

Schlussbericht des Verbundes

- öffentlich einsehbar -

ModE-SoFa

Modulares Batteriesystem zur Elektrifizierung von Sonderfahrzeugen

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers (ZE) oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den Zuwendungsgeber (ZG) ausdrücklich darauf hinzuweisen.

Zuwendungsempfänger: GreenIng GmbH & Co. KG Bahnhofstraße 109 71397 Leutenbach	Förderkennzeichen: 01MV22016A
Selfbits GmbH Haid-und-Neu-Str. 7 76131 Karlsruhe	01MV22016B
Fraunhofer Institut für chemische Technologie Joseph-von-Fraunhofer Str. 7 76327 Pfinztal	01MV22016C
Universität Stuttgart Institut für Kunststofftechnik (IKT) Keplerstraße 7 70174 Stuttgart	01MV22016D
Magirus GmbH Graf-Arco-Straße 30 89079 Ulm	01MV22016E
CompriseTec GmbH Rödingsmarkt 20 20459 Hamburg	01MV22016F

Kontakt Konsortialführer:	Tel.: +49 7195 9 04 33 11 Email: uwe.kehn@greening.de
Laufzeit des Vorhabens: von: 01.09.2022	bis: 31.08.2025
Datum Bericht: 31.10.2025	

Inhalt

.....	1
1. Kurzdarstellung.....	4
1.1. Aufgabenstellung.....	4
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	6
Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	8
Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	8
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
2. Eingehende Darstellung	10
2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	10
Arbeitspaket 1 – Projektmanagement	10
Arbeitspaket 2 – Konzeptionierung und Konstruktion des modularen Baukastensystems.....	10
Arbeitspaket 3 – Prozessentwicklung der in-situ-Pultrusion	17
Arbeitspaket 4 – Funktionalisierung im 3D-Druck.....	26
Arbeitspaket 5 – Entwicklung der Fügeverfahren	30
Arbeitspaket 6 – Produktionsdatenerfassung und -auswertung	36
Arbeitspaket 7 – Demonstratorherstellung	40
Arbeitspaket 8 – Validierung auf Belastungsprüfstand im Fahrzeug	43
Arbeitspaket 9 – Nachhaltigkeitsmanagement durch Reparatur und Recycling	45
Gegenüberstellung der Ziele mit den erreichten Ergebnissen.....	52
2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	56
2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	56
2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	57
2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	57
2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen.....	58

1. Kurzdarstellung

Aufgrund der Forderung nach emissionsfreien Antrieben für Fahrzeuge, insbesondere für den innerstädtischen Bereich, wächst der Markt für fahrzeugindividuelle Batteriesysteme kontinuierlich. Gerade Hersteller von Kommunal- und Sonderfahrzeugen stehen vor der Herausforderung der ganzheitlichen Elektrifizierung ihres Fahrzeugportfolios. Aufgrund des breiten Anforderungsspektrums und anwendungsspezifischen Randbedingungen ergeben sich diverse Batteriekonfigurationen, die oftmals nur in sehr geringen Stückzahlen benötigt werden.

Vor diesem Hintergrund wurde eine modulare und kosteneffiziente Lösung für die Skalierung sowie den Aufbau von individuellen Batteriesystemen entwickelt. Diese Lösung wurde im Verbundvorhaben „ModE-SoFa“ erarbeitet. Dabei fokussierte sich das Vorhaben ModE-SoFa auf die Entwicklung und Validierung eines Baukasten-Ansatzes in Leichtbauweise, sodass die Bauraumsituation sowohl auf Modulebene, als auch auf Gehäuseebene durch den Einsatz standardisierter Elemente flexibel berücksichtigt und effizient gefertigt werden kann.

Dem interdisziplinär entlang der Wertschöpfungskette aufgestellten Konsortium gelang es durch eine sehr gelungene Zusammenarbeit, die definierten Projektziele zu erreichen. Diese erstreckten sich von der Anforderungsdefinition für das Batteriesystem im Demonstratorfahrzeug (Magirus), der Batteriemodul- (GI) und Gehäuseentwicklung (CT, IKT) über die (Weiter-) Entwicklung industrialisierbarer Fertigungstechnologien, wie der thermoplastischen in-situ Pultrusion (ICT,CT), dem Aufdrucken (CT) und dem Aufschweißen (IKT) von Funktionalisierungselementen, der digitalen Nachverfolgung aller Prozesse und Bauteile (Selfbits) bis hin zum Test eines Demonstratordesigns des Batteriesystems auf einem Prüfstand und in einem Feuerwehrfahrzeug.

1.1. Aufgabenstellung

Mit dem zunehmenden Bedarf an fahrzeugindividuellen Batteriesystemen für emissionsfreie Antriebe, insbesondere in Kommunal- und Sonderfahrzeugen, entsteht die Notwendigkeit, flexible und skalierbare Lösungen für Batteriegehäuse und -module zu entwickeln. Das Anforderungsprofil an die Batteriesysteme für diese Fahrzeugklasse unterscheidet sich deutlich von dem für konventionelle PKW. Die geringeren Stückzahlen je Sonderfahrzeugtyp schließen den Einsatz investitionsintensiver Produktionslinien zur spezialisierten Fertigung eines Batteriesystems aus. Für das Batteriegehäuse werden derzeit, entsprechend den fahrzeugspezifischen Bauraumrestriktionen, überwiegend Schweißkonstruktionen aus Metall eingesetzt. Zum einen sind diese Gehäuse durch große Anteile handwerklicher Arbeit sehr aufwendig in der Herstellung (viele Einzelteile müssen verschweißt werden) und zum anderen besitzen diese Strukturen ein vergleichsweise hohes Gewicht und sind nur äußerst begrenzt recyclingfähig.

Das Konsortialprojekt fokussiert sich daher auf die Entwicklung und Validierung eines Baukasten-Ansatzes in Leichtbauweise, sodass die Bauraumsituation sowohl auf Modulebene, als auch auf Gehäuseebene durch den Einsatz standardisierter Elemente flexibel berücksichtigt werden kann.

Die wissenschaftlich-technischen Projektziele des Vorhabens ModE-SoFa wurden verbundübergreifend vor Projektbeginn, wie folgt, zusammengefasst:

- Entwicklung eines modularen und skalierbaren Ansatzes für Modul- und Gesamtbatteriegehäuse mit abschließender Erprobung des Prototyps
- Funktionsintegration: Flammenschutz mit Erfüllen der UL 94 Prüfung Kategorie V0 der thermoplastischen Pultrusionspaneele und Abschirmung/ Dämpfung elektrischer Felder durch neue Gehäusewandung um 50 dB
- Erfolgreiches Fügen der nachverfolgten modularen, faserverstärkten Bauteile auf Grundlage der Produktionsdatenerfassung unter Beibehaltung der geforderten mechanischen Eigenschaften (Definition der mech. Eigenschaften im Lastenheft)
- Min. 10% Gewichtseinsparung des Gehäuses im Vergleich zur aktuellen Bauweise (Material und integrierte Bauweise per 3D-Druck) und Verminderung der Treibhausgas-Emissionen (THG) im Vergleich zur aktuellen Bauweise um min. 20%

- Entwicklung eines effizienten Reparatur- und Recycling-Konzepts und Nachweis der Recyclingfähigkeit der pultrudierten Paneele auf Prüfkörperebene

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die **GreenIng GmbH & Co. KG (GI)** arbeitet seit 2010 an der Elektrifizierung von Fahrzeugen unterschiedlichster Art. Dieses Know-how und die Erfahrungen im Bereich der Batteriesysteme bildeten die Basis für die Anforderungsdefinition und die daran anschließende Konzeption eines modularen und skalierbaren Baukastens für Batteriesysteme.

Die **Selfbits GmbH (SB)** ist ein auf industrielle Softwarelösungen spezialisiertes Technologieunternehmen mit Schwerpunkt auf Produktionsdatenerfassung, Fertigungsplanung und Datenanalyse.

Im Projekt ModE-SoFa brachte Selfbits ihr umfassendes Know-how in den Bereichen Industrie-4.0-Datenarchitekturen, IoT-Integration, Prozessdatenerfassung sowie Entwicklung benutzerzentrierter Web- und Mobile-Anwendungen ein, um ein durchgängiges digitales Nachverfolgungs- und Analysesystem für die Fertigung von Batteriesystemen zu realisieren.

Das **Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart (IKT)** forscht und arbeitet in allen Bereichen der Kunststofftechnik und gliedert sich in die drei Abteilungen Verarbeitungstechnik, Werkstofftechnik und Produktentwicklung. Das breite Know-How im Bereich der Verarbeitung von Kunststoffen wurde im Laufe dieses Projektes in die Entwicklung der Schweißverfahren für die Erstellung der Batteriekästen eingebracht.

Das **Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT** besitzt umfassende Kompetenzen im Bereich der Materialentwicklung (Temperaturbeständigkeit, Feuchteaufnahme, chemische Beständigkeit) für den in-situ-Pultrusionsprozess. Die reaktive Verarbeitung von ϵ -Caprolactam, wurde am ICT seit Anfang der 2000er intensiv untersucht

Die **Magirus GmbH (MAG)** steht seit 1864 für die Verbindung von Innovation und Tradition. Mit einem umfassenden Angebot hochmoderner und zuverlässiger Feuerwehrfahrzeuge wie Löschfahrzeuge, intelligenter Drehleitern, leistungsstarker Flugfeldlöschfahrzeuge, Einsatz- und Löschroboter, digitaler Einsatz- und Flottenmanagementsystem, Pumpen, Tragkraftspritzen und cleverem Equipment gilt Magirus international als einer der größten und technologisch führenden Anbieter von Brandschutz- und Katastrophenschutz-Technik und stellt somit einen zuverlässigen Partner für das Demonstratorfahrzeug dar. Die gemeinsame Entwicklung eines modularen, skalierbaren Batteriesystems für Sonderfahrzeuge innerhalb dieses Projektes gilt als eine Voraussetzung, um den Trend und die Notwendigkeiten des Marktes aufzugreifen, emissionsfreie und leise Antriebe im Produktportfolio aufzunehmen und damit elektrifizierte Sonderfahrzeuge mit hohem Individualisierungsgrad in der Branche zu etablieren.

Die **CompriseTec GmbH (CT)** ist seit 2006 in der Entwicklung und Fertigung von Verfahren, Materialien und Produkten in der Kunststoffbranche tätig und hat sich in dieser Zeit als Partner für jeden Schritt der Produktentwicklung etabliert. Im eigenen Technikum steht ein umfassender Maschinenpark zur Verfügung, um Produkte, Verarbeitungsverfahren und Materialformulierungen zu testen und bis hin zur Kleinserie zu fertigen. Die Anfertigung von Life-Cycle-Assessments bietet die Gewissheit, bei der Entwicklung auf die richtigen Stellschrauben zu achten und zusätzlich zu den technischen Anforderungen auch Nachhaltigkeitskriterien zu erfüllen. Diese Expertise ermöglicht es im ModE-SoFa-Projekt einen leistungsstarken Batteriekasten zu entwickeln und dies am Prototypen nachzuweisen.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben ModE-SoFa gliederte sich in 9 Arbeitspakete. Die interdisziplinären Arbeitsschwerpunkte für die Konstruktion sowie die Material- und Prozessentwicklung des modularen Batteriesystems wurden in ein administratives und acht technische Arbeitspakete (AP) unterteilt. In der Folge sind die Inhalte der technischen AP kurz zusammengefasst. Eine Übersicht der Arbeitspakete findet sich in Tabelle 1.

Zu Beginn der technischen Tätigkeiten wurden in enger Zusammenarbeit aller Partner im AP2 die relevanten Anforderungen in Bezug auf Bauraum, Anschlüsse, Material sowie die Prozesse identifiziert.

Auf dieser Basis werden die Baukastensysteme für Modul- und Gehäuseebene konzipiert und konstruiert, sowie Lösungsansätze für das Thermomanagement, die EMV-Abschirmung und die Kontaktierung erarbeitet. Dadurch werden in diesem Arbeitspaket die grundlegenden Rahmenbedingungen für die weiteren Tätigkeiten festgelegt.

Die thermoplastischen, faserverstärkten Pultrusionspaneele als Grundelemente des Batteriegehäuses, bzw. deren Herstellungsprozess, wurden im AP3 von den Partnern ICT und CT entwickelt. Dazu wurden insbesondere die Additivierung des Monomers zur Realisierung der notwendigen Brandschutzeigenschaften als auch die Integration eines Carbonfaservlieses entwickelt und validiert. Zur individuellen Funktionalisierung der thermoplastischen Profile wurde im AP4 von CT der 3D-Kunststoffdruck angepasst und umgesetzt. Das Drucken von Funktionselementen erfolgt direkt auf die entsprechenden Paneele durch einen modifizierten Aufbau.

Das AP5 umfasst die Entwicklung und Anwendung geeigneter Fügeverfahren zur Umsetzung der modularen Baukastenansätze durch die Projektpartner IKT und CT. Zum Fügen der funktionalisierten Paneele wurde ein geeignetes, thermisch basiertes Fügeverfahren identifiziert, angepasst und auf eine große Presse übertragen.

Im AP6 fand die übergeordnete Produktionsdatenerfassung und –auswertung durch Selfbits statt, welche die Prozessüberwachung im Sinne der „Industrie 4.0“ sicherstellt.

Die Ergebnisse aus den vorangegangenen Arbeitspaketen wurden im AP7 zu einem Demonstrator gebündelt.

Im Rahmen von AP8 wurden sowohl die Batteriemodule, als auch die gesamten Batteriesysteme auf einem Belastungsprüfstand untersucht.

Das Nachhaltigkeitsmanagement im AP9 umfasste zwei zentrale Ansätze: Die Reparatur und das Recycling. Parallel zu den Entwicklungen stellte die projektbegleitende LCA ein Instrument dar, um die Nachhaltigkeit entsprechender Lösungsansätze zu bewerten und auf dieser Grundlage zu entscheiden.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Derzeit bestehen Batteriegehäuse aus Modulen und einem Gesamtgehäuse, meist aus Aluminium, gefertigt durch Kombination von Kant-, Strangpress-, Guss- und Schweißteilen. Diese Bauweise ist komplex, kostenintensiv und erfordert für jede Fahrzeugvariante eine neue Konstruktion. Eine zerstörungsfreie Demontage ist in der Regel nicht möglich und die Skalierung auf andere Bauräume ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Das Pultrusionsverfahren ist seit Jahrzehnten für duroplastische Verbundprofile etabliert. Die thermoplastische in-situ-Pultrusion mit PA6-Matrix ist hingegen neu, ermöglicht das werkstoffliche Recycling, sowie die Schweißbarkeit und Umformbarkeit der Profile, ist jedoch bisher nur mit einfachen Geometrien und ohne serientauglichen, stabilen Prozess umgesetzt worden. Die Herstellung dünnwandiger, breiter Paneele mit flächigen Verstärkungstextilien wurde noch nicht demonstriert.

Das Schweißen von endlosfaserverstärkten Thermoplasten ist grundsätzlich möglich, erreicht aber nicht die Festigkeit des Grundmaterials. Insbesondere die resultierende Faserorientierung und die Erprobung unterschiedlicher Schweiß- und Fügeverfahren ist der Schlüssel zu einer erfolgreichen Verbindung der Pultrusionsprofile.

Die Funktionalisierung von Pultrusionsprofilen mittels 3D-Druck (FDM) und anderen Fügeverfahren ist technisch vielversprechend, insbesondere bei Verwendung von werkstoffgleichen PA6-Filamenten. Der direkte Druck auf in-situ-Pultrudate wurde bisher nicht untersucht. Potenziale bestehen in der Integration von Befestigungselementen und Sensorik ohne zusätzliche Montageprozesse.

Für das Recycling sind thermoplastische FVK im Vorteil: Mechanisches Recycling ermöglicht Wiederverwendung mit nahezu identischen Eigenschaften, chemisches Recycling (z. B. hydrolytische Depolymerisation) erlaubt Rückgewinnung von ϵ -Caprolactam und Fasern, ist jedoch energieintensiv und technisch noch optimierungsbedürftig.

Tabelle 1: Projektplan mit Angabe beteiligter Partner

AP		Leiter	Beteiligte Partner						
			GI	SB	ICT	IKT	MAG	CT	
AP1	Projektmanagement								
		GI	X						
AP2	Konzeptionierung und Konstruktion des modularen Baukastensystems								
AP2.1	Lastenheft: Definition der Randbedingungen des Batteriesystems	GI	X				X	X	
AP2.2	Konzeptionierung des Batteriemodul-Baukastens	GI	X			X		X	
AP2.3	Konzeptionierung des Batteriegehäuse-Baukastens	GI	X		X	X		X	
AP2.4	EMV-Abschirmung und Entwicklung Kabelsatz	GI	X		X		X	X	
AP2.5	Konzept und Integration des Thermomanagements	GI	X		X		X	X	
AP2.6	Konstruktion und Auslegung des Batteriemodul-Baukastens	GI	X					X	
AP2.7	Konstruktion und Auslegung des Batteriegehäuse-Baukastens	GI	X					X	
AP3	Prozessentwicklung der in-situ Pultrusion								
AP3.1	Rezeptentwicklung für flammgeschütztes aPA6	ICT			X			X	
AP3.2	Rezepturoptimierung für robuste und schnelle Verarbeitung	ICT			X			X	
AP3.3	Kompatibilität und Verarbeitbarkeit von Verstärkungstextilien	ICT			X			X	
AP3.4	Prozessentwicklung der aPA6 Pultrusion für Paneele mit Textilverstärkung	ICT			X			X	
AP3.5	Optimierungsschleifen und Paneelfertigung	ICT			X			X	
AP3.6	Validierung des Trackingkonzepts für Pultrusion	ICT			X		X	X	
AP3.7	Material- und Komponententests (Mechanik, Flammenschutz, EMV)	ICT			X			X	
AP4	Funktionalisierung im 3D-Druck								
AP4.1	Definition geeigneter 3D-Druckfilamente	CT				X		X	
AP4.2	Untersuchung und Optimierung der Haftung auf den Paneelen	CT			X	X		X	
AP4.3	Modifikation 3D-Drucker	CT						X	
AP4.4	3D-Druck von Funktionselementen auf die Paneele	CT				X	X	X	
AP5	Entwicklung geeigneter Fügeverfahren								
AP5.1	Entwicklung von Druckplatten und Verspannelementen für Batteriemodulmontage	IKT	X					X	
AP5.2	Verspann- und Fügeeinrichtung zur Batteriemodulmontage	IKT	X			X		X	
AP5.3	Sensorintegration und Datenerfassung bei Batteriemodulmontage	IKT	X	X				X	
AP5.4	Verfahrensentwicklung zum Fügen der pultrudierten Paneele	IKT	X		X	X		X	
AP5.5	Verfahrensentwicklung zum Fügen von vorkonfektionierten Funktionselementen	IKT	X			X		X	
AP5.6	Analyse der Faserorientierung und mechanische Validierung der Fügestelle	IKT	X			X		X	
AP5.7	Aufbau Laboranlage zum Fügen der Paneele zum Batteriegehäuse	IKT	X			X	X	X	
AP6	Produktionsdatenerfassung und -auswertung								
AP6.1	Anforderungsanalyse und Schnittstellendefinition zur Datenerfassung	SB	X	X	X			X	
AP6.2	Konzeptentwicklung zur Nachverfolgung von Bauteilen und Batteriemodulen	SB		X					
AP6.3	Setup- Datenbankmodellierung	SB		X					
AP6.4	Entwicklung von Auswertungsalgorithmen	SB		X					
AP6.5	Visualisierung mittels Web-GUV Dashbord	SB	X	X	X			X	
AP6.6	Optimierung der Auswertungsalgorithmen	SB	X	X				X	
AP6.7	Ableitung von Handlungsempfehlungen für Handhabung und Recycling	SB	X	X	X		X	X	
AP7	Demonstratorherstellung								
AP7.1	Aufbau der Batteriemodule	GI	X			X			
AP7.2	Aufbau der Batteriegehäuse	GI	X		X	X		X	
AP7.3	Zusammenbau des modularen Batteriesystem-Demonstrators	GI	X						
AP7.4	Vorbereitung Demonstratorfahrzeug	GI	X				X		
AP8	Validierung auf Belastungsprüfstand und im Fahrzeug								
AP8.1	Funktionstests der Batteriemodule auf Belastungsprüfstand	GI	X						
AP8.2	Funktionstests des Batteriesystems auf Belastungsprüfstand	GI	X					X	
AP8.3	Integration des Batteriesystem-Demonstrators in das Prototypenfahrzeug	GI	X				X	X	
AP8.4	Funktionstest in realer Einsatzumgebung	GI	X				X		
AP9	Nachhaltigkeitsmanagement durch Reparatur und Recycling								
AP9.1	Entwicklung von Reparaturkonzepten	ICT	X				X	X	
AP9.2	Entwicklung und Nachweis von Recyclingkonzepten	ICT	X		X		X	X	
AP9.3	Projektbegleitende LCA	ICT	X		X	X		X	

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

- [1] Offenlegungsschrift DE 199 13 994 A1, Anmelder: Menzolit-Fibron GmbH, Anmeldetag: 30.03.99.
- [2] European Patent Application EP 1 816 178 A1, Anmelder: Polynt GmbH & Co. Kg, Anmeldetag: 01.02.06.
- [3] European Patent Specification EP 2 046 859 B1, Anmelder: Polynt S.P.A., Bio-Composites And More GmbH, Anmeldetag: 27.07.07.
- [4] United States Patent 5,104,604, Anmelder: Dexter Electronic Materials Div. of Dexter Corp., Anmeldetag: 28.09.90.
- [5] Patent Abstracts of Japan, 02235919 A, Anmelder: Sumitomo Chem Co Ltd, Anmeldetag: 08.03.89.
- [6] Patent Abstracts of Japan, 58191723 A, Anmelder: Dainippon Ink & Chem Inc, Anmeldetag: 04.05.82.
- [7] Patent Abstracts of Japan, 2002012649 A, Anmelder: Matsushita Electric Works Ltd, Anmeldetag: 28.06.00.
- [10] Korean Patent Abstracts, 1020100075790 A, Anmelder: Jeonju Machinery Research Center, Hanguk Mold Co Ltd, Anmeldetag: 26.05.10.
- [11] Korean Patent Abstracts, 1020190044344 A, Anmelder: Hangukmold Kimje, Anmeldetag: 20.10.17.

Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

- [1] FETTE, M.; WULFSBERG, J; HERRMANN, A.; STOESS, N.; RADEMACKER, T.; WITTE, T.: Hybride Faserverbundwerkstoffe mit Kohlenstofffaserzyklaten für Luftfahrtanwendungen. In: ZWF (Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb), Jahrg. 109 (2014) Nr. 9, Carl Hanser, München, S. 663 – 668, 2014.
- [2] STOESS, N.; FETTE, M.; SCHOKE, B.: New flame-retardant SMC for Aerospace Applications. In: Proceedings of the 15th European Meeting on Flame Retardancy and Protection of Materials (FRPM) 2015, BAM, Berlin, 2015.
- [3] KAYSSER T. S., KEUN C. A., STEFFEN S., KÜRSTEN J., SCHUG B., GORNTER F.: Innovative translucent Epoxy-SMC for Applications with flame retardant Properties, SAMPE EU 2022 Conference Proceedings, ISBN/EAN: 978-90-829101-7-9
- [4] KAYSSER S., KEUN C. A., RITSCHEL M., STEFFEN S., KÜRSTEN J., SCHUG B., GORTNER F.: Development of translucent and flame retardant Epoxy-SMC for Aircraft Cabin Applications, SAMPE US 2023 Conference Proceedings, ISBN: 9781713874874
- [5] LECHLEITNER A., SCHWABL D., SCHUBERT T., BAUER M., LEHNER M.: Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. In: Österreichisches Wasser- und Abfallwirtschaft, 72, 47–60, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00628-w>
- [6] KOSLOSKI-OH S. C., WOOD Z. A., MANJARREZ Y., DE LOS RIOS J. P., FIESER M. E.: Catalytic methods for chemical recycling of commercial polymers. In: Materials Horizons, 8, 1084–1129, 2021. <https://doi.org/10.1039/D0MH01286F>
- [7] THIYAGARAJAN S., MAASKANT-REILINK E., EWING T. A., JULSING M. K., VAN HAVEREN J.: Back-to-monomer recycling of polycondensation polymers: opportunities for chemicals and enzymes. In: RSC Advances, 12, 947–970, 2022. <https://doi.org/10.1039/D1RA08217E>
- [8] MCNEELEY A., LIU Y. A.: Assessment of nylon-6 depolymerization for circular economy: Kinetic modeling, purification, sustainable process design, and industrial practice. In: Industrial and Engineering Chemistry Research, 63, 40, 16953–16989, 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01975>

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

GreenIng berichtete dem assoziierten Projektpartner Kärcher in regelmäßigen Abständen über den aktuellen Stand im Bereich der Batteriemodulentwicklung und untersuchte dazu den Einsatz der Batteriemodule in kommunalen Arbeitsmaschinen. Hiermit konnten ergänzende Anforderungen aus weiteren Anwendungsfällen gewonnen werden.

2. Eingehende Darstellung

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

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Arbeitspaket 1 – Projektmanagement

Um eine regelmäßige Kommunikation im Projekt zu gewährleisten, wurde ein monatlicher Regeltermin durchgeführt, an dem die Projektpartner aktuelle Fragestellungen diskutierten, gemeinsam nächste Schritte koordinierten und die Partner über den aktuellen Fortschritt in den Arbeitspaketen informierten.

Darüber hinaus haben mehrere Konsortial- und Arbeitstreffen stattgefunden:

- November 2022 Kick-Off Meeting bei Magirus in Ulm: Projektkoordination und Abstimmung des Lastenhefts
- Juni 2023 beim IKT in Stuttgart: Präsentation der Zwischenergebnisse
- Februar 2024 beim ICT in Pfnitztal: Präsentation der Zwischenergebnisse
- Oktober 2024 Treffen von GreenIng und CompriseTec bei Magirus: Einbau der ersten Demonstratorbatterie ins Fahrzeug.
- Dezember 2024 virtuell Projekttreffen: Präsentation der Zwischenergebnisse
- September 2025 bei Magirus in Ulm: Abschlusstreffen des Projektes

Zusätzlich zu den Projekttreffen wurden im Rahmen des Projektmanagements verschiedene Maßnahmen zur Dissemination des Projektes und der erzielten Ergebnisse von CT durchgeführt:

Zu Projektbeginn erfolgte eine Projektvorstellung im Rahmen der Onlineveranstaltung „Innovation Forum Thermoplastic Pultrusion“ von Composite United am 26.9.2022.

Im November 2022 wurde das Projekt auf der SAMPE (Society for Advanced Materials and Process Engineering) Europe Konferenz 2022 in Hamburg durch CT gemeinsam mit den Projektpartnern ICT und IKT mit dem Titel: „Functionalization of insitu pultruded parts to enable sustainable lightweight design - insight into the joint R&D projects of Comprisetec, IKT Stuttgart and Fraunhofer ICT“ vorgestellt.

Ein erstes von CT hergestelltes Demonstratorbauteil (Bedrucktes Pultrudat – vgl. Abschnitt zu AP4) wurde am Stand des Fraunhofer ICT auf der JEC World 2024 ausgestellt und gemeinsam einem interessierten Fachpublikum präsentiert.

Außerdem wurde der Vortrag „Functionalization of thermoplastic in-situ pultruded profiles as an enabler for innovative applications in mobility, marine and infrastructure“ sowohl bei SAMPE Deutschland in Karlsruhe im April 2024 und bei der „GreenMap“-Konferenz in Stettin, Polen, im Mai 2024 vorgestellt.

Gemeinsam mit den Projektpartnern ICT und IKT veröffentlichte CT im Juli 2024 den Artikel „Modularer Batteriebaukasten für ein Feuerwehrfahrzeug“ in der Fachzeitschrift „Kunststoffe“, indem diverse Projektergebnisse zum Funktionalisieren der in-situ Pultrudate publiziert wurden.

Arbeitspaket 2 – Konzeptionierung und Konstruktion des modularen Baukastensystems

Im Rahmen des AP2 erfolgte die Konzeptionierung und Entwicklung des modularen Batteriebaukastensystems. Die Entwicklung erfolgte anhand der definierten Anforderungen, welche sich aus der Anwendung von Magirus ergaben. Die Ausarbeitung des Batteriesystems mit den zwei zentralen Komponenten Batteriemodule und -kasten erfolgte durch die Partner GreenIng und CompriseTec im kontinuierlichen Austausch, bei klarer Definition der technischen Schnittstellen.

Die Ausarbeitung des Lastenhefts für das Batteriegesamtsystem (AP 2.1) sowie des zugehörigen Batteriebaukastensystems erfolgten vornehmlich basierend auf den Anforderungen, die durch den Endanwender Magirus vorgegeben wurden. Darüber hinaus wurde vor dem Hintergrund anderer

Anwendungen eine grundsätzliche Übertragbarkeit durch den modularen Ansatz des Batteriesystems berücksichtigt.

Ausgehend von dem Magirus 7,5 t Löschfahrzeug wurden zunächst die zentralen Anforderungen ermittelt. Magirus baut dieses Löschfahrzeug auf einem elektrisch angetriebenen Chassis von IVECO, einem E-Daily, auf. Aus diesem Grund ist es nicht möglich die feuerwehrtechnischen Funktionen, wie z.B. die Kreiselpumpe für den Auswurf von Löschmittel über die Traktionsbatterie des Fahrzeugs zu betreiben. Aufgrund dessen müssen alle feuerwehrspezifischen Magirus-Aufbauten über eine zusätzliche Batterie versorgt werden, wobei die Anforderungen an die feuerwehrspezifischen Funktionalitäten durch entsprechende Normen spezifiziert sind. Im Fall der Kreiselpumpe wird ein 4-stündiger Betrieb gefordert, woraus eine Batteriekapazität von 140 kWh resultiert. Auf Basis dieser Rahmenbedingung würde sich ein Batteriesystemgewicht von ca. 1.000 kg ergeben, wodurch in Kombination mit dem Fahrzeugleergewicht die Nutzlast für feuerwehrtechnische Ausrüstung signifikant reduziert würde. Da jedoch effizientere Verbraucher, die direkt elektrisch angetrieben werden könnten, normativ nicht zulässig sind, ergab sich der Leichtbau des Batteriekastens sowie der Fahrzeuganbindung als zentrales Ziel.

