Fraunhofer ICT

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR CHEMISCHE TECHNOLOGIE ICT

SACHBERICHT ZUM VERWENDUNGSNACHWEIS – E! 13526 PASSENGER

Teil I: Kurzbericht

Bundesministerium für Bildung und Forschung

eureka innovation beyond borders

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

KURZBERICHT

Verbundprojekt: Polyamid basierte selbstverstärkte Sandwich-Strukturen für Elektrofahrzeuge der nächsten Generation (PassEnger) Teilprojekt: Entwicklung und Charakterisierung eines Monomaterial Polyamid Sandwichaufbaus

M.Sc. Sascha Kilian

Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7, 76327 Pfinztal, Deutschland

Förderkennzeichen: 01QK2101C
Datum: 30.12.2024
Projektpartner: Daechang Seat Co. Ltd., SAMWOO Co. Ltd., Ulsan National Institute of Science and Tech. Exipnos GmbH, Comfil ApS

Kurzbericht

Motivation des Forschungsvorhabens

Kunststoffe sehen sich aufgrund des wachsenden Bewusstseins für die Abfallproblematik und unzureichender Recyclingstrategien mit steigender Kritik aus Gesellschaft und Politik konfrontiert. Dennoch bietet diese Werkstoffklasse begründet in Ihrer geringen Dichte und den vielseitigen Möglichkeiten der Funktionsintegration ein hohes Ressourceneinsparpotential in mobilen Anwendungen. Um dieses Potential vollends auszuschöpfen, werden Kunststoffe vermehrt mit hochfesten und steifen Fasern aus Glas und Kohlenstoff verstärkt. Allerdings stellen besagte Faserkunststoffverbunde eine große Herausforderung für das mechanische Recycling dar, da die damit einhergehende Fasereinkürzung mit einer Minderung der mechanischen Eigenschaften verbunden ist und ihren Einsatz in einer gleichen Anwendung verhindert.
An diesem Punkt setzte das Projekt PassEnger an, welches zum Ziel hatte selbstverstärkte Sandwichstrukturen basierend auf Polyamid (PA) für die Anwendung in Sitzlehnen zu entwickeln. Der Monomaterialansatz bei welchem die Fasern und die Matrix des Faserverbundkunststoffes jeweils auf Polyamid basieren, erleichtert hierbei die Kreislaufführung. Durch die Kombination mit einem Schaumkern, welcher ebenfalls auf Polyamid basiert, kann zudem bei minimaler Gewichtszunahme ein Sandwichansatz gewählt und somit eine Maximierung der mechanischen Performance erzielt werden. Neben den kommerziell verfügbaren selbstverstärkten Materialien von Dit Weave (Pure) und Propex (Curv), welche beide auf Polypropylene (PP) basieren, bietet die Firma Comfil ApS ein selbstverstärktes Polyethylenterephthalat (PET) kommerziell an. Zudem wurden im durch die EU-geförderten Projekt Bio4Self durch die Partner Comfil und Fraunhofer ICT ein selbstverstärktes Polylactid (PLA) mitentwickelt. Bis dato war und ist weder ein selbstverstärktes Polyamid noch ein Monomaterialsandwich aus Polyamid aus anderen Forschungsvorhaben bekannt. Zudem sind keine weiteren Studien zum Umformverhalten derartiger Strukturen, weder in der Industrie noch in der Forschung bekannt.
Im internationalen Konsortium aus Dänemark, Deutschland und Südkorea übernahm das Fraunhofer folgende Aufgabenstellungen – Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Polyamidtypen für Fasern und Matrix, Entwicklung eines Konsolidierprozesses für die selbstverstärkten Decklagen, Entwicklung eines Polyamidextrusionsschaumes als Kernmaterial, Erarbeitung eines Prozesses zum klebstofffreien Schmelzfügen einer flächigen Sandwichstruktur, Entwicklung eines thermischen Umformprozesses, sowie Umsetzung eines Funktionalisierungskonzeptes im Spritzgießen, Auslegung und Abmusterung einer Sitzstrukturkomponente, Erarbeitung für eine Recyclingstrategie der Sitzstruktur.

Ablauf des Vorhabens

Zunächst unterstütze das Fraunhofer ICT, den koreanischen Partner Deachang Seat Corporation (DSC) bei der Erstellung eines Anforderungskataloges in Hinblick auf material- und prozessspezifische Randbedingungen (AP1).
Basierend auf dem Anforderungskatalog erfolgte die Auswahl geeigneter Polyamidtypen für das Faserspinnen (AP2). Die zunächst getroffene Auswahl der hochschmelzenden Verstärkungsfaserkomponente auf Basis eines PA9T wurde aufgrund mangelnder Verfügbarkeit und nicht reproduzierbarer mechanischer Eigenschaften auf eine PA46-Faser umgestellt. Für die Matrixkomponente konnte erfolgreich ein vom Konsortialpartner Expinos zur Verfügung gestelltes rezyklatbasiertes Polyamid (rPA) durch das Fraunhofer ICT mit Additiven modifziert und an Comfil für Spinnversuche versendet werden (AP3). Zudem erfolgte eine Additivierung zur Anpassung des rPA an die Anforderungen

