

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Hugo Stiehl GmbH - Kunststoffverarbeitung	03WIR1406B
Vorhabenbezeichnung:	
SmartSTRAT: „Prüf- und Fertigungsstrategien für Smart Composite Anwendungen am Beispiel Mikromobilität“ Teilvorhaben 2: „Entwicklung eines Werkzeugkonzeptes für die automatisierte Kapselung und Versiegelung elektrischer Komponenten in Smart Composites“	
Laufzeit des Vorhabens:	
01.05.2021 – 30.04.2024	
Berichtszeitraum:	
01.05.2021 – 30.04.2024	

Abschlussbericht

**SmartSTRAT: Prüf- und Fertigungsstrategien für Smart Composite Anwendungen
am Beispiel Mikromobilität - Teilvorhaben 2**

WIR! - SmartERZ
im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme

**SmartSTRAT – Entwicklung eines Werkzeugkonzeptes für die automati-
sierte Kapselung und Versiegelung elektrischer Komponenten in Smart
Composites**

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Burkert, Jürgen
Messner, Francesco

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung, so-
wie dem Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH als Projektträger des BMBF für die ko-
operative Zusammenarbeit und Betreuung der Arbeiten.

Zuwendungsempfänger
Hugo Stiehl GmbH - Kunststoffverarbeitung
Gerichtsstraße 140
09474 Crottendorf

Inhalt

I.	Kurzbericht (Darstellung des Projektergebnisses / in allgemein verständlicher Form das Vorhaben darstellen und umfasst:.....	4
1	Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand, an dem angeknüpft wurde	4
2	Ablauf des Vorhabens	5
3	Wesentliche Ergebnisse	5
II.	Eingehende Darstellung.....	6
1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	6
1.1	Arbeitspaket 1: Präzisierung der Zielstellung.....	6
1.2	Arbeitspaket 2: Material-, verfahrens- und anwendungsspezifische Voruntersuchungen	7
1.3	Arbeitspaket 3: Verfahrenstechnische Lösungskonzepte zur automatisierten Fertigung von Smart Composites mit strukturintegrierten elektronischen Komponenten	9
1.4	Arbeitspaket 4: Entwicklung eines Prüfkonzeptes für Smart Composite Bauteile mit el. Funktionalitäten.....	11
1.5	Arbeitspaket 6: Entwicklung eines Prüfkörpers für die belastungskonforme Evaluierung.....	12
1.6	Arbeitspaket 7: Fertigungsstudie zur Herstellung von Smart Composite Bauteilen am Beispiel des entwickelten Prüfkörpers	15
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	19
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	19
4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	19
5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	20
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF	20
7	Quellen.....	21
8	Abbildungsverzeichnis	22
9	Tabellenverzeichnis.....	23

I. Kurzbericht (Darstellung des Projektergebnisses / in allgemein verständlicher Form das Vorhaben darstellen und umfasst:

1 Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand, an dem angeknüpft wurde

Das zentrale Thema in aktuellen Debatten zur nachhaltigen Klimapolitik ist die Mobilität. Um die von der Bundesregierung gesetzten Emissionsziele bis 2050 zu erreichen, bedarf es einer umfassenden Modifikation des Verkehrssektors. Eine wesentliche Rolle spielt hierbei der Individualverkehr, welcher im Jahr 2017 einen Anteil von drei Viertel an allen gefahrenen Personenkilometern einnahm. [1]

Politik, Forschung, Unternehmen und Kommunen entwickeln stetig neue Ideen, um die Stadtentwicklung bei steigendem Verkehrsaufkommen nachhaltig zu gestalten. Eine mögliche Lösung stellt die Mikromobilität¹ dar. In urbanen, ländlichen und montan geprägten Verkehrsräumen stellt diese vor allem in Flotten- und Sharing-Konzepten einen innovativen und emissionsfreien Ansatz mit hohem Wachstumspotenzial dar. Basierend auf zwei- bis vierrädriigen Kleinfahrzeugen, wie beispielsweise E-Roller, E-Bikes, Lastenräder oder autonomen Transportsystemen, werden die Fahrzeuge je nach Verkehrsraum und Anwendungsfall (Warentransport, Flottenfahrzeuge etc.) spezifisch angepasst. Dies führt zu einer Vielfalt an Modellvarianten, die nur durch intelligente Plattform- und Bauweisenkonzepte (siehe Bsp. Abb. 1) kosten- und ressourceneffizient gefertigt werden können.

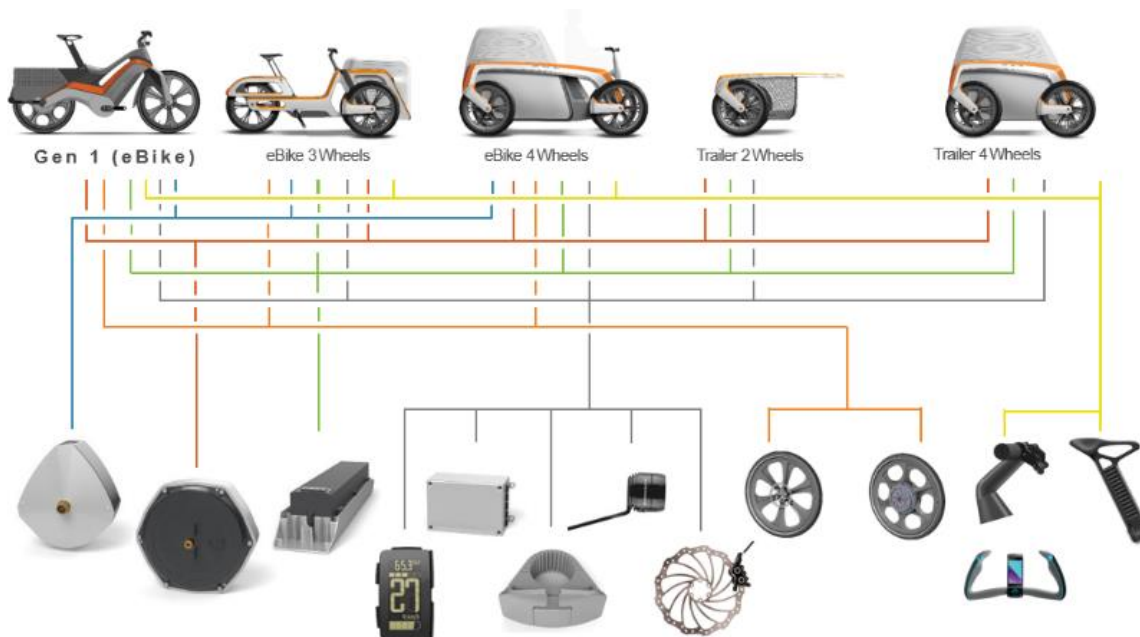


Abbildung 1: Ansatz für ein Baukastensystem von mikromobilen Anwendungen (Quelle: CIP Group)

Entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Konstruktionswerkstoffen bieten Smart Composites, welche aufgrund ihrer großen Designfreiheit, dem geringen Gewicht und der besonderen Eignung zur Funktionsintegration über ein hohes Potenzial für eine kostengünstige Herstellung sowie effektivem Betrieb von Kleinfahrzeugen verfügen. Bisherige Smart Composite – Technologien basieren größtenteils auf manuell ausgeführten Fertigungsverfahren und sind damit einerseits verhältnismäßig teuer und andererseits nicht für

¹ Mikromobilität (engl. Micro Mobility) steht für kleine und leichte, meist elektrisch angetriebene, Transportmittel. Beispiele hierfür sind u.a. E-Scooter, Segways, Hoverboards, Elektrofahrrad, E-Leichtfahrzeuge [2]

große Stückzahlen geeignet. Daher wird im Vorhaben eine vollautomatisierte Fertigung von Smart Composites als Ziel gesetzt. Hierfür sollen materialgerechte Fertigungsstrategien entwickelt werden, um eine großserienfähige Herstellung von Smart Composite Bauteilen zu realisieren.