Ausgehend von dieser benötigten Kapazität, den realisierbaren Energiedichten und dem Gesamtgewicht wurden gemeinsam verfügbare Bauräume zwischen den Achsen sowie im Fahrzeugrahmen hinter der Hinterachse identifiziert. Die Positionierung der Gewichte nah am Fahrzeugchassis und so niedrig wie möglich versprechen aus fahrdynamischen Überlegungen Vorteile. Abbildung 1 stellt die Bauraumanalyse für die seitlich anzubringenden Batteriemodule für das zunächst vorgesehene Fahrzeug Iveco Daily dar.

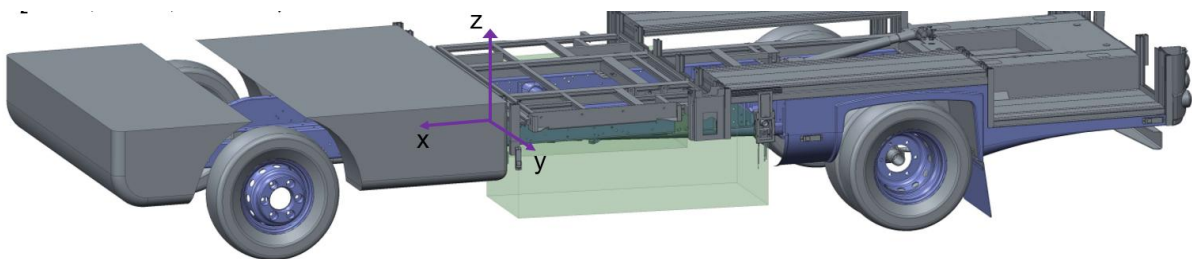


Abbildung 1: Initiale Bauraumanalyse auf Basis des Fahrzeugs Iveco Daily und vorhandener Einbauten

Allgemein müssen für die Fahrzeugintegration der Batteriekomponenten die Anforderungen der ECE-100 Rev. 3 berücksichtigt werden. In Abbildung 2 sind die zentralen mechanischen Anforderungen an das Batteriesystem zusammengefasst. Darüber hinaus müssen weitere spezifische Anforderungen erfüllt werden, wie die Dämpfung von elektromagnetischen Felder und, dass weder Wasser oder Schmutz in das Batteriesystem eintreten noch Elektrolyte austreten dürfen. Die Dichtigkeit gegen Wassereintritt ist vor dem Hintergrund der verfügbaren Einbaupositionen im Kontext von Feuerwehrfahrzeugen von besonderer Relevanz, da diese wafähig nach Klasse H3 sein müssen, was eine strengere Anforderung als die allgemeinen Dichtigkeitsanforderungen darstellt.

Neben den fahrzeug- bzw. feuerwehrspezifischen Anforderungen wurden insbesondere auch die Modularität und Skalierbarkeit sowie die Recyclingfähigkeit, die Reparierbarkeit und die Ergonomie in das Lastenheft aufgenommen. Beispielsweise bedingt die geforderte Reparierbarkeit eine zerstörungsfreie Demontage der Module.

Die Konzeptionierung und Entwicklung des Batteriemodul-Baukastens (AP2.2, 2.4-2.6) sowie der notwendigen elektrischen Anschlüsse sowie der Steuerungselektronik erfolgte durch den Projektpartner GreenIng.

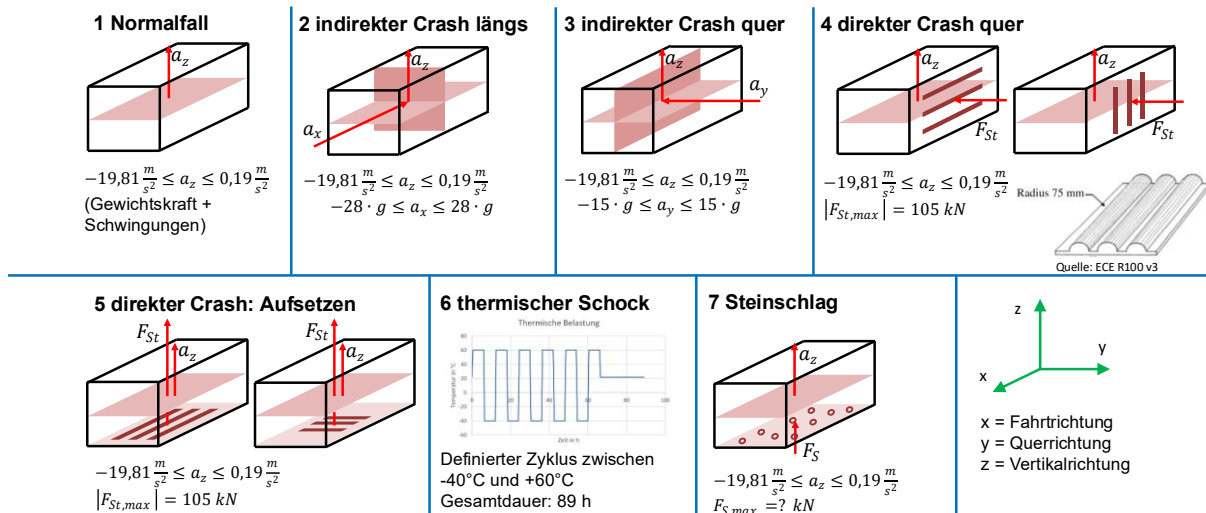


Abbildung 2: Darstellung der zentralen Lastfälle für das Batteriesystem für die Anwendung im Feuerwehrfahrzeug

GreenIng erarbeitet dazu im Rahmen des Projekts ein in alle Raumrichtungen skalierbares Batteriemodulkonzept, welches sich flexibel in unterschiedlichste Bauräume integrieren lässt. Zum Einsatz kommen prismatische Zellen in den Kapazitäten von 50 Ah bis 314 Ah. Durch deren Einsatz wird die Skalierung der Kantenlängen erreicht. Die Modulgehäuseteile sind standardisiert und können individuell für die jeweilige Modulkonfiguration mit wenig Aufwand abgeleitet werden. Dies ermöglicht eine kostengünstige Anpassung des Moduls an unterschiedlichste Fahrzeugbauräume. Eine weitere Besonderheit des von GreenIng entwickelten Batteriemoduls (GreenIng Standard Batteriemodul, kurz GSB) ist die hohe mechanische Festigkeit, womit das Stapeln der Batteriemodule möglich ist. Je nach Batteriegröße werden mehrere dieser Batteriemodule zu einem Batteriesystem kontaktiert. Dabei tragen die Modulgehäuseteile die mechanischen Lasten, sodass die Anforderungen an das Gesamtbatteriesystemgehäuse bzgl. Tragfähigkeit deutlich reduziert sind. Das umschließende Gesamtbatteriegehäuse schützt lediglich vor direktem Berühren von spannungsführenden Teilen sowie dem Eindringen von Feuchtigkeit und stellt die Schnittstellen für die Montage im Fahrzeug sowie die elektrischen Anschlüsse dar.

Auf Basis des GSB konnte die Batterie für das Magirus-Löschfahrzeug und das Batteriesystemgehäuse untersucht werden, wobei in regelmäßigen Abständen die relevanten Schnittstellen abgestimmt und falls notwendig angepasst wurden. Auf Basis von Weiterentwicklungen des Batteriemodulsystems und insbesondere hinsichtlich der Demontierbarkeit durch den Partner GreenIng entfiel die Notwendigkeit für eine tapebasierte Fixierung der Batteriezellen in einem Batteriemodul.

Auf Basis des ausgearbeiteten Lastenhefts für das modulare Batteriesystem hat CompriseTec (CT) ein umfassendes, modulares Batteriekastensystem auf Grundlage von Pultrusionsprofilen erarbeitet. Abbildung 3 fasst die zentralen Konzeptionierungsschritte, die systematisch nacheinander durchlaufen wurden, zusammen. Insbesondere bei der Definition der Pultrusionsprofile als kleinste sich wiederholende Einheit fand eine enge fertigungstechnische Abstimmung zwischen den Partnern ICT und CT statt. Für weitere Details sei hier auf die Erläuterung zu AP 3 verwiesen.

Aufbauend auf einer umfassenden Analyse dieser Grundfunktionen wurde ein morphologischer Kasten als möglicher Lösungsraum für die einzelnen Funktionen erarbeitet. Basierend auf dem morphologischen Kasten wurden zwei Konzeptvarianten entwickelt, von denen nach Bewertung technischer Kriterien eines weiterverfolgt und ausgearbeitet, bzw. optimiert wurde.

Die Entwicklung des Batteriekastengehäuses erfolgte unter Berücksichtigung der vorgesehenen Einbauposition des Batteriesystems am Chassis des Iveco E-Daily (vergleiche Abbildung 4). Das vorgesehene System ermöglicht die Unterbringung von bis zu 36 Batteriemodulen, die die geforderte Kapazität von 140 kWh im vorgegebenen Raum bereitstellen können. Zusätzlich wird jedoch noch Raum für das Batteriemanagementsystem benötigt, das den Energiefluss regelt und im Heckbereich in einem eigenen Gehäuse untergebracht werden kann. Diese Konfiguration stellt aufgrund der Größe,

bzw. dem Gewicht und der Positionierung nah der Fahrbahn, die technisch anspruchsvollste Variante dar. Dies galt insbesondere auch für die Dimensionierung der Fahrzeuganbindung.

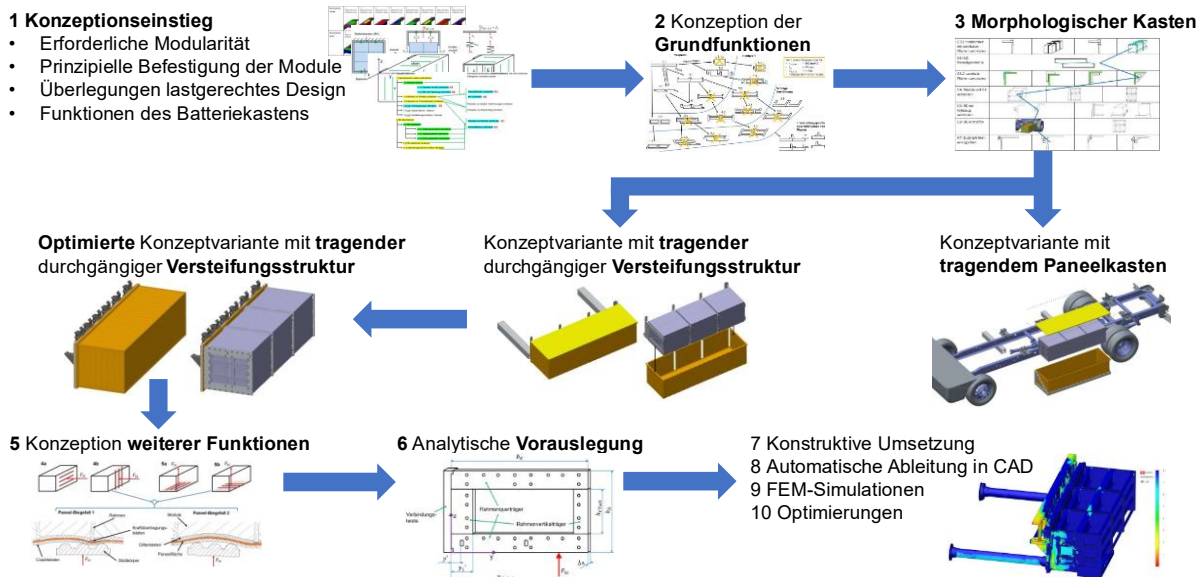


Abbildung 3: Ablauf der Konzeptionierung des modularen Batteriekastens

Das entwickelte modulare Batteriekastensystem basiert auf einer zweigeteilten Bauweise. Diese umfasst die sogenannte Anbindungsseite, vgl. Abbildung 5, und die Paneelhülle, vgl. Abbildung 6. Die Anbindungsseite ist so konzipiert, dass an dieser innenliegend die Batteriemodule über Verbindungsleisten befestigt und auch alle Energie-, Medien- und Informationsschnittstellen durchgeführt werden. Fahrzeugseitig sind modular dimensionier- und positionierbare Elemente zur Befestigung des Batteriekastens vorgesehen. Die Fläche, die aus einer Kombination aus Pultrusionsprofilen und Aluminiumelementen besteht, wird umlaufend mit einer Struktur zur Befestigung der Paneelhülle ausgeführt.

Aufgrund des hohen Batteriegewichts und den limitierten Anbindungspunkten am Chassis des Iveco Daily, bzw. des Iveco E-Daily, werden zusätzlich zwei GFK-Querträger benötigt, die die beidseitig angebrachten Batteriekästen gegeneinander abstützen, um die entstehenden Biegebelastungen zu reduzieren.

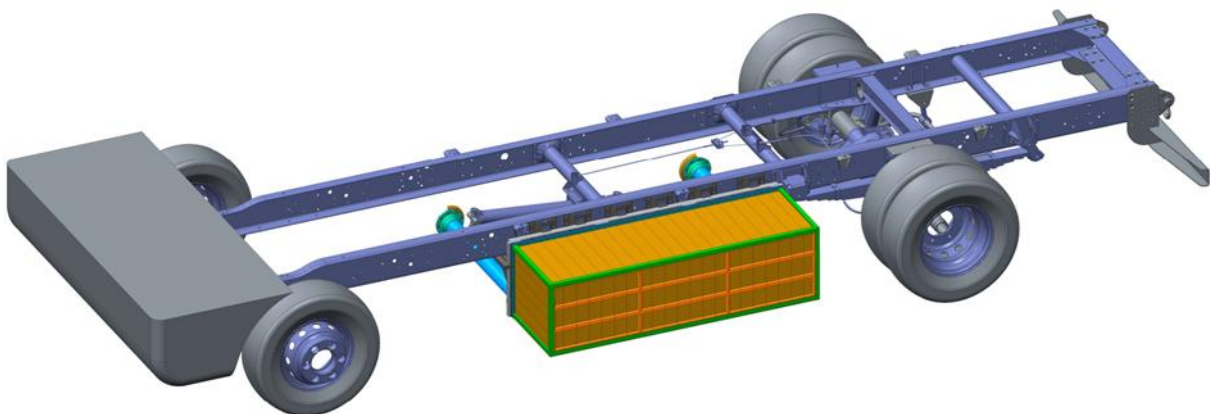


Abbildung 4: Positionierung eines Batteriekastens am Chassis des Iveco Daily

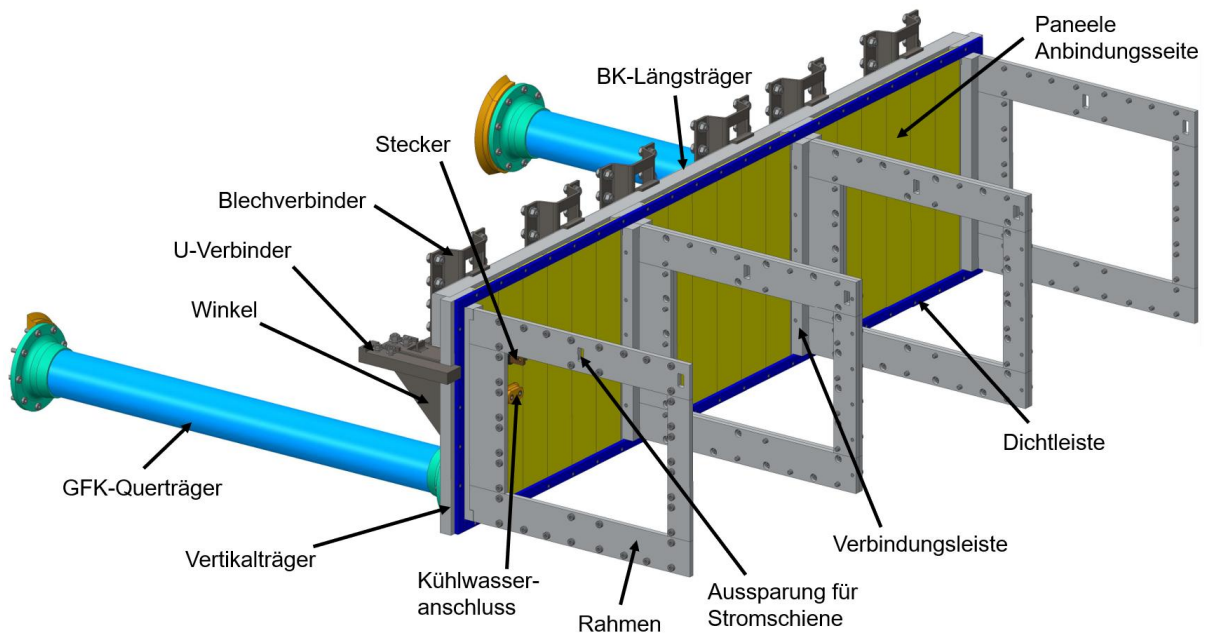


Abbildung 5: Anbindungsseite des Batteriekastens

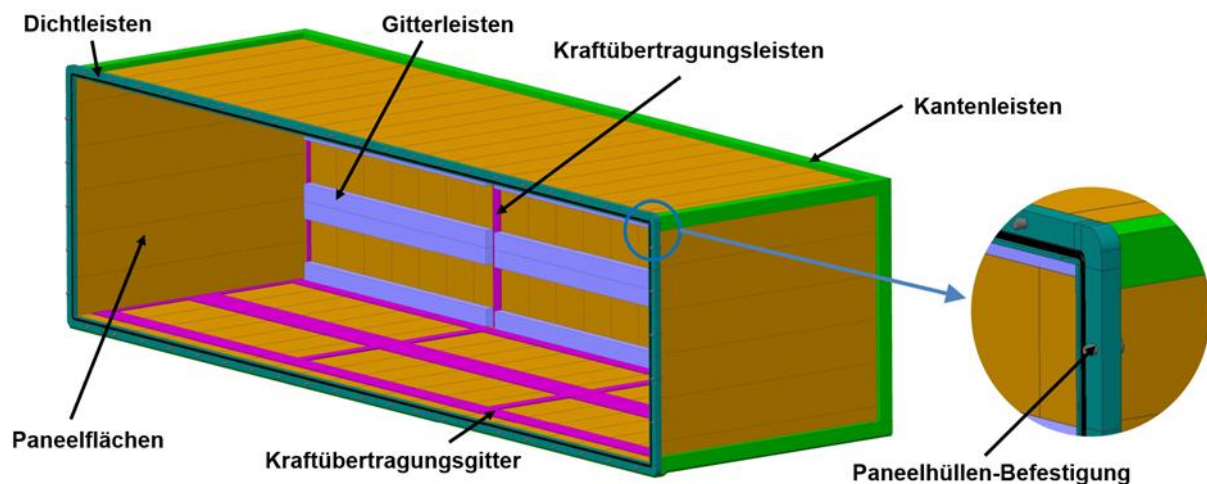


Abbildung 6: Batteriekastenkörper

Die Paneelhülle (vergleiche Abbildung 6) ist aus fünf Seitenwänden aus gefügten pultrudierten Profilen aufgebaut, wobei die Seitenwände über Kantenleisten miteinander gefügt werden. Darüber hinaus ist die Integration von gedruckten Strukturen zur Darstellung von Kraftübertragungsleisten vorgesehen, die im Crashfall dafür sorgen, dass die Verformungen des Kastens minimiert werden und die Lasten in die tragfähigen Bereiche der Batteriemodule eingeleitet werden. Des Weiteren ist eine umlaufende Leiste mit integrierter Dichtung zur Befestigung der Paneelhülle an der Anbindungsseite vorgesehen. Zusätzlich ist die Montage eines Opferblechs zum Schutz vor Steinschlag, siehe Abbildung 7, möglich.

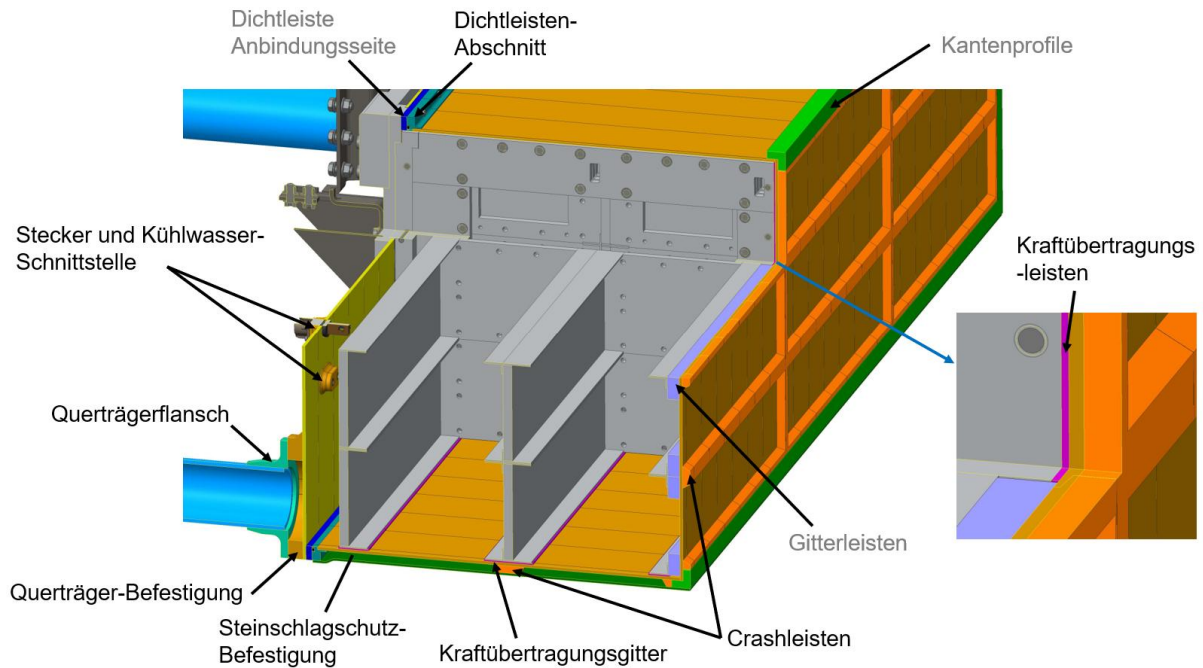


Abbildung 7: Querschnitt durch das montierte Batteriemodul

Im konkret betrachteten Fall für den Iveco Daily ergibt sich für den Batteriekasten, inklusive notwendiges Anbindungsstrukturen eine Masse pro Batteriekasten von etwa 116 kg, wobei rund zwei Drittel auf die Fahrzeuganbindung und ein etwa ein Drittel auf den tatsächlichen Batteriekasten entfallen. Im Vergleich zum Gewicht der verbauten Batteriemodule von 506 kg trägt der Batteriekasten etwa 20 % zum Systemgewicht der Batterie bei. Die Aufschlüsselung der Gewichte des Batteriekastens in Abbildung 8 verdeutlicht, dass insbesondere die Fahrzeuganbindung als Gewichtstreiber angesehen werden muss. Auf eine weitere Optimierung der Anbindungskomponenten wird jedoch vor dem Hintergrund der Modularität des Baukastensystems verzichtet, insbesondere da eine fahrzeugspezifische Anpassung auf den jeweiligen Bauraum notwendig ist. So würde die fahrzeugseitige Entfernung von Störkonturen eine gewichtsoptimierte Bauweise ermöglichen.

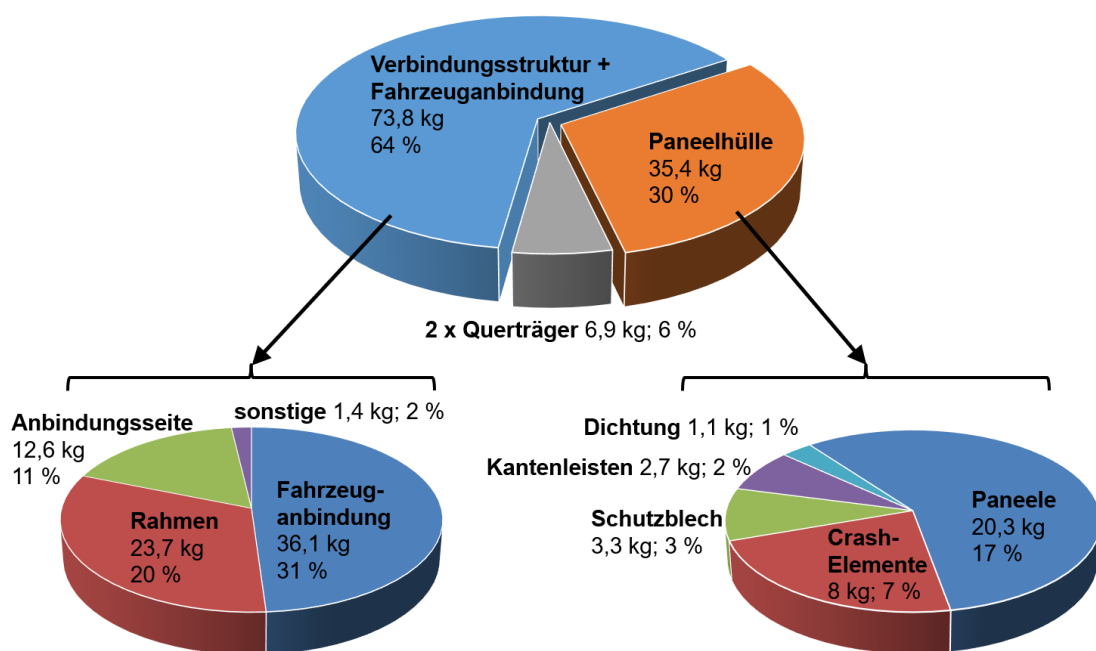


Abbildung 8: Aufschlüsselung des Systemgewichts für das Batteriesystem

Das entwickelte System ermöglicht die Schrittweise Montage und Demontage des Batteriesystems. In Abbildung 9 sind die einzelnen Schritte für die Montage des Batteriesystems am Fahrzeug dargestellt. Die hohe Flexibilität der Montage und Demontage stellt die Grundlage für eine gute Reparierbarkeit, im Sinne des in AP9 entwickelten Reparatur- und Recyclingkonzept dar.

Die vorgesehene Modularität wird durch die Aufteilung einer Anbindungsseite und der Paneelhülle sowie der Vielzahl von standardisierten Verbindungselementen realisiert: Blechverbinder, Winkel und Querträger ermöglichen eine flexible Anpassung an verschiedene Fahrzeugplattformen und Bauraumvorgaben. So lassen sich Batteriekästen in verschiedenen Konfigurationen, wie verschiedene Anbindungsseiten, wie in Abbildung 10 dargestellt, und mit variabler Modulanzahl, vgl. Abbildung 11, zusammenstellen, ohne das Grundprinzip zu verändern. Die Module selbst werden mit standardisierten Schienen und Befestigungen, bzw. über die im GSB vorgesehenen Verbindungsschnittstellen, sicher in den Kästen positioniert.

Darüber hinaus ermöglicht das System eine beliebige Vergrößerung des umschlossenen Raums, die die Unterbringung von zusätzlichen Komponenten, wie einem Batteriemanagementsystem ermöglichen. Abbildung 12 stellt mögliche Räume dar, die zusätzlich umschlossen werden können.

