

# Verbundbauteile in Leichtbauweise mit integriertem Schadenerkennungssystem

Holg Elsner  
Marc Neubert

LSE-Lightweight Structures Engineering GmbH, Chemnitz, Deutschland

## Abstract

Faserkunststoffverbund (FKV) -Werkstoffsysteme nehmen einen immer größeren Platz bei Leichtbaulösungen ein und sind nicht nur für den Automobilbau ein bedeutender Wachstumsmarkt [1,2,3]. Die FKV zeichnen sich durch höchste Designfreiheit, multifunktionale Strukturintegration und kurze Prozessketten im Herstellungsverfahren bei geringem Materialeinsatz aus. Ein noch wenig erschlossenes Einsatzgebiet für FKV-Werkstoffe sind funktionalisierte, crashrelevante Strukturbauteile, die Aufschluss über ihren Zustand nach einer Bauteilschädigung geben. Diese Anforderung kann Zulassungsvoraussetzung für den Einsatz von FKV-Werkstoffen sein. Im Rahmen des Wachstumskerns thermoPre wurde ein Seitenaufprallträger (SAT) mit integriertem Schadenerkennungssystem unter Verwendung von thermoPre-Halbzeugen entwickelt und mittels der Technologiekombination Thermoformen/Spritzguss hergestellt. Zur Integration des Schadenerkennungssystems ist die Tailored-Fiber-Placement-Technologie (TFP) zur Anwendung gekommen, bei der ein Funktionsdraht auf ein Trägermaterial verlegt wird. Durch bedarfsgerechte Anpassung von Materialwahl, Design und Größe können somit verschiedenartige Funktionen erfüllt werden. Während der Fertigung des SAT's im Thermoformen/Spritzgussprozess wird das funktionalisierte Trägermaterial integriert und im hergestellten SAT als Dehnungssensor verwendet. Aufgrund einer Belastung bzw. Beschädigung generiert der Dehnungssensor eine Signaländerung, die den physikalischen Zustand des SAT's beschreiben kann.

## 1 Einleitung

### 1.1 Anforderungen und Lösungsansatz an FKV

Den heutigen Anforderungen im Hinblick auf die Gewichtsreduzierung von Bauteilen und der Verringerung des Energieverbrauchs in den Einsatzbereichen wie beispielsweise Luft- und Raumfahrt, Fahrzeugbau, Maschinenbau und Sportgerätebau werden Faserkunststoffverbundsysteme sehr gut gerecht. Es wurden viele verschiedene Bereiche erschlossen, in denen sich Leichtbaulösungen zunehmend behaupten [4]. Gerade Faserkunststoffverbundsysteme haben neben der hohen Designfreiheit besondere Vorteile bei der multifunktionalen Strukturintegration und sind deshalb für Leichtbauanwendungen sehr interessant.

Um Leichtbauprobleme effektiv zu lösen, werden die Lastpfade über UD-Fasern abgeleitet – wie es auch bei den endlosfaserverstärkten thermoPre-Halbzeugen der Fall ist. Jedoch kann bei diesen und ähnlichen Strukturen nur schwer eine Schädigung im Faserkunststoffverbund erkannt werden. Eine Zulassungsvoraussetzung für den Einsatz von FKV-Werkstoffen in crashrelevanten Bereichen des Automobilbaus kann z.B. eine Bauteilzustandsüberwachung sein, wenn Bauteilversagen und

Impactschäden nicht kontrolliert zu erkennen sind. Um ein ausreichend sicheres Bauteil auszulegen sind mehrere Möglichkeiten gegeben.

Lösungsansätze könnten hierbei die rechnergestützte Auslegung, Überdimensionierung oder ein zyklischer Austausch eines Verbundbauteils sein. Eine Überdimensionierung oder ein Austausch sind im Sinne einer ökonomischen und ökologischen Betrachtung nicht zielführend. Ein Verbundbauteil mit einer rechnergestützten Simulationssoftware auszulegen ist eine gute Möglichkeit, wenn verschiedene Materialparameter und Einsatzbedingungen des Verbundbauteils bekannt sind.

