

Schlussbericht zum Teilvorhaben
**„Prozessentwicklung FST-Schaumkomponente und
Sandwich-Verbund“**

im Rahmen des Verbundvorhabens
FST-FoamPreg, Förderkennzeichen: 03LB2025A
**„Entwicklung flammgeschützter Monomaterial-Sandwich-Bauteile auf Basis von Prepregs
und nachhaltiger Epoxidharzschäume“**

Dr.-Ing Christian Keun, Dr.-Ing. Simon Kaysser

CompriseTec GmbH
Rödingsmarkt 20
20459 Hamburg

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie mittels einer Zuwendung aus dem Sondervermögen „Energie- und Klimafonds“ gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 03LB2025A
Projektlaufzeit: 01.10.2021 – 31.03.2025

Rechtsverbindliche Unterschrift

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Projekthintergrund und -planung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen	6
1.3	Projektplanung und -ablauf.....	9
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik	11
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	17
2	Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.....	18
2.1	AP 0 – Projektkoordinierung & Dokumentation.....	18
2.2	AP 1 – Definitionsphase & Ökobilanzierung	18
2.3	AP 2 – Prozessentwicklung Schaum	25
2.4	AP 3 – Entwicklung thermisch latenter Prepregs	33
2.5	AP 4 – Verbundentwicklung Sandwichkomponente.....	33
2.6	AP 5 – Realisierungsphase und Upscaling.....	42
3	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	49
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	49
5	Verwertbarkeit des Ergebnisses	50
6	Veränderung des Stands der Technik und relevante Ergebnisse von dritter Seite, welche die Projektverwertung signifikant beeinflussen	52
7	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	52
8	Literatur.....	53

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1 Projekthintergrund und -planung

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens *FST-FoamPreg* wurde durch die Kombination thermisch latenter Prepregs und einer ebenfalls latenten Epoxyschaumformulierung ein neues Materialsystem als ressourcenschonende Alternative zu konventionellen Prepreg-Sandwichbauweisen geschaffen. Es ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, insbesondere im Transportsektor, wo die Kombination von Leichtbau unter Einhaltung von Flammenschutzverordnungen von besonderem Interesse sind. Ein Bezug zu den förderpolitischen Zielen der CO₂-Einsparung ist unmittelbar dadurch gegeben, dass durch Substitution etablierter Systeme mit der in FST-FoamPreg entwickelten Lösung direkt große Mengen CO₂ eingespart werden können – und das sowohl im Betrieb durch das hohe Leichtbaupotenzial sowie auch in der Fertigung und Logistik durch den Wegfall der Tiefkühlung aufgrund bei Raumtemperatur thermisch latenter Systeme und den Wegfall umweltschädlicher chemischer Treibmittel.

Die technische Zielsetzung des Gesamtvorhabens besteht dabei insbesondere aus der Entwicklung eines Herstellprozesses für thermisch latente Epoxidharzschaumhalbzeuge sowie Prepregs und deren Kombination, der dafür entwickelten Materialsysteme in Kombination mit einem Flammschutzkonzept und der Gesamtbewertung im Rahmen einer CO₂-Ökobilanz. Die vier Säulen der Arbeitsziele sind nachfolgend definiert:

- 1) **Entwicklung eines ressourceneffizienten Press-Formgebungsverfahrens zur Herstellung von expandierenden Sandwichbauteilen**
- 2) **Entwicklung eines schnellhärtenden und lagerstabilen ressourceneffizienten Epoxy-Monomaterialsystems**
- 3) **Entwicklung eines Flammschutzkonzepts für Epoxy-Monomaterial-Sandwichbauteile**
- 4) **Entwicklung und Durchführung einer CO₂-Bilanzierung zur ressourcenoptimierten Bauteilherstellung**

Im Rahmen des Vorhabens war es maßgebliche Aufgabe von CompriseTec, ein Fertigungsverfahren zur Formgebung von epoxidharzbasierten Sandwichpaneelen zu entwickeln. Dieses Formgebungsverfahren (out-of-autoclave) kann dabei in zwei getrennten Prozessschritten (1. Expansion und Vernetzung des Schaumkerns 2. Konsolidierung der Decklagen, vgl. Abbildung 1.1) oder einem Fertigungsschritt erfolgen (parallel Expandierung und Vernetzung von Schaumkern und Decklagen, Abbildung 1.2) oder. Insbesondere der letztere Prozessansatz birgt dabei ein hohes Potenzial zur Zeit-, Kosten- und Emissionseinsparung bei isothermer Prozessführung. Jedoch birgt dieser innovative Lösungsansatz auch ein erheblich höheres Entwicklungsrisiko aufgrund der komplexen Prozessparameterzusammenhänge und somit auch Anforderungen an die Halbzeuge sowohl für Decklagen als auch Schaumkern.

Grundsätzlich sollen Sandwichbauteile mit hoher spezifischer Festigkeit nach DIN EN 12663-1 in einem zweistufigen Verfahren hergestellt werden. Zuerst erfolgt das Einfüllen der hochviskosen Epoxidharz-Carbamat-Mischung in eine geschlossene Kavität. Anschließend

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

erfolgt durch Erhitzung die Zersetzung des Treibmittels Carbamat ($>80\text{ }^{\circ}\text{C}$) welches zuvor geblocktes CO_2 abgibt und somit das kompakte Material zum Aufschäumen bringt. Anschließend wird in einem zweiten Schritt das thermisch latente und damit raumtemperaturstabile Prepregsystem auf Ober- und Unterseite eingelegt. Mithilfe der Presse wird das handhabungsfähige flächige Halbzeug gleichzeitig oberflächlich am Werkzeug detailgetreu abgeformt und gehärtet werden.

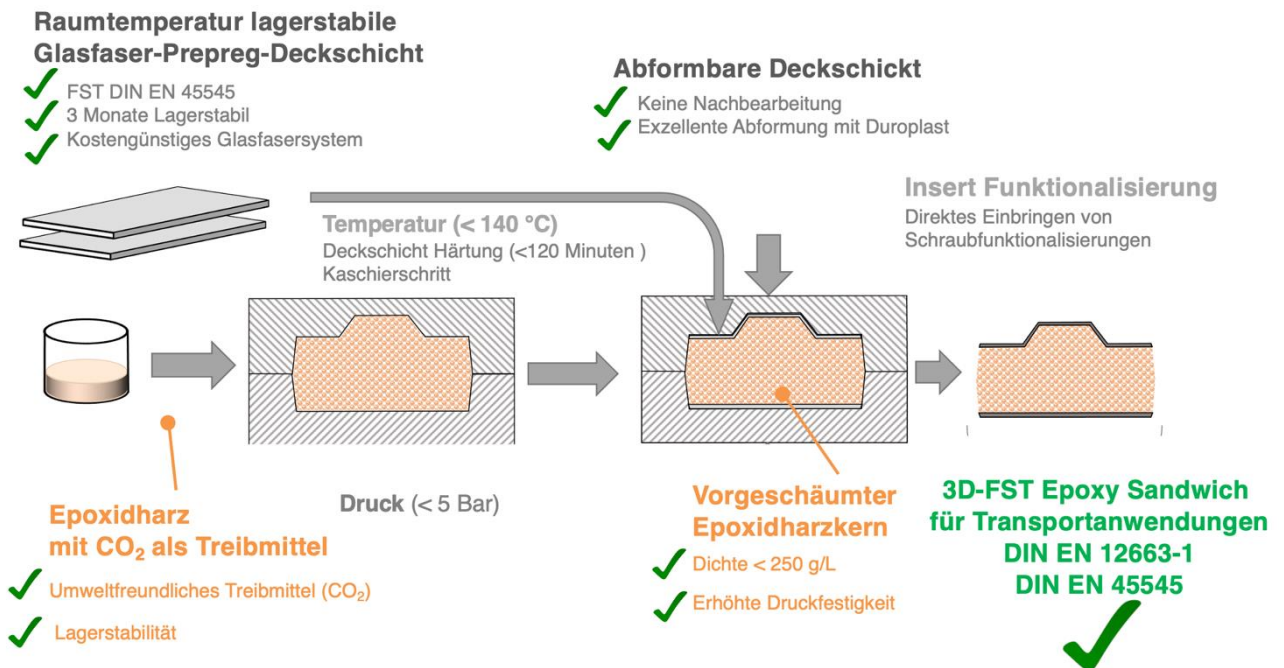


Abbildung 1.1: Technische Arbeitsziele des Projekts "FST-FoamPreg" – Entwicklung eines ressourceneffizienten Press-Formgebungsverfahrens zur Herstellung von in-situ expandierenden Sandwichbauteilen

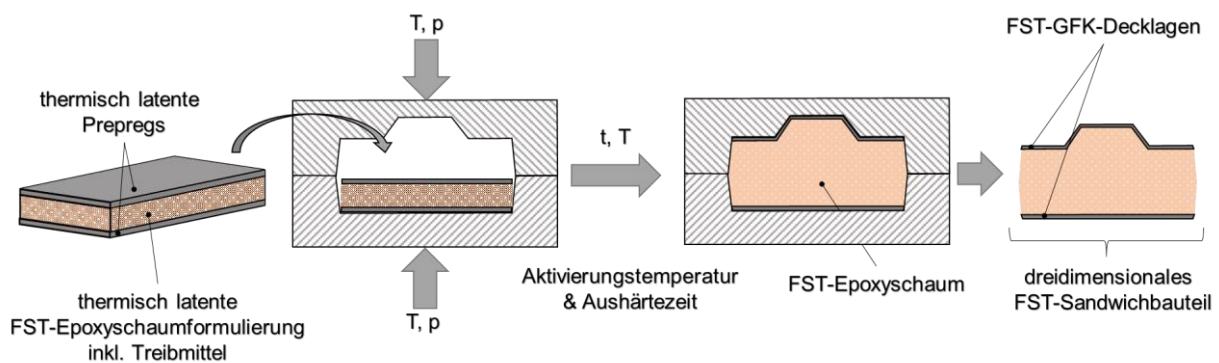


Abbildung 1.2: Alternative Prozessroute in einem Prozessschritt

Zu Beginn des Vorhabens sollte am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth die Synthese der Carbamate technisch weiterentwickelt und vom Labor- auf den Technikums-Maßstab skaliert werden. Dazu sollen auch mit entsprechenden Partnern und Chemieunternehmen in einem Auftrag das Material in Kleinreaktoren synthetisiert werden, um mengenmäßig im späteren Verlauf des Projekts größere Bauteile herstellen zu können.

Der Fokus der Schaumentwicklung liegt darauf, geschlossen-zellige Integralschaumstrukturen mit optimalen mechanischen Eigenschaften bei Dichten von $< 250 \text{ kg/m}^3$ zu erzielen. Dadurch wird das Leichtbaupotenzial bestmöglich ausgenutzt. Die Rolle der genutzten Flammschutzmittel spielt vor allem im Zusammenspiel mit der Schaumzellennukleierung eine Rolle. Der flammhemmende Füllstoff (z.B. Aluminiumtrihydroxid ATH bzw. Ammoniumpolyphosphat APP) wird weiterhin durch seinen geringen Preis das Gesamtsystem kostengünstiger gestalten.

Die Zieleigenschaften der Prepreg-Deckschichten zur Sandwichherstellung wurden mit nachfolgenden Zielen definiert:

1. Raumtemperaturlagerstabilität (Shelf-Life) von mindestens 3 Monaten
2. Realisierbare Zykluszeit < 60 Minuten
3. Härtungstemperatur $< 140 \text{ °C}$
4. Glasübergangstemperatur $> 120 \text{ °C}$

Da bei der Prepreglagerung in der Regel Kühlketten bei -18 °C nötig sind, ist der erste Ansatz zur Ökoeffizienz die Verringerung der Reaktivität bei Raumtemperatur des 1K EP Systems, welches die Fasermaterialien imprägniert. Somit würde sich die Shelf-Life erhöhen, was vor allem durch die Auswahl und das Zusammenspiel von Beschleunigerkomponenten mit dem Härter variiert werden kann. Zudem muss auch die zu erfolgende Aushärtung und Abformung des EP-Prepreg-Harzes auf den EP-Schaumkern miteinander abgestimmt werden.

Die Flammschutzeinstellung erfolgt sowohl über den Schaumkern als auch die Decklagen, wobei bei den meisten Sandwichbauteilen der Schwerpunkt der Flammschutzanforderungen bei den Decklagen liegt. Hier sollen möglichst geltenden Tests in Bezug auf horizontale und vertikale Entflammung in Anlehnung an FAR 25.853 sowie UL94 abgeprüft werden sowie die Charakterisierung von flächigen Proben im Cone Calorimeter (TTI, PHRR als auch die THRR) als Indikation für die Leistungsfähigkeit der entwickelten Materialsysteme in Bezug auf die FAR 25.853 Luftfahrt- sowie DIN EN 45545 Bahnnorm. Die doppelte Ausrüstung mit flammgeschütztem Kernmaterial und Deckschicht auf Basis von EP-Harz stellt eine wesentliche Neuheit dar und ist mit Sandwichkonzepten auf Wabenkernbasis aus dem Stand der Technik nicht zu vergleichen.

Weiterhin gilt die CO_2 -Bilanzierung zur Validierung der Ökoeffizienz von „FST-FoamPreg“ als Hauptziel des Projekts und ist in Abbildung 1.3 exemplarisch dargestellt. Die CO_2 -Einsparung erfolgt dabei durch die Kombination aus effizienter Prozesstechnik, der Vermeidung chemischer Treibmittel und Tiefkühllogistik sowie einem gesteigerten Leichtbaueffekt des Gesamtsystems.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

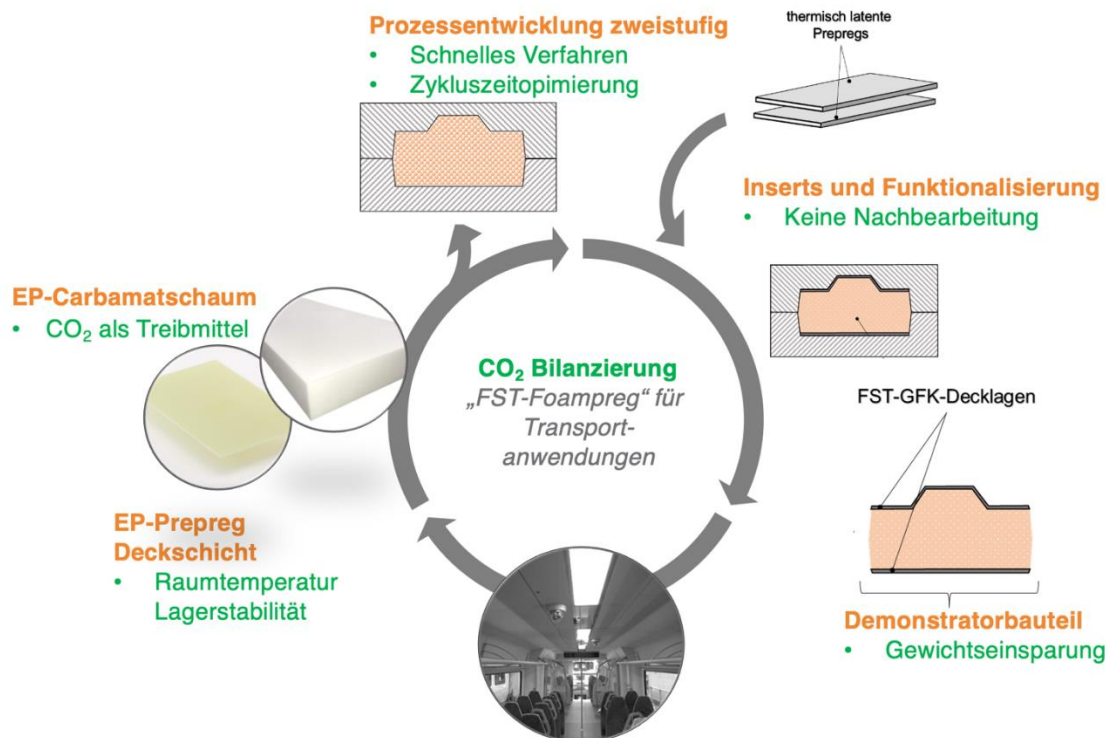


Abbildung 1.3: Technische Arbeitsziele des Projekts "FST-FoamPreg" – Entwicklung und Durchführung einer CO₂-Bilanzierung zur ressourcenoptimierten Bauteilherstellung (Bildquellen: Kinderwelt-strausberg, F3x, Deutsche Bahn)

1.2 Voraussetzungen

Im gesamten Transportsektor, sei es Luftfahrt, Bahnverkehr, Schifffahrt oder teilweise Automotive, gelten strenge Richtlinien für das Brandverhalten (sowie auch z.B. Rauchgasdichte und -toxizität) der Bauteile, insbesondere im Innenraum. In vorangegangenen Projekten haben sich insbesondere die Projektpartner CompriseTec (CT) und der Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe (LPW) auf Anwendungen derartiger Systeme im Luftfahrtbereich beschränkt. Im Rahmen der neuartigen Systementwicklung im Rahmen von FST-FoamPreg sollten die Erkenntnisse und Entwicklungen ebenfalls auf weitere Bereiche des Transportsektors angewendet werden, insbesondere Bahnverkehr und Automotive. Der Zugang zum Bereich Luftfahrt wurde durch CompriseTec (CT) und den assoziierten Partner Lufthansa Technik (LHT) dargestellt. Der Zugang zum Bereich Automotive wurde durch den Projektpartner Euro Advanced Carbon Fiber Composites GmbH (EACC) dargestellt. Der Zugang zum Bereich Bahnverkehr wurde durch bestehende Kontakte zu OEMs in diesem Sektor dargestellt.

Im Vorfeld des Vorhabens wurde bereits eine vereinfachte cradle-to-gate Ökobilanz in Anlehnung an DIN EN ISO 14040/-44 eines 100 x 100 x 1 cm³ großen rechteckigen Sandwichpanels durchgeführt. Dazu wurden die Software SimaPro (Version 9.0.0.30) und die Datenbank Ecoinvent 3 verwendet. Zur Berechnung des Treibhauspotenzials (Global Warming Potential, GWP) wurde die IMPACT2002+ Methode angewendet. In der vergleichenden Analyse eines Aluminium-Honeycomb Sandwichpanels, einem konventionellen chemisch geschäumten Epoxidharzschaum mit Decklagen aus GFK- bzw. CFK-Prepregs und dem im Rahmen von FST-FoamPreg entwickelten Ansatz thermisch latenter GFK-Prepregs und Carbamat-geschäumter

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Epoxidharze ergaben sich Unterschiede im GWP sowohl durch die Tiefkühllogistik als auch den Leichtbaueffekt bei der Produktion durch geringere Materialmengen. Verglichen mit dem Referenzbauteil (Aluminium-Honeycomb) weist das FoamPreg-GFK-Sandwichpanel die mit Abstand günstigste CO₂-Bilanz auf. Hier konnte eine potenzielle Ersparnis von ca. 44,2 kg CO₂-eq/m² motiviert werden. Im Vergleich zum konventionellen Prepreg-Sandwich stellt insbesondere die Tiefkühl Lagerung und -logistik und das verwendete chemische Treibmittel (z.B. Hydrazine oder Carbonsäureamide) einen negativen Einfluss auf das GWP des Referenzbauteils dar. Die zusätzlichen umweltschädlichen Eigenschaften dieser und ähnlicher chemischer Treibmittel abseits des GWP wurden dabei noch nicht berücksichtigt. Verglichen mit einer Al-Honeycomb-Platte oder Phenolharz-GFK-Sandwiches kann über die Produktlebensdauer **zusätzlich** CO₂ durch das im Vergleich niedrigere Bauteilgewicht eingespart werden. Dieser Effekt verbessert zusätzlich die CO₂-Bilanz der *FoamPreg*-Bauteile. Dieser Effekt ist jedoch stark bauteilabhängig und konnte im Vorfeld des Vorhabens nur qualitativ bewertet werden.

Um die zuvor und bereits im Projektantrag motivierten CO₂-Einsparpotenziale und technischen Vorteile der avisierten Entwicklung zu heben, sind umfassende Kompetenzen der Antragssteller erforderlich.

Die 2006 gegründete CompriseTec GmbH ist Spezialist für Kunststoff- und Faserverbundtechnologien. Mit ca. 20 Spezialisten werden Projekte in den Bereichen integrierte Produktentwicklung, Materialentwicklung und Analytik sowie Prozessentwicklung erarbeitet. Im Rahmen zahlreicher Industrieprojekte arbeitet CT dabei direkt für und mit OEMs und 1st-Tier zusammen. In einem neu aufgebauten Kunststofftechnikum werden Prototypen und Kleinserien komplexer Thermoplast-, Elastomer- und Faserverbundbauteile realisiert und produziert. Auch Serienbauteile in kleiner bis mittlerer Stückzahl können so selber produziert werden. Größere Serien werden über verlängerte Werkbänke ausgelagert. Die Kunden sind Technologieführer in der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, im Schiff- und Maschinenbau und in der Medizintechnik.