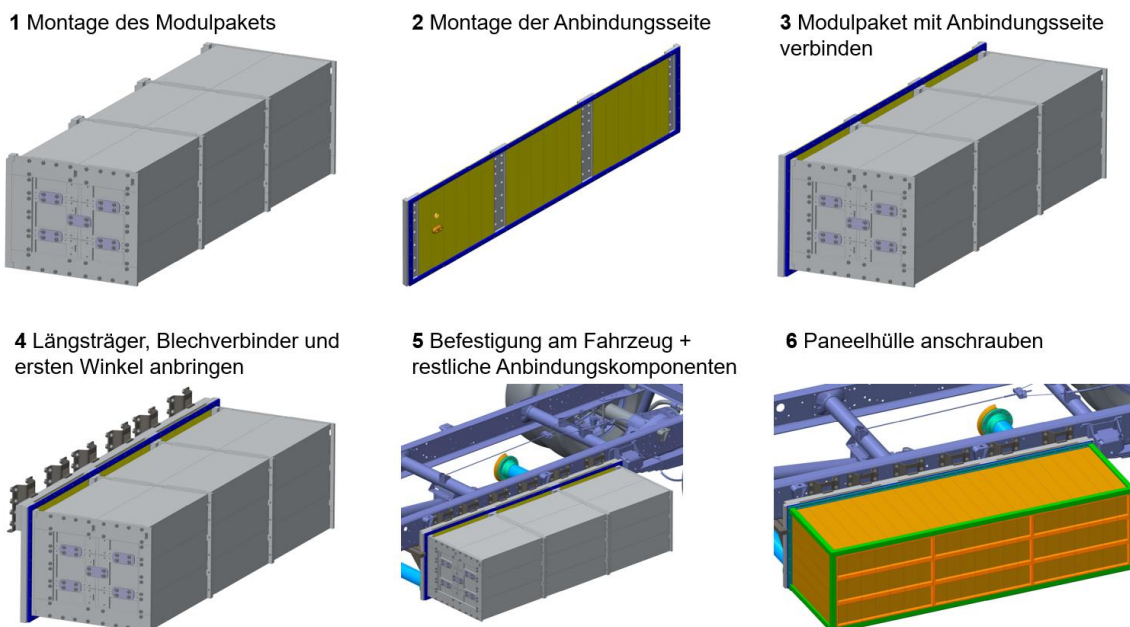


Abbildung 9: Prinzipieller Montageaufbau für den seitlich hängenden Batteriekasten

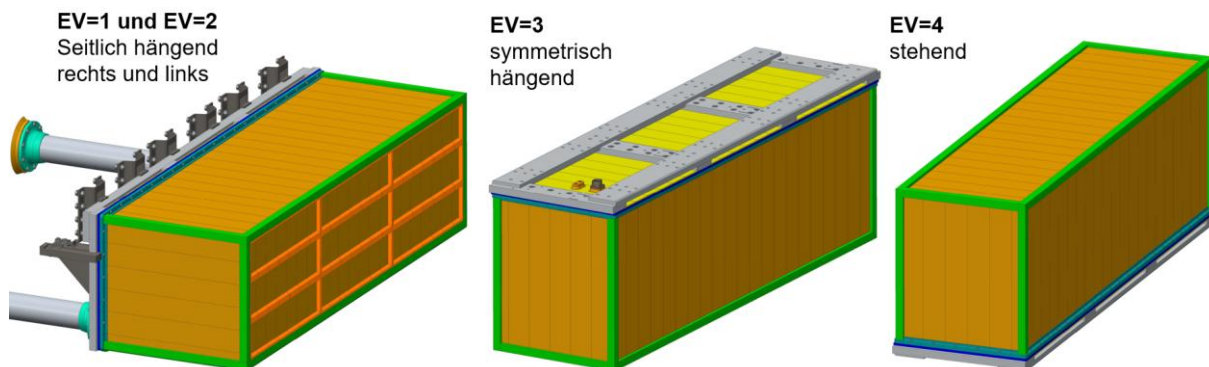


Abbildung 10: Darstellung der Modularität des Batteriekastensystems hinsichtlich der Montageseite zum Fahrzeug

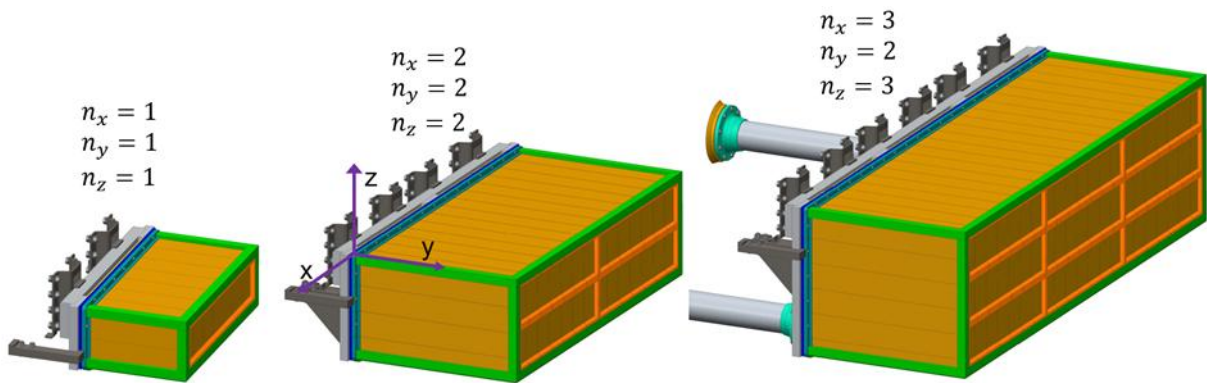


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung von Batteriekästen für mögliche Modulkonfigurationen

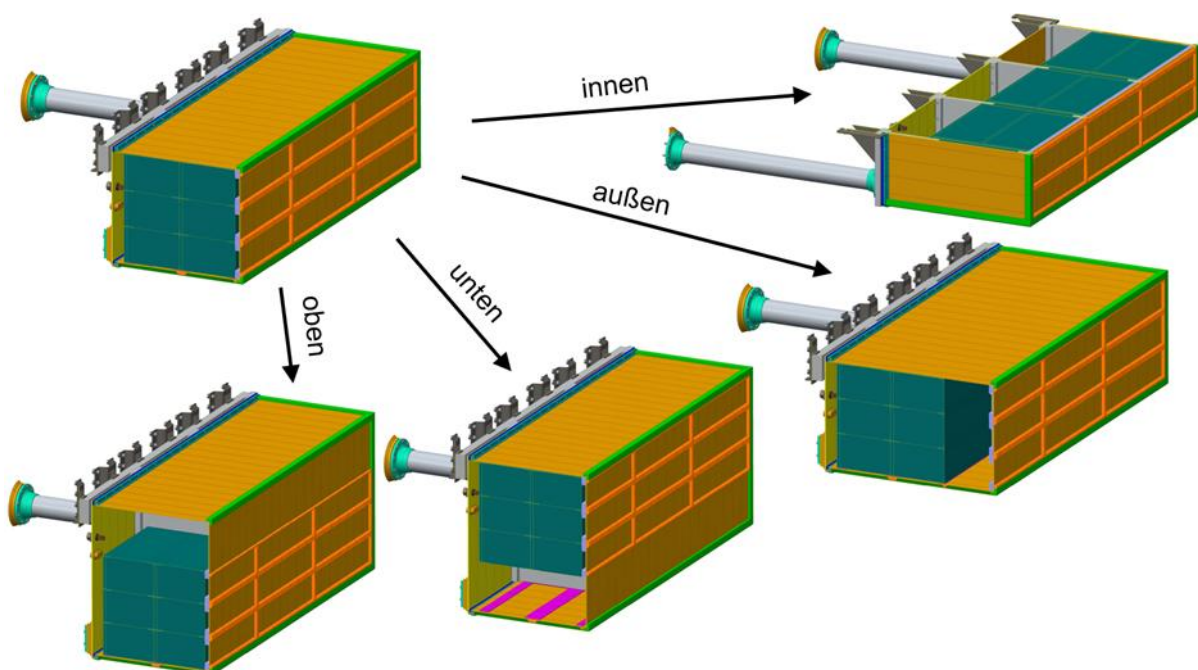


Abbildung 12: Exemplarische Darstellung zur Integration von zusätzlichen Bauräumen im Batteriekasten

Zusammenfassend erfüllt die entwickelte Bauweise des modularen Batteriekastensystems sämtliche gestellten Anforderungen hinsichtlich Lastaufnahme, Schutzfunktion und Modularität. Die integrierten Dichtungs- und Abschirmkonzepte bieten eine dauerhafte Abdichtung gegen Wasser, Schmutz und elektromagnetische Störungen. Die Bauweise ermöglicht einen einfachen Reparaturzugang und flexible Einbaumöglichkeiten in unterschiedlichen Fahrzeugtypen.

Arbeitspaket 3 – Prozessentwicklung der in-situ-Pultrusion

Ausgehend von der Batteriegehäusekonzeption ergeben sich diverse Anforderungen an den Pultrusionsprozess, bzw. die zu pultrudierenden Profile. Die Nutzung der in-situ Polymerisation, bei der das Lactam des ϵ -Caprolactam in einer aktivierten anionischen Ringöffnungspolymerisation zum thermoplastischen Polyamid-6 polymerisiert wird, bildet als Matrixmaterial des Verbundwerkstoffs die Grundlage für die modulare Bauweise, da die Profile aufgrund der thermoplastischen Matrix stofflich gefügt werden können. Zusätzliche Funktionen der Pultrudate, die durch den Einsatz in einem Batteriegehäuse erforderlich werden, sind insbesondere die Integration der EMV-Abschirmung (Elektromagnetische Verträglichkeit) in die Profile sowie die Integration eines geeigneten Flammshutzes in das Polyamid.

Um zunächst das Caprolactam mit dem Katalysator und dem Aktivator optimal auf den Prozess abzustimmen und um so einen robusten Prozess zu erhalten, muss ein geeignetes Verhältnis von Aktivator zu Katalysator sowie die finale Konzentration der Reaktivkomponenten ermittelt werden. Dazu wurden semi-adiabatische Becherversuche durchgeführt.

Die semi-adiabatischen Becherversuche wurden mit einer Niederdruck-Gießanlage durchgeführt. Hierbei wird Caprolactam mit Aktivator (HDCL) in einem und Caprolactam mit Katalysator (NaCl) in einem zweiten, öl-ummantelten Stahlbehälter aufgeschmolzen. Zur Minimierung der Feuchtigkeitsaufnahme werden die Behälter evakuiert und mit Stickstoff auf Normaldruck geflutet. Der Versuchsbecher liegt in einem Ölbad, das über eine Heizplatte temperiert wird. Die Bechertemperatur wird axial mithilfe eines Temperatursensors kontinuierlich überwacht. Die gemessene exotherme Temperaturentwicklung erlaubt Rückschlüsse auf den Umsetzungsgrad von Caprolactam. Für die Ermittlung des geeigneten Verhältnisses von Aktivator zu Katalysator wurde die Menge des Katalysators gegenüber der Menge des Aktivators kontinuierlich erhöht. Durch die Erhöhung des Katalysators steigt die Polymerisationsrate und die Reaktion wird beschleunigt. Eine zu hohe Konzentration von Katalysatormolekülen kann wiederum einen negativen Effekt auf die Eigenschaften des Polymers haben. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Verhältnisuntersuchungen. Die Polymerisationsrate nimmt mit der Erhöhung der Katalysatorkonzentration bis RV5 ($[A] : [K] = 1,0 : 2,0 \text{ M.-%}$) zu. Darüber hinaus ist bei einer zusätzlichen Erhöhung der Katalysatorkonzentration keine Zunahme der Polymerisationsrate zu erkennen. Demnach erzielt RV5 ($[A] : [K] = 1,0 : 2,0 \text{ M.-%}$) die maximale Polymerisationsrate, ohne dass ein höherer Katalysatoranteil nötig ist.

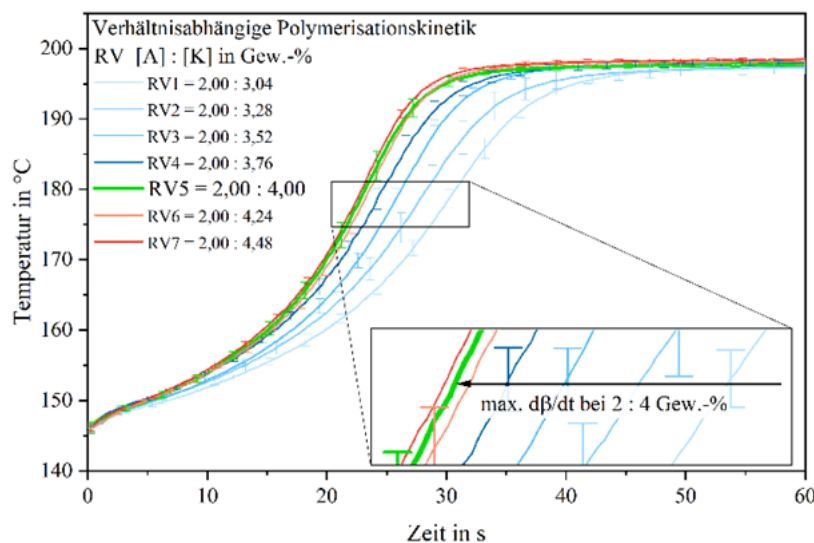


Abbildung 13: Darstellung der verhältnisabhängigen Reaktionskinetik

Die finale Formulierung für einen robusten und wirtschaftlichen Pultrusionsprozess wurde auf der Grundlage der ermittelten Verhältnisse untersucht. Die Ergebnisse der semi-adiabatischen Becherversuche sind in Abbildung 14 dargestellt. Durch die Erhöhung der Aktivator- und Katalysatorkonzentration steigt die Polymerisationsrate stark an. Zum Erreichen eines robusten und wirtschaftlichen Prozesses sind Abzugsgeschwindigkeiten von 1,0 m/min bis 2,0 m/min nötig. Somit ergeben sich Polymerisationszeiten von 36 s – 18 s. Diese Polymerisationsraten werden mit einem Aktivatorgehalt $> 2,75 \text{ M.-%}$ (R6-R9) erreicht.

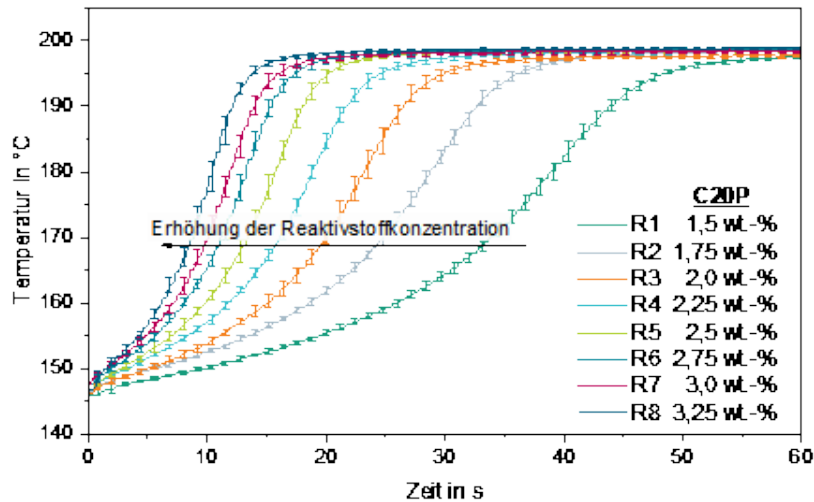


Abbildung 14: Darstellung der Formulierungsbestimmung auf Basis der Verhältnisbestimmung in Abbildung 13

Um das Matrixmaterial in Batteriegehäusen einsetzen zu können, ist eine Additivierung mit Flammenschutzmitteln erforderlich. Im Labormaßstab wurden zwölf potenzielle Flammenschutzmittel systematisch auf ihre Kompatibilität mit der reaktiven Caprolactamschmelze hinsichtlich des Polymerisationsverhalten geprüft. Darüber hinaus wurde der Massenanteil des Flammenschutzmittels variiert. Bei zwölf Systemen wurde unter dem Einfluss des Flammenschutzmittels eine unzureichende Polymerisationsreaktion beobachtet, in vier Systemen konnte eine ausreichende Polymerisation nachgewiesen werden. Für die weiteren Untersuchungen wurden zwei Flammenschutzmittel (Rabitle FP 110, Flamestab NOR 116 gemörsert) selektiert. Der Einfluss auf die Polymerisationsgeschwindigkeit wurde zunächst in semi-adiabatischen Becherversuchen untersucht. Da die Polymerisationsgeschwindigkeit für den Pultrusionsprozess entscheidend ist, kann eine durch Flammenschutzmittel stark verzögerte Polymerisation die Prozessqualität verringern oder zum Prozessabbruch führen. Ziel der Untersuchungen war es die geeigneten absoluten Konzentrationen von Flammenschutzmitteln für den Pultrusionsprozess zu ermitteln.

Der Einfluss des Flammenschutzmittels Rabitle FP 110, der Firma Fushimi, Kagawa, Japan, auf die Polymerisationskinetik ist in Abbildung 15 (links) dargestellt. Mit zunehmendem Anteil vom Flammenschutzmittel in der Matrix nimmt die Polymerisationsgeschwindigkeit ab. Zurückzuführen ist dies auf den reduzierten Anteil an Reaktivkomponenten beim Erhöhen des Anteils von Flammenschutzmittels. Für den Pultrusionsprozess bedeutet dies, dass zur Sicherstellung einer vollständigen Reaktion innerhalb des Werkzeugs die Konzentration der reaktiven Komponenten entsprechend erhöht werden muss.

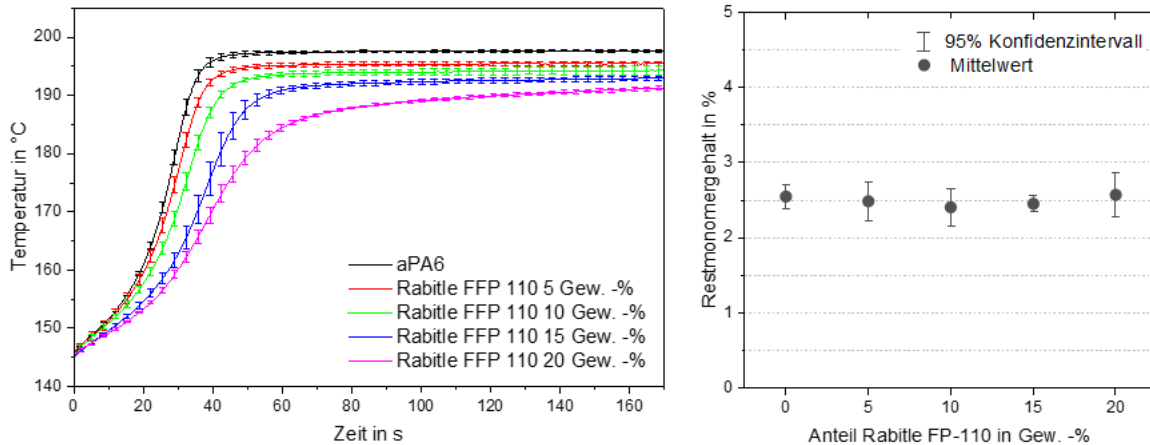


Abbildung 15: Ergebnisse der semi-adiabatischen Becherversuche. Einfluss des Flammenschutzmittels Rabitle FP 110 auf die Polymerisationsgeschwindigkeit (links) und den Einfluss auf den Restmonomergehalt (rechts)

Der Einfluss von Rabitle FP 110 auf den Restmonomergehalt ist in Abbildung 15 (rechts) dargestellt. Die Bestimmung des Restcaprolactams erfolgte mittels Hochleistungsflüssigkeits-chromatographie (HPLC) an den Proben aus den semi-adiabatischen Becherversuchen. Dabei ließ sich kein signifikanter Einfluss des Flammenschutzmittels auf den Restmonomergehalt erkennen.

Aufgrund der Probengeometrie der semi-adiabatischen Becherversuche ist eine Untersuchung des Brandverhaltens sowie der mechanischen Eigenschaften mit Flammenschutzmittel nicht möglich. Daher wurden Pultrusionsversuche mit entsprechenden Rezepturen des Flammenschutzmittels durchgeführt. Die GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff) aPA6-Pultrusionsprofile mit einem Querschnitt von $20 \times 2 \text{ mm}^2$ wurden auf einer industriellen Pultrusionsanlage hergestellt. Die Matrix wurde mit einer Niederdruck Gießanlage verarbeitet. Der Faservolumengehalt betrug 68,7 Vol.-%. Der Flammschutzanteil wurde von 0 bis 25 M.-% in Schritten von je 5 M.-% erhöht. Im Anschluss wurde der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, als auch auf das Brandverhalten untersucht. Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften wurden drei Punkt Biegeversuche (in Faserrichtung) in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 14125 durchgeführt. Zur Messung der axialen Scherfestigkeit zwischen Faser und Matrix wurden Shear Edge Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Mechanische Charakterisierung der unterschiedlichen aPA6-GF Pultrusionsprofile

M.-% Anteil Flammenschutzmittel Rabitle FP 110	Biegefestigkeit σ in MPa	Axiale Scherfestigkeit in MPa
0	1337.7 ± 12.5	61.7 ± 4.5
5	1273.9 ± 94.3	57.1 ± 2.9
10	1290.0 ± 65.8	52.4 ± 4.0
15	1243.8 ± 84.8	48.8 ± 2.9
20	1278.8 ± 46.1	40.9 ± 3.9
25	1234.8 ± 80.1	38.5 ± 2.9

Mit zunehmendem Anteil an Flammenschutzmittel verringert sich die Scherfestigkeit der GF aPA6 Prüfkörper. Das Flammenschutzmittel lagert sich zwischen den Polyamidketten ab und schwächt dadurch intermolekulare Wechselwirkungen (z. B. Amidbindungen), was zu einer Verringerung der mechanischen Kennwerte führt. Wegen des hohen Fasergehalts von 68,7 Vol.-% ist der Effekt auf die faserdominierten Biegeeigenschaften nur gering ausgeprägt.

Um den Einfluss des Flammschutzmittels auf die Qualität der Bauteile zu bewerten, wurden Restmonomeruntersuchungen durchgeführt. Mit steigender Konzentration des Flammschutzmittels nimmt der Restmonomergehalt nur geringfügig zu und ist gleichzeitig durch eine geringe Standardabweichung der Messungen gekennzeichnet. Somit lassen sich die Ergebnisse der Restmonomeruntersuchungen der semi-adiabatischen Becherversuche bestätigen.

Zur Untersuchung des Einflusses des Flammschutzmittels auf das Brandverhalten wird der UL 94 Test durchgeführt. Das Verfahren umfasst die Prüfung von vorkonditionierten Proben, welche zweimal für je 10 Sekunden einer standardisierten Flamme ausgesetzt werden. Es wird die Nachbrennzeit nach der ersten Anwendung und die Nachbrenn- sowie Nachglühzeiten nach der zweiten Anwendung aufgezeichnet. Zudem wird festgehalten, ob brennendes Material tropft und ob diese Tropfen einen Baumwollindikator entzünden. Darüber hinaus wird die gesamte Flammenzeit für eine Probenreihe aufgenommen. Bei den UL94 Tests wurde eine starke Korrelation zwischen der Aufnahme von Wasser während der Konditionierung und des Erreichens der V-0-Klassifizierung beobachtet (siehe Tabelle 3). Nach dem Trocknen (0 Tage Konditionierung) brannten alle Proben vollständig bis zur Klemme. Es konnte keine Klassifizierung erreicht werden. Für die Proben mit 0 M.-%, 5 M.-%, 10 M.-% und 15 M.-% Rabitle FP 110 betrug die Nachbrennzeit mehr als 60 s, während Proben mit 25 M.-% Rabitle FP 110 Nachbrennzeiten von 46 s bzw. 48 s zeigten. Nach der Konditionierung von 7, 10, 13, 18 Tagen, welche bei 23 °C und 50 % relativer Feuchte durchgeführt wurde, konnte bei der Probe mit 25 M.-% Rabitle FP 110 eine V-0-Klassifizierung erreicht werden. Proben mit 20 M.-% bzw. 15 M.-% zeigten über den gesamten Versuchszeitraum geringere Nachbrennzeiten. Demnach ist für die untersuchten Pultrusionsprofile mit einer Additivierung von 25 M.-% Rabitle FP 110 nach 7 Tagen Konditionierung bei Normklima eine UL94-V0 Einstufung erreichbar.

Tabelle 3: Darstellung der Nachbrennzeiten des UL94 Test an GFK aPA6 Prüfkörpern mit unterschiedlichem Anteil an Flammschutzmittel nach 0, 3, 7, 10, 13 und 18 Tagen Konditionierung

M.-%	Nr	0 Tage	3 Tage	7 Tage	10 Tage	13 Tage	18 Tage
		UL94 t ₁ / t ₂ / s	UL94 t ₁ / t ₂ / s	UL94 t ₁ / t ₂ / s	UL94 t ₁ / t ₂ / s	UL94 t ₁ / t ₂ / s	UL94 t ₁ / t ₂ / s
0	1	n.c. >60 / -	n.c. >60 / -	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60
	2	n.c. >60 / -	n.c. >60 / -	n.c. >60 / -	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60
5	1	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60
	2	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60
10	1	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60
	2	n.c. >60 / -	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60
15	1	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / 55	n.c. 0 / 49
	2	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / 43	n.c. 0 / >60
20	1	n.c. 0 / 58	n.c. 0 / 50	n.c. 0 / 45	n.c. 0 / 37	n.c. 0 / 43	n.c. 0 / 45
	2	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / >60	n.c. 0 / 47	n.c. 0 / 58	n.c. 0 / 41	n.c. 0 / 44
25	1	n.c. 0 / 46	n.c. 0 / 33	V-0 0 / 0	V-0 0 / 0	V-0 0 / 0.5	V-0 0 / 0
	2	n.c. 0 / 48	n.c. 0 / 31	V-0 0 / 0	V-0 0 / 0	V-0 0 / 0.5	V-0 0 / 4

Für das Batteriegehäuse werden Paneele eingesetzt, die aus einer glasfaserverstärkten Trägerstruktur mit einer Vlieslage aus recycelten Kohlenstofffasern bestehen. Kohlenstofffasern tragen zu einer Reduktion der Gesamtbrennbarkeit des Bauteils bei, da sie eine zusätzliche Barrierschicht gegenüber der Flammenausbreitung darstellen. Darüber hinaus weisen Kohlenstofffasern eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Glasfasern auf und können deshalb die beim Beflammen entstehende Wärme effizienter abführen. Somit kann durch das Einbringen der Kohlestofffaservliese bei den Demonstratorbauteilen eine flammhemmende Wirkung beobachtet werden.

Zur Erzielung der geforderten EMV-Eigenschaften und zur Verbesserung der Querkzugfestigkeit wurden Vlieslagen aus recycelten Kohlenstoffasern eingesetzt. Diese Vliese wurden am Sächsischen Textilforschungsinstitut (STFI) mittels Airlay- und Kardierverfahren in verschiedenen Flächengewichten gefertigt und anschließend im Pultrusionsprozess verarbeitet. Im Pultrusionsprozess gelangen Vliese und Rovings über Faser- und Vliesführungen durch eine Faservortrocknung in die Injektionskammer. In der Injektionskammer werden die Fasern und das Vlies mit dem Matrixmaterial im gewünschten Verhältnis zusammengeführt und die Fasern sowie das Vlies imprägniert. Im Werkzeug werden die Lagen auf Nenndicke konsolidiert und polymerisiert. Am Ausgang des Werkzeugs ist die Polymerisation des Matrixmaterials vollständig abgeschlossen (siehe Abbildung 16).

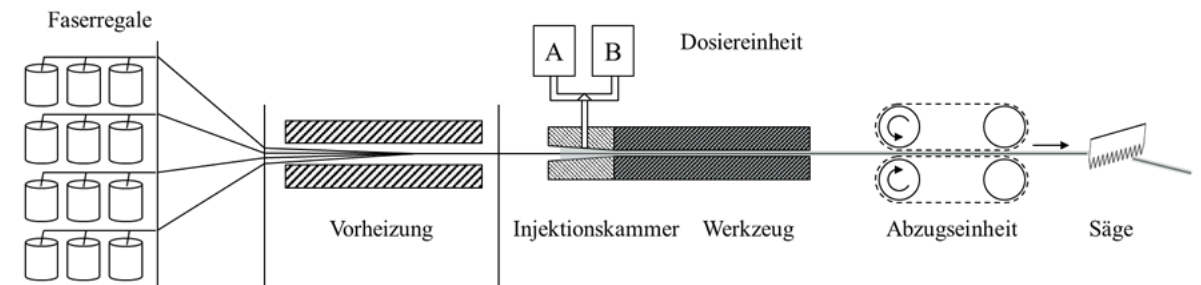


Abbildung 16: Darstellung des in-situ Pultrusionsprozess mit thermoplastischer Matrix nach Dissertation Wilhelm (siehe Tabelle 17)

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Kohlenstoffaservliese mit unterschiedlichen Flächengewichten und Herstellungsverfahren untersucht. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die untersuchten Vliese.

Tabelle 4: Untersuchte Vliesvarianten

Vliesbildung \ Flächengewicht	225 g/m ²	450 g/m ²	750 g/m ²
Airlay	○	○	
Kardieren	○	○	

○ Verarbeitung im Pultrusionsprozess möglich

Die Verarbeitung des 450 g/m² Airlay-Vlieses war aufgrund stark ausgeprägter Materialinhomogenitäten nur bedingt möglich, während die Verarbeitung des Airlay 225 g/m² Vlieses sowie der kardierten Vliese mit dem Flächengewicht von 450 g/m² und 225 g/m² prozesssicher möglich war. Während der Pultrusionsversuche zeigten sich Schwankungen in der Abzugskraft welche analog zu den zuvor gemessenen Flächengewichtsschwankungen der verwendeten Vliese verliefen. Des Weiteren kam es bei allen Versuchen zu einer vertikalen Faltung des Vlieses im Bauteil. Begründet werden kann dies durch die geringe Struktursteifigkeit des Vlieses. Es wurde beim Einziehen in das Pultrusionswerkzeug von den Rovings in vertikaler Richtung verschoben. Ein Unterschied zwischen den Flächengewichten war erkennbar, so war die Verschiebung bei geringen Flächengewichten stärker ausgeprägt als bei hohen.

Um zu untersuchen, ob die Vliese einen negativen Einfluss auf die Polymerisation haben, wurden HPLC-Messungen durchgeführt, welche den Restcaprolactamgehalt im Paneel bestimmten. Dieser lag bei allen untersuchten Proben unter einem M.-%. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Vliese keinen hinderlichen Einfluss auf die Polymerisation zeigen.

Der Einfluss der Vliese auf die mechanischen Eigenschaften in Querrichtung wurde mittels 3-Punkt-Biegeversuchen und Zugversuchen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Charakterisierungen können Abbildung 17 entnommen werden.

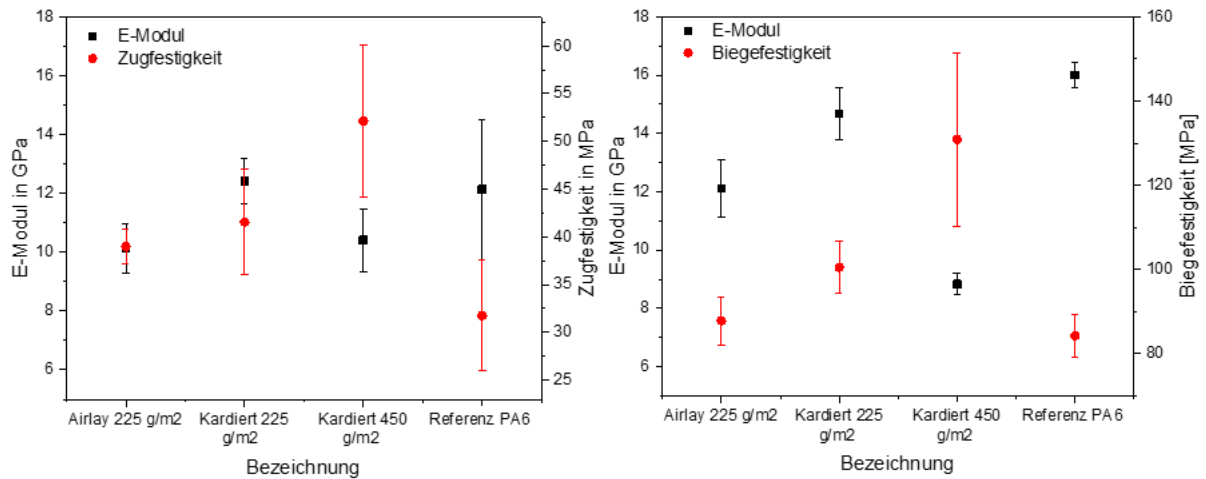


Abbildung 17: Ergebnisse der Querzuguntersuchungen unterschiedlicher Kohlenstofffaservliese im Pultrudat. Rechts: Ergebnisse des 3-Punkt Biegeversuches quer zur Faserrichtung unterschiedlicher Kohlenstofffaservliese im Pultrudat

Dabei wiesen die Paneele mit dem 450 g/m² kardierte Vlies die höchsten mechanischen Eigenschaften quer zur Faserrichtung auf. Dies ist auf die Vorzugsrichtung der Fasern quer zur Vliesherstellungsrichtung zurückzuführen. Bei den Biegeversuchen in Faserrichtung zeigte das Paneel mit dem 450 g/m² Airlay Vlies die besten mechanischen Eigenschaften. Dies lässt sich ebenfalls auf die Herstellungsart des Vlieses zurückführen, da beim Airlayverfahren im Gegensatz zum Kardierverfahren keine Vorzugsrichtung der Fasern vorliegt. Darüber hinaus wurde ein Zusammenhang zwischen dem Flächengewicht des Vlieses und den mechanischen Eigenschaften festgestellt. Es konnte beobachtet werden, dass mit zunehmendem Flächengewicht des Vlieses eine Steigerung der Biegefestigkeit einherging.

