



Polymer Composites

Schlussbericht

ZE: Technische Universität Hamburg – Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe	Förderkennzeichen: 03INT504BB
Vorhabenbezeichnung: COMP-1633 - Flame retardant FRP systems for aircraft interior applications	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2017 - 30.06.2021	
Berichtszeitraum: 01.10.2017 - 30.06.2021, Schlussbericht	

Erstellt von: Julian M. Karsten, M. Sc.
Benedikt Kötter, M. Sc.
Dr. Hans Wittich
Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler

Name: Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler

Datum: 13.12.2021

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03INT504BB gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Rechtsverbindliche Unterschrift (Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Inhaltsverzeichnis:

1	Kurzfassung.....	- 3 -
1.1	Aufgabenstellung.....	- 3 -
1.2	Ausgangssituation und Voraussetzungen.....	- 4 -
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	- 4 -
1.3.1	Arbeitspakete.....	- 5 -
1.3.2	Meilensteine.....	- 22 -
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	- 23 -
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	- 24 -
2	Eingehende Darstellung der Ergebnisse.....	- 26 -
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	- 62 -
2.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	- 62 -
2.3	Notwendigkeit der geleisteten Arbeit.....	- 62 -
2.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	- 63 -
2.5	Veränderung des technologischen Status quo im Vorhabenzeitraum.....	- 63 -
2.6	Veröffentlichungen.....	- 64 -
3	Erfolgskontrollbericht.....	- 66 -
4	Anhang.....	- 68 -



1 Kurzfassung

1.1 Aufgabenstellung

Im Zuge der weltweiten Bemühungen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs und der Emission von Treibhausgasen, stehen zunehmend die Industrie und der Verkehrssektor in der Pflicht. In der Luft- und Raumfahrt und der Zulieferindustrie sollen diese Ziele vor allem durch Gewichtsreduzierung, geringeren Kraftstoffverbrauch und Effizienzsteigerung in den zugrunde liegenden Produktionsprozessen erreicht werden. Betrachtet man die Anstrengungen, die unternommen werden um ein Kilogramm in einem Flugzeug einzusparen, spiegelt dies die Notwendigkeit, aber auch die Komplexität solcher Aufgaben wieder, da hier eine Vielzahl von Themen und Anforderungen berücksichtigt werden müssen, sich aber auch ein enormes Potenzial der Kosteneinsparung im laufenden Betrieb bietet.

Eine verbreitete Methode zur Gewichtseinsparung ist die Substitution von herkömmlichen Leichtbaumaterialien (Aluminium und Titan) durch Polymere- und Faserverbundwerkstoffe in Strukturbauteilen und dem Flugzeuginnenraum. Besonders in der letztgenannten Anwendung geht dies einher mit strengen Anforderungen (z.B. die EU-Chemikalienverordnung REACH) an die allgemeine chemische Unbedenklichkeit der verwendeten Polymerwerkstoffe und insbesondere deren Entflammbarkeit und damit verbundene Rauchentwicklung und Giftigkeit (Flame, Smoke, Toxicity - kurz: FST). Bestehende Materialien wie Phenolharze weisen zwar im Allgemeinen gute flammhemmende und rauchentwickelnde Eigenschaften auf, haben aber erhebliche Nachteile in Bezug auf die Gesundheitsverträglichkeit, die mechanischen Eigenschaften und hinsichtlich ihrer Herstellbarkeit in automatisierten Prozessen. Dieser Umstand verdeutlicht, dass die Entwicklung neuer FST-Werkstoffe und neuer Prozesstechnologien von grundlegender Bedeutung ist. Um solche neuen FST-Werkstoffe entwerfen zu können, muss ein umfassendes Verständnis der allgemeinen werkstofflichen Eigenschaften und Wirkzusammenhänge gewonnen werden. FST Eigenschaften sind hierbei als ganzheitliche Systemeigenschaft zu verstehen, sie werden also nicht nur durch den reinen Werkstoff selbst, sondern durch das gesamte technische Bauteil (Werkstoff, Herstellung, Geometrie, Umgebung etc.) beeinflusst. Diese ganzheitliche Betrachtungsweise stand im Fokus dieses Forschungsprojekts.

Aufgrund der typischen Struktur und Zusammensetzung aktueller Bauteile des Flugzeuginnenraums aus Paneelen, Profilen und Verbindungselementen, kommen viele verschiedene Fertigungstechniken zum Einsatz.

Das Ziel dieses Projekts ist es, einen Beitrag hierfür zu leisten, indem verschiedene bekannte Herstellungsverfahren (SMC-Heißpressen, Prepreg-Imprägnierung/Heißpressen, Pultrusion) weiterentwickelt werden, um die Herstellung von Werkstoffen mit anspruchsvoller Verarbeitbarkeit für die unterschiedlichen Innenraumkomponenten zu ermöglichen. Darüber hinaus werden neue bzw. modifizierte Werkstoffe entwickelt, z.B. durch den Einsatz von neuen Nanozellulosefilamenten und anderen Nanopartikeln oder Flammenschutzmitteln, um das FST-Verhalten erschwinglicher Harzsysteme zu verbessern, ohne deren mechanische oder thermische Eigenschaften negativ zu beeinträchtigen. Die entwickelten Materialien und Technologien werden anschließend zur Herstellung von Demonstrationsteilen für die Innenausstattung von Flugzeugen verwendet, die die erreichbaren Eigenschaften repräsentieren und gleichzeitig als Transferreferenz für weitere Anwendungen dienen und das technologische und wirtschaftliche Potenzial demonstrieren.

Zu diesem Zwecke haben sich mehrere deutsche und kanadische Partner aus Forschung, Entwicklung und Industrie zusammengeschlossen um entsprechend ihrer fachlichen Kompetenzen unter deutscher Projektleitung der Firma CompriseTec GmbH dieses Forschungsvorhaben umzusetzen. Das Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe der



Technischen Universität Hamburg unterstützt hierbei das Vorhaben und alle Projektpartner durch seine langjährige Erfahrung im Bereich der Herstellung, Verarbeitung und Materialprüfung von Kunststoffen und Faserverbunden. In unserem Abschlussbericht widmen wir uns insbesondere den von uns durchgeführten Materialtests, der Mitentwicklung und Prozessoptimierung des DirectPreg-Prozesses, sowie der Entwicklung und Verarbeitung von partikelgefüllten FST-Polymeren und FST-Kompositen.

1.2 Ausgangssituation und Voraussetzungen

Das Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe der TUHH hat langjährige Erfahrung in der Verarbeitung von duromeren Polymeren in verschiedenen Fertigungsverfahren wie dem Resin-Transfer-Moulding-Verfahren (RTM) und der Prepreg-Autoklav-Technologie. Ebenso liegt umfassende Expertise zur mechanischen, thermo-mechanischen und thermischen Charakterisierung von unmodifizierten und partikelmodifizierten Harzsystemen und Faserverbunden sowie zu deren Modifikation selbst vor. Entsprechende Forschungsergebnisse wurden und werden in der internationalen Fachliteratur sowie in institutsinternen Dissertationen publiziert. Die erforderliche Laborausstattung, sowie die notwendigen Prüfmaschinen zur Durchführung der beschriebenen Arbeiten sind am Institut vorhanden. Darüber hinaus verfügt das Institut über ein regionales, deutschlandweites und internationales Netzwerk und zahlreiche Kontakte zu Harzherstellern, Anlagenbauern und Materiallieferanten, die für das in diesem Projekt umgesetzte Vorhaben vorteilhaft waren.

Für die Durchführung der Projektarbeiten konnte das Institut auf die Kapazitäten der Institutsleitung und der angestellten wissenschaftlichen Mitarbeiter, sowie auf studentische Hilfskräfte und Studenten im Rahmen ihrer Studien- und Abschlussarbeiten zurückgreifen.

Jeder Projektpartner liefert darüber hinaus seine eigenen Expertisen in den Bereichen der Forschung und Entwicklung in Materialwissenschaften, industrieller oder Prototypen Fertigung und Produktion, Versuchsdurchführung und Materialtests, sowie ihr eigenes Expertennetzwerk, wodurch das Projekt zusätzliche Unterstützung fand.

Das letzte Jahr des Projektes musste unter den erschwerten Bedingungen der Corona-Pandemie durchgeführt werden. Dabei kam es auf Seiten der TUHH zu einer mehrmonatigen Schließung des Campus bzw. zu einem stark eingeschränkten Betrieb der Universität, sodass insbesondere Labore und Einrichtungen nur bedingt nutzbar waren. Von entsprechenden durch die Corona-Pandemie hervorgerufenen Einschränkungen waren alle Projektpartner und externen Zulieferer betroffen. Darüber hinaus fand während der Projektlaufzeit ein personeller Wechsel der bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter statt, wodurch sich eine Verzögerung der Projektlaufzeit gegenüber der ursprünglichen Planung ergab. Näheres im Kapitel 1.3.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Projektantrag wurden die Projektplanung und das Arbeitsprogramm im Einvernehmen aller Projektpartner festgehalten. Zur Detailplanung und Kontrolle der Leistungsfortschritte wurden in regelmäßigen Abständen Projekttreffen vereinbart. So wurde monatlich der Fortschritt aller Partner in Telefon-/Videokonferenzen besprochen. Darüber hinaus kam es zu regelmäßigen persönlichen Treffen der Landespartner und zwei Gesamtprojekttreffen in Hamburg (Deutschland) und Montreal (Kanada). Aufgrund des umfangreichen Vorhabens, der Anfang 2020 einsetzenden Pandemiesituation und der damit zusätzlich erschwerten Arbeits- und Zulieferersituation aller beteiligten Partner kam es im Vergleich zur ursprünglichen Planung zu Verzögerungen innerhalb des Projekts, sodass seitens des Projektträgers eine kostenneutrale Projektverlängerung vom 30.09.2020 bis zum 30.06.2021 für das Institut genehmigt wurde.



Auch die regelmäßigen Projekttreffen wurden je nach lokaler Pandemie-Situation teilweise ausgesetzt oder in größeren Abständen neu terminiert um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden.

1.3.1 Arbeitspakete

Der Inhalt des Projekts wird gemäß der Gesamtzielsetzung des Vorhabens in verschiedene Arbeitspakete (AP) gegliedert. Diese AP sind wiederum in einzelne Teilarbeitspakete (AP1a, etc.) untergliedert. Neben der nachfolgenden, inhaltlichen Beschreibung der Arbeitspakete und Teilarbeitspakete wird die jeweilige Beteiligung der Projektpartner benannt. Die Auflistung der folgenden Arbeitspakete wurde sinngemäß aus dem englischen Original (Vorhabenbeschreibung zu COMP-1633) übersetzt. Für die Durchführung der Arbeitspakete ist die Originalschrift für alle beteiligten Partner bindend. Eine vereinfachte schematische Darstellung der Kernarbeitspakete (AP1-AP9) ist mit Abbildung 1 gegeben. Die Arbeitspakete mit maßgeblicher Beteiligung des Instituts sind in dunkelblau hervorgehoben.

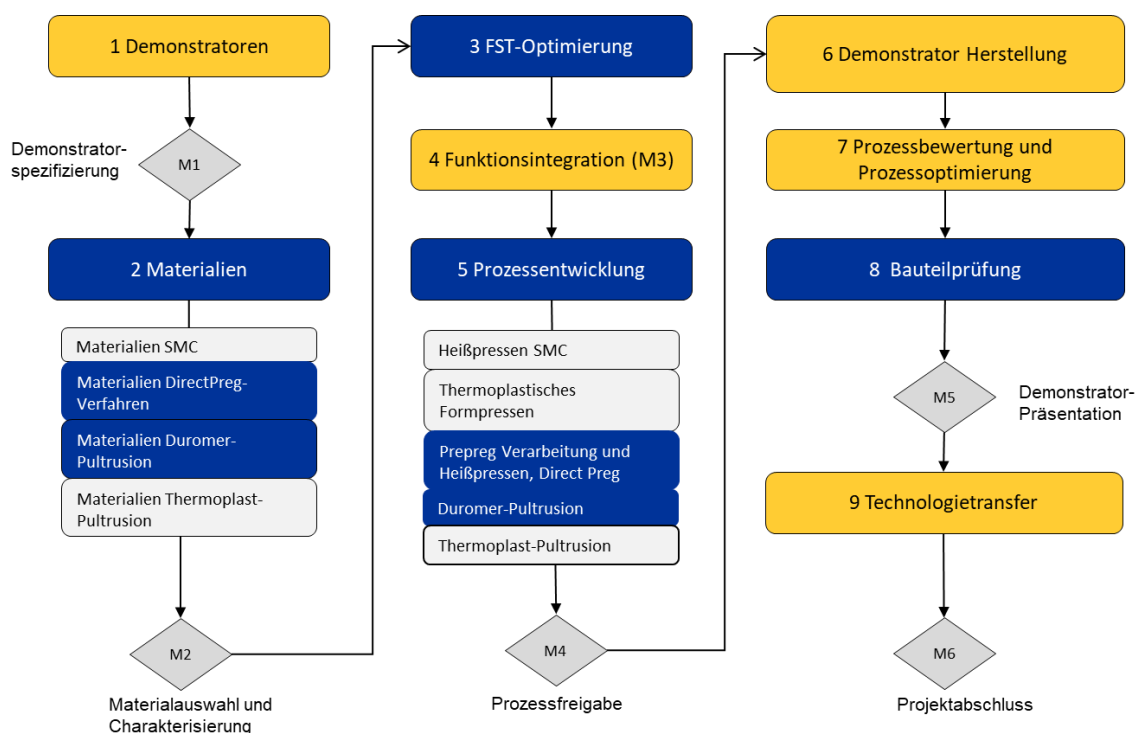


Abbildung 1: Übersicht der Projektorganisation nach Arbeitspaketen und Meilensteinen

Es folgt die ganzheitliche Darstellung der Arbeitspakete des Projekts. Für die Beschreibung der nicht führend von der TUHH bearbeiteten Arbeitspakete und Meilensteine wird auf die Berichte der deutschen Projektpartner CompriseTec GmbH und der Helmut-Schmidt-Universität, sowie den kanadischen Projektpartnern verwiesen.

AP 0 - Projektmanagement und Dokumentation

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Gesamtkoordination des Projekts und die Projektdokumentation.

Spezifische Ziele:

- Projektmanagement: administratives und finanzielles Projektmanagement; Überwachung des Projektfortschritts; Fortschrittskontrolle.
- Projektkommunikation: Definition, Bereitstellung, Einrichtung und Pflege der Kommunikationsverfahren und -instrumente zwischen allen Projektpartnern, um einen effizienten Kommunikationsfluss zu gewährleisten.



- Projektdokumentation: Erstellung von Sitzungsprotokollen und Projektberichten.

Erwartetes Ergebnis:

Die erwarteten Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind die folgenden:

- Alle Projektaufgaben sind erfolgreich abgeschlossen,
- Es liegen detaillierte Berichte über die Projektergebnisse vor,
- Abschlussberichte werden erstellt und an die Projektpartner verteilt.
- Alle Ressourcen werden effizient verwaltet.

AP 0.1 - Verwaltung der Ressourcen

Verantwortlich: CT, KBM, POLY

Der Projektkoordinator ist für die Verwaltung des Projekts verantwortlich, einschließlich der Verteilung der Arbeit unter den Projektpartnern und die Bewertung der Ergebnisse. Aufgrund der Anzahl der beteiligten Partner und zweier verschiedener Länder ist ein erheblicher Koordinierungsaufwand erforderlich. Die Hauptaktivitäten der Projektkoordination wurden von CompriseTec übernommen.

AP 0.2 - Projektkommunikation

(CT, KBM, POLY, ETS)

Die Projektkoordinatoren organisieren Projekt-Telefonkonferenzen, Projekttreffen (national) und Projekttreffen (international), um den Projektfortschritt zu überwachen und die interne Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern zu fördern.

AP 0.3 - Projektdokumentation

(CT, KBM, POLY, ETS, alle)

Die Projektkoordinatoren erstellen Protokolle der Projekttreffen und Projektberichte, um über den Fortschritt des Projekts zu berichten und die Ergebnisse zu speichern. Alle Partner steuern ihre spezifischen Inhalte bei.

AP 1 - Definition und Entwicklung von Demonstrationsteilen

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Definition und Entwicklung verschiedener Demonstratorsteile, die in AP 5 hergestellt werden, um die entwickelten Materialien und Fertigungstechnologien zu demonstrieren.

Spezifische Ziele:

- Definition von Demonstratorsteilen und technischen Anforderungen,
- Design der Demonstratorsteile,
- Numerische Verifizierung des Demonstrator-Designs durch FE-Analyse, unter Verwendung der Modelle aus AP 2.

Erwartetes Ergebnis:

Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist die Definition und Entwicklung (Design und numerischer Entwurf und numerische Verifizierung durch FE-Analyse) eines Sandwichpaneel-Demonstrators, eines Pultrudier-Demonstrators und eines Demonstrators sowie die Definition der zugehörigen kritischen Eigenschaften und Spezifikationen.



AP 1.1 - Definition der Demonstratorteile und technischen Anforderungen (CT, PTI, POLY)

In einem ersten Schritt werden geeignete Demonstratorbauteile (Sandwichpaneel, Pultruderteil und Halterung) für Flugzeuginnenraumkomponenten, die alle erreichbaren Eigenschaften der in AP 2-4 entwickelten Eigenschaften repräsentieren und als Transferreferenz für weitere Anwendungen dienen können, definiert. Nach Definition der Demonstratorteile werden die technischen Anforderungen (Flamm-, Rauch- und Toxizitäts-, Mechanische, Chemische-, Optische-, Funktionelle-, Thermische-Eigenschaften, usw.) definiert.

AP 1.2 - Entwurf der Demonstratorteile (CT)

Die in AP 1.1 definierten Demonstratorteile werden entsprechend den technischen Anforderungen und den Anforderungen der entsprechenden Fertigungstechnologien entwickelt. Das Design wird in Abhängigkeit von den Ergebnissen von FE-Analysen iterativ angepasst.

AP 1.3 - FE-Analyse der Demonstratorteile (CT)

Unter Verwendung der in AP 2 entwickelten Materialmodelle werden die in Aufgabe 1.2 konstruierten Demonstratorteile durch FE-Analysen hinsichtlich der definierten mechanischen Anforderungen numerisch verifiziert.

AP 2 - Definition von Materialien; Entwicklung, Bewertung und Charakterisierung von Materialien

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Bewertung, Optimierung und Auswahl von Materialien für SMC, Formpressen, Pultrusion (duroplastisch und thermoplastisch) und Prepregs, um die Anforderungen an Flamm-, Rauch- und Toxizitätseigenschaften sowie andere technische Anforderungen für die ausgewählten Demonstratorteile gemäß AP 1 zu erfüllen. Auch die Anforderungen an die verschiedenen Prozesstechnologien müssen berücksichtigt werden.

Spezifische Ziele:

- Bewertung und Optimierung von SMC-Materialien zur Erreichung der Flamm-, Rauch- und Toxizitätsanforderungen,
- Bewertung und Optimierung von duroplastischen Werkstoffen für Pultrusion- und Prepreg-Fertigung zur Erfüllung der Flamm-, Rauch- und Toxizitätsanforderungen,
- Bewertung und Optimierung von thermoplastischen Werkstoffen für Pultrusion und Formpressen um die Flamm-, Rauch- und Toxizitätsanforderungen zu erfüllen,
- Untersuchung der Auswirkungen der Zugabe von Nanocellulosefilamenten zu verschiedenen Harzsystemen (mechanisch, FST, physikalisch),
- Erhaltung der Verarbeitbarkeit und der mechanischen Eigenschaften für alle Materialien,
- Weiterhin sollen Materialmodelle für die FE-Analyse der Demonstratorteile entwickelt werden.

Erwartetes Ergebnis:

Nach der umfassenden Bewertung von Werkstoffen für die verschiedenen Verfahrenstechniken wurden geeignete Werkstoffe mit ausreichenden mechanischen und FST-Eigenschaften sowie einer geeigneten Verarbeitbarkeit für die weiteren Arbeiten in den folgenden Arbeitspaketen ausgewählt. Darüber hinaus liegen für alle bewerteten Werkstoffe die fertigen Berichte vor, die die Entwicklung eines Materialmodells für die FEA-Berechnung benötigt wird.



Materialien für die SMC-Herstellung

AP 2.1 - Bewertung und Definition von Matrixmaterialien und Additiven

(HSU, CT)

Die Anforderungen an das Material werden analysiert und geeignete Materialien (Polymere, Füllstoffe, Additive und Flammschutzmittel) ausgewählt, um alle technischen Anforderungen zu erfüllen.

AP 2.2 - Bewertung und Definition von Verstärkungsmaterialien

(HSU,CT)

Vielversprechende geschnittene Faserverstärkungen (Glas, Kohlenstoff) und Textilverstärkungen werden im Hinblick auf ihre mechanischen Eigenschaften, Preis, Benetzungs- und Fließverhalten analysiert. Geeignete Fasertypen werden ausgewählt.

AP 2.3 - Definition von Hartschaumstoffen und Bewertung der Verarbeitbarkeit.

(HSU, CT)

Der Markt wird nach geeigneten Hartschaumstoffen für Sandwichkerne in Bezug auf technische Anforderungen und Verarbeitbarkeit unter SMC-Herstellungsbedingungen durchsucht. Geeignete Schaumstoffe werden ausgewählt. Es werden Vorversuche durchgeführt, um die Eignung der ausgewählten Schaumstoffe und SMC-Deckschichten als Sandwichstruktur sicherzustellen.

AP 2.4 - Definition der notwendigen Formenbeschichtung

(CT, HSU)

Um den Gehalt an Trennmitteln so gering wie möglich zu halten, müssen geeignete Oberflächenbeschichtungen für die Formen untersucht, getestet und für die Formen definiert werden.

AP 2.5 - Materialcharakterisierung, Erstellung von Materialmodellen

(TUHH, HSU)

Die Materialeigenschaften werden für verschiedene Kombinationen von Fasern, Harzen, Additiven und Hartschäumen (bei Sandwichstrukturen) bestimmt und bewertet. Die vielversprechendsten Kombinationen werden für das nächste Arbeitspaket verwendet.

Task 2.6 - Prüfung der Entflammbarkeit

(TUHH)

Um ein direktes Feedback über die FST-Eigenschaften aller zu untersuchenden Materialien zu erhalten, werden Tests bezüglich der Entflammbarkeit und Zersetzung dieser Materialien (Matrix und Verbundwerkstoffe) parallel zu den Arbeitspaketen 2.3 und 2.5 durchgeführt. So können neue Erfahrungen direkt in die Modifikation der Werkstoffe zur Einstellung ihrer Verarbeitbarkeit und anderer physikalischer Eigenschaften einfließen. Weitere Tests (wie Rauchdichte und Toxizität) werden in AP 3 von den kanadischen Partnern durchgeführt.



Materialien für die Prepreg-Herstellung

AP 2.7 - Definition und Auswahl von Materialien

(TUHH, CT, OLI)

Die Anforderungen an das Material werden erfasst und der Markt wird in Bezug auf geeignete Materialien (Polymere, Textilien, Füllstoffe und Komponenten für die Formulierung und Modifizierung, Flammenschutzmittel, benötigte Funktionsintegration) entsprechend den Spezifikationen der Prozesstechnologie untersucht. Die am besten geeigneten Materialien werden ausgewählt.

AP 2.8 - Bewertung der Herstellungseigenschaften und der Verarbeitbarkeit

(TUHH, CT, EAT, OLI)

Um die Verarbeitbarkeit der ausgewählten Materialien im vorgesehenen Herstellungsprozess zu gewährleisten, werden die relevanten Materialeigenschaften wie Reaktivität, Viskosität, Klebrigkeit (Tack) und rheologisches Verhalten der polymeren Matrix oder die Dispergierbarkeit von Füllstoffen experimentell bewertet. Vorversuche zur Imprägnierung von Textilien werden durchgeführt, um die Anwendbarkeit der Polymere im Prepreg-Imprägnier-Verfahren zu untersuchen.

AP 2.9 - Charakterisierung der Matrixeigenschaften

(TUHH)

Zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften des ausgehärteten Matrixmaterials (Reinharz und FST-modifiziert) werden verschiedene Experimente zu den thermischen und mechanischen Eigenschaften des Polymers durchgeführt. Dazu gehören zum Beispiel Experimente, die den Einfluss von Flammenschutzmitteln oder Partikelmodifikationen auf die Partikelmodifikation auf die Glasübergangstemperatur der Matrix, sowie auf mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit untersuchen.

AP 2.10 - Charakterisierung von Verbundeigenschaften

(TUHH, EAT)

Die textilverstärkten FST-Polymer-Verbundwerkstoffe werden hinsichtlich ihrer thermischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Es ist wichtig, den Einfluss von Flammenschutzmitteln und Partikelmodifikation auf die interlaminaren Eigenschaften, wie Scherfestigkeit und Zähigkeit, zu untersuchen. Insbesondere sollen die Eigenschaften von Laminaten mit geringer Dicke untersucht werden, da sie anfälliger bei hohen Temperaturen und im Brandfall reagieren.

AP 2.11 - Prüfung der Entflammbarkeit

(TUHH)

Um ein direktes Feedback über die FST-Eigenschaften aller zu untersuchenden Materialien zu erhalten, werden Entflammbarkeitstests der Materialien (Matrix und Verbundwerkstoffe) parallel zu den Arbeitsaufgaben 2.8, 2.9 und 2.10 durchgeführt. So können neue Erkenntnisse direkt in die Modifikation der Werkstoffe einfließen, um deren Verarbeitbarkeit und andere physikalische Eigenschaften zu optimieren. Eine Brandkammer zur Durchführung dieser Versuche im Rahmen des Projekts muss von der TUHH angeschafft werden. Weitere Tests (wie Rauchdichte und Toxizität) werden in AP 3 von den kanadischen Partnern durchgeführt.



Duroplastische Materialien zur Pultrusion

AP 2.12 - Definition und Auswahl von Materialien

(TUHH, CT, OLI, PTI)

Auch für die Pultrusionstechnik werden die Anforderungen an das Material erfasst und der Markt hinsichtlich geeigneter Materialien (Harze, Fasern und Textilien, Füllstoffe und Komponenten zur Formulierung und Modifizierung, Flammenschutzmittel, interne Trennmittel, erforderliche Funktionsintegration) entsprechend den Spezifikationen des Prozesses analysiert. Daraufhin erfolgt die Auswahl der am besten geeigneten Materialien.

AP 2.13 - Bewertung der Fertigungseigenschaften und der Verarbeitbarkeit

(TUHH, CT, PTI, OLI)

Um die Verarbeitbarkeit der ausgewählten Werkstoffe im Pultrusionsprozess zu gewährleisten, sind die relevanten Materialeigenschaften wie Topfzeit, Reaktivität, Viskosität und rheologisches Verhalten der polymeren Matrix oder Dispergierbarkeit von Füllstoffen experimentell zu bewerten. Anhand experimenteller Vorversuche werden das Aushärteverhalten und die Aushärtebedingungen der geeigneten Matrixsysteme untersucht, um eine gute Verarbeitbarkeit im Pultrusionsprozess zu gewährleisten.

AP 2.14 - Charakterisierung der Matrixeigenschaften

(TUHH, PTI)

Zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften des ausgehärteten Matrixmaterials (Reinharz und FST-modifiziert) werden verschiedene Experimente zu den thermischen und mechanischen Eigenschaften des Polymers durchgeführt. Dazu gehören zum Beispiel Experimente, die den Einfluss von Flammenschutzmitteln oder Partikelmodifikationen auf die Glasübergangstemperatur der Matrix sowie auf mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit darlegen.

AP 2.15 - Charakterisierung von Verbundeigenschaften

(TUHH, CT, PTI)

Die faserverstärkten FST-Polymer-Verbundwerkstoffe werden hinsichtlich ihrer thermischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Es ist wichtig, den Einfluss von Flammenschutzmitteln und Partikelmodifikation auf die interlaminaren Eigenschaften, wie Scherfestigkeit und Zähigkeit, zu untersuchen. Insbesondere sollen die Eigenschaften von Laminaten mit geringer Dicke untersucht werden, da sie anfälliger bei hohen Temperaturen und im Brandfall reagieren.

AP 2.16 - Prüfung der Entflammbarkeit

(TUHH)

Um ein direktes Feedback über die FST-Eigenschaften aller zu untersuchenden Materialien zu erhalten, werden Entflammbarkeitstests dieser Materialien (Matrix und Verbundwerkstoffe) parallel zu den Arbeitsaufgaben 2.13, 2.14 und 2.15 durchgeführt. So können neue Erkenntnisse direkt in die Modifikation der Werkstoffe zur Einstellung ihrer Verarbeitbarkeit und anderer physikalischer Eigenschaften einfließen. Weitere Tests (wie Rauchdichte und Toxizität) werden in WP 3 von den kanadischen Partnern durchgeführt.