Eine weitere Möglichkeit wurde im Rahmen des Wachstumskerns thermoPre entwickelt. Ziel dabei war es, durch die Verwendung von thermoPre-Halbzeugen crashrelevante Strukturbauteile auszulegen und gleichzeitig physikalische Zustandsgrößen mittels einer Bauteilüberwachung zu detektieren.

An die Entwicklung des crashrelevanten Strukturbauteils „Seitenaufprallträger“ in FKV-Bauweise mit integriertem Schadenerkennungssystem wurden beispielsweise folgende Anforderungen gestellt:

- Ablösen der klassischen Werkstoffgruppen wie Stahl oder Aluminium
- Leichtbaulösung mit hervorragenden mechanischen Kennwerten
- Höchste Designfreiheit mit multifunktionaler Strukturintegration
- Geringe Herstellungskosten und kurze Prozessketten
- Überwachung des Faserverbundbauteils

## 2 Technologischer Lösungsansatz

### 2.1 Erhöhung der Funktionsdichte in Faserkunststoffverbundstrukturen

Eine Lösungsstrategie das Potential von Faserkunststoffverbundstrukturen optimal zu nutzen liegt in der Schaffung multifunktionaler Verstärkungsstrukturen mit strukturintegrierten Mehrfachfunktionen, die mittels großserienfähiger Herstellungsverfahren produziert werden können.

Ziel ist es, die Funktionalisierung zum frühestmöglichen Zeitpunkt im Herstellungsprozess eines Bauteils vorzunehmen. Im Regelfall fallen dann die geringsten Entstehungskosten an.

Der Faserkunststoffverbund bietet dafür hervorragende und vielfältige Möglichkeiten zur Umsetzung solcher Strategien. Prinzipiell können Funktionalisierungen sowohl über die Verstärkungsfaser als auch über das Polymer oder durch die Integration einer weiteren Komponente bzw. in Kombination erfolgen.

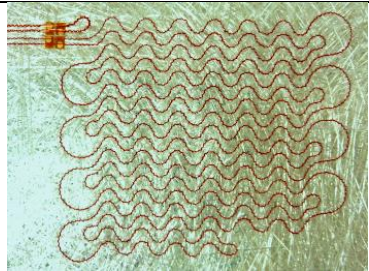
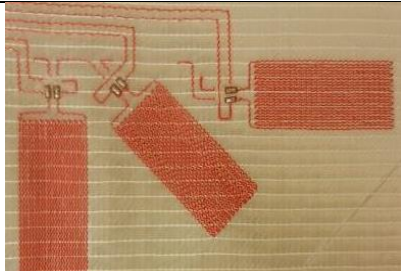
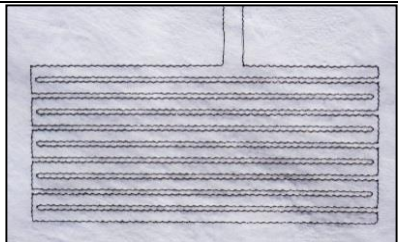
Eine Komponente ist beispielsweise unter Verwendung der TFP-Technologie herstellbar. Dieser Technologie liegt das Verlegen eines Funktionsmaterials bei gleichzeitiger sticktechnischer Fixierung auf einem Trägermaterial (technisches Textil) zugrunde. Anschließend erfolgt die Integration in die Faserkunststoff-verbundpreform. Mit der TFP-Technologie können durch bedarfsgerechte Anpassung von Materialwahl, Design und Größe verschiedenartige Funktionen und Messaufgaben erfüllt werden. Beispielsweise können so Temperaturänderungen oder Dehnungen mit einem Funktionsdraht im FKV-Bauteil bzw. Behälterfüllstände erfasst werden.