eines Extrusionsschaumes. Die beiden eben genannten Fasertypen wurden durch Comfil zu einem Mischgarn verarbeitet und verwoben. Anschließend konnte eine Parameterset am Fraunhofer ICT identifiziert werden, welches eine Kompaktierung zu einem monolithischen Gewebehalbzeug bzw. Organobleche erlaubt (AP4).
In einer Prozessentwicklung mit gekoppelter Parameterstudie konnte das Fraunhofer ICT das in AP3 modifizierte rPA zu einer strukturelle Extrusionsschaumkomponente mit Raumdichten von 100-200 kg/m³ überführen (AP5).
Die in AP4 entwickelten Decklagen in Kombination mit den Extrusionsschäumen wurden in AP6 anschließend erfolgreich zu einer polyamidbasierten selbstverstärkten Monomaterial-Sandwichstruktur verarbeitet. Hierfür entwickelte das Fraunhofer ICT einen klebstofffreien Schmelzfügeprozess für flächige Halbzeuge.
Unterstützt vom koreanischen Partner UNIST erfolgten mehrere Thermoform-, sowie Spritzgießuntersuchungen zunächst an generischen Geometrien am Fraunhofer ICT. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Auslegung und Änderung eines am Fraunhofer ICT vorhandenen Werkzeuges für Sitzlehnengeometrie zur Verarbeitung von Sandwichmaterialien ein. Anschließend konnten die Erkenntnisse in zwei Abmusterungsstudien zunächst in Korea, in eine von DSC entwickelten Sitzstruktur, sowie später in die modifizierte Sitzstruktur am Fraunhofer ICT überführt werden. Somit konnten zwei Demonstratorgeometrien mit unterschiedlichen Detaillösungen im Projekt umgesetzt werden (AP7).
Im Sinne des Nachweises einer Kreislaufführung konnten Einzelkomponenten, wie bspw. der Schaum in einer Recyclingstudie zunächst zerkleinert, regranuliert und erneut zu Schaum verarbeitet werden. Des Weiteren wurden Studien zur Recyclingfähigkeit des Gesamtverbundes durchgeführt und eine Prüfung der Verarbeitbarkeit im Schaum, Spritzgießen und Faserspinnen durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass die Recyclingfähigkeit teilweise nur bedingt gegeben ist. Im Vorhaben war es nicht möglich erneut eine Faser aus dem Regranulat zu erspinnen (AP8).
Im letzten durch das Fraunhofer ICT unterstützten Arbeitspaket (AP9) wurden mechanische Kennwerte der Einzelkomponenten, des Verbundes und der Gesamtstruktur ermittelt. Neben der erfolgreichen Prüfung der koreanischen Sitzlehnenstruktur unter einer vorwärts und rückwärtsgerichteten Momentenbelastung, zeigten sich viele Optimierungspotentiale. Auf eine Optimierung der Fasermatrixkopplung, sowie auf eine Reorientierung der Extrusionsschaumes, welche bessere mechanische Druckeigenschaften in Extrusionsrichtung aufweist, sollte in zukünftigen Vorhaben ein größeres Augenmerk gelegt werden. Zudem sind die hygroskopischen Eigenschaften des Polyamids, die damit einhergehende Wasseraufnahme und Minderung der mechanischen Eigenschaften als kritisch zu betrachten.

Abbildung 1: Entwickelte Gewebe, Decklagen, Schaum, Sandwich, Demonstrator

Abbildung 2: DSC-Demonstrator

Abbildung 3: ICT-Demonstrator

Fraunhofer ICT

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR CHEMISCHE TECHNOLOGIE ICT

SACHBERICHT ZUM VERWENDUNGS-NACHWEIS – E! 13526 PASSENGER

Teil II: Eingehende Darstellung

Bundesministerium für Bildung und Forschung

eureka innovation beyond borders

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

EINGEHENDE DARSTELLUNG

Verbundprojekt: Polyamid basierte selbstverstärkte Sandwich-Strukturen für Elektrofahrzeuge der nächsten Generation (PassEnger) Teilprojekt: Entwicklung und Charakterisierung eines Monomaterial Polyamid Sandwichaufbaus

M.Sc. Sascha Kilian

Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7, 76327 Pfinztal, Deutschland

Förderkennzeichen: 01QK2101C
Datum: 30.12.2024
Projektpartner: Daechang Seat Co. Ltd., SAMWOO Co. Ltd., Ulsan National Institute of Science and Tech. Exipnos GmbH, Comfil ApS

Inhalt

1 Abbildungen 4

2 Vorhabensbeschreibung 5
2.1 Aufgabenstellung 5
2.2 Zeitplan und Arbeitspakete 5
2.2.1 Arbeitspakete 5
2.2.2 Meilensteine 6
2.3 Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 9
2.4 Während der Durchführung bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 9
2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 9
2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit 10

3 AP1 Komponentenanforderungen (Mechanik und Design) 11

4 AP3 Modifikation des Basismaterials 12

5 AP4 Decklagenentwicklung und -produktion 13

6 AP 5 Schaumproduktion und Kernherstellung 14

7 AP 6 Sandwichaufbauentwicklung und –produktion 15

8 AP 7 Herstellung der Demonstratorstruktur 16

9 AP 8 Entwicklung einer Rezyklierstrategie 17

1 0 AP9: Bewertung des Gesamtprozesses hinsichtlich Ökobilanz und Rezyklierbarkeit 18

1
Abbildungen

Abbildung 1: Arbeitsplan im Projekt PassEnger (01.04.2021 – 30.06.2024) mit Meilensteinen 1-6 (Gelbe Markierungen), ... 8
Abbildung 2: Übersicht kommerzieller Polyamide, sortiert nach thermischen Eigenschaften ... 11
Abbildung 3: Einfluss der Kettenverlängerung auf die Schmelzefestigkeit von rPA6 12
Abbildung 4 Hybridgewebe (links) und konsolidierte Decklage (rechts)..... 13
Abbildung 5: Abhängigkeit der Druckeigenschaften von der Schaumorientierung 14
Abbildung 6: Sandwichplatte mit anvisierter Außenkontur der Sitzlehne im Vordergrund (links); Sandwichplatten für Parnter DSC (mitte); Sandwichplatten für ICT (rechts)..... 15
Abbildung 7: Schnitt durch thermogeformtes Sandwich mit Temperaturverlauf während des Prozesses 16
Abbildung 8: Entwickelte Gewebe, Decklagen, Schaum, Sandwich, Demonstrator..... 16
Abbildung 9: DSC-Demonstrator 16
Abbildung 10: ICT-Demonstrator 16
Abbildung 11: Materialkreislauf von PIR PA Granulat, über Schaum und Sandwich, zurück in extrudierten Schaum 17