Die Wirtschaftlichkeit von Flotten- und Sharing-Fahrzeugen wird neben den Fertigungskosten wesentlich durch Ausfallzeiten auf Grund von Instandhaltungsmaßnahmen beeinflusst. Durch strukturintegrierte Sensorik in Smart Composite Elementen können die Bauteilzustände schnell und effektiv erfasst, angezeigt und dokumentiert werden (Condition & Health Monitoring). Damit lässt sich eine unsachgemäße Nutzung, beispielsweise durch Überlastung und Vandalismus, und Schäden am Fahrzeug sowie Ermüdungserscheinungen erkennen. Dies ermöglicht zustandsorientierte Instandhaltung, die gegenüber regulären Instandhaltungsmaßnahmen einen effektiveren Materialeinsatz ermöglicht und somit wesentlich ressourcen- und kostenschonender ist.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse soll am Beispiel einer Rahmenstruktur für Elektrofahrzeuge in Leichtbauweise die Entwicklung und vorwettbewerbliche Umsetzung eines durchgängigen Montagekonzeptes zur vollautomatisierten Sensorintegration, -kontaktierung und -kalibrierung von Smart-Composite-Bauteilen erfolgen. Daran anknüpfend ist ein modularer Strukturprüfstand zur Ermittlung von Betriebs- und Überlasten zu entwickeln, um daraus entsprechende Belastungsgrenzen und Erkennungsmuster für die Auswerteelektronik zu definieren.

2 Ablauf des Vorhabens

Der Entwicklungsschwerpunkt der Hugo Stiehl GmbH Kunststoffverarbeitung lag in der Entwicklung von Lösungsmöglichkeiten zur Integration von Sensoren in Spritzgießbauteile. Je nach Konzept mussten technologieabhängige Besonderheiten betrachtet und berücksichtigt werden.

Dazu zählten u.a. Aufbau und Halbzeugform der Sensoren, Anbindung zum Bauteil und die Signalerfassung. Des Weiteren wurden mit den Projektpartnern eine durchgängige Prozesskette zur Herstellung Smart Composite Bauteile, sowie Anspritzkonzepte und Vorwärmstrategien entwickelt. Auf Basis durchgeführter Versuchsreihen, konnte ein Spritzgießwerkzeug zur Herstellung des Funktionsdemonstrators konzipiert und bautechnisch realisiert werden.

Im Anschluss erfolgten umfangreiche Test und Validierungen der Ergebnisse.

3 Wesentliche Ergebnisse

Im Projektverlauf des Verbundvorhabens wurden nachfolgende Ergebnisse erarbeitet:

- Entwicklung von Anforderungen an automatisierte Prozesse zur Kapselung und Versiegelung elektronischer Komponenten
- Entwicklung von Lösungsmöglichkeiten zur stoff- und formschlüssigen Versiegelung entsprechender Sensorik
- Erarbeitung multifunktionaler Strukturkonzepte
- Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien für Smart Composite Bauteilen mit integrierten elektrischen Komponenten
- Entwicklung und bautechnische Umsetzung eines Prototypenwerkzeuges zur Herstellung von Smart Composite Bauteilen
- Erfolgreiche Bauteilprüfung mit Validierung der Sensorfähigkeit im Spritzgießprozess

II. Eingehende Darstellung

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

Der Hauptteil der Zuwendung wurde für Personalausgaben und den Bau des Prototypenwerkzeuges verwendet. Diese Ausgaben spiegeln sich in den erzielten Ergebnissen der Arbeitspakete wieder.

Tabelle 1: Arbeitsplan

Arbeitspaket	Inhalt
1	Präzisierung der Zielstellung
2	Material-, verfahrens- und anwendungsspezifische Voruntersuchungen
3	Verfahrenstechnische Lösungskonzepte zur automatisierten Fertigung von Smart Composites mit strukturintegrierten elektronischen Komponenten
4	Entwicklung eines Prüfkonzeptes für Smart Composite Bauteile mit el. Funktionalitäten
6	Entwicklung eines Prüfkörpers für die belastungskonforme Evaluierung
7	Fertigungsstudie zur Herstellung von Smart Composite Bauteilen am Beispiel des entwickelten Prüfkörpers

1.1 Arbeitspaket 1: Präzisierung der Zielstellung

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden Anforderungen zur Kapselung und Versiegelung von elektronischen Komponenten definiert, da die Weiterverarbeitung von funktionalisierten FKV-Bauteilen im Spritzgießprozess hohe Anforderungen an die zu integrierende Sensorik stellt.

- Hohe thermische Belastung bis ca. 300°C
- Hohe Druck Anforderungen bis ca. 1500 bar
- Thermische Stabilität der elektrischen Kontakte
- Sichere Ankopplung des Sensors an die Bauteilstruktur zur Crashdetektion

Anforderungen:

- Geringere thermische Belastung der Sensorelemente
- Keine mechanische Belastung des Sensors durch Umformprozesse
- Keine Positionsabweichung des Sensors durch Umformprozesse
- Ansatz für großserientaugliche Technologieentwicklung
- Versiegelungsmatrix muss einen höheren Schmelzpunkt als das Grundpolymer der Verstärkungsstruktur haben
 - im Spritzgießprozess können Temperaturen von über 300°C entstehen
 - Duroplastische Polymere eignen sich als Kapselungsmaterial, da sie bei geringen Verarbeitungsbedingungen (80°C und 25 bar Druck) aushärten
- Definition von temperaturentkoppelten Bereichen im Spritzgießwerkzeug

Neben den Anforderungen an die Kapselung und Versiegelung, ist die Definition von Grenzbereichen hinsichtlich der Drapierbarkeit essentiell für das Erreichen der Forschungszielstellung.

Wichtiger Bestandteil dieser Untersuchung ist die Genauigkeit, die beim Drapieren erreicht werden kann. Der Abstand zwischen der Gegenform und dem Halbzeug darf nicht größer sein als 0,5 mm bzw. darf die eingeschlossene Luft einen Prozentsatz von 2 % nicht übersteigen. Andernfalls wirken sich die Lufteschlüsse nachteilig auf die Temperierung und das Konsolidieren aus. Des Weiteren potenziert sich die Abweichung in der ersten Lage mit jeder weiteren Lage und führt somit zu einer fehlerhaften Geometrie. Der Drapiervorgang muss im schmelzflüssigem Zustand des Halbzeuges durchgeführt werden und ein Rückformverhalten der Halbzeuge muss vermieden werden.

Dabei sind nachfolgende Einflussgrößen Prozessbestimmend:

- Temperatur,
- Biegewinkel,
- Materialstärke,
- Gewebeaufbau der Halbzeuge.

Anhand von durchgeführten praktischen Versuchen, konnten einzelne Verfahrensgrenzen definiert werden:

- Materialstärke von bis zu 2 mm und Umformwinkel bis 100° realisierbar

Ein zu großer Biegeradius oder zu hohe Erwärmungstemperaturen, führen zur Beschädigung der Halbzeuge (Delamination oder Oxidation).

1.2 Arbeitspaket 2: Material-, verfahrens- und anwendungsspezifische Voruntersuchungen

Zur Verfahrenvalidierung wurde mithilfe eines Prototypenwerkzeuges entsprechende Voruntersuchungen durchgeführt. Wichtigste Kenngrößen sind dabei die Oberflächen- und Kerntemperatur der funktionalisierten Halbzeuge.

Als Ausgangsmaterial für das endlosfaserverstärkte Halbzeug (UD Tape) dient ein Celstran® CFR-TP PA6 GF60-01, welches anhand von Berechnungsergebnissen der Projektpartner ausgewählt wurde. Dieses UD-Tape wird entsprechend der Größe des Bauteils konfektioniert und anschließend der belastungsgerechte Lagenaufbau gebildet. Dieser Aufbau besteht aus 10 Lagen mit folgender Faserorientierung [0/90/90/0/0/0/0/90/90/0]. Anschließend wird das Halbzeug erwärmt, umgeformt und hintspritzt.