Thermoplastische Materialien für Pultrusion und Formpressen

AP 2.17 - Bewertung von Harzen für die thermoplastische Pultrusion und das Formpressen

(POLY, ETS, PTI)

Verschiedene thermoplastische Kunststoffe wie PP, PA oder PEI werden auf ihre FST-Eigenschaften untersucht. Die ausgewählten Kunststoffe werden zu unverstärkten Platten und faserverstärkten Laminaten geformt.

AP 2.18 - Integration von Zellulosefasern

(KBM, POLY, ETS)

Die ausgewählten Matrixsysteme aus AP 2.17 werden in Form von Pellets beschafft, um sie mit verschiedenen Konzentrationen von Zellulose in einem Doppelschneckenextruder zu mischen. Dieser Vorgang wird bei einem Laborpartner für thermoplastische Verfahren durchgeführt.

AP 2.19 – Materialcharakterisierung für die thermoplastische Pultrusion und das Formpressen

(POLY, ETS, PTI)

Parallel zu AP 2.17 und 2.18 werden die Kalt- und Schmelzdichte, die Schmelzviskosität und die Kristallinität in Abhängigkeit von der thermischen Vorbehandlung mit den an der Polytechnique Montreal verfügbaren Geräten bestimmt. Diese Charakterisierung wird verwendet, um die Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der thermischen Geschichte während der Verarbeitung zu modellieren.

AP 3 - Experimentelle Bewertung und Modellierung des Feuerwiderstands

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Charakterisierung der in AP 2 entwickelten Materialsysteme unter Beachtung der Bedingungen der FST-Zertifizierungsprüfung. Das weiterführende Ziel ist es nicht nur ein "bestanden/nicht bestanden"-Urteil für spezifische Tests zu geben, sondern vielmehr Versuche auf Coupon-Ebene in einfachen und gut kontrollierten Konfigurationen durchzuführen, wobei fortschrittliche Diagnosetechniken genutzt werden, um die jeweiligen Phänomene (thermische Degradation, Ausgasung, Verbrennung usw.) zu untersuchen. Die in diesen Experimenten gesammelten Informationen werden verwendet, um die Auswirkungen von Materialsystemzusammensetzungen (einschließlich Feuerschutzstrategien) auf die FST-Eigenschaften zu bewerten, Vorhersagemodelle für diese Eigenschaften zu validieren (die ebenfalls in diesem Arbeitspaket entwickelt werden) und Verbundwerkstofflösungen zu finden, die spezifische Anforderungen an die Feuerbeständigkeit stellen.

Spezifische Ziele:

- Durchführung von Experimenten unter Bedingungen, die Zertifizierungsprüfungen nachempfunden sind, um das Verhalten von Komponenten/Demonstratoren zu charakterisieren, die nach den geltenden Normen in Bezug auf Wärmeentwicklung, Rauchdichte, Toxizität und mechanische Eigenschaften entwickelt wurden,
- Entwicklung von Modellen zur Vorhersage der Konformität von Bauteilen/Demonstratoren mit spezifischen Zertifizierungstests vorherzusagen,
- Bewertung der Leistung der in AP 2 umgesetzten Strategien zur Erhöhung der Feuerbeständigkeit,
- Vermittlung von Kenntnissen über die Auswirkungen des Zusatzes von Nanozellulose in thermoplastischen und duroplastischen Matrizen auf die Feuerbeständigkeit des Verbundwerkstoffs.



Erwartetes Ergebnis:

Die FST-Eigenschaften der in AP 3 hergestellten Bauteile werden ermittelt. Die Ergebnisse werden zur Optimierung der Werkstoffsysteme und Fertigungsprozesse genutzt. Die Auswirkung auf die FST-Eigenschaften von kritischen Neuentwicklungen, die in diesem Projekt umgesetzt wurden, wird ermittelt, z.B. die Matrixbeladung mit Nanocellulosefasern und der Kristallinitätsgrad in thermoplastischen Matrizen.

AP 3.1 - Identifizierung des Testverfahrens und der Kontrollparameter (POLY, CT, TUHH)

In enger Zusammenarbeit mit allen beteiligten Partnern werden die Prüfverfahren für die Bewertung der FST-Eigenschaften, sowie die Ausgangswerte für die kritischen Kontrollparameter (Wärmefreisetzungsrate, Rauchdichte, Toxizität usw.), ermittelt. Diese Werte werden in diesem Arbeitspaket mit den in diesem Projekt entwickelten Materialien und zum Abgleich mit bekannten Lösungen, die sich in Zertifizierungsprüfungen bewährt haben, verglichen.

AP 3.2 - Prüfeinrichtungen (POLY)

Die vorhandenen Einrichtungen werden so umgebaut, dass die Proben einer reaktiven (Propan- oder Kerosinbrenner) oder nicht reaktiven (Strahlungswärme) ausgesetzt werden können. Der Wärmestrom und die Temperatur werden regulierbar sein, wobei der Betriebsbereich so gewählt wird, dass er die Bedingungen der einschlägigen Zertifizierungstests abdeckt (ASTM E162, ASTM E662, ISO 2586 für Baumaterialien, FAR 25.853). Dies bedeutet 25-100 kW/m² für den Wärmestrom und bis zu 2000 °F (1100 °C) für die Temperatur.

AP 3.3 - Einführung von Diagnoseinstrumenten (POLY)

Die Versuchsanlage wird so ausgestattet sein, dass sie die quantitativen Daten liefert, die zur Bewertung der FST-Eigenschaften der getesteten Proben notwendig sind. Dazu gehören Massenspektrometrie (O₂, CO und CO₂, als Grundlage für die Wärmefreisetzungsrate), Thermometrie (thermoelementbasiert), optische Rauchdichte und Partikelbildung.

AP 3.4 - Bewertung der FST-Eigenschaften von thermoplastischen Harzen (POLY)

Die von PTI, ETS und POLY hergestellten Proben werden auf ihre FST-Eigenschaften hin untersucht, und zwar unter den Bedingungen, die in AP 3.1 festgelegt wurden. Die Experimente werden Messungen der Wärmefreisetzungsrate umfassen und die Charakterisierung der von den Proben ausgehenden Emissionen (Rauch, Partikel usw.). Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Bewertung des Zusatzes von Nanocellulose und feuerfesten Additiven auf die FST-Eigenschaften.

AP 3.5 - Bewertung der FST-Eigenschaften von duroplastischen Harzen (POLY)

Die von den deutschen Partnern hergestellten Proben werden auf ihre FST-Eigenschaften hin untersucht, wobei diese in AP 3.1 festgelegt wurden. Die Experimente können Messungen der Wärmefreisetzungsrate und die Charakterisierung der von den Proben ausgehenden Emissionen (Rauch, Partikel usw.) umfassen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Bewertung der Auswirkungen des Zusatzes von Nanocellulose und Brandschutzadditiven auf die FST-Eigenschaften.



AP 3.6 - Zertifizierungstests für eine Untergruppe von Proben (POLY)

Um die mit den Experimenten von AP 3.4 und 3.5 erzielten Ergebnisse zu vergleichen und die Modellierungsergebnisse von AP 3.7 zu validieren, wird eine Teilmenge der Proben einer vollständigen Reihe von Zertifizierungstests unterzogen, die zu einem "bestanden/nicht bestanden"-Urteil führen. Diese Tests werden an externe Dienstleister vergeben. Die Anzahl der durchgeführten Tests hängt von dem Umfang der Messungen, die vor Ort durchgeführt werden können und von Haushaltserwägungen ab.

AP 3.7 - Entwicklung eines Prognosewerkzeugs (POLY)

Es wird ein numerisches Simulationswerkzeug entwickelt, um die Wärmeausbreitung in den Proben, die Materialabbaugeschwindigkeit in Abhängigkeit von den Kontrollparametern des Tests (Wärmestrom, Temperatur, Zeit) und der Geometrie der Probe (beginnend mit der Dicke) abzubilden. Das Modell stützt sich auf frühere Entwicklungen für die Zersetzung von Verbundwerkstoffen bei offener Flamme und kann entweder in 1D oder bei Bedarf in 2D implementiert werden. Das Modell wird aus den Ergebnissen von AP 3.4 und 3.5 erstellt und anhand der Ergebnisse der realen Zertifizierungstests von AP 3.6 validiert.

AP 4 - Funktionsintegration

In diesem Arbeitspaket werden Untersuchungen zur funktionalen Integration durchgeführt.

Spezifische Ziele:

- Identifizierung der erforderlichen Funktionen für die in diesem Projekt zu entwickelnden Demonstratoren, wie z.B. RFIDs, metallische Komponenten,
- Erstellung von Konzepten für die Integration dieser Funktionselemente in Bezug auf das Bauteildesign und die Teilefertigung.

Erwartetes Ergebnis:

Nach der umfassenden Bewertung der Auswirkungen von funktionsintegrierten Verbundwerkstoffen auf das Bauteil und die Prozessgestaltung werden funktionsintegrierte Teilkomponenten in der entsprechenden Fertigungstechnologie hergestellt und anschließend getestet. Dazu stehen die fertigen Berichte der Prüfergebnisse zur Verfügung.

AP 4.1 - Erstellung von Konzepten zur Funktionsintegration (HSU, CT)

Die erforderlichen Funktionselemente der verschiedenen Demonstratoren werden analysiert. Vielversprechende Konzepte für die Integration solcher Elemente während der Verbundteilfertigung werden mit Hilfe von morphologischen Kästen entwickelt. Zusätzlich werden die Auswirkungen einer solchen Integration auf das Bauteildesign untersucht.

AP 4.2 - Bewertung der Konzepte zur Funktionsintegration (HSU, CT)

Die in AP 4.1 gesammelten Konzepte für funktionsintegrierte Bauteilkonstruktionen und Fertigungsprozesse werden durch Nutzwertanalysen bewertet.



AP 4.3 - Herstellung von Coupons für Funktionsverbunde und Prüfung (HSU, CT)

Basierend auf den Ergebnissen von AP 4.2 werden detaillierte Prozessketten und Designrichtlinien entwickelt. Coupons mit den integrierten Funktionen werden hergestellt und getestet.

AP 4.4 - Herstellung und Prüfung komplexer Funktionsverbunde (CT, HSU)

Die Ergebnisse der Coupontests aus AP 4.3 werden auf komplexe funktionale Verbundwerkstoffteile, den Demonstratoren übertragen. Entsprechende Teilkomponenten werden hergestellt und getestet.

AP 5 - Prozessentwicklung

In diesem Arbeitspaket wird die Prozessentwicklung und -optimierung aller betrachteten Prozesstechnologien durchgeführt.

Spezifische Ziele:

- Konfiguration aller Schritte zum Heißpressen von SMC, sowie Optimierung aller relevanten Prozessparameter um einen zuverlässigen und reproduzierbaren Prozess zu etablieren,
- Konfiguration aller Prozessschritte zur Prepreg-Imprägnierung und Heißpressverfahren, sowie Optimierung aller relevanten Prozessparameter, einschließlich der Prozessentwicklung und
- Herstellung einer Pilotanlage für die Einzelplattenimprägnierung von Textilien.
- Etablieren eines Verfahrens zur Pultrusion komplexer und dünnwandiger Profilgeometrien und ungerichteten Halbzeugen mit Duroplasten.
- Etablieren eines Verfahrens zur Herstellung von thermoplastischen Profilen mit FST-Eigenschaften bei hoher Pultrusionsgeschwindigkeit.
- Etablieren eines Prozesses für das Formpressen von thermoplastischen Verbundwerkstoffteilen mit Nanocellulosefasern.
- Es werden geeignete Formen für die Herstellung der Demonstratorteile entworfen, entwickelt und hergestellt.

Erwartetes Ergebnis:

Die entwickelten Prozesstechnologien werden optimiert, um die Demonstratoren im nächsten Arbeitspaket herzustellen. Die verfügbaren Berichte über die Prozesskonfigurationen und -parameter können später für die Übertragung dieser Technologien auf weitere Anwendungen genutzt werden.

Heißpressen von SMC

AP 5.1 - Entwicklung des Prozesses (CT, HSU)

Teil der Prozessentwicklung ist die Konfiguration aller Prozessschritte. Weiterhin wird der Automatisierungsgrad für jeden Prozessschritt in Abhängigkeit von dem jeweiligen Demonstrator evaluiert.



AP 5.2 - Entwicklung eines Preform-Konzepts

(HSU, CT)

Basierend auf dem Bauteildesign werden Fertigungsversuche mit verschiedenen Schnittdesigns und vorgeformten SMCs durchgeführt. Ein notwendiger Vorformungsprozess wird abgeleitet.

AP 5.3 - Entwurf und Herstellung von Prototyp-Formen

(CT, HSU)

Teil dieses Arbeitspakets ist der Entwurf und die Herstellung der Formen für die entwickelten Demonstratoren, einschließlich der Sensoren für die Verfolgung der Prozessparameter.

AP 5.4 - Entwicklung eines Nachbearbeitungskonzepts

(CT, HSU)

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität der Bauteile werden Konzepte für Oberflächenbehandlungen und ein Veredelungsverfahren entwickelt und in die ganzheitliche Prozesskette integriert.

AP 5.5 - Einrichtung eines Qualitätskontrollsystems

(HSU, CT)

In diesem Arbeitspaket werden qualitätsrelevante Merkmale und Grenzwerte für Fehler auf der Grundlage der Ergebnisse der Fertigungsversuche definiert. Es werden Verfahren zur Messung und Bewertung dieser Ausfälle festgelegt.

Formpressen von thermoplastischen Verbundwerkstoffen

AP 5.6 - Herstellung von CF/Nanocellulose/Thermoplast-Polymergranulaten

(ETS, POLY, PTI)

Nanocellulose/Thermoplast wird aus AP 2 gewonnen und anschließend mit Kohlenstofffasern in verschiedenen Längen pultrudiert. Die thermoplastische Pultrusionsanlage der Polytechnique wird zu diesem Zweck genutzt.

AP 5.7 - Entwicklung und Optimierung des Formpressverfahrens

(ETS)

In einer parametrischen Studie werden die Prozessparameter für verschiedene thermoplastische Harze, Nanocellulosegehalte und Faserlängen untersucht. Die Charakterisierung der geformten Teile erfolgt zusammen mit der Prozessentwicklung und Prozessoptimierung, um die Qualität der endgültigen Formteile, die Oberflächenbeschaffenheit usw. zu verbessern. Dies wird zunächst an Teilen mit einfacher Geometrie durchgeführt. Es werden Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der endgültigen Teilequalität erarbeitet. Die Auswirkung der Verwendung verschiedener Anteile von Nanocellulose auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der resultierenden Verbundwerkstoffteile wird untersucht.

AP 5.8 - Entwicklung der Form(en) für Demonstratoren

(ETS)

Es werden Werkzeugformen entworfen und hergestellt, um die formgepressten Demonstratoren zu fertigen.



Prozessentwicklung für die Prepreg-Herstellung

AP 5.9 - Prozesskonfiguration

(TUHH, CT, EAT)

Teil der Prozessentwicklung ist vor allem die Optimierung aller Prozessschritte. Hierzu gehören unter anderen die Weiterentwicklung des Imprägnierverfahrens, die Anpassung der textilen Halbzeuge (Schneiden und Kantenfixierung), Optionen für eine mögliche Funktionsintegration, die Laminatherstellung und -aushärtung, sowie mögliche Veredelungsschritte (z.B. Oberflächenbehandlungen und Nachbearbeitung).

AP 5.10 - Optimierung der Prozessparameter

(TUHH, CT, EAT)

Um den Prozess während des gesamten Projekts optimieren zu können, wird eine Parameterstudie durchgeführt, um die Prozessleistung für polymere Matrixsysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften (z.B. Viskosität, Klebrigkeit/Tack usw.), unterschiedlichen Füllstoffgehalten (Füllstofftypen, Größen usw.) und unterschiedlichen Textilien (Textiltyp und Struktur) zu untersuchen.

Aufgabe 5.11 - Konstruktionsbedingte Prozess- und Anlagenoptimierung

(EAT, TUHH, CT)

Die Auslegungsparameter für die Imprägnieranlage und die Anforderungen an deren Steuerung werden überprüft und weiterentwickelt, um eine fortschrittliche Pilotanlage konzipieren zu können. Diese Anlage soll hergestellt werden und eine Benutzerschnittstelle für das Steuerungssystem erstellt werden.

AP 5.12 - Prozessbewertung

(TUHH, CT, EAT)

Zur Bewertung des entwickelten Prozesses muss das hergestellte Material hinsichtlich der Imprägnierung und Laminatqualität analysiert werden, insbesondere bei hochgefüllten Polymermatrizen. Weitere wichtige Kriterien sind die Oberflächenqualität der Lamine, Laminatdefekte (z.B. Lufteinschlüsse, trockene Stellen, Delamination und Risse) sowie allgemeine Materialeigenschaften.

Verfahrensentwicklung für die Duroplast-Pultrusion

AP 5.13 - Prozesskonfiguration

(CT, PTI, TUHH)

Teil der Prozessentwicklung ist zunächst die Anpassung der Prozesstechnik unter Berücksichtigung der Verarbeitungseigenschaften der entwickelten Harzsysteme. Dies beinhaltet die Anpassung der Werkzeugtemperierung zur Steuerung der Aushärtung und Schrumpfung der Polymermatrix. Weiterhin muss eine gute Imprägnierung der Fasern und eine niedrige Reibung sichergestellt werden (Werkzeugbeschichtung, Trennmittel, Pultrusionsgeschwindigkeit), um eine gute Oberflächenqualität der pultrudierten Profile zu erreichen.



AP 5.14 - Pultrusion von komplexen Geometrien

(CT, PTI, TUHH)

Der nächste Schritt in der Entwicklung des Pultrusionsprozesses ist die Pultrusion von komplex geformten, dünnwandigen Profilgeometrien. Dazu müssen geeignete Formen und Pultrusionswerkzeuge entworfen und hergestellt werden. Anschließend sollen z.B. L- oder U-förmige Pultrusionsprofile mit geringen Wandstärken hergestellt und der Prozess entsprechend optimiert werden, um Problemen wie matrixarmen Bereichen oder inhomogener Aushärtung aufgrund unterschiedlicher Wandstärken entgegenzuwirken.

AP 5.15 - Pultrusion von ungerichteten Halbzeugen

(CT, PTI, TUHH)

In der dritten Stufe sollen Textilien und ungerichtete Halbzeuge (auch mit nicht-unidirektionaler Orientierung), Kernmaterialien oder Versteifungen während des Pultrusionsprozesses in die Profile integriert werden. Dadurch wird eine direkte Funktionsintegration in die Profile oder die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften senkrecht zur Pultrusionsachse erwirkt. Eine Inline-Fehlstellenerkennung soll die Qualität der pultrudierten Profile überwachen.

Verfahrensentwicklung für die thermoplastische Pultrusion

AP 5.16 - Voruntersuchung der Pultrusion

(POLY, PTI)

Es wird ein Versuchsplan entworfen, um die Auswirkungen des Temperaturprofils der Pultrusionslinie, der Pultrusionsgeschwindigkeit, der Art des Halbzeugs und des Verhältnisses zwischen Verstärkungssystem und Matrix auf die Pultrusionszugkraft, die Konsolidierungsqualität und die Oberflächenbeschaffenheit zu bestimmen. Die Zugkraft wird mit Kraftmessdosen gemessen und die Konsolidierungsqualität mit Hilfe von Mikroskopaufnahmen des Querschnitts des pultrudierten Balkens geprüft. Die Oberflächenbeschaffenheit wird durch visuelle Inspektion und Profilometer bewertet.

AP 5.17 - Modellierung des thermoplastischen Pultrusionsprozesses

(POLY)

Es wird ein Modell des Pultrusionsprozesses entwickelt, das auf bereits verfügbaren Modellen in der Literatur beruht. Es werden Beiträge zur Entwicklung von Vorimprägnierungsmechanismen geleistet, die vor der Hauptpultrusionsform angeordnet sind. Weitere Beiträge werden bezüglich der Abkühlungsphase des Pultrusionsprozesses geleistet. Das Modell wird die Konsolidierungsqualität und Probleme mit der Oberflächenbeschaffenheit auf der Grundlage der in Aufgabe 4.16 untersuchten Parameter vorhersagen. Ein weiterer Schwerpunkt des Modells wird die Vorhersage der Auswirkungen der Geometrie der Pultrusionsformen auf die Prozessleistung (Geschwindigkeit und Qualität) sein.

AP 5.18 - Entwurf eines thermoplastischen Pultrusionssystems im industriellen Maßstab

(POLY, PTI)

Es wird ein Pultrusionssystem entworfen, um das in AP 1 definierte Profil herzustellen. Die Systemanforderungen und Betriebsbedingungen werden anhand des in AP 5.17 erstellten Modells bestimmt. Detaillierte Zeichnungen werden angefertigt und an den Fertigungslieferanten geschickt. Für die Komponenten der Pultrusionsanlage, wie z. B. das Ziehsystem und eine bewegliche Säge, werden brauchbare Standardkomponenten angestrebt.



Aufgabe 5.19 - Inbetriebnahme eines thermoplastischen Pultrusionssystems im industriellen Maßstab (POLY, PTI)

Das in AP 5.18 entworfene System wird bei PTI installiert und mit Instrumenten zur Temperatur-, Geschwindigkeits- und Kraftregelung ausgestattet. Die erste Inbetriebnahme wird zunächst mit einfachen Konfigurationen durchgeführt und dann mit entsprechenden Anlagenkomponenten erweitert. Es werden Optimierungen vorgenommen, um die volle Funktionalität zu gewährleisten.

AP 6 - Herstellung von Demonstrationsteilen

In diesem Arbeitspaket werden die in AP 1 definierten und entwickelten Demonstratorsteile mit unterschiedlichen Materialkombinationen und Fertigungsparametern hergestellt. Die Konsolidierungsqualität und mechanischen Eigenschaften werden in den folgenden Arbeitspaketen untersucht.

Spezifische Ziele:

- Herstellung eines SMC-Sandwichelement-Demonstrators
- Herstellung eines Sandwichpaneel-Demonstrators, mittels Einzelplattenimprägnierung und Heißpressverfahren
- Herstellung eines pultrudierten Demonstrators, der durch Duroplast-Pultrusion verarbeitet wird
- Herstellung eines pultrudierten Demonstrators, der durch thermoplastische Pultrusion verarbeitet wurde
- Herstellung eines Demonstrators, der durch Formpressen erzeugt wurde.

Erwartetes Ergebnis:

Die verschiedenen in diesem Arbeitspaket gefertigten Demonstratorsteile sind Referenzen für Flugzeuganwendungen im Flugzeuginnenraum und repräsentieren beispielhaft die erreichbaren Eigenschaften der entwickelten Prozesse der vorangegangenen Arbeitspakete. Sie dienen der Demonstration des technologischen und wirtschaftlichen Potenzials der entwickelten Werkstoffe und Technologien und als Transferreferenz für weitere Anwendungen.

AP 6.1 - Herstellung eines Sandwichpaneel-Demonstrators durch SMC-Heißpressen (CT)

Der in AP 1 ausgewählte Sandwich-Paneel-Demonstrator wird durch SMC-Heißpressen bei CT hergestellt.

AP 6.2 - Herstellung eines Demonstrators durch Prepreg-Herstellung und Heißpressverfahren (CT, EAT)

Der Demonstrator wird mit dem in AP 5 etablierten Prepreg-Herstellungsverfahren unter Verwendung der von EAT entwickelten und hergestellten Pilotanlage für Einzelplatten-Imprägnierung und der bei CT installierten Heißpresse hergestellt.

AP 6.3 - Herstellung von Demonstratorsteilen durch Duroplast-Pultrusion (CT, PTI)

Der in AP 1 ausgewählte Demonstrator für ein pultrudiertes Teil wird auf der bei CT installierten Duroplast-Pultrusionsanlage hergestellt. Die Materialien (Harzsysteme, Verstärkungsmaterialien) werden gemäß AP 2 und AP 3 ausgewählt.



AP 6.4 - Herstellung von Demonstrationsteilen durch thermoplastische Pultrusion (PTI, POLY, ETS)

Der Demonstrator für das pultrudierte Teil wird auf der thermoplastischen Pultrusionsanlage bei PTI hergestellt. Die Materialien werden auf der Grundlage von AP 2 und AP 3 ausgewählt.

AP 6.5 - Herstellung von Demonstratorteilen durch Formpressen von BMC-Thermoplasten (ETS, KBM)

Der formgepresste Demonstrator wird bei ETS auf der thermoplastischen Pultrusionsanlage des Polytechnikums hergestellt. Die zu verwendenden Materialien werden auf der Grundlage von AP 2 und AP 3 ausgewählt und die dafür benötigten Werkzeuge in AP 5 entwickelt.

AP 7 - Prozessbewertung und -optimierung

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, die entwickelten Prozesse zu analysieren und die verschiedenen Fertigungsschritte im Hinblick auf Kosten, Durchlaufzeit und Qualität der produzierten Teile zu optimieren. Außerdem soll eine Umweltanalyse durchgeführt werden.

Erwartetes Ergebnis:

Durch die detaillierte Analyse der entwickelten Verfahren hinsichtlich ihrer technischen Qualität, Kosten und des ökologischen Fußabdrucks können die Potenziale aufgezeigt werden.

AP 7.1 - Bewertung der technischen Qualität (HSU, PTI, EAT, KBM, POLY, ETS)

Die entwickelten Prozesse werden im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Teilequalität und Durchlaufzeit bewertet, um Schwachstellen in den verschiedenen Fertigungsschritten zu identifizieren.

Aufgabe 7.2 - Prozesskostenanalyse (CT, KBM, PTI)

Die entwickelten Prozesse werden hinsichtlich der Kosten (Materialkosten, Prozesskosten) bewertet, um Kostentreiber zu identifizieren.

AP 7.3 - Optimierung der Prozesse (CT, HSU, PTI, EAT, POLY, ETS)

Um die entwickelten Prozesse zu optimieren, werden Lösungen für die technischen und wirtschaftlichen Schwachstellen, die sich aus AP 7.1 und 7.2 ergeben haben, erarbeitet.

AP 7.4 - Ökologische Bewertung der optimierten Prozessketten (HSU, CT)

Es wird eine Umweltanalyse durchgeführt, um die Umweltauswirkungen der entwickelten Materialien und Prozesse zu untersuchen. Die Analyse wird von HSU und Comrisetec durchgeführt. Alle Partner werden auf der Grundlage der bisherigen Arbeiten Beiträge zu dieser Aufgabe liefern.



AP 8 - Prüfung von Bauteilen

Im Rahmen dieses Arbeitspakets werden die in AP 6 hergestellten Demonstratoren gemäß den in AP 1 definierten Anforderungen getestet, um sicherzustellen, dass sie alle relevanten Anforderungen erfüllen. Dies umfasst mechanische Prüfungen (zerstörend und zerstörungsfrei), FST-Tests und andere. Zur Überprüfung der mechanischen Tests werden die Ergebnisse mit den Ergebnissen der FE-Analyse von AP 2 verglichen.

Erwartetes Ergebnis:

Am Ende dieses Arbeitspakets können alle Risiken, Vorteile und die Machbarkeit gemäß dem entsprechenden TRL-Level (Technology Readiness Level) bereitgestellt werden, und der Nachweis des Konzepts ist abgeschlossen.

AP 8.1 - Prüfung des Prepreg-Demonstrators

(TUHH, POLY, HSU)

Die in AP 6 hergestellten Prepreg-Demonstratorerteile werden im Hinblick auf die in AP 1 definierten Anforderungen getestet.

AP 8.2 - Test des pultrudierten Demonstrators

(TUHH, POLY, HSU)

Die in AP 6 hergestellten Demonstratoren für pultrudierte Teile werden im Hinblick auf die in AP 1 definierten Anforderungen getestet.

AP 8.3 - Prüfung des Demonstrators im Formpressverfahren

(ETS, POLY)

Die in AP 6 durch thermoplastisches Formpressen hergestellten Demonstratorerteile werden hinsichtlich der in WP 1 definierten Anforderungen getestet.

AP 8.4 - Validierung der optimierten Demonstratorerteile

(TUHH, POLY, HSU, ETS)

Die verschiedenen Demonstratorerteile werden mit optimierten Prozessen gemäß AP 7.3. getestet, um die erforderlichen und erwarteten Eigenschaften zu validieren.

AP 9 - Technologietransfer

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, Potenziale für einen Technologietransfer der entwickelten Materialien und Verfahren auf weitere Bereiche der Luftfahrtindustrie oder verwandte Bereiche zu identifizieren. Weiterhin soll ein Konzept für die spätere Umsetzung der entwickelten Technologien exemplarisch für einige repräsentative Anwendungen entwickelt werden.

Erwartetes Ergebnis:

Berichte über die Übertragbarkeit der in diesem Projekt untersuchten Technologien auf andere Flugzeug- und Nicht-Flugzeug-Anwendungen zeigen die wirtschaftlichen Perspektiven für die beteiligten Unternehmen auf. Darüber hinaus werden verknüpfte zukünftige Forschungsfelder für den Technologietransfer deutlich dargestellt.