2
Vorhabensbeschreibung

2.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Projektes PassEnger war die Entwicklung einer selbstverstärkten Monomaterial-Sandwichstruktur auf Polyamidbasis für die Anwendung in Sitzstrukturen. Diese soll zum einen Leichtbauziele verfolgen, um den Ressourcenverbrauch, während der Nutzungphase zu minimieren und gleichzeitig durch den Aufbau aus einem Grundwerkstoff die Kreislaufführung ermöglichen.
Demonstriert wurde dieser Ansatz anhand zweier Sitzlehnengeometrien mit unterschiedlichen Detaillösungen.

Hauptergebnisse während PassEnger waren:

- Selbstverstärkte Monomaterial Decklagen auf Basis mischbarer Polyamidtypen mit zwei unterschiedlichen Schmelzpunkten (Comfil)
- Ein auf Post-Industrial-Rezyklat basierender Polyamid-Extrusionsschaum, als Kernschicht der Sandwichstruktur (Exipnos und ICT)
- Ein Schmelzfügeverfahren zum klebstofffreien Fügen des Sandwichstruktur (UNIST und ICT)
- Zwei Sitzlehnenwerkzeuge (DSC und ICT) zum Thermoformen und Funktionalieren der Monomaterial-Sandwichstrukturen, folglich zwei Demonstratorprodukte
- Vertieftes Prozesswissen zur Verarbeitung von Polyamiden in Schaumextrusionsprozessen und in selbstverstärkten Monomaterialsystemen (ICT)
- Recyclingstrategie für das mechanische Recycling der Gesamtstruktur

Im Rahmen des Vorhabens wurden zur Erreichung der Projektziele beim Partner DSC automobilübliche Prüfungen an der koranischen Sitzstruktur durchgeführt. Hierbei konnten entsprechende Normen bspw. ECE-R 17, erfüllt werden. Zudem erfolgte durch den Partner UNIST eine LCA-Betrachtung des gewählten Lösungsweges im Vergleich zum Stand der Technik. Hierbei konnte ein Einsparungspotential von CO2-Äquivalenten ermittelt werden.

2.2 Zeitplan und Arbeitspakete

Zur Erfüllung der Projektziele wurde der in Abbildung 1 gezeigte Arbeitsplan verfolgt. Nach diesem wurden in 9 Arbeitspaketen Beiträge zu sechs Meilensteinen erbracht. Hierbei kürzen sich Arbeitspakete mit AP und Meilensteine mit M ab. Die Projektergebnisse wurden durch ein iteratives Vorgehen in mehreren Versuchskampagnen von zunehmender Komplexität, jedoch auch mit Abhängigkeiten voneinander erarbeitet.

2.2.1 Arbeitspakete

In „AP1: Komponentenanforderungen“ unter Leitung von DSC wurde ein Anforderungskatalog, welcher die Kriterien für einen Autositz eines koreanischen Automobilherstellers (assoziiert) erfüllt entwickelt. Begleitet wurde diese Aktivität durch die Prozessexperten von UNIST und ICT, welche prozesstechnische Randbedingungen formulierten.

In „AP2: Herstellung des Fasermaterials“ unter Leitung des Partners Comfil erfolgte zunächst ein Materialscreening potenzieller Polyamidtypen, welche nach ihrer Eignung für den jeweiligen Einsatz als Verstärkungsfaser oder Matrixfaser bewertet, und in eine

Rangliste überführt wurden. Anschließend wurden die jeweiligen Fasern gesponnen bzw. zugekauft und den folgenden Arbeitspaketen zur Verfügung gestellt.

Kern des „AP3: Modifikation des Basismaterials“ unter Leitung der Firma Exipnos, war es, die in AP1 und AP2 definierten Materialien hinsichtlich ihres Leistungsspektrums und zur Erfüllung des Anforderungskataloges durch Additivierung zu modifizieren. Hierbei stellte die Firma Exipnos ein rezyklatbasiertes Post-Industrial-Polyamid zur Verfügung, welches durch das Fraunhofer ICT für den Einsatz als Matrixfaserwerkstoff und für die Schaumanwendung angepasst wurde.

Im von der Firma Comfil geleiteten Arbeitspaket „AP4: Decklagenentwicklung und -produktion“ erfolgte die Entwicklung der Decklagen aus den in AP2 hergestellten Fasern. Die zunächst erzeugten Hybridmischgarne aus Verstärkungs- und Matrixfaser wurden verwoben und dem ICT, als Gewebe zur Verfügung gestellt. Anschließend wurde ein Konsolidierungsprozess zur Herstellung monolithischer Organobleche aus den Geweben entwickelt.

„AP5: Schaumproduktion und Kernherstellung“ unter der Leitung des ICTs konnte ein Schaumextrusionsprozess inkl. Fügen zu Kernstrukturen entwickelt werden.

In „AP6: Sandwichaufbauentwicklung und -produktion“ wurde unter Leitung des Partners UNIST ein klebstofffreies Schmelzfügeverfahren, der in AP4 und 5 entwickelten Einzelkomponenten zu flächigen Sandwichstrukturen etabliert.

In „AP7: Herstellung der Demonstratorstruktur“ unter der Leitung von SAMWOO, wurden zwei Demonstratorgeometrien von SAMWOO und ICT entwickelt, welche im Nachfolgenden, als koreanischer (SAMWOO) und europäische Sitzstruktur (ICT) bezeichnet werden. Hierfür wurden zunächst Verarbeitungsparameter anhand generischer Geometrien entwickelt.

