

Sachbericht

zum Verwendungsnachweis im BMBF Rahmenprogramm

„Vom Material zur Innovation“

Themenfeld:

„Hybride Materialien – Neue Möglichkeiten, Neue Marktpotentiale (HyMat)“

Vorhabenbezeichnung: HIKOM-Pro – Prozessintegrative Herstellung und Integration von komplex geformten hybriden Mehrschichtverbunden mit hoher Funktionsdichte für den Schienenfahrzeugbau	
Zuwendungsempfänger: LSE – Lightweight Structures Engineering GmbH	Förderkennzeichen 03XP0273F
Projektleiter*in Norbert Schramm	Berichtszeitraum 01.06.2020 – 31.05.2023

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03XP0273F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung, sowie dem Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH als Projektträger des BMBF für die kooperative Zusammenarbeit und Betreuung der Arbeiten.



Darüber hinaus gilt unser Dank unseren Projektpartnern:

TGM Lightweight Solutions GmbH, Berlin,

compren GmbH, Malchow

SMT - Forster System-Montage-Technik GmbH, Forst (Lausitz)

Laser-Mikrotechnologie Dr. Kieburg GmbH, Berlin

KSC Kraftwerks-Service Cottbus Anlagenbau GmbH, Peitz

MOCO Maschinen- und Apparatebau GmbH & Co KG, Viernheim

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus

Inhalt

I.	Kurzbericht.....	2
1.	Aufgabenstellung und wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	2
2.	Ablauf des Vorhabens.....	2
3.	Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	3
II.	Eingehende Darstellung.....	4
1.	Darstellung der erzielten Ergebnisse im Vorhaben	4
	AP 1.6: Spezifikation und Auswahl von funktionsintegrativen Basistechnologien	4
	AP 2.6.1: Entwicklung von Sensorintegrationstechnologien	6
	AP 2.6.2: Auswerteelektronik inkl. Anzeigesystem für SHM.....	9
	AP 3.6.1: Auslegung und Weiterentwicklung von Sensorsystemen für komplexe und seriennahe Bauteile.....	10
	AP 3.6.2: Spezifikation der Sensorkontaktierung und Anbindung für seriennahe Bauteilstrukturen	12
	AP 3.6.3: Prüfung der komplexen Technologiedemonstratoren: Sensorfunktionstest	15
	AP 4.6.1: Erstellung eines Sensorkonzeptes zur integrierten Qualitätssicherung bei der Fertigung	19
	AP 4.6.2: Konzeptionierung eines Steuerungssystems zur automatisierten Fertigung und Auslegung einer Überwachung der Prozesskette	19
	AP 5.6.1: Analyse und Validierung anwendungstechnischer Charakteristika (Sensorfunktion)...	21
	AP 5.6.2: Prozessintegrierte Erfassung der Sensordaten zur Erstellung einer Cloud-Datenbank für eine nachhaltige Qualitätssicherung.....	24
2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	26
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	26
4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planung für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	26
5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	27
6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 (NKBF98).....	28

Kurzbericht

1. Aufgabenstellung und wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Energieverbrauch im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) wird vor allem durch das häufige Beschleunigen und Verzögern bestimmt. Aus diesem Grund steht die Entwicklung von deutlich leichteren Fahrzeugen im Fokus vieler Hersteller und Betreiber. Die Kombination aus thermoplastischen faserverstärkten Kunststofflaminaten (T-FKV) und metallischen Dünnschichten zu funktionsintegrativen Leichtbauweisen erlaubt eine signifikante Gewichtsreduktion. Diese hybriden Mehrschichtverbunde besitzen einerseits hohe spezifische Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften und sind ähnlich wie metallische Bleche als tafelförmige Halbzeuge verfügbar. Andererseits lassen sie sich jedoch infolge des stark unterschiedlichen Werkstoffverhaltens der einzelnen Verbundkomponenten nur aufwendig herstellen und schwer in die bestehenden Prozessketten der Metallverarbeitung integrieren. Der prozessintegrierte Einsatz erfordert vor dem Hintergrund der Großserie daher die Entwicklung von effizienteren Herstellungsverfahren und zwingend die werkstoffgerechte Abstimmung der bewährten Umform- und Fügetechnologien auf die neuartigen hybriden Mehrschichtverbunde.

Weiteres, bisher ungenutztes Leichtbaupotential, wurde durch die funktionsintegrierte Gestaltung der Prototypen zur konstruktiven Reduzierung der Teileanzahl sowie durch die Anwendung von neuartigen elektrisch leitfähigen Kombinationsbeschichtungen für sensorische oder aktorische Aufgaben mit Brandschutzfunktion erschlossen.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war von Juni 2020 bis November 2022 geplant und wurde auf Grund der erschwerten Bedingungen durch die COVID-19 Pandemie (Eingeschränkter Zugang zu Büros, Laboren und Technika, Krankheitsbedingte Arbeitsausfälle, keine persönlichen Treffen) bis Mai 2023 kostenneutral verlängert.

Im Vorhaben wurde zur Aufgabenerfüllung das notwendige Arbeitsprogramm in Form von Arbeitspaketen geplant und im Verlauf der Projektbearbeitung, gemäß nachfolgender Auflistung abgearbeitet:

- AP 1: Analyse und Bewertung der Basis-Technologiedemonstratoren unter Berücksichtigung der spezifischen Einsatzrandbedingungen
- AP 2: Herstellung und Test von Schlüssel-Technologiedemonstratoren zur Identifikation von Prozessfenstern
- AP 3: Herstellung komplexer Technologiedemonstratoren
- AP 4: Entwurf und Aufbau einer serientauglichen Prozesskette zur fertigungstechnischen Umsetzung der realen Prototypen
- AP 5: Qualifizierung und serientaugliche Umsetzung in einer Pilotanlage, Anlagen- und Prozessqualifizierung
- AP 6: Regelwerkerstellung / Auswertung

Einige Arbeitspakete wurden fortlaufend bearbeitet, insbesondere betraf dies die Anpassung des Sensorsystems an die Projektdemonstratoren.

Alle geplanten Arbeitspakete wurden erfolgreich verwirklicht.

3. Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Projektverlaufes wurden mehrere unterschiedliche hybride Mehrschichtverbunde hinsichtlich Materialpaarung, Verarbeitbarkeit in einem Prozess, Füge- und Biegeuntersuchungen sowie Trennung der Materialpartner und Zuführung zum Recycling untersucht. Die Zusammenarbeit wurde von dem Projektpartner BTU organisiert und koordiniert. Die Zusammenarbeit erfolgt zwischen allen Projektpartnern.

Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung war die Funktionalisierung der verschiedenen hybriden Mehrschichtverbunde. Dabei wurde ein Sensorsystem entwickelt, welches funktionsintegriert, prozess- und werkstoffgerecht in die Bauteile während des Fertigungsprozesses integriert wurde. Dabei handelt es sich um textile Dehnungssensoren die Belastungszustände sowie Temperatursensoren die Temperaturänderungen während der Bauteilnutzung detektieren. Ein großer Entwicklungsschwerpunkt war, neben der Integration der textilen Sensorelemente inklusive der Zuleitungen in den Herstellungsprozess, auch die Entwicklung und Auslegung der verschiedenen Kontaktierungen. Durch die Erhebung von Messdaten von den integrierten Sensorsystemen zur Dehnungs- oder Temperaturmessung ist es möglich, eine Vielzahl von Use Cases zu bedienen. Dazu zählen: prädiktive Zustandsbeschreibung der Bauteile, Alarmierung bei Schwellwertüberschreitung und vieles andere mehr. Ein großer Vorteil liegt hierbei in

- der lückenlosen Qualitätsüberwachung,
- Kontrolle des Fertigungsprozesses,
- Analyse der auftretenden Lasten während des Betriebs sowie
- Optimierung des Fertigungsprozesses.

Das Projektziel wurde erfolgreich umgesetzt. Zum Projektende wurden 2 verschiedene Demonstratoren mit hybriden Mehrschichtverbunden durch die Zuarbeiten von Halbzeugen der Projektpartner hergestellt. In diesem hybriden Mehrschichtverbund wurden während des Herstellungsprozesses textile Sensorelemente integriert. Durch eine Kontaktierung nach außen konnten die Sensorelemente einem Funktionstest unterzogen, sowie Dehnungs- und Temperaturmessungen durchgeführt werden. In Verbindung mit der entwickelten Auswerteelektronik können Dehnungen bzw. Temperaturen im Bauteil ausgelesen und angezeigt werden.

I. Eingehende Darstellung

1. Darstellung der erzielten Ergebnisse im Vorhaben

AP 1.6: Spezifikation und Auswahl von funktionsintegrativen Basistechnologien

Durch das Projektkonsortium wurde eine Materialauswahl für die Demonstratorbauteile getroffen. Der Projektpartner BTU hat eine Vielzahl von Materialien beschafft und geprüft. Daraus wurden verschiedene Materialpaarungen abgeleitet und weiter untersucht. Der Projektpartner compren hat ein Teilausschnitt der Treppenverkleidung und der Projektpartner SMT das Demonstratorbauteil Fussbodenstruktur ausgewählt, wie auf der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt. Beide Demonstratorbauteile befinden sich im Innenraum eines Wagonabteils für den Personenverkehr.

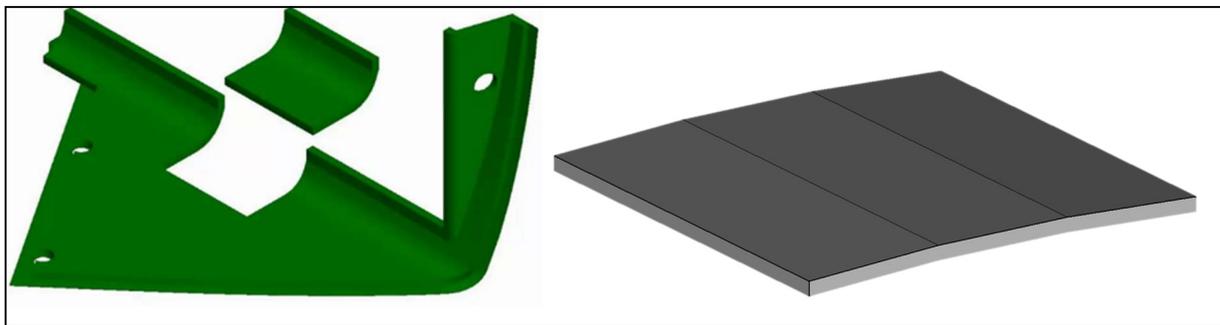


Abbildung 1: links: Demonstrator Treppenverkleidung; rechts: Demonstrator Bodenstruktur

Das Treppenelement befindet sich im Eingangsbereich und ist ein Teil der Wandverkleidung der Treppe. Der Projektpartner compren hat die Herstellung mit den Materialkombinationen hybrider Mehrschichtverbunde (H-SV) Typ 1 und Typ 2 geplant. Bei der Bodenstruktur hingegen, welche sich unmittelbar am Eingangsbereich der Türen befindet, ist die Herstellung aus dem H-SV Typ 3 bzw. einem Handlaminat geplant. Bei beiden Demonstratorbauteilen ist der Vergleich der Herstellungsverfahren mittels Heißpressen, Kleben und des Handlaminier-Verfahrens angestrebt, begründet durch die Materialkombinationen. Um die Funktionsdichte in den Bauteilen zu erhöhen wurden Randbedingungen hinsichtlich des Fertigungsverfahrens und der Einsatzbedingungen definiert. Daraus lassen sich entsprechende Anforderungen an das Sensorconcept ableiten.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die Anforderungen an das entsprechende Sensorconcept für die jeweiligen Prozessschritte und Einsatzbedingungen aufgelistet und beschrieben.