AP 9.1 - Identifizierung von Potenzialen für den Technologietransfer (HSU, CT)

Weitere Bereiche der Luftfahrtindustrie werden untersucht, um potenzielle Anwendungen zu identifizieren, bei denen die entwickelten Prozesse und Materialien die Kosten und/oder die Vorlaufzeit und/oder das Gewicht erheblich reduzieren können. Dies könnten auch Bereiche mit höheren strukturellen Anforderungen oder geringeren FST-Anforderungen sein. Einige repräsentative Anwendungen werden ausgewählt und der Nutzen eines Technologietransfers exemplarisch evaluiert.

AP 9.2 - Entwicklung eines Handhabungs- und Automatisierungskonzeptes (HSU)

Für die in AP 9.1 exemplarisch ausgewählten Anwendungen wird der aktuelle Automatisierungsgrad ermittelt und ein Konzept für die anschließende Implementierung der entwickelten Technologien in diesen Bereichen entwickelt.

AP 10 - Beitrag zur Internationalisierung des Clusters "Hamburg Aviation"

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist es, die Kompetenzen der Projektpartner anderen zu präsentieren (u. A. Cluster-Akteuren in Deutschland und in Kanada). Dies beinhaltet einige Informationsveranstaltungen und Geschäftsreisen nach Kanada, um Kompetenzen auszutauschen und weitere Forschungsprojekte zu initiieren.

AP 10.1 - Modul 1 "Information" (CT, EAT, TUHH, HSU)

Dieses Modul umfasst eine eintägige Veranstaltung, die im ZAL TechCenter in Hamburg stattfindet. Sie richtet sich an interessierte Clusterakteure (insbesondere Forschungsinstitute und KMU), die erstmals internationale F&E-Projekte durchführen. Experten informieren über allgemeine und rechtliche Rahmenbedingungen, die spezifische Situation und Chancen, Trends, Voraussetzungen und Verfahren.

AP 10.2 - Modul 2 "Erkundung von Kompetenzen" (CT, EAT, TUHH, HSU)

Die Erkundung der komplementären Kompetenzen ist eine Reise nach Kanada mit dem Ziel, das Potenzial für F&E-Kooperationen zu erkunden. Hinzu kommen Kontakte zu Behörden, öffentlichen Einrichtungen und lokalen Unternehmen und Forschungseinrichtungen sowie Standort- und Projektbesuche. Dieses Modul kann verbunden werden mit Ausstellungen oder ähnlichen Veranstaltungen in Kanada.

AP 10.3 - Modul 3 "Präsentation der Kompetenzen" (CT, EAT, TUHH, HSU)

Dieses Modul beinhaltet eine Reise mit Symposium, bei der die Leistungen der Organisation des Hamburger Luftfahrtclusters vorgestellt werden, mit der Möglichkeit, das Netzwerk in Kanada zu erweitern. Fachliche und ansprechende Präsentationen (z.B. Hamburg Roadshow an kanadischen Wissenschaftsinstituten) stehen im Mittelpunkt dieser Reise. Abgerundet wird dieses Format durch ein Veranstaltungsmagazin für die Bewerbung im Zielland, ein Briefing der Teilnehmer und geeignete Objekt- und Referenzbesuche.



AP 10.4 - Modul 4 "Information und weitere FuE-Projekte" (CT, EAT, TUHH, HSU)

Die Anbahnung weiterer Innovationsprojekte beinhaltet eine Reise nach Kanada mit einer lokalen Veranstaltung von deutschen und lokalen Experten. Es werden Einzelgespräche mit potenziellen F&E-Partnern organisiert. Der Fokus liegt auf der konkreten Anbahnung von FuE-Projekten (Forschung und Entwicklung) zwischen Hamburger und kanadischen Partnern.

AP 10.5 - Modul 5 "Erfahrungsaustausch" (CT, EAT, TUHH, HSU)

Das letzte Modul umfasst die Unterstützung der F&E-Projekte im Rahmen der Internationalisierung des Hamburger Luftfahrtclusters. Ziel ist das Sammeln von Erfahrungen im Umgang mit geistigen sowie weiteren übergreifenden Fragen zu den einzelnen F&E-Projekten. Der Erfahrungsaustausch findet in der Regel in Hamburg im ZAL TechCenter in Form eines persönlichen Treffens oder einer Telefon/Videokonferenz statt. Der Austausch soll projektübergreifend durchgeführt werden.

1.3.2 Meilensteine

Die folgenden Meilensteine ermöglichen es den Projektleitern, die Ergebnisse innerhalb des Projekts zu bewerten und zu entscheiden, wie mit den folgenden Aufgaben verfahren werden soll. Außerdem dienen diese zur Überprüfung, ob das Projekt noch im Zeitplan liegt und mit den Interessen aller Beteiligten übereinstimmt.

Meilenstein 1: Spezifikation von Demonstratoren

Nach Abschluss von AP 1.1 bis AP 1.2 werden drei geeignete Demonstratoranteile ausgewählt und die zugehörigen kritischen Eigenschaften und Spezifikationen definiert.

Meilenstein 2: Materialfreigabe

Nach Abschluss der entsprechenden Aufgaben für die verschiedenen Technologien werden geeignete Materialien (Matrixwerkstoffe, Additive, Füllstoffe, Verstärkungsmaterialien usw.) für die Herstellung der Demonstratoranteile ausgewählt. Wenn es keine geeigneten Werkstoffe gibt, die alle erforderlichen Anforderungen erfüllen, muss entschieden werden, ob diese Technologie in AP 5 mit einigen Einschränkungen weiterentwickelt werden soll oder nicht. Genauer gesagt sind die "Go/No-Go"-Gates für die verschiedenen Technologien die folgenden:

- G1: Auswahl der Materialien für den Sandwich-SMC-Paneel-Demonstrator
- G2: Auswahl der Materialien für den Demonstrator, mit einem optimierten Prepreg Prozess
- G3: Auswahl der Werkstoffe für den Demonstrator eines duroplastischen pultrudierten Teils
- G4: Auswahl der Werkstoffe für den Demonstrator für thermoplastische Pultrusionsteile und Demonstrator für Formpressen

Meilenstein 3 / G5: Konzepte zur Integration von komplexen Funktionen

Nach Abschluss von AP 4.1 bis AP 4.5 ist zu entscheiden, ob es geeignete Konzepte zur Herstellung komplexer Funktionsverbunde mit den erwarteten Eigenschaften gibt, die in die in AP 5 hergestellten Demonstratoranteile integriert werden können.



Meilenstein 4: Prozessfreigabe

Nach Abschluss der relevanten Aufgaben zur Prozessentwicklung muss entschieden werden, ob die etablierten Prozesse für die Herstellung der ausgewählten Demonstratorteile mit allen erforderlichen und relevanten Eigenschaften geeignet sind oder nicht. Wenn diese nicht geeignet sind, muss entschieden werden, ob eine weitere Entwicklung die bestehenden Probleme in der verbleibenden Zeit lösen kann oder nicht. Genauer gesagt, die Go/No-Go-Gates für die verschiedenen Prozesse / Demonstratorteile sind die folgenden:

- G6: Funktionsfähiger Prozess zur Herstellung von Demonstratorteilen durch Heißpressen von SMC
- G7: Funktionsfähiger Prozess für die Herstellung von Demonstratorteilen durch Formpressen von thermoplastischen Verbundwerkstoffen
- G8: Funktionsfähiger Prozess zur Herstellung von Demonstratorteilen durch Prepreg-Herstellung und Heißpressen
- G9: Funktionsfähiger Prozess zur Herstellung von Demonstratorteilen durch Duroplast-Pultrusion
- G 10: Funktionsfähiger Prozess zur Herstellung von Demonstratorteilen durch thermoplastische Pultrusion

Meilenstein 5: Präsentation von Demonstratoren

Fertige Demonstratorteile werden zusammen mit Prüfberichten über alle relevanten Eigenschaften vorgestellt.

Meilenstein 6: Projektabschluss

Das Projekt ist erfolgreich abgeschlossen, d.h. alle Aufgaben sind erledigt und alle Ressourcen sind effizient verwaltet. Darüber hinaus sind die Demonstratorteile gefertigt und getestet und ihre Eignung für die Übertragung auf weitere Anwendungen nachgewiesen. Zu diesem Zweck wurden geeignete Werkstoffe entwickelt und entsprechend den Anforderungen für die verschiedenen Verfahrenstechniken ausgewählt und die Prozesse einschließlich der erforderlichen Anlagen etabliert.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die heutzutage in Flugzeuginnenräumen eingesetzten Faserverbund-Bauteile unterliegen strengen Anforderungen hinsichtlich ihrer FST-Eigenschaften. Als polymere Matrixmaterialien werden daher Phenolharze oder mit halogenbasierten Flammschutzmitteln modifizierte Kunststoffmaterialien eingesetzt. Diese halogenmodifizierten Materialien sowie Phenoplaste bieten einen sehr guten Flammschutz und schlechte Brennbarkeit, jedoch werden in der Verarbeitung, während des Einsatzes in der Anwendung und im Brandfall teils hochgiftige Stoffe (Halogenradikale, Phenol, Formaldehyd) freigesetzt. Die Verwendung dieser Materialien wird deshalb zunehmend durch politische Verordnungen wie z.B. die EU-Chemikalienverordnung REACH reglementiert und untersagt. Auch gestaltet sich die Verarbeitung dieser Materialien in effizienten, automatisierten Verarbeitungsprozessen aufgrund der Schadstoffexposition teilweise schwierig, sodass aufwändige manuelle Prozesse wie beispielsweise das Handlaminieren bei der Faserverbundfertigung angewendet werden müssen. Des Weiteren besitzen beispielsweise Phenoplaste reaktionsbedingt nur niedrige mechanische Eigenschaften im Vergleich zu zahlreichen anderen Kunststofftypen. Es ist daher notwendig neue flammresistente Kunststoffe sowie neue Flammschutzmittel mit der Eignung für die Modifikation von Polymeren zu entwickeln, zu testen und für die Verwendung in Luftfahrt-Anwendungen zu zertifizieren. Die Herstellung von flammgeschützten Faserverbundbauteilen mit hochgefüllten Harzen im üblichen Resin Transfer Moulding (RTM) ist jedoch problematisch, da eine Filterwirkung der additiven Flammschutzpartikel zu beobachten ist. Um wirtschaftlich



wettbewerbsfähige Bauteile mit den geforderten Eigenschaften herzustellen, müssen daher neue Materialien und alternative Herstellungsverfahren entwickelt und an die spezifischen Bedingungen angepasst werden.

In der aktuellen Fachliteratur finden sich zahlreiche Forschungsarbeiten zur Synthese von alternativen partikelhaltigen sowie flüssigen Flammenschutzmitteln und zur Modifikation von Polymeren mit diesen Flammenschutzmitteln, wobei klar hervorzuheben ist, dass sich die Flammschutzmodifikation signifikant negativ auf die Verarbeitbarkeit oder andere wichtige Eigenschaften der modifizierten Polymere auswirken kann. Die Herstellbarkeit von Faserverbunden unter Verwendung eines flammwidrigen FST-Polymers mittels bestimmter industrierelevanter Fertigungsverfahren muss daher im Einzelfall geprüft werden. Des Weiteren kann von den Brandeigenschaften des modifizierten Kunststoffes nicht direkt auf die Brandeigenschaften des aus diesem Material hergestellten Faserverbundbauteils geschlossen werden, da die FST-Eigenschaften dieses Bauteils als Systemeigenschaft aus Werkstoff, Bauteilgeometrie und Umgebungsbedingungen verstanden werden müssen. Dabei empfehlen sich je nach eingesetztem Material, sowie den im Anwendungsfall vorherrschenden Randbedingungen, unterschiedliche Flammschutz-Mechanismen die im Brandfall wirken sollen, um die geforderten FST-Eigenschaften zu erreichen. Es steht dem Materialentwickler zwar mit inhärent flammwidrigen Kunststoffen, verdünnend oder kühlend wirkenden Zuschlagstoffen, intumeszierenden Schutzschicht-(bildnern) oder in der Gasphase wirkenden Radikalfängern ein breites Spektrum an Materialien mit verschiedenartigen Flammschutzmechanismen zur Verfügung, diese können jedoch im Anwendungsfall aufgrund der Kompositbeschaffenheit, oder anderen Faktoren der erläuterten Systemeigenschaft nahezu wirkungslos sein. Aus diesem Grund muss die Forschungsarbeit unter Berücksichtigung der Themenkomplexität und der Vielzahl an Einflussfaktoren und Abhängigkeiten fortgeführt und mithilfe neuer Herstellungsverfahren für ein breites Anwendungsfeld zugänglich gemacht werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Direkt am Projekt beteiligt sind mehrere deutsche und kanadische Partner aus Forschung, Entwicklung und Industrie, unter denen ein sehr enger projektbezogener und wissenschaftlicher Austausch stattfand.

Deutsche Partner:

CompriseTec GmbH (CT)	Projekt Koordination (KMU)
Exakt Advanced Technologies GmbH (EAT)	Partner (KMU)
Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe/ Technische Universität Hamburg (TUHH)	Forschungspartner (Universität)
Laboratorium Fertigungstechnik Helmut-Schmidt-Universität (HSU)	Forschungspartner (Universität)
Olin Blue Cube Germany Assets GmbH & Co. KG (OLI)	Partner (Associated)

Kanadische Partner:

École de Technologie Supérieure (ETS)	Forschungspartner (Universität)
Kruger Biomaterials (KBM)	Partner (Industrie)
Pultrusion Technique Inc. (PTI)	Partner (Industrie)
Polytechnique Montreal (POLY)	Forschungspartner (Universität)



Neben den direkt am Projekt beteiligten und assoziierten Partnern, wurde ein stetiger Austausch mit Unternehmen der Fertigungs- und Werkstoffbranche gepflegt und weiter ausgebaut. Darüber hinaus wurden die Dienste von diversen Zulieferern und die Infrastruktur der Technischen Universität Hamburg (TUHH) in Anspruch genommen. In diesem Zuge sind von Seiten des Instituts für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe unter anderen nachfolgenden Parteien dankend zu nennen:

Aristo Graphic Systeme GmbH & Co. KG	Zuschnitt, Bebinderung
Clariant AG	Material, Bemusterung
Covestro AG	Material, Bemusterung
Graphit Kropfmühl GmbH	Material, Bemusterung
M&A Dieterle GmbH	FixedTow-Tapelegeprozess
Schill+Seilacher GmbH	Material, Bemusterung
Zentrallabor Chemische Analytik Technische Universität Hamburg	Materialtests
Forschungswerkstatt Maschinenbau Technische Universität Hamburg	Fertigung, Prüfstandbau

In Hinblick auf eine wirtschaftliche Verwertung der Erkenntnisse und Produkte des Projektes erfolgte unter anderem eine Zusammenarbeit mit nachfolgenden Parteien:

Lufthansa Technik AG	Demonstrator DirectPreg
Recaro Holding GmbH	Demonstrator Pultrusion
e-gnition Hamburg e.V.	Demonstrator DirectPreg



2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse

Entsprechend der Arbeitspakete wurden Leistungen definiert, die von den beteiligten Partnern zu den jeweiligen Arbeitspaketen zu erbringen und zu dokumentieren sind. Zur vollständigen Erfassung aller im Projekt erbrachten Ergebnisse sei an dieser Stelle auch auf die Schlussberichte der beteiligten Projektpartner verwiesen.

Die TUHH hatte im Zuge des Projekts die Dokumentationsverpflichtung, ggf. in Kooperation mit Projektpartnern, nachfolgender Projektdokumentationen (vgl. auch die Vorhabenbeschreibung zu COMP-1633 im englischen Original)

Projektdokumentation - Arbeitspaket 2:

- 2.3: Auswahl aller Materialien zur Prepreg-Herstellung
- 2.4: Bericht der Materialcharakterisierung zur Prepreg-Herstellung
- 2.5: Auswahl der Werkstoffe für die duroplastische Pultrusion
- 2.6: Bericht über die Materialcharakterisierung zur duroplastischen Pultrusion

Projektdokumentation - Arbeitspaket 5:

- 5.4: Prozessmodell für Prepreg-Imprägnierung und Heißpressen (CT, TUHH)
- 5.5: Bericht der Prozessparameter für Prepreg-Imprägnierung und Heißpressen (CT, TUHH)
- 5.7: Prozessmodell für die Duroplast-Pultrusion (CT, TUHH)
- 5.8: Bericht über die Prozessparameter für die Duroplast-Pultrusion (CT, TUHH)

Projektdokumentation - Arbeitspaket 8:

- 8.2: Testbericht des Demonstrators für pultrudierte Teile (POLY, TUHH)

Zusätzlich zu den initial angedachten Projektdokumentationen wurden umfangreiche Untersuchungen zur Entwicklung und Verarbeitung von partikelgefüllten FST Polymeren und Kompositen durchgeführt, welche nicht Anwendung in späteren Demonstratorbauteilen fanden. Die Ergebnisse sind AP 2 zuzuordnen und sind ebenfalls Bestandteil dieses Berichts.

Ergebnisbericht - Arbeitspaket 2

2.3: Auswahl aller Materialien zur Prepreg-Herstellung

Entsprechend AP 2.7 wurden die Anforderungen an das Material zur Prepregherstellung erfasst und der Markt in Bezug auf geeignete Materialien (Polymere, Textilie, Füllstoffe und Komponenten für die Formulierung und Modifizierung, Flammschutzmittel, Funktionsintegration) entsprechend der Spezifikationen der Prozesstechnologie untersucht und die am besten geeigneten Materialien ausgewählt.

Hierzu wurden zunächst die Anforderungen an das Harz- und Textilsystem entsprechend der Verarbeitbarkeit im DirectPreg-Prozess (Direktimprägnierungsverfahren von Prepregsystemen) ermittelt.

Der DirectPreg-Prozess wurde in Kooperation mit den Projektpartnern CompriseTec und Exakt entwickelt und gliedert sich entsprechend der Abbildung 2 in nachfolgende Fertigungsschritte:

1. Zuschnitt und Bebinderung der textilen Halbzeuge
2. Imprägnieren am Imprägnierwalzwerk
3. Lagerung und Konsolidierung (Optional)
4. Lay-Up / Laminieren
5. Vernetzung und Konsolidierung (z.B. Heißpresse, Ofen, Autoklav)

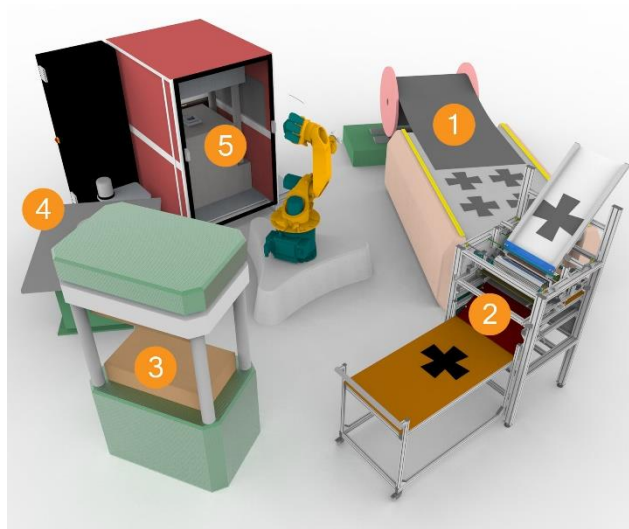


Abbildung 2: Schematischer Prozessablauf im DirectPreg-Verfahren

Maßgeblich für die Auswahl einer geeigneten Materialkombination sind insbesondere der Imprägnierprozess, die Vernetzung und Konsolidierung des Laminats im Heißpressverfahren sowie die Handhabbarkeit und Verarbeitbarkeit des Textils/Prepregs über den gesamten Prozesszeitraum. Darüber hinaus werden im Zuge des Projektes gute FST-Eigenschaften (Flamm-, Rauch-, Toxizitätseigenschaften), die den Brandschutzrichtlinien zur Anwendung im Flugzeuginnenraum genügen müssen, gefordert. Es wurden zusammen mit den Projektpartnern CompriseTec und Exakt nachfolgende Anforderungen an das Matrixsystem gestellt:

Anforderungen der Prozesstauglichkeit zur Direktimprägnierung:

- Steiler Viskositätsabfall bei geringem Temperaturanstieg für eine gute Imprägnierung in einem Temperaturfenster bis max. 80 °C
- Steiler Viskositätsanstieg bei Temperaturabsenkung (auf ca. Raumtemperatur) für gute Handhabungseigenschaften des imprägnierten Textils
- Viskositätsbereich bei der Imprägnierung (im Walzspalt bei max. 80 °C) von ca. 2.000 - 5.000 mPas
- Viskositätsbereich bei Raumtemperatur von min. 300.000 mPas
- Passender Tack für die Verarbeitung auf Walzen (analog gängiger Prepregsysteme)
- Möglichst lange Topfzeit, hohe Latenz, niedrige Reaktivität
- Passende Filmbildungseigenschaften auf Walzen
- Aushärtezeit 120 - 480 min
- Aushärtetemperatur max. 180 - 200 °C
- Reaktions-Onset min. 100 - 120 °C
- Lagerung imprägnierter Halbzeuge min. 7 Tage bei RT, unter Kühlung (+8 °C/-18 °C): 4 - 6 Monate



Projekt-/Anwendungsbedingte Anforderungen

- FST-Konformität gemäß FAR 25 843
- Kein Phenolanteil (REACH)
- In offenem System verarbeitbar (REACH)
- Lösemittelfrei
- Glasübergangstemperatur min. 180 °C
- Aktuelle kommerzielle Verfügbarkeit
- Wird im Bereich Aircraft Interior bereits eingesetzt (Luftfahrtzertifizierung)
- Dichte 1,1 - 1,3 g/cm³
- Einfärbbarkeit gegeben
- Mechanische Anforderungen gemäß Demonstratorauslegung

Nach einem ausführlichen Marktscreening und Kontaktaufnahme zu den Herstellern wurden folgende Systeme für eine weitere Verarbeitung im Rahmen des Projektes ausgewählt und angefragt bzw. beschafft.

Tabelle 1: Ausgewählte kommerzielle Harzsysteme DirectPreg COMP-1633

Hersteller	Harztyp	Harz	Härter	Verarbeitung	Anmerkung
Sicomini	Epoxid	SR1526	KTA 31x	Prepreg	Eingeschränkte Tauglichkeit bzgl. Heat Release
Covestro	PU	Blendur VP.PU 90IK01	Kat. VP.KU 3-4523	Prepreg, Hotmelt	Bereits im Aircraft Interior Bereich eingesetzt, hohe therm. Performance
Henkel	Benzoxazin	Loctite BZ 9110/9120		RTM, Wickeln, Pultrusion	1K-System
Henkel	Benzoxazin	Loctite BZ 9703/04/05		Prepreg	1K-System
Hexion	Epoxid	EPIKOTE 04332	EPIKURE 04332/ Cat. 04332	Prepreg	Bereits im Aircraft Interior Bereich eingesetzt, einstellbarer Tack
Olin	Epoxid	OXR 4100	OXH 4105	RTM	Kein inhärenter Flammschutz

Hierbei weisen die erstgenannten fünf Matrixsysteme bereits einen gewissen inhärenten Flammschutz entsprechend der geforderten Brandschutzverordnung auf. Das Epoxidharzsystem der Firma Olin hingegen weist keinen inhärenten Flammschutz auf und wurde zur Entwicklung eines eigenen flammenschutzpartikelgefüllten Matrixsystems verwendet, vgl. Abschnitt 2.11: Materialentwicklung und Flammschutzoptimierung.

Nachfolgend wird ein Auszug der Ergebnisse der Vorversuche zur Harzcharakterisierung mittels rheologischer Untersuchungen und DSC (Dynamische Differenzkalorimetrie) hinsichtlich der für den Imprägnierungsprozess relevanten Eigenschaften dargestellt.

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der ausgewählten Harzsysteme in DSC-Experimenten mit einer konstanten Aufheizrate von 20 K/min. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Beginn einer starken Vernetzungsreaktion bei allen Harzsystemen oberhalb von 125 °C liegt und damit ein ausreichender Abstand zur geplanten maximalen Prozessstemperatur von 80 °C im Imprägnierungsprozess gegeben ist, um ein spontanes Aushärten auf dem Imprägnierwalzwerk zu verhindern. Es ist gleichfalls deutlich zu erkennen, dass bei der Vernetzung der betrachteten Harzsysteme unterschiedlich viel exotherme Energie freigesetzt wird. Diese Erkenntnis kann später bei der Definition der Aushärtungsprozesse der imprägnierten und zum Laminat gestapelten Textilien im Heißpressprozess je nach Harzsystem Berücksichtigung finden.

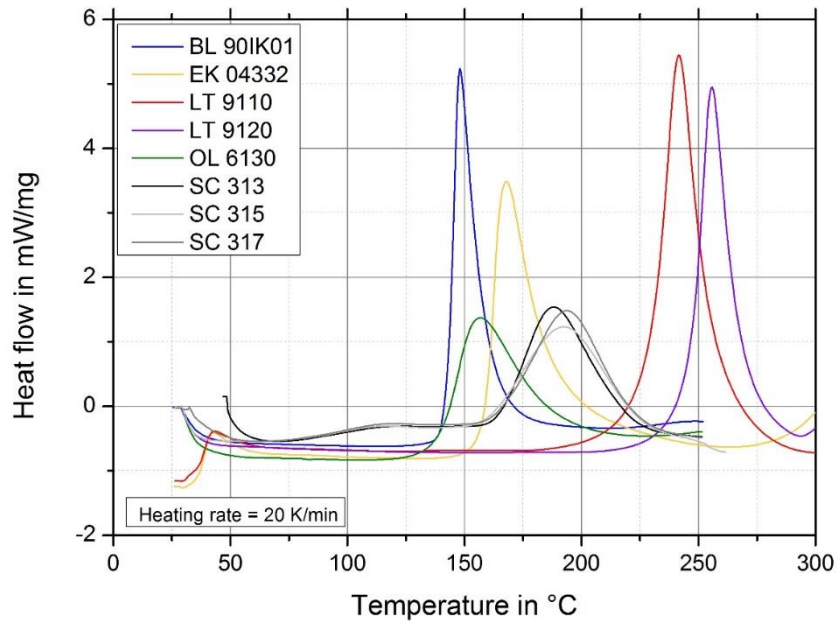


Abbildung 3: Vergleich der Onset-Temperatur zur einsetzenden Härtung und der freiwerdenden Wärmemenge während der Härtung von verschiedenen Harzsystemen im DSC-Experiment mit konstanter Aufheizrate.

In Abbildung 4 ist ein Überblick über den Viskositätsanstieg der ausgewählten Harzsysteme in isothermen Messungen im Rheometer gegeben. Die Temperatur wurde dabei für jedes Harzsystem so gewählt, dass sich eine Startviskosität innerhalb eines Prozessfensters von 1 bis 10 Pas einstellt. Betrachtet wurde über welchen Zeitraum die Viskosität innerhalb dieses Prozessfensters bleibt, um eine Aussage über die Verarbeitungstemperaturen und Verarbeitungsdauer für jedes Harzsystem im Imprägnierungsprozess zu erhalten. Es zeigt sich, dass die betrachteten Harzsysteme sehr unterschiedliche Viskositäten besitzen, sich aber für alle Harzsysteme eine Viskosität unterhalb von 10 Pas erreichen lässt ohne 80 °C zu überschreiten. Es ist daher möglich in den späteren Imprägnierungsversuchen auch den Einfluss unterschiedlich hoher Viskositäten auf die Harzaufnahme des zu imprägnierenden Textils zu untersuchen. Des Weiteren ist klar zu erkennen, dass die unterschiedlichen Harzsysteme deutliche Unterschiede im Viskositätsanstieg zeigen. So weisen die latent katalysierten Ein-Komponenten-Systeme Blendur 90IK01 sowie die beiden Benzoxazin-Systeme 9110 und 9120 kaum einen Viskositätsanstieg über einen Zeitraum von 6 Stunden auf und bieten damit eine ausreichende Verarbeitungsdauer. Auch das Hexion-System 04332 zeigt je nach Temperaturniveau einen akzeptablen Viskositätsanstieg über die betrachtete Zeit. Das Sicomin-System zeigt mit allen drei Härter-Varianten einen zu schnellen Viskositätsanstieg und auch das Olin-System beginnt in seinem derzeitigen Formulierungszustand deutlich zu früh zu härten. Die beiden letztgenannten Harzsysteme müssen daher für die folgenden Imprägnierungsversuche zunächst von der Untersuchung ausgeschlossen werden.