Das vorletzte Arbeitspaket „AP8: Entwicklung einer Rezyklierstrategie“ unter Leitung des ICT konnte mehrere Recyclingstrategien auf Einzelkomponentenbasis, aber auch auf Basis der gesamten Sitzstruktur entwickeln.

In „AP9: Bewertung des Gesamtprozesses hinsichtlich Ökobilanz und Rezyklierbarkeit“ mit DSC in der Leitungsposition wurde zum einen der Gesamtprozess hinsichtlich technologischen Reifegrades, als auch hinsichtlich Umwelteinwirkung bewertet.

2.2.2 Meilensteine

Im Projekt wurden sechs Meilensteine definiert.

1. M1 „Entscheidung bezüglich der Materialauswahl für das Faserspinnen mit Berücksichtigung des Recyclings bzw. Erstellen von Blends “
2. M2 „Erste PA-Formulierungen erfüllen für Faserspinn- und Schäumanwendungen die in AP1 definierten technischen Spezifikationen und Anforderungen an die Herstellbarkeit “
3. M3 „Entscheidung über die Verwendung von Recyclingmaterial als Kernmaterial oder ausschließlich beim Spritzgießen“
4. M4 „Wenn Organobleche und UD-Tapes mit verschiedenen Materialkonfigurationen herstellbar sind, wird eine Entscheidung über das beste Material für die Verwendung in Sandwich-Strukturen getroffen. Zusätzlich findet eine Definition der Layup-Konfiguration statt.“
5. M5 „Entscheidung über Herstellungsverfahren für die Sandwichproduktion“

6. M6 „Entscheidung über die Spritzgießtechnologie in Verbindung mit Rezyklatmaterial “

Diese Meilensteine dienten im Projektverlauf als Messpunkte für den Projekterfolg und stellten jeweils Entscheidungspunkte für die weitere Projektdurchführung dar. Abbildung 1 zeigt die Abhängigkeiten der Arbeitspakete und die Zuordnung der Meilensteine im Projektverlauf.
Zwei wesentliche Ereignisse führten zu Verzögerungen in der vorgesehenen Zeitplanung. Zunächst wurde der Verlauf durch die Wahl einer Verstärkungsfaser aus PA9T, bei welcher sich jedoch herausstellte, dass die mechanischen Eigenschaften deutlich von den Datenblattkennwerten abweichen, verzögert. In Konsequenz wurde eine Verstärkungsfaser aus PA46 gewählt. Dadurch wurden die Arbeitspakete AP3, 4 und 5 und entsprechende Meilensteine M3 und M4 verlängert, bzw. verschoben werden.
Zum zweiten gab es Verzögerungen im Auslegungs- und Beschaffungsprozess der europäischen Sitzlehnengeometrie, welche zu einer Projektverlängerung, um 3 Monate führte.

			Projektmonat																																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Arbeitspaket		Leitung	Apr 21	Mai 21	Jun 21	Jul 21	Aug 21	Sep 21	Okt 21	Nov 21	Dez 21	Jan 22	Feb 22	Mrz 22	Apr 22	Mai 22	Jun 22	Jul 22	Aug 22	Sep 22	Okt 22	Nov 22	Dez 22	Jan 23	Feb 23	Mrz 23	Apr 23	Mai 23	Jun 23	Jul 23	Aug 23	Sep 23	Okt 23	Nov 23	Dez 23	Jan 24	Feb 24	Mrz 24	Apr 24	Mai 24	Jun 24
AP1	Komponentenanforderungen (Mechanik und Design)	DSC																																							
AP2	Herstellung des Fasermaterials	COMFIL								1																															
AP3	Modifikation des Basismaterials	EXIPNOS												2																											
AP4	Decklagenentwicklung und -produktion	COMFIL														4										4															
AP5	Schaumproduktion und Kernherstellung	ICT													3											3															
AP6	Sandwichaufbauentwicklung und -produktion	UNIST																		5																					
AP7	Herstellung der Demonstratorstruktur	SAMWOO																											6												
AP8	Entwicklung einer Rezyklierstrategie	ICT																																							
AP9	Bewertung des Gesamtprozesses hinsichtlich Ökobilanz und Rezyklierbarkeit	DSC																																							

Abbildung 1: Arbeitsplan im Projekt PassEnger (01.04.2021 – 30.06.2024) mit Meilensteinen 1-6 (Gelbe Markierungen),

2.3 Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Derzeit konzentriert sich der Verbundwerkstoffmarkt auf die Verwendung von konventionellen Verstärkungsfasern aus Glas, Aramid oder Kohlenstoff. Diese weisen jedoch Defizite in Bezug auf einen geschlossene Kreislaufführung auf, da es bei einem mechanischen und chemischen Recycling zwangsläufig zu einer Fasereinkürzung kommt. PassEnger greift an diesem Punkt an und ermöglicht ein Aufschmelzen des Gesamtverbundes und im Idealfall die Neuerzeugung von kontinuierlichen Verstärkungsfasern aus dem Rezyklat.

Dies bietet einen erheblichen Mehrwert mit Blick auf die europäische und nationale Gesetzgebung, wie beispielsweise dem European Green Deal, dem Circular Economy Action Plan oder der nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse konzentrieren sich auf die Entwicklung und Modifizierung von Materialien und Prozessen zur Verarbeitung von polyamidbasierten Sandwichstrukturen, sowie deren Einzelkomponenten. Nach der Projektlaufzeit werden die Anstrengungen auf weitere Materialien ausgedehnt, sowie identifizierte Optimierungpotenziale für die Polyamidsysteme weiter untersucht und getestet.