Die Prozessfolge zur Erhöhung der Funktionsdichte am Beispiel des Seitenaufprallträgers wurde wie folgt vorgenommen:

1. Erstellen des Sensorkonzeptes
2. Herstellen des Sensorhalbzeuges
3. Integration des Sensorhalbzeuges in die Faserverbundpreform
4. Bauteilherstellung im Thermoformen/Spritzgußprozess

Je nach Messaufgabe können verschiedenartige textile Funktionsstrukturen nach geforderter Messaufgabe ausgewählt und angepasst werden. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt verschiedene Sensorikkonzepte:

Tab. 1: Verschiedene Sensorikvarianten

Temperatursensorik	Dehnungssensorik	Füllstandssensorik
		

Hinsichtlich der Funktionsintegration kann die Sticktechnologie bei der Auswahl geeigneter Textilhalbzeuge für Erzeugnisse in Faserverbundkunststoffbauweise einen erheblichen Beitrag leisten. In idealer Weise lässt der Stickprozess eine freie Positionierung in x- und y-Richtung auf dem Verstärkungs- oder Trägertextil zu. Die Herstellung dieser sticktechnologischen Sensorkonzepte erfolgt mit einer Portalstickmaschine mit optionaler Zuführung eines Funktionsdrahtes, der auf ein technisches Textil abgelegt und gleichzeitig auf diesem fixiert wird. In der nachfolgenden Abbildung 1 ist der Stickprozess zur Herstellung einer Sensorstruktur dargestellt.

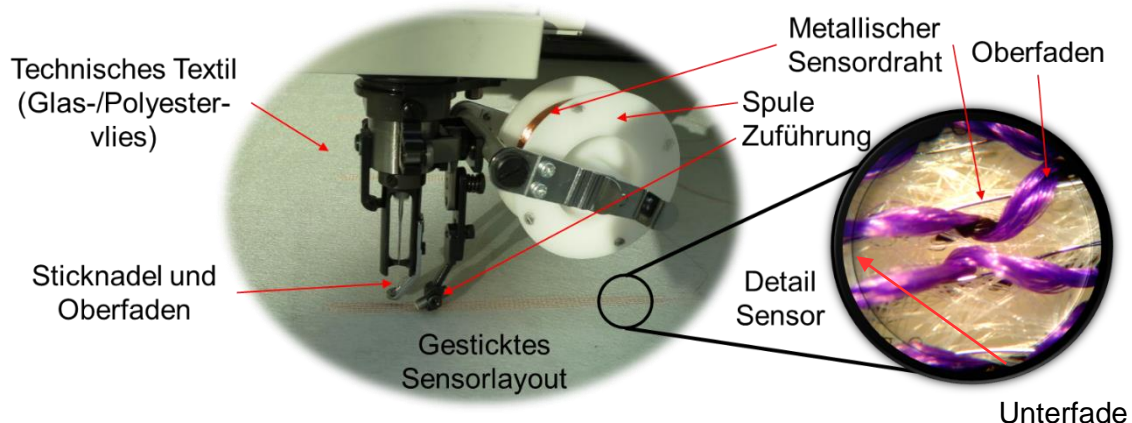


Abb. 1: Sticktechnologische Herstellung textiler Sensorhalbzeuge

Das Layout der gestickten Sensorstruktur, die Materialwahl des Funktionsdrahtes als auch des technischen Textils beeinflusst maßgeblich die Eigenschaften des Sensors. Um den textilen Sensors elektrisch zu kontaktieren werden Kontaktterminals an den vordefinierten Positionen automatisch sticktechnisch verlegt. Ein solcher sticktechnologischer Sensor hat ein hohes Integrationsvermögen in thermo- und duroplastische Verbundwerkstoffe.

## 2.2 Produktbeispiel

### Integration eines Schadenerkennungssystems am Beispiel des Seitenaufprallträgers

Die Entwicklung des von uns mitentwickelten Seitenaufprallträgers sollte zum einen von einer Stahlvariante in eine thermoplastbasierte FKV-Bauweise überführt werden und zum anderen über ein Schadenerkennungssystem verfügen. An Hand eines Funktionsdemonstrators wird aufgezeigt, dass ein Strukturbauteil in FKV-Bauweise ein

metallisches Bauteil ersetzen und zusätzlich mit einem Schadenerkennungssystem ausgestattet werden kann.