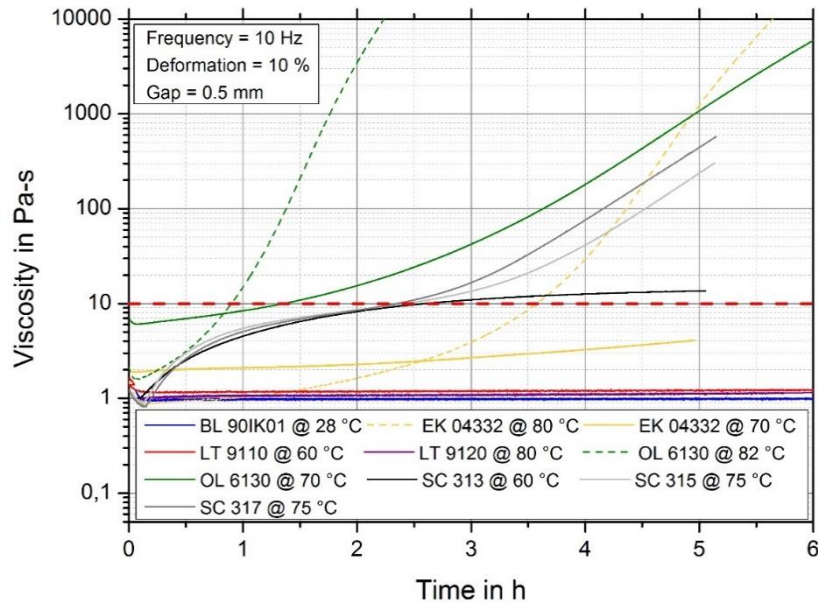


Abbildung 4: Vergleich des zeitlichen Viskositätsanstieges der verschiedenen Harzsysteme im Rheometer bei isothermen Bedingungen für eine Ausgangsviskosität im Bereich von 1 bis 10 Pas

Ähnlich zu der Anforderungsdefinition für die Harzsysteme wurde in Zusammenarbeit mit CompriseTec und Exakt eine Auswahl an kommerziell verfügbaren Glasfasertextilien getroffen, um diese in den kommenden Vorversuchen zur Untersuchung der Prozessierbarkeit zu verwenden. Ziel war es dabei eine Gruppe an Textilien zu finden, die den geometrischen Anforderungen der zu verwendenden Anlagensysteme genügt und deren prägende Merkmale sich nur in möglichst wenigen Aspekten definiert voneinander unterscheiden. Dies soll in den kommenden Versuchen die Korrelation der Messdaten aus dem Verarbeitungsprozess mit bestimmten Textilmerkmalen ermöglichen, da zu erwarten ist, dass die Beschaffenheit bestimmter Textilien im Imprägnierungsprozess vorteilhaft ist. Eine Auflistung der betrachteten Textilmerkmale bzw. der Merkmale die von der Textilbeschaffenheit abhängen sowie die ausgewählten Textilien sind nachfolgend gelistet.

Betrachtete Merkmale:

- Flächengewicht
- Einzellagendicke
- Symmetrie der Webung oder Bindung
- Art des Textils (Gewebe oder Gelege), Art der Webung oder Bindung
- Rovinggröße
- Dichteit/Feinheit der Webung
- Verschiebefestigkeit/Ondulationstendenz
- Schlaffheit
- Schneidbarkeit
- Ausfransverhalten der Kanten
- Permeabilität und Imprägnierbarkeit



Entsprechend der genannten Merkmale und guten Verfügbarkeit wurden unter anderem die nachfolgenden Glasfasertextile im Rahmen des Projekts beschafft:

Tabelle 2: Ausgewählte kommerzielle Textilsysteme DirectPreg COMP-1633

Hersteller	Webart	FAW [g/m ²]	Feinheit [tex]	Faserdurchmesser [µm]	Textildicke [µm]
R&G	Köper	80	34	9	88
R&G	Köper	163	68	9	179
R&G	Köper	280	68/204	9	308
R&G	Köper	390	68/272	9	430
R&G	Köper	580	1200	14	640
R&G	Leinwand	163	68	9	179
R&G	Unidirektional-Gewebe	220	68 (0°) / 22 (90°)	9/7	240

Insgesamt ist darauf hinzuweisen, dass der Einfluss der genannten Merkmale nicht vollständig isoliert untersucht werden kann, da sich die Materialien naturgegeben stets in mehr als einem Parameter unterscheiden. Mit der getroffenen Materialauswahl können dennoch weitgehend systematische Untersuchungen durchgeführt und Abhängigkeiten identifiziert werden.

Neben den aufgeführten Glasfasersystemen, wurden noch weitere Glas- und Carbonfasertextile mit Leinwandbindung und unidirektionale Gewebe untersucht und prozessiert. Zur detaillierten Analyse der Prozessierbarkeit verschiedener Faserflächengewichte an der TUHH wurden die erstgenannten fünf Glasfaserköpergewebe eingesetzt, vergleiche Berichtsdocumentation Kapitel 5.5.

2.4: Bericht der Materialcharakterisierung zur Prepreg-Herstellung

Charakterisierung der Matrixeigenschaften

Entsprechend der Vorauswahl an Materialien aus dem vorangegangenen Kapitel wurden zwei Harzsysteme ausgewählt, die bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit im DirektPreg-Prozess eingehend analysiert werden. Das 1K-PU System Blendur VP.PU 90IK01 / Kat. VP.KU 3-4523 der Firma Covestro mit inhärenten Flammseigenschaften wird als Primärsystem zur Optimierung der Prozesseigenschaften verwendet. Neben der reinen Charakterisierung der Matrixeigenschaften, wird auch die potentielle Verarbeitbarkeit des Harzsystems analysiert. Hierzu werden unter anderem die Reaktivität, Viskosität, Klebrigkeit (Tack) und das allgemeine rheologische Verhalten der polymeren Matrixsysteme untersucht.

Darüber hinaus wird das 2K-Epoxidharzsystem OXR4100 / OXH4105 der Firma Olin eingesetzt. Dieses Harzsystem weist keine inhärenten Flammseigenschaften auf und ist nicht nach gängigen Flammschutzverordnungen zertifiziert. Dieses Harzsystem wird zur Entwicklung eines flammschutzpartikelgefüllten Harzsystems verwendet und später im DirectPreg-Verfahren verarbeitet. Die Kurzcharakterisierung des Harzsystems findet sich im Abschnitt 2.11.

Matrixsystem: Blendur VP.PU 90IK01

Blendur bietet zahlreiche Optionen für die Herstellung von faserverstärkten Strukturbauteilen, Halbfertigerzeugnissen und Fertigerzeugnissen. Zudem kann eine Vielzahl üblicher Füller in das Harzsystem integriert werden. Das hohe Maß an Flexibilität (insbesondere die Kompatibilität zu anderen Blendur-Formulierungen) ermöglicht die Nutzung von Fertigungsverfahren, die normalerweise für Duroplaste eingesetzt werden: Gieß- oder Spritzgießtechnik, Resin Transfer Molding (RTM), Vakuuminfusionsverfahren, Pultrusion, Filament-Winding, Prepreg-Technik, Sheet Molding Compound (SMC) und Bulk Molding Compound (BMC). Blendur wird typischerweise zur Herstellung von Verbundwerkstoffen für Hochtemperaturanwendungen in



der Luft- und Raumfahrt, im Schienenverkehr, in der Automobilindustrie sowie den Elektro-/Elektronikindustrien verwendet. Die wichtigsten thermischen und mechanischen Kennwerte laut Hersteller sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Materialkennwerte - Blendur VP.PU 90IK01

Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]	Zugbruchdehnung [%]	Viskosität @25°C [Pas]	Tg [°C]	MR	Flamm-schutz
40-60	3	1,5-2,5	1,4-2,4	290-310	-	inhärent

Die optimalen mechanischen Eigenschaften von Blendur werden durch schrittweise Wärmehärtung erreicht. Für die nachfolgenden Versuche am vollständig vernetzten System wurde das Harzsystem, sofern nicht anders angegeben, folgender Wärmebehandlung unterzogen: 3h @ 80°C, 3h @ 120°C, 3h @ 160°C, 3h @ 200°C.

Zunächst wurde das Blendur-System auf sein Viskositäts- und Vernetzungsverhalten hin untersucht. Hierzu wurden u. A. isotherme rheologische Untersuchungen bei Raumtemperatur und den späteren Umgebungsbedingungen der Fertigung durchgeführt. Hierdurch lässt sich die Topfzeit bzw. die maximale Verarbeitungszeit des Harzsystems ermitteln, in der die Viskosität des Harzes gering genug ist, um sich weiter verarbeiten zu lassen. Neben dem reinen Blendur-System wurden auch unterschiedliche Füllstoffanteile (2 Gew.-%, 4 Gew.-%, 6 Gew.-%) des Formtrennmittels Acmosal 82-869 im Harzsystem untersucht. Das Acmosal 82-866 der Firma Acmos ist ein internes Formtrennmittel für ungesättigte Polyester- (kurz UP-Harze) und Epoxidharze (kurz EP-Harze). Es wird in diesem Projekt später hauptsächlich für Pultrusionsprozesse verwendet. Das interne Formtrennmittel enthält OH-Gruppenhaltige Komponenten wie zum Beispiel Alpha-Isotridecyl-omega-hydroxy, Isotridecanol und Kaliumhydroxid. Die Ergebnisse der isothermen rheologischen Untersuchung finden sich in Abbildung 5. Es ist zu erkennen, dass sich das Viskositätsverhalten des Blendur-Systems über den betrachteten Zeitraum von 5 Stunden nicht (oder nur marginal) ändert. Die Zugabe des Formtrennmittels reduziert die Ausgangsviskosität in einem vernachlässigbaren Maße. Das Blendur-System lässt sich entsprechend ohne weiteres über einen Zeitraum > 5 h bei Raumtemperatur (25 °C) verarbeiten. Was sowohl im DirektPreg-Prozess (Anmischen, Imprägnieren, Konsolidieren, Imprägnieren, Vernetzung) als auch Pultrusionsprozess ausreichend ist.

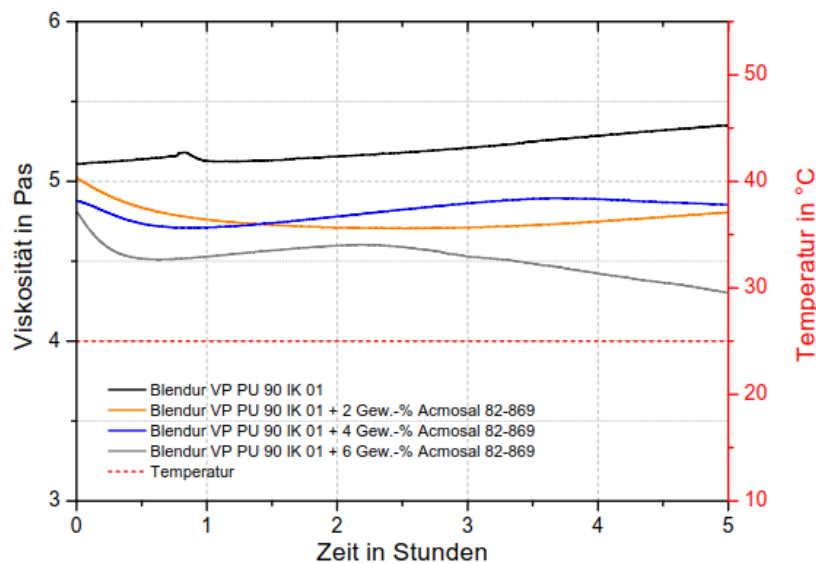


Abbildung 5: Ermittlung der Topfzeit von Blendur VP PU90IK01 durch isotherme Messungen bei 25 °C [Neubacher]



Zur Bestimmung des Beginns der Vernetzungsreaktion des Blendursystems wurden rheologische Untersuchungen in einem Temperaturbereich zwischen 25°C - 120°C durchgeführt, siehe Abbildung 6. Sowohl die Messungen des reinen Blendurs, als auch die Formtrennmittel-Formulierungen haben nahezu den gleichen Verlauf und weisen nur kleine Unterschiede auf. Startend bei einer initialen Viskosität von etwa 5 Pas, fällt die Viskosität infolge Temperaturerhöhung zunächst ab, bis die Vernetzung bei circa 110 °C eintritt. Hier ist ein plötzlicher starker Anstieg der Viskosität sichtbar. Die Ursache hierfür ist der latente Thermo-Katalysator, der bei den Messungen ab circa 110 °C anfängt zu reagieren. Das interne Formtrennmittel hat lediglich eine kleine Auswirkung auf die Vernetzungsstarttemperatur. Diese sinkt mit steigendem Formtrennmittelgehalt leicht ab. Zwischen den internen Formtrennmittelkonzentrationen 0 Gew.-% und 6 Gew.-% sind dies 1 - 2 °C, was in der Fertigung zu vernachlässigen ist.

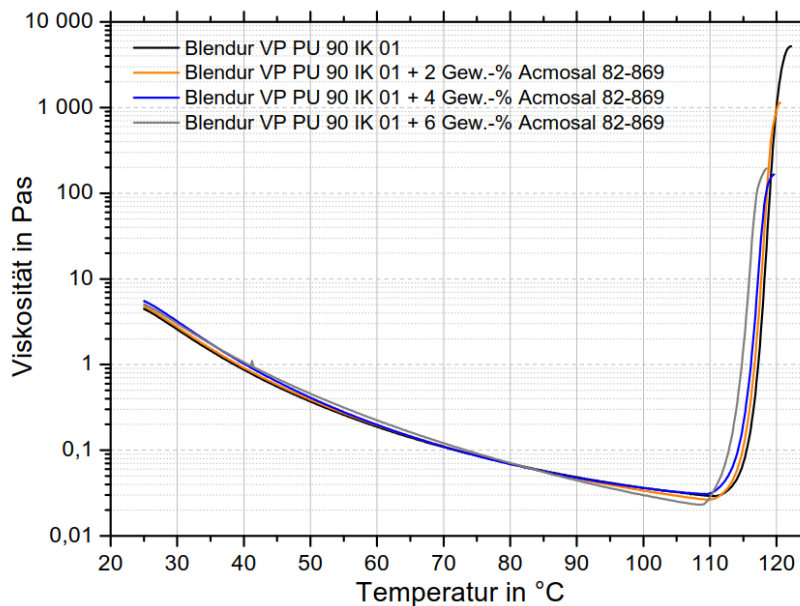


Abbildung 6: Viskositätsverlauf bei Erwärmung und Einsetzen der Vernetzungsreaktion von Blendur VP PU90IK01 (Heizrate: 2 K/min) [Neubacher]

Neben den rheologischen Messungen wurden DSC-Messungen (Dynamische Differenzkalorimetrie) durchgeführt, um die abgegebene oder aufgenommene Wärmemenge bei Aufheizung im Temperaturbereich zwischen 25 °C - 250 °C durchgeführt, siehe Abbildung 7. Die Messverläufe unterscheiden sich nur geringfügig. Mit den Kennzahlen aus Tabelle 4 wird deutlich, dass sowohl die On-Set-Temperatur, als auch die Peak-Temperatur nicht vom internen Formtrennmittel beeinflusst werden. Ganz im Gegenteil zu der Reaktionsaffinität des Harzsystems. Diese nimmt mit steigender internen Formtrennmittelkonzentration deutlich ab. Die Kennzahlen hierfür sind der Peak-Wärmestrom und der in diesem Bereich abgegebene Wärmestrom, auch Reaktionswärme genannt. Bei einer Konzentrationszunahme von 6 Gew.-% internem Formtrennmittel werden der Peak Wärmestrom um circa 19 % und die abgegebene Reaktionswärme um circa 16 % herabgesetzt. Die sich einstellende Differenz zwischen der Reduzierung der Reaktivität und des Masseanteils des internen Formtrennmittels kann durch die unterschiedlich langen Anmischzeiten begründet sein. Die Zubereitung der Mischungen mit internen Formtrennmittel hat etwas mehr Zeit, als die Messung ohne zugesetzten internen Formtrennmittel, benötigt. Innerhalb dieser, wenn auch kurzen Zeitdifferenz, kann das Harz mit der Luftfeuchtigkeit reagiert haben, wodurch die gemessene Reaktivität des Harzsystems niedriger ausfällt. Ansonsten sind keine weiteren Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen sichtbar, wodurch das interne Formtrennmittel bis auf die



Herabsetzung der Reaktivität keinen weiteren nennenswerten Einfluss auf das Reaktionsverhalten des Harzsystems ausübt.

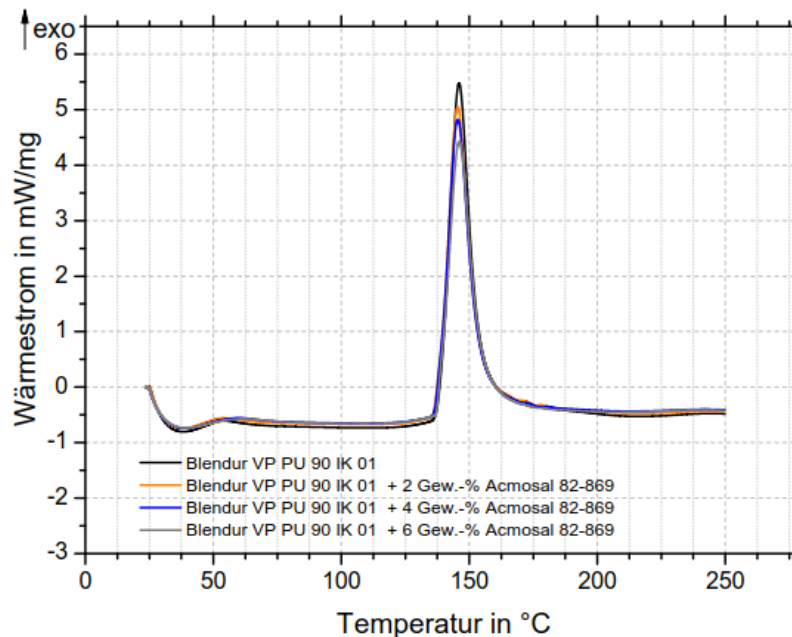


Abbildung 7: Aufheizphase der DSC-Messungen vom flüssigen Blendur VP PU90IK01 (Heizrate: 20 K/min) [Neubacher]

Tabelle 4: Messkennzahlen der DSC-Messungen vom Blendur VP PU90IK01 [Neubacher]

FTM-Konzentration [Gew.-%]	Peak Temperatur [°C]	Peak Wärmestrom [mW/mg]	Reaktionswärme [J/g]	Onset [°C]
0	146,0	5,475	222,9	139,1
2	145,4	5,043	209,2	138,4
4	145,5	4,822	198,3	138,4
6	146,1	4,427	186,8	138,8

2.5: Auswahl der Werkstoffe für die duroplastische Pultrusion

Für den Pultrusionsprozess erfolgte durch CompriseTec eine detaillierte Marktanalyse kommerziell verfügbarer flammbeständiger und pultrusionsfähiger duromerer Harzsysteme. Es wurden hierfür knapp 50 verschiedene Harzsysteme identifiziert, die grundsätzlich für den Pultrusionsprozess verwendbar sind und einen gewissen inhärenten Flammenschutz aufweisen. In enger Abstimmung mit den Vertriebs- und technischen Abteilungen der Harz-Hersteller erfolgte eine Eingrenzung der einsetzbaren Harzsysteme für die Pultrusion. Es hat sich gezeigt, dass die Erfüllung des Flammschutzes ein kritischer Aspekt für das Pultrusionsharzsystem ist. So sind auf dem Markt fast keine Harzsysteme zu finden, die die Anforderungen der Luftfahrtstandards für Flammschutz erfüllen.



Anhand aller gesammelten Information von den Harzherstellern, wurde ein Bewertungssystem erstellt, das es ermöglicht, ein geeignetes Materialsystem auszuwählen. Folgende Bewertungskriterien wurden betrachtet:

- Prozessfähig für Pultrusion
- Verarbeitungsparameter
 - Aushärtetemperatur
 - Topfzeit
 - Viskosität
- FST-Eigenschaften
- Lieferbarkeit und Verfügbarkeit der Harzkomponenten

Tabelle 5: Ausgewählte kommerzielle Harzsysteme Pultrusion

Hersteller	Harztyp	Harz	Härter	Verarbeitung	Anmerkung
Sicomini	Epoxid	SR1126	SD8202	Pultrusion	Zertifizierte FST-Eigenschaften
Covestro	PU	Blendur VP.PU 90IK01	Kat. VP.KU 3- 4523	Prepreg, Hotmelt	Bereits im Aircraft Interior Bereich eingesetzt, hohe therm. Performance
Scott Bader	Epoxid	1212	1212	Pultrusion	Flammschutz durch ATH Zusatz
Huntsman	Epoxid	40002	40003	RTM, Pultrusion	Bereits im Aircraft Interior Bereich eingesetzt
Huntsman	Epoxid	40004	40005	RTM, Pultrusion	Bereits im Aircraft Interior Bereich eingesetzt
Olin	Epoxid	OXR 4100	OXH 4105	RTM	Kein inhärenter Flammschutz

Auf Basis des Bewertungssystems wurden die in Tabelle 5 gelisteten Harzsysteme für eine eingehende Vorversuchsanalyse ausgewählt.

Aufgrund von Herausforderungen bezüglich von Mindermengenabnahmen der einzelnen Komponenten, Lieferschwierigkeiten und Verfügbarkeitsproblemen, gestaltete sich die Beschaffung teilweise aufwendig.

Dank der Vorarbeiten zur Materialauswahl im Direktimprägnierverfahren, wurde zunächst das Blendur VP.PU 90IK01 der Firma Covestro als Referenzharzsystem bestimmt. Darüber hinaus wurden final die Epoxidharzsysteme Araldite FST 40002 / 40003 und Araldite FST 40004 / 40005 der Firma Huntsman für eine genauere Analyse ausgewählt.

2.6: Bericht über die Materialcharakterisierung zur duroplastischen Pultrusion

Charakterisierung der Matrixeigenschaften

Entsprechend der Vorauswahl an Materialien aus dem vorangegangenen Kapitel wurden zwei Harzsysteme bestimmt, die bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit im Pultrusions-Prozess eingehend analysiert werden. Das 1K-PU System Blendur VP.PU 90IK01 / Kat. VP.KU 3-4523 der Firma Covestro mit inhärenten Flammsechutzeigenschaften wird als Primärsystem zur Optimierung der Prozesseigenschaften verwendet. Neben der reinen Charakterisierung der Matrixeigenschaften, wird auch die potentielle Verarbeitbarkeit des Harzsystems analysiert. Hierzu werden unter anderem die Reaktivität, Viskosität, Klebrigkeit (Tack) und das allgemeine rheologische Verhalten der polymeren Matrixsysteme untersucht.

Darüber hinaus werden die 2K-Epoxidharzsysteme Araldite FST 40002 / 40003 und Araldite FST 40004 / 40005 der Firma Huntsman eingesetzt. Auch dieses Harzsystem weist inhärente



Flammschutzeigenschaften auf und ist nach eingängigen Flammschutzverordnungen zertifizierbar.

Matrixsystem: Blendur VP.PU 90IK01

Die Materialcharakterisierung des 1K-Systems Blendur VP.PU 90IK01 / Kat. VP.KU 3-4523 der Firma Covestro findet sich im Abschnitt 2.4 im Bericht der Materialcharakterisierung zur Prepreg-Herstellung.

Matrixsystem: Huntsman Araldite FST 40002 / 40003

Das zweikomponentige duromere Matrixsystem Huntsman Araldite FST 40002 / 40003 wurde speziell für den Flugzeuginnenraumeinsatz von Verbundbauteilen entwickelt. Es weist inhärente FST-Eigenschaften nach FAR 25.853 / ABD 0031 auf und findet fertigungsseitig in RTM-, Infusions- und Pultrusionsverfahren Anwendung. Die FST-Eigenschaften werden ohne Zugabe von Halogenen oder partikulären Füllstoffen erreicht. Nach Herstellerangaben können Pultrusionsgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/h erreicht werden. Die wichtigsten Materialkennwerte des Harzsystems laut Hersteller sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Materialkennwerte - Araldite FST 40002 / FST 40003

Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]	Zugbruchdehnung [%]	Viskosität @25°C [Pas]	Tg [°C]	MR	Flamm-schutz
100	3	5	0,75	260	100/18	inhärent

Die optimalen mechanischen Eigenschaften von Araldite werden durch schrittweise Wärmehärtung erreicht. Für die nachfolgenden Versuche am vollständig vernetzten System wurde das Harzsystem, sofern nicht anders angegeben, folgender Wärmebehandlung unterzogen: 1h @ 100 °C, 1 h @ 120 °C, 2 h @ 180 °C.

Zunächst wurde das Araldite-System auf sein Viskositäts- und Vernetzungsverhalten hin untersucht. Hierzu wurden u. A. isotherme rheologische Untersuchungen bei Raumtemperatur und den späteren Umgebungsbedingungen der Fertigung durchgeführt. Hierdurch lässt sich die Topfzeit bzw. die maximale Verarbeitungszeit des Harzsystems ermitteln, in der die Viskosität des Harzes gering genug ist, um sich weiter verarbeiten zu lassen. Neben dem reinen Araldite-System wurden auch unterschiedliche Füllstoffanteile (2 Gew.-%, 4 Gew.-%, 6 Gew.-%) des Formtrennmittels Chemlease IC25 im Harzsystem untersucht.

Das Chemlease IC25 der Firma Chemtrend ist ein internes Formtrennmittel für Ungesättigte Polyesterharzsysteme. Das interne Formtrennmittel kann sowohl in Kalt- als auch in Heißprozessen verarbeitet werden. Durch das Verwenden vom Chemlease IC25 können sich die Fließeigenschaften von Polyesterharzsystemen verbessern. Die Dichte des internen Formtrennmittels, bei 20 °C, beträgt 0,95 g/cm³.

Die Ergebnisse der isothermen rheologischen Untersuchung finden sich in Abbildung 8. Es ist zu erkennen, dass sich das Viskositätsverhalten des Araldite-Systems über den betrachteten Zeitraum von 5 Stunden nicht (oder nur marginal) ändert. Die Steigerung der Viskosität bewegt sich im Bereich von 0,5 Pas. Die Zugabe des Formtrennmittels erhöht die Ausgangsviskosität in einem vernachlässigbaren Maße. Das Araldite-System lässt sich entsprechend ohne weiteres über einen Zeitraum > 5h bei Raumtemperatur (25 °C) verarbeiten, was im Pultrusionsprozess ausreichend ist.

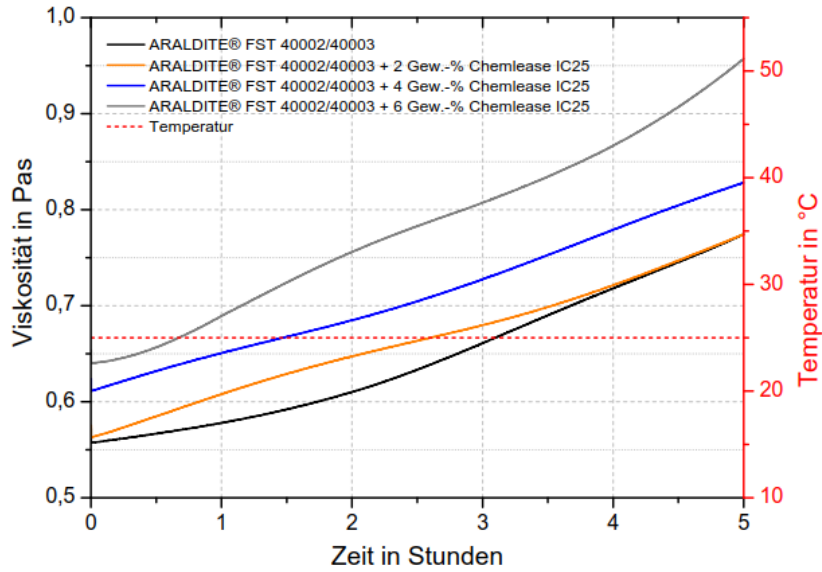


Abbildung 8: Ermittlung der Topfzeit vom Huntsman Araldite® FST 40002 und Araldite® FST 40003 durch isotherme Messungen bei 25 °C [Neubacher]

Zur Bestimmung des Beginns der Vernetzungsreaktion des Araldite-Systems wurden rheologische Untersuchungen in einem Temperaturbereich zwischen 25 °C – 120 °C durchgeführt, siehe Abbildung 9. Sowohl die Messungen des reinen Araldits, als auch die Formtrennmittel-Formulierungen haben nahezu den gleichen Verlauf und weisen nur kleine Unterschiede auf. Startend bei einer initialen Viskosität von etwa 1 Pas, fällt die Viskosität infolge Temperaturerhöhung zunächst ab, bis die Vernetzung bei circa 107 °C eintritt. Hier ist ein plötzlicher starker Anstieg der Viskosität sichtbar. Es ist darüber hinaus ein Trend, in Form einer Viskositätszunahme zwischen 75 °C und 85 °C mit zunehmender Formtrennmittelkonzentration erkennbar. Diese liegt im Bereich von 150 mPas, was in der Fertigung zu vernachlässigen ist. Das interne Formtrennmittel hat keine Auswirkung auf die Vernetzungsstarttemperatur. Diese ist mit steigendem Formtrennmittelgehalt. Nahezu konstant bei 107 °C.