Tabelle 1: Anforderungen und Randbedingungen der jeweiligen Demonstratorbauteile an das Sensor-konzept

Anforderung an	Demonstrator Treppenelement	Demonstrator Bodenstruktur	Ableitung Sensorkonzept
<i>Herstellung</i>	Druck und Temperaturbelastungen, partielle Temperaturbelastung durch Fügeverfahren (Schweißen)		Unempfindlich gegenüber Herstellungsparameter; Positionierung der Sensoren beachten
<i>Betriebszustand</i>	Anforderungen im Betrieb an Beständigkeit gegenüber Vibrationen; Kollisionssicherheit DIN EN 12299: Komfortansprüche	Hohe Belastung durch Personenverkehr (statische und dynamische Lasten); Kollisionssicherheit DIN EN 12299: Komfortansprüche	Betriebssicherheit gegenüber u.a. allg. Sicherheit, Vibrationen, Schall, Komfort, Design
<i>Mechanische Beanspruchungen</i>	dynamisch (Fahrvibrationen, Vandalismus) Statisch – Eindrücken der Verkleidung Kollisionssicherheit DIN EN 15227 beachten	dynamisch (Fahrvibrationen, Personen) Statisch (Personen, Transportgüter) Kollisionssicherheit DIN EN 15227 beachten	Sicher gegenüber dynamischen Beanspruchungen/Impakt und statische Beanspruchungen DIN EN 50155 beachten Leitungsverlegung, Kontaktierung beachten
<i>Temperatur</i>	Temperatur-schwankungen; Einsatz bei -25°C bis +55°C	Temperatur-schwankungen; Einsatz bei -25°C bis +70°C	Unempfindlich bzw. Berücksichtigung gegenüber dem zu erwartenden Temperaturbereich
<i>Medieneinfluss</i>	Mittel; Berücksichtigung von EN 60721-3-5:1998-06 Klasse 5C2	Hoch; Wasser, Salze, Öle (Fahrrad, ...)	Resistent gegen Reinigungsmittel sowie gegen Öle, Kühlmittel, Batterie-Elektrolyte, Flüssigkeiten, Salz bei Oberflächenkontakt
<i>Brandsicherheit</i>	Berücksichtigung der DIN EN 45545 HL2	Berücksichtigung von der DIN EN 45545-2 R10 HL3	Brandschutz berücksichtigen
<i>Optische Anforderung</i>	Designanforderung, Bauteil ist entsprechend lackierfähig	Designanforderung, Bauteil/Boden ist entsprechend versiegelt	Kein Einfluss auf mögliche Lackierung
<i>Alterung</i>	Versprödung des Kunststoffes	wenig	Keine Alterung während des Produktlebenszyklus

Die Anforderungen an beide Bauteile sind sehr hoch. Um eine sichere Funktion während des Betriebes zu gewährleisten, ist ein integriertes oder gekapseltes Sensorsystem von Vorteil.

AP 2.6.1: Entwicklung von Sensorintegrationstechnologien

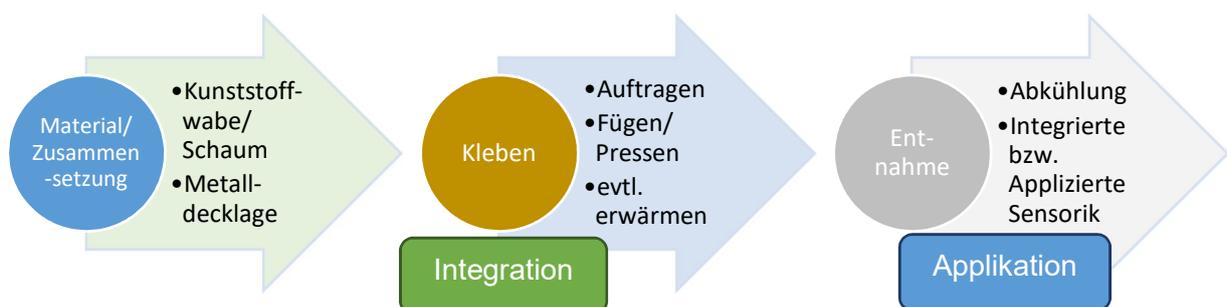
Eine integrierte Sensorstruktur ist vor äußeren Einflüssen geschützt, benötigt einen geringen Bauraum und kann in den Herstellungsprozess integriert werden. Die verschiedenen Materialtypen bzw. Materialkombinationen wurden vom Projektkonsortium in einer Materialmatrix gesammelt und jedem Projektpartner zur Verfügung gestellt. Daraus leiten sich die möglichen Herstellungsverfahren ab. Für die Herstellung der Demonstratorbauteile werden die Herstellungsverfahren Heißpressen, Kleben und Handlaminat näher untersucht. Nachfolgend sind für jedes Herstellungsverfahren die einzelnen Prozessschritte und mögliche Prozessfenster für die Integration bzw. Applikation der Sensorik dargestellt.

1. Heißpressen - Prozessfenster zur Integration der textilen Sensorik



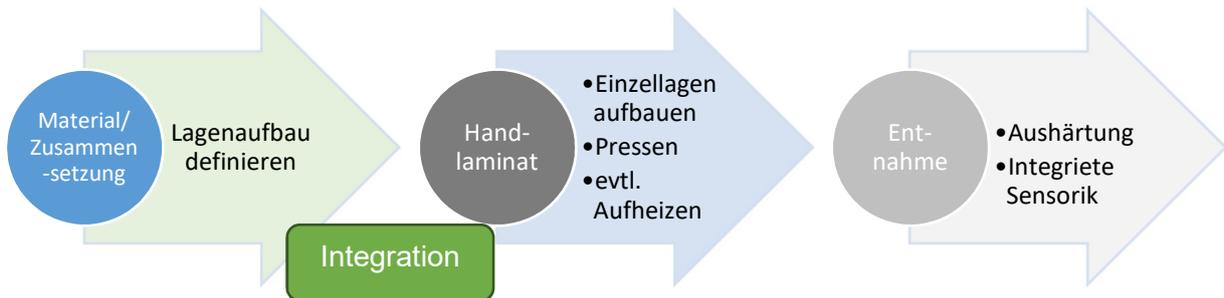
Das Herstellungsverfahren Heißpressen eignet sich für die Integration textiler Sensoren hervorragende, da die Kunststoffschmelze aufgeschmolzen wird und die Kunststoffschmelze die textilen Sensoren einbettet. Bei der Integration ist auf die Prozesstemperatur zu achten und ggf. durch die Materialwahl beeinflussbar. Wie hoch der Umformungsgrad bei den jeweiligen Materialkombinationen ist, wird bei der spezifischen Sensorpositionierung im Bauteil bzw. Werkzeug und den experimentellen Versuchen analysiert und bewertet.

2. Kleben - Prozessfenster zur Integration/Applikation der textilen Sensorik



Bei der Metallkombination H-SV Typ 3 ist eine Integration der textilen Sensoren nur begrenzt möglich. Dabei muss der Klebstoff auf die Haftung zwischen textilen Sensor und den jeweils anderen Materialpartner untersucht werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die textilen Sensoren auf die jeweilige Oberfläche als Decklage zu applizieren. Bei dieser Variante werden angrenzende Bauräume untersucht, um die Sensorfunktion nicht zu beeinträchtigen.

3. Handlaminat - Prozessfenster zur Integration der textilen Sensorik



Im Handlaminat ist die Integration der textilen Sensoren in den Lagenaufbau sehr gut möglich. Dabei ist die Orientierung der textilen Sensoren und die Einbetttiefe für die Sensorfunktion wichtig. Eine geeignete Leitungsführung und ggf. eine Integration einer Steckverbindung wird untersucht.

Definition der Messaufgabe und Vorauswahl von Sensortypen und Sensorfunktion

Sensorkonzept für das Demonstratorbauteil Treppenelement

Das Treppenelement befindet sich im Durchgangsbereich der Treppe im Wagoninnenraum. Durch beabsichtigte oder unbeabsichtigte Schläge (bspw. durch Vandalismus) gegen das Treppenelement bzw. das Verkleidungsteil kann dieses beschädigt werden. Um die Notwendigkeit eines Austauschs des Bauteils beurteilen zu können, ist eine Zustandsüberwachung des Bauteils von Vorteil. Hierbei können Dehnungssensoren zum Einsatz kommen, die über eine schnellere Taktung eine Impaktbelastung detektieren. Des Weiteren sind Temperatursensoren geplant, die in das Bauteil integriert sind. Damit könnte zukünftig die Wagentemperatur auch über die integrierten Temperatursensoren geregelt werden. In den nachfolgenden Abbildung 2 sind die möglichen textilen Sensoren dargestellt.

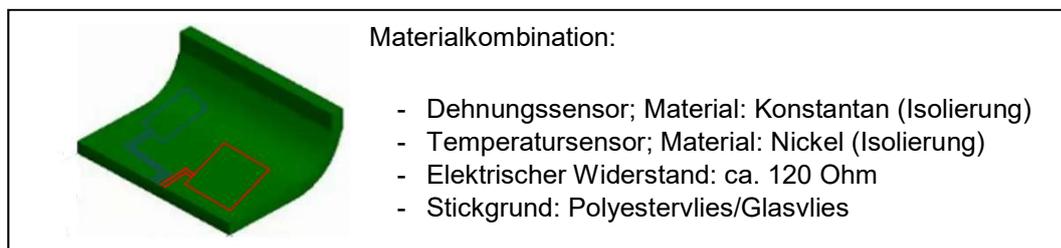


Abbildung 2: Sensorkonzept für Demonstratorbauteil Treppenelement

Sensorkonzept für das Demonstratorbauteil Bodenstruktur

Die Messaufgaben bei dem Demonstratorbauteil Bodenstruktur ist die Erkennung von Trittmustern oder Belegungserkennungen. Dabei wird über 3 Dehnungssensoren durch eine geringfügige Durchbiegung der Bodenstruktur ein Sensorsignal generiert. Eine mögliche Anordnung der Dehnungssensoren ist auf der nachfolgenden Abbildung 3 zu sehen:

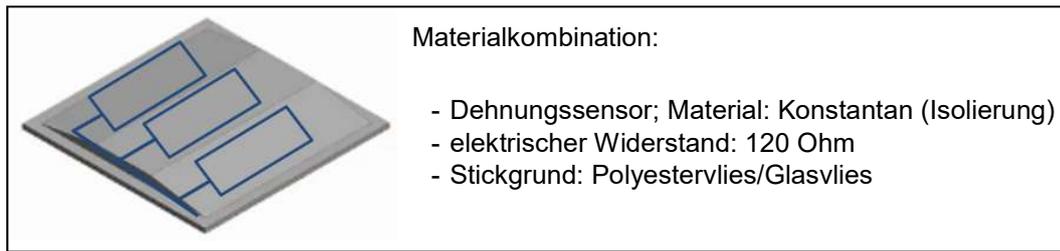


Abbildung 3: Sensorconcept für Demonstratorbauteil Bodenstruktur

Bei diesem Konzept besteht die Möglichkeit mit dieser Dehnungssensorik Trittmuster bzw. die Personenbelegung im Wagon zu erkennen und evtl. das Fahrverhalten des Zuges darauf anzupassen.