Die Materialentwicklung des im Rahmen dieses Projektes entwickelten flammgeschützten Epoxidharzschaumes fußt auf der Entwicklung von CT und LPW im gemeinsamen EUROSTARS Projekt „DiaPore“ (FKZ 01QE1816A), in welcher ein Carbamat-Epoxidharz-basiertes Schaumsystem bis ca. TRL 4 entwickelt wurde. Erste Anwendungsversuche mit Decklagen aus flammgeschütztem Glasfaser-SMC wurden ebenfalls durchgeführt. Die erzielten mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu kommerziellen Schäumen können folgender Abbildung 1.4 entnommen werden. Daraus wurde ein großes Entwicklungspotenzial dieser Lösung für die Schaumkomponente abgeleitet und im Wesentlichen das vorliegende Vorhaben motiviert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

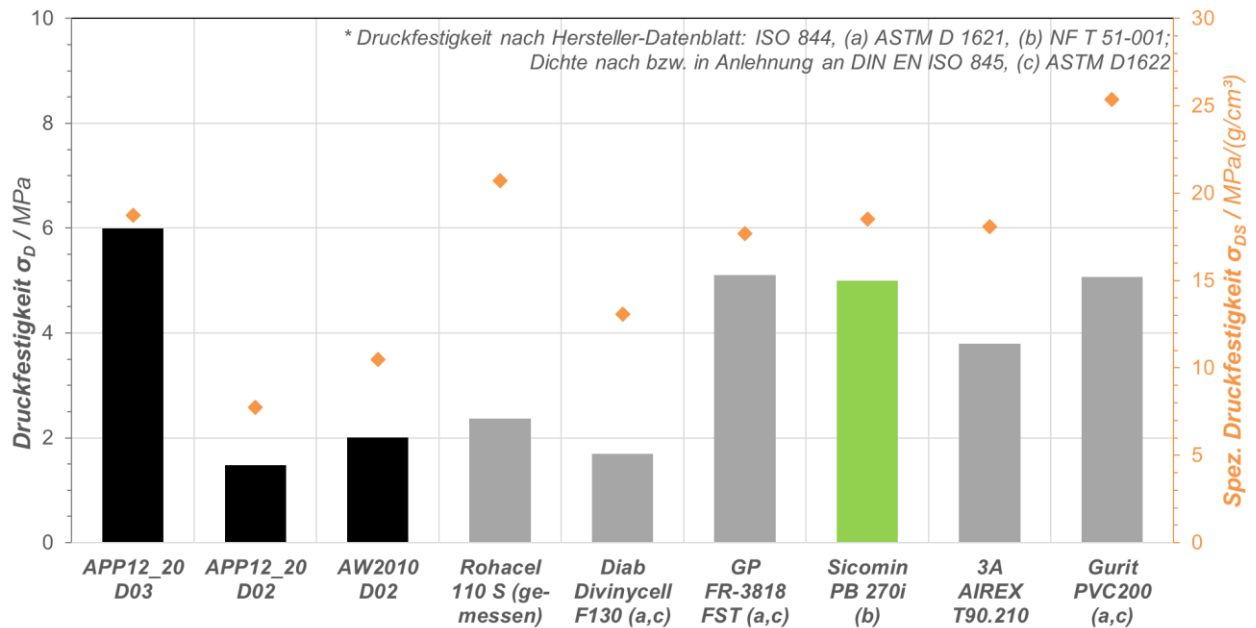


Abbildung 1.4: Vergleich der Druckfestigkeit σ_D sowie der spezifischen Druckfestigkeit σ_{DS} von im Rahmen dieser Arbeit untersuchten (schwarz) sowie am Markt etablierten flammgeschützten Schäumen: grau: als Blockware verfügbar; grün: Schaummasse, [Kay2]. Kennwerte gemäß [Sic], [Dia], [Air], [Gur], [Gen]

Im Rahmen des BMBF Projektes GreenInteriors (FKZ 01LY1302A) entwickelte CT wirtschaftliche Bauteile und Prozesse für flammgeschützte Faserverbundanwendungen, insbesondere aus SMC. Als Produkte aus diesem Projekt, welche bereits der weiteren Verwertung zugeführt werden konnten, entstanden eine Transportbox für den Luftfahrtsektor im Thermoplast-SMC-Hybridbau („Standard Unit“, Finalist JEC World Award 2020) und ein flammgeschützter SMC-Servierwagen für das *First-Class* Segment. Zuvor war CT an der Entwicklung des am Markt etablierten Quantum Lightweight Faserverbund Trolleys (Fa. Norduyn, dem ehemals leichtesten Luftfahrtcatering-Trolley der Welt) beteiligt. Derzeit arbeitet CT auch an Industrieaufträgen im Bereich FVK-Prozess- & Materialentwicklung, insbesondere in den Bereichen SMC und Pultrusion sowie im Bereich nachhaltiger Werkstoffe und Ökobilanzierung von Leichtbauprodukten. CT ist Mitglied des Luftfahrtclusters Hamburg Aviation und in der Forschungsgruppe Internationalisierung und 3D-Druck aktiv. Innerhalb einer Kooperation der deutschen und kanadischen Luftfahrtindustrie arbeitet CT an einem BMBF-geförderten Projekt (COMP-1633), FKZ 03INT504BD zur Material- und Prozessentwicklung für wirtschaftliche flammgeschützte duomere Faserverbundwerkstoffe. SMC-Sandwich Technologie ist ebenfalls Teil dieses Projektes, ebenso die Entwicklung einer neuartigen Prepreg-Imprägnierungstechnologie für Textilzuschnitte. Zudem war CT Teilnehmer des projektbegleitenden Ausschusses des AiF-Projektes „Thermpreg“ (2018-2020 FKZ: 20232 N) der Universität Bayreuth, welches ebenfalls die Kombination der DiaPore-Schaumtechnologie mit thermisch latenten Decklagen motiviert hat.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektpartner ein experimenteller Versuchsplan aufgestellt. Mit dem Meilenstein 1 (Lastenheft und Testkatalog) sollten AP1.1 und 1.2 abgeschlossen werden.

Ziel des AP 1.3 (projektbegleitende Ökobilanzierung, gesamte Projektlaufzeit) war die Abschätzung des ökologischen Impacts des neu entwickelten FST-FoamPreg-Materials bei Verwendung in einem realen Produktdemonstrator. Parallel zum Projekt wurde eine vorläufige Modell-Ökobilanz (cradle-to-gate) erstellt, in welcher noch unklare Prozesse und Materialien mit Platzhaltern gefüllt werden. Neue Projektergebnisse sollten in diese Bilanz iterativ eingearbeitet werden, sodass die o.g. Platzhalter nach und nach durch reale Werte ersetzt werden. Die finale Ökobilanz (cradle-to-grave) erfolgte nach der Identifikation möglicher Demonstratoren über den gesamten Projektzeitraum. (Meilenstein 6)

In AP2 sollte der Epoxidharzschaum entwickelt, die Härtungskinetik bestimmt und in Optimierungsschleifen ein möglichst effizienter Prozess zum Schäumen evaluiert werden, welcher ein optimiertes Endprodukt generiert. Dazu sollten zunächst eine aktualisierte Formulierung und Charakterisierung des Basisschaumsystems anhand voriger Projektergebnisse erfolgen. Vorrangiges Ziel sollte die Reduzierung der Dichte und die Lagerfähigkeit sein bei gleichzeitig optimierten mechanischen Eigenschaften, gleichmäßiger Morphologie und hoher Glasübergangstemperatur und Flammseigenschaften, welche entwicklungsbegleitend anhand einfacher horizontaler bzw. vertikaler Brandtests gemäß UL94 qualifiziert werden sollten. Anschließend sollte die Handlingsfähigkeit als Einkomponentensystem aus Sicht der Verarbeiter überprüft und validiert werden (Transportfähigkeit, Logistik, Lagerung, Handhabung im Verarbeitungsumfeld, Arbeitsschutz). Die Prozessroute und Härterformulierung sollte dahingehend optimiert werden. Anschließend an weitere Schäumversuche sollte die Möglichkeit von Einlegern eingehend untersucht werden (vgl. Schlussbericht LPW). Das AP2 sollten mit dem Meilenstein 2 (Vorläufiger Material-/Prozessfreeze Schaum) abgeschlossen werden.

In AP3 wurden Entwicklungsarbeiten der Partner (federführend hier der LPW) an dem zu dem Schaum kompatiblen latenten Prepregsystem. Zu Beginn wurden die in AP1 ausgewählten Epoxidharzsysteme analysiert und auf deren Lagerstabilität bei Raumtemperatur ohne Vorvernetzung überprüft. Mit der Überführung in ein Prepreg auf Gewebebasis sollte die Verarbeitung erprobt werden. Die entwickelten Materialsysteme sollten auf ihre Tauglichkeit in zukünftigen Anwendungsfeldern durch realitätsnahe Belastungen geprüft werden. Das AP3 sollte abgeschlossen werden durch Meilenstein 3: Validierung Prozessfähigkeit therm. latentes Prepreg.

In AP4 sollte ein Sandwichpaneel als Verbundbauteil hergestellt, somit das gewonnene material- und prozessseitige Know-how experimentell validiert und die Einzelkomponenten sowie deren Zusammenspiel nach Erprobung im Prozess erneut iterierend verbessert werden.

Am Ende von AP4 sollten Testbauteile mit anforderungsgerechten validierten Bauteileigenschaften gemäß Lastenheft (AP1) und applikationsnahen geometrischen Features (Wanddicken, ggf. Wanddickensprüngen, Einlegern, Schrägen und Rippen etc.) stehen. Entsprechende Testwerkzeuge sind dafür vorzusehen und ggf. zu entwickeln. Insbesondere stand seitens CT das Thema der Schaumkomponenten und Decklagen als thermisch latente Halbzeuge im Vordergrund sowie die Entwicklung und Fertigung der Halbzeuge sowie die Validierung der Prozessfähigkeit und der resultierenden Sandwicheigenschaften. Das AP4

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

sollte durch den Meilenstein 4 abgeschlossen werden: Validierung Eigenschaften Sandwich Prepreg Prototyp nach Lastenheft.

Abschließend diene AP5 dem Realisierungsplan und Upscaling anhand spezifischer Anwendungsbeispiele aus min. zwei unterschiedliche Industrien des Transportsektors (z.B. Luftfahrt und Automotive). Ziel des AP5 war die Übertragbarkeit einer Sandwichstruktur aus AP4 auf reelle Bauteilgeometrien, die zusammen mit den Partnern definiert wurden. Im Fokus stehen die Bauteilauslegung sowie die Fertigung und Validierung von Demonstratorbauteilen entsprechend den Anforderungen an Geometrie, mechanischen und FST Eigenschaften. Dabei sollte die Verarbeitung der thermisch latenten Halbzeuge unter Produktionsbedingungen nochmals validiert werden und relevante Prozesskennziffern für die Ökobilanzierung (AP1.3, Meilenstein 6) gesammelt werden. Abgeschlossen werden sollte AP5 durch Meilenstein 5: Validierte Eigenschaften Vorserienprodukte gemäß Lastenheft.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Leichtbau ist heute in nahezu allen Branchen bedeutend. Hervorzuheben sind hier der Fahrzeugbau, der Bahnbereich, und insbesondere die Luft- und Raumfahrt. Eine Verringerung des Fahrzeuggewichts bspw. im Bahnwesen um 20 % kann zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs um 12-14% führen sowie zu einer Erhöhung der Kapazität von Fahrzeugen und zu höheren Beschleunigungs- und Verzögerungsraten, welche kürzere Fahrzeiten und geringere Taktzeiten zur Folge haben können. Hervorzuheben ist, dass unter Lebenszyklusbetrachtungen mehr als 80 Prozent des gesamten Energieeinsatzes während der Nutzungszeit eines Transportfahrzeugs verbraucht werden. Auf Materialproduktion, Fertigung und Recycling/Entsorgung entfallen die restlichen 20 Prozent. Insbesondere die Sandwichbauweise bietet gegenüber monolithischen Strukturen noch zusätzliches Einsparpotential während der Nutzungszeit des Bauteils. Eine Sandwichplatte besteht dabei aus einem inneren Kern, mit geringer Steifigkeit und geringer Dichte, welcher von zwei Außenschichten eingeschlossen ist. Typische Anwendungsbeispiele der Sandwichbauweise aus dem Transportsektor sind in Abbildung 1.6 aufgeführt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

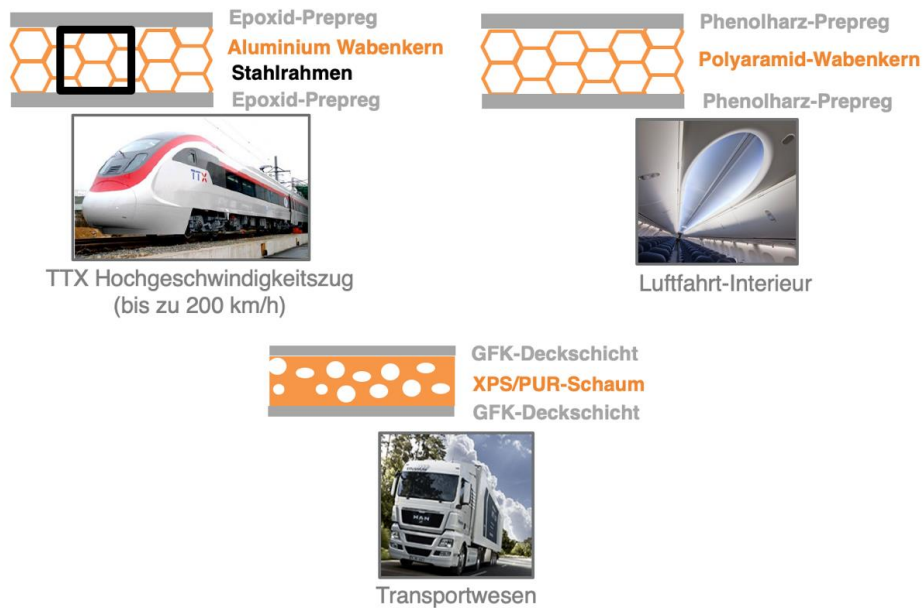


Abbildung 1.6: Anwendungsbeispiele Sandwichstruktur (Bildquellen: Lamilux, Diehl Aviation, [Kan1])

Aktuell kommen im Bahnbereich hauptsächlich Wabenkerne aus Aluminium oder Polymerschäume basierend auf PVC oder PMI/PEI als Sandwichkern zum Einsatz [Wen]. Nachteilig von Aluminiumwabenkern und Stahlrahmen sind jedoch die Korrosionsgefahr, die höheren Dichten aber auch der hohe Preis von bis zu 750 €/m² für die Sandwichsysteme. Weiterhin sind mit Aluminiumwabenkern gekrümmte Strukturen schwierig zu realisieren. Auch der hohe Energieaufwand zur Erzeugung des Aluminiumrohstoffs sowie die Herstellung des Schaums führt zu einer mäßigen Energiebilanz. Für PMI/PEI-Schäume ist der intrinsische Flammenschutz ein großer Vorteil, nachteilig sind jedoch der hohe Preis und die toxikologisch bedenklichen Monomere wie Acrylnitril sowie die zum Einsatz kommenden wenig umweltfreundlichen Treibmittel. Epoxidharzschäume könnten dabei ähnliche Festigkeitswerte bei deutlich niedrigerem Preisniveau und besserer Umweltbilanz erzielen. Ein Schwachpunkt ist für diese Systeme jedoch der Flammenschutz wobei insbesondere im Bahnwesen mit der Norm DIN EN45545 sehr hohe Anforderungen erfüllt werden müssen. Auch bei Anwendungen im Luftfahrtbereich, insbesondere im Interieur, müssen ebenso strenge FST-Richtlinien (gemäß FAR 25.853) erfüllt werden.

Der Sandwichkern dient vor allem dazu, Schubbelastungen widerstehen zu können sowie bei geringer Dichte ein hohes Flächenträgheitsmoment ohne signifikante Gewichtserhöhung zu gewährleisten. Aktuell kommen hierbei hauptsächlich Honeycomb-Strukturen auf Aluminium- (z.B. Bahnsektor) oder Aramidbasis (z.B. Luftfahrtinterior) oder PVC/PMI-Schäume zum Einsatz. Epoxidharzschäume können mit ihren spezifischen Kennwerten bei relativ geringen Kosten hier als Alternative für viele Anwendungen gesehen werden (siehe Abbildung 1.7). Diese sind bisher jedoch noch wenig am Markt vertreten, was auf ein komplexes Schäumverhalten und dessen Prozessführung zurückzuführen ist. Weiterhin unterliegen die bisher verwendeten chemischen Treibmittel einer zunehmenden Regulierung (SNAP in Amerika oder REACH in der EU), da diese als eine Gefahr für Mensch und/oder Umwelt eingestuft werden. Als alternatives, ökologisch unbedenkliches Treibmittel können dabei Carbamate betrachtet werden. Hierzu werden ausgesuchte Aminverbindungen mit CO₂ aus der Atmosphäre geblockt, welches im Schäumprozess gezielt wieder abgegeben kann und so als Treibmittel fungiert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

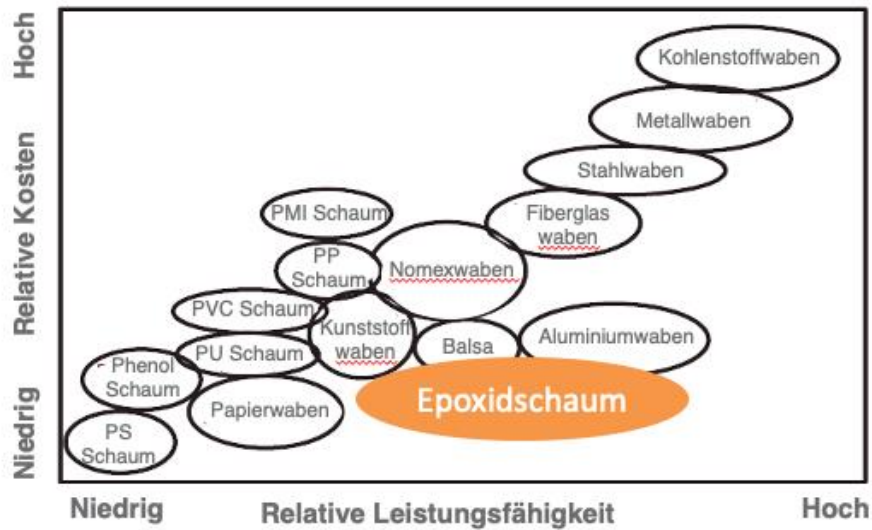


Abbildung 1.7: Polymerschäume in Abhängigkeit von Performance und Kosten [Grü]

Technisch sind Carbamate auf Basis von Aminhärttern seit den 1960iger Jahren bekannt. Eine vereinfachte Verarbeitung aufgrund der Latenz der Systeme wurde bereits damals erkannt und ein breites mögliches Anwendungsfeld beschrieben [Pat1][Pat2][Pat3]. Die aktuellen Anwendungen liegen hauptsächlich im Bereich von Spezialklebstoffen [Pat4]. Die breite Verfügbarkeit anderer, vergleichsweise günstigerer und technisch einfacher darstellbarer Treibmittel hat die Anwendung von Carbamaten bisher in den Hintergrund gestellt. In 2015 hat die Arbeitsgruppe von Ren *et. al.* grundlegende Forschungen zu Carbamaten veröffentlicht, die eine Umsetzbarkeit von aktuell relevanten Härtersystemen wie N-Aminoethylpiperazin (AEP), m-Xylendiamin (mXDA), 4-4'-Diaminodicyclohexylmethan (DDCM), 3-(diethylamino)propylamin (DEAPA) und 4, 4'-diaminodiphenylmethane (DDM) zu Carbamaten beleuchten [Ren1] [Ren2]. Demnach sind primäre aliphatische Amine am besten für eine Umsetzung zu Carbamaten geeignet. Eine Studie von Bethke *et. al.* hat die Anwendung des AEP-Carbamats (B-AEP) auf unterschiedliche Harzsysteme, sowie den resultierenden Einfluss der Rheologie aufgezeigt [Bet1]. Dabei kann eine Kombination aus Amin und Carbamat genutzt werden, um eine verbesserte Integralschaumstruktur zu erzeugen. Eine Studie von Kaysser *et. al.* hat eine praktische Umsetzung des Schäumens mit Isophorondiamin-Carbamaten (B-IPDA) und Flammschutzmittel für Epoxid-Schäume aufgezeigt [Kay].

Es wurde gezeigt, dass die Morphologie durch Vorvernetzung - ermöglicht durch die Kombination aus Amin und Carbamat - beeinflusst und damit neben der Dichte ein weiterer Einflussfaktor auf die mechanischen Eigenschaften besteht. Eine erste Verbesserung der FST Eigenschaften konnte durch den Einsatz verschiedener Flammschutzadditive aufgezeigt werden [Kay]. Eine weitere Studie von Bethke *et. al.* beschreibt die Synthese weiterer Carbamate aus den technisch relevanten Aminen IPDA und 1,4-Diaminomethylcyclohexan (DMC). Hierbei liegt der Fokus auf dem Einfluss von der Zersetzungskinetik auf die duale Funktion als Treibmittel und Härter [Bet2]. Unterschiedliche Zersetzungstemperaturen der Carbamate sowie die unterschiedliche Reaktionskinetik der freigesetzten Amine benötigen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

einen optimierten Verarbeitungsprozess hinsichtlich der Temperaturen, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Die Ergebnisse zur Untersuchung der Synthese zeigen, dass bei einem Scale-Up die entstehende Abwärme durch die exotherme Reaktion berücksichtigt werden muss. Auch sind Parameter wie CO₂ Durchfluss und Sedimentation zu berücksichtigen [Pat1][Pat3][Bet2]. Aktuell in der Literatur vertretende Ansätze der Carbamatsynthese arbeiten hauptsächlich mit der Fällung aus Ethanol [Ren1][Ren2][Bet1][Bet2].

Im Bereich des Flammsschutzes sind kaum Veröffentlichungen im direkten Bezug zu Epoxidharz-Schäumen zu finden. Es sind von diversen Herstellern kommerzielle flammgeschützte Epoxidharz-Schäume verfügbar, beispielsweise Produkte von Sicomin, Resoltec, Altroprol und Gurit. In der Regel werden hier gängige Flammenschutzmittel für kompakte Epoxidharze eingesetzt, die letztendlich auch in der Schaumstruktur ihre Wirkung entfalten. Für Thermoplaste wurde dabei bereits gezeigt, dass in Schaumstrukturen eine Gasphasenaktivität von Vorteil sein kann [Bet3]. Die in der Vergangenheit verbreitet eingesetzten halogenierten FSM sind daher sehr wirkungsvoll. Die Persistenz und Bio-Akkumulation, sowie im Brandfall freigesetzte, hoch toxische, Rauchgase führen vermehrt zu Einschränkungen und Verboten und sind für den Transportsektor nicht praktikabel. Dies bestärkt die Forschungen an alternativen FSM-Systemen [Bet3][Liu]. Aktuelle Forschungen konzentrieren sich auf Phosphor- oder Kohlenstoff-basierte Flammenschutzmittel sowie Silizium- und Metalloxid-Compounds. Durch gezielte Untersuchungen auf synergetische Effekte verschiedener FSM-Systeme, sowie feinere Verteilung in Form von Nano-Additiven kann eine Reduzierung des FSM-Gehalts im System erreicht werden [Liu]. Diese Trends sind auch für die Herstellung von Epoxidharz-Schäumen von Vorteil, um den Einfluss der FSM auf den Schäumprozess zu minimieren. In einer Studie von Kaysser *et. al.* wird der Einfluss der gängigen Flammenschutzmittel Aluminiumtrihydroxid (ATH) und Dihydro-oxaphosphaphenanthren (DOPO), sowie deren Kombination auf die Eigenschaften des Epoxid-Schaums untersucht [Kay]. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Kombination der beiden Flammenschutzmittel zum besten Kompromiss aus FST-Eigenschaften, Morphologie und Dichte, sowie den resultierenden mechanischen Eigenschaften führt [Kay].

Die verarbeitbaren Schaummassen liegen dabei stets als hochviskose Pasten vor, welche gleichmäßig händisch in der jeweiligen Kavität verteilt werden müssen. Dies stellt ein signifikantes Hemmnis für die effiziente Bauteilproduktion dar und ist einer der wesentlichen Aspekte, welcher im Rahmen des Vorhabens FST-FoamPreg verbessert werden soll.

Eine gezielte Anpassung der Flammschutzformulierung für die Anwendung in Sandwich-Systemen durch Optimierung und Abstimmung von Kern- und Deckschicht ist dabei ebenfalls von hoher Relevanz, wie eine weitere Studie von Bethke *et. al.* zeigt [Bet4]. Schaumkerne mit überwiegend Gasphasen aktiven FSM - im Fall der Studie ein halogeniertes FSM 1,2-bis(tetrabromophthalimido)ethan und ein phosphorhaltiges FSM Pentaerythritol-spirobis(methylphosphonate) - zeigten die besten FST-Gesamteigenschaften im Komposit [Bet4].

Die Deckschichten sind maßgeblich für die Festigkeit und Steifigkeit der Sandwichkonstruktion verantwortlich. Als Deckschichten für Sandwich-Systeme kommen zurzeit eine Vielzahl an unterschiedlichen Materialien wie Titan, Aluminium, Spanplatten aber auch faserverstärkten Polymere zum Einsatz. Von letzteren werden dabei oft sogenannte Prepregs (**preimpregnated**), also vorimprägnierte Halbzeuge verwendet. Diese sind für die Herstellung von flächigen Bauteilen besonders vorteilhaft, da eine hohe Handhabungsflexibilität der Werkstoffe möglich

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ist. Zur Herstellung werden Kohlenstoff -oder Glasfasern unidirektional oder Textilien, wie vernähte Gelege oder Gewebe herangezogen. Sie werden mit einem duroplastischen Matrixsystem mithilfe eines Rakelsystems imprägniert, welches in einem separaten zweiten Schritt bei der Formgebung ausgehärtet wird. Die Lagerung der imprägnierten Halbzeuge findet aufgrund der Reaktivität der Harze bei -18 °C statt, um eine Vorhärtung zu verhindern. Ohne die Lagerung bei derart niedrigen Temperaturen würde der mögliche Verarbeitungszeitraum (*Shelf-Life*) von Wochen bis Monate auf Tage herabsinken. Jedoch stellt die Tiefkühllogistik und -lagerung einen signifikanten Faktor für Kosten und Umwelteinfluss der Prepregs dar.