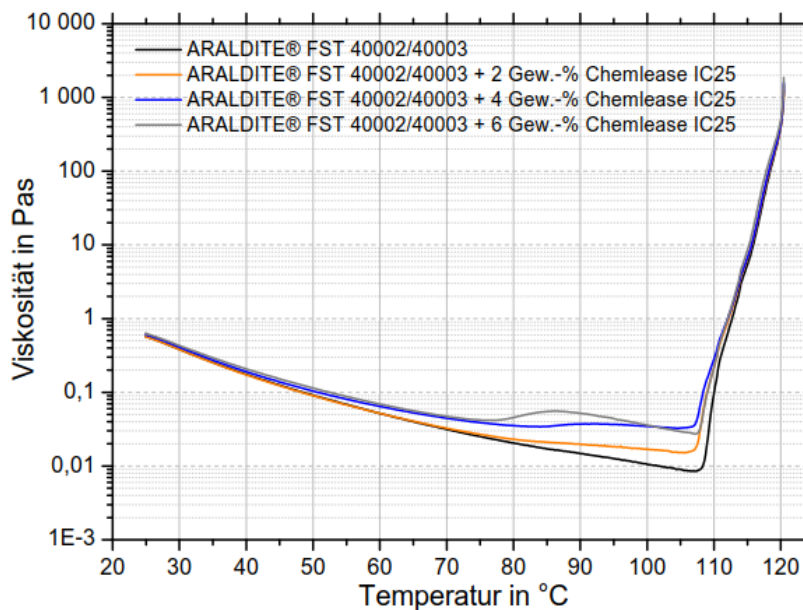


Abbildung 9: Viskositätsverlauf bei Erwärmung und Einsetzen der Vernetzungsreaktion von Huntsman Araldite® FST 40002/40003 (Heizrate: 2 K/min) [Neubacher]



In der nachstehenden Abbildung 10 ist die erste Aufheizphase der DSC-Messung vom Huntsman Araldite FST 40002/40003 Harzsystem dargestellt. Hierbei ist der Wärmestrom in mW/mg über die Temperatur in °C abgetragen. Die vier Messungen verhalten sich über den abgebildeten Temperaturbereich annähernd gleich. Die wichtigsten Kennzahlen zu den durchgeführten Messungen sind in Tabelle 7 aufgeführt. An den Werten lässt sich erkennen, dass das interne Formtrennmittel nur einen geringen Einfluss auf die Reaktivität des Harzsystems hat. Sowohl die On Set Temperatur, die gemittelt bei 142,27 °C liegt, als auch die Peak Temperatur, die gemittelt bei 146,2 °C liegt, werden nicht vom internen Formtrennmittel beeinflusst. Durch den hinzugefügten Masseanteil des internen Formtrennmittels wird jedoch die Reaktivität des Harzsystems leicht herabgesetzt. Die Peak Temperaturen des Wärmestroms verringern sich nahezu im selben Verhältnis, in dem die Konzentration des internen Formtrennmittels steigt. Die Reaktionswärme hingegen, wird deutlich stärker herabgesetzt. Zwischen der Messung mit 0 Gew.-% und 6 Gew.-% internen Formtrennmittel, liegt eine Differenz von circa 11 %. Die von uns darüber hinaus ermittelte Glasübergangstemperatur des prozessierten Harzsystems in der DSC liegt zwischen 220 – 240 °C und damit unter den Angaben des Herstellers von 260°C.

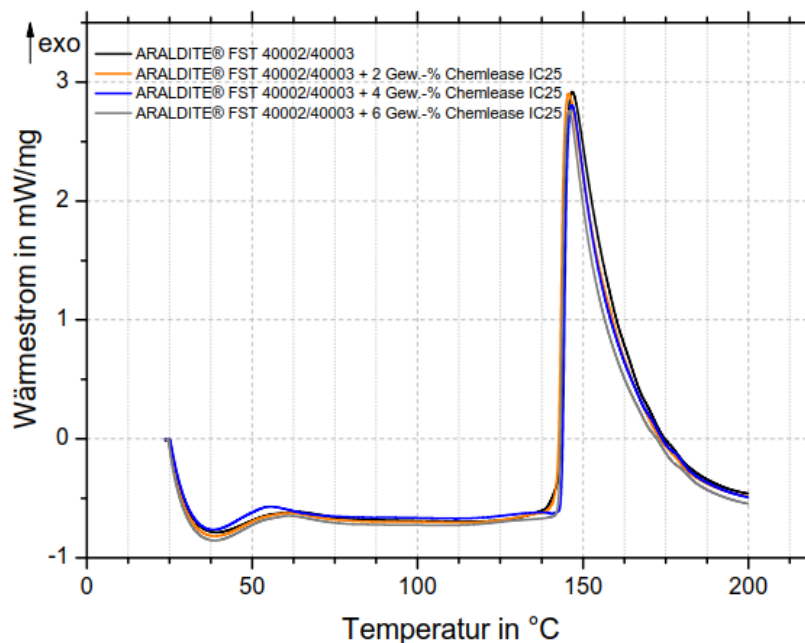


Abbildung 10: 1. Aufheizphase der DSC-Messungen vom flüssigen Huntsman Araldite® FST 40002 und Araldite® FST 40003 Harzsystem (Heizrata: 20 K/min) [Neubacher]

Tabelle 7: Messkennzahlen der DSC-Messungen vom Huntsman Araldite® FST 40002/40003 [Neubacher]

FTM-Konzentration [Gew.-%]	Peak Temperatur [°C]	Peak Wärmestrom [mW/mg]	Reaktionswärme [J/g]	Onset [°C]
0	146,7	2,917	188,3	143,2
2	145,7	2,903	183,9	142,4
4	146,6	2,804	169,1	140,5
6	145,8	2,757	167,3	143,0



Matrixsystem: Huntsman Araldite FST 40004 / 40005

Das zweikomponentige duromere Matrixsystem Huntsman Araldite FST 40004 / 40005 wurde speziell für den Innenraumeinsatz von Zügen und Eisenbahnen entwickelt. Es weist inhärente FST-Eigenschaften nach UL94 V0/V1 auf und findet fertigungsseitig in Infusions- und Pultrusionsverfahren Anwendung. Die FST-Eigenschaften werden ohne Zugabe von Halogenen oder partikulären Füllstoffen erreicht. Nach Herstellerangaben können Pultrusionsgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/h erreicht werden. Die wichtigsten Materialkennwerte des Harzsystems laut Hersteller sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Materialkennwerte - Araldite FST 40004 / FST 40005

Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]	Zugbruchdehnung [%]	Viskosität @25°C [Pas]	Tg [°C]	MR	Flamm-schutz
45	3,2	1,5	0,5	270	100/25	inhärent

Die optimalen mechanischen Eigenschaften von Araldite werden durch schrittweise Wärmehärtung erreicht. Für die nachfolgenden Versuche am vollständig vernetzten System wurde das Harzsystem, sofern nicht anders angegeben, folgender Wärmebehandlung unterzogen: 1 h @ 100 °C, 1 h @ 120 °C, 2 h @ 180 °C.

Zunächst wurde das Araldite-System auf sein Viskositäts- und Vernetzungsverhalten hin untersucht. Hierzu wurden u. A. isotherme rheologische Untersuchungen bei Raumtemperatur und den späteren Umgebungsbedingungen der Fertigung durchgeführt. Hierdurch lässt sich die Topfzeit bzw. die maximale Verarbeitungszeit des Harzsystems ermitteln, in der die Viskosität des Harzes gering genug ist, um sich weiter verarbeiten zu lassen. Neben dem reinen Araldite-System wurden erneut unterschiedliche Füllstoffanteile (2 Gew.-%, 4 Gew.-%, 6 Gew.-%) des Formtrennmittels Chemlease IC25 im Harzsystem untersucht.

Die Ergebnisse der isothermen rheologischen Untersuchung finden sich in Abbildung 11. Es ist zu erkennen, dass sich das Viskositätsverhalten des Araldite-Systems über den betrachteten Zeitraum von 5 Stunden nicht (oder nur marginal) ändert. Die Steigerung der Viskosität bewegt sich im Bereich von unter 0,5 Pas. Die Zugabe des Formtrennmittels hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Ausgangsviskosität. Das Araldite-System lässt sich entsprechend ohne weiteres über einen Zeitraum > 5h bei Raumtemperatur (25 °C) verarbeiten. Was im Pultrusionsprozess ausreichend ist.

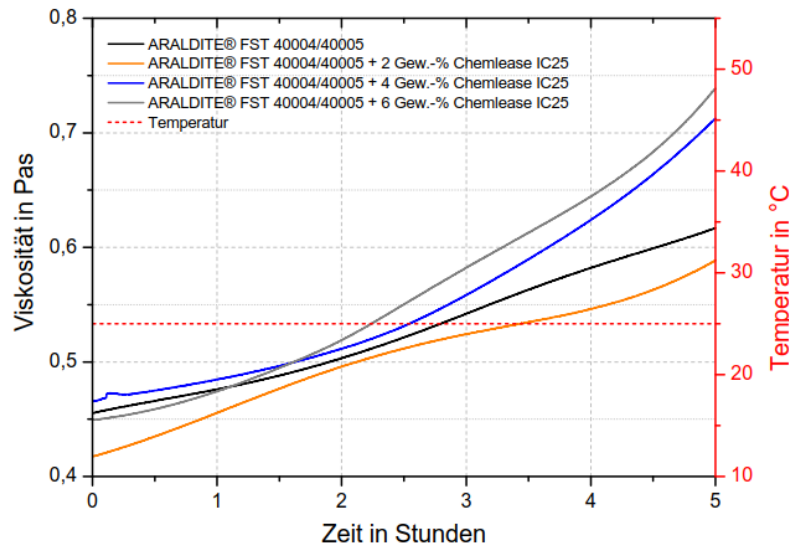


Abbildung 11: Ermittlung der Topfzeit vom Huntsman Araldite® FST 40004 und Araldite® FST 40005 durch isotherme Messungen bei 25 °C [Neubacher]

In Abbildung 12 ist die dynamische Viskosität in Pas, in logarithmischer Skalierung über die Temperatur in °C dargestellt. Die Starttemperatur der Messungen beträgt 25 °C und die Endtemperatur 120 °C. Die aus den vier Messungen gemittelte Startviskosität liegt bei 452,7 mPas. Vom Startpunkt aus, fällt die dynamische Viskosität über den Anstieg der Temperatur ab, bis die Vernetzung bei circa 102-104 °C einsetzt. Die Abweichungen zwischen den Messungen im Temperaturbereich von 90 °C und 100 °C sind im Bereich der zu erwartenden Messabweichungen und entsprechend zu vernachlässigen.

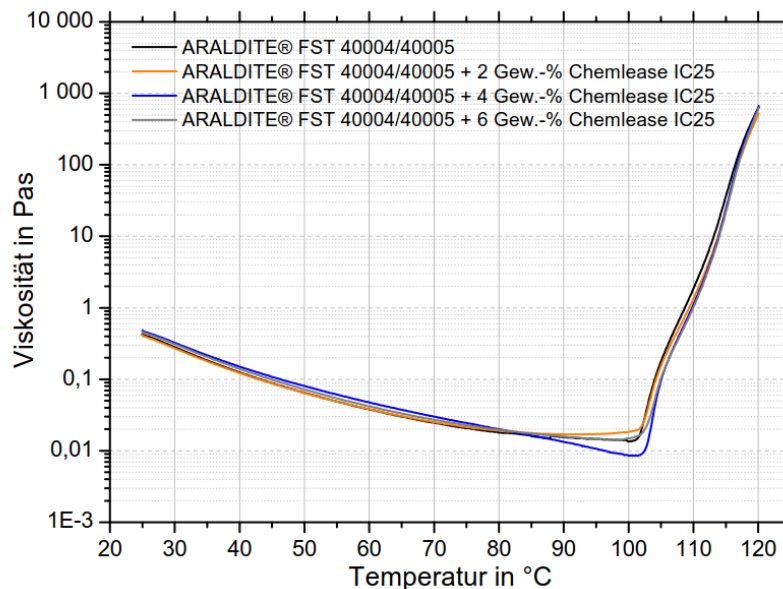


Abbildung 12: Viskositätsverlauf bei Erwärmung und Einsetzen der Vernetzungsreaktion von Huntsman Araldite® FST 40004 und Araldite® FST 40005 (Heizrate: 2 K/min) [Neubacher]

In Abbildung 13 ist die erste Aufheizphase der DSC-Messungen vom flüssigen Huntsman Araldite FST 40004/40005 Harzsystem abgebildet. Hierbei ist der Wärmestrom in mW/mg über die Temperatur in °C abgetragen. Die aus den Messergebnissen resultierenden Messkennzahlen sind in Tabelle 9 aufgeführt. Wie schon bei den vorigen Harzsystemen, hat das interne Formtrennmittel keinen nennenswerten Einfluss auf die On-Set und Peak Temperatur. Das interne Formtrennmittel senkt jedoch den Peak Wärmestrom und die



Reaktionswärme herab. Bei einem Anstieg der internen Formtrennmittelkonzentration um 6 Gew.-%, sinkt der Peak Wärmestrom um circa 20 %. Die von uns darüber hinaus ermittelte Glasübergangstemperatur des prozessierten Harzsystems in der DSC liegt zwischen 210 – 250 °C und damit unter den Angaben des Herstellers von 270°C.

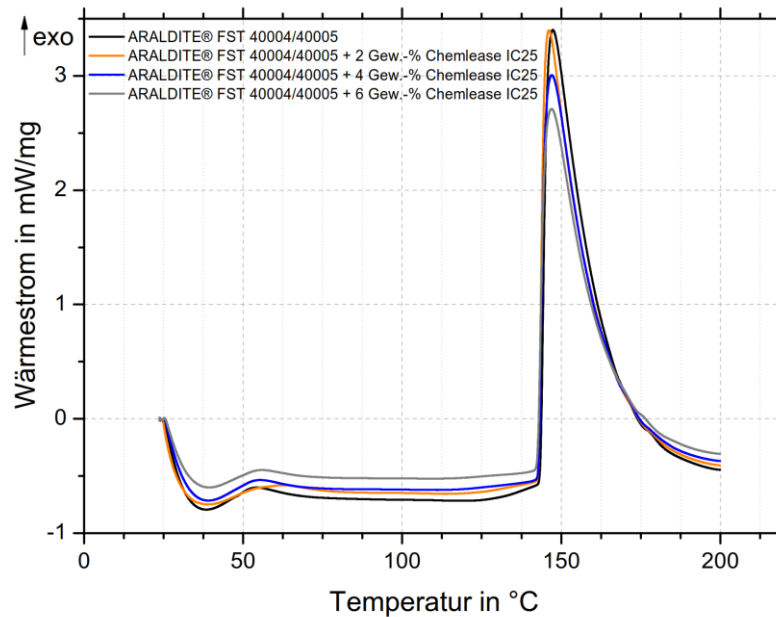


Abbildung 13: Aufheizphase der DSC-Messungen vom flüssigen Huntsman Araldite® FST 40004 und Araldite® FST 40005 Harzsystem (Heizrate: 20 K/min) [Neubacher]

Tabelle 9: Huntsman Araldite® FST 40004/40005 DSC-Messkennzahlen

FTM-Konzentration [Gew.-%]	Peak Temperatur [°C]	Peak Wärmestrom [mW/mg]	Reaktionswärme [J/g]	Onset [°C]
0	146,7	2,917	188,3	143,2
2	145,7	2,903	183,9	142,4
4	146,6	2,804	169,1	140,5
6	145,8	2,757	167,3	143,0

2.11: Materialentwicklung und Flammenschutzoptimierung

Epoxidharzsystem

Im Rahmen des Projekts wurden durch die TUHH mehrere flammenschutzpartikelgefüllte Polymer- und Verbundkunststoffsysteme formuliert. Als Grundlage diente das 2K-Epoxidharzsystem OXR4100 / OXH4105 der Firma Olin, welches keine inhärenten Flammschutzeigenschaften aufweist. Die typischen Materialkennwerte nach Herstellerangaben finden sich in Tabelle 10.

Tabelle 10: Materialkennwerte - Olin OXR4100 / OXH4105

Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]	Zugbruchdehnung [%]	Viskosität @25°C [Pas]	Tg [°C]	MR	Flamm-schutz
75	2,7	5,7	2,3-2,9	145-150	100:16	keiner

Das Vernetzungstemperaturprofil wurde mithilfe von DSC-Messungen und der Software Kinetics Neo der Firma Netzsch simuliert. Für die nachfolgenden Versuche am vollständig



vernetzten System wurde das Harzsystem, sofern nicht anders angegeben, folgender Wärmebehandlung unterzogen: 2 h @ 60 °C, 2 h @ 120 °C.

Das formulierte FST-Harzsystem soll vielseitig einsetzbar sein und sich bei Raumtemperatur sowohl im Harzinfusionsverfahren, als auch im Direktprägnierverfahren verarbeiten lassen. Hierzu wurden zunächst rheometrische Messungen durchgeführt um das Viskositätsverhalten des Harz-Härter-Gemisches bei Raumtemperatur (25 °C) in Abhängigkeit der Verarbeitungsdauer beschreiben zu können, siehe Abbildung 14. Hierbei ergibt sich eine maximale Verarbeitungszeit des Harzsystems von etwa 50 Minuten bei einer geforderten Viskosität unter 5 Pas, was eine gute Verarbeitung im RTM-Verfahren ermöglicht, bzw. eine Verarbeitungszeit von etwa 140 min bei einer geforderten Viskosität unter 100 Pas, was eine Verarbeitung im DirektPreg-Verfahren (u. A. Imprägnieren, Laminieren) erlaubt. Das Viskositätsverarbeitungsfenster im DirectPreg-Prozess wurde im Laufe des Projekts und in Abhängigkeit der verarbeiteten Textile immer wieder angepasst und ist hierbei keineswegs als feste Grenze zur Prozessierbarkeit zu verstehen.

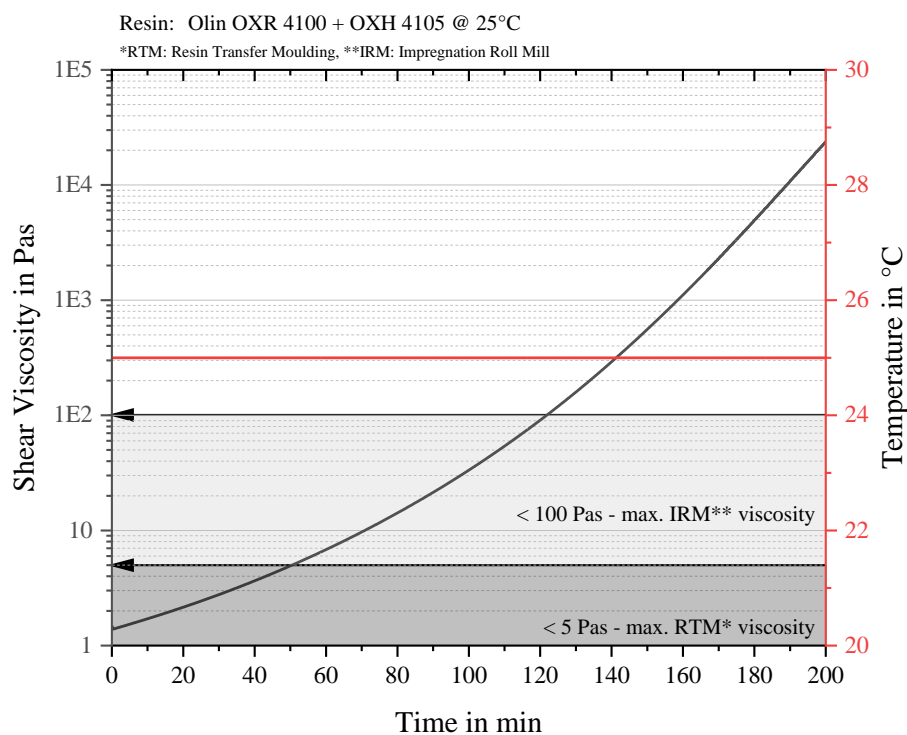


Abbildung 14: Viskositäts-/Vernetzungsverhalten von Olin OXR 4100 + OXH 4105 bei 25°C



Partikuläre FST-Füllstoffe

Nachfolgend werden die verwendeten nicht halogenierten partikulären Füllstoffe nacheinander kurz vorgestellt und ihre Partikelgrößen und Rundheitsverteilungen lichtmikroskopisch analysiert. Der Partikeldurchmesser und die Partikelform der Füllstoffe sind maßgebend für das mechanische und thermische Versagensverhalten des hergestellten Verbundwerkstoffs. So können sich aus mechanischer Sicht beispielsweise lokale Spannungsspitzen an den Partikeln bilden, welche ein frühzeitiges Materialversagen hervorrufen. Alle hier verwendeten partikulären Füllstoffe wirken flammhemmend, indem sie bei Abbrand eine schützende Intumeszenzschicht auf der Materialoberfläche des polymeren Verbundwerkstoffs bilden und somit das noch nicht abgebrannte Kernmaterial nach außen hin abschirmen. Je nach Brandphase kann hierdurch die Erwärmung des Brandgutes verzögert, oder die Zufuhr von Sauerstoff an das Brandgut und somit das Flammpotential behindert werden. Die Intumeszenzschicht wirkt entsprechend auch den für den Menschen gefährlichsten Brandfolgen, nämlich der Bildung toxischer Gase und Rauch, entgegen.

Das verwendete Ammonium Polyphosphat (kurz: APP) des Typs Exolit AP 422 der Firma Clariant bildet bei Abbrand eine Intumeszenzschicht, welche aus Phosphor- und Polyphosphorsäuren besteht. Zusätzlich spaltet es bei Abbrand Ammoniak ab, welches zu Wasser und Stickoxiden abreagiert. Das entstehende Wasser oxidiert und kann dadurch das Brandgut zusätzlich abkühlen. Die entstehenden Stickoxide entziehen der Flamme ihren Sauerstoff. Die untersuchten Partikel haben einen mittleren Durchmesser von $8,3 \mu\text{m}$ und weisen eine Rundheit von $0,8$ ($d_{\text{min}}/d_{\text{max}}$) auf, vergleiche Abbildung 15.

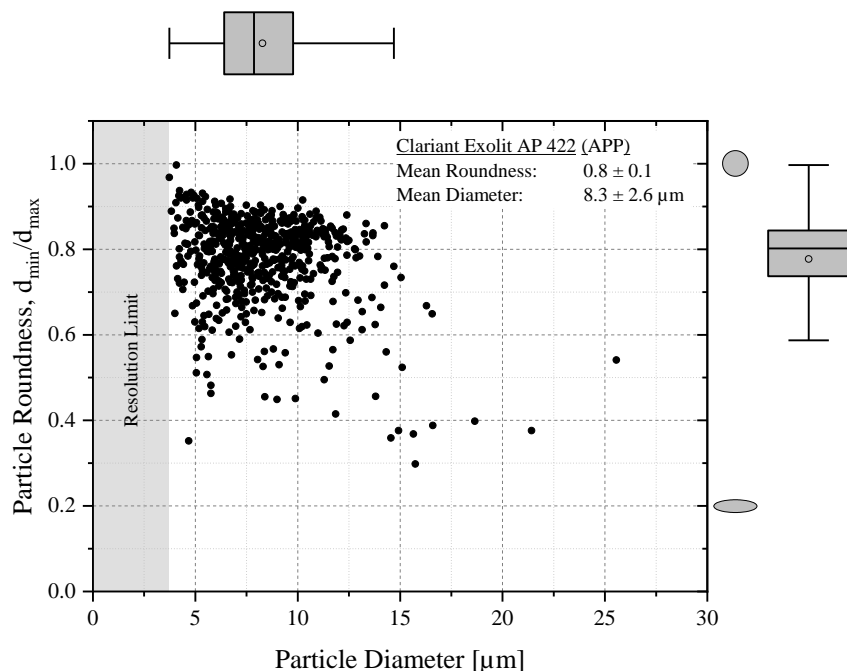


Abbildung 15: Partikelgrößen- und Rundheitsverteilung von Ammonium Polyphosphat (APP)

Das verwendete Blähgraphit oder auch expandierbare Graphit (kurz: EG) des Typs ES 700 F5 pH der Firma Graphit Kropfmühl liegt flockenförmig vor und besteht aus mehreren Schichten von wabenförmig angeordneten Kohlenstoffatomen. Die untersuchten Partikel haben einen mittleren Durchmesser von $123,9 \mu\text{m}$ und weisen entsprechend ihrer Flockenform eine geringe Rundheit von $0,7$ ($d_{\text{min}}/d_{\text{max}}$) auf, vergleiche Abbildung 16. Die Atome jeder Graphitschicht sind hierbei durch starke kovalente Bindungen miteinander verknüpft. Zwischen den Schichten wirken schwächere molekulare Bindungskräfte, sodass



Schwefelsäure zwischen die Graphitschichten eingelagert werden kann. Bei Erhitzung des EG kommt es bei Temperaturen von ca. 180 °C zur Expansion der Graphitflocken und es bilden sich wurmartige/zieharmonikaartige Strukturen, welche ein mehrfach erhöhtes Volumen aufweisen und sich über mehrere Millimeter erstrecken können. Bei der Verarbeitung des EG in polymeren Werkstoffen kann es aufgrund der hohen Dichte der Partikel (Dichte Graphit: ~2,2 g/cm³; Dichte Epoxidharz: ~1,2 g/cm³) zu Sedimentationseffekten kommen. Hierbei setzen sich die Partikel vor oder während der Vernetzungsreaktion des Epoxidharzes aufgrund von Schwerkrafteinwirkung am Boden des Verbundmaterials ab. Ein dichtes und undurchlässiges Faserverbundtextil kann diesem Sedimentationseffekt auf Laminatschichtebene entgegenwirken. Aufgrund der hohen Partikelgröße, ist EG weiterhin schlecht für die konventionelle Fertigung von Faserverbunden im Harzinfusionsverfahren geeignet, da dichte und undurchlässige Faserverbundtextile die Partikel ausfiltrieren würden und somit eine global homogene Verteilung verhindern. Diesem Effekt kann durch Verwendung geeigneter Herstellungsverfahren, wie etwa dem hier verwendeten DirektPreg-Verfahren entgegengewirkt werden.

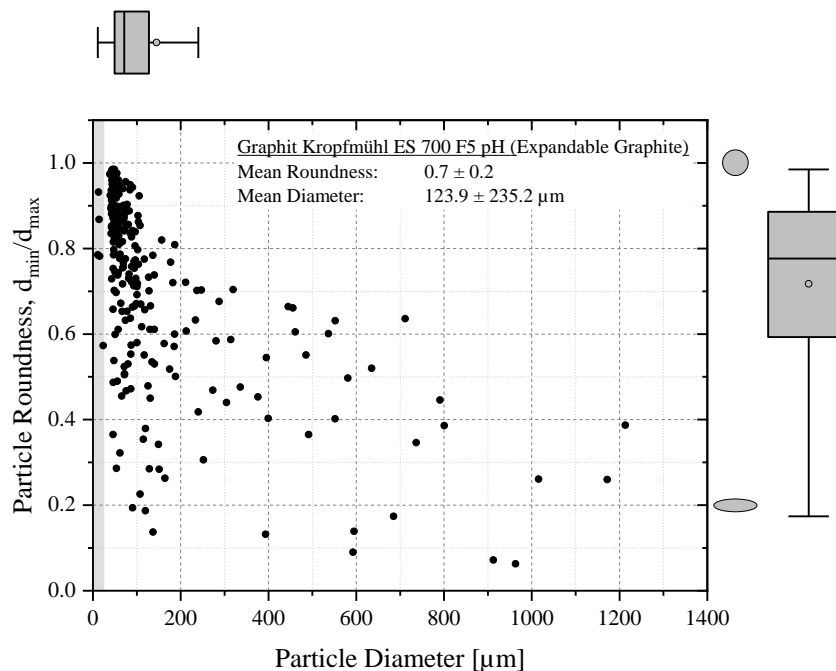


Abbildung 16: Partikelgrößen- und Rundheitsverteilung von Blähgraphit (EG)

Auch der verwendete rote Phosphor (kurz: RP) des Typs Exolit RP 607 der Firma Clariant bildet bei Abbrand eine Intumescenzschicht, welche wie bei APP aus Phosphor- und Polyphosphorsäuren besteht. Diese Schicht wirkt isolierend und schützt das Material vor Sauerstoffzufuhr. Die hier gebildeten Phosphate haben die gleichen Eigenschaften wie die aus APP. RP ist nicht selbstentzündlich, kann aber mit starken Oxidationsmitteln durch geringe Energiezufuhr (Reibung, Schlag) zur schnellen Entzündung gebracht werden. Dies ist insbesondere bei der Verarbeitung zu beachten. Die untersuchten Partikel haben einen mittleren Durchmesser von 7,0 µm und weisen eine Rundheit von 0,7 (d_{\min}/d_{\max}) auf, vergleiche Abbildung 17.