Sensorspezifikation

Die Herausforderung bei der Integration von textilen Sensoren in einen hybriden Mehrschichtverbund ist die elektronische Entkopplung und optimale Funktionsweise der Sensorik. Dies wird im Einzelnen durch geeignete Materialwahl bzw. durch mögliche Isolierschichten gelöst. Dabei ist die Integration bzw. Applikation der textilen Sensoren in den hybriden Mehrschichtverbund entscheidend. In der Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile der Integration bzw. Applikation textiler Sensoren gegenübergestellt.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Integration/Applikation textiler Sensoren

	Sensorintegration	Sensorapplikation
<i>Vorteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Sicher vor Medieneinflüssen und mechanischen Beanspruchungen - Unsichtbarkeit des Sensorsystems - Prozessintegration - Konturanpassung an das Bauteil - Kleiner Bauraum notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - Applikation auf Metallen mit ausreichender Vorbereitung gut möglich - Reparaturen/Austausch möglich
<i>Nachteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Prozessintegration - Integration in Metallen nicht möglich - Zugänglichkeit über Kabel muss gewährleistet werden - Reparatur schwer möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Zusätzlicher Prozessschritt nachträglich notwendig - Ausreichende Matrix notwendig um Mediendicht abzuschließen - mehr Bauraum erforderlich - Anfällig gegen mech. Belastungen an der Oberfläche - Konturanpassung nur begrenzt möglich

Konzepte zur Materialverfolgung bzw. In-Haus-Lokalisierung

Um Bauteile im Fertigungsprozess entsprechend zuordnen zu können sollte eine Kennzeichnung erfolgen. Die Kennzeichnung könnte mit einer Beschriftung via Laserbearbeitung oder Gravur, RFID-Chips oder mit Hilfe von QR-Codes erfolgen. Auf den beiden letztgenannten Systemen lassen sich deutlich mehr prozessbezogene Daten speichern. Die Systeme unterscheiden sich in ihrer Art, ausgelesen zu werden. Ein RDIF-Chip (radio-frequency identification) muss erst per Funkübertragung beschrieben werden, um ihn später mit einem Lesegerät auslesen zu können. QR-Codes (Quick Response-Code) hingegen können über kleine freie Softwaretools erstellt werden. Die erstellten Bilddateien können auf die Oberfläche gedruckt bzw. gelasert werden und optisch ausgelesen werden. Geplant ist, beide Systeme in die Bauteile zu integrieren, um die Nachverfolgbarkeit der Bauteile zu untersuchen. Exemplarisch sind ein RFID-Chip und ein QR-Code nachfolgend abgebildet (siehe Abbildung 4):



Abbildung 4: links:RFID-Chip; rechts: QR-Code

AP 2.6.2: Auswertelektronik inkl. Anzeigesystem für SHM

Für die 2 Technologiedemonstratoren wurde im Unterauftrag eine Auswertelektronik von der Fa. FiberCheck GmbH entwickelt und konfiguriert. Die Auswertelektronik ist jeweils für beide Technologiedemonstratoren einsetzbar. In der Abbildung 5 ist die Hardware dargestellt. Die Auswertelektronik befindet sich in dem Gehäuse. Die Stromversorgung wird über einen herkömmlichen USB-Anschluss mit 5 V über bspw. einen PC sichergestellt. An der Zuleitung können verschiedene Sensoren angeschlossen werden. 2 Steckplätze sind für Sensoren mit einem Grundwiderstand von 120 Ω vorgesehen. Ein weiterer Anschluss ist mit einem Wahlschalter zwischen einem Grundwiderstand von 120 Ω und 350 Ω ausgestattet. Ein 4ter Anschluss ist für die Temperaturmessung vorgesehen und gibt den elektrischen Widerstand des Temperatursensors aus. In den nächsten Schritten kann eine Temperaturkurve mit den entsprechenden Widerstandswerten programmtechnisch hinterlegt werden. Der Verlauf des Sensorsignals wird visuell per Software auf einem PC ausgegeben oder kann über ein separates Datentool gespeichert werden.

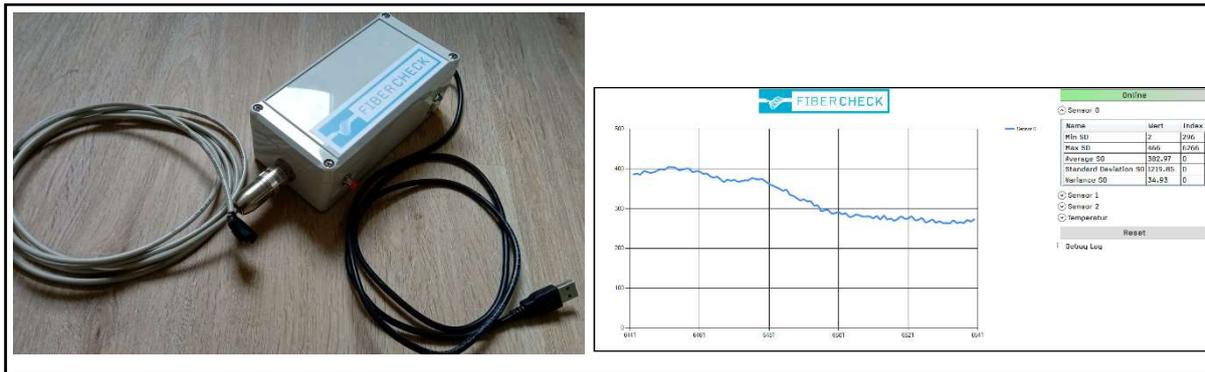


Abbildung 5: FiberCheck-Auswerteelektronik und Ausschnitt der Software

Die Funktion der Auswerteelektronik ist im AP 3.6.3 erläutert.

AP 3.6.1: Auslegung und Weiterentwicklung von Sensorsystemen für komplexe und seriennahe Bauteile

Gemäß dem AP 2.6.1 wurden die Messaufgaben je Technologiedemonstrator definiert.

Während der Projektbearbeitung wurde das Demonstratorbauteil des Projektpartners compren geändert. Das aktuelle, ausgewählte Bauteil ist ein Verkleidungsteil an der Decke (Deckenverkleidung), welches sich ebenfalls im Treppenbereich und im Wagoninnenraum befindet. Es ist ein doppelt gekrümmtes Bauteil mit folgenden Abmessungen: Es hat eine Breite von ca. 860 mm, eine Höhe von ca. 550 mm und eine Tiefe von ca. 150 mm. Die Anforderungen decken sich mit dem vorherigen Bauteil „Treppenverkleidung“.

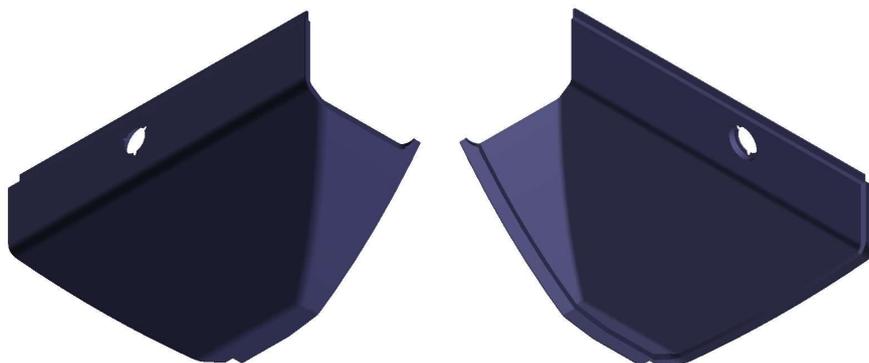


Abbildung 6: CAD-Modell neues Demonstratorbauteil (Deckenverkleidung) compren

Für das Demonstratorbauteil Deckenverkleidung sind Impact- sowie ein Temperatursensor vorgesehen. Entsprechend der Vorgabe des Projektpartners compren wurden die Sensoren auf einer 2D-Abwicklung positioniert. Dieses zweidimensionale Halbzeug wird zur Herstellung des Demonstrators in das Werkzeug eingelegt und verpresst. In Abbildung 7 ist eine Variante der Sensoren für das Demonstratorbauteil Deckenverkleidung ohne Kontaktierung nach außen dargestellt.

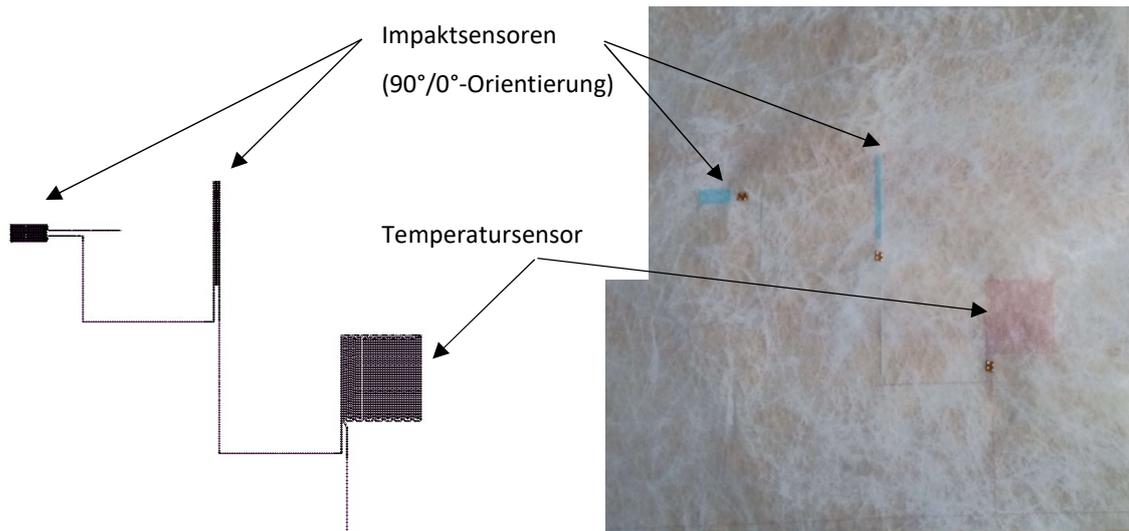


Abbildung 7: Sensorhalbzeug für Demonstrator Treppenelement (links: gepuncht; rechts gestickt)

Bei dem Demonstratorbauteil Bodenstruktur werden basierend auf der Definition der Messaufgabe Dehnungssensoren eingesetzt. Eine Bauteilanalyse der zu erwartenden Belastung und daraus resultierenden Dehnungen wurden durch den Projektpartner TGM durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurde eine Sensoranordnung entwickelt und umgesetzt. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt den Spannungsverlauf des Demonstratorbauteil Bodenstruktur bei einer angreifenden Kraft von 1000 N, die mittig in die Struktur eingebracht wirkt.

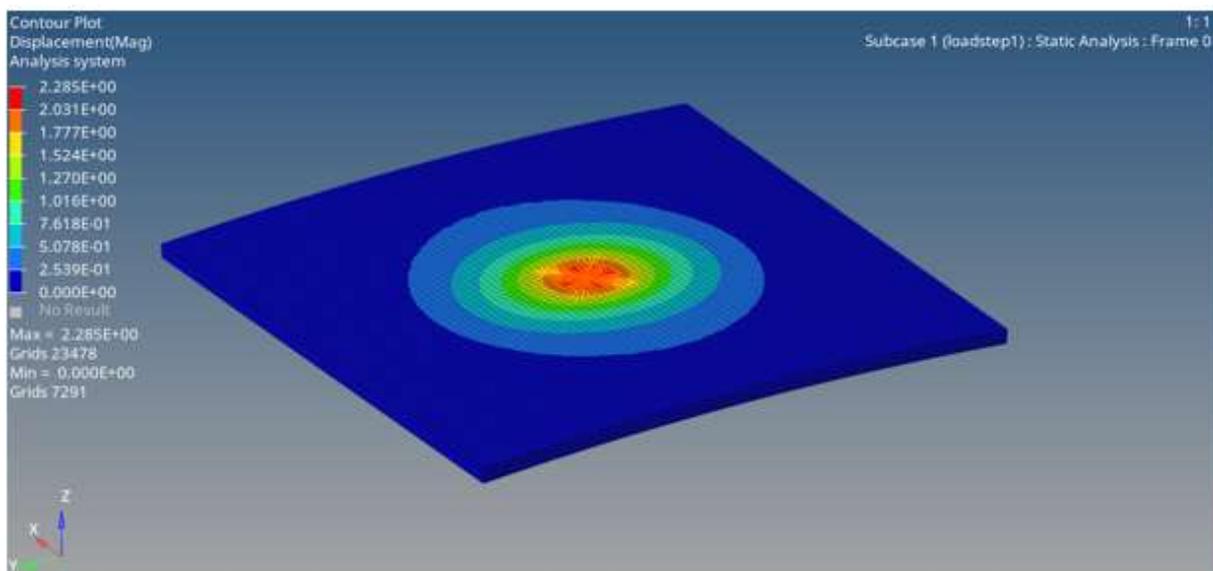


Abbildung 8: Verformungsverlauf des Demonstratorbauteils Bodenstruktur

Die Durchbiegung des Demonstratorbauteil Bodenstruktur erfährt mit dem Kernmaterial THERMHEX PP eine Verformung von 2,75 mm bzw. 2,29 mm in z-Richtung je nach Ausrichtung des Kernmaterials. Die größte Durchbiegung ist in dem Mittelsegment zu erwarten. Um weitere Bewegungsmuster zu analysieren sind weitere Dehnungssensoren in den beiden geneigten Segmenten angeordnet, vgl. Abbildung 9.