Durch ein integriertes Schadenerkennungssystem in der FKV-Struktur wird eine Bauteilüberwachung ermöglicht.

Neben high-impact-crashes können auch sogenannte low-impact-crashes auftreten. Bei dieser Art Beschädigung kann im Regelfall keine Aussage über den Zustand in der Bauteilstruktur getroffen werden. Strukturschädigungen wie Faserbrüche, Brüche in der Matrix oder Delaminationen der einzelnen Lagen können optisch nicht beurteilt werden und die vorhandene Tragfähigkeit nach einem kleinen Energieeintrag ist unbekannt.

Der Vorteil der sich mit den sticktechnologisch hergestellten Sensorstrukturen ergibt, ist die hervorragende Integrationsmöglichkeit in Faserverbundstrukturen und die fast unbegrenzte Layoutfreiheit in Bezug auf die Anpassung an Geometrie und Funktion des Bauteils.

Anforderungen an ein Schadenerkennungssystem sind in diesem Fall:

- Integration einer Sensorstruktur mit guter Zugänglichkeit nach dem Herstellungsprozess
- Gute Integrationsmöglichkeit in den Bauteilherstellungsprozess
- Bauteilüberwachung bzw. detektieren physikalischer Zustandsgrößen des Strukturbauteils

Als Ergebnis der Entwicklung ist eine funktionsfähige Prozesskette zur Herstellung großflächiger thermoPre-verstärkter Strukturbauteile mit Zustandsanzeige entstanden, mit der aufgezeigt wurde, dass thermoPre-Halbzeuge und Funktionsintegration im Thermoformen/Spritzgussprozess herstellbar sind. Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten wurden folgende Arbeitsschritte vorgenommen:

- Analyse des bestehenden Seitenaufprallträgers aus Stahl (Abb. 2)
- Modellentwicklung und Bauweisenkonzeption zur Überführung in ein FKV-Bauteil (Abb. 2)
- Entwicklung einer optimalen Sensorstruktur und ihre Positionierung
- Herstellungsstrategie für das Thermoformen/Spritzgussverfahren mit thermoPre-Material



Abb.2: Seitenaufprallträger: li. Stahlvariante, re. Erste Modellentwicklung

Die jeweiligen Arbeitsschritte wurden überschneidend bearbeitet, damit die zeitliche und prozesssichere Abfolge bei der Herstellung des SATs sowie die Positionierung und Integration einer Sensorstruktur synchronisiert werden konnten.

### Bauteilentwicklung mit Bezug auf das Schadenerkennungssystem

Eine FEM-Berechnung ermittelte die Lastpfade und im Ergebnis wurden die Geometrie und der Lagenaufbau ausgelegt. Durch Iterationsschleifen wurde die optimale Variante bestimmt. Dabei ist in einem Crashbauteil der Verlauf der Energieabsorption in einem Crashfall ein wesentlicher Bestandteil der Strukturauslegung. Die

Energieabsorption wird sowohl durch die Geometrie als auch durch den Verlauf der Lastpfade beeinflusst. Diese Faktoren wurden sowohl bei Erstellung des Sensorlayouts als auch der Sensorpositionierung im Bauteil berücksichtigt. Mit umfangreichen Umformuntersuchungen im Thermoformen/Spritzgussverfahren unter Beachtung von Maschinenparametern, Werkzeugaufbau, Bauteilfunktion, medialen Belastungen, eingesetzten Werkstoffen und Umformverhalten der Funktionsstrukturen wurden die Prozessparameter ermittelt. Darüber hinaus wurden stoffliche und konstruktive Wechselwirkungen zwischen Basismaterial, Funktionsmaterial und Zusatzkomponenten unter presstechnologischen Aspekten untersucht.

### Werkzeugentwicklung mit Bezug auf das Schadenerkennungssystem

Für die Herstellung des Strukturbauteils mit integriertem Schadenerkennungssystem wurde das Thermoformen/Spritzgussverfahren in seinem Arbeitszyklus bestimmt. Ein entscheidender Einflussfaktor ist, wie die Integration der Sensorstruktur in den Herstellungsprozess erfolgt. Daraus ergeben sich die Anforderungen für den Werkzeugaufbau (Abb. 3), die Bauteilfunktion, die medialen Belastungen, die eingesetzten Werkstoffe unter Beachtung von Maschinenparametern und das Umformverhalten der Funktionsstruktur im Thermoformen/Spritzgussprozess bei mehrdimensionaler Formausbildung.