Die im Projekt beteiligten kommerziellen Partner Comfil, Expinos, DSC und SAMWOO werden die entwickelten Lösungen in ihre existierende Produktpalette integrieren und als Teil des Kommerzialisierungsprozesses in den Produkten von zukünftigen Kunden implementieren.

Als Forschungspartner wird das Fraunhofer ICT die erzielten Ergebnisse verwenden, um die Forschung und Entwicklung im Bereich des Morphologieleichtbaus auszubauen. Insbesondere werden die gewonnenen Erkenntnisse auf weiter. Die entwickelten Ansätze werden in neuen, öffentlich sowie unternehmerisch finanzierten Forschungsvorhaben mit weiteren Partnern aus dem akademischen und unternehmerischen Umfeld ausgebaut werden.

2.4 Während der Durchführung bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In der Projektlaufzeit wurde lediglich ein durch das BMWK national gefördertes Projekt „TherMono – Thermoplastische Monomaterial-Sandwichwerkstoffe, optimiert für die Kreislaufwirtschaft“ - Förderkennzeichen: 03LB2081A, welches im August 2023 begonnen wurde, identifiziert. Auf dem konkreten Feld der Polyamid-Monomaterial-Sandwichsysteme sind außerhalb des Projektes keine allgemein zugänglichen Fortschritte bekannt geworden.

2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Rahmen der JEC 2024, sowie der Hannovermesse 2024 konnte die koreanische Sitzlehnenstruktur einem breiten Fachpublikum, sowie der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.
Im akademischen Umfeld wurden die Projektergebnisse durch die Partner Comfil und ICT auf der ITHEC Konferenz am 09.10.2024 in Bremen, sowie der SAMPE Symposiums

Konferenz am 10.04.2024 in Karlsruhe präsentiert. Die zugehörigen Veröffentlichungen werden als Teil von Tagungsbänden veröffentlicht werden.
Zudem wurde das Projekt als Teil einer Bewerbung für den AVK-Innovationspreis 2024 im Bereich Forschung und Wissenschaft integriert. Das Fraunhofer ICT wurde hierbei mit dem 1. Platz ausgezeichnet.
Die Präsentation der europäischen, sowie koreanischen Sitzstrukturen ist für die JEC 2025 erneut geplant.

2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die Entwicklung von kreislauffähigen Leichtbauwerkstoffen unter der Anwendung des Morphologieleichtbauansatzes – Kombination unterschiedlicher Morphologien eines Materials - bedarf eines intensiven und tiefgreifenden Prozess-Know-Hows, um entsprechende Wirkzusammenhänge der Einzelkomponenten unter Prozessbedingungen zu verstehen und diese Methodik erfolgreich in die industrielle Anwendung zu überführen.
Aus dieser Anforderung ergibt sich die besondere Bedeutung des Fraunhofer ICT, entlang der Wertschöpfungskette, welches mit seinen Kompetenzen, in der Materialmodifikation, der Schaumextrusion und Faserverbundtechnologie auf industriellen Anlagentechnik und seines erfahrenen Personals für die erfolgreiche Lösung dieser Forschungsaufgaben.

3
AP1 Komponentenanforderungen (Mechanik und Design)

Geeignete PA-Typen wurden hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften für die anschließende Verarbeitung im Faser-Verbund verglichen, da das Schweißen von Schaumkern und Decklage das Fasermaterial nicht beeinträchtigen sollte.
Die Wahl fiel auf PA6 als Material für Schaum und Matrix der Decklage, da es als Recyclingmaterial gut verfügbar ist und thermisch einen ausreichend großen Abstand zu Hochtemperaturmaterialien wie PA46 und PA9T als Fasermaterial bietet.

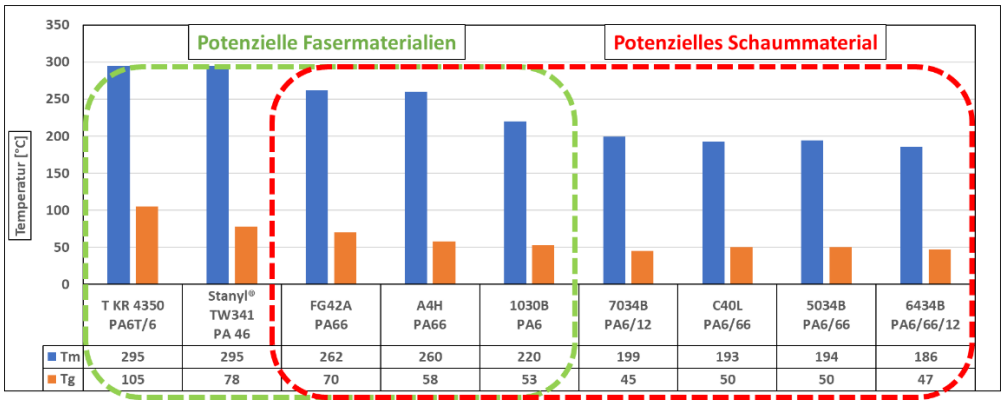

Abbildung 2: Übersicht kommerzieller Polyamide, sortiert nach thermischen Eigenschaften

4
AP3 Modifikation des Basismaterials

Polyamide, insbesondere recyceltes PA, sind Polymere mit niedriger Schmelzfestigkeit. Diese Schmelzefestigkeit wird in Form der Abzugskraft eines Schmelzfadens in Abhängigkeit von Schmelzetemperatur und Abzugsgeschwindigkeit, mit steigender Geschwindigkeit bis zum Reißen im Rheotensversuch gemessen.
Da die Schmelze die Zellstruktur von der Nukleierung, über die Expansion bis zur Erstarrung erhalten muss, ist die Schmelzefestigkeit eine essenzielle Eigenschaft für die Herstellung thermoplastischer Schaumstoffe. Durch Senkung der Temperatur, sowie Einsatz von Kettenverlängerern oder –verzweigern kann die Schmelzefestigkeit erhöht werden. Die Schmelzefestigkeit entspricht der maximalen Abzugskraft beim Abreißen des Schmelzefadens.
Alle Proben von PA6 Neuware bis PIR PA6 wiesen eine vergleichsweise niedrige Schmelzfestigkeit von unter 0,1 N auf.
Durch Modifikation mit linearem Kettenverlängerer, der die Recyclingfähigkeit gewährleisten soll, wurde die Schmelzefestigkeit signifikant gesteigert und die Extrusion von Schäumen niedriger Dichte ermöglicht.