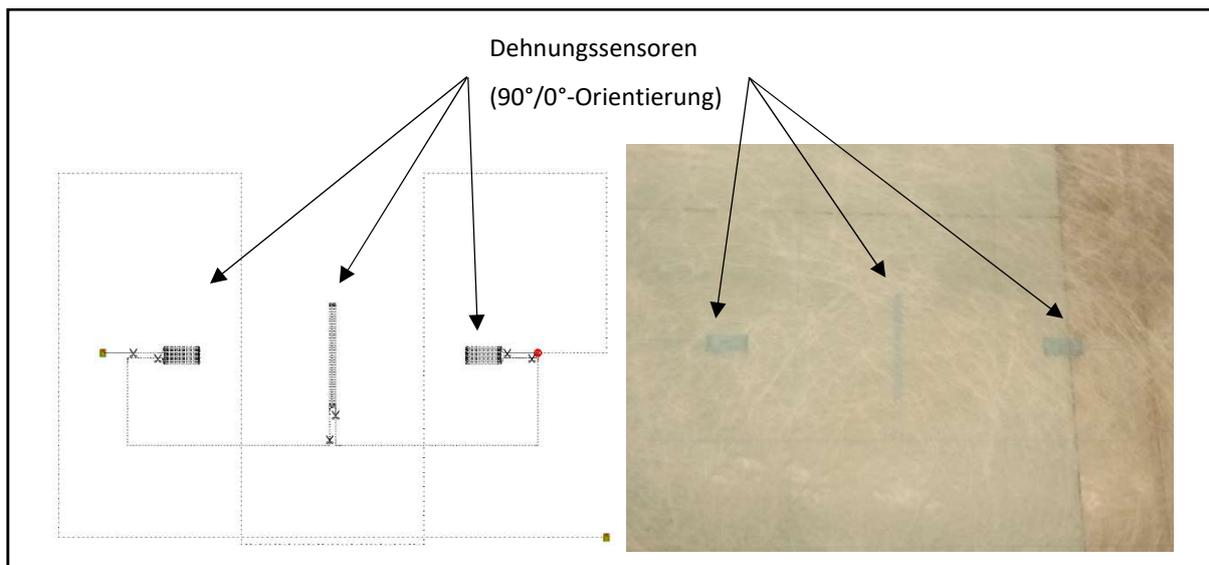


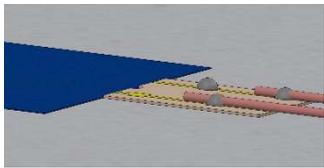
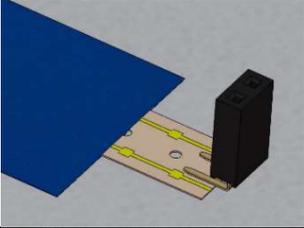
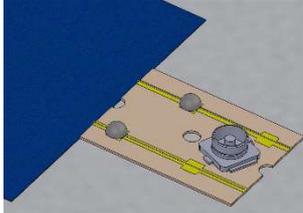
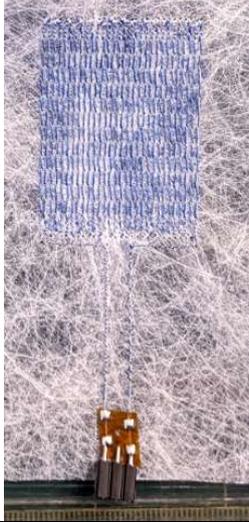
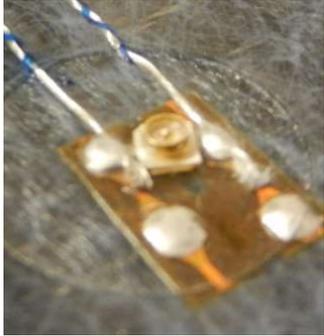
Abbildung 9: CAD-Abbildung zur Anordnung der Dehnungssensoren für das Demonstratorbauteil Bodenstruktur (links: gepuncht; rechts: gestickt)

Der Verlauf der Signalleitungen an den Bauteilrand ist in diesen ersten Mustern noch nicht umgesetzt. Die entwickelten Sensorhalbzeuge wurden für die Integration der Demonstratorbauteile in ausreichenden Mengen zur Verfügung gestellt.

AP 3.6.2: Spezifikation der Sensorkontaktierung und Anbindung für seriennahe Bauteilstrukturen

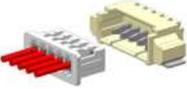
Für die Kontaktierung der Sensoren sind je Sensor 2 Signalleitungen notwendig. Die Kontaktierung des textilen Sensors ist eine Herausforderung bei integrierten Sensoren, da aufgrund des Aufbaus des hybriden Mehrschichtverbundes eine Zugänglichkeit zu den Sensoren nach der Bauteilherstellung beeinträchtigt wird. Es sind zwei Kontaktierungen notwendig. Die 1. Kontaktierung befindet sich unmittelbar am Sensor und die 2. Kontaktierung ist die Kontaktstelle nach „außen“ zu bspw. der Auswerteelektronik. Nachfolgend sind Möglichkeiten zur Kontaktierung abgebildet und bewertet, vgl. Tabelle 3

Tabelle 3: Möglichkeiten zur Sensorkontaktierung

Bezeichnung	Lötverbindung via Kabel	Pin-Steckverbinder	BNC-Steckverbindung
<i>CAD-Abbildung</i>			
<i>Realversuch</i>			
<i>Bemerkung</i>	Die Zuleitungen können während der Sensorherstellung auf dem Trägertextil positioniert und fixiert werden	Positionierung der Pin-Steckverbindung auf dem Kontaktpad möglich	Positionierung der BNC-Steckverbindung auf dem Kontaktpad möglich
<i>Bewertung</i>	Verbindung ausreichend robust nach Pressversuch	Schutz der Steckkontakte erforderlich Funktionstest nach Pressversuch steht noch aus	Buchenschutz erforderlich, Funktionstest nach Pressversuch steht noch aus

Die Zuverlässigkeit der Kontaktsteckverbindung wurde näher untersucht. Für die Kontaktierung der Sensoren wurden mehrere Varianten ausgewählt und prototypisch umgesetzt. Wesentliche Eigenschaften der Steckverbindung sind neben der zuverlässigen Verbindung auch ein niedriger elektrischer Übergangswiderstand sowie die Handhabung des Steckkontaktes. Durch ein Lösen der Verbindung wird ein möglicher Austausch der Bauteile realisierbar und erhöht die Wartungsfreundlichkeit. Eine Übersicht der möglichen Varianten ist in Tabelle 4 dargestellt. Dabei stellte sich heraus, dass die Varianten 1 und 3 durch ihre Bauform sehr hohen Aufwand an das manuelle Umsetzen der Lötung hatte. Prototypisch wurde eine Steckverbindung umgesetzt, jedoch nicht weiterverfolgt.

Tabelle 4: Übersicht Kontaktvarianten

Variante	1	2	3	4
Bezeichnung	Molex PicoBlade	JST Steckverbindung	Mikrokoaxial Steckverbinder	Pinheader
Abbildung				
Schritte	Crimpen, Lötten	Crimpen, Lötten	Lötten	Lötten
Steckhöhe	3,4 mm	5,6 mm	1,9 mm	3,46 mm
Anzahl Pole	2 bis 15	2 bis 10	2	1 bis 10
Spannung (max.)	125 V	50 V AC	nicht bestimmt	250 V
Stromstärke (max.)	2,5 A	1,0 A	nicht bestimmt	3,0 A
Kontaktwiderstand (max.)	20 mΩ	20 mΩ	20 - 50 mΩ	20 mΩ
Spannungsfestigkeit	250 V AC	500 V AC	Überschlag (200 V)	1000 V AC
max. Steckzyklen	30	nicht bestimmt (ca. 10)	30	nicht bestimmt
Betriebs-temperaturbereich	-40 °C bis 85 °C/ 105 °C	-25 °C bis 85 °C	-40 °C bis 105 °C	-40 °C bis 105 °C

Die Kontaktvarianten 2 und 4 wurden untersucht und verglichen, vgl. Abbildung 10 bis Abbildung 12. Bei den durchgeführten Versuchen erfolgte bei keiner Kontaktvariante ein Versagen. Eine Zugentlastung bei den Proben ist von Vorteil. In den Nachfolgenden Abbildungen sind Kontaktvarianten dargestellt, die den Steckkontakt zugänglich von oben bzw. von der Seite gewährleisten. Dies zeigt die hohe Varianz der Positionierung der Steckkontakte an den Bauteilen und kann somit an die Bauteilspezifikation angepasst werden. Für die Kontaktierungsvariante „oben“ ist eine Aussparung im hybriden Mehrschichtverbund notwendig, um die Zugänglichkeit der Steckverbindung zu gewährleisten.

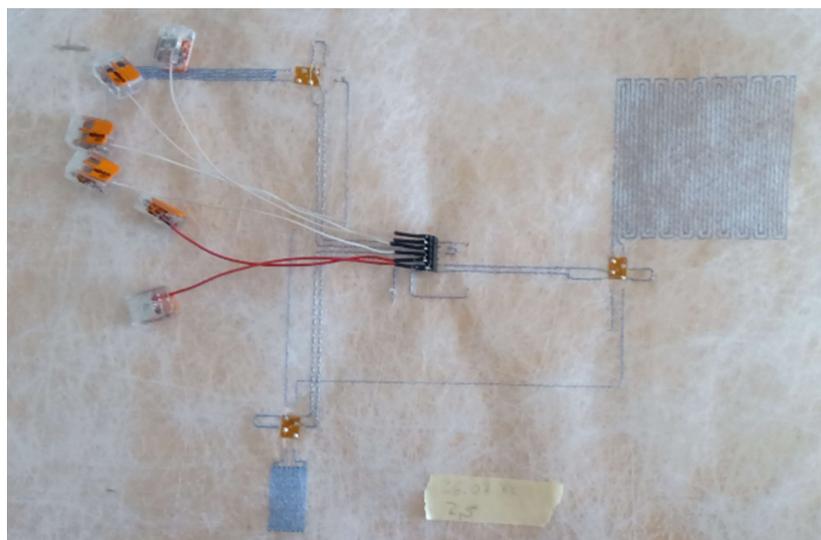


Abbildung 10: Sensorlayout mit Zuleitung, Pin-Steckkontakt und Kontaktierung mit Klemmverbindern

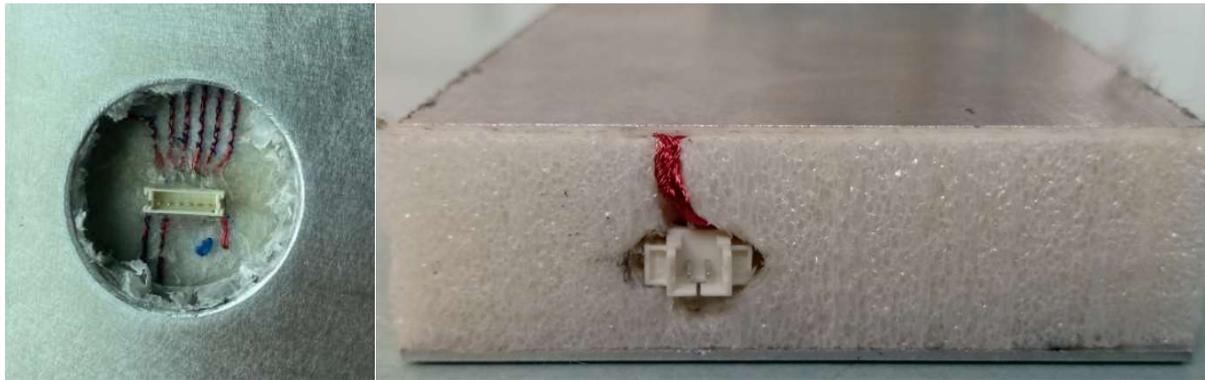


Abbildung 11: JST-Steckverbindung; links Bauteiloberfläche; rechts: Bauteilrand im hybriden Mehrschichtverbund

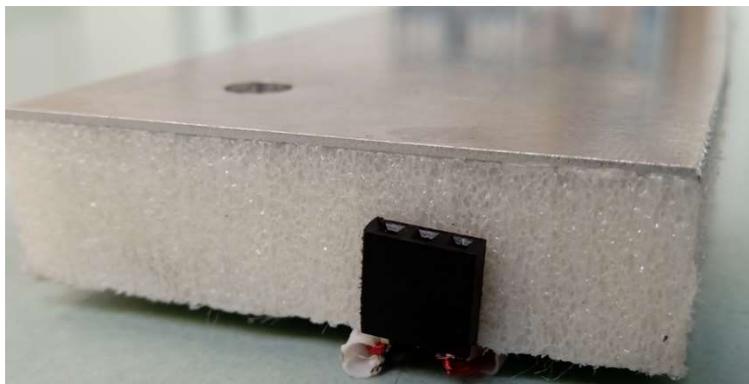


Abbildung 12: Pin-Steckverbindung – Bauteilrand im hybriden Mehrschichtverbund

AP 3.6.3: Prüfung der komplexen Technologiedemonstratoren: Sensorfunktionstest

Nach Integrationsversuchen wurden die Sensoren auf Funktion getestet. Die Sensoren wurden bei dem Projektpartner BTU in den Pressprozess eingelegt und somit in den hybriden Mehrschichtverbund integriert. Die Sensoren wurden auf verschiedene Trägermaterialien gestickt um die Materialanbindung beurteilen zu können, vgl. Abbildung 13.