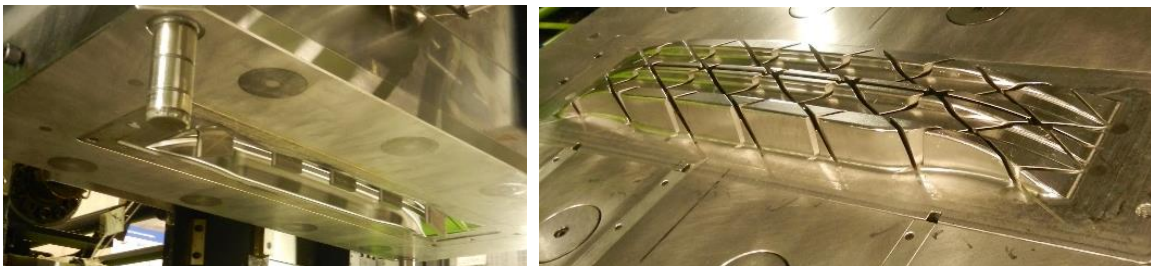


Abb.3: Press- und Spritzgießwerkzeug: li. Oberform, re. Unterform

Der Einsatz funktionalisierender Materialien mit elektrisch leitfähigen/isolierenden Eigenschaften in Abhängigkeit der Zielfunktion, Notwendigkeit und Verarbeitungsparameter in Verbindung mit polymerbasierten Bausteinen insbesondere auf Zuverlässigkeit und Funktionssicherheit wurden mit einbezogen. Von besonderer Bedeutung ist die polymere Anbindung an Verbindungsstellen, Werkstoffübergängen und die Kontaktierung.

### Sensorentwicklung mit Bezug auf das Schadenerkennungssystem

Eine Versagenssimulation ermittelte über verschiedene Belastungsvarianten die Positionierung der Sensorstruktur.

Die Bauteilzustandsüberwachung erfolgt nach dem resistiven Messprinzip. Eine derartige Sensorstruktur (Abb. 4) wurde in den Seitenaufprallträger während des Thermoformen/Spritzgussprozesses integriert.

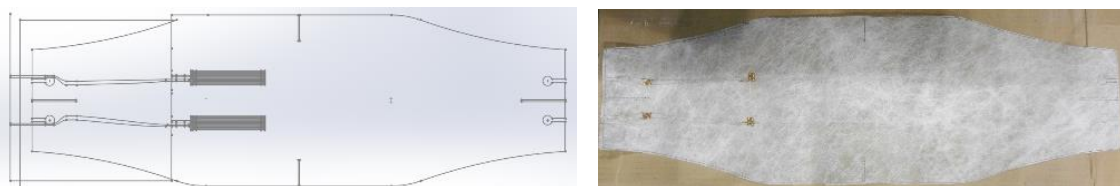


Abb.4: Sensorlayout: li. CAD-Modell, re. Sensorhalbzeug



Bei Belastung bzw. Beschädigung des SAT`s wird eine Signaländerung generiert, die dessen physikalischen Zustand beschreibt.

### Prozessablauf

Nachfolgender Prozessablauf wurde zur Bauteilherstellung entwickelt:

1. Separate Bereitstellung des Sensorhalbzeuges
2. Erwärmen des konsolidierten thermoPre-Halbzeuges (Organoblech) in der Vorheizstation
3. Aufgeheiztes Organoblech mittels Handlingsystem mit dem Sensorhalbzeug zusammen fixieren (Preform)
4. Einlegen der Preform in das Thermoform/Spritzgussprozesswerkzeug
5. Die Preform wird umgeformt und anschließend eine Rippenstruktur angespritzt, wie in Abbildung 5 zu sehen
6. Entnahme des Seitenaufprallträgers mit integrierter Schadenerkennungssensorik