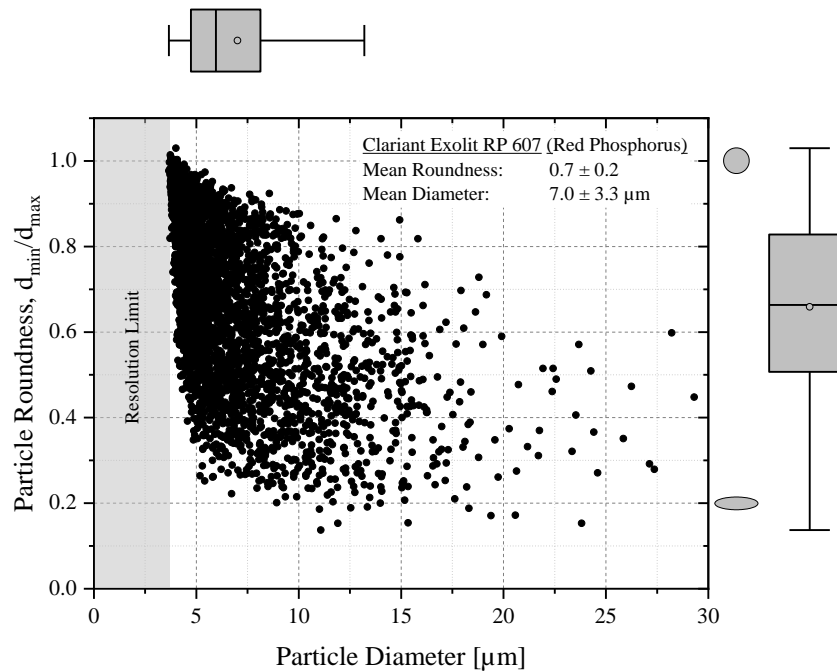


Abbildung 17: Partikelgrößen- und Rundheitsverteilung von Roter Phosphor (RP)

FST-Partikelgefüllte Polymere

Im nachfolgenden Unterkapitel wurden aus dem benannten Epoxidharzsystem und den partikulären Füllstoffen gefüllte polymere Prüfkörper hergestellt und ihr mechanisches Verhalten, sowie ihr Flammenschutzpotential analysiert. Hierbei wurden dem Harzsystem unterschiedliche partikuläre Füllstoffanteile zwischen 2,5 Gew.-% und 10 Gew.-% zugegeben. Das Vermengen von Harz und Füllstoff erfolgte über mehrere Minuten in einem Speedmixer bei 3000 U/min um eine homogene Verteilung der Partikel zu erreichen. Die Herstellung der plattenförmigen Halbzeuge erfolgte im Harzinfusionsverfahren. Mit Ausnahme der EG-Prüfkörper konnte auch eine homogene Partikelverteilung nach Vernetzungsreaktion des Harzsystems hergestellt werden. Die EG-Partikel sind im Herstellungsprozess leicht sedimentiert, weshalb die Aussagekraft der nachfolgenden Ergebnisse für das EG-System nicht repräsentativ und uneingeschränkt vergleichbar zu den anderen Proben ist.

Zunächst wurden Zugversuche nach DIN EN ISO 527 mit Prüfkörpertyp 1B durchgeführt. Abbildung 18 zeigt hierzu die Zugfestigkeitswerte und Abbildung 19 die Zugsteifigkeitswerte (Zugmodul, E-Modul) aller untersuchten partikelgefüllten Spezifikationen im Vergleich zum Reinharzsystem. Bezüglich der Zugfestigkeit ist festzuhalten, dass die APP-Partikel keinen oder einen zumindest indifferenten Einfluss ausüben. Die EG-Partikel reduzieren und die RP-Partikel erhöhen tendenziell die Zugfestigkeit mit zunehmendem Füllstoffgehalt. Das schlechte mechanische Verhalten der EG-Partikel ist hierbei auf den Sedimentationseffekt und die dadurch resultierenden asymmetrischen Aufbau der Probekörper zurückzuführen. Die Ursache für die festigkeitssteigernde Wirkung des RP konnte nicht abschließend geklärt werden.

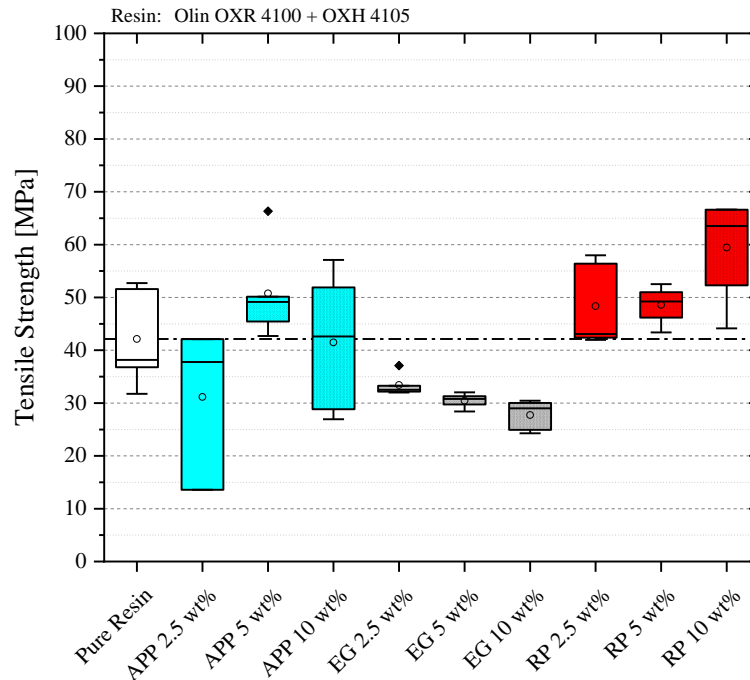


Abbildung 18: Zugfestigkeit unter Flammschutzpartikeleinfluss

Bezüglich der Zugsteifigkeit ließ sich durch Zugabe aller Partikel eine Steigerung erzielen. Hierzu gibt es diverse Erklärungsansätze. Zum einen ist davon auszugehen, dass die Grundsteifigkeit der partikulären Füllstoffe höher ist, als die des Reinharzsystems. Entsprechend würde es nach der vereinfachten Annahme der Mischungsregel zu einer Steifigkeitssteigerung kommen. Darüber hinaus kann es zu gewissen Härtungsmechanismen in Abhängigkeit gesteigerter Adhäsionskräfte durch die Partikel im Verbund kommen, oder die Kettenmobilität des Polymers kann durch die Partikel gehindert werden und ihrerseits eine Versteifung des Verbunds hervorrufen.

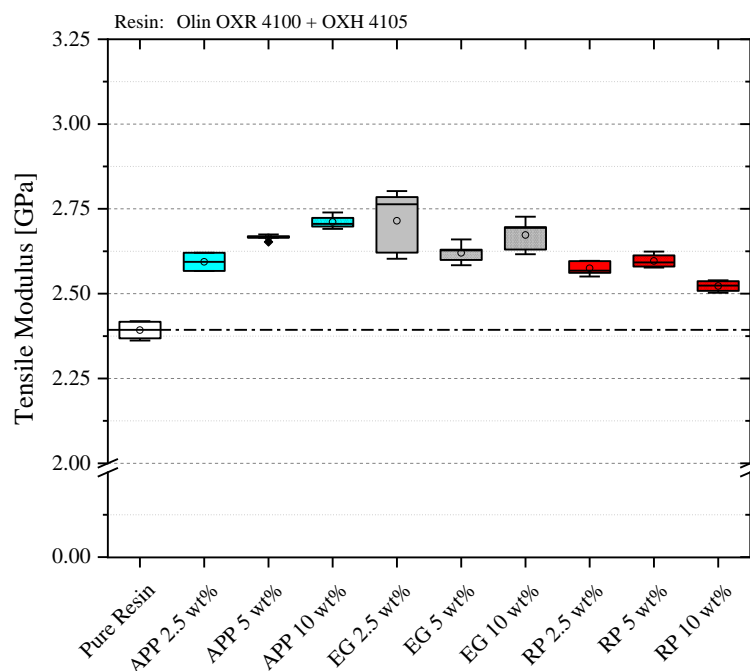


Abbildung 19: Zugsteifigkeit (E-Modul) unter Flammschutzpartikeleinfluss



Nachfolgend werden die Ergebnisse der Biegeversuche nach DIN EN ISO 178 aufgeführt. Abbildung 20 zeigt hierzu die Biegefestigkeitswerte und Abbildung 21 die Biegesteifigkeitswerte aller untersuchten partikelgefüllten Spezifikationen im Vergleich zum Reinharzsystem. Mit Ausnahme der APP-gefüllten Prüfkörper reduziert sich die Biegesteifigkeit aller gefüllten Prüfkörper deutlich. Aufgrund des Sedimentationseffekts ist die Abschwächung der Biegesteifigkeit bei den EG-Partikelgefüllten Probekörpern auf weniger als die Hälfte des Referenzwertes am deutlichsten ausgeprägt. Bezüglich des Biegemoduls lassen sich in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts für jeden Füllstofftyp leichte individuelle Steigerungen der Steifigkeit erkennen. Im Vergleich zur Referenz sind allerdings nur die Steifigkeitswerte von APP und EG signifikant erhöht, die Zugabe von RP-Partikeln hingegen scheint keinen nennenswerten Einfluss auf die Biegesteifigkeit auszuüben.

Bezüglich der Ergebnisse der mechanischen Tests lässt sich zusammenfassen, dass alle APP gefüllten Prüfkörper bezüglich ihrer Festigkeits- und Steifigkeitswerte vergleichbar mit der Reinharzreferenz oder besser bewertet sind. Die mit EG oder RP gefüllten Prüfkörper liegen in mindestens einem der untersuchten mechanischen Kennwerte unter der Reinharzreferenz. Diese Erkenntnis muss in der praktischen Auswahl der partikulären FST-Füllstoffe zusätzliche Beachtung finden.

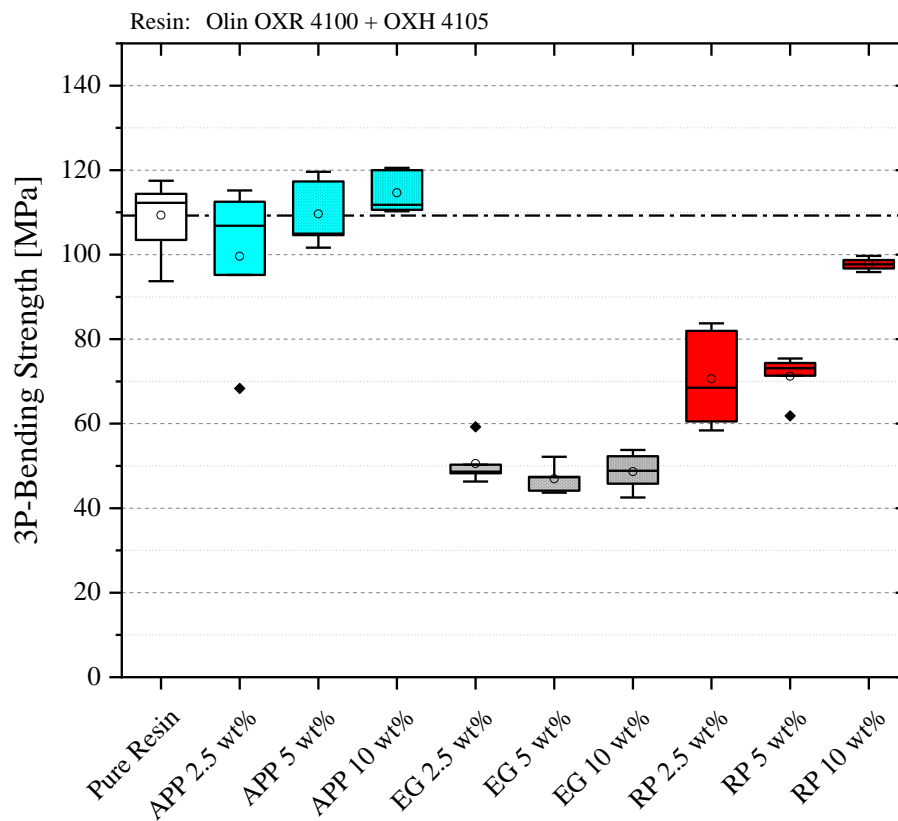


Abbildung 20: 3-Punkt-Biegefestigkeit unter Flammenschutzpartikeleinfluss

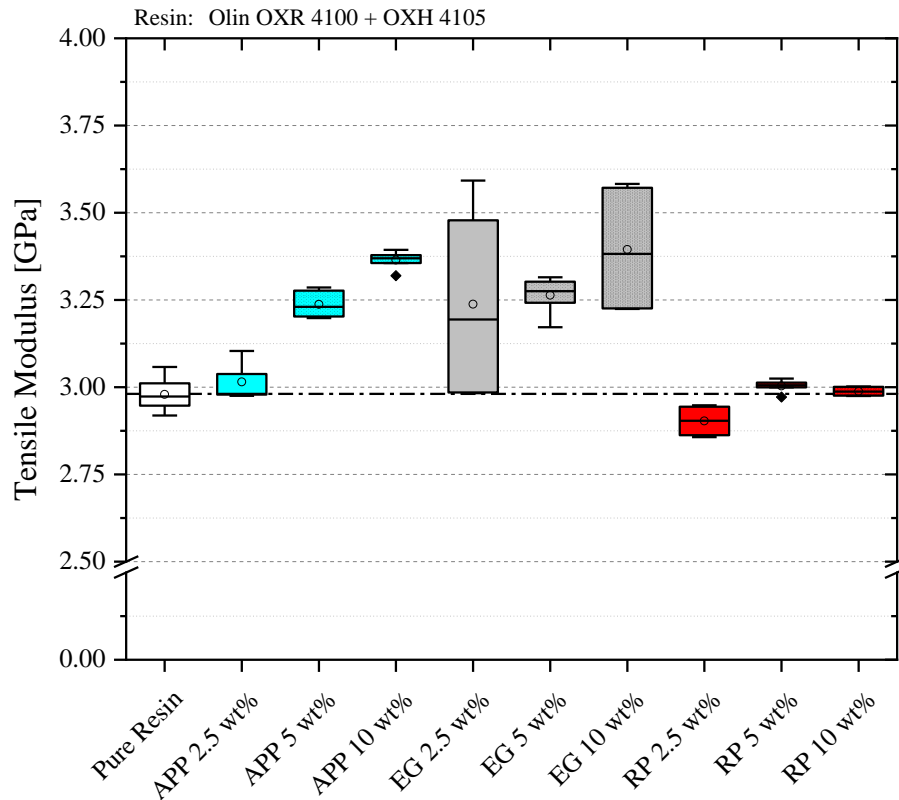


Abbildung 21: 3-Punkt-Biegesteifigkeit unter Flammschutzpartikeleinfluss

Zur Analyse der Flammschutzeigenschaften der partikulären Füllstoffe wurden vertikale Flammtests nach UL94 Standard durchgeführt. Eine Momentaufnahme der Flammtests am Beispiel des Reinharzsystems und der mit 10 Gew.-% gefüllten Verbunde während und nach dem Test ist Abbildung 22 zu entnehmen. An den Probenoberflächen ist deutlich die Bildung der Intumeszenzschicht zu erkennen. Die EG-Partikel bilden hierbei die bereits erwähnten wurmartigen/ziehharmonikaartigen Strukturen, welche im Vergleich die höchste Volumenzunahme erreichen. Aufgrund der Sedimentationseffekte der EG-Partikel im Herstellungsprozess, wirkt die Intumeszenzschicht hier allerdings nur einseitig an der Vorderseite der Prüfkörper. Entsprechend sind die Ergebnisse für das EG-System nicht repräsentativ und uneingeschränkt vergleichbar zu den anderen Proben. Es ist davon auszugehen, dass EG bei homogener Partikelverteilung besser als hier dargestellt abschneiden würde.

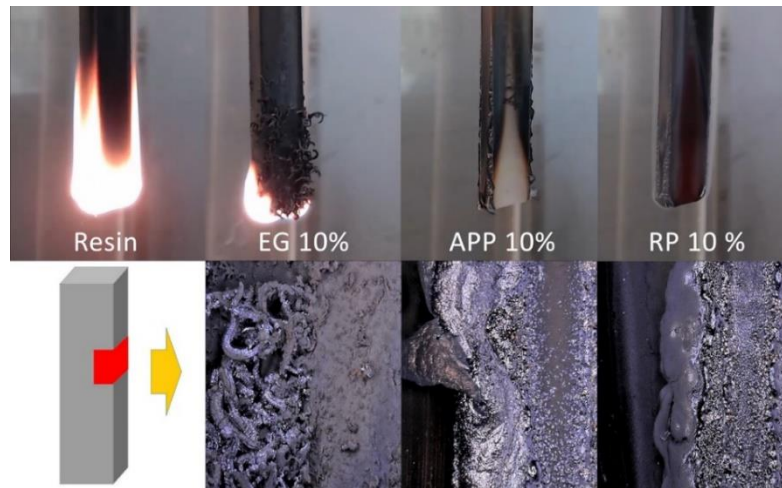


Abbildung 22: UL94 Vertikaler Flammtest unter Flammenschutzpartikeleinfluss (oben), Mikroskopieaufnahmen der Probenoberfläche (Kohleschicht) nach dem Flammtest (unten)

Entsprechend der Klassifizierungsrichtlinien des vertikalen UL94 Flammtests, wurden die Prüfkörperkonfigurationen nach der Dauer ihrer Nachbrennzeit bewertet und entsprechend in die Kategorien UL94-V0 bis V1 eingeordnet. Hierbei stellt die UL94-V0 die strengsten Anforderungen an das Brandverhalten der Prüfkörper. Die Prüfkörper dürfen nicht vollständig abbrennen, es darf zu keiner Bildung von brennenden Partikeln oder Tropfen während des Versuchs kommen und die einzelnen und kombinierten Flammzeiten dürfen bestimmte Zeitvorgaben nicht überschreiten. Als Beispiel hierfür sind die maximalen individuellen Flammzeiten $\max(t_1, t_2)$ in Abbildung 23 dargestellt. Diese müssen zum Erreichen der UL94-V1 unter 30 s (gelber Zeitbereich) bzw. zum Erreichen der UL94-V0 unter 15 s (grüner Zeitbereich) liegen.

Unter Berücksichtigung aller Bewertungskriterien, erfüllen die flammenschutzpartikelgefüllten Kunststoffsysteme mit ≥ 5 Gew.-% APP und ≥ 10 Gew.-% RP die von uns geforderten Kriterien der UL94-V0. Womit es gelungen ist, im Rahmen des Projektes, zwei flammgeschützte Kunststoffsysteme mit geringen Partikelfüllstoffgehalten herzustellen.

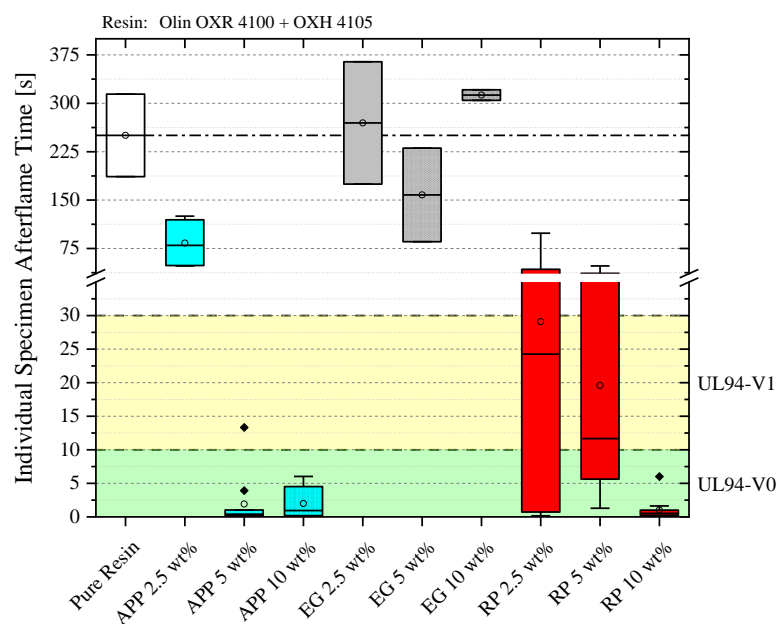


Abbildung 23: Flammzeiten nach UL94 vertikalem Flammtest unter Flammenschutzpartikeleinfluss, Reinharz



FST-Partikelgefüllte Faserverbunde

Im nächsten Schritt sollen die Erkenntnisse aus der Materialentwicklung eines flammenschutzpartikelgefüllten Reinharzsystems auf Faserverbundsysteme überführt werden. Eine besondere Herausforderung ist hierbei das Einbringen der Flammenschutzpartikel (Partikelgrößen: $\leq 4 \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$) in den Faserverbundkunststoff. Einige herkömmliche Herstellungsverfahren, wie etwa das Harzinfusionsverfahren (RTM-Prozess) eignen sich nur bedingt für das Einbringen größerer Partikel, da die Partikel während der Infusion durch das Fasertextil zurückgehalten und ausfiltriert werden. In Fließrichtung nimmt somit die Partikelkonzentration ab und eine homogene Verteilung der Partikel im Material wird verhindert.

Das im Zuge dieses Projektes entwickelte DirectPreg-Verfahren erlaubt es hingegen eine homogene Verteilung der Flammenschutzpartikel in faserverstärkten Kunststofflaminaten zu erzielen. Da jede Laminatlage einzeln imprägniert wird, findet keine Filtration der Partikel statt. Eine schematische Darstellung hierzu findet sich in Abbildung 24.

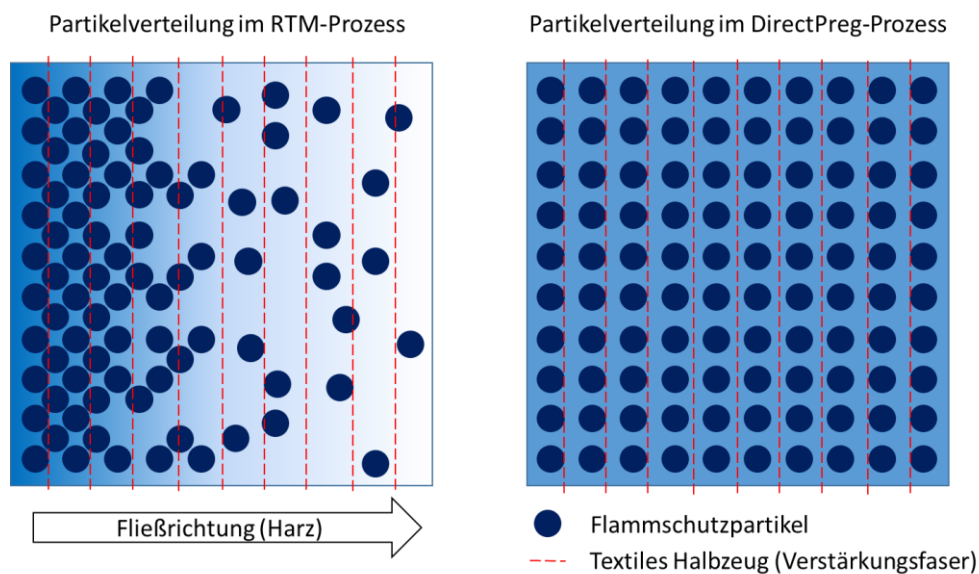


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Partikelverteilung. Inhomogene Partikelverteilung im RTM-Prozess (links), Homogene Partikelverteilung im DirectPreg-Prozess (rechts)

Es ist darüber hinaus möglich die (Flammschutz-)Funktionalisierung gezielt in einzelnen Laminatlagen einzubringen und den Partikelfüllstoffgehalt zu variieren. So kann es sich z.B. anbieten bei flächigen Strukturbauteilen nur die äußeren Lagen des Faserverbunds mit Flammenschutzpartikeln zu beaufschlagen, da zunächst nur diese im Falle eines Brandes schützend auf der Bauteiloberfläche wirken. Hierdurch kann ein entsprechender Flammenschutz bei gleichzeitig geringerem Einsatz partikulärer Füllstoffe im Gesamtlaminat erreicht werden.

In den nachfolgenden Untersuchungen wurden Glasfaserverbundkunststoffe mit Leinwandwebung und einem Faserflächengewicht von 220 g/m^2 in Verbindung mit dem 2K-Epoxidharzsystem OXR4100 / OXH4105 der Firma Olin hergestellt und im DirectPreg-Prozess homogen mit unterschiedlichen Füllstoffgehalten (0 – 20 Gew.-%) der Flammenschutzpartikeln (EG, APP, RP) funktionalisiert.

In mechanischen Tests zur Ermittlung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit zeigte sich ein leicht negativer Einfluss der Flammenschutzpartikel, vergleiche Abbildung 25. Im Vergleich zum ungefüllten Faserverbund ist die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit um



bis zu 30 % reduziert. Hierbei reduziert sich die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit tendenziell mit Zunahme des Füllstoffgehalts. Dieser Effekt ist nachvollziehbar, da die Partikel sich überwiegend zwischen den Laminatschichten in den harzgefüllten Bereichen ansammeln und hier unter Belastung Spannungsspitzen verursachen können, welche zur Schadensinitialisierung führen. Die Reduktion der mechanischen Eigenschaften ist bei der Verwendung der betrachteten Systeme zu berücksichtigen und im individuellen Anwendungs- und Auslegungsfall zu überprüfen.

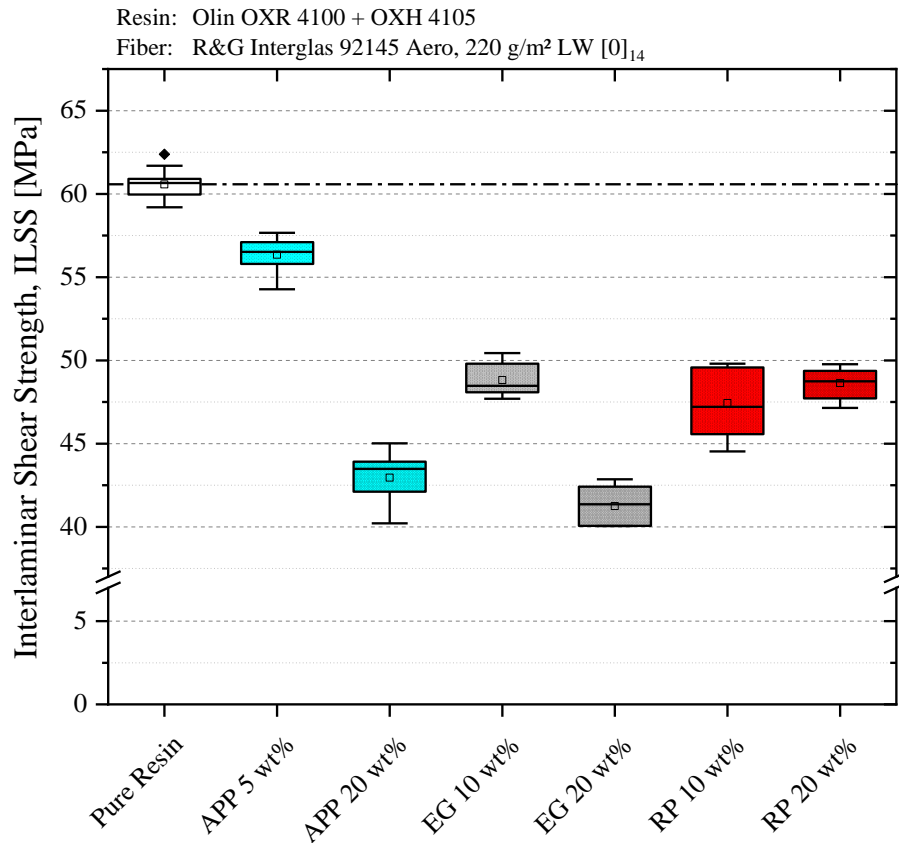


Abbildung 25: Scheinbare Interlaminare Scherfestigkeit unter Flammschutzpartikeleinfluss

Bezüglich der Flammschutzoptimierung wurden erneut vertikale UL94 Flammtests durchgeführt. Die Ergebnisse der maximalen individuellen Flammzeiten $\max(t_1, t_2)$ sind in Abbildung 26 zu entnehmen. Im Vergleich zu den nicht faserverstärkten Prüfkörpern (vergleiche Abbildung 23) ist ein deutlich höherer Anteil von Flammschutzpartikeln nötig, um die Anforderung der UL94-V0 Klassifizierung zu erreichen. Unter Berücksichtigung aller Bewertungskriterien, erfüllen die flammschutzpartikelgefüllten Kunststoffsysteme mit ≥ 20 Gew.-% APP und ≥ 20 Gew.-% RP die von uns geforderten Kriterien der UL94-V0. Der Partikelgewichtsanteil bezieht sich hierbei auf das verwendete Harzgewicht und nicht auf das Gesamtgewicht (Harz + Fasern) der untersuchten Prüfkörper. Hiermit ist es im Zuge des Projektes gelungen, zwei flammgeschützte Faserverbundkunststoffsysteme mit geringen Partikelfüllstoffgehalten herzustellen.