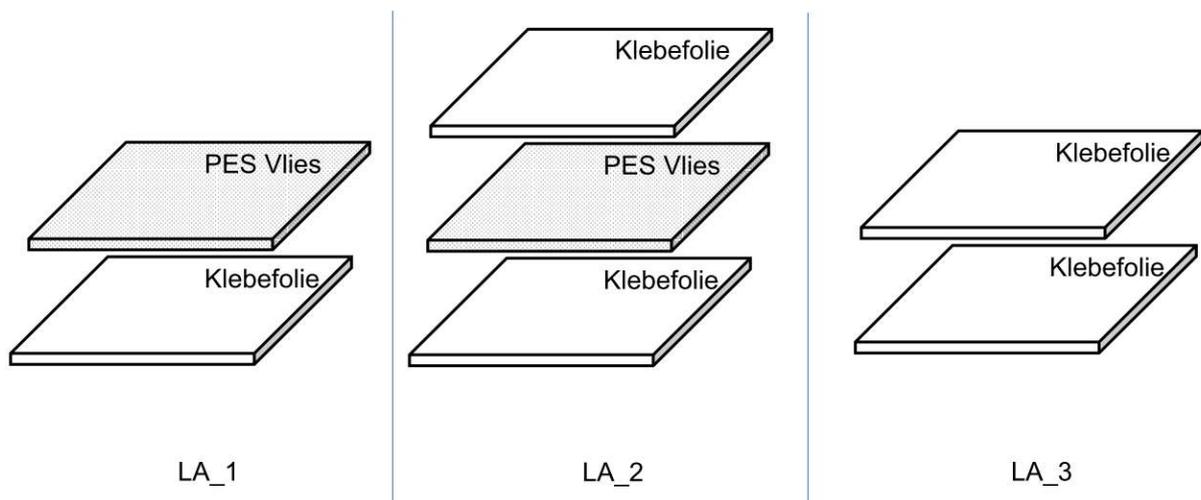


Abbildung 13: Varianten der Trägerstruktur



Abbildung 14: Versuchskörper vor (links) und nach (rechts) dem Pressprozess

Wie in der Abbildung 14 dargestellt, ist die Integration der textilen Sensorik in den hybriden Mehrschichtverbund erfolgreich umgesetzt worden. Die Funktion der Sensoren ist nach dem Pressprozess gewährleistet. Dabei stellte sich der Lagenaufbau LA_1 als geeignete Variante heraus.

Um die Sensorfunktion und den Abgleich mit der Auswertelektronik durchzuführen wurde ein Versuchsmuster hergestellt, vgl. Abbildung 15. Dieses besteht aus einem textilen Dehnungssensor D120, welche in einer thermoplastischen Matrix mit unidirektional ausgerichteten Glasfasern integriert wurde. Diese Materialkombination wurde in Verbindung mit einer Waben- bzw. Schaumstruktur als Sandwichbauteil zusammengeführt.

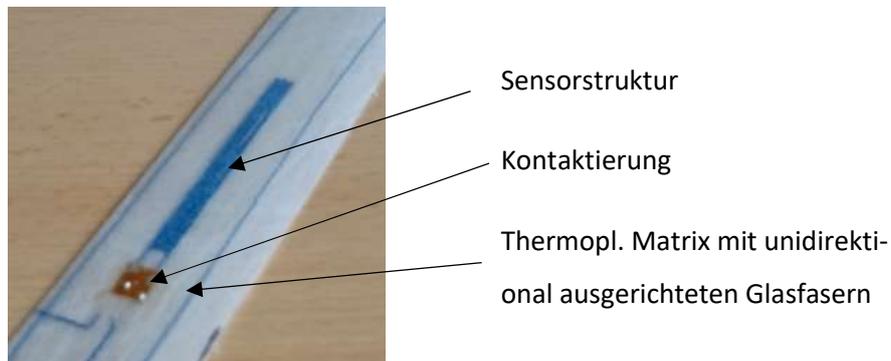


Abbildung 15: Versuchsmuster mit integriertem Dehnungssensor

Die Auswertelektronik, vgl. Abbildung 5, wurde an das Versuchsmuster angeschlossen. Die Y-Skala lässt einen Ausschlag der Amplitude in beide Richtungen zu, welches die Dehnung und Stauchung des Dehnungssensors zuordnen lassen. Die Abtastung des Messsignals wurde auf 6,2 ms festgesetzt. Diese Abtastrate generiert ausreichende Messwerte für die Messung von Dehnungs- oder Impaktbelastungen. In den nachfolgenden Abbildung 16 und Abbildung 17 ist das Sensorsignal aufgrund einer Biegung und oszillierenden Belastung des Versuchsmusters abgebildet. Für den Funktionstest wurde alle Kanäle angeschlossen und getestet. Es ist eine signifikante Abhängigkeit zwischen mechanischer Belastung und elektrischem Signal ersichtlich.

Abbildung 16 zeigt eine langsame Verformung des Versuchsmusters und dementsprechend eine langsame Änderung des Sensorsignals eines textilen Dehnungssensors.

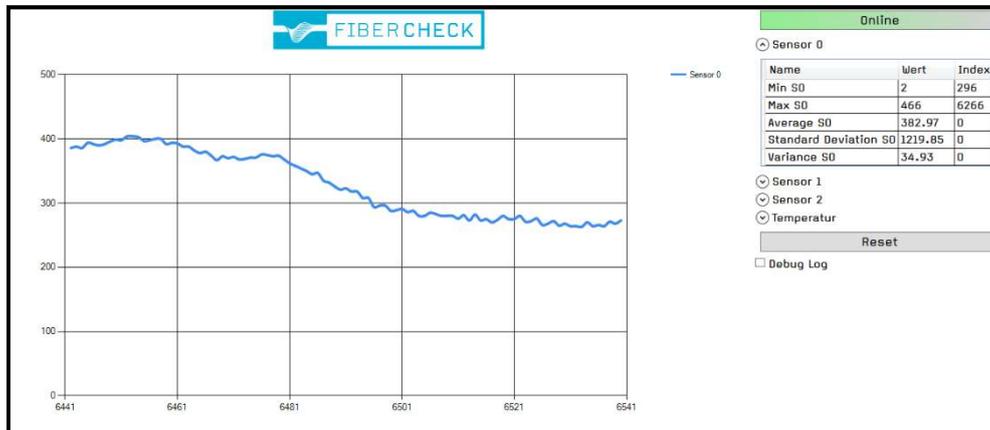


Abbildung 16: Sensorsignal - langsame Dehnung

In der Abbildung 17 ist ein oszillierendes Sensorsignal infolge einer dynamischen Anregung abgebildet. Die Daten können über eine weitere Software in eine txt-Datei abgespeichert werden, um die Messdaten auszuwerten.

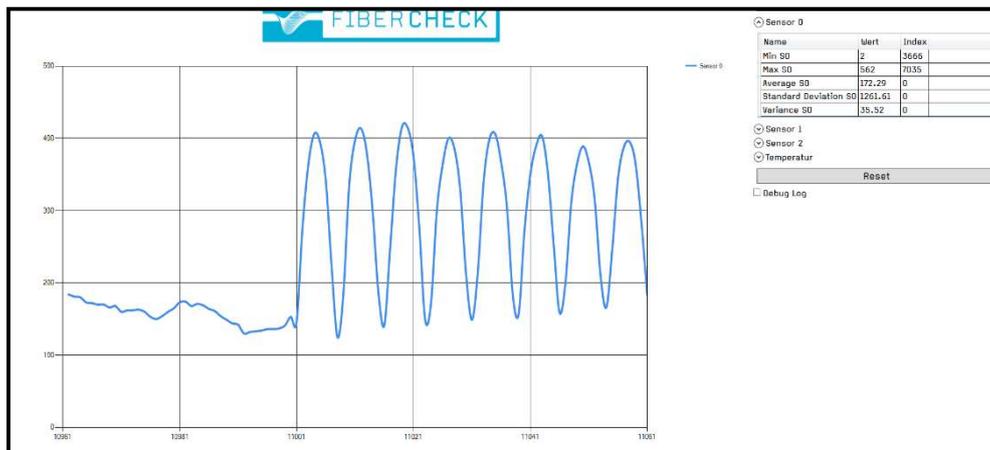


Abbildung 17: Sensorsignal - Oszillierende Bewegung

Der Funktionstest der integrierten Sensoren als auch der Auswerteelektronik ist erfolgreich umgesetzt wurden.

Untersucht wurde die Empfindlichkeit bzw. die Funktion eines Temperatursensors T100 im Verbund. Dazu wurde ein Temperatursensor T100 in einen hybriden Mehrschichtverbund integriert. Die Probe wurde ausgeschnitten und in einem Umluftofen aufgeheizt. Mithilfe der Auswerteelektronik und der Referenztemperatur am Umluftofen bzw. am Referenzthermometer wurde ein Temperaturprofil erfasst, vgl. nachfolgende Abbildung 18.