Im Rahmen der Untersuchung zur elektromagnetischen Verträglichkeit wurde beobachtet, dass Paneele mit Kohlenstofffaservlies mit einem Flächengewicht von 450 g/m² die größte elektromagnetische Abschirmleistung erzielten. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung wurden in weiteren Versuchskampagnen Profile mit zwei Vlieslagen mit jeweils 250 g/m² hergestellt. So konnte gleichzeitig eine hohe Schirmdämpfung und hohe mechanische Eigenschaften in Querrichtung erreicht werden.

Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Vliesintegration am Fraunhofer ICT und aus den Pressversuchen am IKT, vgl. Arbeitspaket 5, den prozesstechnischen Randbedingungen sowie den konstruktiven Anforderungen der Batteriekastenkonzepktion hat CompriseTec (CT) zusammen mit den Projektpartnern eine Profilgeometrie entwickelt. Ausgehend von einer umfassenden Betrachtung und Bewertung diverser Umsetzungsmöglichkeiten, siehe Abbildung 18, wurde insbesondere vor dem Hintergrund der erwartbaren Fügequalitäten eine relativ simple symmetrische Nut-Feder-Verbindung gewählt.

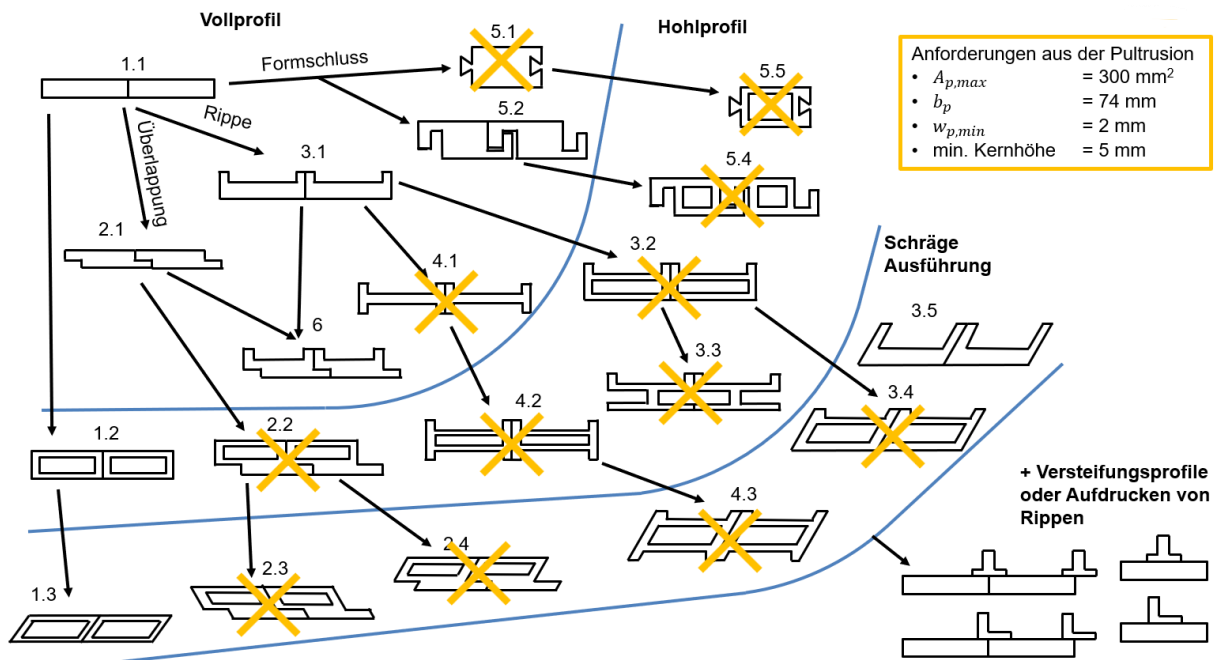


Abbildung 18: Betrachtung unterschiedlichster Profilgeometrien für den Batteriekasten

Das Panelwerkzeug (siehe Abbildung 19 links) weist eine doppelte Trapezform mit einem Profilquerschnitt von 50 x 5 mm auf. Die schräg zulaufenden Flächen an den Kavitätsrändern begünstigen den Schweißprozess zum Fügen der Profile. Darüber hinaus ermöglicht die Überlappung der Paneele die Bildung einer kontinuierlichen Vliesstruktur, was zu einer signifikanten Verbesserung der EMV-Eigenschaften führt. In Abbildung 19 ist in den beiden rechten Bildern, die Überlappung der Vliesstruktur über die einzelnen Paneele erkennbar.

Die Werkzeugentwicklung sowie die Inbetriebnahme und die Profilverstellung erfolgten dann am Fraunhofer ICT. Die praktischen Arbeiten der CT erfolgten insbesondere hinsichtlich der Befähigung der vorhandenen Pultrusionsanlage von CT zur perspektivischen Produktion der skalierten Paneele. Aufgrund der Tatsache, dass alle bekannten in-situ Pultrusionsanlagen Unikate mit unterschiedlichsten Konfigurationen der zentralen Komponenten, wie Vorheizstrecke, Werkzeug, Dosieranlage und Abzug ausgestattet sind, erfolgt der Technologietransfer hauptsächlich auf Grundlage von qualitativen Erkenntnissen, die dann im entsprechenden Anlagenkontext erprobt werden müssen. Häufig wurden auch Anpassungen oder Neuentwicklungen von spezifischen Anlagenteilen notwendig. Zum Ende des Projekts konnten erfolgreich vollimprägnierte Profile mit vollständig polymerisierter Matrix und einem ähnlich großen Profilquerschnitt, wie das Zielprofil hergestellt werden. Versuche mit einem Profilwerkzeug, das auf Basis der Erkenntnisse des Fraunhofer ICTs beschafft wurde, konnten aufgrund akkumulierter Verzögerungen bei der Inbetriebnahme des Profilwerkzeug am ICT und in der Beschaffung im Rahmen des Projekts nicht mehr durchgeführt werden.

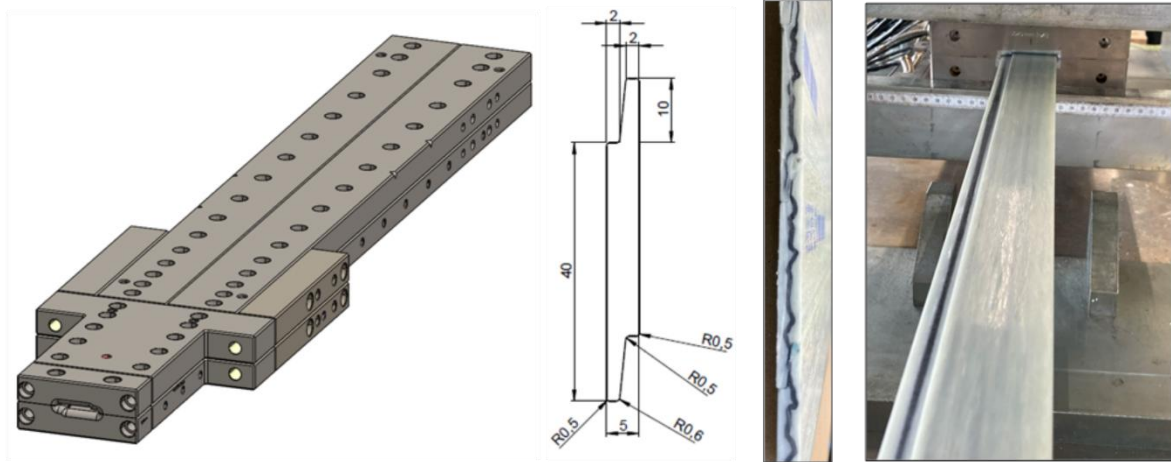


Abbildung 19: Von links nach rechts: Panelwerkzeug, Querschnitt der Profilgeometrie, gefügtes Flächenelement im Querschnitt und Herstellung der finalen Profilgeometrie in der in-situ Pultrusion.

Die experimentellen Arbeiten bei CT musste aufgrund eines notwendigen Umzugs des Anwendungstechnikums und anschließenden Problemen bei der Wiederinbetriebnahme für mehrere Monate unterbrochen werden.

Die am ICT hergestellten und am IKT und bei CT gefügten Profile wurden bezüglich ihrer Querkzugfestigkeit und EMV-Abschirmung charakterisiert. Der Einsatz des Kohlenstoffaservlieses führte zu einer Erhöhung der Querkzugfestigkeit um ca. 50 % gegenüber einem GF-aPA6-Referenzprofil ohne Vlies. Mit einem Kohlenstoffaservlies von 500 g/m^2 wurde eine Schirmdämpfung von $> 50 \text{ dB}$ im Bereich von $3,4 \cdot 10^8$ bis $6,3 \cdot 10^8$ gemessen (siehe Abbildung 20). Dies ist auf die hohe Anzahl von leitfähigeren Verbindungen sowie der flächendeckenden Abdeckung des Kohlenstoffaservlies über das gesamte Bauteil zurückzuführen. Mit einer steigenden Anzahl von Kohlenstoffasern im Bauteil erhöht sich auch die Anzahl der leitfähigen Verbindungen, was zu einer höheren Abschirmung durch das Bauteil führt.

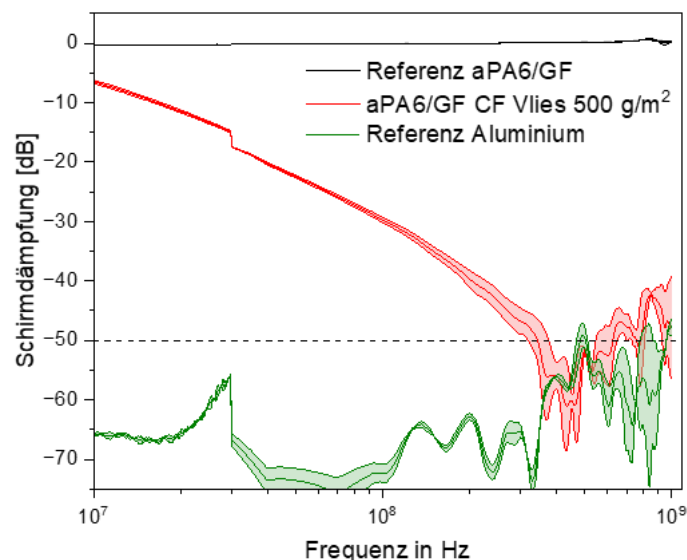


Abbildung 20: Ergebnisse der magnetischen Schirmdämpfungsversuche der gefügten Flächenelemente sowie Referenzmaterial aus Aluminium. Darstellung der Frequenz als logarithmische Größe

Die Arbeiten zur Herstellung von in-situ pultrudierten thermoplastischen Tapes wurden auf Seiten von CT nach der Konzeption einer geeigneten Werkzeugtechnik und der Erfassung der notwendigen Änderungen an der Pultrusionsanlage eingestellt, da aufgrund der konstruktiven Entscheidung von GreenIng in AP2 kein Bedarf für diese Lösung mehr bestand.

Arbeitspaket 4 – Funktionalisierung im 3D-Druck

Die Funktionalisierung von in-situ pultrudierten Profilen, bzw. aus diesen Profilen gefügten Platten, vergrößert die Einsatzmöglichkeiten dieser Profile enorm und stellt einen zentralen Vorteil gegenüber duroplastischen Profilen dar. Die Entwicklung des Batteriekastensystems, vgl. AP 2, ist unter der Prämisse erfolgt, dass stoffschlüssige Verbindungen von Funktionselementen möglich sind.

Auf Basis der Anforderungen aus dem Lastenheft hinsichtlich der Materialspezifikation für die Materialien zur Funktionalisierung stellten insbesondere die geforderten Flammseigenschaften das zentrale Auswahlkriterium dar. Eine Marktrecherche vor dem Start der Materialentwicklung ergab, dass ein kommerziell verfügbares Druckfilament verfügbar war, das alle Spezifikationen erfüllt, sodass die Notwendigkeit einer Eigenentwicklung entfiel und das 3D-Druckfilament LUVOCOM 3F PAHT 9936 BK ausgewählt und in den nachfolgenden Arbeitsschritten für die Verwendung im 3D-Druck mit in-situ pultrudierten Profilen befähigt wurde.

Im Gegensatz zum klassischen 3D-Druck bei dem die zu druckende Struktur nach Abschluss des Drucks vom Druckbett entfernt wird, besteht das Ziel bei der Funktionalisierung darin eine möglichst hohe Fügefestigkeit zwischen Substrat, hier das in-situ Pultrudat, und dem Druckteil zu realisieren. Das Fügen von thermoplastischen Kunststoffen basiert auf verschiedenen Mechanismen, welche maßgeblich von den Parametern Druck, Temperatur und Fügezeit abhängen. Da bei der Funktionalisierung im 3D-Druck jedoch auf die Parameter Druck und Fügezeit kaum Einfluss genommen werden kann, kommt der Temperaturführung eine besonders große Bedeutung zu.

Die Erwärmung des Substrats stellt eine Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Fügen, bzw. Aufdrucken, dar. Dementsprechend wurden zunächst das thermische Verhalten der Pultrudate insbesondere hinsichtlich des Aufheizens und des Abkühlens charakterisiert. Dabei wurden verschiedene Erwärmungsmethoden, wie Umluftofen, Wärmeleitung und Infrarot untersucht und hinsichtlich ihrer Integrierbarkeit in einen 3D-Druck Prozess bewertet. Für die allgemeinen Prozessuntersuchungen wurde die Wärmeleitung über ein heißes Metallstück als passendste Erwärmungsmethode ausgewählt.

Basierend auf den erreichten Pultrudattemperaturen und den Verarbeitungshinweisen des Filamentherstellers wurde ein Prüfplan unter Variation der Polymer- und Pultrudattemperatur, der Druckgeschwindigkeit und der Schichtdicke erarbeitet und systematisch untersucht. Zur Positionierung und Fixierung der aufgeheizten Pultrudatabschnitte wurde eine individuelle Aufnahme entwickelt, die auf dem Druckbett des 3D-Druckers Sovol SV06 Plus befestigt wird. So wird die schnelle und reproduzierbare Positionierung der heißen Pultrudatstücke ermöglicht. Ein effizienter Ablauf bei der Couponfixierung und der Programmintegration ist ebenso wie die Kenntnis des Abkühlverhaltens des Pultrudats bis zum tatsächlichen Start des Bedruckens von essentieller Bedeutung für das erfolgreiche und reproduzierbare Drucken. Hier ist insbesondere die richtige Einstellung der Höhe der zu bedruckenden Oberfläche und des Druckkopfs entscheidend.

Für eine effiziente Prüfkörperherstellung wurde eine hohle Druck-Prüfkörpergeometrie entwickelt, die darauf ausgelegt ist die höchsten Lasten im Fügebereich zu erzeugen. Die Geometrie ermöglicht nach dem Ankleben von Aluwinkeln und Zugblechen eine Einspannung in die Zugprüfmaschine. Diese ist zusammen mit der entwickelten Klebevorrichtung in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt.

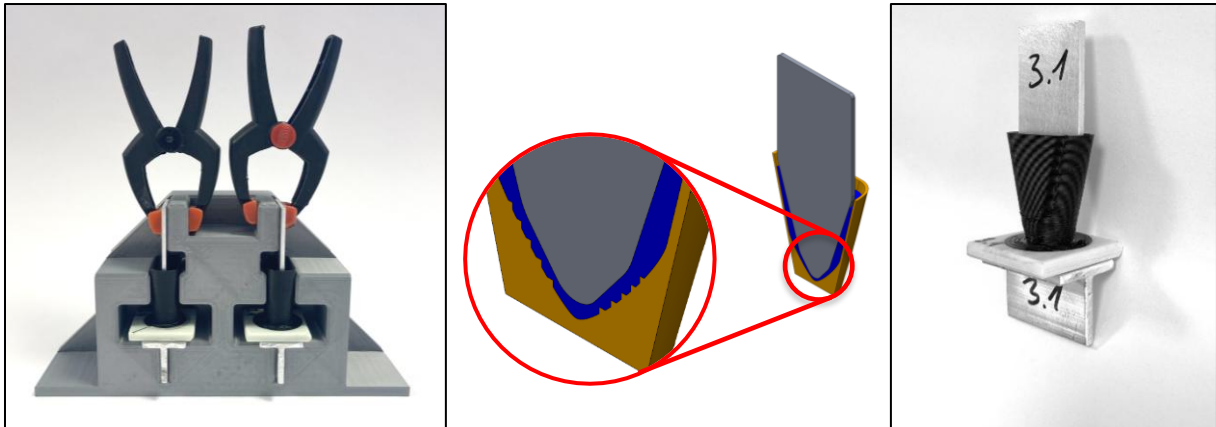


Abbildung 21: Klebevorrichtung zum exakten Verkleben der Einzelteile zum Zugprüfkörper (links), angepasste Prüfkörpergeometrie "Vase" mit Zugblech und Harzfüllung (mitte) und fertiger Zugprüfkörper (rechts)

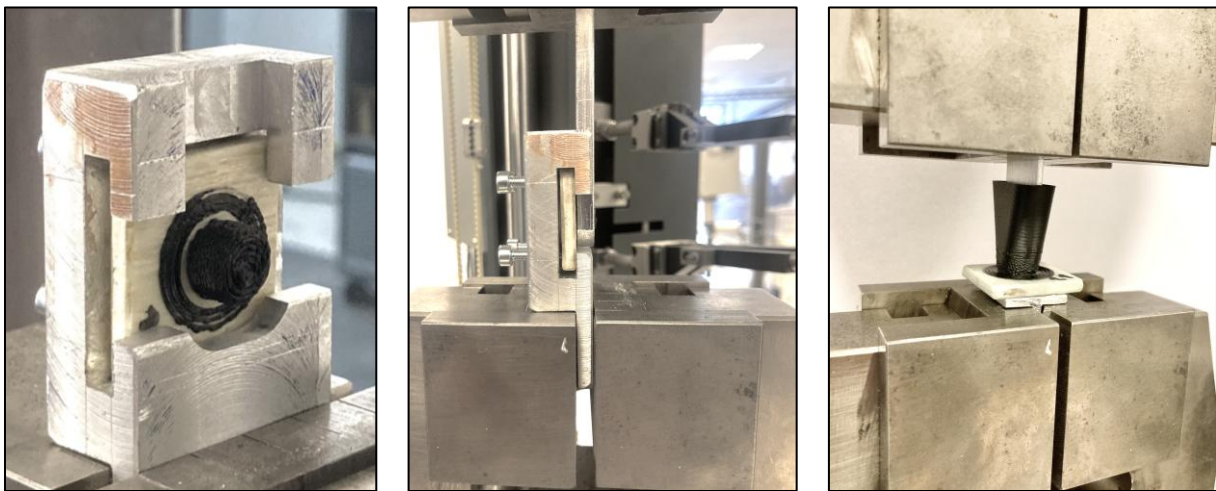


Abbildung 22: Scherprüfkörper in Aufnahme (links), Scherprüfkörper in Zugprüfmaschine (mitte) und Normalzugprüfkörper in Zugprüfmaschine (rechts)

Im Rahmen der Untersuchungen konnten diverse Einflüsse auf die Fügefestigkeiten identifiziert werden. Insbesondere die Erhöhung der Pultrudattemperatur sorgt für verbesserte Zug- und Schubfestigkeiten. Kleinere positive Effekte auf die Scherfestigkeit konnten durch die Erhöhung des Extrusionsfaktors erzielt werden. Insgesamt weisen die Scherprüfkörper mit $6,92 \pm 1,55$ MPa im Vergleich zu den Normalzugprüfkörpern mit $3,26 \pm 1,07$ MPa eine deutlich höhere Festigkeit auf.

Die Bruchbilder, dargestellt in Abbildung 23, lassen im Allgemeinen keinen Rückschluss auf die erreichte Festigkeit zu, genauso kann aufgrund einer erreichten Festigkeit kein Rückschluss auf das Bruchbild gezogen werden.

Für die Fertigung des Demonstratorbauteils mussten – wie bei der Funktionalisierung der Batteriekastenwände später auch – einzelne Bereiche des Pultrudats erhitzt werden. Dies wurde mit den gleichen Stahlklötzen wie für die Prüfkörperherstellung umgesetzt, allerdings ohne, dass das gesamte Pultrudat im Ofen platziert wurde. So konnten die Funktionsgeometrien nacheinander aufgebracht werden, ohne die bereits gedruckten Geometrien den hohen Temperaturen auszusetzen. Das fertige Demonstratorbauteil mit zwei Arten von Positionierungshilfen, einer Kabelbefestigung und einem Schraubendom ist in Abbildung 24 zu sehen.

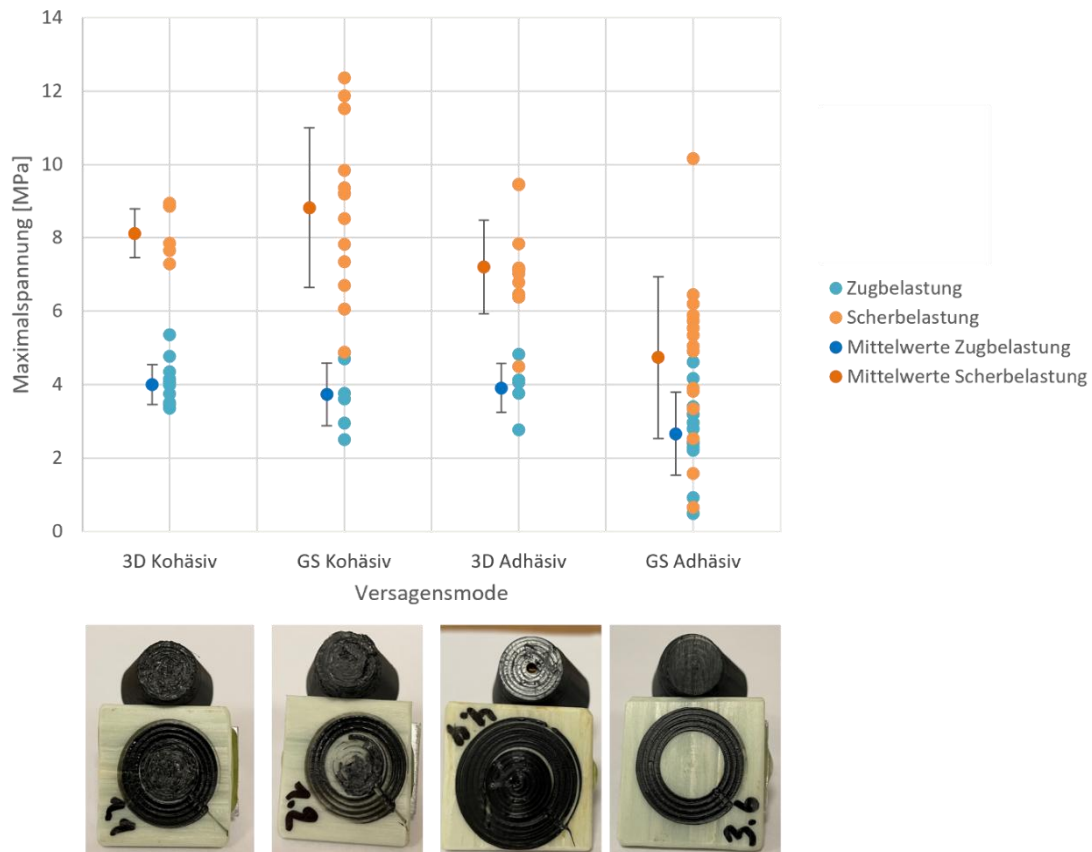


Abbildung 23: Festigkeit angedruckter Strukturen in Abhängigkeit des Versagensmodus

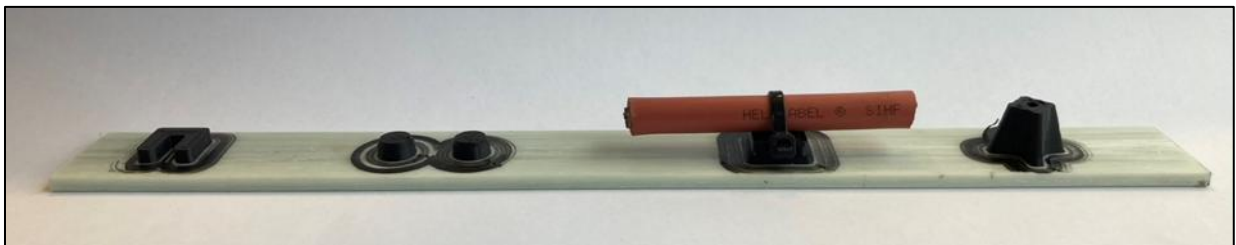


Abbildung 24: Fertiges Demonstratorbauteil mit verschiedenen Funktionsgeometrien

Neben der Funktionalisierung der pultrudierten Profile im 3D-Druck wurde zusätzlich das Aufspritzen von Funktionalisierungselementen untersucht. Dabei besteht die Herausforderung das theoretisch endlose Profil so in eine Spritzgusswerkzeug einzulegen und zu fixieren, dass die Anlage den aufgeschmolzenen Kunststoff über das Werkzeug in die Werkzeugkavität mit der Profilloberfläche in Kontakt gebracht wird. Aufgrund der Bau- und Funktionsweise von Spritzgussmaschinen mit einer unidirektionalen axialen Öffnungsbewegung ergeben sich für unterschiedliche Funktionalisierungsgeometrien unterschiedliche Herausforderungen durch geometrische Hinterschnitte in Öffnungsrichtung. Geometrien ohne Hinterschnitte wurden bereits erfolgreich auf Pultrudate oder andere faserverstärkte Halbzeuge aufgespritzt und stellen den Stand der Forschung dar. Deswegen wurde im Rahmen dieses Projekts der Fokus auf hinterschnittige Geometrien gelegt. Zunächst wurde eine entsprechende Geometrie erarbeitet und dann mittels einer Spritzgussimulation hinsichtlich der Füge­temperatur und des Fügedrucks untersucht, siehe Abbildung 25 links. Dazu wurden Werkzeugform­ein­sätze mit der von CompriseTec entwickelten ADDSET-Technologie realisiert. Ein gedruckter Einsatz ist in Abbildung 25 rechts dargestellt. Die zentrale Herausforderung der Prozessführung bestand in der Integration der Pultrudate­stücke ins Werkzeug. Es war mit realistischem Aufwand nicht möglich die Stücke so ins Werkzeug einzulegen, dass diese beim Schließen des

Werkzeugs in die gegenüberliegende Werkzeughälfte eintauchen ohne zu verformen oder das Werkzeug zu beschädigen, sodass diese Prozessroute nicht weiterverfolgt wurde.

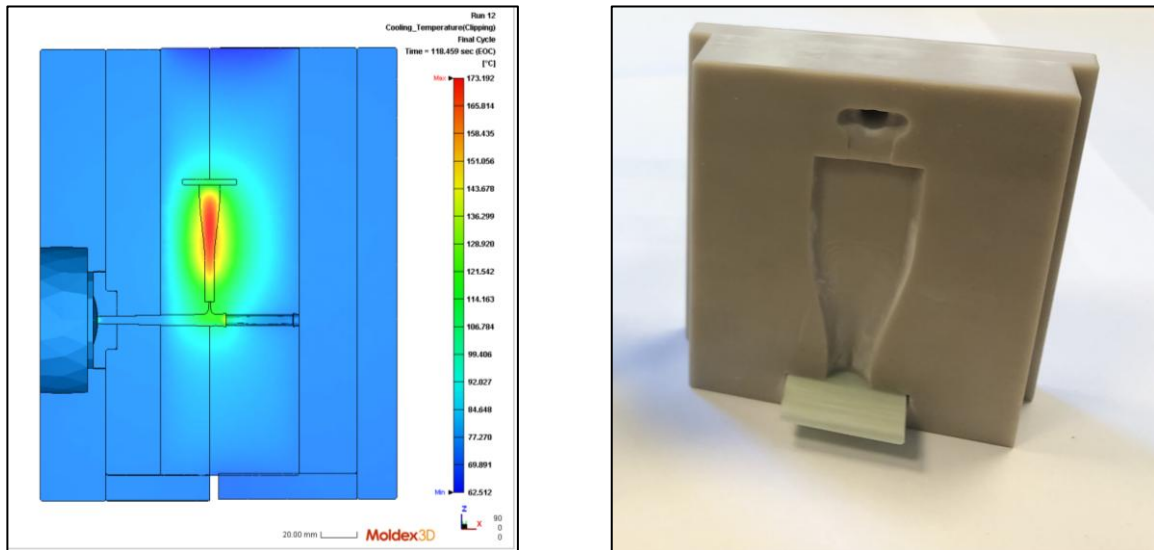


Abbildung 25: links: Simulation des Einspritzprozesses ins Spritzgusswerkzeug mit Pultrudateinleger, rechts: mit ADDSET-Technologie gedruckter Spritzgusswerkzeugeinsatz zur Funktionalisierung von in-situ Pultrudaten

Aufbauend auf den zuvor durchgeführten Arbeiten zum Bedrucken von Pultrudaten wurde der Prozess des Aufdrucken von dem zuvor genutzten Desktop-FDM-3D-Drucker auf die roboterbasierte Anlage, den SpacePrinter übertragen. Bei dem SpacePrinter handelt es sich um eine Entwicklung der CompriseTec mit weiteren Partnern im Rahmen des LuFo-Vorhabens „Epoxy Space Printer“ (LuFo III, 20Q170A). Diese Anlage ermöglicht aufgrund seiner Dimensionen und der technischen Spezifika des Knickarm-Roboters das Bedrucken von großen Paneelflächen und könnte perspektivisch steuerungstechnisch in eine umfassend automatisierte Produktionsanlage integriert werden. Alternative FFF-Drucker konnten die Anforderungen hinsichtlich der nötigen Integration der zu bedruckenden Teile weder auf Hardwareseite noch auf Softwareseite erfüllen. Grundsätzlich ist aber der eingesetzte Druckkopf vergleichbar mit anderen FFF-Druckern. Lediglich die Bewegung sowie die zugrundeliegende Steuerung unterscheiden sich.