Grundsätzlich sind verschiedene duroplastische Matrixmaterialien für den Faserkunststoffverbund wie Phenolharze, Cyanatester, Bismaleimide oder Epoxidharze verwendet [Len]. Letztere zählen aufgrund ihrer einstellbaren Prozessierbarkeit, mechanischen Eigenschaften und deren Preiseffizienz (durchschnittlich 3-10 €/kg) zur den mengenmäßig am häufigsten eingesetzten Matrixsystemen.

Das Flammschutzkonzept der Deckschicht trägt den wesentlichen Teil zu den finalen Brandschutzeigenschaften des Bauteils bei, da hier der erste Kontakt mit einer Flamme oder einer Hitzequelle auftritt, die zur Entzündung des Gesamtsystems beiträgt. Zurzeit werden als Decklagen im Luftfahrtbereich vorwiegend intrinsisch-flammgeschützte Glasfaser-Phenolharz-Prepregs genutzt, welche einen Aramidfaser-Wabenkern umschließen. Nachteilig sind bei diesen Werkstoffen vor allem die Toxizität der Phenolharze, Ausgasung im Bauteil und der späteren Anwendung und Verarbeitungsproblematiken. Die Toxizität der Materialien, welche bei der Verarbeitung auch erhebliche Restriktionen mit sich bringt, ist auf freies Formaldehyd zurückzuführen. Dieses ist als karzinogen einzustufen und gast in erheblichem Maße bei der Verarbeitung aus. Auch ein Ausdampfen im Bereich von wenigen ppm Restformaldehyd aus den Bauteilen wurde in der Innenkabine und Leitungssystemen oder Hatracks

Alternativen bieten hier epoxidharzbasierte Deckschichten. Diese werden vor allem in strukturellen Bauteilen in nahezu allen Industriesparten eingesetzt und finden abhängig von deren Viskosität durch viele verschiedene Verarbeitungsrouten Anwendung. Da Epoxidharze als lösemittel- und nebenproduktfreie Reaktionsharze nicht inhärent flammgeschützt sind, müssen Flammschutzmittel zugesetzt werden. Daher wurden in Arbeiten des LPW auf Basis von anorganischen Additiven die Eigenschaften in hochviskosen Epoxy-Novolak-Harzen untersucht. Es wurden entsprechende flammhemmende Eigenschaften erzielt, jedoch waren teils sehr hohe Füllstoffgehalte nötig, um die nötigen Brandschutznormen zu erreichen, was letztendlich das mechanische Eigenschaftsprofil zum Negativen verändert hat. [Neu 1] [Neu2] [Neu 3].

Des Weiteren sind Beschichtungen der Decklagen aus FKV über Gelcoats mit einem Zusatz von Flammschutzmittel auf phosphor- oder anorganischen Hydroxiden eine Möglichkeit umgeltende Brandschutznormen zu erreichen. Diese Beschichtungen werden jedoch nach dem Herstellungsschritt auf die Oberfläche aufgetragen und stellen dadurch auch einen zusätzlichen Arbeitsschritt bei der Applikation und einen Kostennachteil zum avisierten Verfahren und Flammschutzkonzept dar.

Ein großer Nachteil von Sandwichelementen ist die geringe Belastbarkeit bei lokal konzentrierter Beladung durch die oft nur punktuelle und nicht flächige Verbindung wie dies bei den gängigen Fügeverfahren wie Schweißen, Kleben oder Nieten der Fall ist. Dies ist erforderlich, um eine

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbindung mit anderen Bauelementen wie bspw. Metallbauteilen zu erreichen. Die erforderlichen lokalen Verstärkungen führen jedoch zu komplizierten Spannungszuständen und erschweren die Bauteilauslegung. Daher werden metallische Kraftlasteinleitungselemente verwendet (*inserts*), welche die Kräfte großflächig in den Kern und in die Deckschichten einleiten. Hier ist jedoch die zeit- und kostenintensive Bearbeitung zu nennen, da die Inserts nachträglich in das vorgefertigte Bauteil eingefügt werden. Hier werden oft in einem separaten Arbeitsschritt Löcher gebohrt, danach Verbindungselemente hinzugefügt und mit einer Vergussmasse gefüllt, um eine Verbindung zwischen Schaum und Einleger zu gewährleisten. Durch die zahlreichen Arbeitsschritte und unterschiedlichen Insert-Formen und -Techniken erhöht sich die Anzahl an potentiellen Fehlerquellen. Daher ist eine Vielzahl an Richtlinien und Normierungen für die richtige Präparation, wie z.B. der von der europäischen Raumfahrtagentur ESA herausgegebene Leitfaden „Insert Design Handbook“, verfügbar [Wil]. Eine Kombination aus stoff- und formschlüssigen Verbindungen stellt das Aus- und Umschäumen von Inserts dar [Sch]. Es kann in einen Schritt erfolgen und zur Integralbauweise gezählt werden, wobei viele Funktionen zur Reduzierung der Einzelkomponenten und Fertigungsschritte in einem Bauteil integriert werden.

Es kann zusammengefasst werden, dass die meisten nach aktuellem Stand der Technik verwendeten Sandwichsysteme signifikante Nachteile aufweisen, sei es in Bezug auf Umweltauswirkung oder Arbeitsschutz (z.B. Phenolharzdecklagen), Flammenschutz und mechanische Eigenschaften oder ihre Kosten. Carbamat-geschäumte Epoxidharze sowie flammenschutzmodifizierte thermisch latente Epoxidharz-Prepregs als Decklagen bieten ein hohes Potenzial. Es besteht jedoch noch signifikanter Entwicklungsbedarf bei der industriellen Prozessfähigkeit und Dichte (Schaum) und Flammschutz- und Härterformulierung (Decklagen).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Gesamtvorhabens „FST-FoamPreg“ fungierte CT als Verbundführer und war als solcher maßgeblich für die vorhabensübergreifende Koordination der Partner verantwortlich. Zudem bildet CT die primäre Schnittstelle zum Projektträger.

CT war im Rahmen seines Teilvorhabens technologisch vorwiegend für die Entwicklung und Realisierung der Schaumkomponente verantwortlich, übernahm maßgeblich die Verbundentwicklung und -realisierung hin zu Sandwichbauteilen und seriennahen Demonstratoren und unterstützte bei der Entwicklung der Prepregs. Zudem war CT verantwortlich für die Definitionsphase und Ökobilanzierung – und somit der Überwachung der Einhaltung der CO₂-Einsparungsziele als vorrangiges förderpolitisches Ziel.

Die Aktivitäten des Lehrstuhls für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth (LPW) lagen hauptsächlich im Bereich der Werkstoffentwicklung und -optimierung der Schaum- und Prepregkomponenten, der Material- und Bauteilanalyse, der Probenfertigung sowie der Fertigung von Prepregs. Zudem war der LPW für die wissenschaftliche Dissemination der Ergebnisse verantwortlich.

Euro Advanced Carbon Fiber Composites GmbH (EACC) war maßgeblich für die Einhaltung von Richtlinien, prozess- und marktbedingten Anforderungen verantwortlich. Im Laufe des Projektes arbeitete EACC an allen neuralgischen Entwicklungsschnittstellen mit und stellte sicher, dass die Anforderungen industrieller Produktionsabläufe berücksichtigt werden um eine anschließende Industrialisierung der Projektergebnisse zu ermöglichen. Die Aktivitäten von EACC konzentrierte sich somit insbesondere auf die Realisierungsphase und Upscaling (AP5). EACC besitzt als ISO 9001 zertifizierter Lieferant einen direkten Marktzugang zum Segment Automotive.

Lufthansa Technik (LHT) als assoziierter Partner aus dem Luftfahrtbereich unterstützte das Projekt mit Demonstratorbauteilen und Spezifikationen an Material, Halbzeug und Bauteil. Durch die Beteiligung von LHT im Rahmen des Vorhabens können bereits frühzeitig Anforderungen potenzieller späterer Kunden im Marktsegment Luftfahrt berücksichtigt werden. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden seitens CT und LPW weitere Gespräche bzgl. möglicher Demonstratoranwendungen mit Diehl Aviation Laupheim GmbH geführt, welche schließlich auch die Luftfahrt-Demonstratoranwendung bereitgestellt haben

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

2 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Arbeitsfortschritte bzw. wissenschaftlich-technischen Ergebnisse, aufgeteilt nach zugeordnetem Hauptarbeitspaket, aufgeführt.

2.1 AP 0 – Projektkoordinierung & Dokumentation

Unter Koordinierung von CompriseTec (CT) fand das Kickoffmeeting unter Einbeziehung des PTJ am 8.11.2021 in den Räumlichkeiten von CT in Präsenz aller Projektpartner in Hamburg statt. Am 9.11.2021 fand – ebenfalls in Präsenz – bereits das Kickoffmeeting mit dem assoziierten Partner Lufthansa Technik (LHT) in der Lufthansa Basis Hamburg statt. Seitens der Projektpartner wurden die Arbeitsinhalte und geplante Vorgehensweise bei der Entwicklung erläutert. Seitens LHT wurden mögliche Demonstratorbauteile und Anforderungen präsentiert (sh. AP1). Mit dem assoziierten Partner Alstom fand ein Kickoffmeeting via Webkonferenz im November statt. Zur weiteren operativen Kommunikation wurde ein zweiwöchiges Regelmeeting via Webmeeting eingeführt sowie eine Datenaustauschplattform etabliert. Die weiteren Projekttreffen sind im Folgenden zusammengefasst:

- Dezember 2022, zweitägiges Projekttreffen in Bayreuth
- Februar 2023, operative Projekttreffen von CT und LPW in Bayreuth
- August 2023, zweitägiges Projekttreffen bei EACC in Esslingen
- November 2023, operatives Projekttreffen von CT und LPW in Bayreuth
- August 2024, zweitägiges Projekttreffen bei CT in Hamburg
- Abschlussmeeting 2025 in Planung

2.2 AP 1 – Definitionsphase & Ökobilanzierung

Beim Kickoff Termin bei LHT vor Ort, konnten bereits diverse Baugruppen und Komponenten gesichtet werden, welche potenzielle Anwendungsfälle für die FST-FoamPreg-Technologie darstellen können. Hier besteht konkreter Bedarf für Werkstoff-technische Lösungen im Bereich des Sandwichkomponenten seitens LHT. Es konnten dabei zwei Anwendungsfälle identifiziert werden. Ein Anwendungsfall weist komplexe mechanische und physikalische Anforderungen auf, wird als 3D-Bauteil in gefertigt als mehrlagiges Sandwich. FST-Eigenschaften sind bei diesem Bauteil nicht gefordert. Im Bereich von Bauteilen mit FST-Anforderungen wird über ein Ersatzteil aus dem MRO-Bereich der Flugzeugkabine diskutiert. Vor allem ein Anwendungsfall (3D-Bauteil als mehrlagiges Sandwich mit vielfältigen Anforderungen) wurde anschließend präzisiert. Es konnte ein entsprechendes Lastenheft, angelehnt an die „Specs“, welche bei LHT zur Beschaffung derartigen Sandwich-Decklagen (Prepregs) und Schäume, definiert werden. Die gestellten Anforderungen sind dabei angelehnt an eine luffahrtsspezifische Spezifikation (Schäume, vgl. Erfolgskontrollbericht) sowie (Prepreg) an eine LHT-interne Spezifikation. Die Anforderungen an die Schäume sind auf unterschiedliche Dichteklassen bezogen. Diese stellen eine erste Orientierung für die technischen Anforderungen der Schaumkomponente dar, sind jedoch mit Epoxidharz-basierten System nur schwierig zu erzielen – insbesondere vor dem Hintergrund der sehr geringen Dichte. Daher werden auch weitere mögliche Applikationen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

beleuchtet mit geringeren Anforderungen im Hinblick auf die dichtespezifischen mechanischen und thermischen Eigenschaften.

Initiiert durch einen Kontakt durch den Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth, wurde eine weitere mögliche Anwendung im Luftfahrtsektor bei Diehl Aviation identifiziert. Es handelt sich um die mögliche Substitution eines bereits als reaktive Epoxyschaumlösung umgesetzten Komponente für die Bauteilherstellung und die Reparatur von Sandwich-Bauteilen (z.B. von Ceiling Panels): einen sog. Splicer. Vorteilhaft aus Sicht des Konsortiums ist insbesondere, dass bereits mit den erfolgreich umgesetzten Dichtebereichen die Schaumkomponente von FST-FoamPreg eine attraktive Lösung bieten kann. Die mögliche Anwendung umfasst primär die Materialentwicklung des Schaums, ggf. in Kombination mit entsprechenden thermisch latenten Decklagen. Für die Demonstratorfertigung in AP5 wurde ein Formwerkzeug seitens Diehl gestellt. Zusätzlich fanden mehrere Gespräche seitens CompriseTec (CT) mit Airbus für mögliche Applikationen im Aircraft Interior Bereich statt. Diese führten bislang jedoch noch zu keiner konkreten Anwendung.

Zusammen mit dem Projektpartner EACC wurden weitere potenzielle Anwendungen im Bereich der Automotive-Industrie und deren Anforderungen (insbesondere auch Prozess-seitig) diskutiert. Hier kann die im Rahmen des Projektes FoamPreg entwickelte Lösung insbesondere Stärken im Bereich der freischäumbaren Kerengeometrien und eine effiziente Fertigung von Sandwichkomponenten mit komplexer dreidimensionaler Geometrie ausspielen. Es konnte ein entsprechendes Bauteil seitens EACC definiert werden. Für weitere Details sei an dieser Stelle auf die Berichte der Projektpartner (v.a. EACC) verwiesen. Eine Demonstratoranwendung im Bahnbereich konnte vorerst nicht identifiziert werden.

Ökobilanzierung (AP 1.3)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der finalen Ökobilanzierung im Projekt FST-FoamPreg anhand der avisierten Demonstratorapplikationen dargestellt. Dabei wird im vorliegenden Schlussbericht eine teilweise anonymisierte Variante dargestellt mit einer Konzentration auf der Ergebnisse. Für die vollständige Dokumentation der Ökobilanzierung sei an dieser Stelle auf den Erfolgskontrollbericht verwiesen.

FST-FoamPreg Splicer in Sandwichbauteilen

Ziel und Umfang der Studie

Im Rahmen der vorliegenden vergleichenden Ökobilanzstudie wurde ein von Diehl bereitgestelltes Panel mit unterschiedlichen Materialkonfigurationen analysiert. Dabei wurde der im ursprünglichen Panel eingesetzte Schaum der sogenannten Splicer durch ein im Projekt neu entwickeltes Schaummaterial ersetzt. Anschließend erfolgte ein Vergleich der beiden Varianten.

Die Untersuchung konzentrierte sich auf die Umweltauswirkungen der Produktionsphase im Sinne einer Cradle-to-Gate-Betrachtung. Die Ökobilanzierung wurde mit der Software SimaPro (Version 10.2.0.0) durchgeführt. Dabei kamen sowohl standardisierte Prozessdaten aus der Ecoinvent-Datenbank (Version 3.11) als auch projektspezifisch erhobene Primärdaten zum Einsatz.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Sachbilanz – Materialien

Das neu entwickelte flammgeschützte Schaummaterial basiert auf einem Epoxidharz mit verschiedenen Härtern, Additiven und Füllstoffen. Zum besseren Verständnis der Varianten sei an dieser Stelle auf AP5 (Abschnitt 2.6) verwiesen.

Herstellung

Für alle Herstellungsprozesse wurden Primärdaten bezüglich Stroms und Wärme verwendet.

Wirkungsabschätzung - Cradle-To-Gate

Als Berechnungsmethode zur Bestimmung der Umweltindikatoren wurde Environmental Footprint 3.1 (adapted) V1.03 verwendet. Es ist eine etablierte Methode, besonders im europäischen Raum um die Umweltindikatoren zu berechnen.

In Abbildung 2.1 sind die Umweltindikatoren des derzeitigen Panels mit den Indikatoren des im Projekt hergestellten Panels nebeneinander dargestellt. Die absoluten Werte der Umweltindikatoren finden sich in Tabelle 2.1. Es ist zu erkennen, dass die Variante mit den FoamPreg Schaum über alle Indikatoren eine bessere Umweltbilanz aufweist. Für den Indikator Klimawandel ist die neue Variante mit 3,93 kg CO₂eq um 8 % geringer als den Stand der Technik mit 4,26 kg CO₂eq. Allgemein fallen die Unterschiede bei fast allen Kategorien gering aus, da den größten Anteil der Emission die Aramidpapier-Wabenstruktur hat (siehe Netzwerk Abbildung 2.2). Der Indikator „land use“ wurde bei dieser Modellierung nicht betrachtet, da der verwendete Datenbankprozess für Aramidfaser einen bekannten Fehler aufweist.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

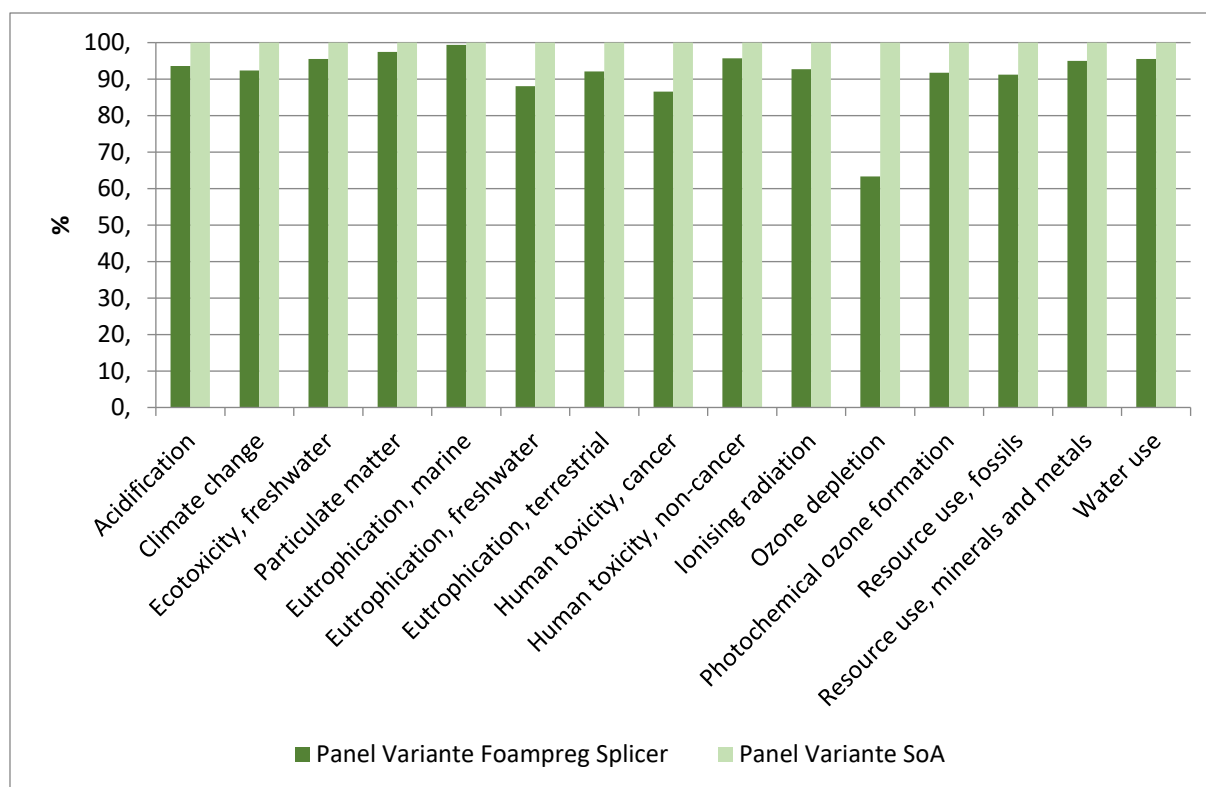


Abbildung 2.1: Umweltindikatoren Ceiling Panel SoA vs. FST-FoamPreg

Tabelle 2.1: Ergebnisse Ökobilanzierung Ceiling Panel Wirkungsindikatoren SoA vs. FoamPreg Splicer

Damage category	Unit	Panel Variante Foamreg Splicer	Panel Variante SoA
Acidification	mol H+ eq	0,01	0,01
Climate change	kg CO ₂ eq	3,93	4,26
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	128,48	134,55
Particulate matter	disease inc.	3,34E-07	3,43E-07
Eutrophication, marine	kg N eq	0,04	0,04
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,56E-03	1,77E-03
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	0,03	0,03
Human toxicity, cancer	CTUh	2,74E-09	3,17E-09
Human toxicity, non-cancer	CTUh	5,38E-08	5,62E-08
Ionising radiation	kBq U-235 eq	0,56	0,61
Land use	Pt	0,51	1,17
Ozone depletion	kg CFC11 eq	4,31E-08	6,81E-08
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	0,01	0,01
Resource use, fossils	MJ	59,04	64,71
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	3,61E-05	3,80E-05
Water use	m ³ depriv.	1,21	1,27

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

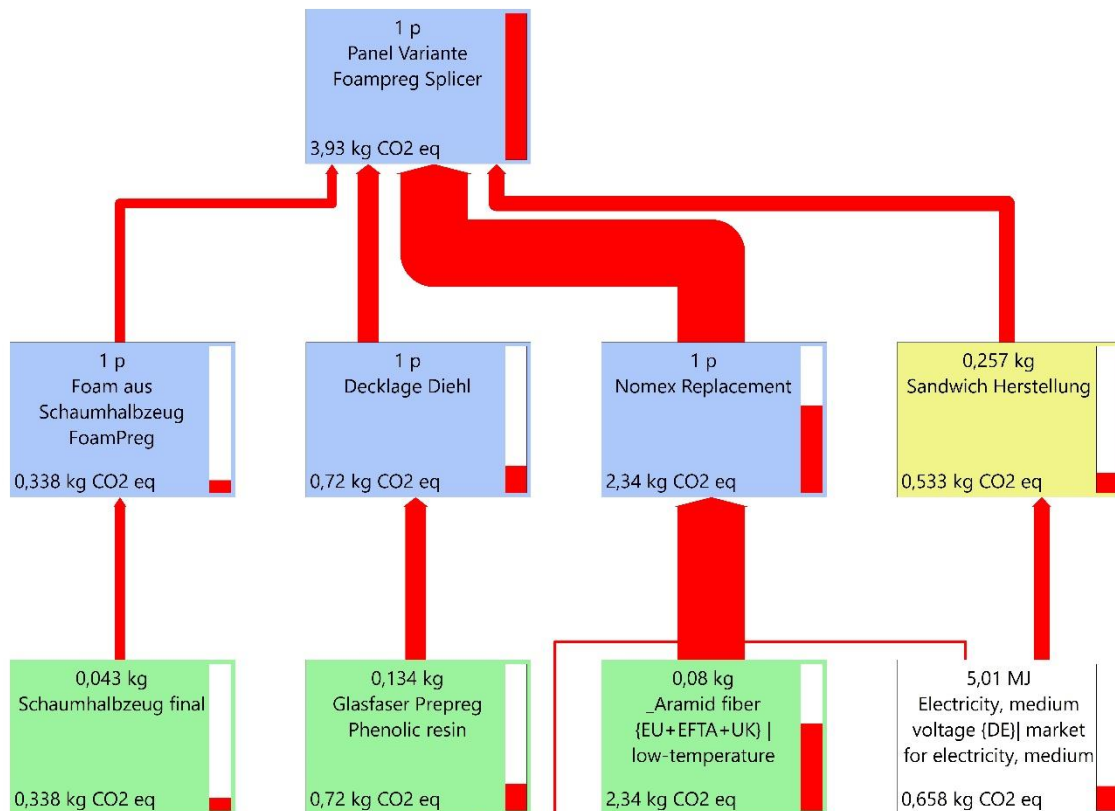


Abbildung 2.2: Netzwerkstruktur Ökobilanzierung Ceiling Panel FoamPreg Splicer

Fazit zur Ökobilanz

Im *Cradle-to-Gate* Vergleich schneidet das Panel mit dem neu entwickelten Schaummaterial über alle Umweltindikatoren besser ab. Dabei ist noch nicht einmal die Nutzungsphase betrachtet in welcher das geringere Gewicht den Treibstoffverbrauch und damit auch die Umweltauswirkung weiter reduzieren kann.