Abbildung 18: Probe im Umluftofen

Temperaturgang von integrierten T100 zu Referenztemperaturen

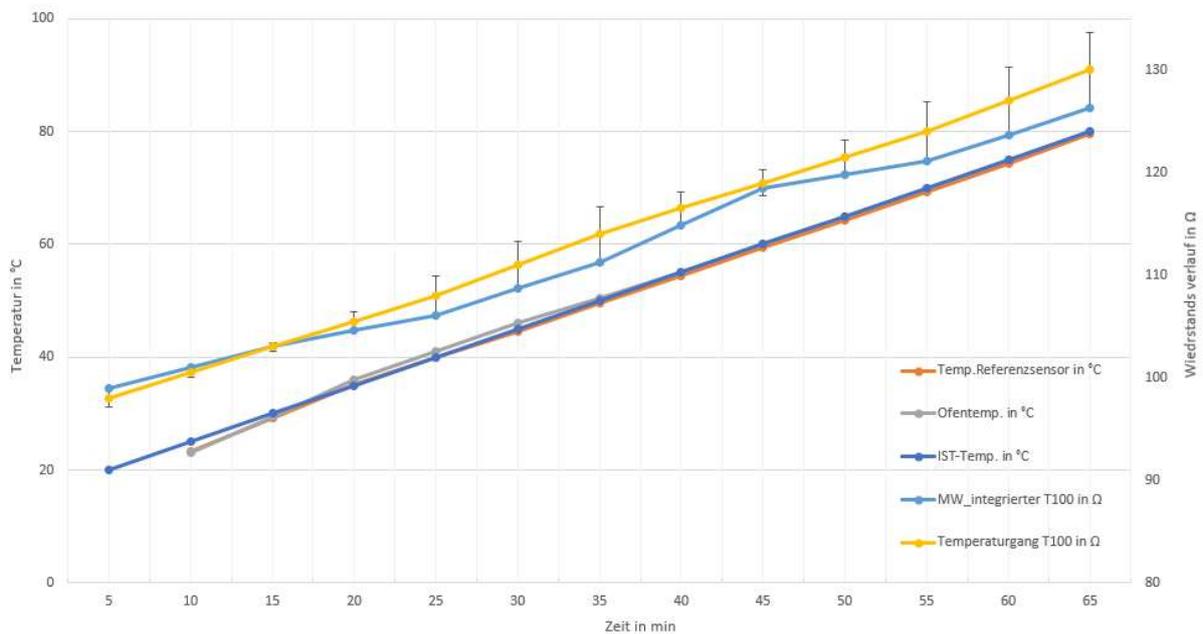


Abbildung 19: Temperaturgang T100 im Vergleich

Das Diagramm, vgl. Abbildung 19, beschreibt die tatsächliche Temperatur mittels Referenztemperaturfühler und den Verlauf des integrierten T100. Die Temperaturstufen wurden schrittweise alle 5 min erhöht und aufgezeichnet. Dabei betrug die Anpassungszeit des integrierten T100 ca. 40 s zwischen den einzelnen Temperaturstufen. In dem Diagramm ist die signifikante Abhängigkeit zwischen dem Temperatur- und dem Widerstandssignal des textilen Temperatursensors ersichtlich. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte eine maximale Toleranz von bis zu 5 Ω je Messbereich. Dies entspricht einer

Temperaturdifferenz von ca. 7 °C. Durch Anpassung der Auswertelektronik auf einen kleineren Messbereich kann die Empfindlichkeit des textilen Sensors angepasst werden.

Der Temperatursensor T100 kann als integrierter Temperatursensor in einem Mehrschichtverbund zur Auswertung der Temperatur verwendet werden.

AP 4.6.1: Erstellung eines Sensorkonzeptes zur integrierten Qualitätssicherung bei der Fertigung

Durch die Integration von Sensorik können die Signalverläufe während der Bauteilherstellung aufgezeichnet werden. Daraus kann die Qualität des Verbundes durch vergleichen der Bauteilparameter während des Herstellungsprozesses beurteilt werden. Dadurch können Rückschlüsse auf die Qualität einer Herstellungscharge gezogen werden und dienen erheblich der Qualitätssicherung der hergestellten Produkte.

Der Prozessablauf für die Erfassung der Herstellungsparameter die unmittelbar am Bauteil erfolgen, können mit einem Temperatursensor T100 erfolgen. Während der Herstellung eines hybriden Mehrschichtverbundes ist die Integration eines Temperatursensors T100 in diesen Verbund sehr gut möglich. Dabei erfolgte eine Live-Ansteuerung eines Temperatursensors und Überwachung des Sensorsignals über den gesamten Herstellungszyklus um die tatsächliche Temperatur im Bauteil zu messen und Rückschlüsse auf mögliche Qualitätsunterschiede zu ziehen. Zur Auswertung dieses Sensorkonzeptes zur Qualitätssicherung sollten folgende Parameter zur Verfügung stehen:

- Zeit
- Pressdruckverlauf – Druckkräfte des Stempels
- Presse – Position des Stempels
- Temperaturverlauf beim Pressen (Temperaturfühler Presse)
- Temperaturverlauf beim Abkühlen (Temperaturfühler Presse)
- Sensorsignal/Temperatursignal im Bauteil

Das Sensorkonzept sieht vor, dass durch eine Liveüberwachung die Temperatur unmittelbar am Bauteil gemessen werden kann. Damit kann der Abgleich von Daten wie bspw. Temperaturen zu bestimmten Zeitpunkten zur Qualitätssicherung beitragen. Die Liveüberwachung kann für die Bauteilherstellung zur Prozesssteuerung, -überwachung sowie zur -optimierung eingesetzt werden und ein bedeutendes Hilfsmittel sein.

AP 4.6.2: Konzeptionierung eines Steuerungssystems zur automatisierten Fertigung und Auslegung einer Überwachung der Prozesskette

Das Konzept wie in AP 4.6.1 beschrieben, wurde bei dem Projektpartner BTU in einer Formenpresse umgesetzt. Es wurde ein Demonstrator hergestellt und Parameter der Presse sowie Messdaten aus dem Bauteil aufgezeichnet. Diese Daten wurden abgeglichen und zusammengeführt, wie nachfolgend in Abbildung 20 dargestellt. Der Versuchsaufbau bestand aus einem Schaumkern mit Decklagen aus Stahlblech. Zur Verklebung wurde das Klebevlies 178 WEB des Herstellers Protechnic verwendet. Ge-

mäß Herstellerangaben wird das Klebevlies in einem Temperaturbereich von 98 °C bis 108 °C aufgeschmolzen. Es wurden mehrere Versuche durchgeführt um somit die Parameter für eine bestmögliche Verklebung der Fügepartner zu erhalten.

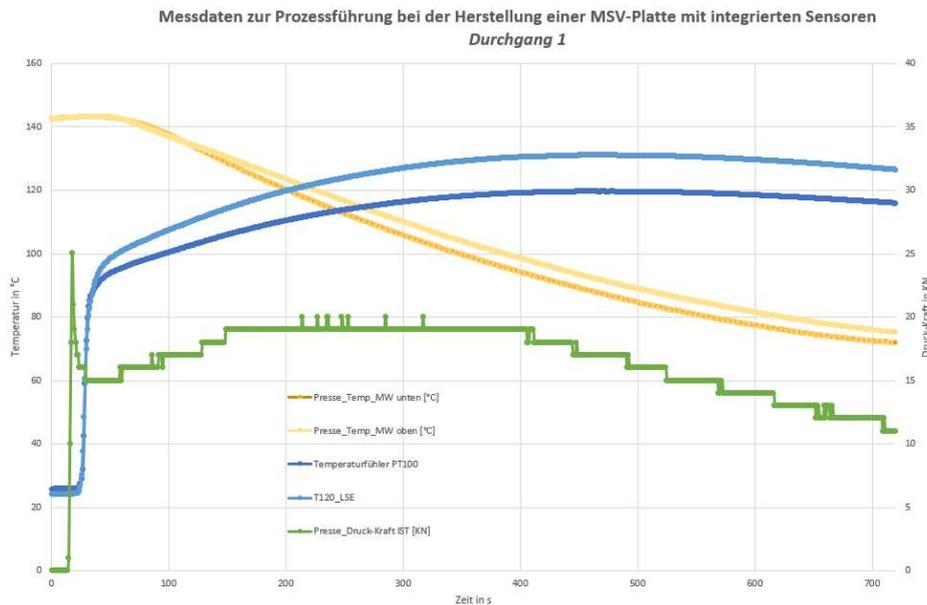


Abbildung 20: Temperatur- und Druckverlauf bei der Bauteilherstellung

Ergebnisse:

Hier ist ersichtlich, dass die Presse von 140 °C auf ca. 80 °C abgekühlt wird (gelbe Kurven). Die Temperatur wird in den ersten 60 s an das Bauteil übertragen, erkennbar am Temperatursensor und Referenzsensor im Bauteil (blaue Kurven). Die Presskraft ist über den Herstellungsprozess stabil, da die Herstellung Weg-gesteuert stattgefunden hat (vgl. grüne Kurve). Durch den Verlauf und die Position von verschiedene Temperaturmesspunkten kann auf die Erwärmung des Klebevliese und damit auf die Aktivierungstemperatur rückgeschlossen werden.

Auswertung und Diskussion

In der nachfolgenden Abbildung 21 sind Bereiche markiert, die zur Qualitätsüberwachung herangezogen werden können.

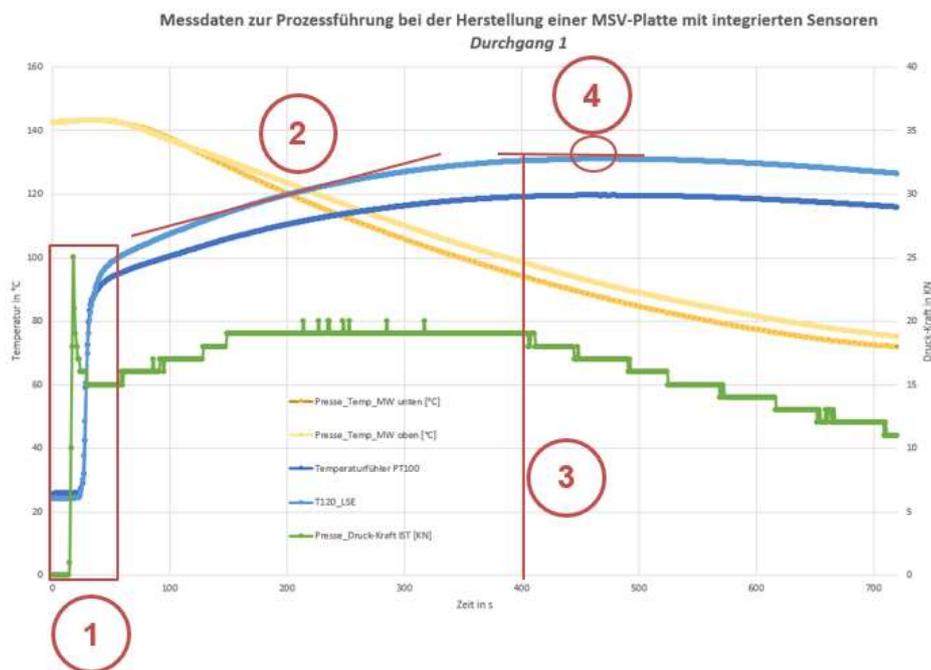


Abbildung 21: Temperatur- und Druckverlauf - Markierte Bereiche

1. Der Bereich 1 spiegelt das Aufheizverhalten bzw. Übertragungsprofil der Temperatur auf das Bauteil wider. Dabei wird innerhalb von 50 s eine Temperatur von ca. 100 °C im Bauteil erreicht. Die Klebstoffaktivierungstemperatur beträgt gemäß Datenblatt 96 °C. Somit können Rückschlüsse über die Temperaturübertragung im Bauteil gezogen werden.
2. Der Bereich 2 definiert die Temperaturanstiegsrate innerhalb der ersten 4 Minuten, sie entspricht 240 s. Hier beträgt die Temperaturanstiegsrate 22,25 K/min bei dem Temperaturfühler PT100 und 24,75 K/min bei dem integrierten T120. Hiermit kann die Aufheizzeit bis zur maximalen Temperatur ausgewertet werden.
3. Im Bereich 4 ist die maximale Bauteiltemperatur dargestellt. Diese sollte nach 400 s ca. 130 °C betragen. In diesem Bereich verringert sich die Druckkraft der Presse und die Abkühlung des Bauteils beginnt.
4. Die maximale Bauteiltemperatur von 131 °C ist nach ca. 450 s erreicht. Es folgt die Abkühlung des Bauteils. Eine Messung der auftretenden Maximaltemperatur kann eine einfache Methode zur Qualitätsüberwachung sein.

Die hier dargestellten vier Bereiche können zur Qualitätsüberwachung, insbesondere zum Aufschmelzen des Klebstoffs, als ausreichendes Kriterium betrachtet werden. Die Qualität des Verbundes lässt sich damit nicht beurteilen, da Informationen zum Druck- und Kraftverlauf der Presse bzw. des Bauteils fehlen.

AP 5.6.1: Analyse und Validierung anwendungstechnischer Charakteristika (Sensorfunktion)

Die integrierten Dehnungssensoren D120 sowie Temperatursensoren wurden erfolgreich erprobt. Die Untersuchung zur Empfindlichkeit bzw. zur Bestimmung des k-Faktors erfolgte bei dem Projektpartner

BTU. Bei dieser instrumentierten Prüfung wurde ein 4-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an die DIN 53293 durchgeführt. Bei diesem Biegeversuch wurden die Messdaten eines integrierten Dehnungssensors sowie eines Folien-DMS, welcher als Referenz diente, aufgezeichnet.