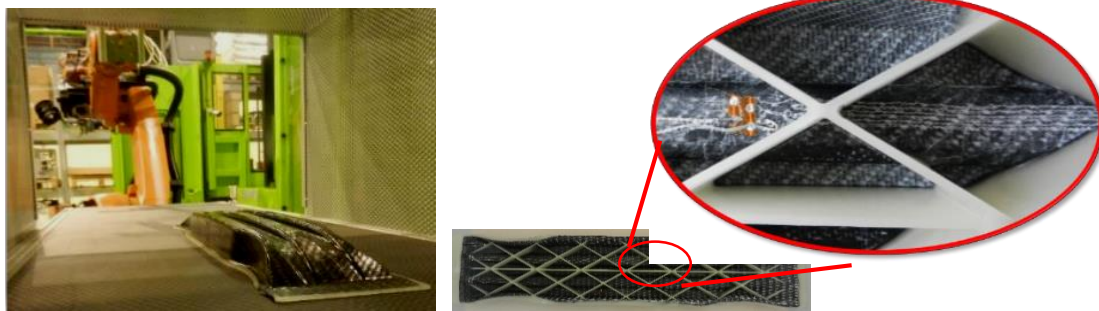


Abb.5: Seitenaufprallträger mit integrierter Schadenerkennungssensorik

### Funktionsnachweis des Schadenerkennungssystems

Zum Funktionsnachweis des Schadenerkennungssystems wurden eine quasistatische und eine dynamische Prüfung durchgeführt. Der 3-Punkt-Biegeversuch (Abb. 6) stellt den Signalverlauf des Sensors des jeweiligen Versuchs dar. Der im Rahmen gekennzeichnete Bereich ist jeweils der Bereich, in dem das Schadenerkennungssystem ausgelöst hat (Tab. 2).

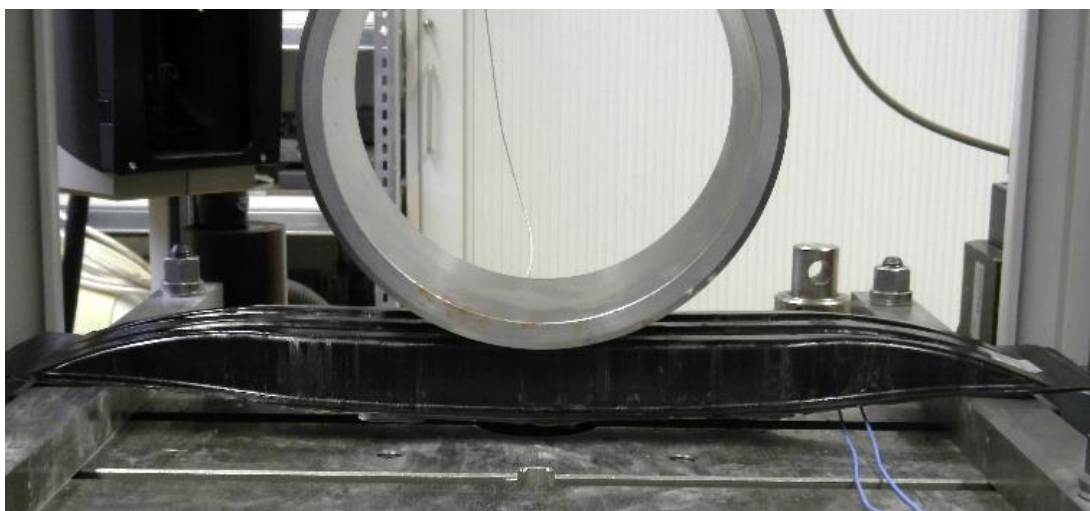
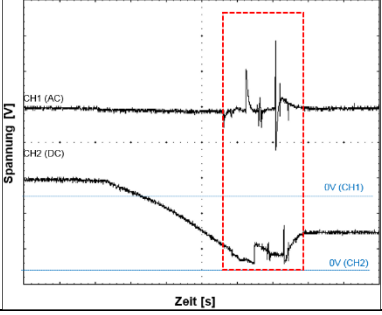
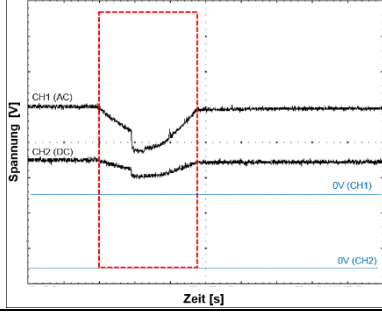
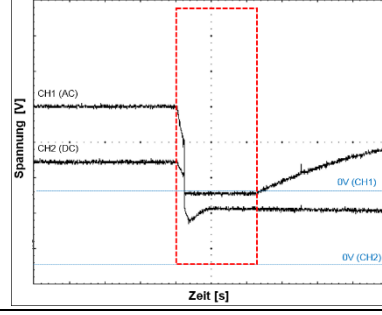