Im Vorfeld wurden mit dem Matrixmaterial der Fa. ems (Grivory HTV-3H1) spritzgießtechnische Vorversuche zur optimalen Parameterfindung durchgeführt. Grundlage bildete ein Plattenwerkzeug mit einer Kavitätgröße von 100 x 250 x 2 mm. Hierfür wurden entsprechende Werkzeugelemente angefertigt.

Tabelle 2: Spritzparameter Vorversuche Grivory HTV-3H1

	optimierter Prozess
Massepolster	7,3 mm
Spritzzeit	1,28 sec
Werkzeugtemp.	140°C DS 140°C AS
Massetemp.	Zone1=280°C Zone2=290°C Zone3=300°C Zone4=310°C Zone5=320°C Zone6=330°C Düse=330°C
Staudruck	15 bar
Nachdruck	600 bar
Schließkraft	1200 kN

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden auf einem CNC-Cutter entsprechende UD-Tapes konfektioniert und der belastungsgerechte Lagenaufbau gebildet. Anschließend wurde das funktionalisierte Lagenpaket mittels einer Heiz-Pressen bei 265°C erwärmt und konsolidiert.

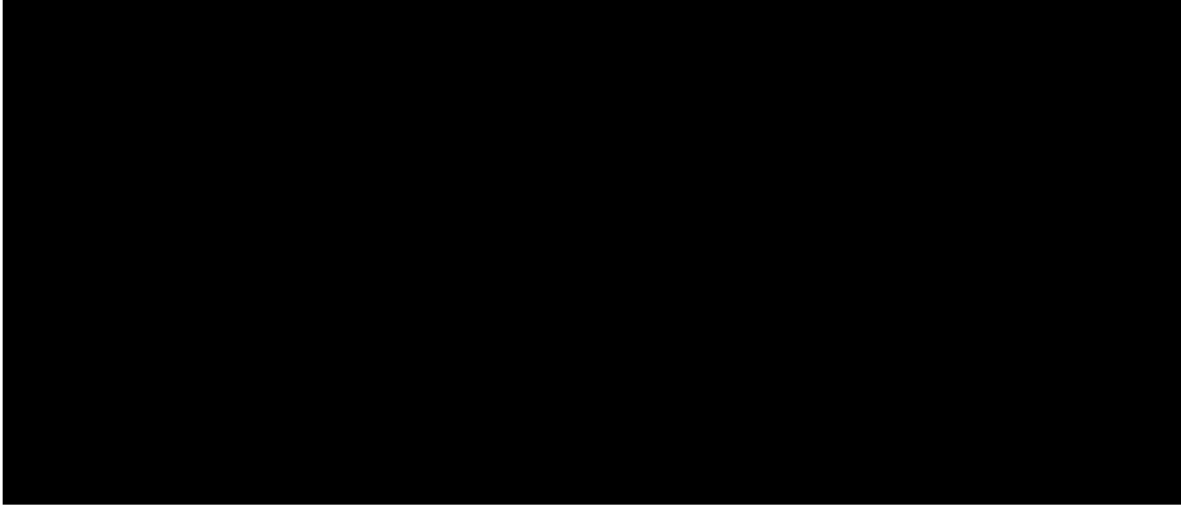


Abbildung 2: Schematische Darstellung Prozessablauf

Prozessablauf:

- Konfektionierung der Halbzeuge
- Vorkonsolidierung und Umformung der Halbzeuge
- Freilegen der Taschen mit anschließender Sensorfixierung
- Einlegen der kontaktierten Halbzeuge in der Spritzgießmaschine
- Umspritzen des sensorintegrierten Halbzeuges inkl. Anspritzen der Rippen

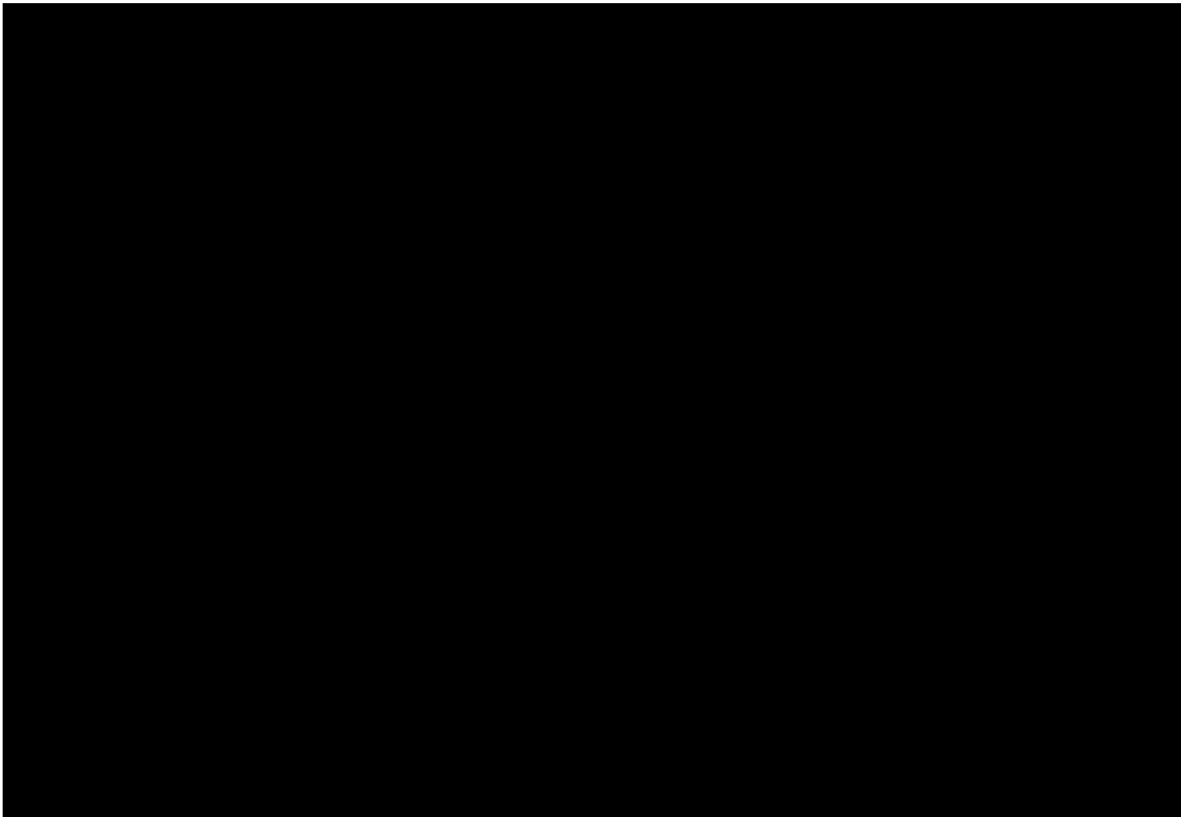


Abbildung 3: Umgeformtes Halbzeug mit freigelegter Tasche zur Sensorapplikation

Im Anschluss erfolgte eine entsprechende Kontaktierung der eingebetteten Sensorik zur Funktionsüberprüfung, mit erfolgreicher Signalübertragung.



Abbildung 4: Eingebettete Sensorik (DMS) mit entsprechender Kontaktierung

Die im Anschluss durchgeführten Spritzgießversuche dienen nicht nur zur Untersuchung der Sensorstabilität, sondern auch zur Gewinnung entsprechender Werkzeug- und Spritzparameter.