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Abhängigkeit zwischen Durchbiegung der Probe und dem Dehnungssignal der Dehnungssensoren.

Der entwickelte Projektdemonstrator wurde mit einem integrierten Temperatursensor hergestellt, vgl. Abbildung 22. Beim Erwärmen des Sensors wird die Temperaturänderung an der Auswertelektronik ausgegeben, wie auf der Messe Innotrans 2022 am Gemeinschaftsstand präsentiert.



Abbildung 22: Projektdemonstrator mit integrierter Temperatursensoren

Untersuchung des dynamischen Verhaltens integrierter D120 im Verbund

Es wurden Musterplatten mit integrierten D120 Sensoren hergestellt. Um den Dehnungssensor D120 näher spezifizieren zu können, wurden dynamische Untersuchungen mittels eines Frequenzprüfstandes durchgeführt. Der Prüfaufbau ist nachfolgend dargestellt, Abbildung 23.

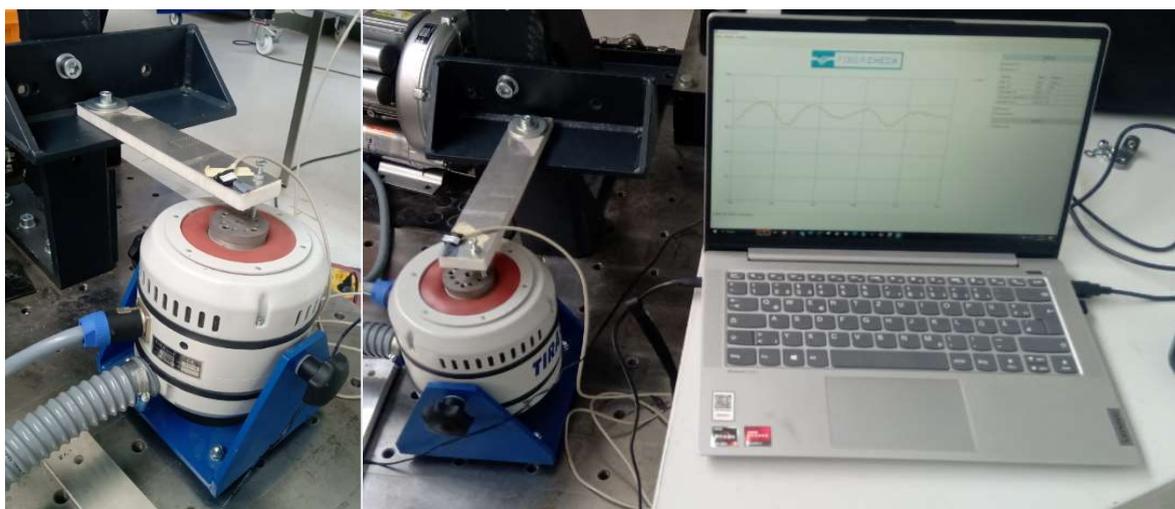


Abbildung 23: Frequenzprüfstand: rechts: Probe mit fester Einspannung und Befestigung am Shaker; links: Prüfaufbau und Auswertung am PC

Es wurden 2 Lastfälle auf den Probekörper eingeleitet. Im ersten Lastfall wurde die Probe mit einem impulsartigen und im zweiten Lastfall mit einer oszillierenden Belastung angeregt. Zusätzlich wurden bei diesen dynamischen Untersuchungen die Verbindungsknoten hinsichtlich Zuverlässigkeit beurteilt. Nachfolgend sind beispielhafte Signalverläufe des ersten und zweiten Lastfalls dargestellt, vgl. Abbildung 24 und Abbildung 25.

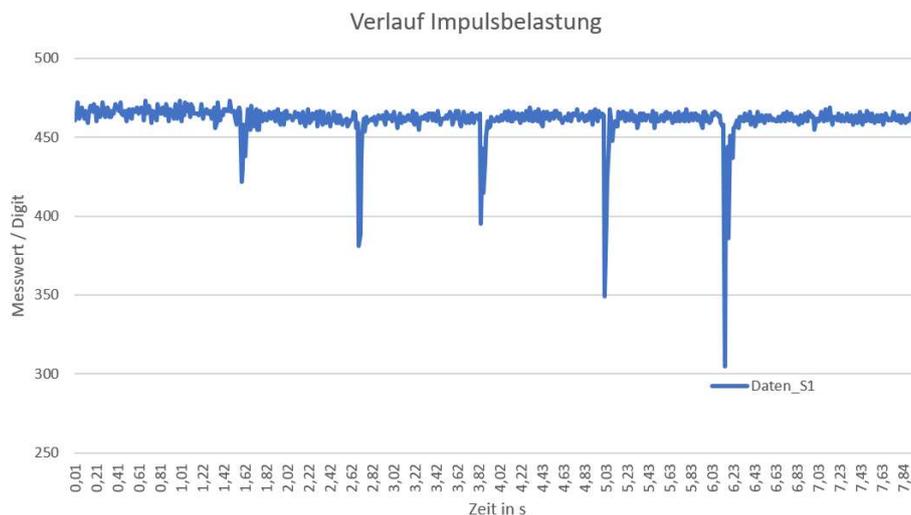


Abbildung 24: Lastfall 1 - impulsartige Belastung

Probe S1 bei Sweep 52 Hz bis 55 Hz
(Eigenfrequenz der Probe bei 52,8 Hz)

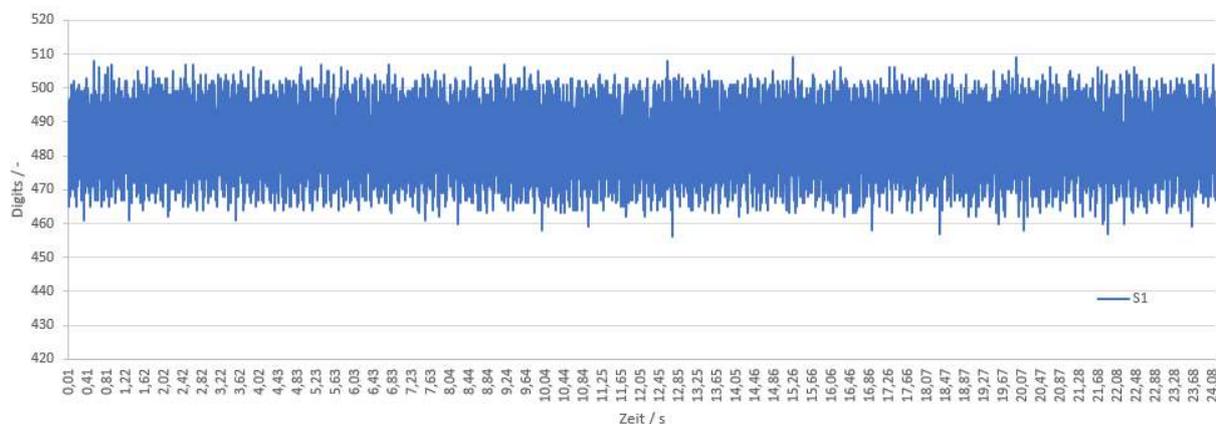


Abbildung 25: Lastfall 2 - oszillierende Belastung

Durch einen Impulseintrag bzw. durch eine oszillierende Anregung reagiert der integrierte Sensor mit einem Signalausschlag. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt mit der Auswertelektronik der Firma Fibercheck GmbH, die im Unterauftrag beauftragt wurde. Mit einem Tabellenkalkulationsprogramm ist eine Rückrechnung des Dehnungssignals auf die Dehnung des Bauteils möglich, vgl. Abbildung 26 sowie Abbildung 27. Exemplarisch für die Auswertung der impulsartigen Belastung ist die Rückrechnung auf die Dehnung durchgeführt worden. Entsprechend der eingeleiteten Energie wurde der Dehnungssensor gedehnt und hat dabei ein Signalverlauf erzeugt. Dabei entspricht die Dehnung des Sensors zwischen $1000 \mu\text{m}/\text{m}$ bis $4000 \mu\text{m}/\text{m}$ bei einem k-Faktor von 1,6. Dieser k-Faktor wurde in ähnlichen Untersuchungen ermittelt und wurde hier zur Auswertung verwendet.

Dabei wurden Impulse bis zu einer Dehnung von bis zu 0,4 % detektiert.

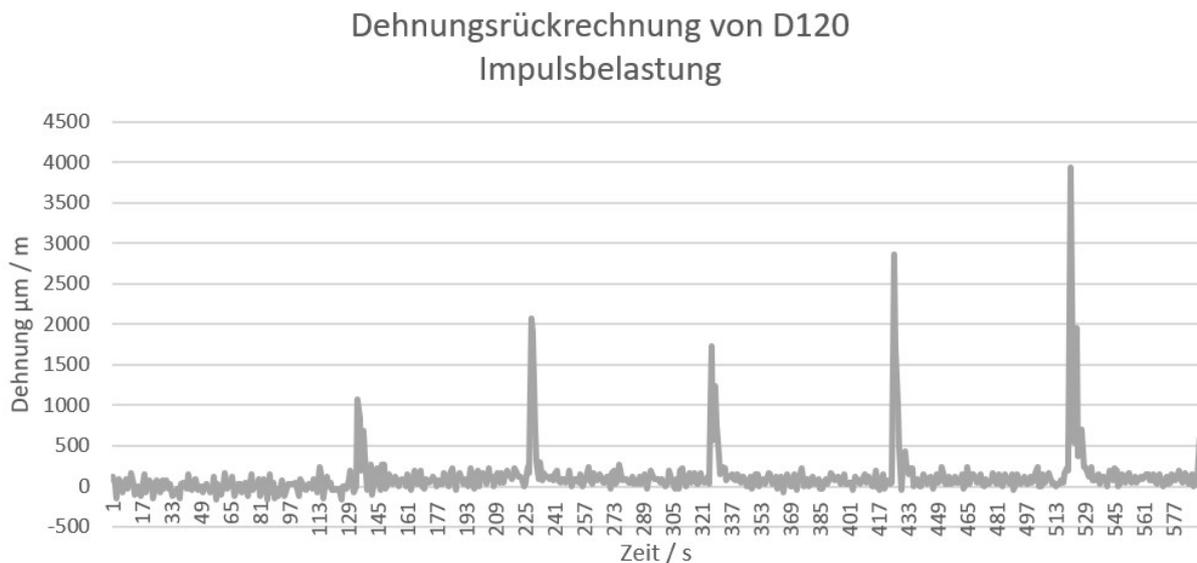


Abbildung 26: Dehnungsrückrechnung - Impulsbelastung

Bei der oszillierenden Anregung wurden Dehnungen zwischen 0,15 % auf Zugbelastung und 0,05 % auf Stauchung detektiert.