Folgende Tabelle 2.2 gibt eine grobe Einschätzung über das CO₂-Einsparpotenzial in der Herstellung und Nutzungsphase von Ceiling Panels unter Verwendung der FST-FoamPreg Schaum- und Prepregkomponenten wieder.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Tabelle 2.2: Übersicht über mögliche Anzahl CO₂-Einsparungen sowie Energieeinsparung (cradle-to.gate) sowie CO₂-Einsparungen durch Leichtbaueffekte in der Nutzungsphase (*Angenommenes Marktszenario, orientiert an verkauften Airbus-Flugzeugen bzw. Kabinenneuaustrüstungen bei deutschen Airlines, extrapoliert am Beispiel von Lufthansa [Luf, Bra])

Marktanteil*	2 %	12,5 %	25 %	50 %
Anzahl Panels p.a.	1.094	8.750	17.500	35.000
Cradle-to-gate Einsparungspot. kg CO ₂ eq. kg/kg	361	2.888	5.775	11.550
Cradle-to-gate Energieeinsparungspot. in MWh	1,91	15,31	30,63	61,25
Nutzungsphase Einsparungspot. to. CO ₂ eq. kg/kg	49,8	530,4	1.166,8	2.566,9

EACC Demonstrator

Ziel und Umfang der Studie

Im Rahmen der vorliegenden Ökobilanzstudie wurde ein Demonstrator von EACC aus der Automobilbranche analysiert. Die Untersuchung konzentrierte sich auf die Umweltauswirkungen der Produktionsphase im Sinne einer Cradle-to-Gate-Betrachtung. Die Ökobilanzierung wurde mit der Software SimaPro (Version 10.2.0.0) durchgeführt. Dabei kamen sowohl standardisierte Prozessdaten aus der Ecoinvent-Datenbank (Version 3.11) als auch projektspezifisch erhobene Primärdaten zum Einsatz.

Sachbilanz – Materialien

Das neu entwickelte flammgeschützte Schaummaterial basiert auf einem Epoxidharz mit verschiedenen Härtern, Additiven und Füllstoffen.

Herstellung

Für alle Herstellungsprozesse wurden die Nennleistung der verwendeten Maschinen als Grundlage verwendet.

Wirkungsabschätzung - Cradle-To-Gate

Als Berechnungsmethode zur Bestimmung der Umweltindikatoren wurde Environmental Footprint 3.1 (adapted) V1.03 verwendet. Es ist eine etablierte Methode, besonders im europäischen Raum um die Umweltindikatoren zu berechnen.

In Abbildung 2.3 sind die Umweltindikatoren aufgeschlüsselt nach Schaumkern, Prepreg und Herstellungsprozess grafisch dargestellt. Die absoluten Werte der Umweltindikatoren finden sich in Tabelle 2.3. Das Prepregmaterial hat dabei den größten Einfluss auf die Umweltindikatoren. Wie auch in Abbildung 2.4 zu erkennen, macht das Prepreg über 60 % (7,3

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

kg CO₂eq) des CO₂-Austoßes aus. Für die Indikatoren „Resource use“ und „Water use“ sind es sogar über 80 %.

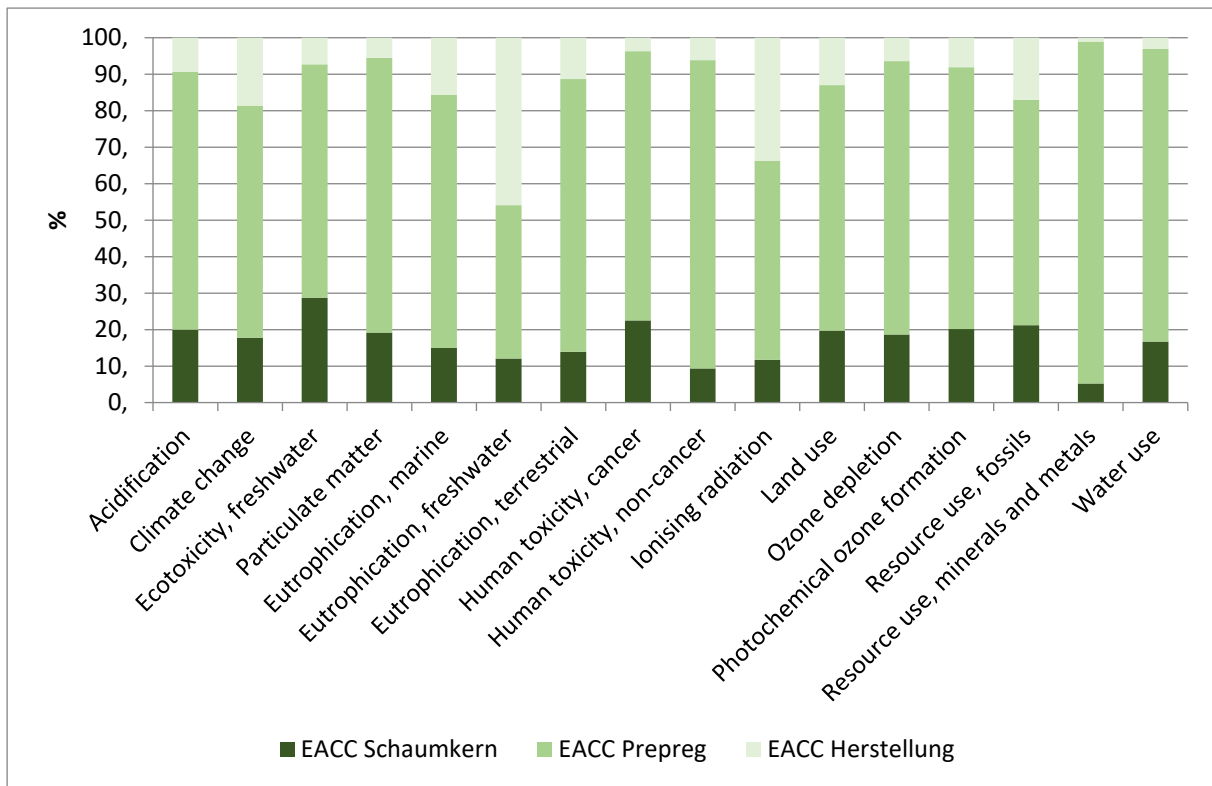


Abbildung 2.3: Umweltindikatoren EACC Demonstrator Schaumkern, Prepreg, Herstellung

Tabelle 2.3: Ergebnisse Ökobilanzierung EACC Demonstrator

Damage category	Unit	EACC Demonstrator
Acidification	mol H+ eq	0,05
Climate change	kg CO ₂ eq	11,55
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	81,00
Particulate matter	disease inc.	3,66E-07
Eutrophication, marine	kg N eq	0,01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	0,01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	0,09
Human toxicity, cancer	CTUh	6,12E-09
Human toxicity, non-cancer	CTUh	1,88E-07
Ionising radiation	kBq U-235 eq	1,37
Land use	Pt	34,21
Ozone depletion	kg CFC11 eq	3,31E-07
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	0,04
Resource use, fossils	MJ	187,44
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	3,29E-04
Water use	m3 depriv.	2,65

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Abbildung 2.4: Netzwerkstruktur Ökobilanzierung EACC Demonstrator

Zur Bewertung möglicher Einsparpotenziale sei an dieser Stelle auf die Schlussberichte des Partners EACC verwiesen.

2.3 AP 2 – Prozessentwicklung Schaum

Die im Vorhaben FST-FoamPreg verwendete und weiterentwickelte Schaumkomponente basiert auf intensiven Vorarbeiten seitens CompriseTec (CT) und dem Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth (LPW). In der Weiterentwicklung der Schaumkomponente (geringere Dichte bei verbesserter Morphologie, thermische Latenz und Lagerfähigkeit, Prozessfähigkeit als Halbzeug) lag einer der wesentlichen Arbeitsschwerpunkte von CT im Rahmen des Vorhabens FST-FoamPreg.

Parallel wurde die Entwicklung einer effektiven Supply Chain für das notwendige Carbamat (B-IPDA) mit dem LPW für die Versorgung zunächst im Projektrahmen diskutiert und erste Lösungsansätze erarbeitet. Am LPW ist die Produktion von Carbamat im hochskalierten Labor- (bis Technikums)maßstab möglich. Dadurch ist zunächst die Versorgung in AP2 gesichert. Im weiteren Verlauf von AP2 wurde die Möglichkeit der Synthese von B-IPDA in Wasser (statt Ethanol) evaluieren. Für die weiteren Entwicklungsarbeiten im Bereich der Carbamat Synthese wird an dieser Stelle auf den Projektbericht des LPW verwiesen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Herstellung der Harzpasten, welche im Rahmen der Entwicklung verwendet wurden, fand bei CT mittels eines Dreiwalzwerkes der Fa. Exakt statt.

Im Rahmen erster Gespräche (z.B. mit LHT) wurden zwei kritische Aspekte in Bezug auf die Verarbeitungseigenschaften des Schaums identifiziert:

- Das Handling der Schaummasse soll in Form handhabbarer fester Halbzeuge angestrebt und verbessert werden statt in Form einer dosierfähigen Paste.
- Die angestrebte Dichte in Verbindung mit hohen mechanischen Kennwerten wird eine der größten Herausforderungen in AP2 sein.

Problematisch ist insbesondere der drastische Abfall der mechanischen Eigenschaften bei von z.B. 300 auf 200 kg/m³ reduzierter Dichte (Druckfestigkeit: 6,62 → 1,69 MPa). In einem ersten Ansatz zur Materialoptimierung wurden daher unterschiedliche Verfahrensansätze verfolgt:

- Precuring (Vorvernetzung) mittels ungeblocktem Aminhärter (Isophorondiamin, IPDA)
- Verwendung von „atmenden“ Werkzeugen (Erhöhen der Probenplattendicke im Prozess)
- Blenden von nieder- mit hochviskosen Epoxy Novolac (EN) Systemen
- Stabilisierung der Schaumstruktur mit oberflächenaktiven Stoffen bzw. nukleierenden Partikelsystemen

Mittels Precuring mit IPDA konnte eine ca. 20-30%ige Verbesserung der dichtetpezifischen Druckfestigkeit erzielt werden (vgl. Abbildung 5), jedoch auf Kosten einer langen Prozesszeit von mehreren Stunden. Daher wurden alternative Aminhärter mit höherer Reaktivität (rH2 und rH3) für zeiteffizientes Precuring getestet.

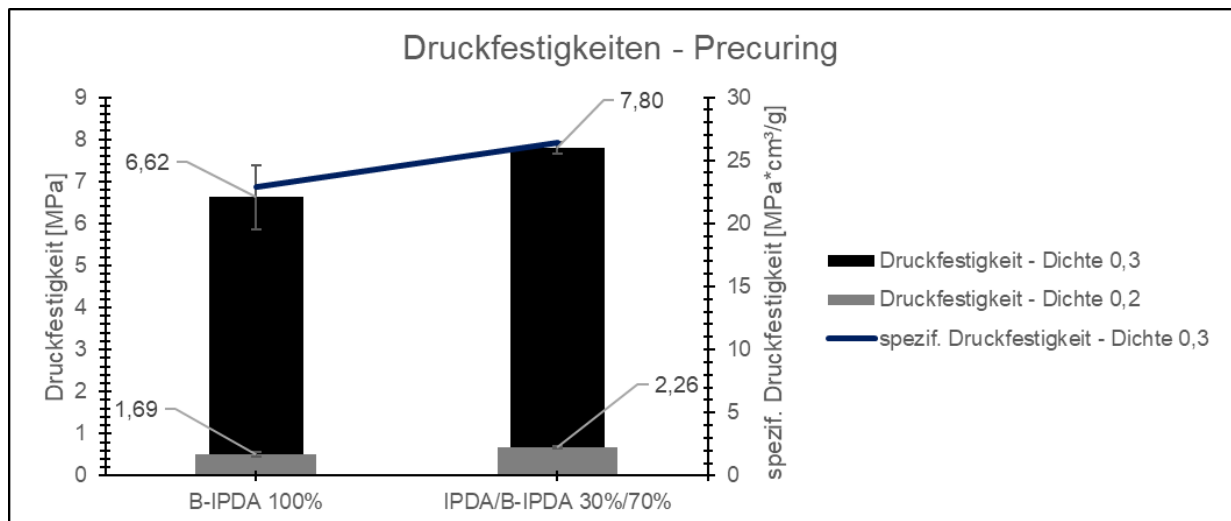


Abbildung 5: Druckfestigkeit für vorvernetzte EN/B-IPDA/IPDA Schäume in Abhängigkeit von der Dichte

Die Versuchsreihe zum Blenden von DEN431 mit DEN 438 (hochviskos) führte zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit, jedoch nur zu einer geringfügigen Verbesserung der Morphologie und keiner signifikanten Verbesserung der Druckeigenschaften (vgl. folgende Abbildungen 2.6 und 2.7).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

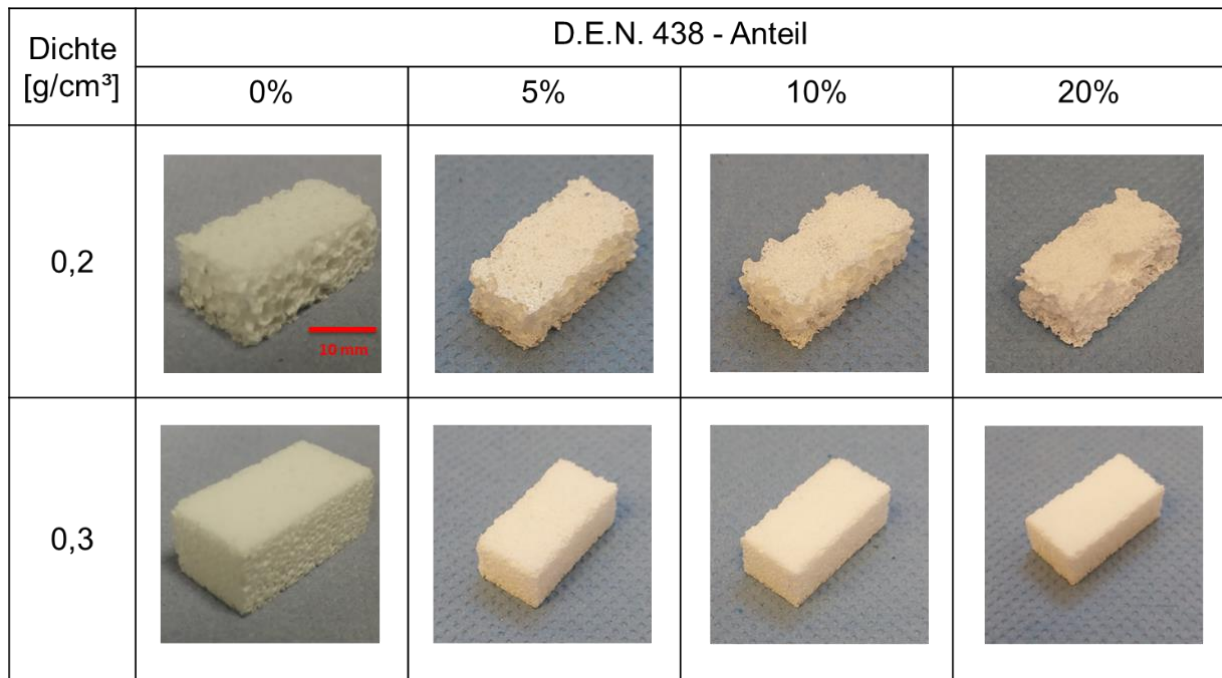


Abbildung 6: Morphologie von Schaumproben aus DEN431/438 Blends mit variiertem 438-Anteil

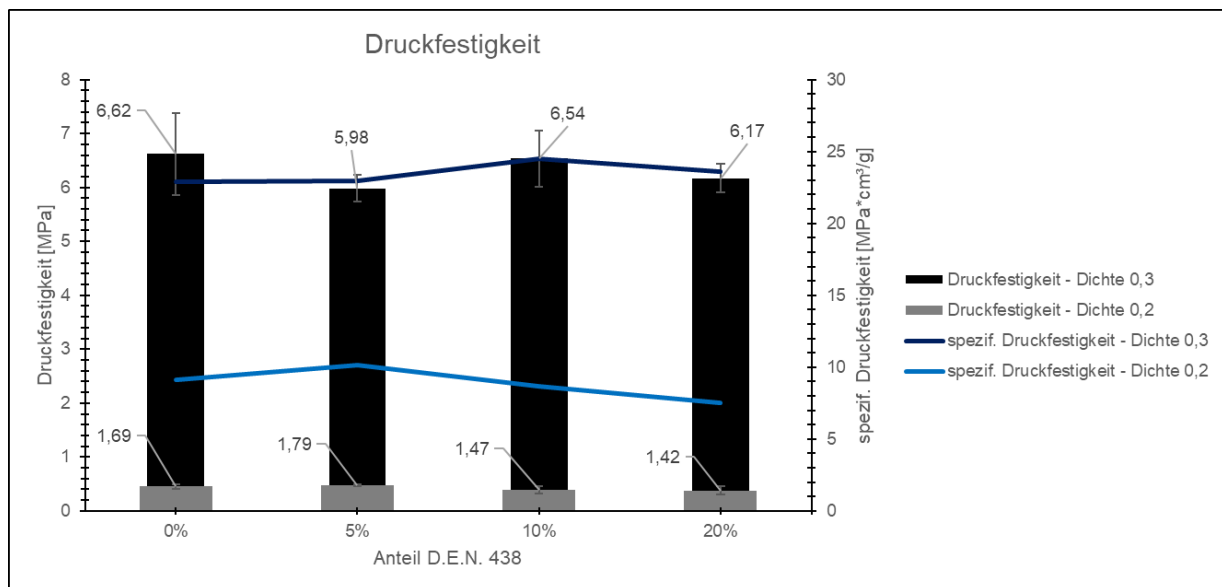


Abbildung 7: Druckfestigkeit von Schaumproben aus DEN431/438 Blends mit variiertem 438-Anteil

Um die o.g. Anforderungen zu erzielen und nachdem Experimente mit Harz-Blends nicht zu den erwünschten Ergebnissen geführt haben, wurde insbesondere auf einen Vorvernetzungs-schritt gesetzt zur Verbesserung der Morphologie bei geringer Schaumdichte. Um kurze Prozesszeiten gewährleisten zu können wurde ein besonders schneller Härter (rH2) für die weiterführenden Vorvernetzungsversuche eingesetzt. Die zuvor mehrere Stunden umfassende Vorvernetzungszeit verkürzt sich somit auf wenige Minuten. Abbildungen 2.8 und 2.9 zeigen Vergleiche von Schaumproben ohne („NEAT_D02/03“) und mit („NEATA10_2m_D03/02“) 2 min Precuring bei Verwendung von einem zusätzlichen reaktiven Härter (rH2). Es ist eine signifikante Verbesserung der Morphologie erkennbar. Die Druckfestigkeit liegt auf einem

vergleichbaren Niveau. Abbildung 2.10 zeigt exemplarisch einen Morphologievergleich in Abhängigkeit der Vorvernetzungszeit. Die Prozesseinstellung sowie die Analyse zur weiteren Reduktion der Dichte bei homogener Morphologie (Ziel: 110 kg/m³) erfolgt aktuell in Vorbereitung auf M2.

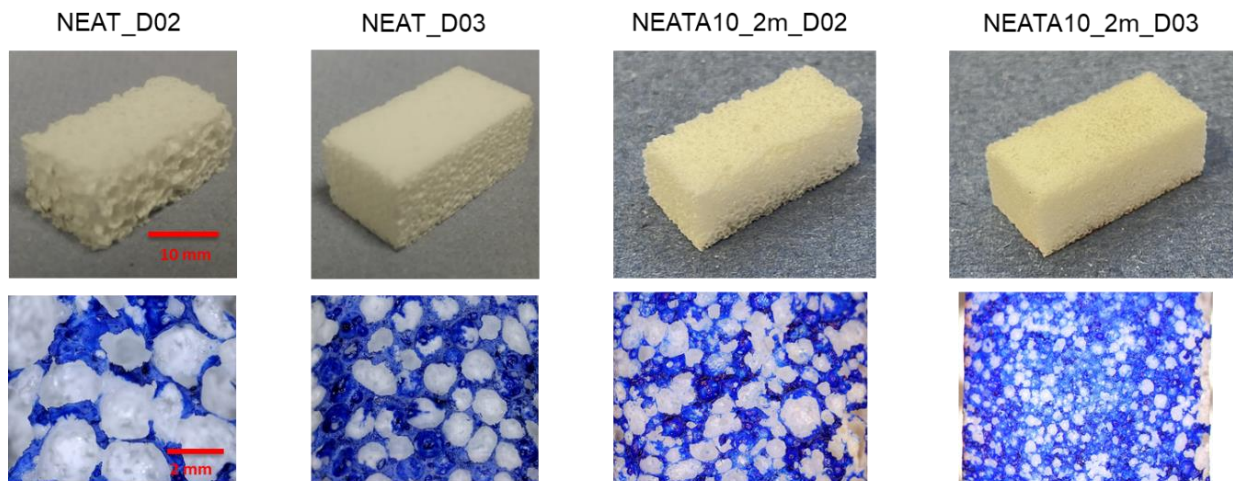


Abbildung 2.8: Vergleich von nicht-vorvernetzten (NEAT...) sowie 2 min bei 60°C mittels zusätzlichem Härter (rH2) vorvernetzten Schaumproben (NEATA10_2m...) bei einer Dichte von 200 (D02) bzw. 300 kg/m³ (D03)

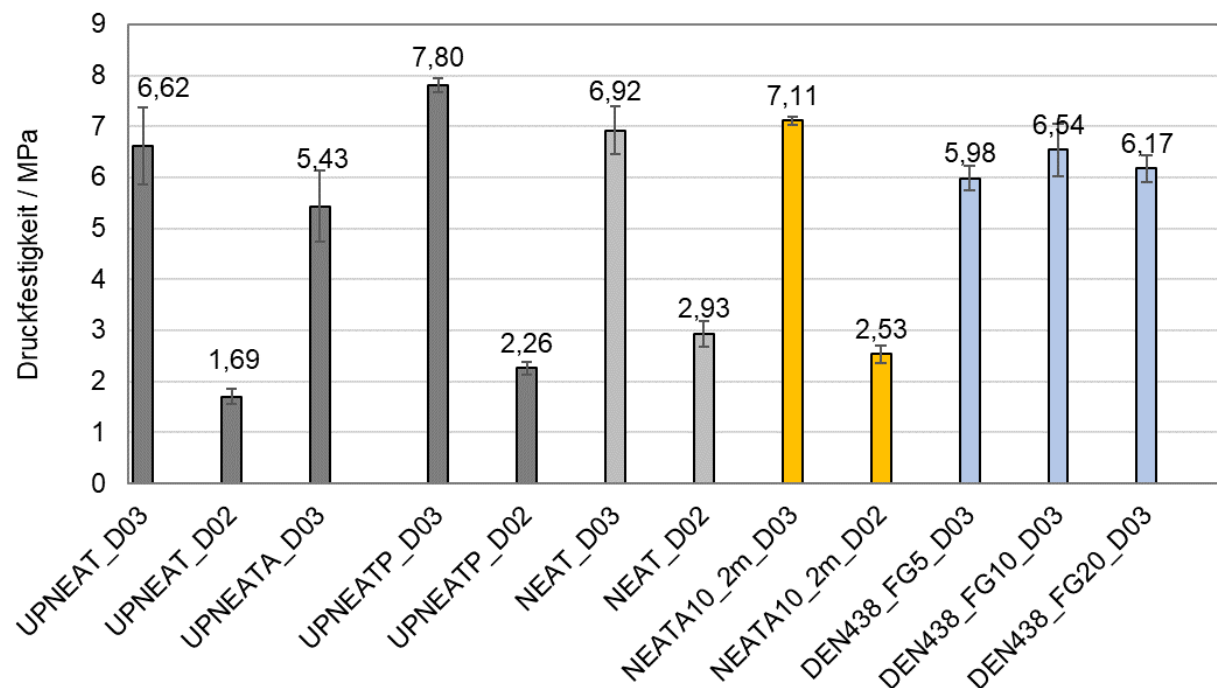


Abbildung 2.9: Vergleich der Druckfestigkeit von nicht-vorvernetzten (NEAT...) sowie 2 min bei 60°C mittels zusätzlichem reaktivem Aminhärter (rH2) vorvernetzten Schaumproben (NEATA10_2m...) bei einer Dichte von 200 (D02) bzw. 300 kg/m³ (D03), zum Vergleich Varianten mit Harzblend aus dem vorigen Berichtszeitraum (DEN438...) sowie Proben aus anderen Schaumwerkzeugen mit IPDA-Vorvernetzung (UPNEATP...)