Kennwerte:

- Werkzeugtemperatur: 145°C
- Massetemperatur Düse: 330°C
- Nachdruck Max.: 1.250 bar
- Spritzdruck Max.: 1.850 bar

1.3 Arbeitspaket 3: Verfahrenstechnische Lösungskonzepte zur automatisierten Fertigung von Smart Composites mit strukturintegrierten elektronischen Komponenten

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde an Probekörpern Grenzschichtanalysen durchgeführt, um den Einfluss einer mechanischen- oder thermischen Bearbeitung auf die Verstärkungsstrukturen (Faser) und der Sensorik zu untersuchen.

Für die Untersuchungen wurde ein unidirektional verstärktes PA/GF eingesetzt.

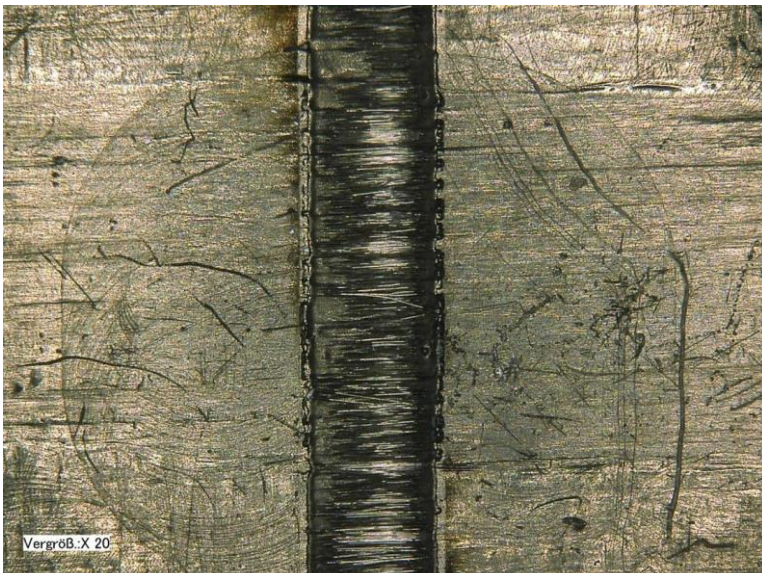


Abbildung 5: Darstellung mechanische Bearbeitung Halbzeug PA/GF mit 20-facher Vergrößerung

Im Ergebnis lässt sich sagen, dass eine Matrixentfernung zum Freilegen der Sensorik oder Taschenbildung zur Sensorapplizierung, ohne Schädigung der Verstärkungsfaser, realisierbar ist. Anhand der Erkenntnisse wurde ein entsprechendes Konzept zur Einbettung von Sensorik in thermoplastische Halbzeuge entwickelt.

Prozessablauf:

Grundlage bildet die Verwendung thermoplastischer Halbzeuge mit Langfasern aus Glas (Prepregs). Die Ausrichtung der Fasern ist unidirektional. Die Matrix besteht aus Polyamid.

Der mehrlagige Aufbau aus Prepregs und Sensorhalbzeug wird in einem geschlossenen Werkzeug in einer beheizbaren Presse vorkonsolidiert. Anschließend erfolgt der mechanische Umformungsprozess mit einem entsprechenden Werkzeug.

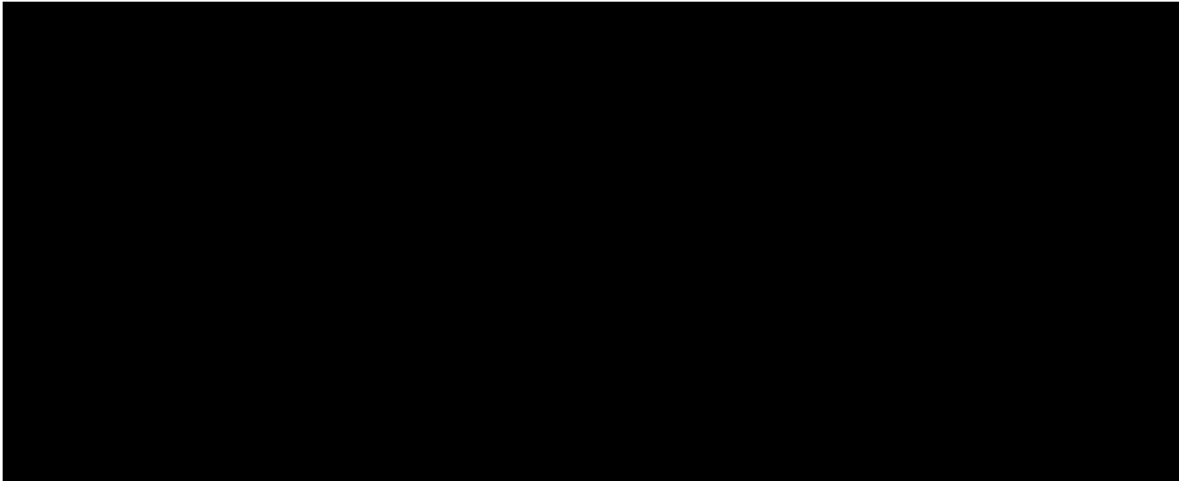


Abbildung 6: Schematischer Halbzeugaufbau mit eingebetteten Sensor

In der nächsten Stufe der Wertschöpfungskette wird das Halbzeug mit weiteren Funktionsapplikationen versehen. Dies können angespritzte Kühlrippen sowie die Beschichtung mit einer zusätzlichen Umhüllung sein. Dazu wird das umgeformte thermoplastische Halbzeug mit Hilfe eines Handlingsystems in ein Spritzgusswerkzeug eingelegt. Anschließend erfolgen der Spritzvorgang und der Auswurf des fertigen Bauteils.

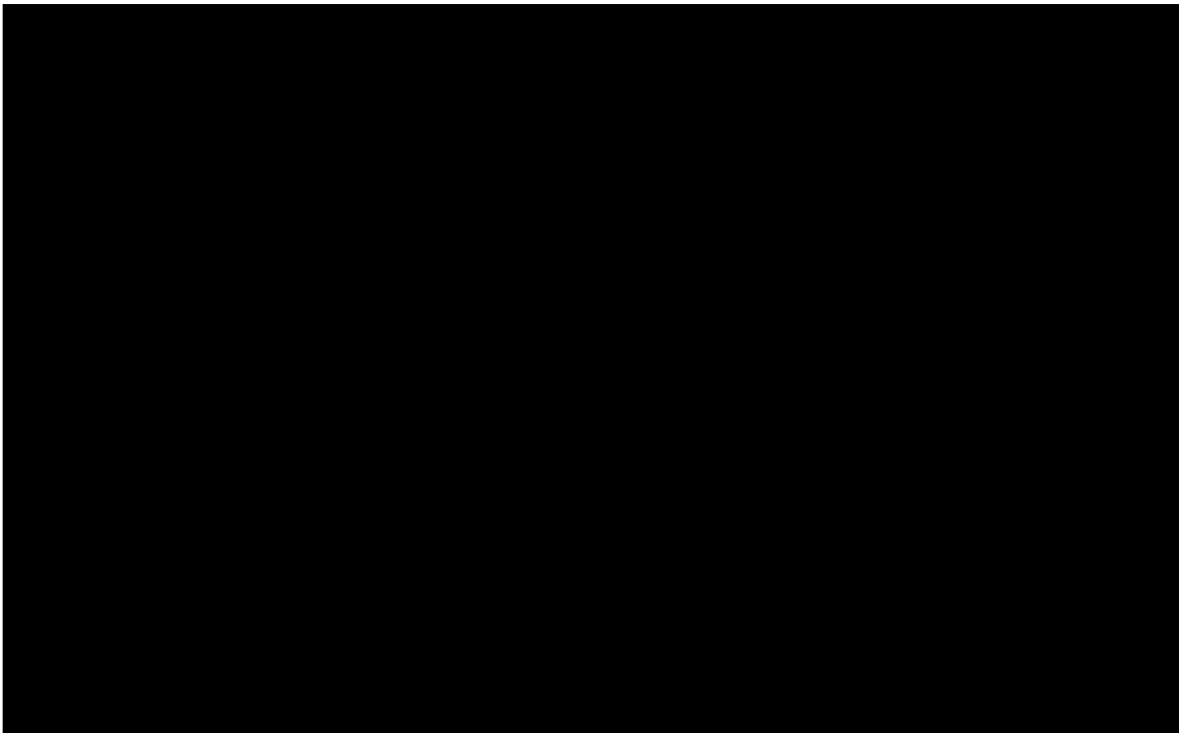


Abbildung 7: Möglicher Prozessablauf

Die Positionierung des Sensors spielt dabei eine entscheidende Rolle und sollte in einem auf Dehnung belasteten Bereich erfolgen. Nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch mögliche Sensorposition unter Biegebelastung.