Abbildung 26: Ursprünglicher Aufbau der SpacePrinter-Anlage

Zur Befähigung der Space-Printer Anlage für das Bedrucken von Pultrudaten, bzw. gefügten Flächen aus Pultrudaten, ist die Synchronisation der Position in der realen und der virtuellen Welt der

Anlagensteuerung essentiell. Dazu wurde zunächst ein Tisch mit variabler Aufnahme von pultrudierten Platten mit unterschiedlichen Größen entwickelt und aufgebaut. Für die Erwärmung der Pultrudate wurde eine Infrarotheizstation in den Aufbau integriert. Des Weiteren wurde die Lage des Tisches in Relation zu den Koordinaten des Roboters in die Robotersteuerung implementiert und außerdem die Software so erweitert, dass zu druckende Geometrien auf einer frei wählbaren Position auf der pultrudierten Platte platziert werden können (vergleiche Abbildung 27 und Abbildung 28). Entscheidend ist an dieser Stelle die Übertragung des in FFF-Druckern eingesetzten G-Code auf die Steuerung des Industrieroboters.

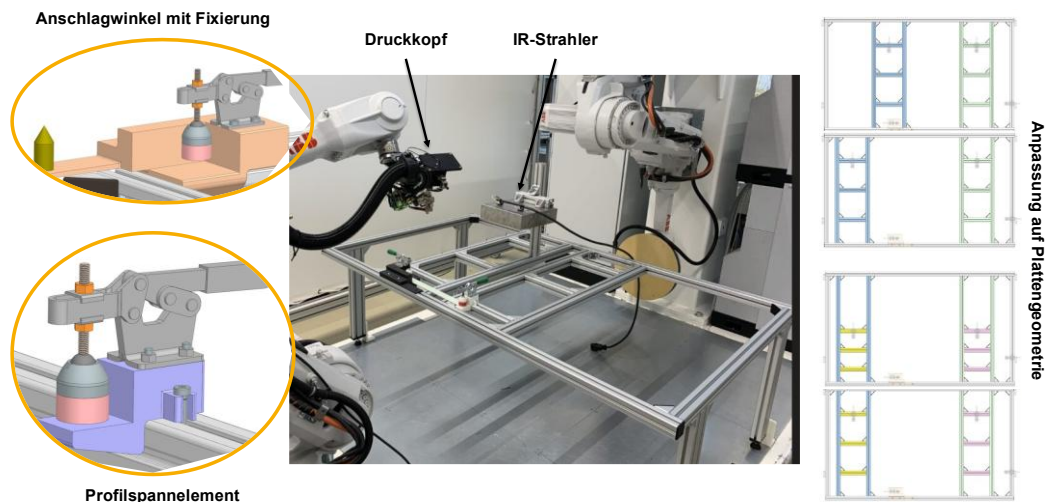


Abbildung 27: Aufnahme für zu funktionalisierende Profile in der SpacePrinter-Anlage

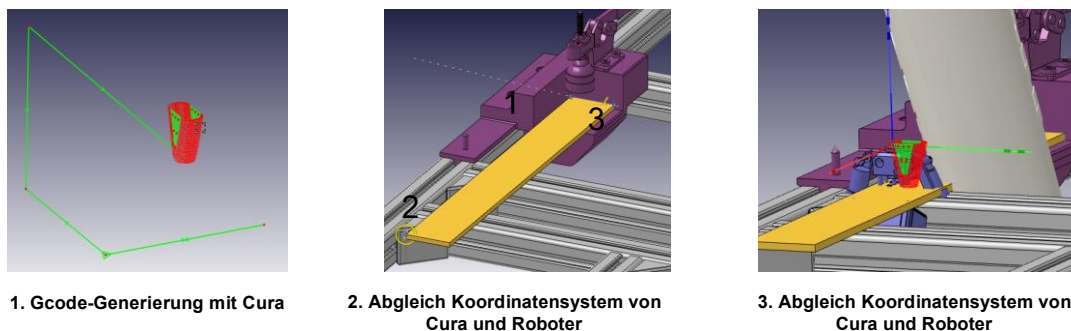


Abbildung 28: Virtuelle Prozesskette zur Roboterprogrammierung für den 3D-Druck

Abschließend wurde die Betriebs- und Prozessfähigkeit der Anlage untersucht und validiert. Dabei konnte die erreichten Fügefestigkeiten der Versuche mit dem Desktop-FFF-Drucker erfolgreich reproduziert werden.

Arbeitspaket 5 – Entwicklung der Fügeverfahren

Das stoffgleiche Fügen stellt einen zentralen Vorteil von in-situ pultrudierten Profilen gegenüber Pultrusionsprofilen mit duroplastischer Matrix dar. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden zwei verschiedene Prozesse untersucht. Zum einen das Fügen von Pultrusionsprofilen miteinander zu Platten und das Aufschweißen von Funktionselementen, analog zur Funktionalisierung mittels 3D-Druck, das in AP4 beschrieben wird.

Die Entwicklung des Fügeprozesses von zwei oder mehr Pultrusionsprofilen erfolgte beim Projektpartner IKT, bei dem das Heizelementschweißen und das Heißpressen miteinander verglichen wurden. Mithilfe von Coupon-Tests aus quadratischen 30 mm x 30 mm Zuschnitten aus pultrudierten Profilen (ICT) mit einem Faservolumengehalt von 71 Vol.-% und einer Wanddicke von 4 mm, wurden die beiden Verfahrensvarianten detailliert untersucht.

Beim Heizelementschweißen werden die Fügepartner unter definierter Temperatur und Druck an einer Heizplatte aufgeschmolzen und anschließend unter Druck miteinander verbunden. Beim zweiten Verfahren, dem Heißpressen, werden die Fügepartner zuvor so bearbeitet, dass sie als Halbzeuge einen überlappenden Querschnitt besitzen. Diese werden dann in eine beheizte Presse eingelegt und unter Druck und Temperatur miteinander verpresst (siehe Abbildung 29).

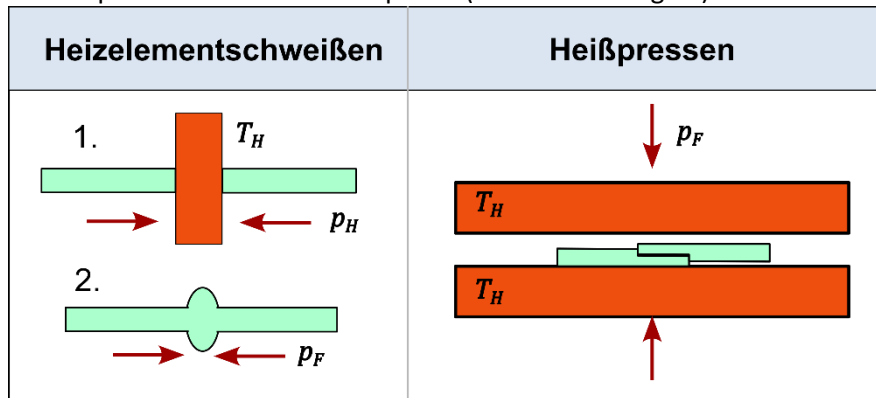


Abbildung 29: Verfahrensvarianten für das Fügen der pultrudierten Paneele

Für beide Verfahren muss beachtet werden, dass der Energieeintrag ausreichend ist um den Kunststoff aufzuschmelzen. Bei zu großem Energieeintrag kann es in der Schweißebene zu Zersetzungserscheinungen kommen, die sich negativ auf die Festigkeit der Verbindung auswirken können. Die Untersuchungen ergaben, dass die Pultrudate mit beiden Verfahren erfolgreich gefügt werden können, wobei die realisierten Festigkeiten beim Heißpressen in Abhängigkeit der Prozessparameter 50-100 % höher lagen als beim Heizelementschweißen (siehe Zugfestigkeiten in Abbildung 30). Darüber hinaus ergibt sich beim Heizelementschweißen eine Schweißwulst, die die Oberflächenqualität der gefügten Flächenelemente negativ beeinflussen würde, sodass im Rahmen des Projekts das Heißpressen, mit dem eine glatte Bauteiloberfläche erreicht werden kann, weiterverfolgt wurde. Für weitere Details zu diesen Arbeiten sei an dieser Stelle auf den zweiten Zwischenbericht des IKT verwiesen.

Bei der Weiterentwicklung des Heißpressens wurden zwei verschiedene Werkzeug- und Fertigungskonzepte verfolgt. Zum einen das sequenzielle Fügen bei dem jeweils ein Pultrudat an eine Platte gefügt wird (vergleiche Abbildung 31) und zum anderen das parallele Fügen aller Pultrudate gleichzeitig zu einer Platte. Insbesondere vor dem Hintergrund der Modularität der Batteriegehäusebauweise ermöglicht der sequenzielle Aufbau Vorteile, da die Länge der Platte theoretisch nicht limitiert ist. Im Gegensatz dazu benötigt man für das parallele Fügen ein entsprechend großes Werkzeug mit einer passenden Presse, was bei den in AP2 diskutierten Dimensionen des finalen Batteriekastens, mit nicht unerheblichen Investitionskosten verbunden wäre.

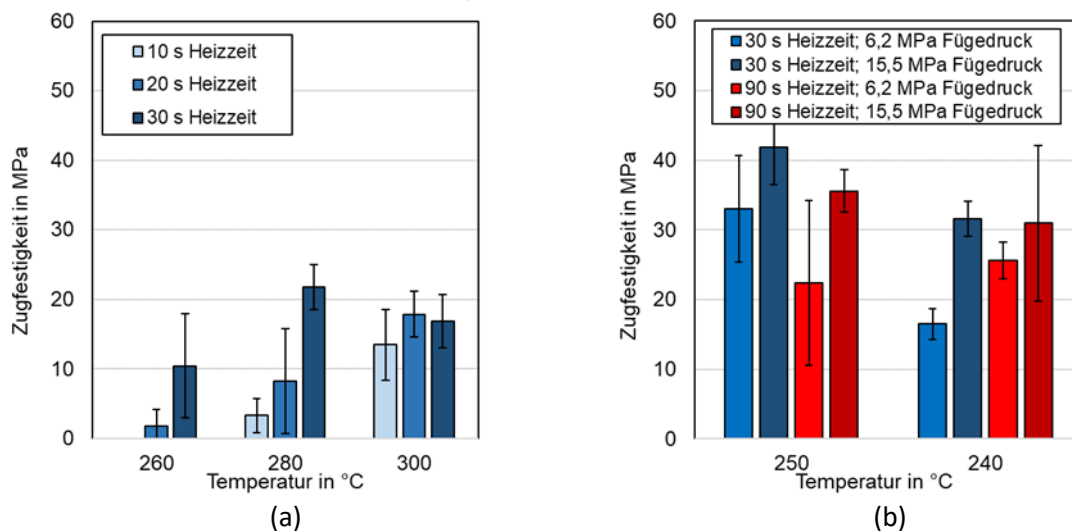


Abbildung 30: Zugfestigkeiten der geschweissten (a) und gepressten (b) Prüfkörper. Fügedruck in (a) 0,25 MPa.

Das IKT entwickelte eine Vorrichtung zum sequenziellen Fügen von den in AP3 entwickelten Pultrudaten mit einer Länge von bis zu 250 mm und konnte diese erfolgreich zur Herstellung von Platten nutzen. Untersuchungen der Fügenahtqualität ergaben eine sehr gute Anbindung bis hin, dass die Fügenaht im Querschnitt nicht mehr identifiziert werden konnte. Aufgrund der Tatsache, dass der Fügedruck durch einen Stempel nur lokal aufgebracht wurde, wurde beim Pressen jedoch Material verdrängt, sodass sich neben dem Stempel Wulste bildeten. Dadurch bildete sich eine unebene Oberfläche, die zusätzlich die Positionierung mit den Niederhaltern erschwert. Für eine erfolgreiche Umsetzung dieses Fügekonzeptes ist daher eine flächige Fixierung der Paneele notwendig.

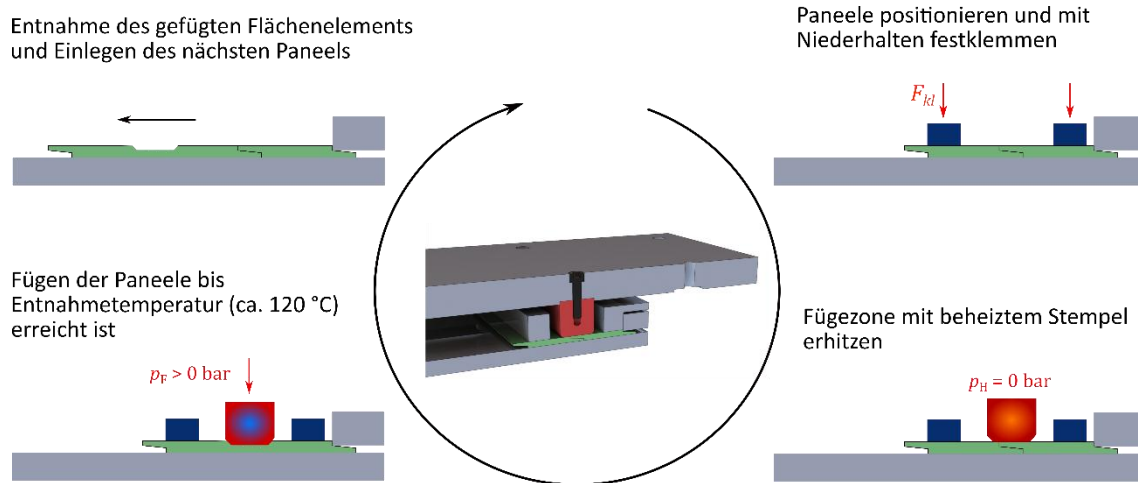


Abbildung 31: Visualisierung der Werkzeugtechnik für die Umsetzung des sequenziellen Fügekonzeptes

Parallel zu den Aktivitäten am IKT entwickelte CT in enger Abstimmung mit dem IKT ein einfaches Presswerkzeug zum parallelen Verpressen mehrere Pultrusionsprofile. Abbildung 32 links zeigt eine CAD-Darstellung der Werkzeugoberflächen (grün), den Kühlplatten (blau) und den eingelegten Pultrudaten (gelb). Das konstruierte Werkzeug wurde im Anschluss gefertigt, in Betrieb genommen und erfolgreich für die Herstellung der für den Demonstrator benötigten Seitenteile des Batteriekastendeckels genutzt. Vorteil dieses Konzeptes ist, dass die Flächenelemente in einem einzelnen Prozessschritt hergestellt werden können und sich eine komplett flächige, glatte Oberfläche ergibt. In Abbildung 32 ist in der Mitte das manuelle Einlegen der einzelnen Pultrudate in die Rucks-Presse von CompriseTec dargestellt und rechts das anschließende Besäumen der gepressten Platte mithilfe einer CNC-Fräse.

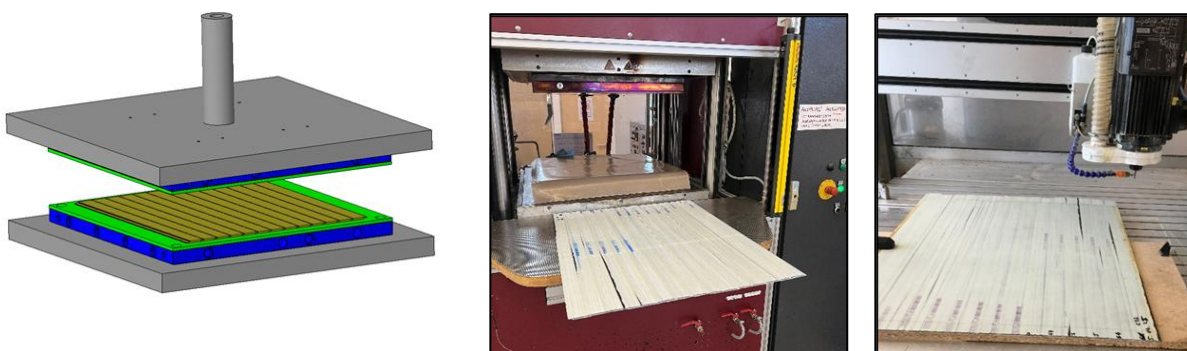


Abbildung 32: links: Werkzeugkonzept im CAD; Mitte: Manuelles Einlegen der Pultrusionsprofile ins Werkzeug zum Verpressen; rechts: Zu einer Platte verpresste Pultrudate bei der Besäumung in der Fräse

Neben den Seitenteilen für den Demonstrator wurden mit derselben Presse aus den Profilen des ICT Testplatten hergestellt, die im Anschluss am IKT auf Zugbelastung und Biegebelastung geprüft wurden.

Die Prozessparameter orientierten sich an den Ergebnissen der Vorversuche, wobei der Fügedruck aufgrund des Kraftlimits der Presse angepasst werden musste. Die Ober- und Unterseite des Werkzeuges wurden auf 230 °C vorgeheizt. Nach dem Einlegen der Füge­teile wurde eine Fügedruck von 0,23 MPa aufgebracht (Maximalkraft der Presse bezogen auf die große Platte in Abbildung 32). Die Presskraft war solange aktiv, bis eine Temperatur von 180 °C erreicht wurde. Bei einer Temperatur von 120 °C wurden die Platten entnommen. Die Prozesszeit wird wesentlich von der Kühlzeit der großen Platten bestimmt und betrug in etwa 75 Minuten. Der Fügedruck wirkt also deutlich länger als in den Vorversuchen, in denen die Prozesszeit in etwa 5 Minuten betragen hat. Die Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung dieser Platten sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Ergebnisse für die Zugbelastung decken sich sehr gut mit den Ergebnissen der Vorversuche (siehe Abbildung 30 (b)). Sowohl die Prüfkörper der Vorversuche als auch die Testplatten konnten Zugfestigkeiten von über 40 MPa erreichen und liegen damit noch über der Querszugfestigkeit der Profile vor dem Fügen ohne Vlies (ca. 32 MPa, siehe Abbildung 17). Diese Festigkeitssteigerung kann zum einen auf die Vliesintegration zurückgeführt werden, zum anderen dadurch, dass durch den Pressprozess der effektive Faseranteil durch ein nach außen drücken der Matrix erhöht wurde. Gleichzeitig, kann es beim erneuten Aufschmelzen der Matrix zu einer besseren Haftung zwischen Matrix und Fasern gekommen sein, die womöglich während der in-situ Pultrusion noch nicht vollständig ausgeprägt war. Auch die Ergebnisse der Biegeprüfung deuten auf eine sehr gute Fügeverbindung hin. So konnte beispielsweise der Biegemodul mit 12 GPa in etwa konstant gehalten werden.

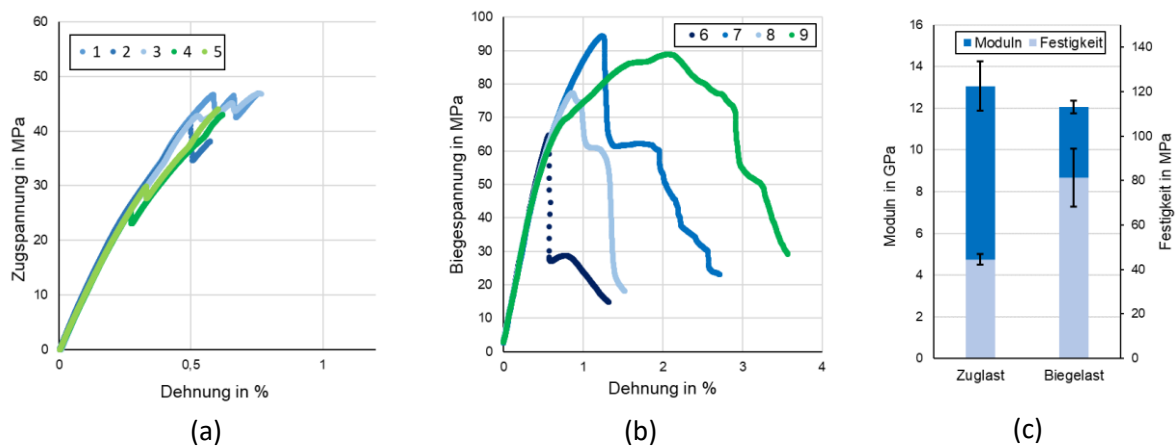


Abbildung 33: Spannungs-Dehnungskurven von Prüfkörpern aus flächig gepressten Pultrudatplatten mit integriertem Vlies. (a) Zugbelastung, (b) Biegebelastung, (c) Darstellung der wichtigsten Kennwerte.

Um auch das Nahtgefüge untersuchen zu können, wurden Comptertomographieaufnahmen der Nahtbereiche angefertigt. In Abbildung 34 ist die CT-Aufnahme eines flächig gepressten Nahtbereichs gezeigt.

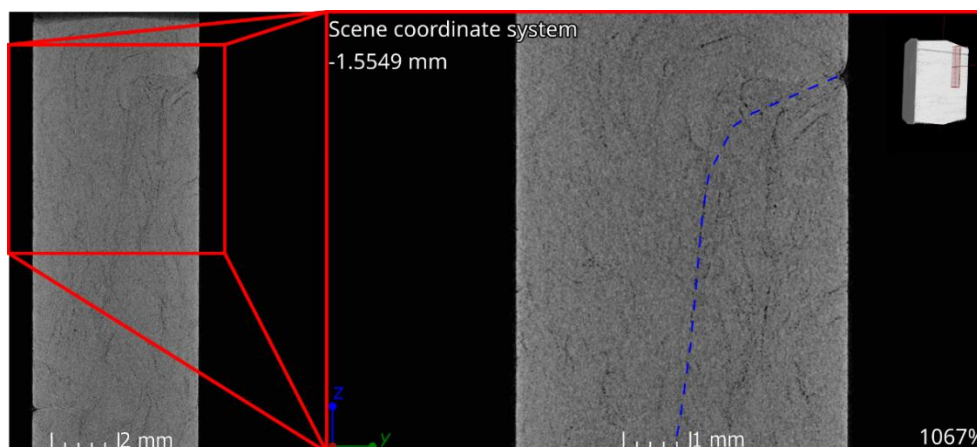


Abbildung 34: CT-Aufnahme eines Querschnitts zweier gefügter Pultrusionsprofile (ohne Vliesintegration)

Der Übergangsbereich zwischen den beiden Profilen ist kaum erkennbar und auch Leerstellen oder Poren lassen sich nicht ausmachen. Dies deutet auf eine sehr gute Verbindung hin und stimmt mit den sehr guten mechanischen Eigenschaften der hergestellten Flächenelemente überein.

Neben der Fertigung der Flächenelemente beschäftigte sich das IKT mit dem Aufschweißen von Funktionselementen auf die Batteriekastenoberfläche. Dabei wurden das Strahlungsschweißen und das Ultraschallschweißen zum Fügen von Funktionselementen untersucht (siehe Abbildung 35) und anschließend mit den Ergebnissen von CompriseTec für das Aufbringen von Funktionselementen mittels 3D-Druck verglichen (siehe AP4). Zunächst wurde als Werkstoff für die aufgeschweißten Funktionselemente ein Polyamid 6 (Ultramid B3S der BASF, Ludwigshafen) gewählt, so dass eine homogene Materialpaarung zwischen Pultrudat und Funktionselement getestet werden konnte.

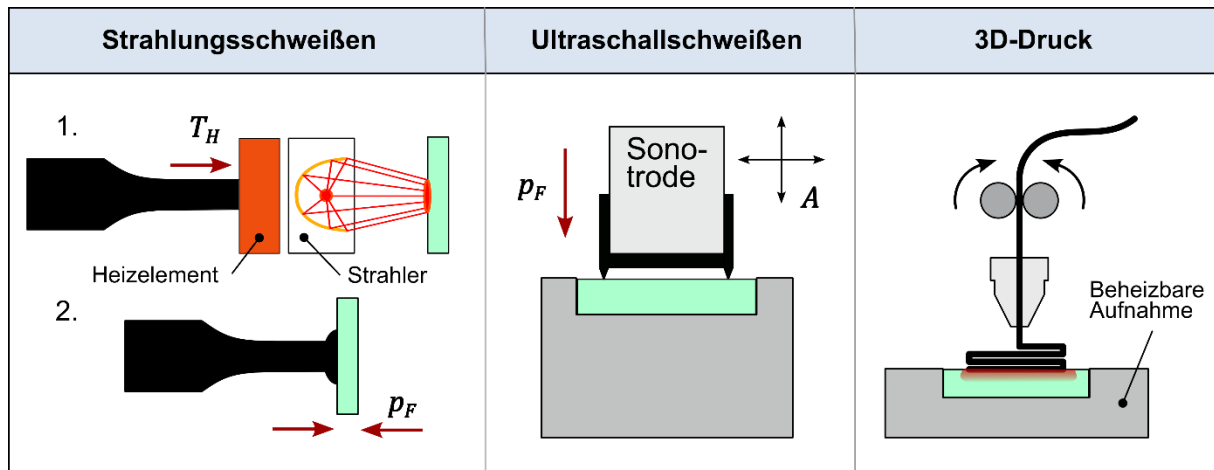


Abbildung 35: Verfahrensvarianten für das Fügen von Funktionselementen auf die thermoplastischen Flächenelemente

Die hergestellten Prüfkörper wurden im Zugversuch mechanisch charakterisiert. Die ermittelten Zugfestigkeiten dieser Verbindungen sind in Abbildung 36 dargestellt.

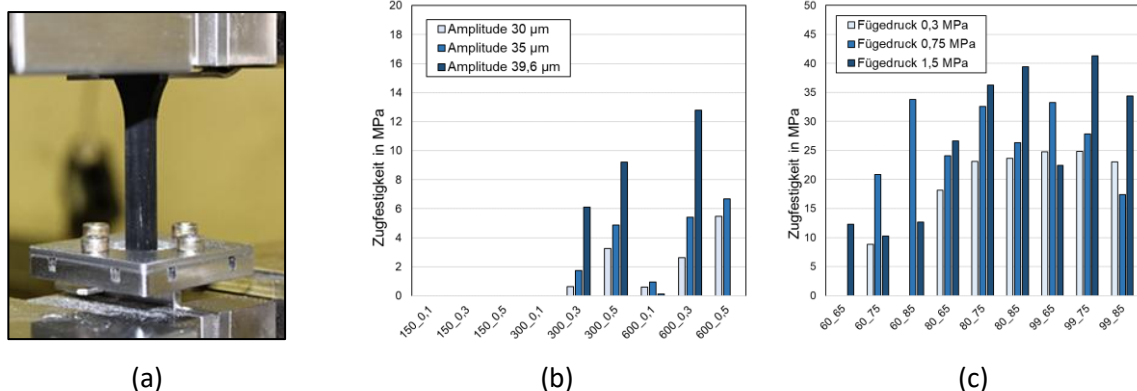


Abbildung 36: Mechanische Charakterisierung der hergestellten Prüfkörper. (a) Vorrichtung zum Prüfen der Prüfkörper hergestellt mit dem Strahlungsschweißen; (b) Festigkeit der Prüfkörper hergestellt mit dem Ultraschallschweißen; (c) Festigkeit der Prüfkörper hergestellt mit dem Strahlungsschweißen

Beim Ultraschallschweißen wurden die Fügekraft in N (erste Zahl der x-Achsenbeschriftung), die Fügezeit in s (zweite Zahl der x-Achsenbeschriftung) und die Anregungsamplitude in µm der Sonotrode variiert. Die Prozessparameter beim Strahlungsschweißen umfassen die Heizzeit in s (erste Zahl der x-Achsenbeschriftung), die Intensität des Strahlers in % der Maximalleistung (zweite Zahl der x-Achsenbeschriftung) sowie den Fügedruck in MPa. Es ist zu sehen, dass die Prüfkörper, die mit dem Strahlungsschweißen hergestellt wurden, deutlich höhere Zugfestigkeiten erreichen, als die ultraschallgeschweißten Prüfkörper. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus Arbeitspaket 4 (siehe Abbildung 18) zeigt, dass die aufgedruckten Funktionselement nur deutlich geringere Kräfte übertragen können. Durch das Strahlungsschweißen können etwa sechsmal höhere Festigkeiten im

Vergleich zum 3D-Druck erreicht werden. Grund hierfür ist, dass durch den Strahler die Polyamid Matrix im Pultrudat in den schmelzeförmigen Zustand überführt wird und durch den Fügedruck das Funktionselement in das erweichte Pultrudat eindringen kann. In Abbildung 38 (a) ist das vergrößerte Schnittbild eines aufgeschweißten Prüfkörpers gezeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass es zu einer Vermischung des aufgeschweißten Prüfkörpers mit den Fasern im Pultrudat gekommen ist und die Kraftübertragung in der Naht durch diesen Formschluss gewährleistet wird.