Druckfestigkeit

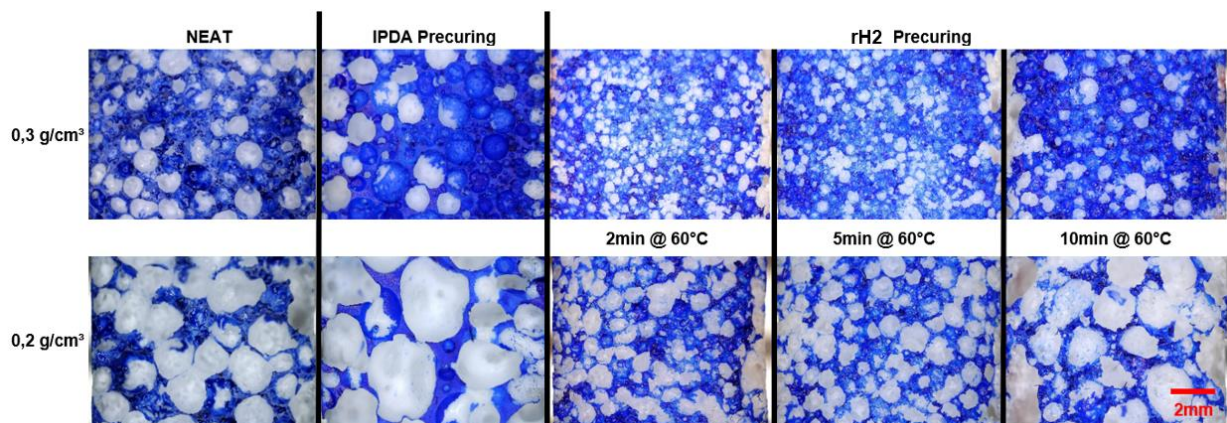
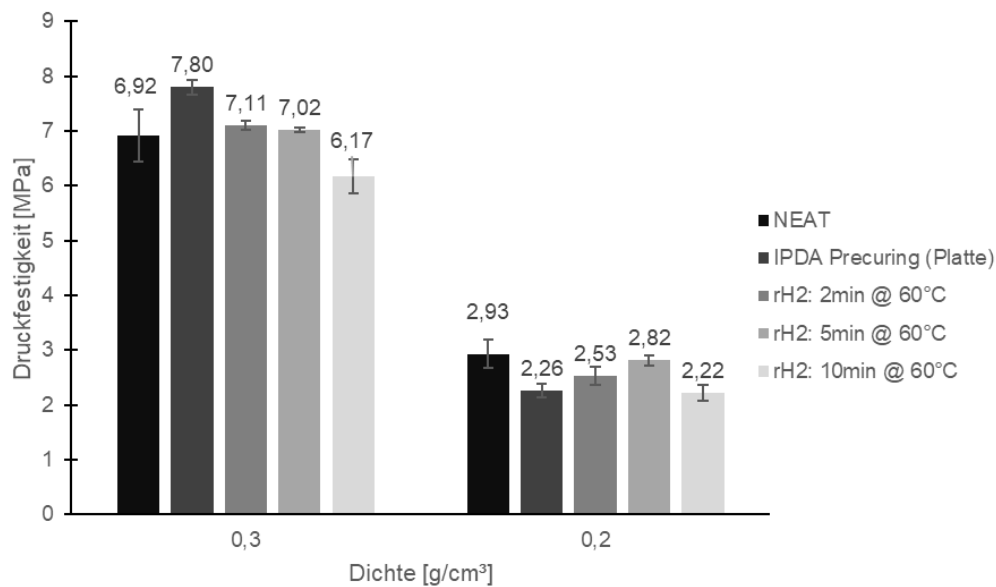


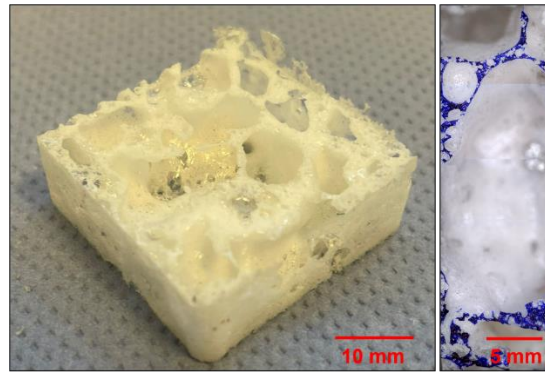
Abbildung 2.10: Oben: Vergleich der Druckfestigkeit von Schäumen NEAT, mit IPDA und rH2 Precuring sowie Precuring über 2, 5 sowie 10 min bei 60°C; unten: Vergleich der Schaummorphologie

Anschließend wurde der Fokus auf die Ermittlung der geringstmöglichen Dichte bei Erhaltung einer geschlossenzelligen Morphologie und akzeptablen mechanischen Eigenschaften gelegt. Als neue Zieldichte wurden 80-100 kg/m³ angestrebt, um konkurrenzfähig im Vergleich zu alternativen Schaumlösungen am Markt zu sein (z.B. Gurit PVC, Rohacell, Diab etc.). Es hat sich jedoch herausgestellt, dass eine einfache Adaption der Schaumdichte nach der bislang verwendeten Prozessroute wenig Zielführend ist (vgl. Abbildung 2.11).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Hoher Anteil rH2 – Pre-Curing-Temperatur: 60 °C

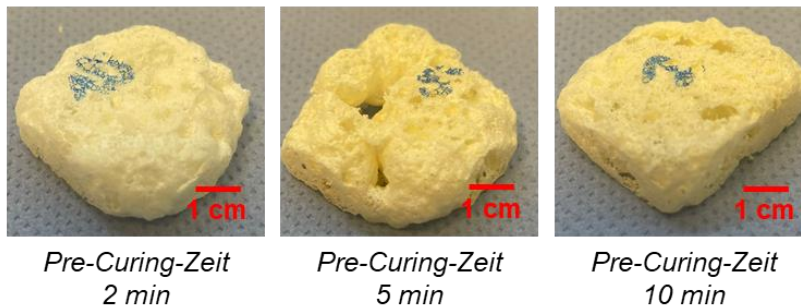


Abbildung 2.11 Oben: Schaumproben 30x30x10 mm³ nach bisherigem Schäumprozess mit einer Zieldichte von 100 kg/m³; unten: analoge Proben mit hohem reaktiven Härteranteil (rH2) zur Vorvernetzung bei 60°C

Die Proben wiesen entweder eine starke Koaleszenz oder keine vollständige Ausschäumung der Kavität auf. Mit einem CO₂-Gehalt von ca. 5 Gew.-% in der Formulierung ist der Treibmittelgehalt und der somit beim Schäumen entstehende Gasdruck hoch. Demnach wurde entschieden, neue Wege bei der Prozessoptimierung zu gehen. In gemeinsamen Schäumversuchen von CT und LPW wurden verschiedene Precuring-Parameter (Temperaturen, Zeiten) und Dispergierprozesse (Überkopfrührer ÜKR und Zentrifugalmscher ZFM) evaluiert sowie neue Werkzeugkonzepte mit zylindrischen Kavitäten. Hierzu wurden neue Formwerkzeuge realisiert. Dabei wurde festgestellt, dass zylinderförmige Kavitäten in einer vorteilhaften Morphologie resultieren (vgl. Abbildung 2.12). Die verbesserte Morphologie der zylinderförmigen Proben wurden u.a. auf die homogenere Verteilung der Harzpaste in der Kavität zurückgeführt. Um hier eine Verbesserung zu erzielen, wurden entsprechend mittels SLA additiv gedruckte Formstempel angefertigt. Mit diesen Stempeln konnte unter Einsatz einer zusätzlichen Trennmittelschicht eine verbesserte Verteilung der Harzpaste vor dem Schäumen in der Kavität erzielt und dadurch die resultierende Morphologie des Schaums verbessert werden (Prozess A). Eine zusätzlich mehrstufige Temperaturkurve (Prozess B) führte zu keinem Erfolg und wurde nicht weiterverfolgt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Niedriger Anteil rH2 – Pre-Curing-Temperatur: 40 °C – Pre-Curing-Zeit: 60 min

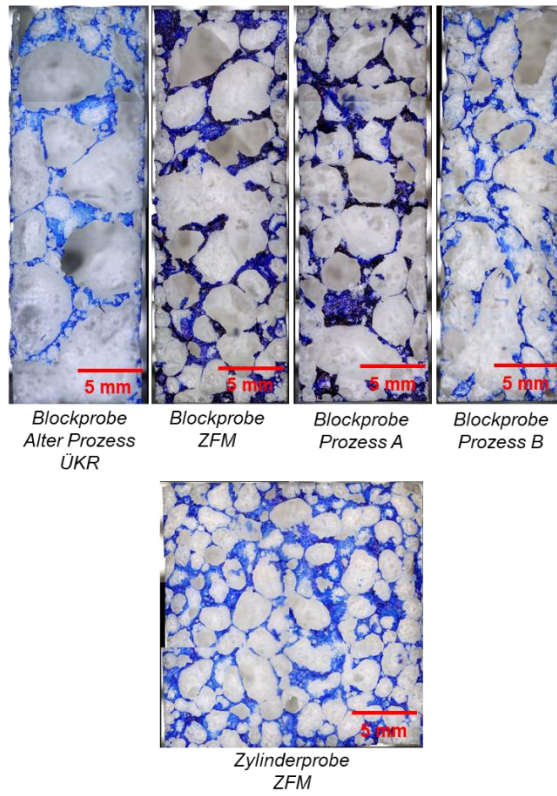


Abbildung 2.12 Blockproben vs. Proben aus zylindrischen Kavitäten mit variierten Prozessparametern und Dispergiermethoden (ÜKR vs. ZFM)

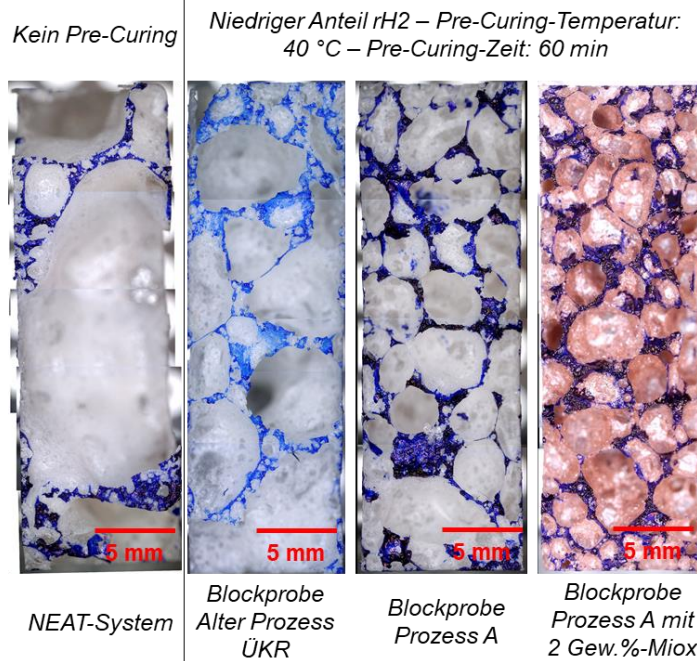


Abbildung 2.13 Schaumblockproben v.l.n.r.: ohne Precuring, mit precuring nach bisheriger Prozessroute, nach der Prozessoptimierung, zusätzlich mit 2 Gew.-% Miox als Nukleierungsmittel

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Anschließend wurden weitere Optimierungsschritte durchgeführt in Bezug auf den Verarbeitungsprozess und der Modifikation mit plättchenförmigen mineralischen Füllstoffen (Miox). Die positiven resultierenden Eigenschaften Miox-modifizierter Epoxidharzschaume sind aus vorangegangenen Projekten (EUROSTARS DiaPore) bekannt. Hierdurch konnte eine verbesserte Nukleierung erzielt werden (vgl. Abbildung 2.13). Weitere Untersuchungen zur Optimierung des Prozesses umfassten die Dispergierung der Epoxidharzschaummatrix im ÜKR unter Vakuum im Exsikkator und unter Umgebungsdruck (ohne Vakuum). Eine Dispergierung im Exsikkator zeigte dabei sowohl eine verbesserte Morphologie als auch verbesserte dichtetpezifische Druckfestigkeiten im Vergleich zur Dispergierung unter Umgebungsdruck (vgl. Abbildung 2.14). Durch die Anpassung des Prozesses konnten die morphologischen und mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum bisherigen Verfahren verbessert werden. Die Ergebnisse der zylindrischen Proben aus dem ZFM wurden zwar nicht erreicht, jedoch liefert der optimierte ÜKR-Prozess bessere Resultate als die Blockproben aus dem ZFM.

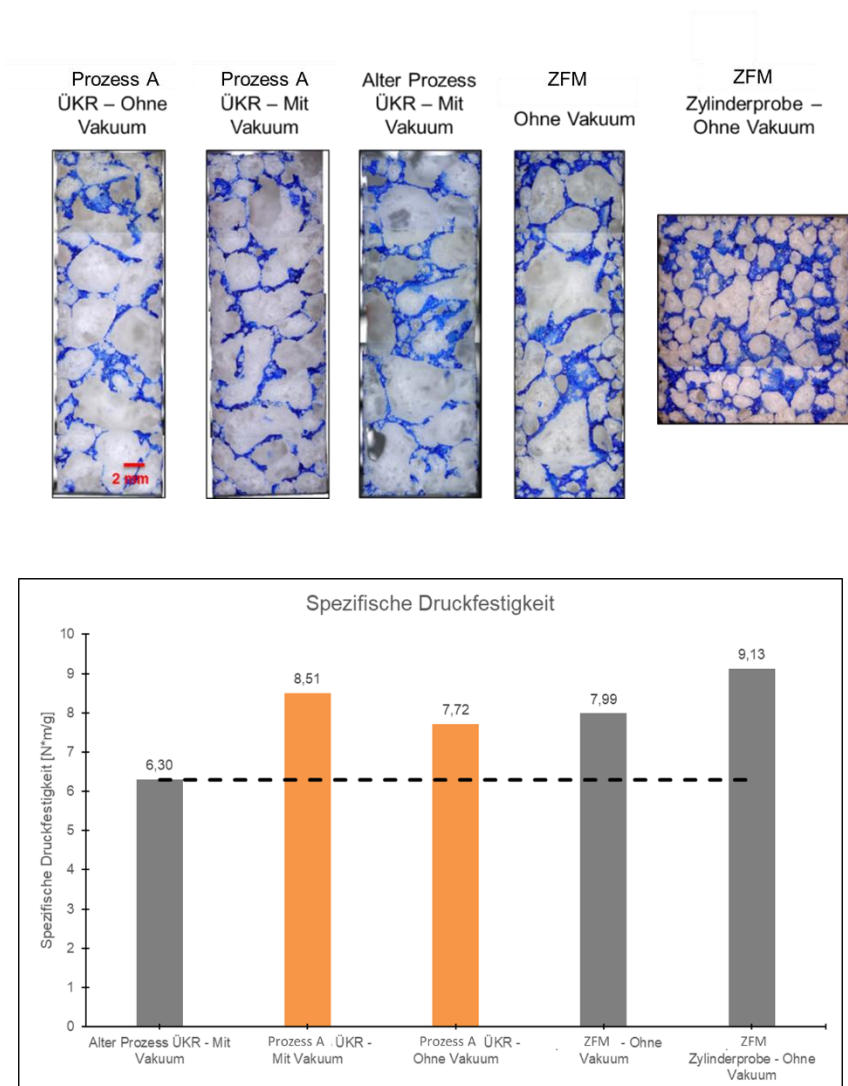


Abbildung 2.14 Oben: Übersicht über unterschiedliche Schaumproben mit Zieldichte 100 kg/m³, unten: Vergleich der jeweiligen dichtetpezifischen Druckfestigkeit

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Flammenschutzmodifikation derartiger Schaumpasten konnte erfolgreich mittels einer hauptsächlich APP (Ammoniumpolyphosphat) basierten Flammenschutzmittelformulierung erreicht werden. APP hat sich bereits in vorangegangenen Projekten als hochwirksames Flammenschutzmittel in Epoxidharzschäumen erwiesen. Dabei ist sowohl die Einarbeitung der Flammenschutzmittel im Dispergierprozess sowie die Auswahl und der Anteil der Flammenschutzmittel entscheidend um nicht nur die erforderliche Flammenschutzwirkung zu erzielen, sondern ebenfalls die Schaummorphologie und somit die mechanischen Schaumeigenschaften sowie die Dichte nicht zu stark negativ zu beeinflussen. Auf nähere Details zur Flammenschutzformulierung wird aus Gründen der Geheimhaltung an dieser Stelle verzichtet. Es konnten erfolgreich horizontale und vertikale Brandtests nach UL94 mit den Bewertungen HB und V-0 erzielt werden. Mit Festlegung der Flammenschutzformulierung und Härterkombination zur Vorvernetzung wurden Meilenstein 2 (Materialentwicklungsfreeze Schaumkomponente) erfolgreich abgeschlossen.

Für die Ergebnisse zu den Auslagerungsversuchen sowie den Schäumversuchen mit Inserts (AP2.6) sei an dieser Stelle auf den Bericht des LPW verwiesen.

Als weiterer wesentliche Schritt hin zu einer zukünftigen Industrialisierung der Entwicklung des FoamPreg-Systems sehen die Projektpartner die skalierbare Synthese des Carbamats (B-IPDA) an. Die Kosten und die Möglichkeit einer skalierbaren Produktion des Carbamats stellt einen der wesentlichen Faktoren für die zukünftige Verwertbarkeit der Projektergebnisse dar. Zum einen stellt das Carbamat den signifikantesten Kostenfaktor für das Gesamtsystem dar. Zum anderen bestimmt neben der technischen Leistungsfähigkeit natürlich der Preis ganz entscheidend die potenziellen zukünftigen Anwendungen. Dies wurde bereits in der Entwicklung und auch bei der Auswahl möglicher Demonstrator-Anwendungen (AP1) berücksichtigt. Im Rahmen des AP2 fanden hierzu neben den Synthesen beim LPW seitens CT erste Gespräche und Vorarbeiten mit Lohnfertigern statt.

2.4 AP 3 – Entwicklung thermisch latenter Prepregs

Im Arbeitspaket 3 war CT vorwiegend beratend tätig bei der Materialauswahl und möglichen Flammenschutzformulierungen. Für weitere Aktivitäten im AP3 wird auf den Bericht der Universität Bayreuth verwiesen.

2.5 AP 4 – Verbundentwicklung Sandwichkomponente

Vorrangiges Ziel von Arbeitspaket 4 war die Entwicklung eines funktionalen Materialverbundes auf Basis der in den vorangegangenen Arbeitspaketen 2 und 3 entwickelten Einzelkomponenten „Schaum“ und „Prepregs“. Allerdings lag im Fokus dieses Arbeitspakets dadurch nicht nur die bloße Zusammenführung der Komponenten, sondern auch die gegenseitige iterative Materialentwicklung sowie die Prozessentwicklung der Halbzeuge im Kontext des Gesamtverarbeitungsprozesses (am Beispiel der Schaumkomponente) von der Carbamat- und Partikeldispergierung über die Herstellung von lager- und handlingsfähigen Halbzeugen bis hin zu einem Zeit- und Energie-effizienten Verarbeitungsprozess zum Sandwichbauteil. Eine

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

wesentliche Änderung zu Beginn von Arbeitspaket 4 seitens CT war die Verwendung einer größeren und leistungsfähigeren Engel vduo 700 Presse statt bzw. in Ergänzung zu der bis dato verwendeten Laborheizpresse, welche auch in den späteren Demonstratorversuchen (AP5) zum Einsatz kommen sollte. Für die Temperierung der Werkzeuge wurde auf öltemperierte Heizplatten zurückgegriffen, welche Werkzeugspezifisch angepasst werden können. Diese wurden mittels eines Hochtemperatur-Öltemperiergeräts der Fa. Tooltemp temperiert.

Ein ambitioniertes Ziel des Arbeitspakets 4 war die Entwicklung, Fertigung und Verarbeitung von lagerfähigen flächigen Schaumhalbzeugen, welche analog zu Prepregs ohne Faserverstärkung gehandhabt und verarbeitet werden können. Dabei fand zunächst die Konzeptentwicklung einer Filmziehanlage und des entsprechenden Fertigungsprozesses statt, anschließend erfolgten erste Vorversuche zur Herstellung von Filmen mit definierter Dicke aus Carbamat-Epoxy-Systemen sowie die experimentelle Evaluierung möglicher Einflussfaktoren auf den Fertigungsprozess. Es folgten erste Schäumversuche – zunächst im kleinen Maßstab anhand im Projekt bereits verwendeter Aluminiumwerkzeuge (AP2), anschließend mit Hilfe von Presswerkzeugen auf einer industriellen Heizpresse (sh. unten).

Zur Entwicklung der Schaumhalbzeuge auf Basis des Epoxy-Carbamat Pasten wurde seitens CT in Eigenkonstruktion eine automatisierbare Filmziehanlage entwickelt und gebaut, da am Markt verfügbare Filmziehgeräte einen hohen Preis, lange Lieferzeiten und eine mangelhafte Skalierbarkeit aufwiesen. Hierzu wurde auf ein manuelles Filmziehrakel der Fa. BYK sowie eigens konstruierte Spann- und Formrahmen aus Aluminium zurückgegriffen. Das manuelle Filmziehrakel wurde mit dem modifizierten Heizbett und der Kinematik eines kommerziellen FFF-Druckers kombiniert, um eine einstellbare und reproduzierbare Filmdicke, Abziehggeschwindigkeit, Länge sowie Breite zu erzielen. Um eine homogene Temperaturverteilung auf der Substratplatte zu erzielen, wurde die Temperiertechnik des FFF-Druckergestells entsprechend modifiziert. Die fertiggestellte Konstruktion wurde anschließend umfassenden Testläufen unterzogen, welche eine hohe Einstellgenauigkeit sowohl von Temperatur, Positionen als auch Verfahrensgeschwindigkeiten aufzeigten. Durch die gängige Steuerung der FFF-Drucker-Basis ist eine schnelle und einfache Modifikation und Dokumentation von Fertigungsparametern möglich. Die technischen Einstellparameter können dem Erfolgskontrollbericht entnommen werden.