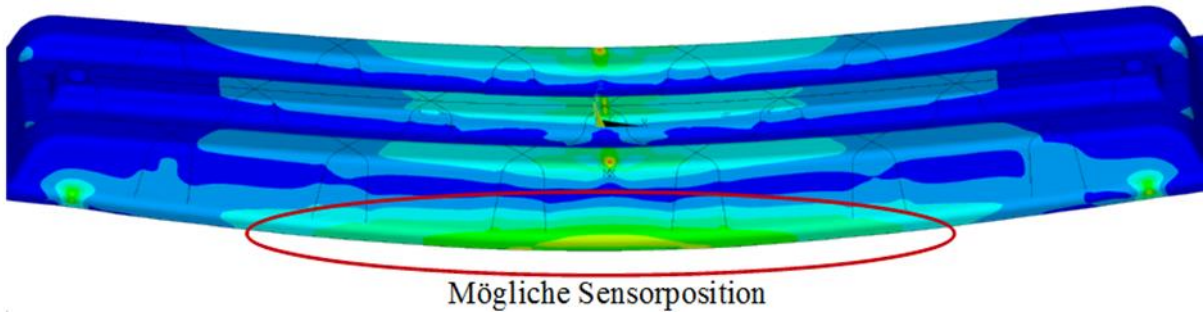


Abbildung 8: Biegebelastung eines Strukturbauteils

Diese Vorgehensweisen und Untersuchungen bildete die Grundlage für die spätere Positionierung eines entsprechenden Sensors im Funktionsdemonstrator.

1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung eines Prüfkonzeptes für Smart Composite Bauteile mit el. Funktionalitäten

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, anhand von Vorversuchen Rückschlüsse auf das spätere Demonstratorwerkzeug zu gewinnen. Dabei waren eine Reihe von umfangreichen Spritzgießversuchen mit einem entsprechenden vorhandenen Demonstratorwerkzeug notwendig.

Als Ausgangsmaterial dienten endlosfaserverstärkte UD-Tapes mit einer Polyamidmatrix und einen Glasfaseranteil von 60%. Diese Tapes wurden konfektioniert und ein belastungsgerechter Lagenaufbau gebildet. Anschließend erfolgte die Konsolidierung auf einer Heiz-Pressen bei 265°C.

Im Anschluss wurden entsprechende DMS-Sensoren vom Type FLAB-5-8 mittels hochtemperaturbeständigem Kleber an den umgeformten und konsolidierten UD-Halbzeugen fixiert.

Danach erfolgten entsprechende spritzgießtechnische Voruntersuchungen anhand vorher definierter Versuchspläne.

Der Prozessablauf lässt sich wie folgt beschreiben:

- Konfektionierung der Halbzeuge
- Vorkonsolidierung und Umformung der Halbzeuge
- Sensorfixierung
- Einlegen der kontaktierten Halbzeuge in eine Spritzgießmaschine
- Umspritzen der sensorintegrierten Halbzeuge inkl. Anspritzen von Verstärkungsrippen

Aus bisherigen Forschungsuntersuchungen sind folgende Prozessparameter im Wesentlichen bestimmend für die Funktionalität von Smart Composite Bauteilen:

- Temperatur der einspritzenden Kunststoffschmelze
- Werkzeugoberflächentemperatur
- Temperatur des endlosfaserverstärkten Halbzeuges
- Restfeuchte Granulat und Halbzeug
- Einspritzgeschwindigkeit
- Nachdruck
- Sensorfixierung
- Anspritzposition am Bauteil

Bei den ersten Untersuchungen erfolgte der Einspritzvorgang mittels Heißkanal oberhalb der Sensorplatzierung. Die Prozessparameter lagen im mittleren Bereich der Herstellervorgaben. Aufgrund der ungünstigen Anspritzposition kam es zur einer Beschädigung der integrierten Sensorik und es konnte keine Funktionalität

nachgewiesen werden. Eine weitere Ursache könnten die hohe Masstemperatur der Kunststoffschmelze sein.

Basierend auf die ersten negativen Ergebnisse erfolgte eine Änderung der Anspritzposition. Dabei wurde das funktionalisierte Halbzeug Stirnseitig mittels eines Filmangusses angespritzt. Ziel der Änderung war eine Druckverringering während der Einspritzphase in das Werkzeug.

Mit dieser Änderung konnten erste funktionalisierte Probekörper hergestellt und auf ihre Funktionalität getestet werden.

Dazu erfolgten 3-Punkt-Biegeversuche auf einer Handspindelpresse mit positiven Ergebnisse.

Die durchgeführten Versuche dienten nicht nur zur Untersuchung der Funktionalität von Smart Composite Bauteilen, sondern es konnten auch Rückschlüsse auf das Werkzeugkonzept und den Fertigungsprozess gezogen werden.

Nachfolgend sind nochmal einzelne, optimierte Prozessparameter aus den Validierungsschleifen zusammengefasst:

- Werkzeugtemp. Düsenseite : 100°C
- Werkzeugtemp. Auswerferseite : 100°C
- Masstemperatur
 - Zone1 : 265°C
 - Zone2 : 270°C
 - Zone3 : 275°C
 - Zone4 : 280°C
 - Zone5 : 285°C
 - Zone6 : 290°C
 - Düse : 295°C
- Staudruck : 20 bar
- Nachdruckprofil:

P = 1200 bar	1200 bar	1200 bar
t = 1,20 s	15,00 s	0,3 s
- Einspritzprofil

V = 40,0 cm ³ /s	80,0 cm ³ /s	110,0 cm ³ /s
P = 1300 bar	1700 bar	1800 bar
S =	50,0 cm ³	80,0 cm ³

1.5 Arbeitspaket 6: Entwicklung eines Prüfkörpers für die belastungskonforme Evaluierung

Auf Basis der entwickelten Lösungen aller Projektpartner, ist ein entsprechender Funktionsdemonstrator (Ausschnitt Steuerrohr eines Pedelecs) entwickelt worden.