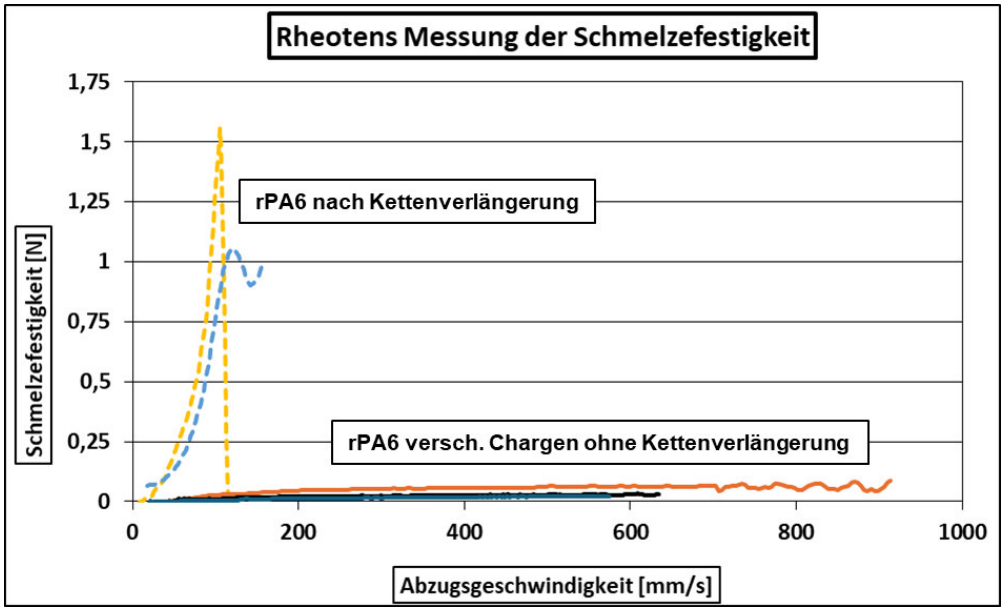

Abbildung 3: Einfluss der Kettenverlängerung auf die Schmelzefestigkeit von rPA6

5
AP4 Decklagenentwicklung und -produktion

Im AP4 erfolgte unter der Leitung des Partners Comfil die Entwicklung und Produktion der Decklagen. Hierbei wurden die in AP2 entwickelten Matrixfasern und Verstärkungsfasern als verwobenes Hybridgarn dem ICT zur Verfügung gestellt.
In einem strahlungsinduzierten Vakuumkonsolidierverfahren (SVK) erfolgte eine Parameterstudie.
Die Hauptherausforderung gestaltete sich derart, dass eine vollständige Imprägnierung stattfindet, bei einer gleichzeitigen Vermeidung einer Relaxation des verstreckten Zustandes der Verstärkungsfasern. Zu diesem Zweck wurde eine zielführende Wärmevorbehandlung der Verstärkungsfasern etabliert, sowie eine Prozessparameterraum identifiziert.

Abbildung 4 Hybridgewebe (links) und konsolidierte Decklage (rechts)

6
AP 5 Schaumproduktion und Kernherstellung

Die erste Generation extrudierter PA6 Schaumstoffe erreichte Dichten von etwa 100 - 220 kg/m³ und wurde aus PA6 Neuware hergestellt. Die 2. Generation wurde aus rPA6 und mit Dichten von 100 und 190 kg/m³ extrudiert. Die Zellwände erscheinen auf REM-Aufnahmen geschlossenzellig. Somit konnte erfolgreich die Nutzung von rPA6 für die Herstellung der Kernlagen umgesetzt werden. Eine Reorientierung der Schaumplatten beim Verschweißen um 90° hatte zudem eine deutliche Steigerung der Festigkeit und Steifigkeit zur Folge und erzielte für getrocknete PA-Schäume höhere Festigkeiten und Steifigkeiten als kommerzielle PET-Referenzproben gleicher Dichte.

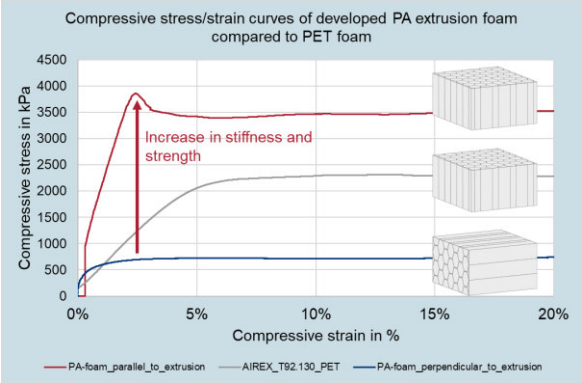

Abbildung 5: Abhängigkeit der Druckeigenschaften von der Schaumorientierung

Tabelle 1 Vergleich der mechanischen Eigenschaften von PA6 Schaum mit kommerziellem PET-Schaum

	Dichte in g/l	Plattenhöhe in mm	Druckmodul in MPa	Festigkeit 10% Stauchung in MPa
rPA6 stehend	146	22	189,9 ± 34	3,7 ± 0,4
Airex T92.130 stehend	140	15	130 ± 10	2,3 ± 0,4
Airex T92.130 Datenblatt	127-143	20	140	2,4

Mittels Stumpfschweißen und ohne vollständige Reorientierung der extrudierten Schaumplatten mit eine Handschweißanlage 15.20 von Ingenia GmbH konnten dem AP6 erfolgreich Schaumplatten als Kernlagen aus rPA6 zur Verfügung gestellt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass durch dieses Vorgehen nicht das vollumfängliche mechanische Potential ausgeschöpft wurde, jedoch im Rahmen des Forschungsvorhabens eine wirtschaftliche Lösung gefunden wurde. Dieses Vorgehen hat jedoch starke Auswirkungen auf die Verarbeitung im Thermoformen (Vgl. AP 7).