Für die verwendeten Epoxy-Carbamat Pasten (zunächst ohne Flammschutzmodifikation) konnte nach einigen Justierungsarbeiten eine gleichmäßige Filmdicke von 1 mm mit einer Toleranz von 0,1 mm erzielt werden und somit eine vergleichbare Präzision zu kommerziellen Filmziehgeräten. Allerdings verblieben vereinzelt größere Luftblasen in den Filmen. Als nächster Optimierungsschritt wurden unterschiedliche Substrate getestet, beispielsweise Glas oder PTFE Folien. Schlussendliche Erkenntnis dieser Studie war, dass das Material des Substrates für die Filmdicke (vorausgesetzt eine flache und eben Oberfläche) keinen signifikanten Einfluss auf die Dickentoleranz hat. Das Problem der Luftblasen konnte jedoch nicht gelöst werden. Weitere iterative Optimierungsschritte der Massenverteilung vor dem Rakelmesser, der vorgelagerten Entgasung der Harzpaste sowie der Variation der Aufziehgeschwindigkeit ergaben inkrementelle Verbesserungen des Ergebnisses (vgl. Abbildung 2.15) bis schließlich nur noch mikroskalige Lufteinschlüsse vorhanden waren, welche als unkritisch bewertet wurden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Abbildung 2.15 (v.l.n.r.) Inkrementelle Verbesserung der Filmqualität ohne Vorvernetzung durch Parametervariation (AP4)

Anschließend erfolgten erste Filmziehversuche mit weiteren Trägersubstraturen und einem im Vergleich zur Paste erhöhten Anteil des hochreaktiven Aminhärterers zur Vorvernetzung der Harzpaste zur Herstellung lagerfähiger zäher Filmhalbzeuge. Es konnte direkt eine gleichmäßige Filmdicke mit einer Toleranz von 2 % erzielt werden. Die hergestellten Filme wiesen dabei lediglich geringe mikroskalige Lufteinschlüsse auf. Eine Herausforderung stellte die vollflächige Benetzung des Trägersubstrats da, welche jedoch gelöst werden konnte. So konnten schließlich hochqualitative vorvernetzte Harzpastenfilme hergestellt werden, welche den gesteckten Anforderungen genügen in Punkto Maßhaltigkeit und Handhabbarkeit (vgl. Abbildung 2.16).



Abbildung 2.16 mittels rH3 vorvernetzter Harzfilm

Im Anschluss erfolgten erste Schäumversuche ohne Decklagen im Aluminiumblockwerkzeug mit einer Kavität von 30 x 30 x 10 mm³ sowie dem Plattenwerkzeug mit einer Kavität von 160 x 110 x 10 mm³ (bekannt aus vorangegangenen Versuchsphasen). Dabei wurden Schaumkörper mit einer Zieldichte von 95 und 190 kg/m³ hergestellt (vgl. Abbildung 2.17). Wie in Abbildung 2.17 zu erkennen, führt ein zu hoher Anteil reaktiven Härterers zu keiner ausreichenden Expansion des Schaumes, was auf eine zu hohe Viskosität der Matrix zum Zeitpunkt der Expansion hindeutet. Der Anteil reaktiven Härterers wurde somit für die nächsten Versuchsreihen reduziert. Die Verarbeitung der Schäume erfolgte in einem „Hot-In-Hot-Out“- Prozess. Dabei wird die Schaummasse in ein auf 160 °C temperiertes Werkzeug eingebracht und 20 min vernetzt/verschäumt und anschließend aus dem nach wie vor 160 °C isotherm temperierten Werkzeug entnommen. Ein solcher Fertigungsprozess zielt auf die spätere Serienbauteilfertigung ab um große Temperaturänderungen der Werkzeuge und somit einen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

hohen Energie- und Zeitaufwand zu vermeiden. Es folgte eine Studie zur idealen Vorvernetzungstemperatur und -dauer (vgl. Erfolgskontrollbericht).

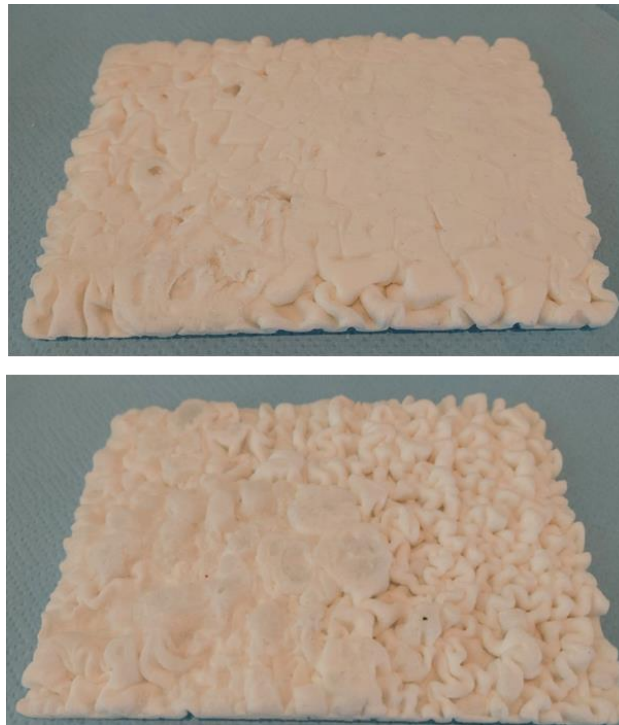


Abbildung 2.17 Schaumkörper aus mit hohem Anteil rH3 vorvernetzten Filmhalbzeugen mit einer Dichte (v.o.n.u.) von 190 und 95 kg/m³ (5 Tage Vorvernetzung bei 30°C)

Anfängliche Strategie seitens CT für die Verarbeitung von größeren Sandwichpaneelen war die Entwicklung eines kombinierten und modular aufgebautem Schäum- und Sandwich-Presswerkzeugsystems. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse der flächigen Schaumhalbzeuge wurden diese Konstruktionen jedoch nicht realisiert. Stattdessen wurde zu Gunsten eines industrienahen *Hot-in-Hot-out* Prozesses (Werkzeug liegt vorgeheizt in der Presse vor -Entnahme des Bauteils erfolgt ohne Änderung der Werkzeugtemperatur) mittels thermisch latenter Halbzeuge (flächiges Schaumhalbzeug und Prepreg) und die Verwendung von bei CT vorhandenen Tauchkantenwerkzeugen (vorrangig für die Verarbeitung von SMC und Sandwich-SMC) entschieden. Hierfür erfolgte die Fertigung von passenden Heizplatten.

Die größer skalierten Sandwich-Pressversuche wurden anhand von Tauchkantenwerkzeugen auf der Heizpresse mit einer Kavität von ca. 300 x 200 x 10 mm³ und einer Zieldichte von anfangs 150 kg/m³ durchgeführt. Dabei wurde jeweils eine Prepreglage (anfangs ohne Flammenschutz) verwendet. Die avisierte Zielschaumdichte konnte erreicht werden, d.h. eine vollständige Expansion des Schaums trotz vollflächig belegter Prepregdeckschichten konnte validiert werden. Allerdings kam es zu einer Faltenbildung der Deckschichten und suboptimaler Entformbarkeit als auch Schaummorphologie. Durch eine Iteration des Laminataufbaus (v.a. Hinzufügen einer 2. Deckschicht) konnte die Faltenbildung unterbunden werden. Dabei konnte eine vollständige Expansion der Schaumlage erzielt werden sowie eine gute Anbindung von Prepreglagen und Schaumkern. Einzig die Schaummorphologie war weiterhin noch

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

verbesserungsbedürftig. Die Ergebnisse der Sandwich-Versuchsreihe sind in Abbildung 2.18 dargestellt.



Abbildung 2.18 Epoxy-Sandwichplatte aus thermisch latenden Prepregs (2 Decklagen unten) und in situ expandiertem Schaumkern (Schaumdichte ca. 150 kg/m³)

Im Rahmen weiterer Prozessoptimierungen wurden Versuchsreihen zur Variation der Vernetzungszeit (10, 20, 30 min) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 2.19 bis 2.21 zusammengefasst. Es lässt sich festhalten, dass eine Verarbeitungsdauer von 30 min einen negativen Effekt auf die Biegefestigkeit (Delamination) aufweist. Die höchste Druckfestigkeit ergibt sich bei einer Aushärtungszeit von 10 min. Allerdings bleibt diese nach wie vor hinter den erreichten Festigkeiten der reinen Schäume (ohne Decklagen) zurück. Dies ist auf die inhomogene Schaummorphologie in den Sandwich-Platten zurückzuführen. Als nächster Optimierungsansatz wurde die Modifikation der Schaummasse mit Nukleierungsmitteln verfolgt.

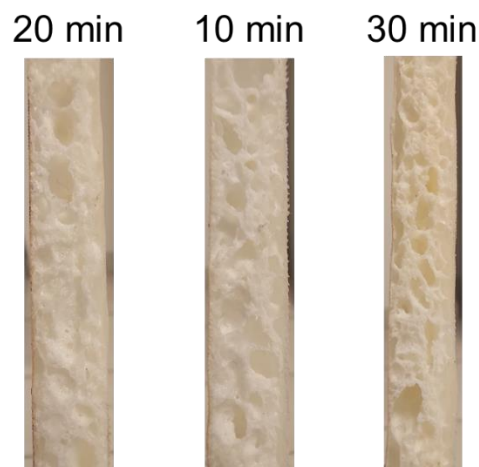


Abbildung 2.19 Epoxy-Sandwichplatten Querschnitt bei variabler Verarbeitungsdauer von 10, 20 und 30 min

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

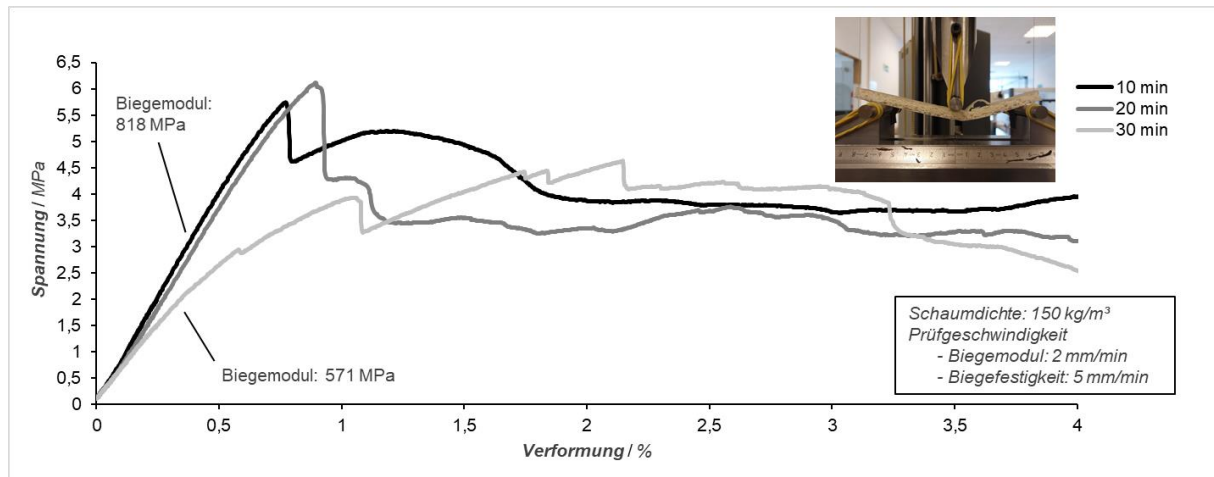


Abbildung 2.20 Biegespannungsverläufe von Epoxy-Sandwich Platten mit variabler Aushärtungszeit

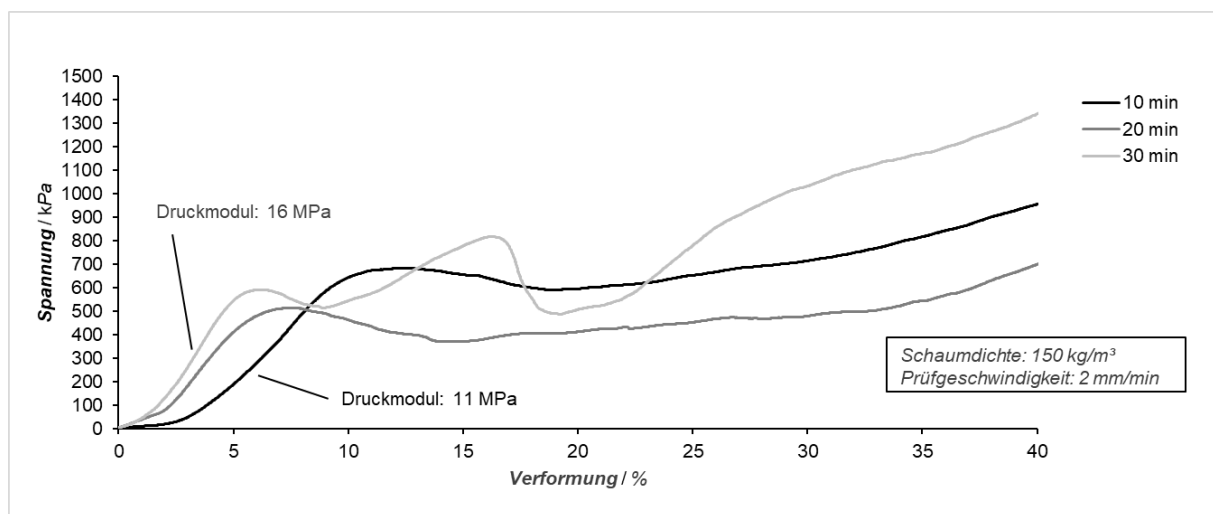


Abbildung 2.21 Druckspannungsverläufe von Epoxy-Sandwich Platten mit variabler Aushärtungszeit

Im weiteren Verlauf von AP4 fand eine mittels statistischer Versuchsplanung gestützte vollfaktorielle Versuchsreihe zur Einflussparameterstudie bei der Sandwichpaneelherstellung auf Couponebene statt. Als Faktoren des Versuchsplans wurden die Schaumdichte der Kernlage (zweistufig: 150 bzw. 200 kg/m³), der Vorvernetzungsgrad charakterisiert durch den Anteil an reaktivem Härter (dreistufig) sowie die Aushärtungstemperatur und -zeit (zweistufig) herangezogen. Aus jeder der sich ergebenden (insgesamt 36) Parameterkombinationen wurden mehrere Schäumversuche mit anschließender Analytik durchgeführt. Als messbare Zielgrößen wurden (charakterisiert durch Mittelwert und Standardabweichung) die Druckfestigkeit und der Druckmodul bei Raumtemperatur, die Biegefestigkeit und -steifigkeit (3-Punkt-Biegeversuch) und (qualitativ) die resultierende Schaummorphologie herangezogen. Die gewonnenen Ergebnisse wurden mittels eines Tools (Freeware Software *R*) nach Design of Experiments (DOE) Methoden ausgewertet um nicht nur eine Aussage zur Signifikanz der einzelnen Faktoren zu gewinnen, sondern auch deren relevanten Wechselwirkungen.

Abbildung 2.22 zeigt einen qualitativen Vergleich der resultierenden Schaummorphologie der Kernlagen (oben/unten jeweils eine Prepreg-Deckschicht) der unterschiedlichen Varianten. Dabei zeigten Varianten mit einem geringeren Anteil reaktivem Härter zur Vorvernetzung keinen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

signifikanten Unterschied in der Morphologie in Abhängigkeit von der Aushärtungstemperatur. Sowohl bei einer Dichte von 150 als auch 200 kg/m³ traten stark bimodale Zellgrößenverteilungen auf. Bei einem erhöhtem reaktivem Härteranteil zeigte sich bei einer Verarbeitungstemperatur von 140 °C eine leicht verbesserte Morphologie im Vergleich zur höheren Verarbeitungstemperatur von 160 °C sowie insgesamt eine deutlich homogenere Zellgrößenverteilung. Die homogenste Zellmorphologie mit den feinsten Zellen ließ sich mit einem hohen reaktivem Härteranteil erzielen, allerdings konnte der Schaum nur mit der höheren Dichte (200 kg/m³) und der geringeren Prozessstemperatur (140 °C) verarbeitet werden. Bei geringerer Zieldichte bzw. höherer Prozessstemperatur konnte die Kavität nicht ausgefüllt und der Schaum nicht vollständig expandiert werden.

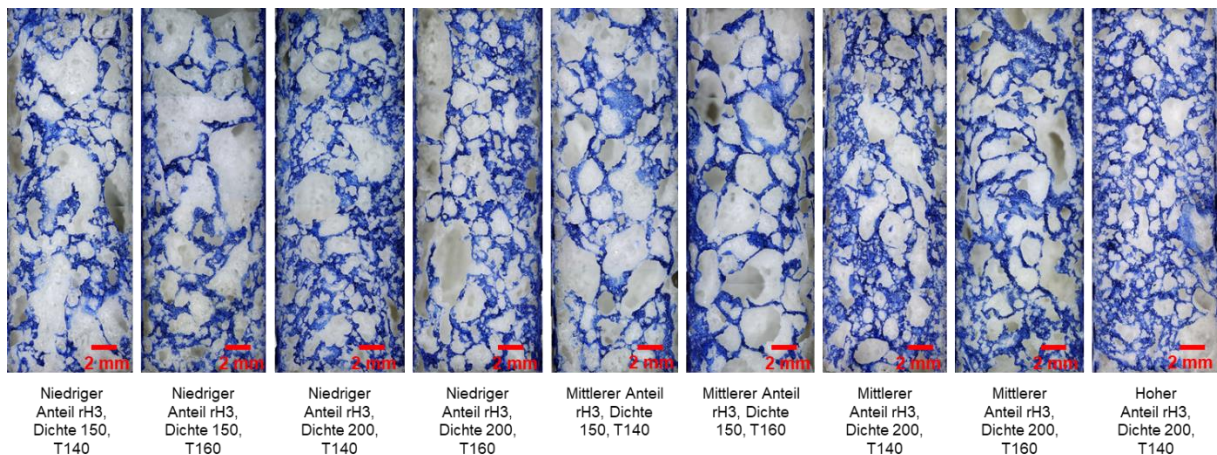


Abbildung 2.22: Qualitativer Vergleich der Zellmorphologie unterschiedlicher Formulierungen und Prozessparametervarianten der durchgeführten Hauptversuchsreihe (AP4)

In Abbildung 2.23 und 2.24 sind die Ergebnisse der mechanischen Druckprüfung (angelehnt an DIN EN ISO 844) zusammengefasst. Es kann festgehalten werden, dass die Aushärtungstemperatur (bei angepasster Prozessdauer) keinen signifikanten Einfluss auf die Druckeigenschaften der Schäume zu haben scheint. Des Weiteren wird beobachtet, dass Schäume mit einem geringeren Härteranteil geringere Druckkennwerte aufweisen im Vergleich zu höheren Härteranteilen (vermutlich aufgrund o.g. bimodaler Zellgrößenverteilung). Die höchste Druckfestigkeit wird erwartungsgemäß von dem Schaum erzielt, welcher die homogenste und feinste Morphologie aufweist. Ansonsten zeigt sich erwartungsgemäß eine Erhöhung der Druckkennwerte mit Erhöhung der Dichte.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

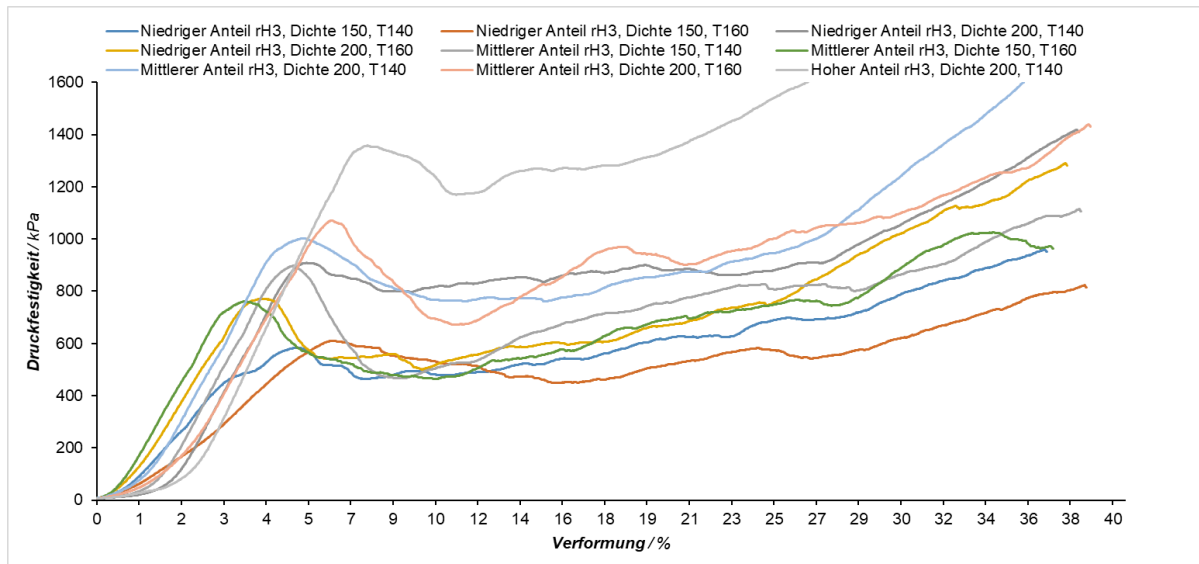


Abbildung 2.23: Druckkurven Hauptversuchsreihe Sandwichproben (AP4)

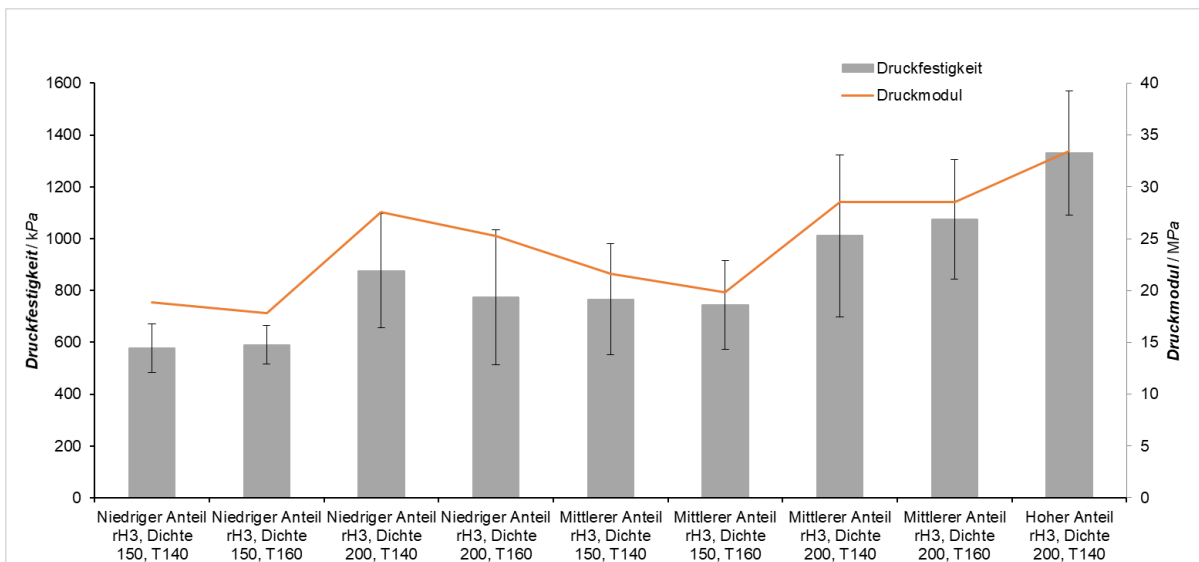


Abbildung 2.24: Zusammenfassung Druckfestigkeit & Druckmodul - Hauptversuchsreihe Sandwichproben (AP4)

In Abbildung 2.25 sowie 2.26 sind die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung der Sandwichproben (angelehnt an DIN EN ISO 178) zusammengefasst. Auch hier konnten geringere mechanische Eigenschaften der Proben mit geringerem Härteranteil festgestellt werden. Proben mit einem erhöhten Härteranteil zeigten hier signifikant höhere Werte (v.a. für die Biegefestigkeit) bei einer Aushärtungstemperatur von 160 °C. Die Proben, welche mit 140 °C verarbeitet wurden, zeigten dabei primär ein Versagen durch Delamination der oberen Deckschicht vom Schaumkern, während auffälliger Weise als dominante Versagensart bei Sandwichproben, welche mit 160 °C verarbeitet wurden, ein Schubversagen im Schaumkern auftrat. Auch mit einem höheren Anteil an reaktivem Härter tritt nach wie vor ein Versagen der bei 140 °C verarbeiteten Sandwichplatte durch Delamination (und damit bei relativ geringer Festigkeit) auf.