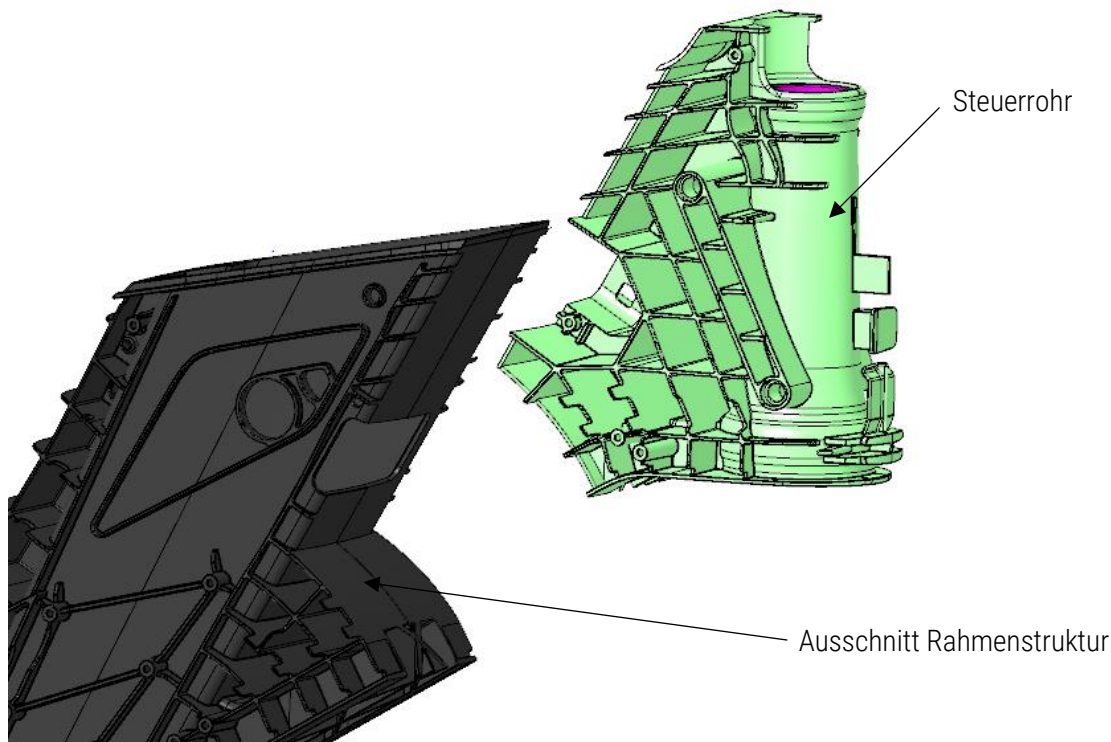


Abbildung 9: Funktionsdemonstrator „Steuerrohr“

Das dafür notwendige Spritzgusswerkzeug zur Fertigung entsprechender Strukturbauteile wurde im Rahmen der Arbeitspaketbearbeitung konzeptionell entwickelt und bautechnisch umgesetzt.

Neben den einzulegenden funktionalisierten Halbzeugen, erfolgte die Implementierung zweier Inserts zur Gabellagerung.

Anhand der Ergebnisse aus den Vorversuchen hinsichtlich Angusspositionierung, wird der Funktionsdemonstrator Stirnseitig mittig mittels Filmanguss angespritzt. Dies führt zu einer geringeren Belastung des funktionalisierten Einlegers während des Spritzvorganges.

In parallelen Versuchen hat man eine gezielte Viskositätsbeeinflussung mittels dynamischer Anregung der Kunststoffschmelze untersucht. Dies ist neben dem Einsatz von Additiven eine Variante, um die Kunststoffschmelze lange fließfähig zu halten.

Dabei werden mit einem speziellen Plattenwerkzeug unterschiedliche Frequenzen mittels Hydraulikdruck der Maschine simuliert.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit additivierten Kunststoffen erbrachte keinen signifikanten Vorteil, auch aufgrund des hohen Werkzeuginvests.

Nach Abschluss der Detailkonstruktion erfolgte eine Validierung mittels Moldflow-Analyse.

Diese Simulation bietet eine Reihe von Vorteilen, die zur Effizienzsteigerung, Qualitätsverbesserung und Kostenreduktion beitragen kann. Im Folgenden werden spezifischen Ziele und Vorteile einer Moldflow-Simulation im Detail beschrieben:

1. Optimierung des Füllverhaltens

- **Füllstudie:** Bestimmung des Füllverhaltens des Materials im Werkzeug, um sicherzustellen, dass die Kavitäten vollständig und gleichmäßig gefüllt werden.
- **Schließzeitoptimierung:** Reduktion der Zykluszeit durch Optimierung der Füllgeschwindigkeit und -drucks.

2. Vorhersage von Herstellungsfehlern

- **Lunker und Einschlüsse:** Identifizierung und Vermeidung von Hohlräumen und Einschlüssen im Bauteil.
- **Bindenähte:** Erkennung und Minimierung von Bindenähten, die die mechanischen Eigenschaften und das Erscheinungsbild des Teils beeinträchtigen können.
- **Verzug und Schwindung:** Vorhersage und Minimierung von Verzug und Schwindung, um Maßhaltigkeit und Formtreue des Teils zu gewährleisten.

3. Materialflussanalyse

- **Fließfrontverhalten:** Analyse des Fließfrontverhaltens des Polymers, um sicherzustellen, dass das Material gleichmäßig verteilt wird.
- **Temperaturverteilung:** Untersuchung der Temperaturverteilung während des Füll- und Nachdruckprozesses, um eine gleichmäßige Abkühlung zu gewährleisten.

4. Kühlkreislaufoptimierung

- **Kühlzeitreduzierung:** Optimierung der Kühlkreisläufe zur Reduktion der Kühlzeit und damit der gesamten Zykluszeit.
- **Temperaturmanagement:** Sicherstellung einer gleichmäßigen Kühlung, um Spannungen und Verzug im fertigen Teil zu minimieren.

5. Nachdruckphase

- **Nachdruckprofil:** Optimierung der Nachdruckphase, um die Bauteilqualität durch Minimierung von Schrumpfung und Verzug zu verbessern.
- **Materialverteilung:** Sicherstellung, dass während der Nachdruckphase genügend Material in die Kavitäten gelangt, um eine gleichmäßige Dichte und mechanische Eigenschaften zu gewährleisten.

6. Werkzeugauslegung und -design

- **Anschnittpositionierung:** Bestimmung der optimalen Position und Geometrie der Anschnitte, um den Materialfluss zu optimieren und Bindenähte zu minimieren.
- **Entlüftung:** Identifizierung der optimalen Entlüftungspositionen, um Lufteinschlüsse zu vermeiden.
- **Kühlkanaldesign:** Optimierung des Kühlkanaldesigns zur effizienten Wärmeabfuhr.

7. Kosten- und Zeitersparnis

- **Prototypenreduktion:** Verringerung der Notwendigkeit für physische Prototypen durch virtuelle Tests und Optimierungen.
- **Fehlervermeidung:** Reduktion von Fehlern und Nacharbeiten durch frühzeitige Identifikation und Lösung potenzieller Probleme im Simulationsstadium.
- **Ressourcenschonung:** Optimierung des Materialeinsatzes und Reduktion des Abfalls.

8. Nachhaltigkeit

- **Energieeffizienz:** Optimierung des Prozesses zur Reduktion des Energieverbrauchs.
- **Materialeffizienz:** Minimierung des Materialverbrauchs durch Optimierung der Bauteilgeometrie und des Spritzgießprozesses.

Im Anschluss an den Untersuchungen erfolgte die konstruktive Entwicklung, eine entsprechendes Re-Designe und die bautechnische Umsetzung des Funktionsdemonstratorwerkzeuges.

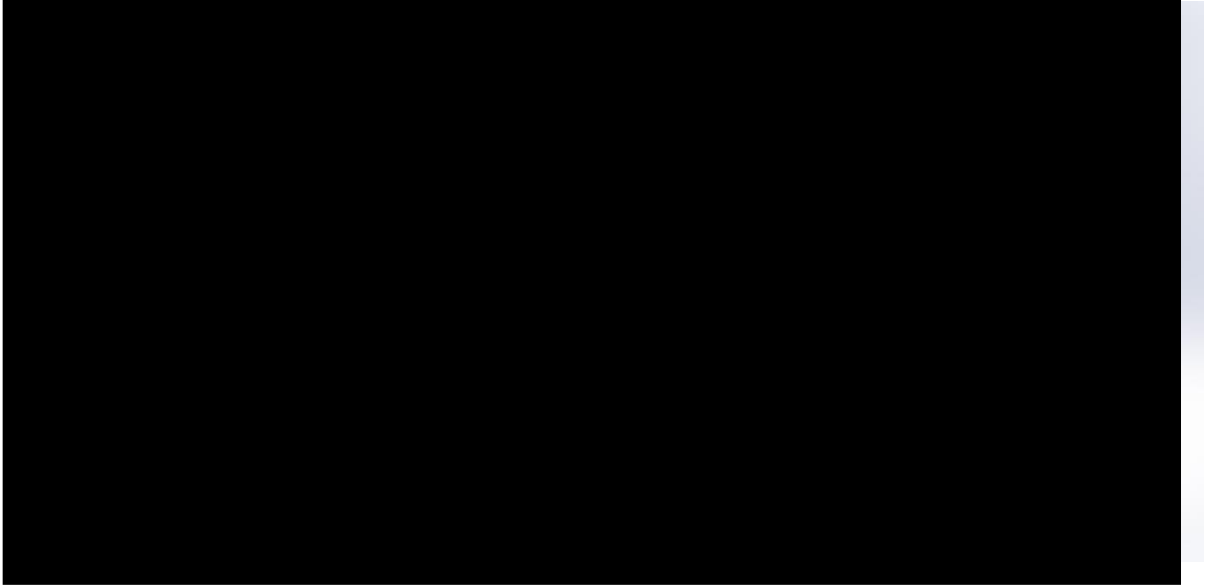


Abbildung 10: finale Konstruktionsvariante Demonstratorwerkzeug (links: Auswerferseite; rechts: Düsenseite)