Der höhere Partikelanteil zum Erreichen der UL94-V0 ist dadurch zu erklären, dass sich die Partikel nur in den harzreichen Bereichen des Faserverbunds ansammeln können. Die Partikel sind zu groß um sich zwischen die einzelnen Faserrovings zu legen. Hierdurch reduziert sich der mögliche Wirkungsbereich der Flammschutzpartikel auf der Bauteiloberfläche abhängig vom Harzgehalt bzw. Faservolumengehalt des Faserverbundkunststoffs. Typische Faservolumenanteile der untersuchten Prüfkörper liegen zwischen 50 – 60 Gew.-%. Zur Ausbildung einer flammgeschützenden Intumeszenzschicht wird daher eine höhere



Flammschutzpartikelkonzentration im Harzsystem benötigt. Die exemplarische Verteilung von EG-Partikeln im Faserverbund und die schematische Darstellung der Verteilung und Oberflächeneinflusszone der Partikel zur Bildung einer Intumeszenzschicht ist Abbildung 27 zu entnehmen.

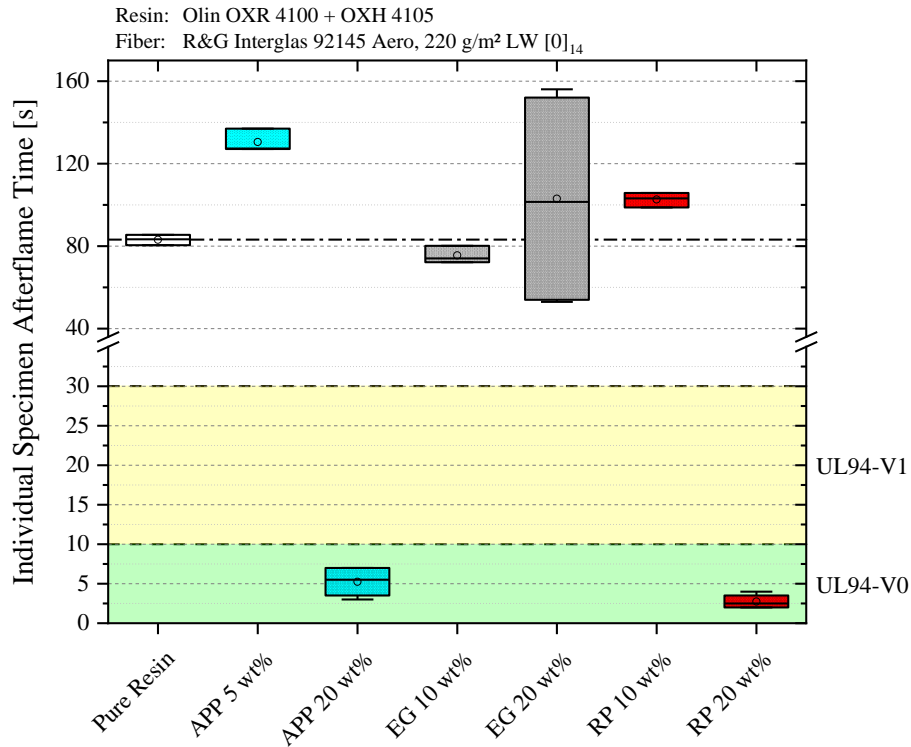


Abbildung 26: Flammzeiten nach UL94 vertikalem Flammtest unter Flammschutzpartikeleinfluss, Glasfaserverbund

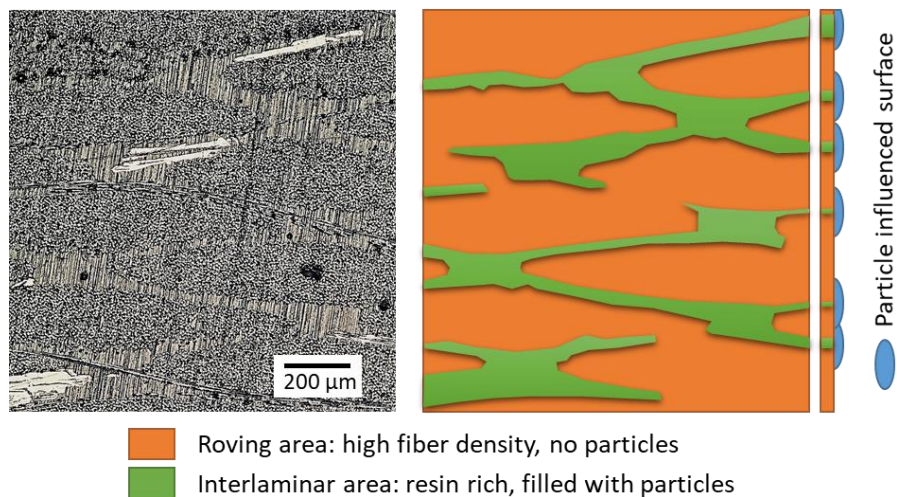


Abbildung 27: Mikroskopieaufnahme der Harz-/Glasfaser-/Partikelverteilung am Beispiel von EG 20 Gew.-% (links), schematische Darstellung der Verteilung und Oberflächeneinflusszone der Partikel (rechts)



Ergebnisbericht - Arbeitspaket 5

5.4: Prozessmodell für Prepreg-Imprägnierung und Heißpressen (DirectPreg)

Im Rahmen des Projekts wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Exakt ein Prozessmodell für den neu- bzw. weiterentwickelten DirectPreg-Prozess erstellt. Ziel war es zunächst die unterschiedlichen Einflussgrößen im Prozess zu analysieren und ihre Auswirkungen auf die finale Laminatqualität bzw. den Textilzustand und den sich einstellenden Faservolumengehalt (FVG) im Imprägnierprozess am Imprägnierwalzwerk (IWW) herauszuarbeiten.

Hierzu wurde an der TUHH ein früher Prototyp des im Zuge dieses Projektes durch Exakt weiterentwickelten Imprägnierwalzwerks mit einem Zweiwalzensystem genutzt. Das prinzipielle Imprägnierverfahren eines Faserverbundtextils ist in Abbildung 28 dargestellt. Zunächst wird ein Harzsystem bestimmter Viskosität (V) auf das Walzenpaar aufgebracht. Zwischen den beiden rotierenden Walzen wird nun eine konstante Harzfilmdicke (F) ausgebildet. Hierzu lässt sich der parallele Spalt zwischen den Walzen mikrometergenau einstellen, -Schritt 1-. Anschließend werden die beiden Walzen auf die Imprägnierspaltweite (S) auseinander gefahren, -Schritt 2-. Ein Faserverbundtextil wird auf die Walze gelegt und unter definierter Walzendrehzahl (n) durch den harzgefüllten Spalt gefördert. Hierbei tränkt sich das Textil mit Harz, -Schritt 3-. Nachdem das Textil vollständig imprägniert wurde, kann es von der Walze abgenommen werden, -Schritt 4-. Das dadurch entstandene Prepreg, zu Deutsch: „vorimprägnierte Fasern“, kann anschließend hinsichtlich seines Textilzustandes (z.B. auftretenden Faserondulationen und einer homogenen Harzverteilung), sowie des sich einstellenden Faservolumengehalts analysiert werden. In Abbildung 29 ist hierzu das schematische Ursache-Wirkungsdiagramm des Imprägnierwalzwerksystems gezeigt. Neben den bereits erwähnten Einflussfaktoren und Zielgrößen, können auch eine Reihe von Störgrößen, wie etwa die Umgebungstemperatur, Vorbehandlungen des Textils oder Variable Anlagenparameter Einfluss auf den Prozess nehmen.

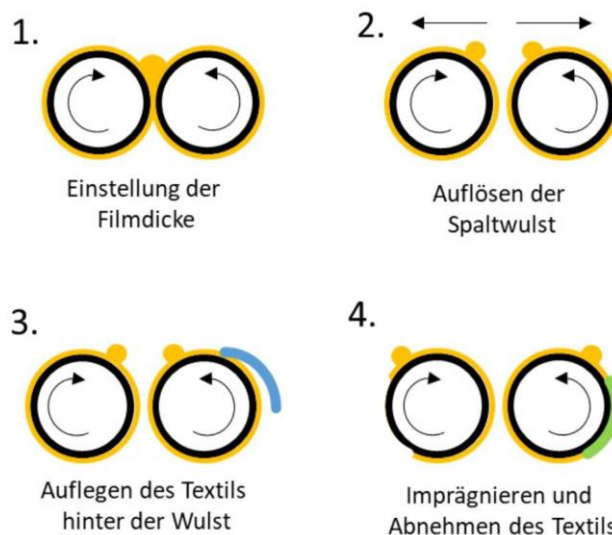


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Zweispaltmethode am Imprägnierwalzwerk [Brouschkin]

Insbesondere im Bereich der Kantenfixierung bzw. automatisierten Bebinderung der verwendeten Textilie wurde von Seiten Exakt und in Kooperation mit der Firma Aristo Graphic Systeme GmbH & Co. KG ein hoher Aufwand betrieben um die Textilie bei hohen Walzendrehzahlen und wirkenden Kräften beschädigungsfrei prozessieren zu können. Hierzu sei explizit auf den Schlussbericht der Firma Exakt verwiesen. Die Kantenfixierung zu den



nachfolgenden Ergebnissen an der TUHH erfolgte mittels eines schnelltrocknenden Polymergels auf Wasserbasis, welches die äußeren Randbereiche der verarbeiteten Textilie in Form hält.

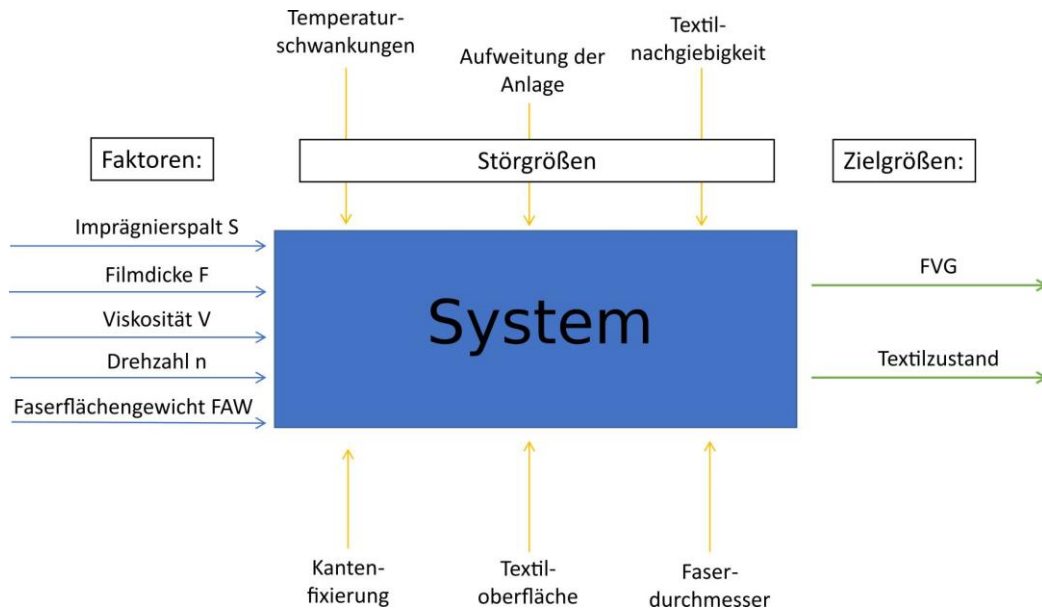


Abbildung 29: Ursache-Wirkungsdiagramm am Imprägnierwalzwerk [Touni]

Mithilfe statistischer Versuchsplanung wurde systematisch ein Prozessmodell des Imprägnierwalzwerkprozesses erstellt. Hierzu wurden Glasfasertextile mit Körperwebung unterschiedlicher Faserflächengewichte (FAW) zwischen 80 g/m² und 580 g/m² untersucht. Abhängig vom FAW ergeben sich spezifische Imprägniereigenschaften, die unter anderem durch die Textildicke, Textilloffenheit, Webfeinheit bzw. Rovingbreite und die Einzelfaserstärke beeinflusst werden. Abbildung 30 zeigt hierzu exemplarische Mikroskopieaufnahmen der verwendeten Glasfasertextile um ihre geometrischen Unterschiede zu verdeutlichen.

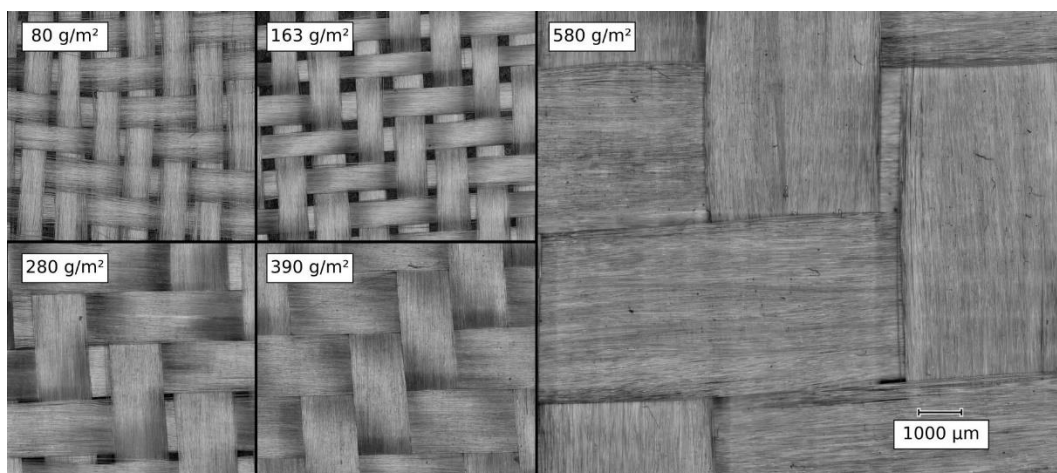


Abbildung 30: Mikroskopieaufnahmen von GF-Körpergewebe unterschiedlicher FAW (80-580 g/m²) [Touni]

Entsprechend wirkt sich der Effekt der untersuchten Einflussfaktoren abhängig vom betrachteten Faserflächengewicht des Textils deutlich unterschiedlich auf das Imprägnierverhalten aus. Abbildung 31 gibt hierzu einen schematischen Überblick und zeigt den Effekt auf den Faservolumengehalt bei Erhöhung der Einflussfaktoren, bezogen auf das in der Abzisse angegebene Referenztextil.



Alle Einflussfaktoren sind hierbei hochsignifikant. Eine zunehmende (Matrix-)Filmdicke im Imprägnierprozess reduziert beispielsweise den sich einstellenden Faservolumengehalt um über 5 % in dem gewählten Betrachtungshorizont bei Faserflächengewichten $\leq 390 \text{ g/m}^2$. Demgegenüber erhöht ein zunehmender Imprägnierspalt den Faservolumengehalt insbesondere bei dünnen Textilien von 80 g/m^2 um etwa 13 %. Dieser Effekt nimmt jedoch mit zunehmenden FAW ab, bis sich dieser Effekt ab 180 g/m^2 sogar ins Negative umschlägt. Die Wirkzusammenhänge sind an dieser Stelle keineswegs trivial und müssen immer als Gesamtsystem betrachtet werden. Insbesondere die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren sind hierbei von Interesse.

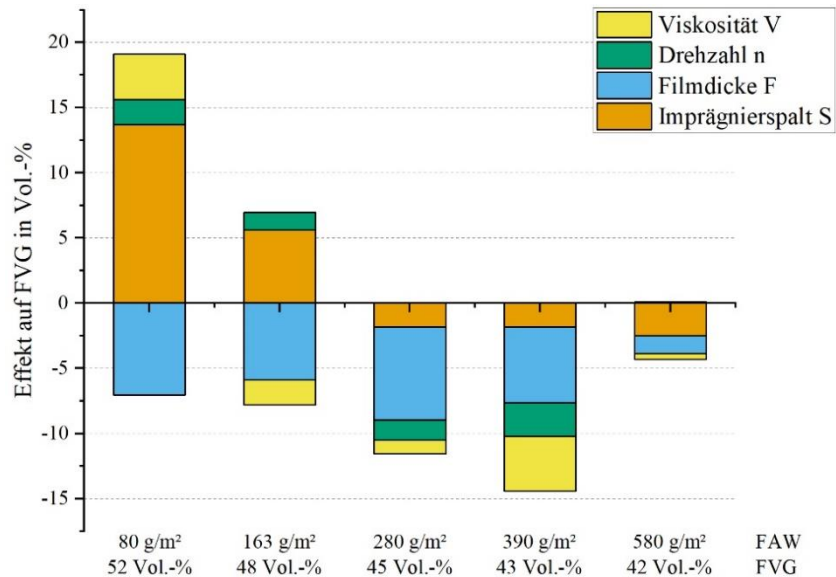


Abbildung 31: Effektediagramm für GF-Körpergewebe (FAW 80 - 580 g/m²) [Touni]

Abbildung 32 zeigt die Wechselwirkung der Einflussfaktoren Filmdicke und Imprägnierspalt gegenüber dem Faservolumengehalt als Zielgröße. Es ist zu erkennen, dass sich in Abhängigkeit der Einflussfaktoren ein minimal erreichbarer FVG einstellt. Tendenziell kann durch eine größere (Matrix-)Filmdicke mehr Harz in das Textil eingebracht werden, der FVG sinkt. Durch Wahl des Imprägnierspalts wird das Textil während des Imprägniervorgangs unterschiedlich stark komprimiert, wodurch zunächst die Harzaufnahme verbessert wird, da das Harz tiefer in das Textil „eingedrückt“ werden kann. Bei einer zu starken Komprimierung hingegen, werden überschüssige Harzmengen zwischen den Walzen aus dem Textil gepresst. Es ergibt sich hieraus der minimal erreichbare FVG.

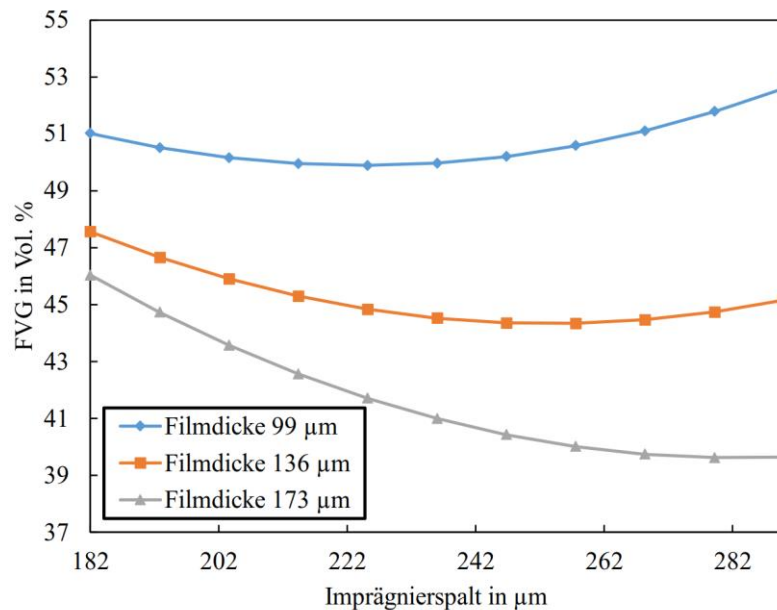


Abbildung 32: FVG des Prepregs (KP280) über den eingestellten Imprägnerspalt und verschiedenen Filmdicken [Touni]

Durch detaillierte Kenntnis des Verhaltens aller relevanten Einflussfaktoren, lassen sich aus den vorhandenen Daten verschiedenste Modelle aufstellen. So wurde beispielsweise ein numerisches Modell zur Abschätzung der auftretenden realen Linienpressung (rLP), welche während des Imprägniervorgangs auf das Textil wirkt, erstellt. In dieses Modell fließen alle bisher betrachteten Einflussfaktoren und ihre Wechselwirkungen ein. Neben den bisherigen Einflussfaktoren wurde auch die Umfangsgeschwindigkeit der Imprägnierwalzen (B) in die Betrachtung mit einbezogen. Die reale Linienpressung ergibt sich nach diesem Modell zu:

$$rLP = \begin{pmatrix} 3,4639 \\ 2,9991 \\ -3,9139 \\ 3,2498 \\ -1,7475 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ V \\ S \\ B \\ l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1,1417 \\ 1,4130 \\ -0,5933 \\ 0,8455 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} VV \\ SS \\ BB \\ ll \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -4,0587 \\ 3,7387 \\ -2,2846 \\ -1,6750 \\ 1,7687 \\ -0,9493 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} VS \\ VB \\ VI \\ SB \\ Sl \\ Bl \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0,2661 \\ 0,7907 \\ -0,6506 \\ 0,7351 \\ 0,7663 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} VSB \\ VSl \\ VB l \\ SBl \\ VSBl \end{pmatrix}$$

Vergleich man die rechnerischen Ergebnisse des rLP-Modells, welches mithilfe von newtonschen Referenzfluiden (Silikonölen) unterschiedlicher Viskosität aufgenommen wurde, mit dem realen Verhalten eines duromeren Harzsystems, hier Blendur VP.PU 90IK01 / Kat. VP.KU 3-4523 der Firma Covestro, ergibt sich das in Abbildung 33 dargestellte Verhalten. Es ist zu erkennen, dass das Modell das reale Verhalten der rLP im Mittel sehr gut abbildet. Diese Erkenntnisse können in Folgeprojekten zur inline Prozessoptimierung und -überwachung eingesetzt werden und unterstützen die Fertigung bei der automatisierten Detektion unerwarteten Verhaltens, wie z.B. einer vom Erwartungswert abweichenden initialen Imprägnierviskosität, einer Viskositätsänderung des verwendeten Harzsystems, Abweichungen der rLP infolge von Textilondulationen / Textilschädigungen oder sogar kinematische Auffälligkeiten an der Maschine, die sich direkt aus den untersuchten Einflussfaktoren ergeben.

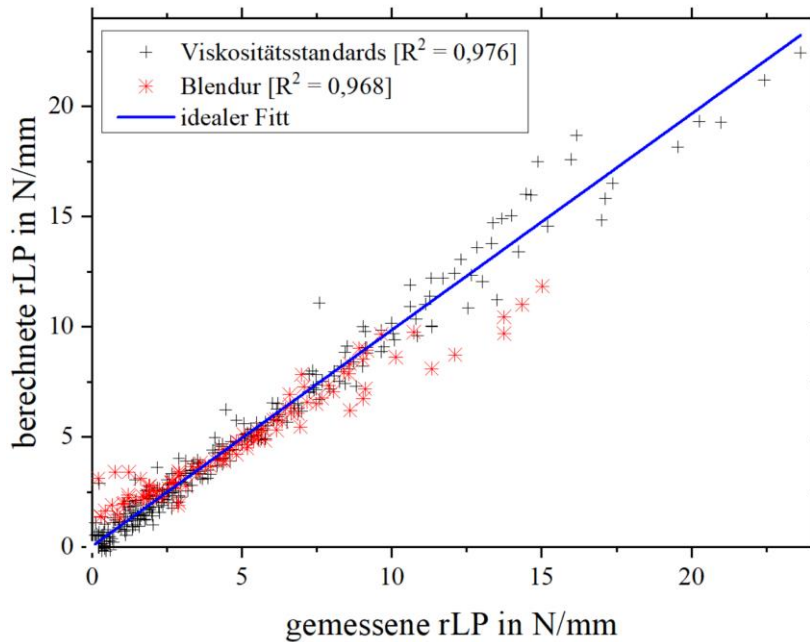


Abbildung 33: Modellierung der Linienpressung

Des Weiteren konnten die ermittelten Daten genutzt werden um Einstellkarten für den Prepregfertigungsprozess anzufertigen. So ist es in der Fertigung z.B. möglich in Abhängigkeit des verwendeten Textils und Harzsystems einen optimalen Maschinenparametersatz (hier Filmdicke und Imprägnerspalt) zu finden, um den gewünschten FVG im Imprägnierprozess zu erreichen. Abbildung 34 zeigt dies exemplarisch für ein Glasfaser-Körper-Gewebe mit einem Flächengewicht von 280 g/m² und Verwendung eines duromeren Harzsystems mit einer Viskosität von 155 Pas. In dem hier betrachteten Einsatzfenster lassen sich so Faservolumenanteile zwischen etwa 40-50 Vol.-% im Prepreg einstellen. Es sei darauf hingewiesen, dass der gezeigte FVG keineswegs dem FVG im fertigen Laminat entspricht. Je nach Weiterverarbeitungsart (z.B. Heizpressprozess, Autoklavprozess, Vakuumsackprozess) und insbesondere der Konsolidierung des Prepregs erhöht sich der finale FVG im vollvernetzten Laminat noch einmal deutlich.

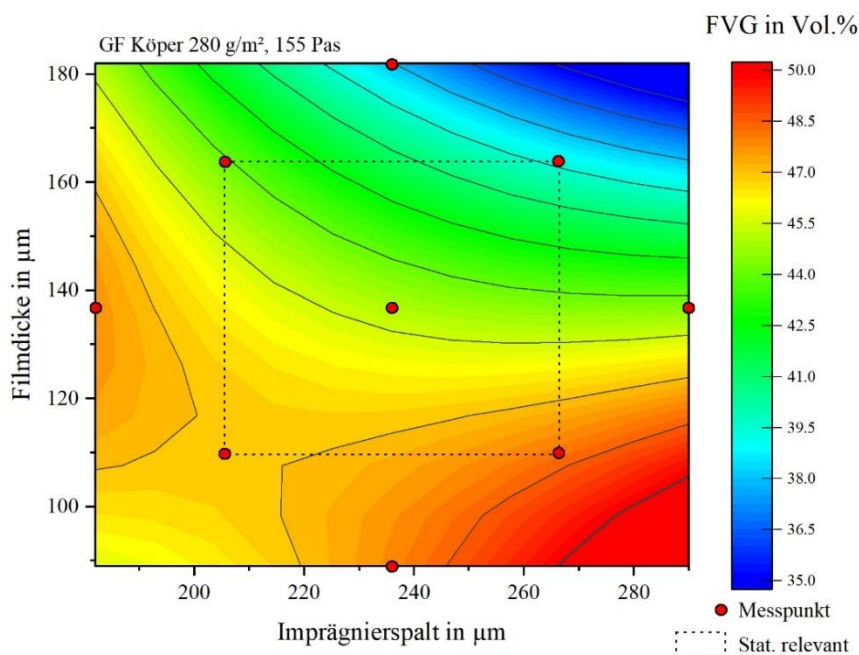


Abbildung 34: Prozesseinstellkarte für KP280



Neben der Optimierung des Imprägnierprozesses wurden weitreichende Bemühungen unternommen die Weiterverarbeitung der Prepregs im Heißpressprozess zu verbessern. Darüber hinaus wurden entsprechende Vergleiche des Heißpressprozess gegenüber anderen Prozessen (Autoklav, Vakuumsack/Ofen) durchgeführt. Detaillierte Ergebnisse hierzu finden sich im Schlussbericht des Projektpartners CompriseTec und in den studentischen Arbeiten von [Tobaben] und [Killi].

An der TUHH wurden zusätzliche Vergleichstests zwischen dem Direktprägnierverfahren mit Weiterverarbeitung im Autoklavprozess und dem am Institut etablierten V-RTM Verfahren (Vakuum-Harzinfusionsverfahren) durchgeführt. Die detaillierten Versuchsergebnisse finden sich in der studentischen Arbeit von [Jacobs]. In Abbildung 35 und Abbildung 36 sind beispielhaft die Zugmodul (E-Modul) und Zugfestigkeit von Blendur-Glasfaser-Verbunden mit unidirektionaler Faserverstärkung 220 g/m² und Körper-Gewebe 163 g/m² gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Steifigkeit, als auch Zugfestigkeit der im DirektPreg-Verfahren hergestellten Probekörper absolut höhere mechanische Kennwerte aufweisen. Durch die Verarbeitung im Autoklavprozess kam es allerdings zu einer hohen Verdichtung des Laminats, was in einem erhöhten Faservolumengehalt (FVG) resultiert. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Es ist ersichtlich, dass im DirectPreg-Prozess, nach der Optimierung aller Prozessparameter, zu anderen Herstellungsverfahren vergleichbare und wettbewerbsfähige Bauteile in Bezug auf ihre mechanischen Zugeigenschaften hergestellt werden können.