7
AP 6 Sandwichaufbauentwicklung und –produktion

Im AP6 konnte in Zusammenarbeit mit dem Partner UNIST erfolgreich ein klebstofffreies Schmelzfügeverfahren für die in AP4 entwickelten Decklagen zusammen mit den in AP5 generierten Extrusionsschäumen entwickelt und validiert werden. Dies erfolgte zunächst auf Coupon-Ebene und mit glasfaserverstärkten Decklagen und wurde anschließend auf das Zielsystem übertragen.
Zudem erfolgte eine erfolgreiche Skalierung des Prozesses auf die erforderliche Demonstratorgrößen von 1000 mm x 900 mm x 9 mm für DSC (koreanische Sitzstruktur) und 1000 mm x 900 mm x 12 mm für das ICT (europäische Sitzstruktur).
Zuletzt erfolgte die Fertigung der erforderlichen Anzahl an Demonstratorhalbzeugen zur Abmusterung in AP7.

Abbildung 6: Sandwichplatte mit anvisierter Außenkontur der Sitzlehne im Vordergrund (links); Sandwichplatten für Parnter DSC (mitte); Sandwichplatten für ICT (rechts)

8
AP 7 Herstellung der Demonstratorstruktur

Im Rahmen des AP7 erfolgten zunächst Umformversuche mit den entwickelten Sandwichplatten anhand einer generischen Geometrie. Ziel war es das Thermomanagement innerhalb der Sandwichstruktur zu evaluieren und geeignete Prozessparameter zur Verarbeitung zu identifizieren. Hierfür wurden die Sandwichplatten zunächst in einem IR-Heizfeld unter Variation der Zieltemperatur und Haltezeit aufgeheizt und anschließend umgeformt. Weiterhin wurden ebenfalls an generischen Bauteilen Versuche zur Funktionalisierung im Spritzgießen unternommen.

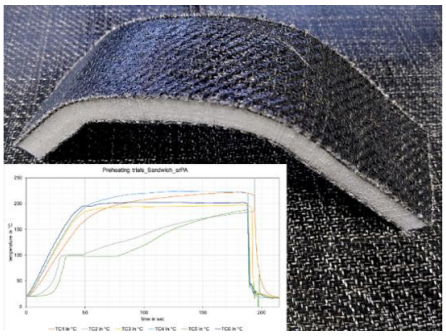

Abbildung 7: Schnitt durch thermogeformtes Sandwich mit Temperaturverlauf während des Prozesses

Abbildung 8: Entwickelte Gewebe, Decklagen, Schaum, Sandwich, Demonstrator

Die gewonnenen Erkenntnisse bzw. das vielversprechendste Parameterset diente als Grundlage zur Entwicklung und Herstellung der beiden Sitzlehnengeometrien. Hierbei konnte zum einen eine Guideline zur Wahl und Positionierung der Anspritzpunkte und zum anderen Richtlinien zur Umformung und Vorkompaktierung abgeleitet werden. Die koreanische und europäische Sitzstruktur unterscheiden sich hierbei, sowohl in der Spritzgießkomponentenauslegung, als auch im Umformbereich. So weist beispielsweise die europäische Sitzstruktur einen rundumlaufenden kompaktierten Sandwichrandbereich auf, welcher verhindert, dass Spritzgießmaße in den Kern des Sandwiches eindringt.

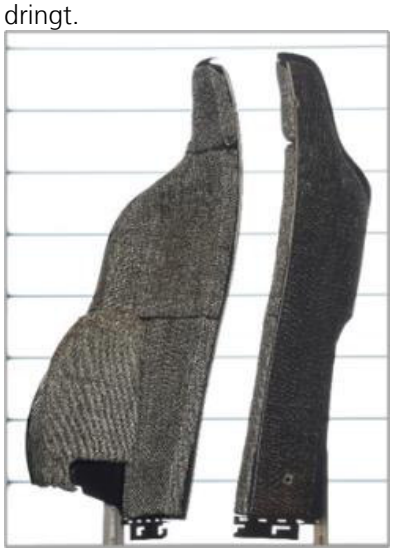

Abbildung 9: DSC-Demonstrator

Abbildung 10: ICT-Demonstrator

9
AP 8 Entwicklung einer Rezyklierstrategie

Als Rohstoff für die extrudierten Schaumkerne im Monomaterialsandwich diente bereits recyceltes PA6 von Exipnos (PIR PA6). Um die Recyclingfähigkeit des PA-System zu überprüfen, wurden sowohl der Schaumkern separat, als auch das selbstverstärkte PA-Sandwich im Ganzen geschreddert und regranuliert. Dabei wurde die Temperatur so gewählt, dass lediglich der Schaum und die Decklage, aber nicht die PA-Fasern aufschmelzen. Das Granulat enthält somit ca. 33 wt% PA-Fasern.
So wurden die Regranulate rPA6 aus dem separaten Schaumkern, als auch srPA aus dem vollständigen Sandwich inklusive PA-Fasern gewonnen.
In erneuten Extrusionsversuchen zeigte sich eine hervorragende Schäumbarkeit dieser Regranulate, ohne Zugabe weiterer Kettenverlängerer.
Die Schaumextrusion von reinem PA6 Schaum-Granulat war erfolgreich und erzielte Dichten von ca. 69 kg/m³. Mit zunehmendem Anteil srPA-Granulat mit ca. 33 wt% PA-Faseranteil nahm die Schaumdichte geringfügig zu, bis bei 30 wt% sr-Granulat (entspricht ca. 10 wt% PA-Fasern) der Schaum deutlich anstieg. Die könnte auf die nukleierende Wirkung der Fasern zurückzuführen sein.