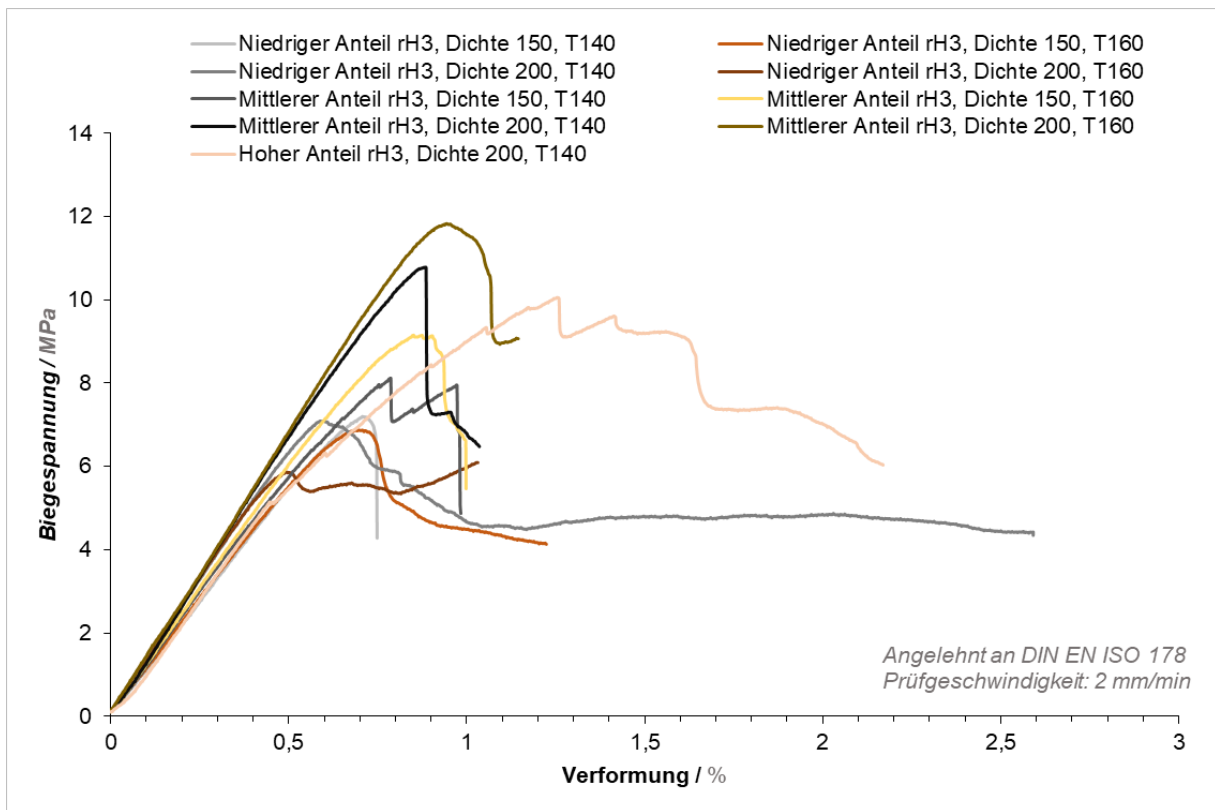


Abbildung 2.25: Biegekurven Hauptversuchsreihe Sandwichproben (AP4)

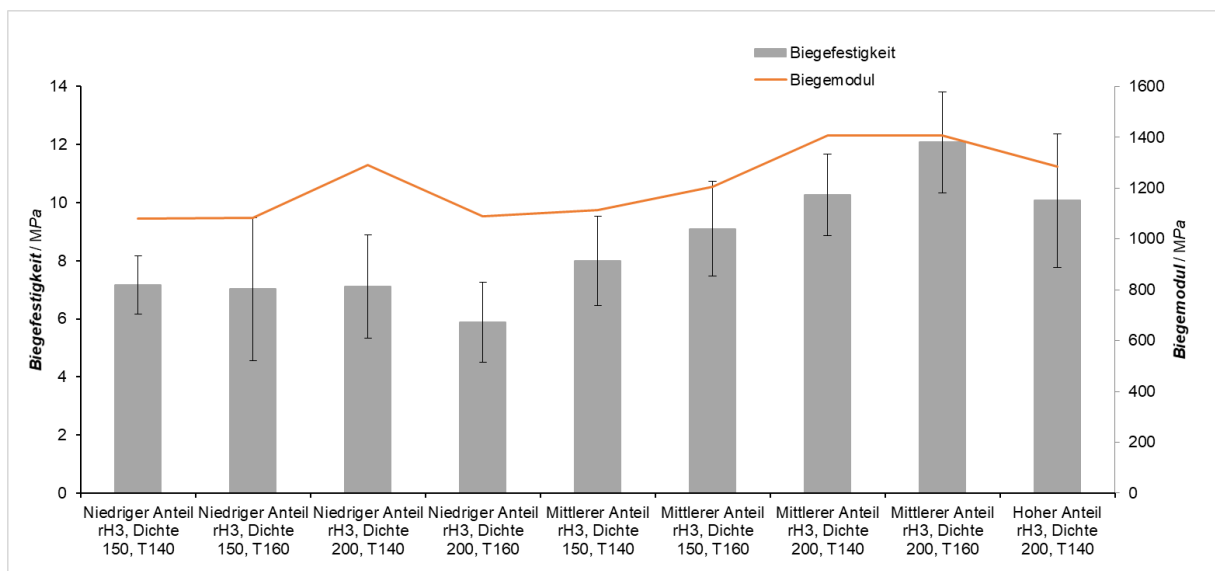


Abbildung 2.26: Zusammenfassung Biegefestigkeit & Biegemodul - Hauptversuchsreihe Sandwichproben (AP4)

Die Signifikanz der Einflussfaktoren sowie deren Wechselwirkungen wurden ausführlich im Rahmen einer durch die Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg betreuten studentischen Arbeit diskutiert. Es konnte geschlussfolgert werden, dass der geringere Anteil

des reaktiven Härter zur Vorvernetzung zu einer nicht ausreichenden Vorvernetzung führt. Dies resultiert in einer inhomogenen Morphologie mit bimodaler Zellgrößenverteilung (einzelne große Zellen) und ist durch den vermutlich zu ausgeprägten Viskositätsabfall bei der simultanen Vernetzung und Expansion und dadurch resultierendes starkes Zellwachstum und Zellkoaleszenz zu begründen. Mit einem erhöhten reaktiven Härteranteil konnten die mechanischen Eigenschaften sowie die Schaummorphologie der Kernschicht signifikant verbessert werden. Es konnte dabei kein signifikanter Einflussfaktor der Aushärtungstemperatur und Zeit im gewählten Prozessfenster festgestellt werden. Allerdings ließen sich mit einem hohen Anteil an reaktivem Härter vorvernetzte Schaumhalbzeuge nur mit einer Prozessstemperatur von 140 °C und maximal bis zu einer Zieldichte von 200 kg/m³ expandieren (begründet durch die hohe Viskosität des vorvernetzten Systems am Punkt der Expansion).

Aus den durchgeführten Biegeversuchen konnte zudem geschlussfolgert werden, dass eine Aushärtung im *Hot-in-Hot-out* Prozess bei einer Temperatur von 140 °C bei einer verringerten Prozesszeit nicht ausreichend für die vollständige Vernetzung des Sandwichverbundes (vermutlich insbesondere der Decklage) ist. Bei den auf diese Art verarbeiteten Proben kam es in den Biegeversuchen zu repräsentativem Versagen durch Delamination der oberen Deckschicht.

Die für die weiteren Versuche ausgewählte Variante kann dem vertraulichen Erfolgskontrollbericht entnommen werden.

2.6 AP 5 – Realisierungsphase und Upscaling

Im Rahmen des Vorhabens wurde auf zwei parallel von den Partnern bearbeiteten Entwicklungssträngen abgezielt. CompriseTec fokussiert sich dabei auf die Entwicklung und Herstellung sowie das Benchmarking im Vergleich zum Stand der Technik eines komplexen Luftfahrtbauteils.

Parallel arbeitet der Projektpartner EACC an der Realisierung eines weiteren Demonstratorbauteils aus dem Automotivesektor. Es handelt sich dabei um ein aus flächigen Schaumhalbzeugen und Decklagen abzubildendes komplexes dreidimensionales Leichtbauteil aus dem Automobilexterior. Für weitere Details sei an dieser Stelle auf den Bericht von EACC verwiesen.

Für die Fertigung der Demonstratoren bei EACC wurden die dafür vorgesehenen Schaumhalbzeuge von CompriseTec hergestellt und basierend auf den Rückmeldungen von EACC weiterentwickelt. Auf Basis der in Arbeitspaket 4 gewonnenen Erkenntnisse wurden Schaumhalbzeuge für die ersten Demonstratorversuche bei EACC hergestellt.

Nach Rückmeldung von EACC zeigte sich bei der Verarbeitung dieser Halbzeuge eine ähnlich geringe Expansion des Schaums wie bereits in AP4 dokumentiert. Um die Schaumexpansion zu verbessern, wurde daraufhin der Anteil des reaktiven Härter reduziert. Dieser Anpassung lag die in AP4 beobachtete Korrelation zwischen dem reaktiven Härteranteil und der Schaumdichte zugrunde. Parallel dazu wurden Halbzeuge mit unterschiedlichen Dicken vorgesehen, um potenzielle Wechselwirkungen zwischen Schaumexpansion und Bauteilgeometrie zu berücksichtigen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Für die weiteren Demonstratorversuche bei EACC wurden insgesamt 16 Schaumhalbzeuge mit folgenden Dicken gefertigt und die Vorvernetzungsparameter beibehalten:

- 4 Halbzeuge mit 1,0 mm Dicke,
- 4 Halbzeuge mit 1,3 mm Dicke,
- 8 Halbzeuge mit 1,5 mm Dicke.

Die Rückmeldungen von EACC zeigten, dass durch die Reduktion des reaktiven Härteranteils eine deutlich verbesserte Expansion des Schaumes erzielt werden konnte. Für detaillierte Ergebnisse der Bauteilfertigung und -prüfung wird auf den Bericht des Projektpartners EACC verwiesen. Die Entwicklung und Herstellung der Schaumhalbzeuge für den EACC-Demonstrator waren damit im Rahmen des Vorhabens abgeschlossen.

Im Rahmen von AP5 wurde durch CompriseTec ein weiterer Demonstrator mit direktem Bezug zur Luftfahrtanwendung entwickelt. Dabei handelt es sich um ein Bauteil aus dem Interior eines kommerziellen Flugzeugs, welche nach aktuellem Stand der Technik auf einem Verbundaufbau mit einem Wabenkern, phenolharzbasierten, thermisch nicht latenten Prepreg sowie einem sogenannten „Splice“ zur Kantenausbildung und Lastaufnahme basiert. Der verwendete Splice besteht aus einem epoxidharzbasierten Schaum. Die skalierte Fertigung der Ceiling Panel Demonstrators erfolgt in einem Demonstratorwerkzeug in Presstechnik bei erhöhter Temperatur mit einer Aushärtezeit von unter einer Stunde. Das nach aktuellem Stand der Technik verwendete Prozessfenster entspricht demjenigen, das auch für die im Rahmen des Projektes FST-FoamPreg entwickelten Materialien angewendet wurde. Das Demonstratorwerkzeug wird der CompriseTec vom Luftfahrt Supplier und potenziellen zukünftigen Anwender für die Dauer der Versuche zur Verfügung gestellt.

Zu den wichtigsten Anforderungen an das Ceiling Panel zählen der Brandschutz gemäß EASA CS-25 bzw. FAR 25.853, welcher die flammhemmenden, raucharmen und toxikologisch unbedenklichen Eigenschaften der eingesetzten Materialien sicherstellen muss, sowie eine ausreichende mechanische Stabilität. Das Panel muss Belastungen durch Vibrationen, Kabinendruckschwankungen und mechanische Einflüsse standhalten bei gleichzeitig möglichst geringem Gewicht.

Ziel der Untersuchungen war die Substituierung des aktuellen verwendeten Splicematerials sowie der Decklagen durch eine FST-FoamPreg-Variante. Die Substitution des gesamten Panels scheint auf Basis der aktuellen Dichtebereite (sh. Ergebnisse AP4) und der äußerst geringen Dichte der wenig belasteten Honeycombstruktur als wenig vielversprechend. Durch die Verwendung des im Rahmen des Projekts entwickelten Schaumhalbzeugs als Ersatz für den bislang eingesetzten Splice Film ergibt sich das Potenzial, die Materialdichte signifikant zu reduzieren und damit eine deutliche Gewichtseinsparung zu erzielen. In Kombination mit dem im Projekt entwickelten thermisch latenten Prepreg ergeben sich darüber hinaus sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile durch den Verzicht auf tiefkühlagerpflichtige Materialien, wie sie im Fall des phenolharzbasierten Prepregs erforderlich sind. Die angestrebte Kombination aus Splice-Material und Prepreg unterstützt außerdem einen Monomaterialansatz, der die Recyclingfähigkeit erhöht und die Komplexität des Materialverbunds reduziert. Insgesamt zeigt sich, dass die im Projekt entwickelten Materialien wesentliche Vorteile gegenüber dem Stand der Technik bieten und ein vielversprechendes Substitutionspotenzial für bestehende Komponenten im Bereich der Luftfahrtinterieurstruktur darstellen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Im Rahmen der Fertigung des Demonstrators sind insgesamt vier Fertigungsversuche vorgesehen. Der erste Versuch dient als Referenz und basiert auf dem aktuellen Stand der Technik (State of the Art, SOTA). Dabei wird ein Ceiling-Panel unter Verwendung der derzeit eingesetzten Materialien hergestellt.

In den nachfolgenden Versuchen erfolgt eine schrittweise Substitution der einzelnen Komponenten durch FST-FoamPreg-Halbzeuge. Für weitere Details sei an dieser Stelle auf den Erfolgskontrollbericht (Teil III) verwiesen.

Die Pressversuche werden an der Vertikalpresse Engel V-Duo 700 (ENGEL AUSTRIA GmbH, Schwertberg, Österreich) durchgeführt. Die Werkzeugtemperierung erfolgt über zwei Temperiereinheiten des Typs Tool-Temp MP-888 (Tool-Temp AG, Sulgen, Schweiz). Der Aufbau des Pressversuchs ist in Abbildung 2.27 dargestellt.

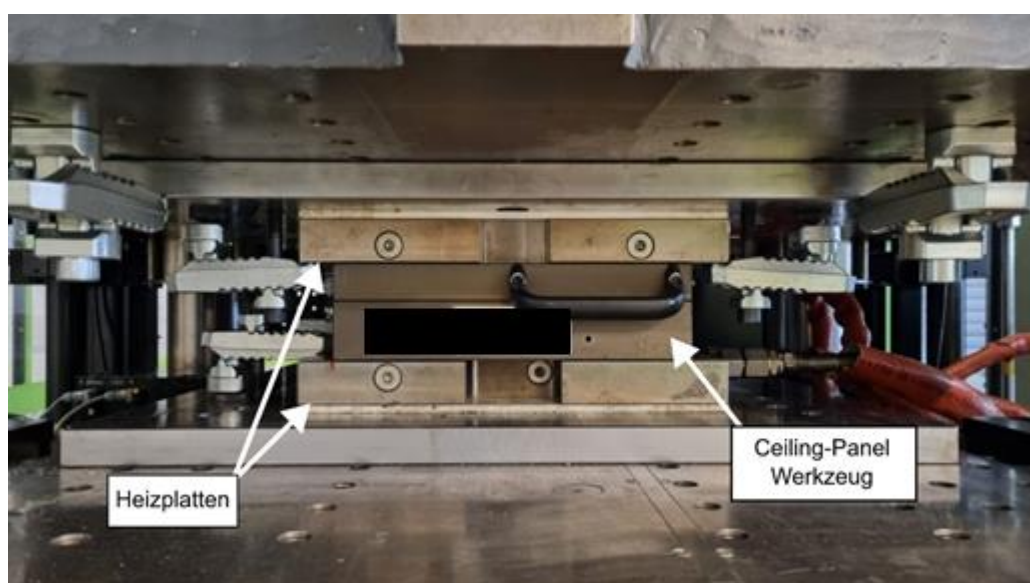


Abbildung 2.27: Aufbau des Pressversuchs.

Das Werkzeug zur Herstellung des Ceiling-Panels Demonstrators steht sowohl an der Ober- als auch an der Unterseite in direktem Kontakt mit den Heizplatten der Presse. Diese Heizplatten werden vor Beginn des Pressvorgangs auf Prozesstemperatur vorgeheizt, wobei die Vorheizdauer etwa 60 Minuten beträgt. Nach dem Einlegen des Werkzeugs in die Presse erfolgt eine Aufheizphase von ca. 40 Minuten, bis auch das Werkzeug die Zieltemperatur erreicht. Für den Pressvorgang wird eine Schließkraft von 1000 kN eingestellt, um ein vollständiges Schließen der Werkzeugform sicherzustellen.

Während der Halte- und Abkühlphasen wird der Stromverbrauch einer Temperiereinheit mit einem mobilen 32A-Digital-Drehstromzähler vom Typ SDM72 (NAKA24 GmbH, Seelow, Deutschland) erfasst. Da für die Temperierung jeweils eine Einheit pro Heizplatte (oben und unten) eingesetzt wird und von einem identischen Stromverbrauch beider Einheiten

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ausgegangen wird, wird der gemessene Verbrauch einer Einheit auch auf die zweite übertragen. Der Stromverbrauch der Presse wird durch die interne Software aufgezeichnet.

Der gesamte Ablauf – einschließlich Materialzuschnitt, Werkzeugvorbereitung und Pressprozess – erfolgt in Anlehnung an das für die Bauteile nach aktuellem Stand der Technik beschriebene Vorgehen und kann an dieser Stelle aus Gründen der Geheimhaltung nicht eingehender aufgezeigt werden.

Ceiling Panel Demonstrator x FST-FoamPreg Splicer

Der Legeprozess entspricht im Wesentlichen dem des Ceiling Panels nach aktuellem Stand der Technik. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die herkömmlichen Splicer durch das FST-FoamPreg Schaumsystem ersetzt werden.

Ceiling Panel Demonstrator x FST-FoamPreg Prepreg und Splicer

Bei der Substitution des Prepregs werden statt einer einzelnen Lage Randschutz Prepregs drei lagen des FST-FoamPreg Prepregs übereinandergelegt. Diese Maßnahme vermindert ein Durchschäumen des Schaumsystems durch die Randschicht. Der restliche Ablauf des Legevorgangs bleibt unverändert zum zuvor beschriebenen Prozess.

Ceiling Panel Demonstrator x FST-FoamPreg Prepreg, Splicer und Kern

Bei der vollständigen Substitution aller Hauptkomponenten – also des Wabenkerns, der Prepregs und der Splicer – werden ebenfalls drei Lagen Prepreg zur Ausbildung der Randschicht verwendet.

Zur Substitution des Wabenkerns werden FST-FoamPreg-Schaumhalbzeuge auf der unteren Prepreg-Decklage positioniert. Anschließend wird die obere Prepreg-Decklage so aufgelegt, dass sie an den Kanten der Splicer aufliegen.

Ergebnis

Die Qualität des Bauteils nach aktuellem Stand der Technik dient als Referenz und kann als zufriedenstellend bewertet werden. Das Prepreg weist weder Falten noch Lufteinschlüsse auf und die Splicer füllen die Kavitäten vollständig aus. Der Splice staucht die äußersten Waben und ein geringfügiges Einschäumen in den Hohlraum der Waben, ausgehend vom Splice der Einlage, kann beobachtet werden.

Die *Ceiling Panel Demonstrator x FST-FoamPreg Splicer* Variante bildet die Kavitätsform des Werkzeugs größtenteils wieder, jedoch sind ein Durchschäumen des Splices an den Kanten des Ceiling Panels sowie Einfallstellen zu sehen.

Das Durchschäumen deutet auf eine niedrigere Viskosität der Schaummasse beim Verschäumen im Vergleich zum SOTA Schaum hin, was ein Durchdringen des Schaumes durch

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

die Gewebelagen zur Folge hat. Es ist ein verstärktes Einschäumen der Schaummasse in den Hohlraum des Wabenkerns im Vergleich zum SOTA Ceiling Panel zu verzeichnen. Zudem wird der Wabenkern weniger stark durch den Splice gestaucht, als es beim SOTA Ceiling Panel der Fall ist, was durch eine geringere Anpresskraft durch den FoamPreg Splice begründet wird. Es treten Einfallstellen an den Kanten auf, was ebenfalls auf die geringe Anpresswirkung durch die Splicer auf die Prepreg Randstreifen zurückzuführen ist.

Aufgrund dieses Ergebnisses wurden kleinskalige Zwischenversuche in Form von Blockproben durchgeführt, um den Einfluss von mehreren Randstreifenlagen auf das Durchschäumverhalten zu prüfen. Die Verwendung von drei Randstreifenlagen führte zu einer zufriedenstellenden Reduzierung des Durchschäumens. Somit wurden beim Pressversuch des *Ceiling Panel Demonstrator x FST-FoamPreg Prepreg und Splicer* drei Randstreifen verwendet.

Nach dem Pressvorgang lag eine glatte, faltenfreie Oberfläche vor. Das Ergebnis des *Ceiling Panel Demonstrator x FST-FoamPreg Prepreg und Splicer* Pressversuchs zeigt ein vermindertes Durchschäumen des Splices durch die FoamPreg Prepregs im Vergleich zum *Ceiling Panel Demonstrator x FST-FoamPreg Splicer* Panel. Dies deutet darauf hin, dass der Einsatz von drei Randstreifen zur Verhinderung des Durchschäumens erfolgreich ist. Einfallstellen sind jedoch auch bei dieser Ceiling Panel Variante präsent, möglicherweise aufgrund der bereits genannten niedrigeren Anpresswirkung durch den *FoamPreg Splice*. Die geringere Anpresswirkung kann entweder materialbedingt durch eine geringere Aufschäumung (u.a. durch weniger Material) oder prozessbedingt durch zu langsames Aufheizen des Schaums beim Pressversuch resultieren. Durch eine weitere Entwicklung des FoamPreg Schaumsystems oder des Fertigungsprozesses kann die Verwendung von lediglich einem Randstreifen in Aussicht gestellt werden.