Da die Kraftübertragung vermutlich durch eine Verhakung zwischen den Endlosfasern des Pultrusionsprofils und dem Kunststoff des Prüfkörpers erfolgt, wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich auf diesem Weg auch andere Werkstoffe aufschweißen lassen, die normalerweise keine Verbindung mit PA6 eingehen. Zu diesem Zweck wurden die Werkstoffe Polystyrol (PS) und Polypropylen (PP) untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 37 (b) und (c) gezeigt. Die ursprüngliche Annahme konnte jedoch nicht bestätigt werden. Sowohl die PS- als auch die PP-Prüfkörper ließen sich nur unzureichend mit dem Pultrudat schweißen. Als mögliche Ursache wird eine zu geringe Viskosität vermutet. Eine höhere Viskosität geht mit einer gesteigerten Schmelzefestigkeit einher. Beim Aufschweißen auf das Pultrudat wird die Schmelzeschicht dadurch weniger stark nach außen verdrängt und kann tiefer in das Profil sowie zwischen die Fasern eindringen. Diese Vermutung wird durch die Ergebnisse mit PA6 gestützt. Neben dem niedrigviskosen Ultramid B3S wurde auch das deutlich höherviskose Ultramid B40 untersucht (siehe Rheo-Kurve in Abbildung 38(c)). Es zeigt sich, dass die Verbindungen zwischen dem Pultrudat und PA6 B40 höhere Schweißfaktoren erreichen als die Verbindungen mit dem niedrigviskoserem PA6.

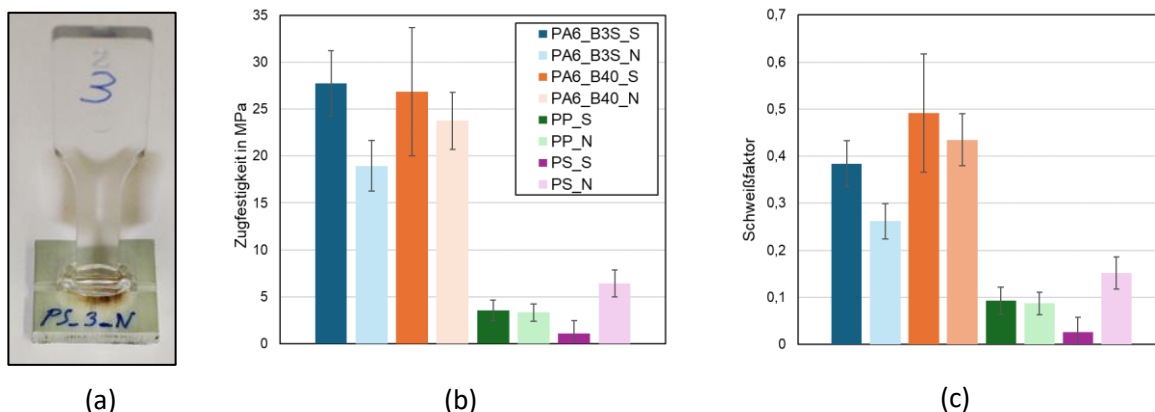


Abbildung 37: Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung der Funktionalisierung mit unterschiedlichen Werkstoffen. (a) Prüfkörper mit eingefräster Nut und aufgeschweißtem PS Zugstab; (b) Zugfestigkeiten, X_S stehen für unbearbeitete Profile, X_N für Profile mit Nut; (c) Schweißfaktoren

Mit dem Ziel den Formschluss zu verbessern wurden zusätzlich auch Schweißversuche mit zuvor bearbeiteten Pultrusionsprofilen durchgeführt. In Abbildung 37 (a) ist ein Prüfkörper abgebildet, bei dem zuvor eine rechteckige Nut in das Profil gefräst wurde. Die mechanischen Ergebnisse weisen jedoch keine Erhöhung der Festigkeit auf; vielmehr führt die Nut sogar zu einer Verschlechterung der Verbindungseigenschaften. Ein Grund hierfür könnte die unzureichende Aufschmelzung der Kunststoffmatrix an den Nutflanken gewesen sein. In Abbildung 38 (b) ist das Bruchbild eines solchen Prüfkörpers im Schnitt gezeigt. Deutlich erkennbar ist, dass an den Flanken der Nut keine Durchmischung mit dem aufgeschweißten Zugstab stattgefunden hat. Infolgedessen wird der Zugstab im Versuch praktisch ohne Materialverbund aus der Nut herausgezogen.

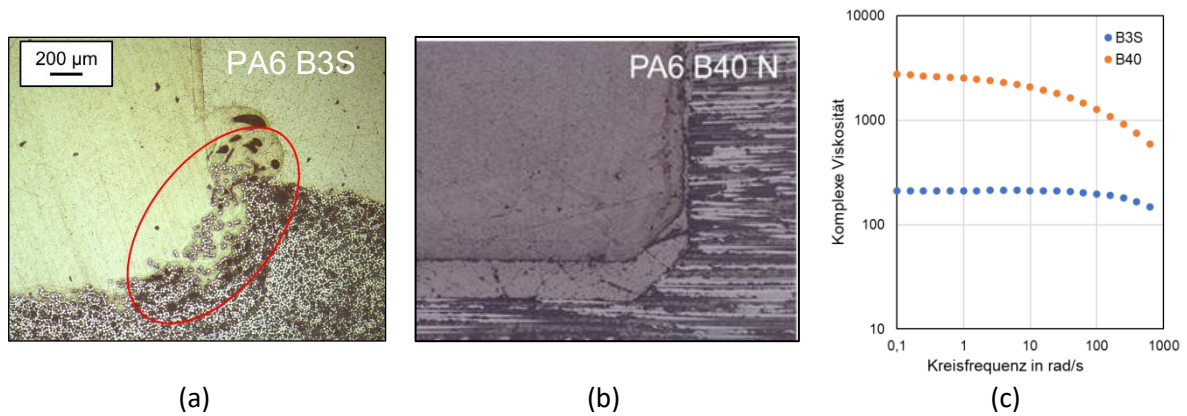


Abbildung 38: (a) Makroskopische Aufnahme der Fügenaht des PA6_B3S_S Prüfkörpers; (b) Bruchbild des Prüfkörpers PA6_B40_N; (c) Komplexe Viskosität der beiden untersuchten PA6-Typen

Arbeitspaket 6 – Produktionsdatenerfassung und -auswertung

Das Arbeitspaket 6 wurde hauptverantwortlich von Selfbits bearbeitet. Die Aufgabe bestand darin, die im Projekt ModE-SoFa entwickelten Fertigungs- und Produktionsprozesse mit einem durchgängigen System zur Prozessdatenerfassung, Nachverfolgung und Auswertung auszustatten. Ziel war die Realisierung einer digital vernetzten, transparenten Produktionsumgebung im Sinne der Industrie 4.0, in der sämtliche Prozess- und Trackingdaten der Fertigung über eine gemeinsame Infrastruktur erfasst, ausgewertet und nutzbar gemacht werden. Die Umsetzung erfolgte in enger Zusammenarbeit der Konsortialpartner Selfbits GmbH, Fraunhofer ICT, CompriseTec GmbH und GreenIng GmbH.

Anforderungsanalyse und Schnittstellendefinition (AP 6.1)

Zu Beginn des Arbeitspakets wurden die Anforderungen an die Produktionsdatenerfassung und Nachverfolgung systematisch ermittelt. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden die Datenschnittstellen zu der Pultrusionsanlage am ICT sowie die bekannten Anforderungen aus in-situ Pultrusion, Montage und Fügeverfahren dokumentiert. Darüber hinaus wurden im Zuge der Analyse auch die regulatorischen Anforderungen des Digitalen Produktpasses (DPP) für Batterien in der Elektromobilität dokumentiert, der ab 2027 verbindlich wird. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die im Projekt entwickelte Datenarchitektur zukunftssicher und konform mit europäischen Nachhaltigkeitsstrategien ausgelegt ist. Weiterhin wurden allgemeine Anforderungen bezüglich Speicherung, Verarbeitung und Bereitstellung von Nachverfolgungsdaten mit dem Ergebnis recherchiert, dass EPCIS-Konformität erreichbar sein muss. EPCIS (Electronic Product Code Information Services) ist ein Standard von GS1, der definiert, wie Ereignisdaten in der Lieferkette erfasst, gespeichert und ausgetauscht werden. Ziel ist Transparenz über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts.

Konzeptentwicklung zur Nachverfolgung (AP 6.2)

Basierend auf der Anforderungsanalyse wurde ein umfassendes Tracking-Konzept entwickelt, das die eindeutige Identifikation und Nachverfolgung von pultrudierten Bauteilen über alle Fertigungsschritte hinweg ermöglicht. Selfbits evaluierte verschiedene Tracking-Technologien, unter anderem ausgedruckte QR-Codes und kontinuierliche Druckverfahren (Continuous Inkjet). Aufgrund der besseren Automatisierung und digitalen Erfassung wurde die Continuous Inkjet Lösung weiterverfolgt. Das Konzept sieht vor, dass die in der Pultrusionsanlage am Fraunhofer ICT hergestellten Paneele laufmeterweise mit einem Datamatrix-Code versehen werden können. Dieser Code enthält Tracking-Informationen wie Bauteil-ID, Zeitstempel und Versuchskennungen und ist sowohl maschinen- als auch menschenlesbar. Zusätzlich wurde ein Konzept zur EPCIS-konformen Ereignisverfolgung (Electronic Product Code Information Services) ausgearbeitet, das die lückenlose Dokumentation aller Produktions- und Bewegungsereignisse entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht. Die Umsetzung des Konzepts erfolgte in enger Kooperation zwischen Selfbits und dem Fraunhofer ICT. Der Anbieter Videojet gewann die Ausschreibung und nahm den Continuous Inkjet Drucker an der Pultrusionsanlage

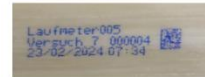
in Betrieb. Selfbits realisierte das Konzept, indem das parametrisierte Layouts am Drucker festgelegt wurde und die Druckdaten per TCP Verbindung gelesen und geschrieben werden konnten (siehe Abbildung 39).

Nachverfolgung in kontinuierlichem Prozess über CIJ-Drucker

ModE-SoFa Ergebnisse



Beispiel



- Layout wird am Drucker mit Variablen konfiguriert.
- Selfbits Flow Designer kommuniziert via TCP/IP mit Drucker
- Druckjobs werden pro Laufmeter ausgelöst (Rotationssensor)

Abbildung 39: Zentraler Printer-Service erlaubt die Integration mit Netzwerkdruckern. Die Nachverfolgung von Einzelteilen im kontinuierlichen Prozess ist erfolgreich erprobt.

Für die Nachverfolgung der Montage- und Fügeprozesse wurde stattdessen eine Lösung auf Basis von gedruckten QR-Code Labels konzipiert, die nach der Montage oder dem Fügeprozess auf die erzeugte Baugruppe geklebt wird und diese als Einzelteil eindeutig nachverfolgt. Gleiches gilt für Zukaufteile wie Batteriemanagementsystem, Batteriezellen oder Metallverstärkungen. Die montierten oder gefügten Materialien sind somit entweder pultrudierte Paneele, die bereits einen Aufdruck haben, oder Baugruppen / Einzelteile, die bereits ein Label aufgeklebt haben. Das Konzept sieht vor, dass diese Ereignisse als EPCIS-konforme Events gespeichert und auswertbar bereitgestellt werden. Das Konzept deckt somit den Fertigungsprozess über verschiedene Partner und Fertigungsprozesse bis zum finalen Gesamtbatteriesystem ab.

Von Seiten Fraunhofer ICT und CompriseTec wurde das Arbeitspaket in dieser Phase anwendungstechnisch beratend begleitet. Der Fokus lag dabei auf der strukturellen Aufbereitung der Fertigungsprozesse und Materialflüsse des Batteriekastengehäuses. Das ICT und CompriseTec brachten ihr Prozess-Know-how insbesondere bei der Identifikation relevanter Prozessgrößen im kontinuierlichen Pultrusionsprozess ein. Diese Expertise trug wesentlich dazu bei, die erfassten Produktionsdaten zielgerichtet für spätere Auswertungen nutzbar zu machen. Da die CompriseTec-Pultrusionsanlage, inklusive Steuerung, zu großen Teilen eine Eigenentwicklung darstellt, bestand der erste Schritt zur Prozessdatenerfassung seitens CompriseTec in der Entwicklung einer Datalog-Schnittstelle, die es ermöglicht kontinuierlich Daten aus der Anlagensteuerung auszulesen und an einer zentralen Stelle im Netzwerk in einer SQL-Datenbank speichert. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde ein Kraftsensor zur Erfassung der Abzugskraft in die bestehende Anlage sowie die Steuerung integriert. Die Integration weiterer Anlagenteile, wie z.B. der Dosieranlage, und assoziierter Meta-Daten, wie Materialrezepturen, war aufgrund fehlender Schnittstellen nicht möglich.

Datenbankmodellierung und Systemintegration (AP 6.3)

Im Anschluss an die Konzeptphase wurde die technische Infrastruktur zur Speicherung und Verarbeitung der Tracking- und Produktionsdaten aufgebaut. Selfbits entwickelte hierfür eine Cloud-basierte Datenarchitektur zur Speicherung EPCIS-konformer Tracking-Daten sowie eine sichere Kommunikationsschnittstelle zur Pultrusionsanlage. Zur Datenintegration wurde ein Managed Printer Service (MPS) entwickelt, der Druckaufträge innerhalb des lokalen Netzwerks verwaltet und den

kontinuierlichen Druck der Tracking-Codes im Prozess sicherstellt. Parallel entstand ein Filestorage-Service zur Verwaltung begleitender Material- und Produktinformationen (z. B. PDF-Dokumente, Bilder). Zur Datenerfassung vor Ort wurde eine plattformübergreifende Tablet-App (iOS/Android) entwickelt, die eine manuelle Erfassung von Prozessparametern sowie das Auslesen der Tracking-Codes mit per Bluetooth gekoppelten Scannern ermöglicht. In dieser App werden zum einen die Artikelstammdaten, Stücklisten und Fertigungsprozesse vom Versuchsleiter an der Pultrusionsanlage digital gepflegt. Zum anderen erstellt der Versuchsleiter in der App Versuche für Artikel und startet die Bearbeitung dieser Versuche. Er erhält über die App die Möglichkeit, Daten von der Anlage (z.B. Betriebszustände) einzusehen und kann selbst Betriebsdaten zum Versuch oder zur Anlage manuell erfassen.

Entwicklung von Auswertungsalgorithmen und Visualisierung (AP 6.4 und 6.5)

Zur Analyse und Visualisierung der erfassten Prozess- und Betriebsdaten wurden neben der Live-Anzeige in der Tablet App auf Basis der Selfbits-Cloud-Infrastruktur verschiedene Softwaremodule entwickelt. Dazu zählen eine Webanwendung zur Anzeige und Auswertung der Tracking-Daten, Dashboards für den Versuchsverlauf und die Maschinenprozessparameter, eine SOLL/IST-Plantafel für die zeitliche Gegenüberstellung geplanter und realer Produktionsdaten sowie Selfbits Analytics, eine Analyseumgebung für registrierte Nutzer. Selfbits Analytics erlaubt dem Versuchsleiter die Anwender- und Prozessspezifische Konfiguration von Analysedashboards. Unter anderem wurde so ein Dashboard für das ICT entwickelt, um zentrale Prozessparameter zu einem Versuch mit manuell vom Anlagenführer eingegebenen zeitlichen Markern auszuwerten.

Individuelles Dashboard für Versuchsleiter in Selfbits Analytics

ModE-SoFa Ergebnisse

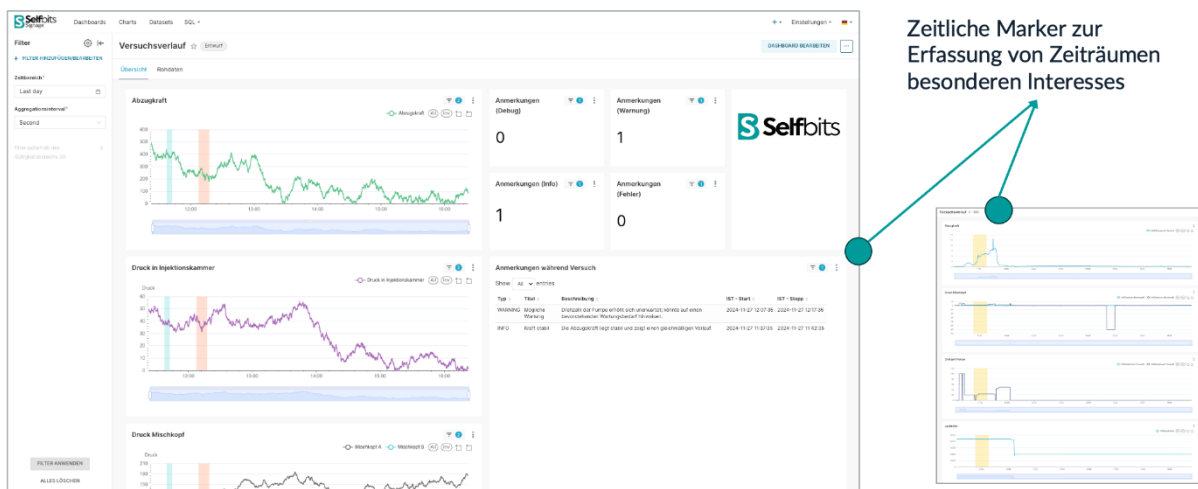


Abbildung 40. Anwendungsspezifische Auswertung der wichtigsten Prozessdaten mit Visualisierung der zeitlichen Marker

Weiterhin wurde die Tablet-App um Funktionen im Kontext des Digitalen Produktpasses erweitert. So können für nachverfolgte Einzelteile (z.B. pultrudierte Paneele) digitale Produktpässe erzeugt werden, die wiederum mit Partnern gezielt geteilt werden können, ohne die erfassten Rohdaten bereitstellen zu müssen. Digitalen Produktpasses erweitert. Außerdem wurde zur Echtzeitdarstellung von Prozessdaten ein Signage Screen eingerichtet, der die Live-Daten aus der Pultrusionsanlage direkt im Produktionsumfeld visualisiert. Die Inbetriebnahme erfolgte am ICT.

Optimierung der Auswertungslogik und Handlungsempfehlungen (AP 6.6 und 6.7)

In der finalen Projektphase wurden die Auswertungsalgorithmen auf Basis der erfassten Prozessdaten optimiert. Aufgrund der fehlenden Sensorik im Fügeverfahren wurden hierzu manuell erzeugte Datensätze aus den Montage- und Fügeschritten verwendet. Die Tablet-App wurde erweitert, sodass autorisierte Nutzer nun eigene Analysen und EPCIS-Events erstellen und verwalten können. Konkret

wurde die Zusammensetzung des ModE-SoFa-Batteriesystems über die gesamte Wertschöpfungskette als Sankey-Diagramm entwickelt und in der App visualisiert.

Eingabe von Produktpass Informationen in neuer App ModE-SoFa Ergebnisse

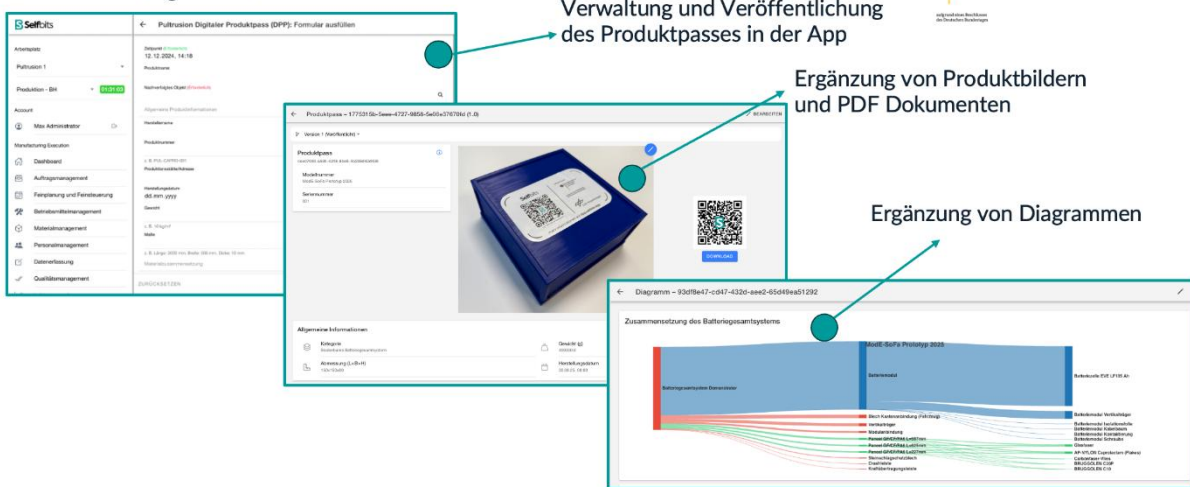


Abbildung 41: Der digitale Produktpass wird in der neuen App verwaltet und veröffentlicht. Dateien, Diagramme und Attribute wie CO₂-Fußabdruck oder Zertifizierungen ergänzen automatisch erzeugte Prozessdaten.

Darüber hinaus wurde im Rahmen einer Masterarbeit ein umfassendes Konzept für einen Digitalen Produktpass für kontinuierliche Fertigungsprozesse entwickelt. Auf dieser Grundlage wurde von Selfbits ein zentraler Dienst mit öffentlicher Web-Schnittstelle für veröffentlichte digitale Produktpässe entwickelt, über den Handlungsempfehlungen zu Recycling, Demontage und Verwertung vom Endanwender durch den Scan des QR Codes abgerufen werden können (siehe Abbildung 42). Autorisierte Anwender können den digitalen Produktpass bearbeiten, sodass beispielsweise ein Reparatuer Informationen zur erfolgten Reparatur und Mängeln digital erfassen kann. Der Hersteller kann somit anhand des Produktpasses die Mängelmeldung gezielt bis zu seinem Fertigungsprozess rückverfolgen und Maßnahmen einleiten, um die Mängel zu verhindern. Zur Demonstration der erzielten Ergebnisse im Arbeitspaket wurde in Zusammenarbeit mit CompriseTec ein 3D-Modell des ModE-SoFa-Prototyps gefertigt, welches die entwickelten Tracking- und Analyselösungen anschaulich visualisiert und die Rückverfolgung vom Prototyp über die gesamte Fertigung in Form des digitalen Produktpasses ermöglicht.

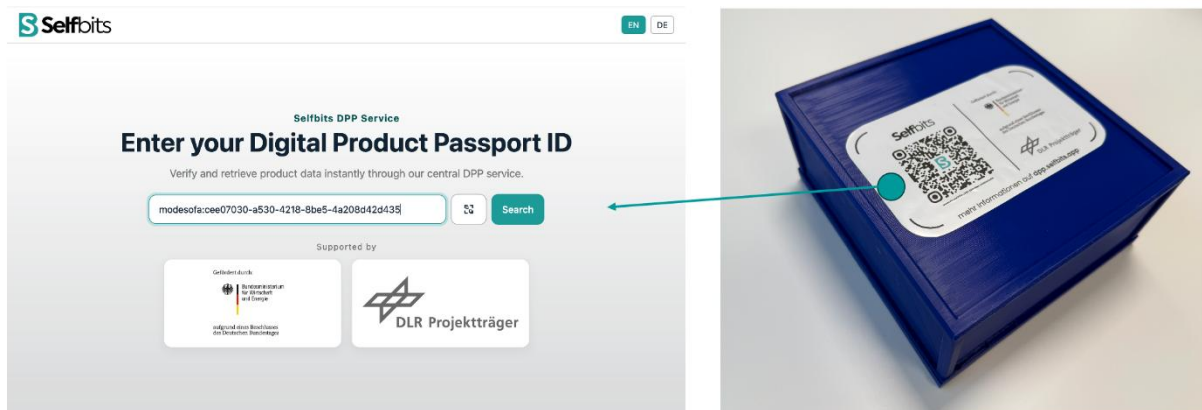


Abbildung 42: QR-Code des Produktpasses verlinkt auf öffentlich freigegebene Produktpassinformationen des Herstellers.

Die Ziele des Arbeitspakets 6 wurden alle erreicht. Gemeinsam wurde eine durchgängige digitale Kette von der Fertigung bis zum Endanwender im Produktlebenszyklus geschaffen – ein zentraler Schritt hin zur realen Umsetzung von Industrie 4.0 und der europäischen Kreislaufwirtschaftsstrategie.

Arbeitspaket 7 – Demonstratorherstellung

Zur Demonstration der Forschungsergebnisse und zur Validierung des Batteriemodulkonzepts baute GreenIng Batteriemodule auf. Vier dieser Module kamen für die Energieversorgung des Magirus-Feuerwehraufbaus des IVECO eDaily zum Einsatz. Weitere Module wurden für die Demonstration der Skalierbarkeit für unterschiedlichste Batteriesysteme aufgebaut. Abbildung 43 zeigt eine Übersicht der im Rahmen von ModE-SoFa entstandenen Demonstratoren.

Niedervolt-Batteriemodul

- ❖ Systemspannung 12 bis 48 V
- ❖ Kapazität 4 bis 5 kWh



Stationärspeicher

- ❖ Systemspannung 384 V
- ❖ Kapazität 80,6 kWh



Multi-Use-Batterie

- ❖ Systemspannung 345 V
- ❖ Kapazität 72,0 kWh



Heckbatterie Magirus

- ❖ Systemspannung 51,2 V
- ❖ Kapazität 16,1 kWh



Abbildung 43: Demonstratoren der GreenIng GmbH & Co. KG

Anhand der Demonstratoren konnte die Skalierbarkeit der Spannungslagen, Kapazitäten und Modulabmessungen veranschaulicht werden. Im Bereich der Batteriesystemgehäuseentwicklung untersuchte GreenIng auch ein Konzept in metallischer Bauweise, welches den Skalierungsansatz der Batteriemodule uneingeschränkt unterstützt. Das Ergebnis ist ein flexibel anpassbares Gehäusekonzept, bei welchem anwendungsspezifisch die Anbindungspunkte für die mechanische Integration des Batteriesystems in das jeweilige Fahrzeug angebracht werden. Das Grundkonzept des Gehäuses bleibt unverändert.

Die Arbeiten von CompriseTec im Rahmen von AP7 umfassten insbesondere die Herstellung von zwei Demonstrator-Batteriegehäusen in Kunststoffbauweise. In einem ersten Schritt wurde das in AP2 entwickelte modulare Batteriekastengehäuse genutzt um eine Batterie aus vier Batteriemodulen in

einem Bauraum zwischen den Längsträgern des Fahrzeugchassis zu konfigurieren. Darüber hinaus wurde eine vereinfachte Struktur zur Anbindung an das Fahrzeug entwickelt.

Im Rahmen des Arbeitspaket 7 ist der erste Demonstrator des hinteren Batteriekastens aufgebaut worden. Da zum damaligen Zeitpunkt noch keine aus Pultrudaten gefügten Platten zur Verfügung standen, wurden Polyamid-Platten als Halbzeuge für die Flächen genutzt. In Abbildung 44 und Abbildung 45 ist der schrittweise Aufbau der Grundplatte und des Trogs, bzw. Deckels, abgebildet. Abbildung 46 zeigt den fertiggestellten ersten Demonstrator des Batteriekastens. In Abbildung 46 sind sowohl der Einbau der Batteriemodule in den Batteriekasten, als auch die Positionierung der Batterie unter dem Fahrzeug dargestellt.



Abbildung 44: Aufbau der „Trog“-Seite des ersten Batteriekastendemonstrators

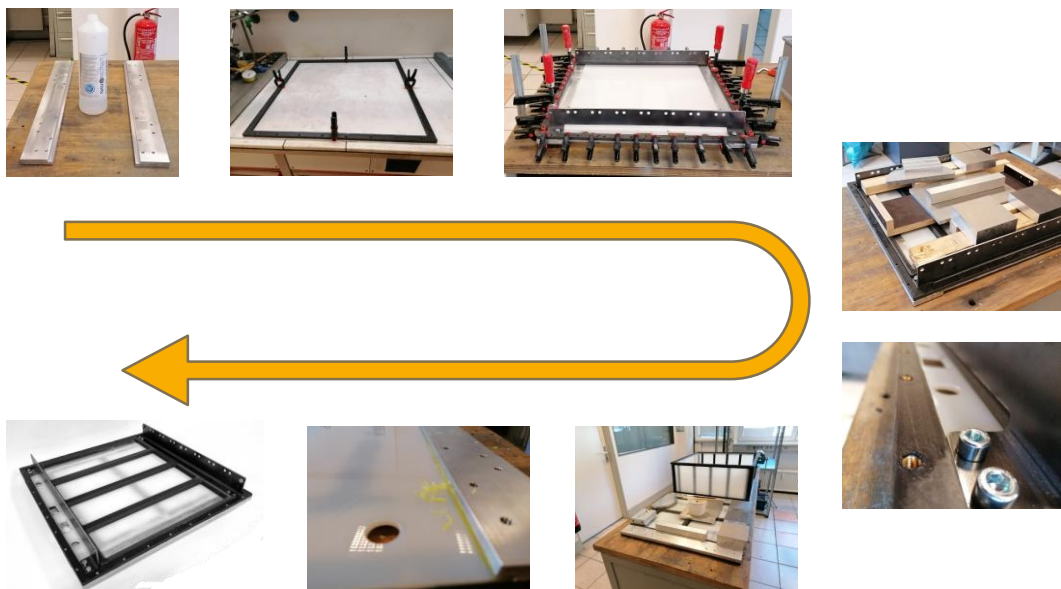


Abbildung 45: Aufbau der Anbindungsseite des ersten Batteriekastendemonstrators

Nachdem das Konzept des ersten Batteriesystems in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Projektpartnern erfolgt ist und daraus parallel der erste Demonstrator entstand, wurden von Magirus

die notwendigen Umbauten am Fahrgestellrahmen durchgeführt, sodass der erste Fit-Check im Fahrzeug selbst stattfinden konnte.