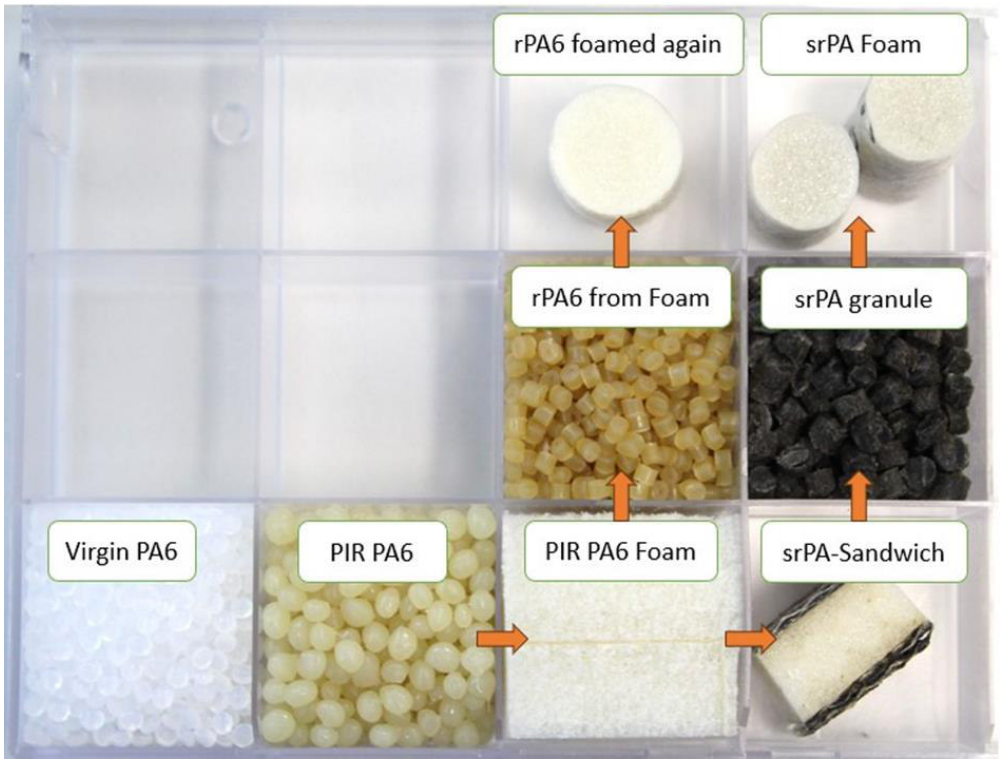

Abbildung 11: Materialkreislauf von PIR PA Granulat, über Schaum und Sandwich, zurück in extrudierten Schaum

1 0
AP9: Bewertung des Gesamtprozesses hinsichtlich Ökobilanz und Rezyklierbarkeit

Im AP9 wurde die mechanische Performance der Verbundkomponenten getestet. Für die Decklagen aus AP4 konnten im Zugversuch folgende Kennwerte für getrocknete Decklagen ermittelt werden.

Tabelle 2 mechanischen Zugeigenschaften der Decklagen

Name	Zug E-Modul in MPa	Zugfestigkeit in MPa	Bruchdehnung in %
Finales Laminat aus Hybridgewebe PA6-PA46	1.720 ±220	160,09 ±5,75	23,135 ±1,25

Insbesondere die hohen Zugfestigkeiten bei einer geringen Dichte des Verbundes weisen ein hohes Potential auf. Die Steifigkeitseigenschaften hingegen zeigen ein deutliches Optimierungspotential, welches sich durch geeignete Wahl des Gewebetyps, oder der Modifikation der Fasermatrixanbindung verbessern lässt.
Dennoch stellt die große Feuchtigkeitsaufnahme von Polyamiden mit der daraus resultierenden Senkung der mechanischen Eigenschaften ein essenzielles Anwendungshindernis für Polyamid-Sandwichmaterialien dar und bedarf einer genauen Auslegung.

Jedoch zeigt insbesondere der Sandwichaufbau basierend auf der hohen Bruchdehnung der Decklagen, sowie der gutmütigen Schädigungsmechanismen ein extrem hohes Potential für Anwendungen in Crashstrukturen aufgrund der hohen Energieabsorption.

Tabelle 3 Puncture Test (DIN EN ISO 6603-2) der Sandwichstrukturen

Name	Max. Kraft in N	Puncture Energy in J	Auslenkung in mm
srPA-PassEnger Sandwich 12 mm	6.890	107,7	31,9

Zusammenfassend wurde eine Optimierungsmöglichkeit hinsichtlich der Steifigkeit der Decklagen im Sinne der Modifikation der Verstärkungsfasern identifiziert. Dies würde das technologische Potential weiter heben und bietet die Grundlage für weitere FE-Aktivitäten im Gesamtkontext.

Eine Reorientierung des extrudierten Schaumes mit Extrusionsrichtung in Lastrichtung ist bei kommerziellen Schaumstoffen für technische Anwendungen bereits etabliert und stellt ebenso für Schaum aus Polyamid eine wichtige Möglichkeit zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften dar.