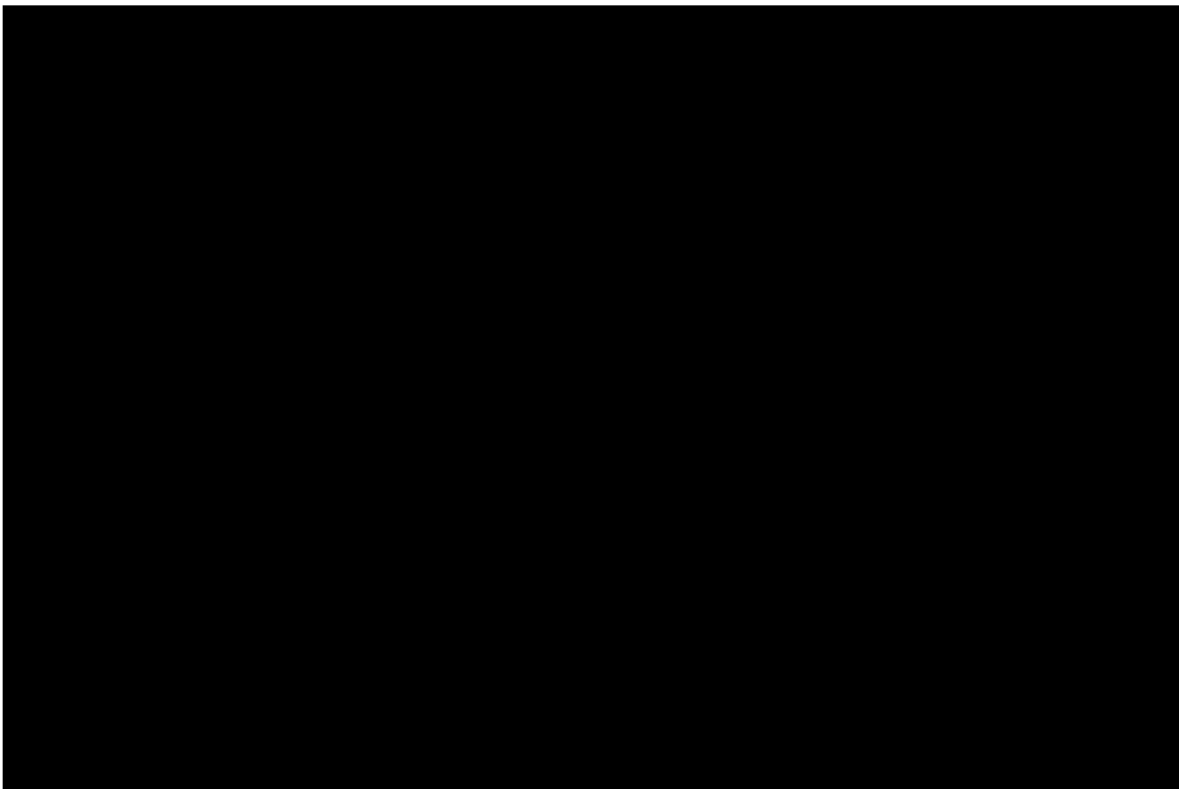


Abbildung 11: Demonstratorwerkzeug „Steuerrohr“ (links: Auswerferseite; rechts: Düsenseite)

1.6 Arbeitspaket 7: Fertigungsstudie zur Herstellung von Smart Composite Bauteilen am Beispiel des entwickelten Prüfkörpers

Ziel in diesem Arbeitspaket war die Untersuchung des Einflusses des Spritzprozesses auf die Stabilität der eingebetteten, elektrischen Komponenten und die Herstellung von Funktionsdemonstratoren für die spätere Bauteilprüfung in einem Pedelec.

Im ersten Prozessschritt erfolgte die Vorwärmung der Alu-Inserts im Steuerrohr zur Gabellagerung mittels einer Heizplatte. Anschließend die Übergabe in das Spritzgusswerkzeug mit den funktionalisierten Halbzeugen und Herstellung erster Funktionsmuster.



Abbildung 12: Steuerrohr mit integrierten Inserts zur Gabellagerung



Abbildung 13: Füllstudie zur Herstellung Funktionsdemonstrator



Abbildung 14: Funktionsdemonstrator Steuerrohr

Dabei waren mehrere Änderungs- und Optimierungsschleifen notwendig.

Zur Qualitätssicherung des Prozesses und somit des Funktionsmusters erfolgte eine In-line-Überwachung des Spritzgussprozesses an der Maschine.

Entsprechende Füllstudien (Abbildung 13) zur Validierung des Heißkanalsystems wurden ebenfalls durchgeführt.

Erste prozessrelevante Kennwerte wurden ermittelt und nachfolgend zusammengefasst:

- Zuhaltkraft : 800 to.
- Werkzeugtemp. Düsenseite : 100°C
- Werkzeugtemp. Auswerferseite : 100°C
- Massetemperatur
 - Zone1 : 280°C
 - Zone2 : 297°C
 - Zone3 : 300°C
 - Zone4 : 290°C
 - Zone5 : 285°C
 - Zone6 : 275°C
 - Düse : 275°C
- Spritzzeit : 1,83 s

- Spritzdruck : 10 bar
- Dosierzeit : 6,46 s
- Schneckendrehzahl : 69 U/min

Nach den ersten Kennwertermittlungen erfolgten umfangreiche Validierungen und Anpassungen am Prototypenwerkzeug, weitere Bemusterungsschleifen mit integrierten Sensoren zur Herstellung entsprechender Funktionsmuster und Optimierung der Prozessparameter.

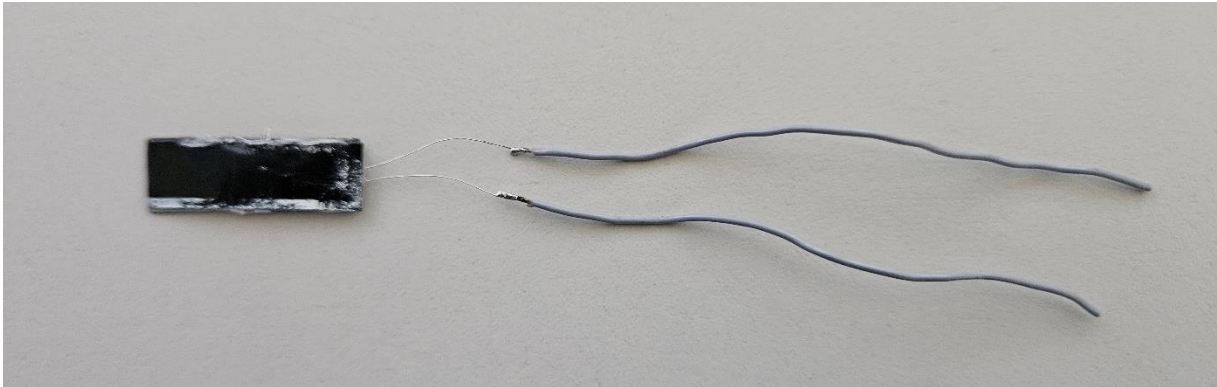


Abbildung 15: Kontaktierter, gekapselter Sensor

Optimierte Prozessparameter:

- Zuhaltkraft : 800 to.
- Werkzeugtemp. Düsenseite : 110°C
- Werkzeugtemp. Auswerferseite : 110°C
- Massetemperatur
 - Zone1 : 285°C
 - Zone2 : 300°C
 - Zone3 : 305°C
 - Zone4 : 295°C
 - Zone5 : 290°C
 - Zone6 : 280°C
 - Düse : 280°C
- Spritzzeit : 1,97 s
- Spritzdruck : 10 bar
- Dosierzeit : 6,20 s
- Schneckendrehzahl : 60 U/min

In dem durchgeführten Teilprojekt des Forschungsvorhabens konnten mithilfe des entwickelten Demonstratorwerkzeuges Smart Composite Bauteile als Funktionsmuster hergestellt werden.