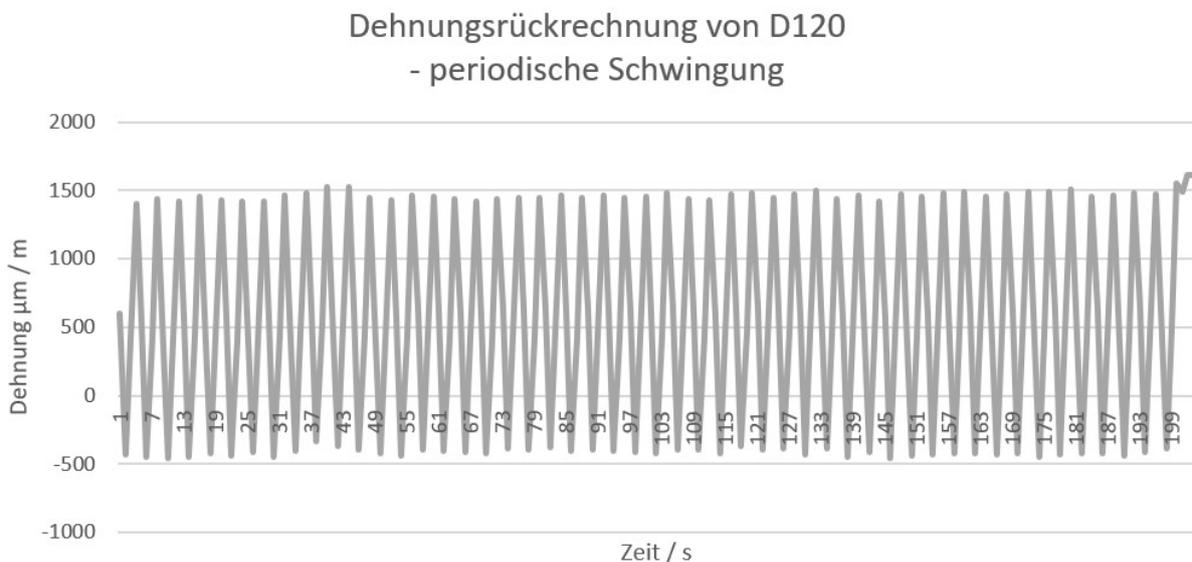


Abbildung 27: Dehnungsrückrechnung - periodische Belastung

AP 5.6.2: Prozessintegrierte Erfassung der Sensordaten zur Erstellung einer Cloud-Datenbank für eine nachhaltige Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung der integrierten textilen Sensoren sollten nach dem Herstellungsprozess geprüft werden, ob sie sich in dem vorgegebenen Toleranzfeld befinden. Des Weiteren können definierte Abweichungen wie u. A. Geometrie, Toleranzen, Widerstände oder Position des idealen Bauteils in einer Datenbank hinterlegt und mit entsprechenden *binning*-Befehlen hinterlegt werden.

Bei einer Serienherstellung der Bauteile können diese mit einem Beschriftungslaser oder einem Aufkleber beschriftet werden. Dabei können bspw. der Name, Herstellungsort, -datum, -urzeit, Prozessparameter, Bearbeiter etc. hinterlegt werden. Damit kann jedes Bauteil individuell zugeordnet werden. Hier wird auf den Abschnitt AP 2.6.1: Entwicklung von Sensorintegrationstechnologien verwiesen.

Nach der Herstellung können die Bauteile in einer QM-Zelle geprüft werden. Dabei können taktile Messfühler zur Überprüfung von geometrischen Abmessungen, optische Aufnahmegeräte oder elektrische Messspitzen zum Einsatz kommen. Durch eine Teilenummer wird das Bauteil identifiziert. Die Messwerte werden mit den hinterlegten Messwerten aus der Datenbank abgeglichen. Bei bspw. einem fehlerhaften Sensorsignal wird der Wert Bin 1 „resistance fail“ auf fail gestellt. Es folgt eine Klassifikation, d. h. Sortierung der Bauteile entsprechend der Parameter in Gutteil oder Schlechtteil und kann zur Nachprüfung kontrolliert werden, Abbildung 28.

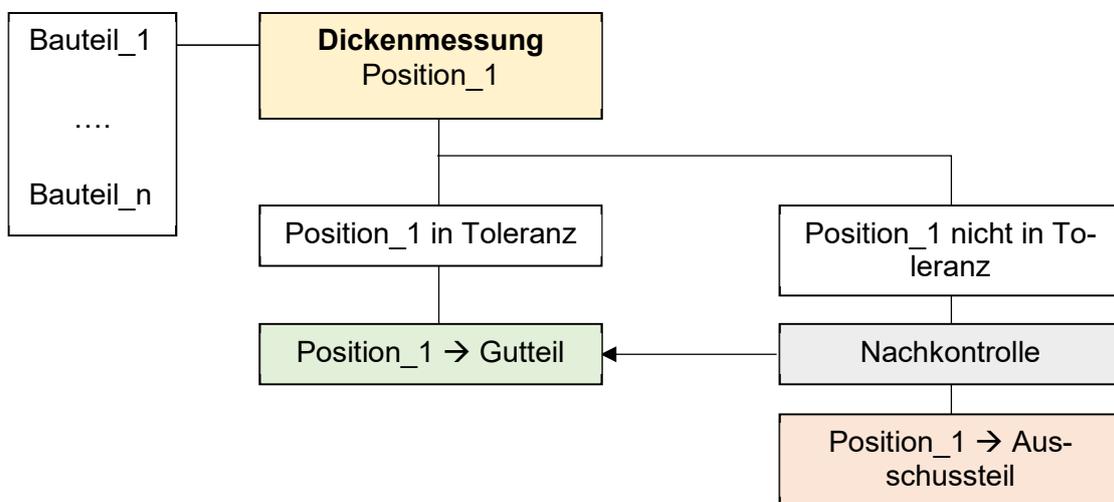


Abbildung 28: vereinfachter Prozessablauf Bauteilprüfung

In einer Datenbank werden die Messdaten mit zu dem jeweiligen Bauteil und gemessenen Parametern zusammengefasst und abgespeichert. Die Ergebnisse der Messstellen können bspw. über eine Tabelle ausgegeben werden, vgl. Tabelle 5. Die dargestellten Parameter sind exemplarisch. Die fehlerhaften Teile werden entsprechend dem Fehler in Behälter 1-n gesammelt. Die Datenbank kann gemäß Stand der Technik auch Cloud-basiert arbeiten. Dafür muss ein Netzwerk entsprechend eingerichtet werden. Die Überprüfung der Bauteile ist dann nicht mehr ortsgebunden.

Tabelle 5: Datenbank zur Bauteilkontrolle; exemplarisch

Bin Name	Attribute	Number	Description	Ergänzende Bemerkung
thick_pos_n_bin	Pass	2	thickness Position_n bin	Dicke der Position_n im Toleranzbereich
resistance_Rn_bin	Fail	4	resistance_Rn failure bin	El. Widerstand_Rn nicht im Toleranzbereich → Nachkontrolle erforderlich
optical_bin	Pass	3	optical bin	Oberfläche/Rauigkeiten etc. sind im Toleranzbereich
temperature_Tn_bin	Fail	5	Temperature_Tn failure bin	Temperatur bei der Herstellung wurde nicht erreicht/unterschritten

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben der Projektgelder zu den einzelnen Positionen entsprechen im Wesentlichen dem Finanzierungsplan des Projektes. Die Mittel wurden sparsam, wirtschaftlich und im Sinne des Projektes zielführend zur Durchführung der Forschungsarbeiten entsprechend der einzelnen Arbeitspakete eingesetzt. Die Projektmittel wurden dabei zeitnah abgerufen und verwendet.

Im Rahmen der Arbeiten am Projekt entstanden folgende Selbstkosten:

Position	Gesamtvorkalkulation (€)	Gesamtnachkalkulation (€)
0813 Material	17.750	17.721,32
0823 FE-Fremdleistungen	19.175	19.175,00
0837 Personalkosten inkl. GK-Aufschlag (100%)	167.448	168.215,84
0838 Reisekosten	1.000	932,56
0855 Summe	205.373	206.044,72

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung beteiligte sich an der Finanzierung mit einer Förderung in Höhe von 56 % der Selbstkosten, also mit 115.009 Euro. Der Anteil Eigenmittel lt. Finanzierungsplan der LSE GmbH beläuft sich auf 90.364 Euro.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der betriebene personelle und materielle Forschungsaufwand entsprach den geplanten Grundgrößen der einzelnen Arbeitspakete. Teilweise zeitliche Verschiebungen oder Überschneidungen in den Abläufen der Aufgabenlösung war im Rahmen des Verbundprojektes in Kooperation mit allen Partnern unvermeidbar.

Alle in der Antragstellung formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet und nahmen keine zusätzlichen Mittel in Anspruch.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planung für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Mit erfolgreicher Projektbearbeitung ergeben sich für alle beteiligten Unternehmen starke wirtschaftliche Effekte, die neben der Schaffung von Alleinstellungsmerkmalen im Wesentlichen auf eine Steigerung der Produktivität durch verkürzte Taktzeiten zurückzuführen sind. Gleichfalls soll die angestrebte Lösung KMU-tauglich umgesetzt werden, also hohe Investitionskosten in spezialisierte Anlagentechnik vermieden werden und die vorhandenen modernen Maschinen an die Prozesskette auf hybride Materialien angepasst werden. Die Steigerung des technologischen Reifegrades ergibt einen deutlichen Vorsprung in der Wettbewerbsfähigkeit und somit einen strategischen Nutzen für die deutsche Wirtschaft, um auch weiterhin an der Weltmarktspitze platziert zu sein.

Die LSE-GmbH hat im Verlauf des Projektes ein Sensorsystem mit dazugehöriger Auswerteelektronik entwickelt, welches in hybride Mehrschichtverbunde integriert werden kann. Durch den Marktzugang der Firmen SMT GmbH sowie compren GmbH wird eine Vermarktung sowie Weiterentwicklung des Sensorsystems erwartet.

Gemäß dem im Projektantrag enthaltenen Verwertungsplan haben sich die prognostizierten Produktabsätze hinsichtlich der Zeitschiene verändert. Durch die Verzögerung im Projektfortschritt wurde entsprechend verzögert mit der Verwertung begonnen. Das entwickelte Sensorsystem ist als Prototyp funktionsfähig und steht für potentielle Kunden zur Verfügung. Hier ist das Sensorsystem vorbereitet und kann auf die Anforderungen der Kunden angepasst werden. Zurzeit werden Gespräche mit namenhaften Herstellern der Schienenfahrzeugbranche geführt und über Projektinhalte und Weiternutzung abgestimmt. Ein weiteres Geschäftsfeld ergibt sich im Service- bzw. Reparaturbereichen. Hier können die entwickelten Sensorsysteme gemäß den Anforderungen angepasst werden. Die hier aufgezeigten Chancen bieten die Möglichkeit, das Sensorsystem im Bereich der Schienenfahrzeuge zu überführen.

Mit der Firma compren werden weitere Aktivitäten angestrebt, die die Weiterentwicklung des Sensorsystems auf weitere Bereiche und Branchen zum Ziel haben. Beispielsweise können health monitoring Systeme zur Schadensüberwachung von Strukturbauteilen untersucht werden.

In weiteren Forschungsprojekten wird die Integration von textilen Sensoren in strukturmechanische Komponenten des Schienenfahrzeugbaus untersucht. Hierbei wird beispielsweise die Überwachung von Spannungszuständen mit integrierter Sensorik von Haltemechanismen und gegebenenfalls ihre Steuerung in Betracht gezogen. Die entwickelte Auswerteelektronik wird an diesen Anwendungsfall angepasst und optimiert.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine FuE-Ergebnisse von anderen Stellen bekannt, die den gewonnenen Fortschritt auf diesem Gebiet gefährden.

Es gibt eine Vielzahl an Sensorsystemen zur Strukturüberwachung. In diesem Forschungsprojekt wurde jedoch die Strukturüberwachung mit integrierten, textilen Sensoren in hybriden Mehrschichtverbunden entwickelt. Die Vernetzung der Messdaten oder Bauteildaten während der Nutzung sind schon sehr weit fortgeschritten. Beispielsweise bietet die Fa. ZF Sensorlösungen an, die die gesamten Messdaten während des Fahrbetriebes aufzeichnen und in einem Netzwerk abspeichern. Somit ist die Zustandsüberwachung von Bauteilen durch bspw. dem Zugführer möglich, welcher bei Bedarf den Zug stoppen kann. Die Einbindung des in diesem Projekt entwickelten Systems könnte in dieser Systemlösung gut möglich sein. [<https://www.zf.com/products/de/rail/home/rail.html>; Stand 12.10.2023]

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 (NKBF98)

Das Projekt HIKOM-Pro wurde im Rahmen der Werkstoffplattform HyMat zum 1. Statusseminar am 22.02.2021 online präsentiert.

Das Projekt HIKOM-Pro wurde im Rahmen der Werkstoffplattform HyMat zum 2. Statusseminar am 21./22.06.2022 in Dresden präsentiert. Des Weiteren folgten Veröffentlichungen über einen Gemeinschafts-Messestand der BTU bei der Messe Innotrans in Berlin am 20.-23.09.2022 zur Projektpräsentation.