Nach dem erfolgreichen Fit-Check des Batteriesystems im Fahrzeug beim Projektpartner Magirus wurde ein weiterer Batteriekastendemonstrator mit den im Rahmen des Projektes entwickelten Technologien aufgebaut. Im Rahmen dieses Demonstrators wurden die Erkenntnisse aus dem Prüfstandtest im Rahmen von AP8 umgesetzt. Die Anbindungsseite ist in Abbildung 47 abgebildet. Diese ermöglicht die Befestigung von vier GSB-Batteriemodulen sowie die Durchführung von Kabeln für die Energieversorgung und den Informationsaustausch. Darüber hinaus ist ein mit geringem Aufwand wechselbares metallisches Opferblech vorgesehen, um den Batteriekasten vor Steinschlägen zu schützen.

In Abbildung 48 ist die Trogseite des Batteriekastens aus funktionalisierten in-situ Profilen dargestellt. Dazu wurden fünf Platten aus in-situ pultrudierten Profilen gepresst, vgl. AP 5, und mit den 3D-gedruckten Strukturen funktionalisiert. In der Abbildung sind auch noch einige Barcodes sichtbar, die während des Pultrusionsprozesses zur Identifikation aufgebracht wurden, vgl. AP 6.



Abbildung 46: Bilder von der Integration der Batteriemodule in den Batteriekasten und dem Einbau des Batteriesystems ins Erprobungsfahrzeug

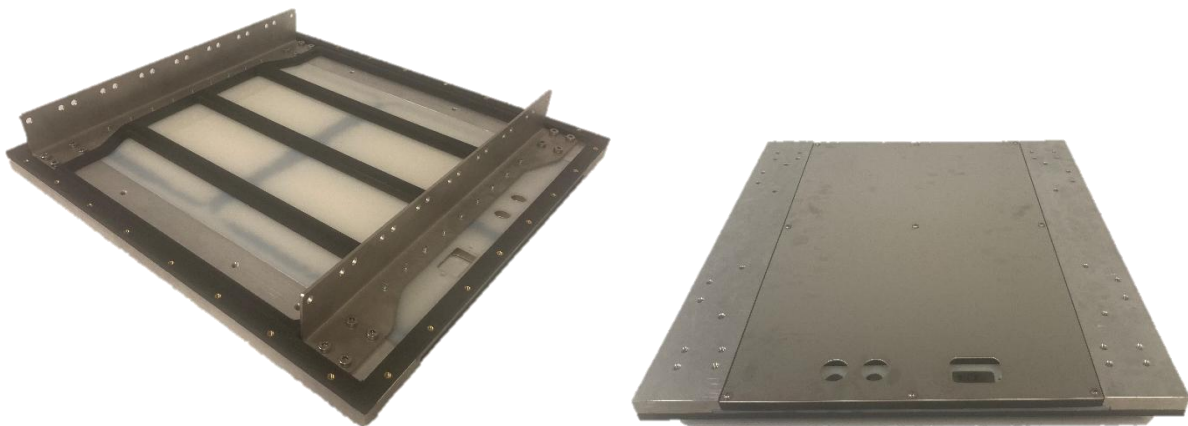


Abbildung 47: Finaler Prototyp der Anbindungsseite des Batteriekastens (links: Innenseite; rechts: Außenseite mit Opferblech für Steinschläge)



Abbildung 48: Finaler Prototyp der Trogseite des Batteriekastens aus funktionalisierten und gefügten in-situ Pultrudaten (links: Außenansicht; rechts: Innenansicht)

Arbeitspaket 8 – Validierung auf Belastungsprüfstand im Fahrzeug

Das Arbeitspaket 8 umfasst die Validierung am fahrzeugseitigen Belastungsprüfstand. Diese wurde durch einen Betriebsfestigkeits-Nachfahrversuch sowie durch eine zeitlich versetzte Funktionsprüfung durchgeführt. Beide Prüfumfänge wurden maßgeblich von Magirus koordiniert und gesteuert.

Betriebsfestigkeitsnachfahrversuch:

Um den Festigkeitsnachweis für die Verlastung im Fahrzeug zu erbringen, wurde der Batterie-Demonstrator in das Versuchsfahrzeug eingebaut und mit Sensoren ausgestattet, welche wiederum die wirkende Belastung an verschiedenen Stellen während der Fahrt auf der Teststrecke aufzeichneten. Diese Aufzeichnung wurde verwendet, um das Abfahren der Teststrecke gemäß einem festgelegten Prüfstandard in einem Rüttelprüfstand mit sechs Anregungsachsen bei der Realtest GmbH zu simulieren. Die Gesamtansicht der Prüfanordnung ist in Abbildung 49 dargestellt.



Gesamtansicht der Prüfanordnung

Prüfanordnung mit 6 Anregungszylindern:

- 3 Vertikalzylinder
- 2 Longitudinalzylinder
- 1 Lateralzylinder

Fahrtrichtung

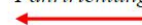


Abbildung 49: Gesamtansicht der Prüfanordnung mit 6 Anregungszylindern bei der Realtest GmbH

Der Prüflauf hat gezeigt, dass nach einem Fortschritt von $N = 11,3 \%$ (90,30 Teststrecken – km) der Prüflauf aufgrund sehr starker dynamischer Veränderungen abgebrochen werden musste. Gründe hierfür waren das Lockern von Schrauben an der mechanischen Struktur der Batterie, das starke Verformen des Batteriebodens schon während der Iteration und die Erkenntnis, dass die elektrischen Spannungen mehrerer Module außerhalb des Normbereichs waren.

Die detaillierten prüftechnischen Untersuchungen sowie die Zwischenergebnisse sind in einem Versuchsbericht festgehalten. Aufgrund dieses ersten Betriebsfestigkeitsnachweis wurden konzeptionelle Anpassungen am Batteriemodul und am Batteriekasten vorgenommen, die in den Bau des zweiten Demonstrators eingeflossen sind.

Funktionsprüfung:

Nach Abschluss des Nachfahrversuchs zur Betriebsfestigkeit und der darauffolgenden Nachbearbeitung am Batteriemodul selbst, fand die komplette Elektrifizierung im Demonstratorfahrzeug bei der Magirus GmbH statt. Diese Elektrifizierung wurde von GreenIng in den folgenden Bereichen maßgeblich unterstützt und durchgeführt: Konzeption, Entwicklung, Aufbau der Teilsysteme, Fahrzeugaufbau und Validierung. Das Gesamtsystem – Batteriemodul im Heck des Fahrzeuges inkl. Einbindung im Fahrzeug über Inverter (siehe Abbildung 50 links) – kann final elektrische Verbraucher für den Feuerwehrbedarf, unabhängig vom laufenden Fahrzeug, mit Strom versorgen. Somit gilt die Funktionsprüfung als bestanden.

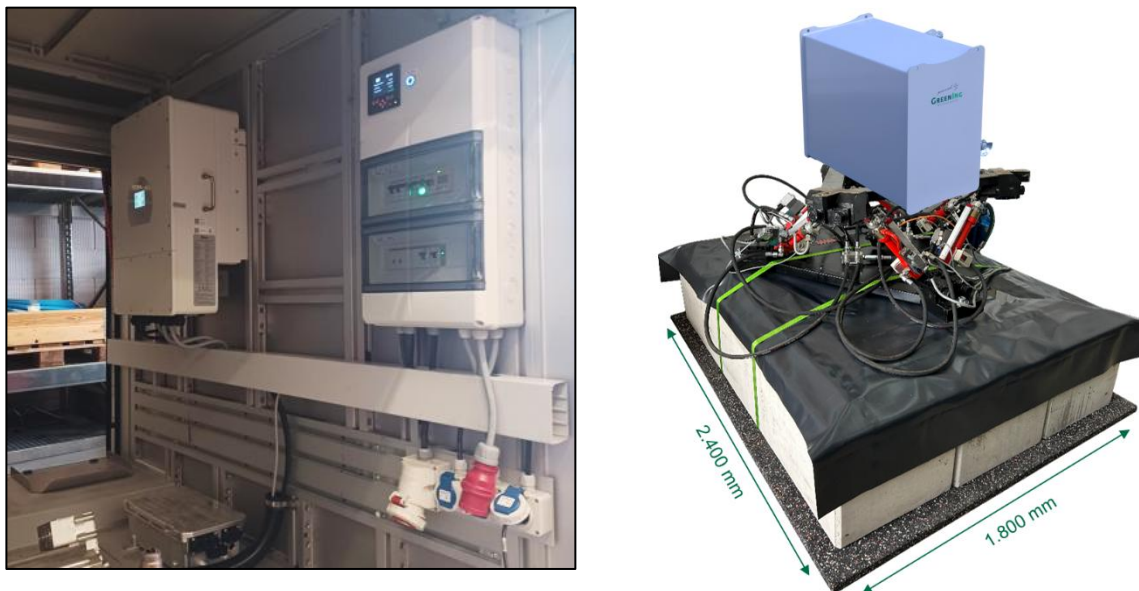


Abbildung 50: Links: Inverter angeschlossen an finales Batteriesystem zur Versorgung elektrischer Verbraucher; Rechts: Hydraulischer Hexapod der GreenIng GmbH & Co. KG

Zur Validierung des Batteriemodulkonzepts wurde bei GreenIng ein hydraulischer Hexapod aufgebaut, welcher es ermöglicht Vibrationsprüfungen zur mechanischen Erprobung der Modulgehäusebauteile durchzuführen. Gegenüber eines herkömmlichen Schwingungsprüfstands (Shaker) können mit dem Hexapod komplexere Belastungsprofile abgeprüft werden. Da es sich bei dem Hexapod um eine gebrauchte Komponente ohne dazugehörige Steuerung handelte, wurde von GreenIng eine passende Steuerung für die Modulerprobung entwickelt. Als Fundament dienen 3 je 2.000 kg schwere Betonklötze, auf welchen der Hexapod installiert ist. Durch das gezielte Ansteuern der sechs Hydraulikzylinder kann die Prüfplattform in sechs Freiheitsgraden bewegt werden. Zur Untersuchung von komplexeren und realitätsnahen Belastungen bietet der Hexapod die Voraussetzungen, um in zukünftigen Forschungsprojekten zum Einsatz zu kommen. Abbildung 49 rechts zeigt den Hexapod der Firma GreenIng.

Der im Rahmen von Arbeitspaket 7 erste entwickelte Geometriedemonstrator ohne Pultrusionsprofile (siehe Abbildung 44) musste aufgrund von Verzögerungen beim Aufbau des Demonstrators aus Pultrudaten, für die Durchführung des Tests auf dem Belastungsprüfstands genutzt werden. Da dieser

Demonstrator lediglich für geometrische Untersuchungen vorgesehen war, führten die aufgebrachten Lasten zu einem Versagen der strukturellen Integrität des Batteriekastens.

Darüber hinaus trat auf der Anbindungsseite an der Schnittstelle zum Fahrzeug Versagen auf, das in

Abbildung 51 abgebildet ist. Aufbauend auf einer Analyse des Schadensbildes wurde die Strukturanbindung überarbeitet, optimiert und im zweiten Batteriekastendemonstrator, vgl. Abbildung 47, umgesetzt.



Abbildung 51: Bild der verbogenen Batteriekasten-Anbindungsseite nach dem Belastungsprüfstand

Arbeitspaket 9 – Nachhaltigkeitsmanagement durch Reparatur und Recycling

Die Entwicklung des Reparatur- und Recyclingkonzepts für den Batteriekasten wurde von Beginn an bei der Konzeption, vgl. AP2, mitgedacht, sodass das umgesetzte Batteriekastensystem diese beiden Punkte direkt adressiert. Die zentralen Aspekte sind der grundsätzlich modulare Aufbau des Batteriekastensystems und die Materialauswahl, die sich auf der Polymerseite auf (glasfaserverstärkte) Polyamide beschränkt. Darüber hinaus sieht das Konzept auch Schutzmaßnahmen zur grundsätzlichen Vermeidung von Schäden vor. Für das Feuerwehrfahrzeug ist hier insbesondere das sogenannte „Opferblech“ zu nennen. Dieses dünne Aluminiumblech wird mit Abstand unter dem Batteriekasten in Richtung der Fahrbahn befestigt und nimmt so die Einschläge von Steinschlag auf. Bei Schäden am Opferblech kann dieses einfach gewechselt werden.

Der modulare Aufbau in Kombination mit den stoffschlüssigen, thermoplastischen Verbindungen ermöglicht je nach Notwendigkeit des spezifischen Schadensbilds die Auswahl einer geeigneten und materialeffizienten Reparaturmethode. Die verfügbaren Reparaturmethoden umfassen aufgrund der thermoplastischen Werkstoffe insbesondere thermische Fügeverfahren. So können Risse im Kunststoff durch Verschweißen wieder geschlossen werden. Schäden mit Faserbrüchen können entweder durch das Aufbringen von Patches oder das Einschweißen von unbeschädigten Teilen repariert werden. Darüber hinaus können größere Schäden auch durch Austauschen einzelner Module adressiert werden.

Die Begrenzung der Materialauswahl von (glasfaserverstärkten) Polyamiden bildet die Voraussetzung für gutes stoffliches Recycling. Dieses wurde am Fraunhofer ICT eingehender untersucht.

Für das Recycling von Kunststoffen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Am geläufigsten sind aktuell mechanische Recyclingmethoden. Dabei werden Kunststoffabfälle zunächst gewaschen und mechanisch zerkleinert und im Anschluss thermisch umgeformt und für neue Anwendungen verarbeitet. Die Grundstruktur der Polymere bleibt dabei erhalten. Mechanisches Recycling lässt sich gut mit sortenreinen Kunststoffabfällen durchführen.

Für die Versuche zum mechanischen Recycling wurden die folgenden Materialkombinationen verwendet:

Tabelle 5: Untersuchte Materialkombinationen beim mechanischen Recycling

Bezeichnung	Typ	Vol.-% Fasern gesamt	Vol.-% GF Fasern	Vol.-% CF Fasern
F5	Airly 450 g/m ²	46,98	38,70	8,28
F7	Airly 225 g/m ²	54,04	49,90	4,14
F8	Kardiart 225 g/m ²	62,14	58,00	4,14
F9	Kardiart 450 g/m ²	46,98	38,70	8,28
F12	Referenz GF Fasern	70,00	70,00	0,00

Um die aus der in-situ-Pultrusion gewonnenen Profile weiterzuverarbeiten, werden sie zunächst auf eine Größe von 60 mm × 60 mm zugeschnitten. Für den Zerkleinerungsprozess wird eine Schneidmühle von Hosokawa Alpine verwendet. Die Mühle ist mit einem Rotormesser und zwei Statormessern ausgestattet und hat eine maximale Drehzahl von 1500 1/min. Für das Zerkleinern der Profile wird zunächst ein Lochdurchmesser von 20 mm mit runder Form verwendet, gefolgt von einem Lochdurchmesser von 5 mm mit rechteckiger Form als zweiter Schritt. Dieses Zwei-Schritte-Verfahren zielt darauf ab, Granulatpartikel zu erzeugen, die in ihrer Größe kommerziell erhältlichem Spritzguss-Neumaterial ähneln. Ziel ist es, ähnliche Partikelgrößen zu erreichen, um das Dosierverhalten der Materialien zu standardisieren und so eine homogene Verteilung der Mischung aus Rezyklat und Neumaterial sicherzustellen.

Zur Trennung der Fraktionen wurde ein Analysesieb mit Maschenweiten von 0,71 mm bzw. 0,50 mm verwendet. Insgesamt wurden 50 g Material jeweils drei Minuten lang gesiebt. Das Sieb wurde ausschließlich horizontal in einer einzigen Achse bewegt, um die Ausbreitung der Staubfraktion in die Umgebung zu minimieren. Insgesamt wurden 25,15 kg zerkleinertes Material wie beschrieben fraktioniert. Anschließend wurden die Massenanteile des zerkleinerten Materials jeder Fraktion durch Wiegen bestimmt, und die Faserlängenverteilung (FLD) mittels FASEP® (mit doppelter Bestimmung) ermittelt. Aufgrund der Schwierigkeiten, Glasfasern von Kohlenstofffasern zu trennen, wurde die FLD-Analyse ausschließlich für die grobe Fraktion (>0,71 mm) gemäß dem manuellen Trennprozess durchgeführt. Das Ergebnis der Faserfraktion nach dem Zerkleinern und Sieben ist in Tabelle 6 zusammengefasst. Nach dem Sieben beträgt die grobe Fraktion (> 0,71 mm) etwa 75,5 M.-%, sie ist damit die dominierende Fraktion; die Staubfraktion (< 0,5 mm) folgt mit 18,7 M.-%. Die gemischte Fraktion (> 0,5 mm und < 0,71 mm) hat mit 5,8 M.-% den geringsten Anteil. Aufgrund der Herausforderungen bei der Trennung von Kohlenstofffaser und Glasfaser ist die Faserlängenverteilung (FLD) nur für die grobe Fraktion (> 0,71 mm) verfügbar; die Glasfasern entsprechen erwartungsgemäß einer Größe, die einem Neumaterial-Granulat von ca. 3 mm ähnelt.

Tabelle 6: Fraktionen nach dem Zerkleinern und Sieben sowie FLD der groben Fraktion

Fraktion	Siebanteil in M.-%	Glasfaserlänge in μm	Kohlefaserlänge in μm
Grobanteil (> 0,71 mm)	75,51 %	2970	1355
Mixtur (>0,5; <0,71 mm)	5,79 %	-	-
Staubanteil (<0,5 mm)	18,70 %	-	-

Für die Untersuchung der Recyclingfähigkeit wurden unterschiedliche Formulierungen betrachtet, wobei alle einen Fasergehalt von 30 M.-% (Glasfaser und Kohlenstofffaser) erreichen sollten. Wie bereits erwähnt enthält das Rezyklat einen Glasfaser- und Kohlenstofffaseranteil von 47,98 Vol.-% bis 62,14 Vol.-% (siehe Tabelle 5). Um den gewünschten Faser-Massenanteil zu erreichen, wird das Rezyklat mit reinem Polyamid verdünnt (Ultramid B3K der Firma BASF). Um den Rezyklatanteil einer Formulierung anzupassen, wird glasfaserverstärktes Polyamid (Ultramid B3WG6 der Firma BASF) zugesetzt. Die Formulierungen für jede Bedingung sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 7: Formulierung der Bedingungen für Kohlenstofffaservlies mit einem Flächengewicht von 255 g/m² (F7, F8)

Nr.	Bedingung	M.-% Rezyklat	M.-% B3K	M.-% B3WG6
1	Kardiert 225 g/m ²	37	60,8	2,2
2		30	56,6	13,4
3		20	50,7	29,3
4		10	44,8	45,2

Tabelle 8: Formulierung der Bedingungen für Kohlenstofffaservlies mit einem Flächengewicht von 450 g/m² (F5, F9)

Nr.	Bedingung	M.-% Rezyklat	M.-% B3K	M.-% B3WG6
1	Kardiert 450 g/m ²	37	50,8	12,2
2		30	48,5	21,5
3		20	45,3	34,7
4		10	42,1	47,9

Ziel der Recyclingversuche war es, den Einfluss der verschiedenen Parameter während des Recyclingprozesses auf die Eigenschaften des hergestellten Rezyklats zu untersuchen. Im Folgenden werden die untersuchten Kombinationen wie folgt bezeichnet: Das Rezyklat wird zunächst anhand des Produktionsprozesses des Kohlenstofffaser-Vlies und dessen Flächengewicht kategorisiert (FX). Für jede F-Kategorie wurde die Art der Fraktion (G, M, S), der Rezyklatanteil (1, 2, 3, 4) und die Art des Aufbereitungsprozesses (SG, EX) untersucht. Die Nomenklatur ist in Abbildung 52 (d) nochmals übersichtlich dargestellt.

Für das Compoundieren der Formulierungen wurde ein Zweiseitenextruder der Marke Leistritz verwendet. Das Extrudermodell Micro 27/GL-36D hat ein L/D-Verhältnis von 36 und einen äußeren Schneekendurchmesser von 27 mm. In Formulierungen, die sowohl B3K als auch B3WG6 enthalten, wurden die Komponenten vor dem Hinzufügen zur Dosierstation der Hauptzufuhr in einem Eimer vorgemischt. Alle Materialien wurden vor dem Compoundieren 24 Stunden bei 80 °C im Vakuumtrockner getrocknet. Zur Herstellung von Prüfkörpern wird eine Spritzgießmaschine Victory 330/120 tech von Engel verwendet. Die Prüfkörper entsprechen Typ A1 der DIN EN ISO 20753.

Abbildung 52 (a) zeigt die ermittelten Werte des E-Modul und der Zugfestigkeit aller Versuche der verschiedenen FX Kategorien. Abbildung 52 (b) zeigt die Ergebnisse in Abhängigkeit der Fraktion, Abbildung 52 (c) in Abhängigkeit des Rezyklatanteils und der Fraktion.

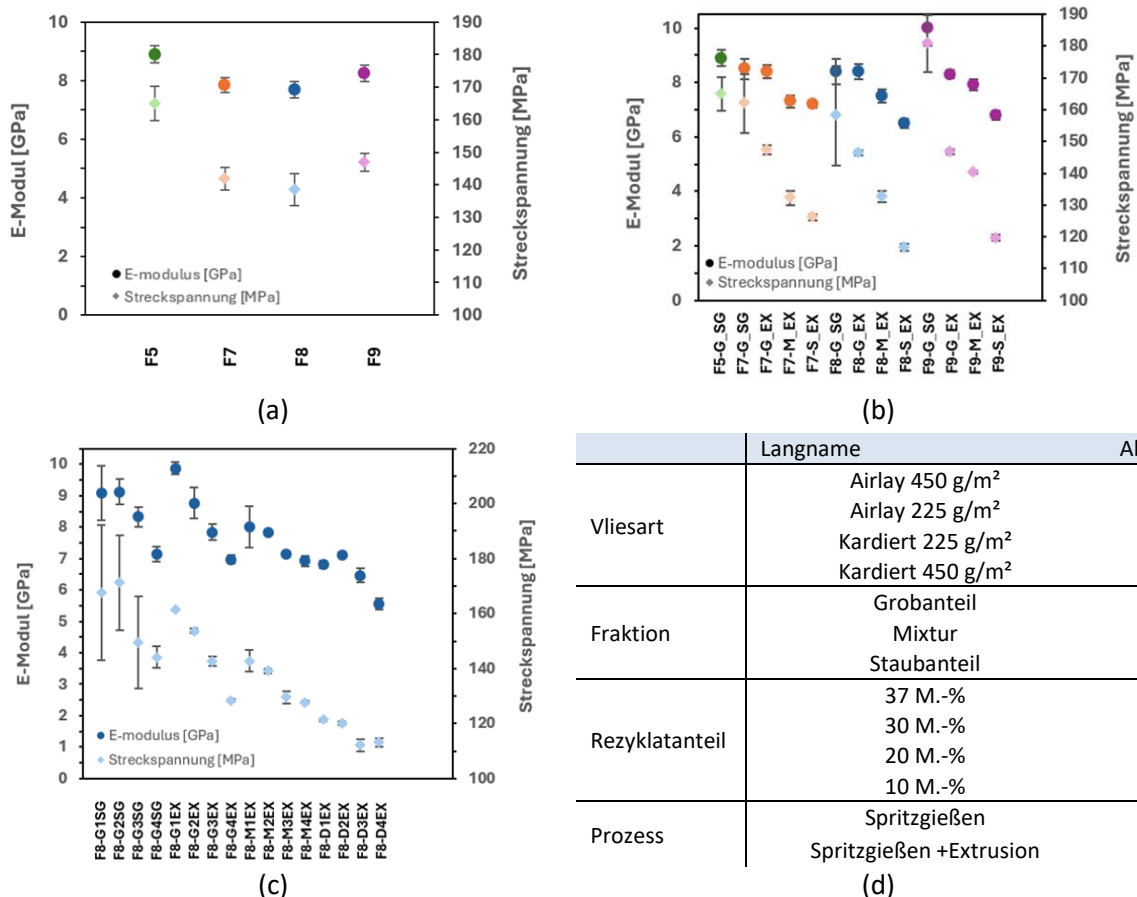


Abbildung 52: (a) E-Modul- und Zugfestigkeitsdaten aller Versuche der verschiedenen Vliesarten; (b) E-Modul und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Faserlänge; (c) E-Modul und Zugfestigkeit der F8-Probe in Abhängigkeit vom Rezyklatgehalt; (d) Nomenklatur.

Abbildung 52 (a) veranschaulicht den Einfluss des Kohlenstofffaseranteils in den Rezyklat-Proben. F5 und F9, die einen Kohlenstofffaseranteil von 8,28 % enthalten (das Doppelte von F7 und F8), weisen sowohl beim E-Modul als auch bei der Zugfestigkeit höhere Eigenschaften auf. Zusätzlich wird der Einfluss der Herstellungsmethode des Kohlenstofffaser-Vlies hervorgehoben. Das Airlay-Verfahren (F5, F7) zeigt bei gleichem Kohlenstofffaseranteil bessere Eigenschaften als das Kardierverfahren (F8, F9). Abbildung 52 (b) zeigt den Einfluss der Fraktion auf E-Modul und Zugfestigkeit. Die Eigenschaften sinken in der Reihenfolge $SG > G_EX > M_EX > S_EX$ über alle Bedingungen, was auf eine Korrelation zwischen Faserlänge und mechanischen Eigenschaften hindeutet. Bezüglich des Verarbeitungsprozesses zeigt der SG-Prozess konsistent eine hohe Standardabweichung, was auf das nicht gesiebte Ausgangsmaterial zurückzuführen ist und zu unterschiedlichen Faserlängen führt. Im Gegensatz dazu weisen alle EX-Formulierungen, unabhängig vom Anteil der Faserlänge, eine sehr geringe Standardabweichung auf, was darauf hindeutet, dass der Siebvorgang effektiv ist.

Um den Einfluss der Herstellungsmethode des Kohlenstofffaser-Vlies und seines Flächengewichts auf den Recyclingprozess zu veranschaulichen, können F7 & F8 mit F5 & F9 verglichen werden. F7 und F8, hergestellt mit Kohlenstofffaser-Vlies mit einem Flächengewicht von 225 g/m² und einem geringeren Kohlenstofffaseranteil von 4,14 %, zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen SG und G_EX. Im Gegensatz dazu zeigt F9, hergestellt mit Kohlenstofffaser-Vlies bei einem Flächengewicht von 450 g/m² und einem höheren Kohlenstofffaseranteil von 8,28 %, einen deutlichen Unterschied zwischen SG und G_EX. Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss des Kohlenstofffaseranteils auf die Eigenschaften erheblich ist.

Abbildung 52 (c) dient dazu, weitere Ergebnisse zu F8 zu veranschaulichen. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Abbildung 52 (b) zeigt die SG-Gruppe die größte Standardabweichung für E-Modul und Zugfestigkeit. Alle Formulierungen zeigen einen konsistenten Trend und zwar dass die mechanischen Eigenschaften mit sinkendem Rezyklatanteil abnehmen. Dies deutet darauf hin, dass die im Rezyklat enthaltenen Kohlenstofffasern und Glasfasern eine Verstärkung für das hergestellte Compound bewirken.

Die Versuche zum mechanischen Recycling lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der Vergleich der Formulierungen F5 und F9, die jeweils einen Kohlenstofffaser- und Glasfaseranteil von 8,28 % aufweisen, zeigt, dass ein höherer Anteil dieser Fasern zu verbessertem E-Modul und zu höherer Zugfestigkeit führt. Zudem beeinflusst das Herstellungsverfahren des Kohlenstofffaser-Vlies die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe signifikant. Das Airlay-Verfahren (für F5 und F7 verwendet) erzielt bei gleichem Faservolumenanteil bessere mechanische Eigenschaften als das Kardier-Verfahren (für F8 und F9 eingesetzt). Dies deutet darauf hin, dass die Wahl der Herstellungstechnik entscheidend für die Optimierung der Materialeigenschaften ist.

Die Faserlängenanalyse zeigt eine positive Korrelation zwischen Faserlänge und mechanischen Eigenschaften, wobei die beobachtete Eigenschaftensreihenfolge ($SG > G_EX > M_EX > S_EX$) diese Beziehung widerspiegelt. Längere Fasern tragen zu einer stärkeren Verstärkung des Verbundmaterials bei. Zudem deutet die Standardabweichung im SG-Zustand darauf hin, dass nicht gesiebte Prozesse zu unterschiedlichen Faserlängen führen, was die Ergebnisstabilität negativ beeinflussen kann. Insgesamt lässt sich allerdings festhalten, dass alle untersuchten Materialkombination nach dem mechanischen Recycling weiterhin sehr hohe mechanische Kennwerte erreichen und daher nach dem Einsatz im Batteriekasten wieder dem Kreislauf zugeführt werden können.

Im Fall von gemischten bzw. stark verunreinigten Kunststoffabfällen sind mechanische Methoden schwierig durchführbar oder führen zu einem Qualitätsverlust im Material. In diesem Fall stellen chemische Recyclingmethoden eine komplementäre Ergänzung dar. Im chemischen Recycling wird die Polymerkette durch unterschiedliche Methoden gespalten mit dem Ziel Monomere oder andere Grundchemikalien herzustellen, die wieder in hochwertige Anwendungen überführt werden können. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass sich diese Chemikalien sehr gut reinigen lassen und eine Repolymerisation von erhaltenen Monomeren zu Kunststoffen mit neuwertigen Eigenschaften führt. [5, 6]

Im Fall von Polykondensationspolymeren wie PA6 eignet sich die Solvolyse als chemische Recyclingmethode. Hierbei werden schwach nukleophile Lösungsmittel eingesetzt, um die Polymerbindung zu spalten und das Monomer zurückzugewinnen. Je nach eingesetztem Lösungsmittel können verschiedene Methoden unterschieden werden. Für den vorliegenden Abfallstrom wurde zum einen die Glykolyse unter Einsatz von Ethylenglykol als Lösungsmittel durchgeführt. Als Katalysatoren wurden Diazabicycloundecen (0,05 Äquivalente in M.-%) und Zinkacetat (0,05 Äquivalente in M.-%) eingesetzt. Der Vorteil dieser Methode liegt in den vergleichbaren niedrigen Reaktionstemperaturen und -drücken. Nach Beendigung der Reaktion wurde die Lösung abgekühlt, anschließend filtriert und der Rückstand mit Ethanol gewaschen. Der feste Filtrationsrückstand wurde im Vakuumtrockenschrank getrocknet. Nach der Glykolyse lagen die Fasern vereinzelt vor und das Matrixmaterial hatte sich während der Reaktion zersetzt. Das ϵ -Caprolactam konnte in dieser Lösung nur in geringen Mengen (ca. 2,3 %) nachgewiesen werden. Es wird vermutet, dass sich im Prozess andere Zersetzungsprodukte bzw. Derivate von ϵ -Caprolactam gebildet haben.