Abb.6: Prüfaufbau stat. Prüfung des Seitenaufprallträgers

Tab. 2: Verschiedene Signalverläufe des Schadenerkennungssystems

Stat. Signalverlauf	Dyn. Signalverlauf – kein Bruch	Dyn. Signalverlauf – Bruch des SAT's
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dehnung des Sensors durch die Durchbiegung des SAT's</li> <li>• Schadenerkennungssystem hat die vordefinierte Schwelle überschritten und ausgelöst</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plötzlicher Einschlag des SAT's führt zur schnellen Signaländerung des Sensors</li> <li>• Schadenerkennungssystem hat die vordefinierte Schwelle nicht überschritten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plötzlicher Einschlag des SAT's führt zur schnellen Signaländerung des Sensors</li> <li>• Einschlagenergie führt zum Bruch des SAT's</li> <li>• Schadenerkennungssystem zeigt den Defekt des SAT's auf</li> </ul>

Durch die entwickelte Auswerteelektronik ist es möglich durch eine vordefinierte Schwelle des elektrischen Signals den Schadensbereich zu klassifizieren. Mit unterschiedlichen Energieeinträgen ist es mit diesem Sensorsystem möglich, eine Schädigung im Faserverbundbauteil zu detektieren.

### 3 Ausblick

Es ist zu erwarten, dass durch die sticktechnologische Verarbeitung unterschiedlicher Materialien mit verschiedenen Eigenschaften zu komplexen Strukturen künftig noch weitere bekannte physikalische Effekte mit brauchbaren Eigenschaften erzeugt werden können, die für Faserkunststoffverbundbauteile weitere Anwendungsgebiete eröffnen.

Viele Möglichkeiten werden sich eventuell erst aus Entwicklungen der Garnveredlung ergeben, die Garne mit noch höheren Eigenschafts- und Funktionsprofilen für technische Anwendungen bereitstellen. So könnten sich aus der Beschichtung von Garnen mit sogenannten Wandlerwerkstoffen oder CNT, die sticktechnologisch verarbeitbar sind, neue Perspektiven auch in der Herstellung von aktorischen und generatorischen Eigenschaften ergeben. Eine weitere Entwicklungsrichtung zeichnet sich in der Kommunikationsfähigkeit zwischen funktionalisierter Faserstruktur und der Kunststoffmatrix bei Nutzung chemischer oder chemisch-physikalischer Reaktionsprozesse ab. Auch Polymere als Matrixwerkstoff können heute schon mit einer Reihe von Funktionseigenschaften ausgestattet werden.

### Danksagung

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Wachstumskerns thermoPre.

### Literatur

- [1] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 3., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

- [2] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [3] <https://www.kunststoffe.de/kunststoffe-zeitschrift/archiv/artikel/leichtbau-mit-thermoplastischen-fkv-erfordert-neue-wege-in-der-verarbeitung-830492.html?search.highlight=6/2014>.
- [4] Schürmann, H.: themaFORSCHUNG 1/2006, S. 56-63. - Stabsstelle Kommunikation und Medien der TU Darmstadt.