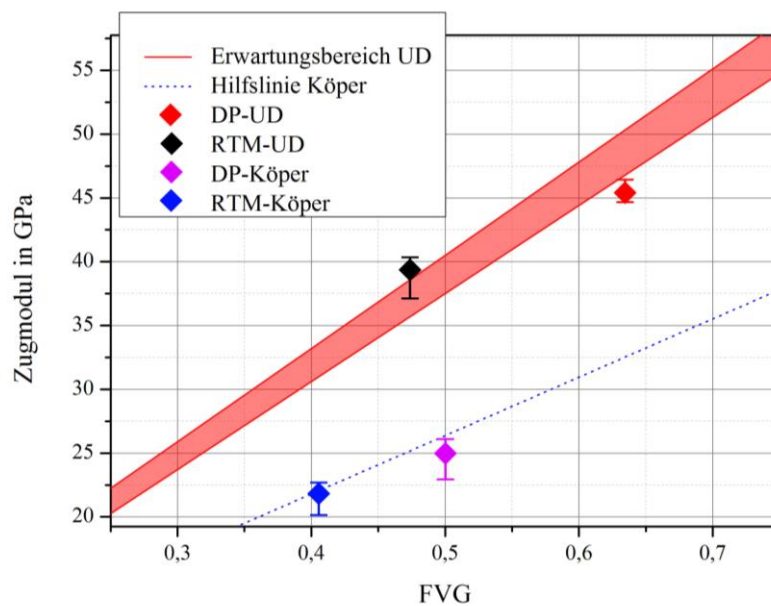


Abbildung 35: Vergleich der Zugsteifigkeiten: DirectPreg-Prozess (DP) und RTM-Prozess



Ergebnisbericht - Arbeitspaket 8

8.2: Testbericht des Demonstrators für pultrudierte Bauteile (POLY, TUHH)

Arbeitspaket 8 sieht Tests und Optimierungen der Demonstratorbauteile vor. Seitens der TUHH werden diese mechanisch / optisch / chemisch getestet und z.B. ihr Versagen analysiert. Die finalen Demonstratorbauteile, u. A. die Gepäckstange der Sitzreihen im Flugzeuginnenraum, lagen der TUHH zum Ende der eigenen Projektlaufzeit noch nicht vor. Wir haben uns aber dazu verpflichtet, auch nach unserer Projektlaufzeit eingehende Demonstratorbauteile unserer Projektpartner zu testen. Entsprechende Ergebnisse finden sich dann in den Projektberichten der jeweiligen Projektpartner.

Als Vorbereitung der finalen Tests für die im Pultrusionsprozess hergestellte Gepäckstange des Passagierabteils im Flugzeuginnenraum wurde ein Prüfaufbau entwickelt, welcher die betrieblichen Anforderungen der Gepäckstange erfüllt und erste Versuche mit kommerziell verfügbaren GFK Rohren durchgeführt:

- 3-Punkt Biegeversuch
- 2-Punkt Biegeversuch (Freier Biegebalken)
- Druckversuche quer zur Längsachse des Rohres
 - Ohne Vorschädigung
 - Mit Vorschädigung (Schlagschaden durch einen Falldorn)

Bezüglich der 3-Punkt Biegeversuche muss laut Vorgabe eine Last von 1300 N ohne Schädigung des Bauteils erreicht werden. Wie in Abbildung 37 dargestellt, haben sich erste Schädigungen erst ab einer Last von 2065 N gebildet, sodass die Anforderungen erfüllt wurden. Bei dem Versagen handelte es sich um ein zu erwartendes Druckversagen an der Oberseite des Rohres, sodass diesbezüglich keine Änderungen am Prüfaufbau durchgeführt werden müssen.

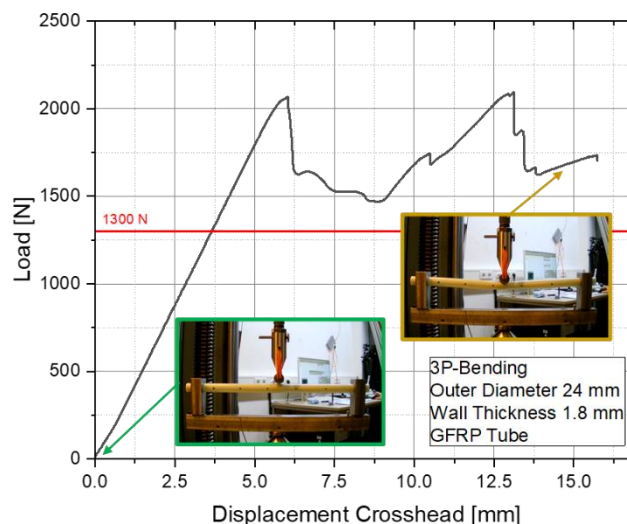


Abbildung 37: Kraft-Weg Kurve des kommerziell erworbenen GFK-Rohres im 3-Punkt Biegeversuch

Bezüglich der 2-Punkt Biegeversuche konnten die Vorgaben nicht eingehalten werden. Gefordert wurde eine maximale Durchbiegung von 65 mm bei einer Last von 1413 N. Da es sich um kommerzielle GFK Rohre handelt und diese nicht für diesen Lastfall ausgelegt wurden, sind die Ergebnisse nicht von Relevanz für die Beurteilung der im Zuge des Projekts hergestellten Pultrudate, sondern dienen zunächst zur Validierung des Versuchsaufbaus. Nach dem Test zeigte sich eine Kerbe an den Kanten der Einspannung des GFK-Rohres (siehe Abbildung 38). Um die Kerbwirkung in diesem Bereich zu minimieren, werden die Einspannungen, welche derzeit aus Edelstahl bestehen, durch Einspannungen aus POM (Polyoxymethylene) einem



hochmolekularen Kunststoff gefertigt. Durch die Änderung der Materialwahl und einer möglichen Modifizierung der Kante (Fase oder Rundung) sollte die Kerbwirkung reduziert werden, was sich positiv auf das Bauteilversagensverhalten auswirkt und die tatsächliche Einspannungssituation des Demonstratorbauteils besser abbildet.

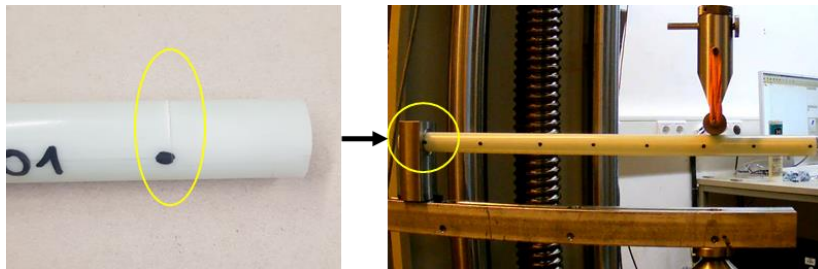


Abbildung 38: Kerbe im GFK Rohr aufgrund der Edelstahlspannung im 2-Punkt Biegeversuch

Die Druckversuche haben gezeigt, dass Druckkräfte senkrecht zur Längsachse einen kritischen Lastfall darstellen. Gerade Vorschädigungen wie Schlagschäden (z.B. durch rutschende/fallende Koffer oder stark auftretende Personen verursacht), besitzen einen starken Einfluss auf die Druckfestigkeit. Bei einem Impact von 19,2 J mit einem Falldorn von 10 mm Durchmesser hat sich die Druckfestigkeit um 48 % verringert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt. Die Versuche zeigten, dass Druckkräfte wie auch Schlagschäden bei der Auslegung der GFK Rohre berücksichtigt werden müssen.

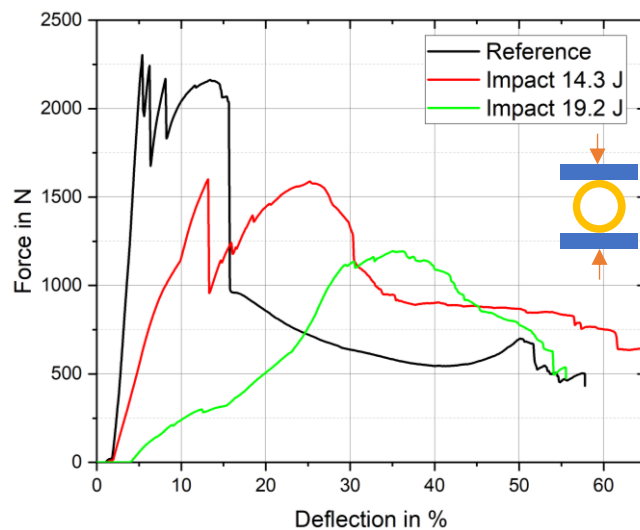


Abbildung 39: Ergebnisse der Druckversuche quer zur Längsachse der GFK-Rohre mit und ohne Schlagschaden



2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Zur Erreichung der Ziele war das bewilligte Budget notwendig. Die Verwendung der Zuwendung im Einzelnen entnehmen Sie bitte dem zahlenmäßigen Nachweis, der von der TUHH Drittmittelverwaltung gesondert übermittelt wird. Der wesentliche Teil der Zuwendung wurde für Personalausgaben eines promovierenden wissenschaftlichen Mitarbeiters verwendet. Diese wurden für die Durchführung aller Prüfungen und Experimente, sowie die Betreuung der im Zuge des Projekts durchgeführten studentischen Arbeiten eingesetzt. Unterstützt wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter durch die eingestellten studentischen Hilfskräfte. Die Personalausgaben spiegeln sich direkt in den erzielten Ergebnissen der Arbeitspakete wieder. Weitere Investitionen wurden im Bereich Prüfequipment und Prüfmaschinen (z.B. Neuanschaffung einer Brandkammer) getätigt. Diese waren unter anderem Grundvoraussetzung für die Durchführung der projektbegleitenden Brandversuche, Materialcharakterisierungen und mechanischen Tests. Verbrauchsmittel wurden insbesondere für die Arbeit in den Laboren und für die Umsetzung der Materialfertigung benötigt. Die entstandenen Reisekosten resultieren aus den notwendigen Projekttreffen zwischen den deutschen und kanadischen Projektpartnern und der Teilnahme an Fachtagungen, welche als Plattformen für die Präsentation von Forschungsergebnissen genutzt wurden.

2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde weitgehend gemäß Planung umgesetzt. Die Abweichungen bei den Mittelabrufen ergaben sich aus Anpassungen an den Verlauf des Projekts. Diese wurden in Abstimmung mit dem Projektträger durchgeführt.

Folgende große Investitionen wurden vorgenommen:

- Anschaffung einer Brandkammer: Die Anschaffung der Brandkammer (Horizontal Vertical Flame Chamber) war notwendig, um die projektbegleitenden Brandversuche nach Norm (FAA / UL94) durchführen zu können und sowohl die neu entwickelten flammgeschützten Kunststoff- und Verbundsysteme, als auch die späteren Demonstratorbauteile in Hinblick auf ihre Brandschutzklassifizierbarkeit bewerten zu können. In diesem Zuge wurde die Brandkammer sowohl von der TUHH, als auch von den deutschen Projektpartnern in Anspruch genommen.
- Umrüstung und Optimierung Imprägnierwalzwerk-Prototyps: Die Umrüstung und Optimierung des Imprägnierwalzwerk-Prototyps war Grundlage für die eingehende Analyse und Prozessoptimierung des Imprägnierprozesses im Rahmen des DirectPreg-Prozesses.

Weitere Ausgaben teilten sich hauptsächlich auf diverse Materialien sowie Personal- und Reisekosten auf.

2.3 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren zur übergreifenden Charakterisierung der untersuchten Materialien notwendig und die Ergebnisse können von den Projektpartnern direkt bei allen weiteren themenverwandten Arbeiten berücksichtigt und verwendet werden.

Auch die Anlagen für die betrachteten Produktionstechnologien und Brandschutztests mussten entwickelt, gefertigt und aufgebaut werden. Alle Anlagen stehen den Projektpartnern natürlich über die Projektlaufzeit hinweg zur Verfügung und können für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten genutzt werden. Die geleisteten Arbeiten waren entsprechend angemessen.



2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Nutzen des durchgeführten Projektes für das Institut besteht neben dem reinen Erkenntnisgewinn aus den durchgeführten Untersuchungen und der Prozessentwicklung unter anderem darin, dass es durch die weiterentwickelten und aufgebauten Faserverbund-Fertigungs- und Brandversuchsanlage seinen Zugang zu neuesten und hochaktuellen Fertigungstechnologien ausbauen und sich im Bereich der FST-Materialprüfung und FST-Materialentwicklung positionieren konnte. Des Weiteren konnte das Institut durch Erweiterung seines Netzwerks und den intensiven Austausch mit Akteuren des betrachteten Forschungsfeldes der FST-Materialien und deren Einsatz in der Luftfahrt einen umfassenden Überblick über die komplexe aktuelle Forschungs- und Entwicklungssituation gewinnen. Dies schließt die teils problematische Prozessierbarkeit, beziehungsweise die Entwicklung von passenden Verarbeitungsprozessen für diese Materialien explizit mit ein.

Bei den deutschen Projektpartnern Exakt und Comprisetec konnten die Projektergebnisse direkt für die Produktentwicklung genutzt werden. Des Weiteren wird die Zusammenarbeit mit Exakt, Comprisetec und anderen Partnern des Instituts auf diesen Forschungsfeldern aller Voraussicht nach in kommenden Forschungsprojekten fortgesetzt.

Bis zum Ende des Projektes wurden zudem neun studentische Arbeiten (Bachelorarbeiten, Projektarbeiten, Masterarbeiten) mit inhaltlichen Schnittmengen zum Projekt durchgeführt und abgeschlossen. Weitere entsprechende Arbeiten laufen derzeit oder sind in konkreter Planung. Diese schließen inhaltlich teils direkt an die im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse an oder bauen auf den Projektergebnissen auf. In Kapitel 2.6 ist eine Übersicht über die abgeschlossenen studentischen Arbeiten mit Abschlussdatum bzw. voraussichtlichem Abschlussdatum gegeben.

Des Weiteren werden Teile der Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekt in die Dissertationen der projektbearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter einfließen. Teile der Projektergebnisse wurden bereits auf Fachtagungen und Publikationen einem internationalen Publikum zugänglich gemacht. Einzelheiten hierzu ebenfalls in Kapitel 2.6.

2.5 Veränderung des technologischen Status quo im Vorhabenzeitraum

Das auf dem Markt verfügbare kommerzielle Angebot an FST-Harzen wurde und wird seitens der harzentwickelnden Industrie fortwährend mit neuen Materialien erweitert, sodass eine Vielzahl an Materialien in der weiterverarbeitenden Industrie Berücksichtigung finden muss, beziehungsweise zur Auswahl herangezogen werden kann. Die grundsätzliche Notwendigkeit zur individuellen Beurteilung dieser Materialien hinsichtlich der spezifischen zu erfüllenden Anforderungen an ihre FST-Eigenschaften und die Verarbeitbarkeit im Prozess bleibt jedoch bestehen. Auch das Potential der großen Zahl an neu entwickelten Flammenschutzmitteln kann nicht genutzt werden, sofern die Verwendbarkeit in industrierelevanten Verarbeitungsprozessen und das Brandverhalten im finalen Bauteil ungeklärt ist.

Das Interesse an diesen Forschungsthemen bleibt in der Industrie aktuell weiterhin hoch. Die zusammenhängende Betrachtung wie in diesem Projekt ist daher als wertvoll einzuordnen, um den technologischen und wissenschaftlichen Stand korrekt einzuschätzen und zukünftig wichtige Forschungsfragen ableiten zu können. Dem Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe sind während der Projektlaufzeit keine Ergebnisse bekannt geworden, die dies in der gleichen Weise tun. Vergleichbare Untersuchungen von der Verarbeitbarkeit bis zu den Brandeigenschaften von FST-Materialien in Kombination mit der Entwicklung passender Verarbeitungstechnologien werden, soweit dem Institut bekannt ist, bei anderen Stellen nicht durchgeführt. Die Arbeiten werden daher am Institut in Kooperation mit den Projektpartnern und unter Beibehaltung dieses übergreifenden Entwicklungsansatzes fortgeführt werden.



2.6 Veröffentlichungen

Veröffentlichungen (Stand: 30.09.2021)

In Folge der durch dieses Projekt hervorgegangenen Forschungskooperation der Projektpartner und dem Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe der TUHH wurden nachfolgende wissenschaftliche Paper, Magazinbeiträge, Patente und Vorträge veröffentlicht:

- Köpke, U.; Fiedler, B.; Kaysser, S.. „Entwicklung und Herstellung neuer Materialien mit optimierten Materialeigenschaften für die jeweilige Anwendung und den verwendeten Fertigungsprozessen“. 57. Hamburg Aviation Forum. Vortrag. 2020
- Langot, J.; Pelzmann, T.; Chavez-Gomez, P.; Boanta, C.S.; Karsten, J.; Fiedler, B.; Lévesque, M.; Robert, E.. „Multi-physics modeling of the ignition of polymer matrix composite exposed to fire“. Fire Safety Journal. 2021. [\[doi\]](#)
- Wittich, H.; Karsten, J.; Fiedler, B.. „Flammhemmende Faser-Kunststoff-Verbund-Systeme für die Innenausstattung für die Flugzeugkabine“. WAK - Jahresmagazin Ingenieurwissenschaften - Im Fokus: Kunststofftechnik 2021. ISSN 1618-8357. 2021 [\[web\]](#)
- CompriseTec, EXAKT. „Herstellung von Prepregs für ein Faserverbundbauteil“. Kennziffer: DE 10 2020 102 015 A1. DPMA. Patent zum Schutz des DirectPreg-Prozesses und des Imprägnierwalzwerks. Patent. 2021

Im Laufe des Vorhabenzeitraums wurde bezüglich DirectPreg eine Veröffentlichung auf der SAMPE Europe 2020 in Amsterdam veröffentlicht.

Informationen zu weiteren Veröffentlichungen der Projektpartner sind entsprechend den Abschlussberichten der Projektpartner zu entnehmen.

Geplante Veröffentlichungen

Des Weiteren sind seitens der TUHH aktuell weitere Veröffentlichungen in Planung:

- Paper zur Anwendung partikulärer Füllstoffe zur Flammhemmung in Epoxidharzsystemen (Arbeitspaket 2, Dokumentationspunkt 2.11)
- Paper zu den Erkenntnissen aus der Prozessführung und -optimierung des DirectPreg-Prozess (Arbeitspaket 5, Dokumentationspunkt 5.4)
- Vortrag auf dem nächsten Jahreskongress des Netzwerkes NanoCarbon im Februar 2022 zum Thema „Direct Preg“.

Informationen zu weiteren geplanten Veröffentlichungen der Projektpartner sind entsprechend den Abschlussberichten der Projektpartner zu entnehmen.

Studentische Arbeiten

Im Rahmen dieses Projektes wurden nachfolgende wissenschaftliche Arbeiten an der TUHH durchgeführt und im Rahmen von Abschlussarbeiten dokumentiert und abgeschlossen. Hierbei kam es, entsprechend des Arbeitsinhalts, zur fachlichen und wissenschaftlichen Kooperation mit unseren Projektpartnern Exakt und CompriseTec.

- Brouschkin, A.. „Charakterisierung des Imprägnierverhaltens textiler Halbzeuge mit flammgeschützten Harzsystemen im Walzwerkprozess“. Masterarbeit. Technische Universität Hamburg. 2018 (Beginn während des Vorgängerprojekts GreenInterior*, Abschluss während des Projekts COMP-1633)
- Billerbeck, F.. „Evaluierung von Brandschutz-Matrixsystemen anhand der mechanischen Eigenschaften und der Prozessführung in Bezug auf Pultrusion“. Bachelorarbeit.



Technische Universität Hamburg. 2019 (Beginn während des Vorgängerprojekts GreenInterior*, Abschluss während des Projekts COMP-1633)

- Tobaben, J.. „Prozessentwicklung und Parameterstudie für die Out-of-Autoklav Fertigung direktimprägnierter Textilien“. Bachelorarbeit. Technische Universität Hamburg. 2019
- Sum, R.. „Prozesskontrolle und Einfluss der Linienpressung beim Imprägnierprozess“. Projektarbeit. Technische Universität Hamburg. 2020
- Touni, F.. „Analyse des Imprägnierverhaltens von Glasfasertextilen im Imprägnierwalzwerkprozess“. Bachelorarbeit. Technische Universität Hamburg. 2020
- Jakobs, J.. „Mechanische und thermische Validierung des DirectPreg-Prozesses“. Bachelorarbeit. Technische Universität Hamburg. 2020
- Yücel, O.. „Einfluss partikulärer Füllstoffe auf das Brandverhalten und die mechanischen Eigenschaften von Epoxidharzen“. Bachelorarbeit. Technische Universität Hamburg. 2020
- Killi, M.. „Einflussparameteranalyse der Laminatqualität von in Out-of-Autoclave-Prozessen verarbeiteten und direktimprägnierten Textilien“. Masterarbeit. Technische Universität Hamburg. 2020
- Neubacher, M.. „ Pultrusion von faserverstärkten Kunststoffprofilen für Anwendungen in der Luftfahrt - Materialevaluation & Prozessoptimierung “. Bachelorarbeit. Technische Universität Hamburg. 2020

*Vorgängerprojekt GreenInterior: BMBF, Förderkennzeichen: 01LY1302B, Vorhabensbezeichnung: KMU-innovativ: Ressourcen- und Energieeffizienz - Entwicklung eines energieeffizienten Verfahrens zur Herstellung von leichten Faserverbundbauteilen



3 Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen der Internationalisierungsstrategie „InterSpiN – Internationalisierung von Spitzenclustern, Zukunftsprojekten und vergleichbaren Netzwerken“ des Luftfahrtclusters Hamburg Aviation durchgeführt. Dessen wesentliches förderpolitisches Ziel ist es, die Wahrnehmung des Luftfahrtstandorts Hamburg international zu erhöhen, Netzwerke in Wissenschaft und Forschung aufzubauen und neue Märkte für KMU in der Zielregion zu erschließen.

Mit der Zielregion Montreal, Kanada und dessen Luftfahrtcluster Aéro Montréal besteht bereits seit 2008 eine Zusammenarbeit, die im Rahmen dieser Initiative weiter vertieft werden konnte.

In der Projektplanung wurde neben den inhaltlichen Arbeiten deshalb Wert auf einen regelmäßigen persönlichen Austausch gelegt, indem halbjährliche Projekttreffen in Hamburg bzw. Montreal vorgesehen waren. Bis zum Beginn der Corona-Pandemie konnten vier Treffen durchgeführt werden, bei denen in Workshops inhaltlich an den Forschungsthemen gearbeitet wurde. Darüber hinaus wurden Produktionsstätten und Forschungseinrichtungen der Projektpartner sowie Luftfahrtbetrieben in der Region besichtigt, wie zum Beispiel den Airbus-Werken in Hamburg und Stade oder dem Bombardier-Werk in Montreal.

In der zweiten Projekthälfte mussten die persönlichen Projekt-Treffen ausfallen bzw. in Telefon und Videokonferenzformaten durchgeführt werden. Dennoch hat das Forschungsvorhaben für alle Projektpartner ermöglicht, ihr Netzwerk nachhaltig zu erweitern und den Luftfahrtstandort Hamburg in der Zielregion Montreal zu repräsentieren und dessen Wahrnehmung zu erhöhen.

2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Als wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Forschungsvorhabens konnte nachgewiesen werden, dass die Formulierung und Herstellung von FST-Polymeren und FST-Faserverbundwerkstoffen technisch umsetzbar ist. Hierbei wurden verschiedene Fertigungstechnologien entwickelt, die eine Prozessierbarkeit der FST-Materialien erlaubt.

Wissenschaftliche und technische Analyseverfahren wurden eingesetzt um in einem ganzheitlichen Ansatz von der Materialentwicklung und -analyse über die Fertigungsprozessdefinition und -optimierung bis hin zum fertigen Produkt und dessen mechanischer und flammenschutztechnischer Prüfung, den Herstellungsprozess verschiedenster polymerer Leichtbau- und FST-Bauteile umzusetzen.

Hierbei konnten auf Seiten der TUHH insbesondere im Bereich des DirectPreg-Verfahrens wesentliche Erkenntnisse in den Wirkzusammenhängen zwischen Harzsystemen, Verstärkungsfasern und möglichen (FST-)Additiven gewonnen werden.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Im Zuge des Projekts kam es von Seiten der TUHH zu keinen Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen. Bezüglich der wirtschaftlichen Verwertungspläne der final in diesem Projekt entwickelten Fertigungsprozesse (DirectPreg, Pultrusion, SMC-Sandwich-Verfahren) sei auf die Schlussberichte der Projektpartner verwiesen.



Die von der TUHH beschaffte und weiterentwickelte frühe Prototypenanlage des Imprägnierwalzwerks zum DirectPreg-Prozesses wird weiterhin für aktuelle und kommende Fragestellungen in Forschung, Entwicklung und Lehre verwendet und findet aktuell Anwendung in der weiterführenden Funktionalisierung von Faserverbundkunststoffen und der Kleinserienfertigung von nicht handelsüblichen Materialpaarungen unterschiedlicher Harzsysteme und Fasertextile. Hierbei stehen aktuell unter anderem additive Zähigkeitssteigerungen von Epoxidharzsystemen und Biopolymeranwendungen im Fokus des Instituts. Insbesondere für die experimentelle Kleinserienfertigung hat sich der DirektPreg-Prozess gegenüber anderen großindustriellen Anlagen aufgrund der flexiblen Einsetzbarkeit bewährt.

Die Projektpartner Exakt, ComprisTec und TUHH sind bezüglich des DirectPreg-Prozesses weiterhin im engen Kontakt und planen den Prozess weiterzuentwickeln um in anstehenden Konferenzen, Tagungen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen unsere bisherigen Projektergebnisse zu präsentieren (z.B. beim Jahreskongress des Netzwerkes NanoCarbon) und darüber hinaus weitere Kooperationsprojekte auf dem Gebiet anzustoßen.

Bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens konnte die Ausgabenplanung bis auf einen geringen Restbetrag, der nicht abgerufen wurde, im Wesentlichen eingehalten werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass unter anderem durch die Absage der persönlichen Projekttreffen, aufgrund der zwischenzeitlich einsetzenden Corona-Pandemie, die Reisekosten deutlich geringer ausgefallen sind als geplant und auch die Kosten für die Umrüstung bestehender Prüfanlagen insgesamt geringer ausgefallen sind, weshalb eine Umwidmung der Gelder in Richtung der Personalmittel durch den Projektträger ermöglicht wurde.

Insbesondere die Optimierung der Fertigungsprozesse und Einrichtung der Anlagen, sowie Zuliefererzeiten wurden initial in der Zeitplanung etwas unterschätzt. Durch die zusätzlich einsetzende Corona-Pandemie wurde dieser Effekt zusätzlich verstärkt, sodass das Projekt zeitlich verlängert werden musste. Positiv zu bewerten ist allerdings, dass es durch die angepasste zeitliche Projektplanung trotzdem gelungen ist, sämtliche ursprünglich formulierten wissenschaftlichen Fragestellungen im Rahmen des Forschungsvorhabens zu adressieren.



4 Anhang

- Berichtsdatenblatt

Berichtsdatenblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel COMP-1633 – Flame retardant FRP systems for aircraft interior applications Schlussbericht der Technischen Universität Hamburg - Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Karsten, Julian M. M. Sc. Kötter, Benedikt M. Sc. Dr. Hans Wittich Prof. Dr.-Ing. habil. Fiedler, Bodo	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2021
	6. Veröffentlichungsdatum 13.12.2021
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Hamburg Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe Denickestraße 15, 21073 Hamburg, Deutschland	9. Ber. Nr. Durchführende Inst. -
	10. Förderkennzeichen 03INT504BB
	11. Seitenzahl 68
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 13
	14. Tabellen 10
	15. Abbildungen 39
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Technologische und regionale Innovationen, Cluster (TRI 3), Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich, 30.09.2021	
18. Kurzfassung Das Ziel dieses Projekts ist es, einen Beitrag zur Fertigung und Entwicklung von polymeren FST-Werkstoffen im Flugzeuginnenraum zu leisten, indem verschiedene bekannte Herstellungsverfahren (SMC-Heißpressen, Prepreg-Imprägnierung/Heißpressen, Pultrusion) weiterentwickelt werden, um die Herstellung von Werkstoffen mit anspruchsvoller Verarbeitbarkeit für die unterschiedlichen Innenraumteile zu ermöglichen. Darüber hinaus werden auch neue oder modifizierte Werkstoffe entwickelt, um das FST-Verhalten erschwinglicher Harzsysteme zu verbessern, ohne deren mechanische oder thermische Eigenschaften negativ zu beeinträchtigen. Die entwickelten Materialien und Technologien werden dann zur Herstellung von Demonstrationsteilen für die Innenausstattung von Flugzeugen verwendet, die die erreichbaren Eigenschaften repräsentieren und gleichzeitig als Transferreferenz für weitere Anwendungen dienen und das technologische und wirtschaftliche Potenzial demonstrieren. Der vollständige Umfang des Projekts wird in der Gesamtheit der Schlussberichte aller beteiligten Projektpartner beschrieben.	
19. Schlagwörter FST-Werkstoffe, Flugzeuginnenraum, Fertigungsverfahren, DirectPreg, Kunststoffe, Faserverbundkunststoffe	
20. Verlag -	21. Preis -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title COMP-1633 – Flame retardant FRP systems for aircraft interior applications Final Report of Hamburg University of Technology- Institute of Polymers and Composites	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Karsten, Julian M. M. Sc. Kötter, Benedikt M. Sc. Dr. Hans Wittich Prof. Dr.-Ing. habil. Fiedler, Bodo	5. End of Project 30.06.2021
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date 13.12.2021
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Hamburg University of Technology Institute of Polymers and Composites Denickestraße 15 21073 Hamburg Germany	7. Form of Publication Report
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. Originator's Report No. 03INT504BB
	10. Reference No.
	11a. No. of Pages Report 68
	11b. No. of Pages Publication
	12. No. of References 13
	14. No. of Tables 10
	15. No. of Figures 39
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date) Projektträger Jülich, Technologische und regionale Innovationen, Cluster (TRI 3), Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich, 30.09.2021	
18. Abstract	

19. Keywords

20. Publisher

21. Price