Als zweite Methode wurde die Hydrolyse zu Caprolactam mit Wasser als Lösungsmittel betrachtet. Diese Methode erfordert höhere Temperaturen und Drücke. Ein Vorteil liegt jedoch darin, dass sich das Produkt leichter aufreinigen und weiterverarbeiten lassen. [7, 8] Hierbei wurde das aPA6 GF Profil in einer Natriumhydroxidlösung in einem Reaktor unter Temperatur (250 °C) und Druck (Stickstoff 50 bar) umgesetzt. Nach dem Abkühlen wurde der Reaktor geöffnet, die Rückstände abfiltriert, mit Wasser gewaschen und im Vakuumtrockenschrank bei 40 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Es konnte eine Ausbeute von 20,4 % ϵ -Caprolactam bezogen auf das zersetzte Matrix-Material erreicht werden. Neben ϵ -Caprolactam entstanden noch eine Reihe von Nebenprodukten, die zunächst nicht weiter charakterisiert wurden.

Da für beide Prozesse jeweils nur ein Versuch mit generischen Bedingungen durchgeführt werden konnte, wird davon ausgegangen, dass eine gezielte Optimierung der Reaktionsparameter zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse führen kann. Zusammenfassend konnten mit der Hydrolyse deutlich bessere Ergebnisse erreicht werden als mit der Glykolyse. Dies liegt vor allem an der deutlich selektiveren Zersetzung in der Hydrolyse, sodass im Wesentlichen ein Hauptprodukt (ϵ -Caprolactam) erhalten wird. Zudem beschleunigen die extremeren Prozessbedingungen (Temperatur und Druck) bei der Hydrolyse den Zersetzungsprozess.

Abschließend wurde noch eine vergleichende Ökobilanzstudie für den im Rahmen von AP7 entwickelten Batteriedemonstrator durchgeführt. Für einen validen Vergleich wurde eine alternative Variante des Batteriekastens in Aluminiumbauweise konzeptioniert und dimensioniert. Dabei ergibt sich ein Gewicht des Alubatteriekastens von 27,35 kg, der im Vergleich zur Pultrudatbauweise, die 25,58 kg wiegt, ca. 7 % schwerer ist.

In der vorliegenden vergleichenden Ökobilanzstudie wurden alle relevanten Bauteile der Batterie und des Batteriekastens für den im Rahmen des Projektes entwickelten Demonstrators und der Referenzbauweise aus Aluminium berücksichtigt. Als funktionelle Einheit wurde die gesamte Stückliste soweit bisher bekannt des entwickelten Demonstrators für die Cradle-to-Gate-Betrachtung (Umweltauswirkungen bei der Produktion) herangezogen. Die Nutzungsphase wurde aufgrund nicht verfügbarer Szenariendaten (z.B. Anzahl Ladezyklen und gefahrene Kilometer in einem gewissen Zeitraum) und einer hohen Unsicherheit durch Verluste und verschiedene Strommische nicht berücksichtigt. Die Entsorgung wurde in dieser Bilanzierung nicht einbezogen. Die Ökobilanz wurde mithilfe der Software "SimaPro", Version 10.2.0.0, durchgeführt. Dabei wurden sowohl Standardprozesse aus der Datenbank Ecoinvent 3.11 als auch Primärdaten, die im Rahmen des Projekts erhoben wurden, berücksichtigt. Die Studie wurde gemäß den gängigen Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 durchgeführt.

Wirkungsabschätzung - Cradle-To-Gate

Wie im Baumdiagrammen zu sehen (Abbildung 53), entfallen bei einer Cradle2Gate-Betrachtung der CO₂-Emission bei der Herstellung der Demonstratorbatterie (vgl. AP7) zwei Drittel der Emissionen auf die Herstellung der Batterien und nur etwa ein Drittel auf die Herstellung des Batteriegehäuses. Beim

Batteriegehäuse treiben insbesondere die metallischen Komponenten die CO₂-Emissionen nach oben. Insgesamt ergibt sich für die entwickelte Pultrudatbauweise eine Klimawirkung von 280,38 kg CO₂e für den Batteriekasten. Im Vergleich dazu liegen die 381,89 kg CO₂e in der Alubauweise um etwa 25 % höher.

Fazit zur Ökobilanzierung

Im Cradle-to-Gate Vergleich weist das in diesem Projekt neu entwickelte Batteriekastenskonzept eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen von etwa 25 % gegenüber einer vergleichbaren Bauweise aus Aluminium auf. Die Bilanz ergibt jedoch einen etwa doppelt so großen Impact durch die Herstellung der Batteriemodule, bzw. insbesondere durch die eingesetzten Batterien. Es ist bei der Skalierung zu größeren Batterien davon auszugehen, dass der Anteil des Batteriekastens sinkt, da die Batterien volumetrisch wachsen und die Umhüllungsfläche nur zweidimensional. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass in der Nutzungsphase des Feuerwehrfahrzeugs weitere Treibhausgasemissionen vermieden werden können. Dies gilt insbesondere, wenn erneuerbare Stromquellen für das Aufladen der Batterien eingesetzt werden. Eine Quantifizierung dieser Emissionen ist bislang aufgrund von nicht verfügbaren Nutzungsszenarien nicht möglich gewesen.

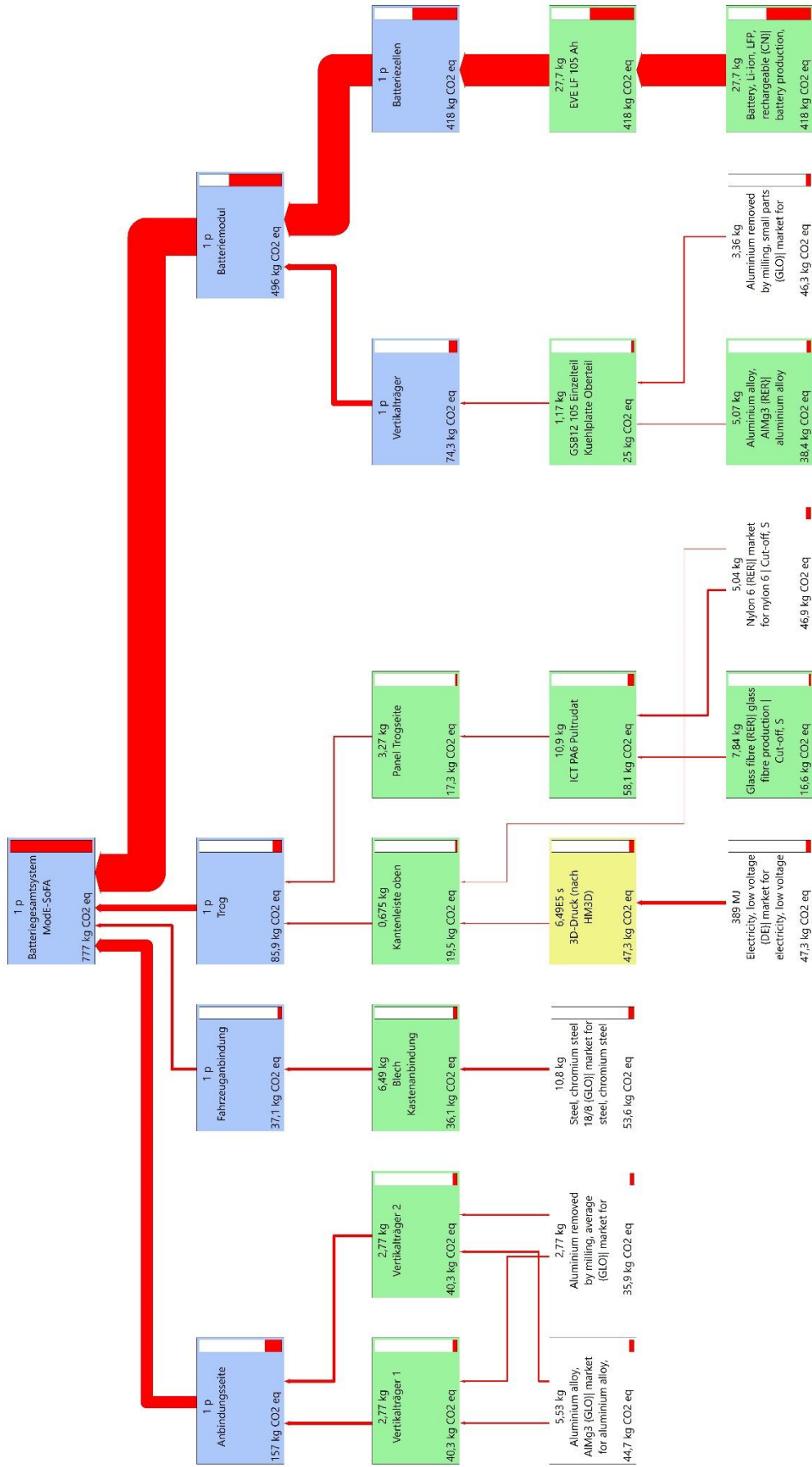


Abbildung 53: Netzwerkdigramm für das Demonstrator-Batteriesystem

Gegenüberstellung der Ziele mit den erreichten Ergebnissen

Tabelle 9: Verwendung Teilvorhaben GreenIng

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Entwicklung skalierbares Batteriemodul	Ein in alle Raumrichtungen skalierbares Batteriemodulkonzept wurde erarbeitet.
Entwicklung skalierbares Batteriesystem	Ein Gehäusekonzept, welches sich flexibel an die skalierbaren Batteriemodule adaptieren lässt wurde erarbeitet.
Fügen und Verspannen der Module	Das erforschte Batteriemodulkonzept enthält einen Verspannmechanismus, welcher es ermöglicht, die Zellen nach Herstellerangaben zu verspannen.
Gewichtseinsparung	Das Gewicht konnte um 15% zur herkömmlichen Bauweise reduziert werden.
Validierung skalierbares Batteriemodul	Die Validierung konnte anhand der Anwendung in dem Feuerwehrfahrzeug von Magirus erfolgen.
Reparaturkonzept	Die Anforderungen an ein demontagegerechtes Design wurden bei der Konzeption des Batteriemoduls berücksichtigt.

Tabelle 10: Verwendung Teilvorhaben Produktionsdatenerfassung und -auswertung (Selfbits)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Erhebung von Anforderungen und Definition von Schnittstellen für die Produktionsdatenerfassung im Pultrusions- und Fügeprozess	Anforderungen und Schnittstellen wurden ausgearbeitet und dokumentiert.
Entwicklung des produktionsübergreifenden Tracking Konzeptes	Produktionsübergreifendes Tracking Konzept für kontinuierlich gefertigte Paneele und montierte/gefügte Baugruppen wurde ausgearbeitet.
Implementierung des Systems zur Produktionsdatenerfassung und Weiterverarbeitung	An der ICT Pultrusionsanlage wurden Produktions- und Trackingdaten sowie integrierte Prozessdaten während der Produktion erfasst und an die Cloud-Infrastruktur übermittelt. Pultrudierte Paneele wurden meterweise mit dem Continuous Inkjet Verfahren bedruckt und sind somit nachverfolgbar.
Entwicklung von Auswertungsalgorithmen zur Optimierung des Pultrusionsprozesses basierend auf erfassten Produktions- und Tracking-Daten	Live-Daten für Pultrusionsversuche wurden am Signage Screen an der Anlage visualisiert. Anlagenführer und Versuchsleiter können die Prozessdaten über Selfbits Analytics anwendungsspezifisch auswerten und Maßnahmen zur Verbesserung datengetrieben einleiten.
Entwicklung einer Web-GUI zur Visualisierung der Bauteil-Auswertungen und Prozessinformationen	Registrierter Nutzer kann Bauteil-Auswertungen und Prozessinformationen über eine mobile App am Tablet oder als Web App am Browser abrufen. Stamm- und

	Bewegungsdaten können vom Versuchsleiter über die App eingetragen werden.
Ableitung von Handlungsempfehlungen bezüglich Recycling, Demontage und Verwertung der bauraumgerecht montierten und geschweißten Batteriesysteme	Die QR-Codes auf dem bauraumgerecht montierten Batteriesystem erlaubt den langfristigen Abruf des digitalen Produktpasses mitsamt Recycling-, Demontage- und Verwertungshinweisen über eine öffentlich zugängliche Webanwendung.
Ableitung von Handlungsempfehlungen innerhalb der Wertschöpfungskette zur Optimierung der Pultrusions- und Fügeprozesse basierend auf produktionsübergreifender Datenerfassung und Teilennachverfolgung	Autorisierte Nutzer können in der App am digitalen Produktpass des nachverfolgten Teils Mängel oder Feedback hinterlegen. Dadurch können die Zulieferer von Einzelteilen dieser nachverfolgten Teile das Feedback nutzen, um Maßnahmen zur Optimierung der Pultrusions- oder Fügeprozesse abzuleiten.

Tabelle 11: Verwendung Teilvorhaben Prozessentwicklung in der Pultrusion (ICT)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Identifikation eines geeigneten Flammenschutzmittels für die insitu-Pultrusion	Durch eine umfangreiche Recherche und das Durchführen von Laborversuchen konnten geeignete Flammenschutzmittel identifiziert werden.
UL 94 Prüfung an den hergestellten Demonstratoren	Eine UL 94 V-0 Klassifizierung konnte an den Demonstratoren erreicht werden.
Entwicklung einer Rezeptur, die eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit erlaubt bei gleichzeitiger Robustheit des Verfahrens	Durch eine umfassende Rezepturentwicklung ist ein wirtschaftlicher und robuster Prozess möglich .
Erfolgreiche Herstellung flächiger Textilien (Vliese) mit geeigneter Schlichte	Mit Hilfe des STFI e.V (Sächsisches Textil Forschungsinstitut) konnten geeignete Vliese für den in-situ Pultrusionsprozess hergestellt werden.
Erfolgreiche Verarbeitung der hergestellten flächigen Textilien	Die Vliese konnten erfolgreich im Pultrusionsprozess verarbeitet werden.
Integrierte EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit)	Es konnte eine EMV-Abschirmung von 50 dB erreicht werden.
Prozess- und Materialparameter können mit dem jeweiligen Paneel nachverfolgbar verknüpft werden	Durch einen auf dem Panel aufgedruckten QR-Code lassen sich die Paneele nachverfolgen.
Entwicklung einer Recyclingmethodik für die hergestellten Profile	Durch eine umfassende Recyclingstudie konnte eine geeignete Recyclingmethode für die Profile gefunden werden.

Tabelle 12: Verwendung Teilvorhaben Verfahrensentwicklung Thermoplastschweißen für faserverstärkte Sonderbauteile (IKT)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Konzeptionierung des Batteriemodul-/Batteriegehäusebaukastens	Batteriegehäusebaukasten für Heck- und Seitensystem wurde erfolgreich konzipiert.
Identifikation des geeigneten Verfahrens zum Fügen der jeweiligen Komponente	Für die Flächenelemente wurde das Heißpressen als geeignetste Methode identifiziert; für die Anbringung der Funktionselemente das Heizelementschweißen in Kombination mit einem IR-Strahler
Definition der Kriterien für die Funktionselemente, Identifikation geeigneter 3D-Druckfilamente und Prozessparameter für eine gute Anhaftung im 3D-Druck	Prozessparameter für die Anbringung der Funktionselemente wurden erfolgreich identifiziert.
Weiterentwicklung/Anpassung der Schweißteststände	Für die Durchführung der Versuche wurden die Teststände entsprechend angepasst.
Optimierung des Fügeprozesses für faserverstärkte Thermoplaste	Mithilfe einer experimentellen Untersuchung wurden die optimalen Schweißparameter identifiziert.
Erfolgreiches Verschweißen der verschiedenen Teile/Module im Labormaßstab	In Vorversuchen wurden die Teile mit Erreichen einer hohen Verbindungsfestigkeit im Labormaßstab gefügt.
Übertrag des Labormaßstabs auf die industrielle Fertigung	In Zusammenarbeit mit CompriseTec wurde der Übertrag auf die industrielle Fertigung erfolgreich umgesetzt.
Erfolgreicher Zusammenbau der Gesamtkonstruktion	Batteriekastendemonstrator wurde aufgebaut.
Prozessbegleitende LCA-Analyse	In Zusammenarbeit mit CT wurde eine LCA-Analyse durchgeführt.

Tabelle 13: Verwendung Teilvorhaben Aufbau Demonstrator und Validierung (Magirus)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Use Case	Demonstratorfahrzeug wurde festgelegt, welches den Bereich Sonderfahrzeug im Projekt widerspiegelt.
Definition Packaging- Konzept & Sicherstellung Funktionalität	Gesamtfunktionsumfang wurde definiert und Demonstrator-Konzept erstellt.
Konzept Thermomanagement erarbeitet	Gemeinsam mit Projektpartnern wurde ein Konzept erarbeitet und bei der Herstellung des Batteriedemonstrators berücksichtigt.
Demonstrator aufgebaut	Fahrzeug ist am Rahmen umgebaut und mit dem finalen Batteriesystem (als Heckmodul) aufgebaut.
Demonstrator validiert und getestet	Der Betriebsfestigkeitsnachfahrversuch und die Funktionsprüfung sind durchgeführt und die Ergebnisse festgehalten.

Tabelle 14: Verwendung Teilvorhaben Modulare skalierbare Batteriegehäuse zur Elektrifizierung von Sonderfahrzeugen (CompriseTec)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Konzeptionierung und Konstruktion des modularen Baukastensystems	<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption und Entwicklung eines umfassend modularen Batteriebaukastensystems auf Basis von in-situ pultrudierten Profilen • Entwicklung eines flexiblen Anbindungskonzepts für das Fahrzeug Iveco E-Daily
Prozessentwicklung der in-situ Pultrusion	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung einer pultrudierbaren und fügeoptimierten Profilgeometrie • Integration eines Carbonfaservlieses in das Profil für EMV-Abschirmung • Befähigung des Pultrusionsprozesses auf der CompriseTec-Anlage
Funktionalisierung im 3D-Druck	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl eines kompatiblen PA-Druckfilaments und Entwicklung eines Prozesses zur Funktionalisierung von in-situ Pultrudaten auf einem Desktop-3D-Drucker • Erfolgreiche Übertragung des Prozesses auf ein Industrieroboterbasiertes Drucksystem, inkl. Workflow zur Erstellung von Druck-Jobs
Entwicklung geeigneter Fügeverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines sequenziellen und eines parallelen Pressprozesses, inkl. Werkzeugtechnik zur Flächenerzeugung aus einzelnen Pultrudaten • Herstellung von Full-Size Platten aus pultrudierten Profilen für den Batteriekastendemonstrator
Produktionsdatenerfassung und -auswertung	Aufbau der Grundlagen für die kontinuierliche Prozessdatenerfassung und -verarbeitung der CompriseTec-Pultrusionsanlage
Demonstratorherstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines Batteriekastens zum Einbau ins Chassis hinter die Hinterachse des Iveco E-Daily • Herstellung von einem geometrischen Batteriekastendemonstrator zur Validierung der Aufbaureihenfolge und zur Einpassung der Batteriemodule und zur Einbauvalidierung im Fahrzeug • Herstellung eines Batteriekastens als Technolgie-demonstrator für die thermoplastische Bauweise aus gefügten pultrudierten Profilen
Validierung auf Belastungsprüfstand und im Fahrzeug	Analyse der Schwachstellen der Chassisaufnahme des Batteriekastens nach Prüfstandtest und Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen
Nachhaltigkeitsmanagement durch Reparatur und Recycling	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines bauweisenspezifischen Reparaturkonzepts für unterschiedliche Bereiche und Schäden des Batteriekastens

	<ul style="list-style-type: none"> • Nachweis einer Vermeidung von 20% CO₂e-Emissionen des Batteriekastens im Vergleich zu einer konventionellen Aluminiumbauweise (Cradle-2-Gate-Bilanz)
--	---

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Siehe Erfolgskontrollberichte der Konsortialpartner.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

GreenIng GmbH & Co. KG:

Die Entwicklung eines skalierbaren Batteriesystems ist mit einer Vielzahl an technischen Herausforderungen und mit entsprechend hoher Entwicklungsleistung verbunden. Insbesondere für kleiner Firmen stellt dies ohne die Zuwendungen eine nicht zu bewältigende Aufgabe dar. Die Förderung und die Zusammenarbeit mit anderen Firmen und Forschungseinrichtungen bot die notwendigen Voraussetzungen für die Grundlagenentwicklung eines solchen Konzeptes.

Selfbits GmbH:

Das Gesamtvorhaben war äußerst ambitioniert und konnte aus Sicht von Selfbits nur durch die enge Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern im Verbund erfolgreich umgesetzt werden. Die im Projekt verfolgten Ziele erforderten methodische und konzeptionelle Leistungen, die über die normale Geschäftstätigkeit von Selfbits hinausgingen. Ohne die Zuwendung wäre es dem Unternehmen nicht möglich gewesen, die hierfür notwendigen personellen, technischen und finanziellen Ressourcen bereitzustellen.

Die im Projekt erforderlichen Investitionen in Know-how-Aufbau und Entwicklungsarbeit hätten für Selfbits als einzelnes Unternehmen ein zu hohes wirtschaftliches Risiko dargestellt und wären ohne Förderung nicht zu realisieren gewesen.

Durch die öffentliche Förderung konnte Selfbits gezielt in die Evaluation von Lösungsansätzen und die Entwicklung innovativer Komponenten investieren, die erst mittel- bis langfristig wirtschaftlichen Nutzen entfalten. Die Zuwendung ermöglichte es, neue strategische Kompetenzen aufzubauen und die Kundenanfragen im Bereich der Nachverfolgung und des digitalen Produktpasses durch ein reduziertes Risiko wesentlich mutiger und agiler zu gestalten.

Eine vollständige Vorfinanzierung und Absicherung gegen technische und wirtschaftliche Risiken war mit Eigenmitteln nicht möglich. Die Förderung war daher entscheidend, um das wirtschaftliche Risiko auf ein tragbares Maß zu reduzieren und die Teilnahme am Projekt überhaupt zu ermöglichen. Zugleich trug die Verbundstruktur mit den Konsortialpartnern dazu bei, das wissenschaftlich-technische Risiko erheblich zu senken und das Projekt erfolgreich zum Abschluss zu bringen.

Fraunhofer ICT

Die Fraunhofer Gesellschaft ist als nicht auf Gewinnerzielung ausgerichteter eingetragener Verein als gemeinnützig anerkannt. Die gilt in gleichem Maße auch für die einzelnen Institute, so auch für das Fraunhofer ICT. Die der Fraunhofer Gesellschaft aus der Bund-Länder Finanzierung zur Verfügung stehenden Mittel der Grundfinanzierung werden von den Zuwendungsgebern zum Aufbau neuer Kompetenzen zur Verfügung gestellt und stehen somit nicht zur Finanzierung öffentlich geförderter Projekte zur Verfügung. Insbesondere bei der Entwicklung von alternativen Antriebskonzepten sieht das ICT großes Potential und möchte dies als Forschungsinstitut in der Zusammenarbeit mit der Industrie weiter voranbringen.

Institut für Kunststofftechnik (IKT):

Die Zuwendung ist für die Universität Stuttgart - Institut für Kunststofftechnik (IKT) - notwendig, da durch die vielseitige Aufgabenstellung zur Umsetzung der angestrebten Entwicklung ein Material- und Personalaufwand entsteht, der nicht aus der Grundausstattung einer universitären Forschungseinrichtung abgedeckt werden kann. Das IKT sieht die Entwicklung alternativer

Gehäusekonzepte im Bereich der E-Mobilität als wichtiges Forschungsfeld an, um zukünftig durch die Leichtbaueigenschaften der neuen Werkstoffe CO₂-Emissionen einsparen zu können. Gleichzeitig ist das Etablieren und Erforschen von Weiterverarbeitungsverfahren ein zentraler Ansatzpunkt, um die vielversprechende in-situ Pultrusion einem breiteren Einsatzgebiet zugänglich zu machen.

Magirus GmbH:

Magirus sieht die Entwicklung modularer und skalierbarer Batteriesysteme als zentrale Voraussetzung, um elektrifizierte Sonderfahrzeuge – insbesondere Feuerwehrfahrzeuge – mit hohem Individualisierungsgrad herstellen zu können. Durch das geförderte Projekt soll ein grundlegender Zugang zur Elektrifizierung in der Branche für Sonderfahrzeuge geschaffen werden. Die Förderung ermöglicht, Know-how aufzubauen, Stakeholder zu überzeugen und Erfahrungen für die zukünftige Umsetzung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte zu sammeln. Da Magirus als Mittelstand nicht über ausreichende finanzielle Reserven verfügt, kann die Entwicklung einer neuen Technologie ohne Förderung nicht realisiert werden. Trotz technischer und wirtschaftlicher Risiken investiert Magirus erhebliche Ressourcen und setzt auf die enge Zusammenarbeit mit Projektpartnern aus verschiedenen Fachbereichen.

CompriseTec:

CompriseTec führte in diesem Vorhaben projektspezifische Arbeiten aus, die nicht mit den sonstigen im Tagesgeschäft anstehenden Aufgaben in Verbindung stehen. Der finanzielle Spielraum muss aus Gewinnen des laufenden Tagesgeschäfts erwirtschaftet werden. Im Wettbewerb der kleinen und mittleren Unternehmen, sind aber keine so hohen Überschüsse zu erwirtschaften, sodass die Markteinführung einer neuen Prozesskette nicht alleine finanziert werden kann. Das avisierte Vorhaben barg umfassende technische sowie wirtschaftliche Risiken, für die CompriseTec im Rahmen des Vorhabens umfassende Kapazitäten und Mittel in die Entwicklungsarbeit investierte. Die Entwicklung der funktionsintegrierten Paneele folgt einem interdisziplinären und kompetenzübergreifenden Ansatz, für welchen Werkstoffwissenschaften unterschiedlicher Materialien und zugehöriger Prozesssysteme kombiniert werden müssen. Ohne kooperative Zusammenarbeit mit den Partnern als Know-how-Träger und Marktteilnehmer der verschiedenen Disziplinen in diesem Projektkonsortium hätte die Komplexität des Themas von CompriseTec nicht erarbeitet werden können.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Siehe Erfolgskontrollberichte der Konsortialpartner.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

GreenIng GmbH & Co. KG:

GreenIng sind keine vergleichbaren Konzepte bekannt.

Teilvorhaben Produktionsdatenerfassung und -auswertung (SB):

Selfbits sind keine vergleichbaren Konzepte bekannt.

Teilvorhaben Prozessentwicklung Pultrusion (ICT)

Dem ICT sind keine Arbeiten auf dem Gebiet Prozessentwicklung Pultrusion bekannt

Teilvorhaben Verfahrensentwicklung Thermoplastschweißen für faserverstärkte Sonderbauteile (IKT)

Dem IKT sind keine Arbeiten auf dem Gebiet des Fügens thermoplastischer Pultrusionsprofile bekannt.

Teilvorhaben Aufbau Demonstrator und Validierung (MAG):
Magirus sind keine vergleichbaren Konzepte bekannt.

Teilvorhaben Modulare skalierbare Batteriegehäuse zur Elektrifizierung von Sonderfahrzeugen (CT):
CompriseTec sind keine vergleichbaren Konzepte bekannt.

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen

Tabelle 15: Veröffentlichungen Teilvorhaben Konsortialführer

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
ModE-SoFa - modular and scalable battery housings for special purpose vehicles „Enhancing Lightweight Potential Through Modularization in Battery Casings for Special Purpose Vehicles“	04/2024	SAMPE Europe (Karlsruhe)	Darstellung der Ergebnisse zu Modularisierung und Skalierung von Batteriesystemen

Tabelle 16: Veröffentlichungen Teilvorhaben Verfahrensentwicklung Thermoplastschweißen für faserverstärkte Sonderbauteile (IKT)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Functionalization of Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Pultrusion Profiles by Welding	01/2025	Journal of Composites Science https://doi.org/10.3390/jcs9010006	Darstellung der Ergebnisse zur Funktionalisierung der Profile mittels Strahlungsschweißen

Tabelle 17: Veröffentlichungen Teilvorhaben Prozessentwicklung in der Pultrusion (ICT)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Verfahrensentwicklung für die Herstellung kontinuierlich faserverstärkter, thermoplastischer	12/2024	Dissertation, https://doi.org/10.24406/publica-4189	Darstellung der Prozessentwicklung der in-situ Pultrusion mit ϵ -Caprolactam. Insbesondere der Optimierung von der ϵ -Caprolactam Rezeptur (Verhältnis Aktivator zu Katalysator) für die Pultrusion sowie

Profile im Pultrusionsverfahren mittels in-situ Polymerisation von ϵ -Caprolactam			die Modellbildung und Validierung von Parameterkombinationen für hohe Profilqualität und Produktionsraten
Influence of flame retardants on the anionic polymerization of polyamide 6 (apa6) as Matrix for FRTPS	10/2025	SAMPE Europe (Amsterdam)	Darstellung der Ergebnisse zur Integration von Flammschutzmitteln in aPA6
Modularer Batteriebaukasten für ein Feuerwehrfahrzeug	07/2024	Kunststoffe ISSN: 0023-5563, https://doi.org/10.24406/h-472146	Darstellung der Projektfortschritte in der in-situ Pultrusion (ICT) insbesondere bezüglich der EMV-Abschirmung. Des Weiteren wurden erste Ergebnisse zum Fügen der Profile (IKT) und zur Funktionalisierung der Profile mittels 3D-Druck und Schweißen vorgestellt (CT, IKT)