Die gepresste Ceiling Panel Variante der *Ceiling Panel Demonstrator x FST-FoamPreg Prepreg, Splicer und Kern* mit vollständiger Substitution aller Materialien weist im Vergleich zu den vorherigen Varianten die meisten Fehlstellen auf, jedoch konnte die Form der Werkzeugkavität grundlegend abgebildet werden. Das kernsubstituierende Schaumhalbzeug füllt die Kavität in der aktuellen Konfiguration nicht vollständig aus, was zu großen Hohlräumen im Bauteil geführt hat. Zwischen dem Prepreg des Einlegers und des oberen Decklagenprepregs liegt ebenfalls ein Hohlraum vor. Die seitlichen Ränder des Ceiling Panels werden weitgehend durch die zusätzlich eingelegten Splicer an den Rändern zufriedenstellen ausgeformt. Einfallstellen und Falten, besonders auffällig an den Prepreg Decklagen, können einer nicht ausreichenden Füllung des Werkzeugs mit Schaumhalbzeugen, einem zu niedrigen Anpressdruck durch das Aufschäumen oder dem Fertigungsprozess mit zu langer Aufheizzeit der Schaumhalbzeuge zugeordnet werden.

Die Massen aller gepressten Ceiling Panel Varianten sind in Abbildung 2.28 und die Massersparnispotentiale in Tabelle 2.4 aufgeführt. Zusätzlich wird eine potentielle Ceiling Panel Variante mit FoamPreg Splicer und FoamPreg Prepreg Substitution aufgeführt, welche durch zusätzliche Entwicklungsarbeit nur eine Lage Prepreg Randstreifen enthält und dennoch ein zufriedenstellendes Ceiling Panel ohne Durchschäumung, Einfallstellen oder Faltenbildung ergibt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

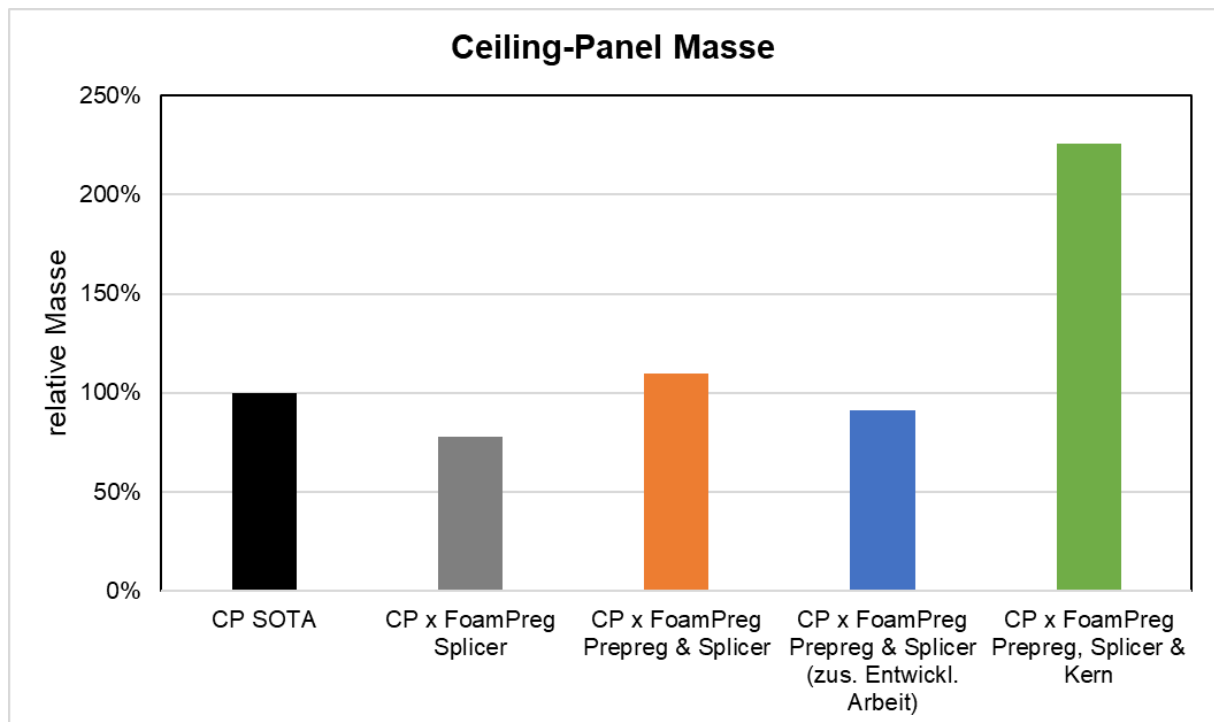


Abbildung 2.28: Massen der gepressten Ceiling Panel Varianten.

Tabelle 2.4: Potential zur Masseersparnis der Ceiling Panel Varianten.

Ceiling Panel Variante	Potential der Masseersparnis [%]
CP x FoamPreg Splicer	22,2
CP x FoamPreg Prepreg & Splicer	-9,5
CP x FoamPreg Prepreg & Splicer (zus. Entwickl. Arbeit)	8,8
CP x FoamPreg Prepreg, Splicer & Kern	-125,7

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die Substitution des aktuell verwendeten Splicer Systems durch eine FST-FoamPreg Lösung nicht nur eine signifikant sicherere und ökologisch schonendere Variante hergestellt werden kann, sondern sich auch eine Gewichtersparnis von bis zu ca. 9 % des Gesamtsandwichbauteils realisieren lässt (vgl. Abschnitt 2.2 zur Ökobilanzierung).

Im Rahmen des Projekts wurde darüber hinaus eine detaillierte Kostenkalkulation für die Materialkosten des bestehenden „State-of-the-Art“ (SOTA) Ceiling Panels sowie der drei entwickelten Varianten durchgeführt. Ergänzend wurde eine vierte Variante im Sinne eines technologischen Ausblicks betrachtet, bei der der Prepreg-Anteil der Variante 2 reduziert wurde.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Grundlage der Kalkulation bildeten die in Tabelle 2.5 aufgeführten Kilopreise der eingesetzten Materialien. Die Ergebnisse der Kostenkalkulation sind im Erfolgskontrollbericht aufgeführt.

Tabelle 2.5: Materialkosten der eingesetzten Ceiling Panel Materialien

	SOTA Wabenkern	SOTA Prepreg	SOTA Splice	FST- FoamPreg Splice	FST- FoamPreg Prepreg
Preis [€/kg]	675,00	30,00	217,00	414,00	100,00

Es kann jedoch an dieser Stelle festgehalten werden, dass durch die Substitution des herkömmlichen Splice-Materials mit dem FST-FoamPreg-Schaumsystem die Kosten pro Panel signifikant um ca. 10 % (exkl. Lackierung und Finish) gesenkt werden können.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

3 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Entwicklungsarbeiten wurden insbesondere umfassende Personalkosten seitens CT aufgewendet. Der Gesamtbedarf an Personalmitteln hat den Umfang der ursprünglichen Vorkalkulation überschritten. Dafür konnten an einigen Stellen durch Eigenleistung oder zusätzliche Kooperationen (Beispiel: Demonstratorwerkzeug) Sachausgaben eingespart werden. Entsprechende Mittelumwidmungen wurden mit dem Projektträger kommuniziert und umgesetzt. Zur Nachwuchsförderung wurden im Rahmen des Vorhabens mehrere Studenten beschäftigt, bspw. im Rahmen von Bachelor- und Projektarbeiten.

Zudem wurden Sachkosten aufgewendet in Form von Materialkosten, Investitionen und sonstigen unmittelbaren Vorhabenskosten, beispielsweise für die im Rahmen der Arbeitspakete verwendete Anlagentechnik (Dreiwalzwerk Exakt mit Zubehör, Presse Engel, Temperiergerät Tooltemp), aber auch für die verwendete Software (CAD, Ökobilanzierung) und für Werkzeugkomponenten (Heizplatten Sample und Demonstratorwerkzeug) und die Harzfilmherstellung (Komponenten für Filmziehgerät mit Zubehör).

Zudem erfolgte die externe Beauftragung der Carbamatproduktion im Technikumsmaßstab bei einem Lohnfertiger, mit welcher erfolgreich nachgewiesen werden konnten, dass zum einen eine technische Herstellung des Carbamats auch außerhalb der Laborbedingungen am LPW möglich ist und zudem erste Preisschätzungen durch kommerzielle Lieferanten möglich waren.

Der Großteil der übrigen Materialkosten (neben Werkzeugkomponenten) wurde direkt für den Bedarf der experimentellen Arbeiten an Verbrauchs- und Hilfsmitteln sowie Basismaterial aufgewendet. Zur Erstellung der Sicherheitsdatenblätter für die Materialbereitstellung an die Projektpartner und die sichere Handhabung wurde die Firma UMCO beauftragt.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Im Rahmen des Gesamtvorhabens FST-FoamPreg wurde von Seiten der Projektpartner eine noch nicht industriell angewendete Technologie zur Herstellung von thermisch latenten Halbzeugen für Epoxidharzschäume und Prepregs und die Kombination aus beiden bis hin zu Sandwichpaneelen und -bauteilen entwickelt. Es wurden seitens CompriseTecs grundlegende Arbeiten, nicht nur der Material- und Prozessentwicklung, sondern auch in Vorbereitung auf eine weitere Industrialisierung einer innovativen und potenziell nachhaltigen Technologie für unterschiedliche Sektoren durchgeführt. Das bereits im Projektantrag dargestellte hohe wissenschaftlich-technische Risiko sowie das damit zusammenhängende wirtschaftliche Risiko (ausführlich dargestellt in Abschnitt 4 & 5) hinderte die Projektpartner an der Durchführung des Vorhabens ohne finanzielle Unterstützung.

Der finanzielle Spielraum von CT muss aus den Gewinnen des laufenden Tagesgeschäfts erwirtschaftet werden. Im Wettbewerb der Entwicklungsspezialisten und Kleinserienproduzenten für Polymerbauteile, dem CompriseTec zuzurechnen ist, sind jedoch keine so hohen Überschüsse zu erwirtschaften, als dass die Entwicklung einer neuen Technologie komplett allein finanziert werden könnte. Zudem hätten die avisierten

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Entwicklungstätigkeiten seitens des akademischen Projektpartners für die Materialentwicklung und Analyse ohne eine Förderung für CT nicht darstellbare zusätzliche Kosten bedeutet. Eine Finanzierungsmöglichkeit durch die Europäische Union bestand nicht.

Der in Anspruch genommene Entwicklungsaufwand wurde von Seiten CompriseTecs durch potenzielle Verwertungsperspektiven (vgl. Erfolgskontrollbericht) motiviert. Die technologische Tiefe des Projektes machte die durchgeführten Entwicklungsarbeiten unabdingbar. Der entsprechende Aufwand wird von Seiten von CT als angemessen bewertet vor dem Hintergrund des erreichten technologischen Fortschrittes sowie der ersten Schritte zur Dissemination der Projektergebnisse (vgl. Erfolgskontrollbericht) und dem potenziellen Anteil an einem neuen nachhaltigen Technologiefeld.

5 Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Rahmen des Vorhabens „FST-FoamPreg“ wurden durch CompriseTec umfangreiche Entwicklungen im Bereich thermisch latenter Schaumhalbzeuge auf Epoxidharzbasis realisiert. Der Fokus lag auf der Formulierung und Verarbeitung flammgeschützter Schäume, die mittels Carbamaten expandiert werden und die Entwicklung thermisch latenter Halbzeuge auf dieser Materialbasis. CT konzentrierte sich im Projektverlauf auf die Entwicklung von Schäumen mittlerer Dichte mit hoher mechanischer Belastbarkeit, die sich insbesondere für Sandwichanwendungen eignen. Die Kombination dieser Schaumtechnologie mit den ebenfalls im Rahmen des Vorhabens entwickelten thermisch latenten Prepregs eröffnet neue Wege für die Herstellung vollständig latenter Sandwichhalbzeuge. Bereits während der Projektlaufzeit konnten erste Kontakte zu potenziellen Anwendern im Bereich Luftfahrt und Automobil (Projektpartner EACC) geknüpft werden. Die erzielten Materialeigenschaften – insbesondere die einstellbare Flammgeschützwirkung, die praxisorientierte Handhabung und Lagerfähigkeit der Halbzeuge sowie die kurze Prozesszeit wurden von Industriepartnern als hochrelevant eingestuft. CT wird diese Kontakte nun gezielt weiterverfolgen, um die entwickelten Lösungen in marktfähige Produkte zu überführen.

Nach erfolgreichem Abschluss des Projekts hat CT eine vielversprechende Ausgangsposition für die wirtschaftliche Verwertung der entwickelten Technologien erreicht. Im Fokus steht dabei die neuartige FoamPreg-Technologie, bei der thermisch latente Schaumformulierungen in Form von Pasten oder flächigen Halbzeugen bereitgestellt werden können und mit ebenfalls thermisch latenten Prepregs kombiniert werden. Dieser Ansatz ermöglicht die Herstellung flammgeschützter, leichter und formflexibler Sandwichbauteile in einem effizienten Verarbeitungsprozess ohne Tiefkühllogistik und -lagerung, die insbesondere in der Luftfahrt, im Automobilbereich sowie im Bahnsektor Anwendung finden. Durch das sich ergebene Leichtbaupotenzial sowie die effiziente Verarbeitung und thermische Latenz ergeben sich neben ökonomischen und technologischen auch ökologische Vorteile gegenüber dem Stand der Technik, welche im mittels einer projektbegleitenden Ökobilanzierung nachgewiesen werden konnten.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die im Projekt entwickelten Schaumhalbzeuge zeichnen sich durch ihre thermisch latente Struktur aus, die eine energieeffiziente Verarbeitung, gute Handhabbarkeit (vgl. Schlussbericht Projektpartner EACC) und eine hohe Designfreiheit erlaubt. Die im Projekt realisierten Demonstratoren haben die Leistungsfähigkeit der Technologie für Anwendungen im Luftfahrtbereich unter Beweis gestellt. Auch im Automobilbereich konnten vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die FoamPreg-Technologie nicht nur für Anwendungen mit Brandschutzanforderungen genügt, sondern auch außerhalb davon Gewichtsvorteile und gestalterische Flexibilität bietet. Diese Eigenschaften sind insbesondere für Premiumhersteller und den Sonderfahrzeugbau von großem Interesse.

CT verfolgt eine gezielte Markteintrittsstrategie über kundenspezifische und spezialisierte Nischenprodukte. Der Fokus liegt zunächst auf Anwendungen mit hohen technischen Anforderungen, besonderen Anforderungen im Hinblick auf die Prozesstechnik, eine hohe Kompatibilität zu den verwendeten Wabenkernen und Decklagen und geringere Stückzahlen. Diese Anwendungen bieten nicht nur höhere Margen und eine höhere Preisflexibilität, sondern auch eine geringere Markteintrittsbarriere, was eine zügige Etablierung der Technologie ermöglicht. Für weitere Details hierzu sei an dieser Stelle auf den Erfolgskontrollbericht verwiesen.

Ein zentrales Thema im Rahmen der Skalierung ist die Rohstoffverfügbarkeit, insbesondere des Carbamats, das als thermisch latentes Treibmittel eine Schlüsselrolle in der Schaumformulierung spielt. Die Möglichkeit das Carbamat mit möglichst geringen Kosten in skalierbarer Menge zu produzieren bzw. zu beziehen, ist ein wesentlicher Baustein für die zukünftige Verwertung der FoamPreg-Technologie. CT hat daher frühzeitig Maßnahmen zur Risikominimierung ergriffen: Neben der Diversifizierung der Lieferantenbasis wurden auch alternative chemische Formulierungen geprüft. Langfristig ist eine Lohnfertigung mit Partnern aus der chemischen Industrie avisiert, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Erste Produktionsversuche im Technikumsmaßstab wurden hierzu im Rahmen des Vorhabens bereits erfolgreich durchgeführt.

CT plant in Zukunft als Hersteller der Epoxidharz-Carbamat Formulierungen in Form von Pasten und ggf. flächigen Halbzeugen zu fungieren. Die Herstellung des Carbamats sowie ggf. auch weitere Fertigungsschritte sollen zukünftig (je nach Entwicklung der Produktionsskalierung) über verlängerte Werkbänke mit bereits etablierten Partnern erfolgen. CT agiert weiterhin als Entwicklungspartner und bietet Dienstleistungen in den Bereichen Materialentwicklung, Prozessentwicklung und Bauteilkonstruktion an.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse und die erfolgreiche Umsetzung der Demonstratoren belegen das hohe Marktpotenzial der entwickelten Technologien. Trotz bestehender Herausforderungen – insbesondere bei der Rohstoffbeschaffung – sieht CT eine klare wirtschaftliche Perspektive. Die Konzentration auf hochwertige Nischenprodukte bildet dabei die Grundlage für eine nachhaltige Etablierung im Markt und eröffnet langfristig auch Chancen für eine breitere industrielle Anwendung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

6 Veränderung des Stands der Technik und relevante Ergebnisse von dritter Seite, welche die Projektverwertung signifikant beeinflussen

Im Berichtszeitraum sind keine relevanten Forschungs- und Entwicklungsergebnisse von dritter Seite bekannt geworden im Feld der thermisch latenten Epoxidharzschaumpasten und -halbzeuge. Dies umfasst u.a. sowohl Ergebnisse, die den Inhalt einzelner Arbeitspakete signifikant beeinflussen können, als auch Ergebnisse die eine Anpassung der Zielsetzung erforderlichen machen oder die Verwertungsperspektive aus Sicht des Konsortiums signifikant beeinflussen. Für nähere Details zum Bereich der thermisch latenten Prepregs und der Automotive Anwendungen sei an dieser Stelle auf die Berichte der jeweiligen Projektpartner verwiesen. Es ist somit auch in dieser Hinsicht keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt, welche die Verwertung des Projektes gefährden.

7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Zur Attrahierung neuer Anwendungsfelder im maritimen Sektor wurde das Projekt im Oktober 2022 auf dem CMT Marilight Technologie Transfer Workshop in Hamburg vorgestellt.

Zusätzlich werden Teile der Projektergebnisse unter Federführung des Projektpartners LPW auf der SAMPE EU Konferenz 2025 in Amsterdam vorgestellt. Eine weitere Veröffentlichung der Projektergebnisse im Rahmen der JEC World Messer 2026 (z.B. als Beitrag zu den JEC Awards) in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und ggf. Diehl Aviation ist Gegenstand aktueller Diskussionen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

8 Literatur

- [Air] Airex AG, Data Sheet Airex T90 02.2012, Easy Processing Structural FST Foam, , Sins, Schweiz, 2012
- [Bet1]: C. Bethke, S. A. Sanchez-Vanquez, D. Raps, V. Altstädt. Effect of Resin and Blocked/Unblocked Hardener Mixture on the Production of Epoxy Foams with CO₂ Blocked Hard-ner in Batch Foaming Process. *Polymers* 2019, 11, 793.
- [Bet2]: C. Bethke, S. T. Kaysser, D. N. Uy Lan, S. M. Goller, V. Altstädt. Synthesis and characterization of carbamates as latent curing and foaming agents for epoxy resins. *Ind. Eng. Chem. Res.* under review.
- [Bet3]: C. Bethke, D. Goedderz, L. Weber, T. Standau, M. Döring, V. Altstädt. Improving the flame-retardant property of bottle-grade PET foam made by reactive foam extrusion. *J. Appl. Polym. Sci.* 2020, 137, e49042
- [Bet4]: C. Bethke, L. Weber, D. Goedderz, T. Standau, M. Döring, V. Altstädt. Fire behavior of flame retarded sandwich structures containing PET foam cores and epoxy face sheets. *Polym. Comp.* 2020, 41, 5195–5208
- [Bra] <https://www.aerointernational.de/airlines-nachrichten/studie-lufthansa-monopol-droht-vor-allem-auf-innerdeutschen-strecken.html>, abgerufen am 22.07.2025
- [Dia] Diab Group, Datasheet Diab Divinycell F rev25 SI August 2022, Helsingborg, Schweden, 2022
- [Gen] General Plastics, LAST-A-FOAM® FR-3800 FST RIGID POLYURETHANE FOAM, Tacoma, USA, 2022
- [Grü] Dissertation Grünwald, Universität Bayreuth, 2017
- [Gur] Gurit Inc., General Datasheet Gurit PVC Structural Foam Core, PDS-Gurit PVC-11-0618, Bristol, USA
- [Kan1]: C. Kang, H.-Y. Kim, M. Kim, G. Goo, Anti-Skid Control System Anaylsis of a Tilting Train, *Transactions fo the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 2009. 269-178
- [Kay]: S. T. Kaysser, C. A. Keun, C. Bethke, V. Altstädt. Tailoring epoxy foam properties with an innovative process approach using CO₂ as blowing agent. *Society for Advancement of Material and Process Engineering* 2020 , 1-15
- [Kay2] S. Kaysser, Dissertation, Carbatmat-geschäumte Epoxidharze – Optimierung von Brandverhalten und Mechanik durch Füllstoffe, Universität Bayreuth, 2024.
- [Len] Lengsfeld, Wolff-Fabris, Krämer, Altstädt, Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung, Hanser 2016
- [Liu]: Q. Liu, D. Wang, Z. Li, Z. Li, X. Peng, C. Liu, Y. Zhang, P. Zheng. Recent Developments in the Flame-Retardant System of Epoxy Resin. *Materials* 2020, 13, 2145
- [Luf] <https://report.lufthansagroup.com/2024/annual-report/de/zusammengefasster-lage-bericht/grundlagen-des-konzerns/flotte-und-streckennetz/flotte/>, abgerufen am 22.07.2025

- [Neu1] Neumeyer, Bonotto, Krämer, Döring, Altstädt, Fire behavior and mechanical properties of an epoxy hot-melt resin for aircraft interiors, Composite Interfaces, 2013
- [Neu2] Neumeyer, Struktur und Eigenschaften neuer, flammgeschützter Prepreg-Matrixsysteme für Anwendungen in der Kabine von Verkehrsflugzeugen, Dissertation 2015
- [Neu3] Neumeyer et al., Novel epoxy resins for aircraft interiors based on combinations of halogen-free flame retardants, CEAS Aeronautical Journal 2018
- [Pat1]: E.E. Weller, J. Plagains, U.S. Patent US3275587, 27 July 1966
- [Pat2]: L. Burt, A. Huntsville, U.S. Patent US3320187, 27 May 1967
- [Pat3]: A. Kühkamp, O. Mauz, S. Göwecke, US3406131, 15 October 1968
- [Pat4]: D. Bankmann, E. Barriau, M. Renkel, S. Wucherpfennig, O. Lammerschop, K. Braun, E.U. Patent EP2473559A1, 11 July 2012
- [Ren1]: Q. Ren, S. Zhu. One-Pack Epoxy Foaming with CO₂ as Latent Blowing Agent. ACS Macro Lett. 2015, 4, 693–697
- [Ren2]: Q. Ren, S. Zhu. Development of Epoxy Foaming with CO₂ as Latent Blowing Agent and Principle in Selection of Amine Curing Agent. Ind. Eng. Chem. Res. 2015, 54, 11056–11064
- [Sch] J. Schwennen, V. Sessner, J. Fleischer, A New Approach on Integrating Joining Inserts for Composite Sandwich Structures with Foam Cores, in: Procedia CIRP, 2016.
- [Sic] Sicomin Epoxy Systems, PB 270 i, PB 370 i & PB 570 i - Technical datasheet, 2015
- [Wen] D. Wennberg, Light-weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels, in: Kth R. Inst. Technol., 2011.
- [Wil] J. Wilson, B. Hussey, Status of ECSS E-30 - Space engineering handbooks on CDROM: Structural materials handbook, insert design handbook and adhesive bonding handbook, in: Eur. Sp. Agency, (Special Publ. ESA SP, 2005.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages