

# **Angepasste Piezosensorelektronik und integrierte drahtlose Sensor- netzwerke zur Herstellung intelligenter Leichtbauteile**

## **Adapted piezoceramic sensor elements and integrated wireless sensor networks for the production of intelligent lightweight composite parts**

Dr.-Ing. Andreas Weder, Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS), Dresden, Deutschland,  
andreas.weder@ipms.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Sirko Geller, Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Dresden,  
Deutschland

Prof. Dr.-Ing habil. Wolf-Joachim Fischer, Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informations-  
technik, Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, Dresden, Deutschland

### **Kurzfassung**

Intelligente Leichtbauteile, die eigenständig und energieautonom Messwerte erfassen, analysieren und entsprechend reagieren können, werden zukünftig an Bedeutung gewinnen. Ziel der vorgestellten Arbeiten ist es, den Herstellungsprozess solcher Bauteile massenproduktionstauglich zu gestalten. Dazu zählt besonders die vollständig automatisierte Produktion und Integration piezokeramischer Sensorelemente im gleichen Prozessschritt wie die eigentliche Bauteilproduktion. Weiterhin werden verschiedene Untersuchungen zur Einbringung der notwendigen elektronischen Komponenten vorgestellt. Abschließend wird das Konzept einer integrierten Funksensorplattform demonstriert, mit welcher sich drahtlose Sensornetzwerke aufbauen lassen.

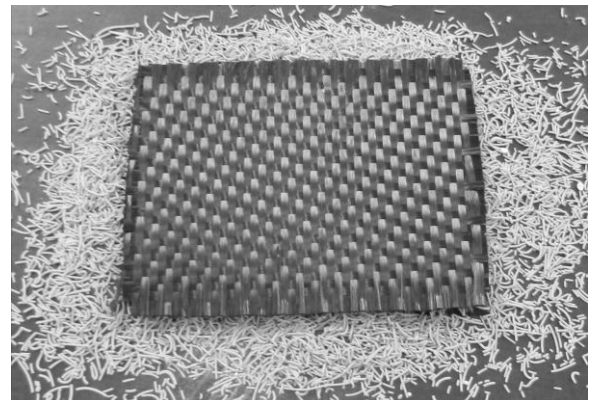
### **Abstract**

Intelligent lightweight composite parts that are able to autonomously record physical parameter, analyse the measurements and react accordingly will gain popularity in the future. The contribution of the presented work is the development of technologies for the automated high-volume production of such parts. This includes concepts for the completely automated production and integration of piezoceramic sensing elements. Several studies demonstrate the feasibility of the integration of electronic components using this technology. Finally, we present the concept of an integrated wireless sensor network platform.

## **1 Einleitung**

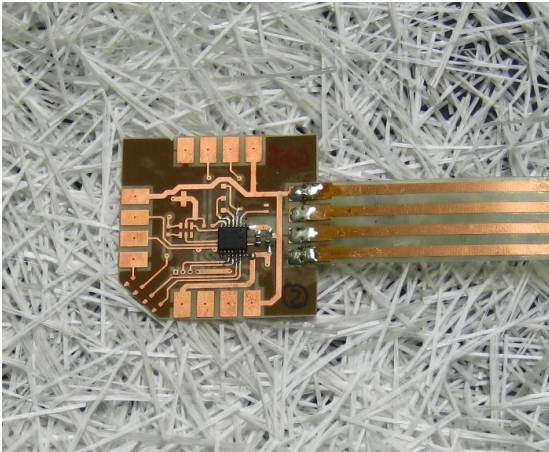
Die Massenfertigung intelligenter Leichtbauteile gilt als eine der zukünftigen Schlüsseltechnologien in diversen Anwendungsbereichen. Insbesondere piezokeramische Baugruppen erschließen sich in diesem Zusammenhang aufgrund ihrer dualen Anwendbarkeit als Sensoren oder als Aktoren vielfältige neuartige Nutzungsmöglichkeiten. Von besonderem Interesse ist beispielsweise ihre Integration in Verbundwerkstoffe, um durch die Aufzeichnung von mechanischen Belastungen oder Stoßereignissen auf die Bauteilintegrität schließen zu können. Auch Anwendungen im Bereich der Energiegewinnung aus der Umwelt (Energy Harvesting) sind auf Basis von piezokeramischen Elementen realisierbar.

Für die Schaffung solcher „intelligenter“ Verbundbauteile ist neben der eigentlichen Bauteilherstellung auch die Integration von Sensorelementen und angepasster elektronischer Schaltungen notwendig. Ein wesentlicher Aspekt ist, dass sich derartige Bauteile in einem Massenproduktionsprozess herstellen lassen, um eine breite Akzeptanz, speziell im adressierten Automobilsektor, sicherzustellen. Essentiell ist also das Vorhandensein einer schnellen und vor allem kostengünstigen Fertigungstechnologie.

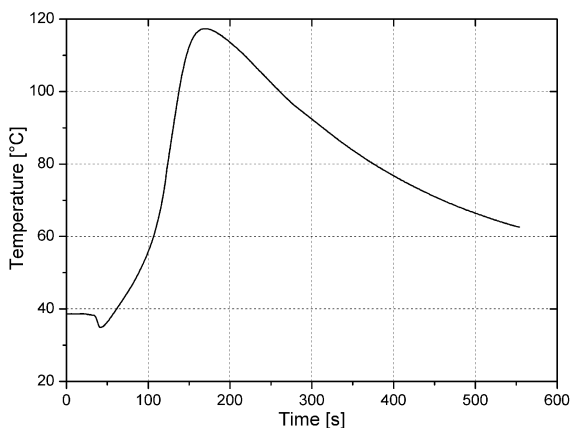


**Bild 1** Automatisch platziertes piezokeramisches Sensorelement vor dem Start des Sprühprozesses.

Eine solche Technologie wird im Rahmen des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereichs / Transregio 39 „PT-PIESA“ entwickelt. Ziel ist speziell die Kombination von Leichtbauteilproduktion und Sensorintegration in einen einzelnen Arbeitsschritt. Statt der bisher üblichen und sehr aufwendigen Praxis, die Sensorelemente in einem ersten Arbeitsschritt zu produzieren und anschließend manuell in das Leichtbauteil einzubringen, steht hier die automatisierte Produktion im Vordergrund.



**Bild 2** Temperatursensorknoten auf Glasfasermaterial vor der Integration.



**Bild 3** Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils während des Herstellungsprozesses.

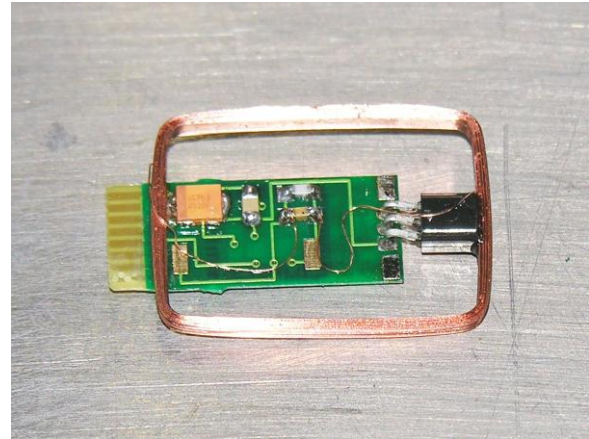
## 2 Automatisierte Herstellungstechnologie für intelligente Leichtbauteile

Glasfaserverstärkte Polyurethanverbundwerkstoffe eignen sich hervorragend für die Konstruktion von intelligenten Leichtbauteilen. Als Basistechnologie kommt für die Herstellung das Long-Fibre-Injection-Verfahren (LFI) [1] zum Einsatz. Dieses findet bisher vorrangig in der Automobilindustrie Anwendung [2,3].

Um die gleichzeitige Herstellung von piezokeramischen Sensorelementen zu ermöglichen, wurde das LFI-Verfahren dergestalt erweitert, dass zeitgleich piezokeramische Materialien eingebracht werden können. Diese neue Produktionstechnik wird daher als Multi-Fibre-Injection (MFI) [4] bezeichnet.

Beide Techniken basieren auf einem Sprühverfahren, bei dem ein Mix aus Glasfasern und Polyurethan in eine offene Werkzeugform ausgetragen werden. Nach dem Schließen der Form härtet das Bauteil in einer exothermen Reaktion aus.

Die Sensorelemente werden hergestellt, indem piezokeramisches Funktionsmaterial zwischen zwei Elektroden-



**Bild 4** Passiver RFID-Transponder mit Temperatursensor vor der Integration.

strukturen ausgebracht wird. Um dies zu realisieren, wurden Verfahren für die automatische Positionierung der Elektrodenstrukturen im Werkzeug erarbeitet [7]. Anschließend wird der Sprühprozess gestartet, der die Komponenten mit der Mischung aus Polyurethan und Glasfasern umschließt. Ein auf diese Weise automatisch platziertes Sensorelement ist in **Bild 1** vor dem Start des Sprühprozesses dargestellt.

In umfangreichen Integrationsversuchen wurde die Eignung unterschiedlicher keramischer Ausgangsstoffe und unterschiedlicher Elektrodenstrukturen untersucht.

## 3 Integration elektronischer Komponenten

### 3.1 Analyse der Prozessparameter

Für die Herstellung intelligenter Leichtbauteile ist die Integration elektronischer Baugruppen nötig, die die Signale der eingebetteten Piezosensoren auswerten können. Hohe prozessbedingte Belastungen können jedoch zur Zerstörung der zu integrierenden elektronischen Baugruppen führen [5]. Daher galten die ersten Experimente der Analyse der prozessinternen Parameter Temperatur und Druck.

Zu diesem Zweck wurde die im **Bild 2** dargestellte Sensorhardware entwickelt, die die Temperatur des Bauteils während der stark exothermen Expansionsreaktion permanent aufzeichnet. Das Ergebnis eines Einbringungsversuchs mit dieser Baugruppe ist im Temperaturverlauf in **Bild 3** dargestellt. Nach dem Schließen des Werkzeugs steigt die Temperatur während der Expansion stark an. Nach dem Erreichen der maximalen Reaktionstemperatur von ca. 120°C sinkt die Temperatur wieder, wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Polyurethanschaums jedoch mit einem kleineren Gradienten. Elektronische Baugruppen müssen für eine Anwendung mit dieser Technologie demnach eine Temperaturbelastbarkeit von unter 130°C für wenige Minuten aufweisen.



**Bild 5** Fertiggestelltes Leichtbauteil mit integriertem Temperatursensor in der RFID-Testumgebung.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass ein Druck von 5 bar innerhalb des Werkzeugs nicht überschritten wird. Verglichen mit den textilbasierten Einpressverfahren aus [5] bietet die hier verwendete Technologie unkritische Prozessbedingungen und damit eine wesentlich höhere Ausbeute.

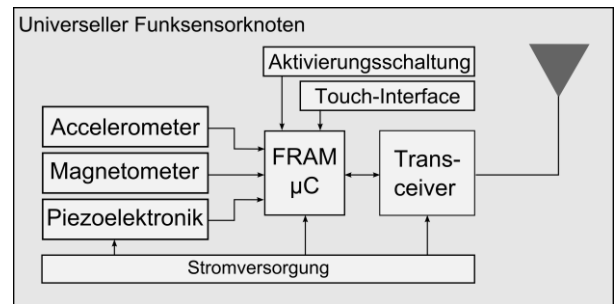
Die drahtlose Kommunikation und die drahtlose Übertragung von Energie wurden durch das Einbringen von RFID-Sensor-Tags (**Bild 4**) evaluiert. Mit Hilfe eines ISO 18000-2 kompatiblen Readers (**Bild 5**) und unserer Analysesoftware lässt sich die bauteilinterne Temperatur, ohne permanente Energieversorgung der elektronischen Komponenten durch Batterien, drahtlos auswerten.

Weiterhin konnte in verschiedenen Untersuchungen [6] gezeigt werden, dass auch die direkte Integration von Primär- oder Sekundärzellen (z.B. NiMH-Knopfzellen oder Lithiumknopfzellen) zur Stromversorgung mit dieser Technologie zuverlässig möglich ist. Die einer Knopfzelle entnehmbare Energiemenge wird durch den Integrationsprozess wegen der geringen Temperaturbelastung nicht signifikant verändert.

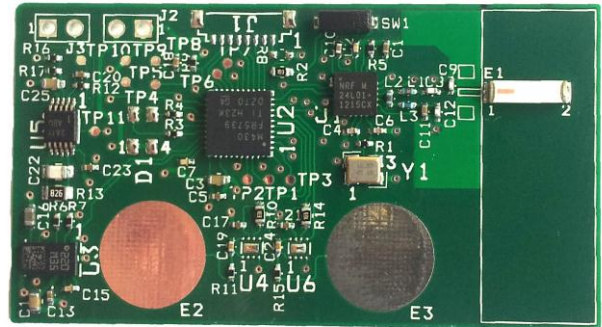
### 3.2 Sensorknotenplattform

Um auch die Integration komplexer elektronischer Schaltungen in die Leichtbauteile zu evaluieren, wurde eine universelle Sensorknotenplattform entwickelt. Mehrere Sensorknoten haben die Möglichkeit, drahtlos miteinander zu kommunizieren und bilden so ein drahtloses Sensornetzwerk (WSN).

Das Konzept der Knotenhardware ist in **Bild 6** dargestellt. Zur Steuerung wird der MSP430FR5739 Mikrocontroller eingesetzt, der statt des üblichen Flash-Speichers den neuen FRAM als nicht-flüchtigen Speicher einsetzt. Die Vorteile gegenüber Flash-Speicher sind hohe Schreibgeschwindigkeiten bei geringerer Energieaufnahme und hoher Lebensdauer. Diese Technologie eignet sich daher besonders für den Einsatz in energieautarken Data-Loggern in Leichtbauteilen.



**Bild 6** Schematische Darstellung der universellen Funksensorknotenhardware.



**Bild 7** Prototyp der Funksensorknotenhardware.

Zur Bereitstellung der Funkschnittstelle wird der Ultra-Low-Power-Transceiverschaltkreis nRF24L01+ verwendet. Dieser Transceiver arbeitet im 2.4 GHz-Band mit einer Bruttodatenrate von 2 MBit/s. Erst die niedrige Stromaufnahme in den verschiedenen Betriebszuständen (TX: 11.3mA, RX: 13.5mA, Standby: 26µA, Deep Sleep: 900nA bei  $V_{DD}=3V$ ) ermöglichen den Aufbau von drahtlosen Sensornetzwerken innerhalb von Bauteilen, bei denen ein Batteriewechsel kaum möglich ist.

Für die Kommunikation innerhalb des drahtlosen Sensornetzwerkes wurde ein speziell angepasstes Kommunikationsprotokoll entwickelt, das den Energiebedarf minimiert. Updates der Firmware sind drahtlos möglich.

Des Weiteren verfügt die Baugruppe über Sensoren zur Erfassung von Beschleunigung, Temperatur, Magnetfeld sowie eine speziell angepasste Schaltung zur Auswertung der Signale der im Bauteil automatisch eingebetteten Piezosensoren.

Die Stromversorgung erfolgt direkt aus einer Lithium-Mangan Knopfzelle (CR2032) mit einer Nominalspannung von 3.0V. Die Schaltung ist dabei so konzipiert, dass eine ineffiziente Wandlung der Versorgungsspannung für die verschiedenen Bauelemente nicht notwendig ist.

Ein erster Prototyp der Sensorknotenplattform ist in **Bild 7** dargestellt.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Technologien sind ein vielversprechender Ausgangspunkt für die massenfertigungstaugliche Herstellung von intelligenten Leichtbauteilen. Piezo-

keramische Sensorelemente lassen sich prozessintegriert einbringen. Auch elektronische Baugruppen für die Auswertung von Sensorsignalen lassen sich aufgrund der geringen Prozessbelastungen in der Regel problemlos integrieren.

Derzeit laufen Arbeiten zur Charakterisierung der automatisch hergestellten Sensorelemente um die Anpassung der Sensorelektronik zu optimieren, die Analyse von Prozessparametern um die Streuung der Sensoreigenschaften zu minimieren und Versuche zur automatischen Kontaktierung und Polarisierung der Sensorelemente.

Weiterhin werden die Firmware des Funksensorknotens hinsichtlich der Energieaufnahme optimiert, um die Nutzungsdauer weiter zu steigern und das drahtlose Laden eingebrachter Knopfzellenakkumulatoren erprobt.

#### Acknowledgement

Die Forschungsarbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs/Transregio 39 PT-PIESA im Teilprojekt B6 unterstützt.

## 5 Literatur

- [1] A. Frieges, W. Söchtig, A. Bauer, Long-Fiber-Injection-Polyurethan – Die neue kostengünstige Methode, glasfaserverstärkte PUR-Leichtbauteile zu fertigen, in: Internationale AVK-Tagung, Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe, 1996, pp. 1–7, Paper-Nr. B11
- [2] J. Rosenberger, Class-A Folie PUR hinterschäumt für Nutzfahrzeug-Außenteile, PUR 2009, VDI Verlag, Düsseldorf, 2009, S. 21–32
- [3] T. Hack, R. Schmidt, K. Nonnbroich, J. Burmeister, Anforderungen an ein Sportwageninterieur am Beispiel des Audi R8, Kunststoffe im Automobilbau, VDI Verlag, Düsseldorf, 2008, S. 67–76
- [4] Weder, A.; Geller, S.; Heinig, A.; Tyczynski, T.; Hufenbach, W.; Fischer, W.-J.: Integration of Piezoceramic Sensor Elements and Electronic Components in Glass Fibre Reinforced Polyurethane Composite Structures. *Procedia Engineering*, 47 (2012), p. 354–357
- [5] K.-U. Roscher, W.-J. Fischer, J. Landgraf, G. Pfeifer, E. Starke, Sensor network for integration into textile-reinforced composites, in: *Proc. Int. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conf. Transducers 2007*, 2007, pp. 1589–1592; <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4300451>
- [6] A. Weder, et al., A novel technology for the high-volume production of intelligent composite structures with integrated piezoceramic sensors and electronic components, *Sens. Actuators A: Phys.* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.01.050>
- [7] Hufenbach, W.; Fischer, W.-J.; Michaelis, A.; Gebhardt, S.; Geller, S.; Tyczynski, T.; Heinig, A.; Weder, A.; Hohlfeld, K.: High-volume production of glass fibre-reinforced polyurethane composite structures with integrated piezoceramic sensor elements and adapted electronics. Tagungsband 4. Wissenschaftliches Symposium des SFB/TR 39 "PT-PIESA", Nürnberg, Deutschland, 26.-27.03.2013, S. 57-61