Anhand umfangreicher experimenteller Untersuchungen, konnte die Integration gekapselter elektrischer Komponenten in den Spritzgießprozess nachgewiesen werden.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben der Projektmittel zu den einzelnen Positionen überstiegen die den Finanzierungsplan des Projekts aufgrund gestiegener Personalkosten. Die Mittel wurden trotzdem sparsam, wirtschaftlich und im Sinne des Projekts zielführend zur Durchführung der Forschungsarbeiten entsprechend der einzelnen Arbeitspakete eingesetzt. Die Projektmittel wurden dabei zeitnah abgerufen und verwendet.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Teilvorhabens beschriebenen Arbeiten, Untersuchungen und grundlagenorientierten Technologieentwicklungen stellen ausschließlich vorwettbewerbliche Arbeiten dar. Der Grad der Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsleistungen geht über die bisher üblichen F-u-E-Leistungen hinaus. Daraus resultierte ein erhöhtes Risiko, da die Ergebniserreichung und angestrebten Verwertungsszenarien nicht sichergestellt sind. Hierfür wurden die Zuwendungen dringend benötigt, um die Risiken für die einzelnen Partner auf ein handhabbares Maß zu reduzieren.

Die Partner sind an den Entwicklungsergebnissen der einzelnen Teilvorhaben sehr interessiert und leisten in Form von Eigenmitteln auch einen signifikanten Beitrag zur Vorhabenrealisierung.

Jedoch waren diese Forschungsleistungen mit einem sehr hohen wissenschaftlich-technischen Risiko behaftet, so dass die Umsetzung ohne die Mittel des BMBF nicht realisierbar war.

Die Möglichkeit, einen ausschließlichen bzw. einen ergänzenden Förderantrag bei der Europäischen Union zu stellen, wurde geprüft. Zum damaligen Zeitpunkt waren keine Ausschreibungen bekannt, die einen Bezug zum beantragten Themenfeld haben und somit eine Antragstellung/Förderung aus Mitteln des Forschungsrahmenprogramms der EU gestatten hätten.

Kapitel 2 zeigt auf, dass alle Arbeitspakete umfänglich bearbeitet wurden. Die Umsetzung erfolgte mit dem bereits dargestellten Aufwand, was verdeutlicht, dass die geleisteten Arbeiten zur Erreichung der Forschungszielstellung notwendig und angemessen waren.

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

Die entwickelten Lösungen im Rahmen des Forschungsprojektes haben das Potential, die Fertigungs- und Prüfstrategien nachhaltig zu transformieren. Entsprechende Werkstoffe gewinnen an Bedeutung und die steigenden Anforderungen an Leichtbau, Energieeffizienz und Funktionsintegration machen innovative Ansätze in der Fertigung und Qualitätssicherung unabdingbar.

Durch die Integration von Sensorik und Aktorik, sowie durch die Nutzung adaptiver Werkstoffe, können die mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften von Bauteile gezielt beeinflusst werden. Im Bereich der Mikromobilität ermöglichen solche Werkstoffe die Reduktion des Gewichts und eine verbesserte strukturelle Integrität. Es können somit auch gezielt Werkstoffeigenschaften verbessert werden.

Des Weiteren kann die Effizienz komplexer Prozessketten zur Herstellung Smart Composites verbessert und Produktionszeiten verkürzt werden. Durch die Einbettung von Sensoren in die Composites während der Produktion, kann eine kontinuierliche Überwachung des Fertigungsprozesses erfolgen. So lassen sich beispiels-

weise Spannungen, Temperaturen oder Feuchtigkeitsgehalte in Echtzeit messen und analysieren. Dies ermöglicht eine vorausschauende Qualitätssicherung (Predictive Quality Assurance), die Fehler frühzeitig erkennt und behebt, bevor sie zu Ausschuss führen.

Daher finden die Ergebnisse in den Bereichen der industriellen Anwendung, Standardisierung und wissenschaftliche Weiterentwicklung Anwendung. Es können zum Beispiel neu Forschungs- und Entwicklungsprojekte initiiert und Know-how transferiert werden.

Für die Projektpartner bedeutet dies eine Verbesserung und Weiterentwicklung des Produktportfolios. Speziell Hugo Stiehl verwertet die entsprechenden Werkzeugkonzepte zur Integration elektrischer Komponenten und dient als Spritzgießer solcher Strukturbauteile

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

Während der Projektlaufzeit, ist für die relevanten Teilarbeitspakete der Hugo Stiehl GmbH Kunststoffverarbeitung kein Fortschritt bei anderen Stellen bekanntgeworden.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF

Im Rahmen regelmäßiger „SmartERZ-Bündnisversammlungen“ wurden die Zwischenergebnisse in Form von Präsentationen und Postern vorgestellt.

Des Weiteren erfolgte eine Präsentation der Projektergebnisse auf der „Sächsischen Innovationskonferenz-futureSAX“ am 04.07.2023 in Dresden, sowie eine Veröffentlichung im Steinbeis Transfermagazin (<https://transfermagazin.steinbeis.de/?p=14820>).

Derzeit werden weitere relevante Tagungen und Möglichkeiten zur Veröffentlichung der Projektergebnisse in Fachjournalen eruiert.

7 Quellen

[1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Mobilität in Deutschland (MiD), 6. Januar 2020

[2] Schneider, A.: <https://vimcar.de/boxenstopp/lexikon/mikromobilitaet/> [10.03.2020]

8 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Ansatz für ein Baukastensystem von mikromobilen Anwendungen (Quelle: CIP Group).....</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 2: Schematische Darstellung Prozessablauf</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 3: Umgeformtes Halbzeug mit freigelegter Tasche zur Sensorapplikation.....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 4: Eingebettete Sensorik (DMS) mit entsprechender Kontaktierung</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 5: Darstellung mechanische Bearbeitung Halbzeug PA/GF mit 20-facher Vergrößerung</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 6: Schematischer Halbzeugaufbau mit eingebetteten Sensor</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 7: Möglicher Prozessablauf</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 8: Biegebelastung eines Strukturbauteils</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 9: Funktionsdemonstrator „Steuerrohr“</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 10: finale Konstruktionsvariante Demonstratorwerkzeug (links: Auswerferseite; rechts: Düsenseite)</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 11: Demonstratorwerkzeug „Steuerrohr“ (links: Auswerferseite; rechts: Düsenseite)</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 12: Steuerrohr mit integrierten Inserts zur Gabellagerung</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 13: Füllstudie zur Herstellung Funktionsdemonstrator.....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 14: Funktionsdemonstrator Steuerrohr</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 15: Kontaktierter, gekapselter Sensor.....</i>	<i>18</i>

9 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Arbeitsplan</i>	6
<i>Tabelle 2: Spritzparameter Vorversuche Grivory HTV-3H1</i>	7