

In-situ-Strukturüberwachung von Faserkunststoffverbunden unter Druckbeanspruchung

Autoren: Le Xuan, Hung*^{*}; Seidel, André; Hahn, Lars; Nocke, Andreas; Cherif, Chokri
Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM), TU Dresden

Am ITM erfolgte im IGF-Projekt 21169 BR (Comp-i-TenS) die simulationsgestützte Auslegung und Umsetzung druckmessfähiger textilbasierter Sensoren und deren textiltechnische Integration in funktionalisierte Verstärkungshalbzeuge für die Anwendung in Faserkunststoffverbunden (FKV).

Einleitung

Faserverstärkte Verbundstrukturen (Composites) werden gegenwärtig u. a. in den Bereichen des Maschinen-, Flugzeug- und Automobilbaus aufgrund der ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitig höchstem Leichtbaupotenzial eingesetzt [1]. Auch im Bausektor finden Hochleistungstextilien, substituierend zur Stahlbewehrung, zunehmend Anwendung im Carbonbeton [2], aufgrund ihrer mechanischen sowie chemischen Eigenschaften und der daraus resultierenden ressourcenschonenden, filigranen Leichtbauweise. Die langzeitstabile Funktionsfähigkeit und Sicherheit von faserverstärkten Verbundstrukturen ist durch den häufigen Einsatz in sicherheitskritischen Komponenten und Strukturen dringend erforderlich. Ein vielversprechender praxisorientierter Lösungsansatz stellt hierbei die kontinuierliche Strukturüberwachung dar, um die (Rest-)Tragfähigkeit zu quantifizieren und um ggf. erforderliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit einzuleiten.

Eine besonders wirtschaftliche und strukturkompatible Lösung sind textilbasierte Sensoren, die während der Herstellung der textilen Verstärkungshalbzeuge integriert und zur Erfassung komplexer Lastfälle sowie Riss- und Delaminationsvorgänge auf Verbundebene eingesetzt werden. [3 – 6]

Textilbasierte Dehnungssensoren werden prinzipbedingt vorwiegend zur Überwachung in zugbeanspruchten Verbundstrukturen eingesetzt. Um zuverlässige Aussagen über strukturelle Veränderungen und kritische Überlastzustände auch in komplex überlagerten Beanspruchungsszenarien (bspw. Zug- und Druckbeanspruchungen) ableiten zu können, wurden im IGF-Projekt 21169 BR textilbasierte druckmessfähige Sensorsysteme zur kontinuierlichen In-situ-Strukturüberwachung für FKV entwickelt.

Zielsetzung und Lösungsweg

Das Ziel des IGF-Forschungsprojekts war die Entwicklung, Charakterisierung und Erprobung textilbasierter druckmessfähiger Sensorsysteme und deren textiltechnische Integration im Multiaxialkettenwirken zur Herstellung sensorisch-funktionalisierter textiler Verstärkungshalbzeuge für den Einsatz in FKV. Das Anforderungsprofil an die textilen

Sensoren wurde anhand eines Funktionsdemonstrators simulationsgestützt abgeleitet und gezielt darauf ausgelegt strukturelle Deformationen durch einwirkende Zug-, Biege- und vor allem Druckbeanspruchungen zu erfassen. Hierfür wurde der Ansatz verfolgt, die Drucksensitivität von textilen Sensoren durch die gezielte Einstellung und Aufrechterhaltung einer Vorspannung bzw. -dehnung zu erhöhen. Das Sensorverhalten wurde umfangreich in elektromechanischen Untersuchungen auf Faser- und Verbundebene analysiert und am Funktionsdemonstrator erprobt.

Ergebnisse

Simulationsgestützte Auslegung

Grundlegend wurde ein generalisiertes FEM-Modell entwickelt und adaptiert, um einerseits die Sensorpositionierung zu definieren und andererseits die erforderliche Vorspannung (bzw. Vordehnung) zur Druckmessfähigkeit abschätzen zu können. Ein Vierkantprofil, bestehend aus carbonfaserverstärkten Kunststoff (CFK) wurde als Funktionsdemonstrator gewählt und in einer Drei-Punkt-Biegebeanspruchung simulativ untersucht. In Abbildung 1 wird ersichtlich, dass sich aufgrund der Biegebeanspruchung die zu erwartende Druckbeanspruchung an der Oberseite und Zugbeanspruchung an der Unterseite einstellt. In der neutralen Faser sind die Spannungen dahingegen am geringsten. Folglich werden die Sensorgarne an der Zug- und Druckseite vorgesehen, um die entsprechenden resultierenden Dehnungen bzw. Stauchungen zu erfassen.

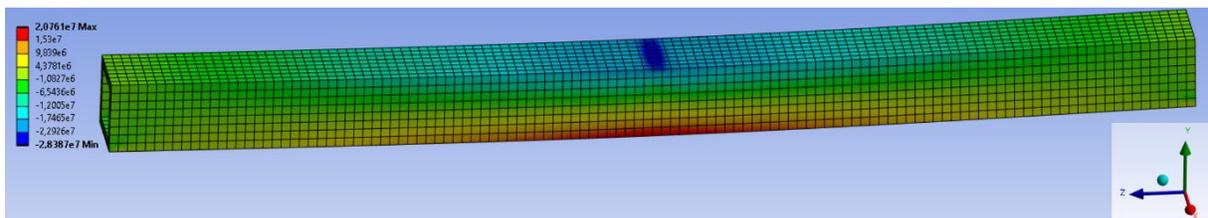
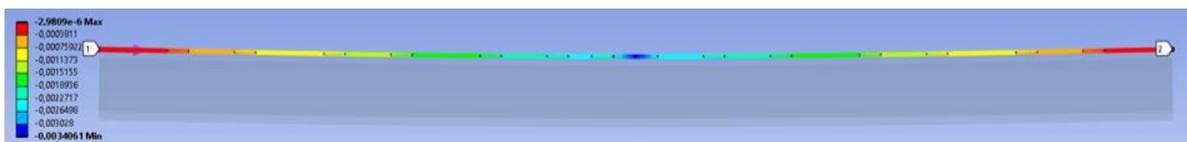


Abbildung 1: Analyse der lokalen Normalspannungen (Z-Achse) des CFK-Vierkantprofils unter Biegebeanspruchung

Stauchung des Sensorgarns auf Druckseite



Dehnung des Sensorgarns auf Zugseite



Abbildung 2: Simuliertes Dehnungs-/Stauchungsverhalten der Sensorgarne auf Druck- und Zugseite des CFK-Vierkantprofils

Zur simulativen Abschätzung der benötigten Vordehnung des Sensorgarns zur Realisierung der angestrebten Druckmessfähigkeit durch die Verschiebung des Arbeitspunktes wurde das Sensorgarn mit Balkenelementen diskretisiert und an die 0° Faserlage des Bauteils gekoppelt. Durch das erstellte Simulationsmodell ist es möglich, lagenspezifische Belastungen vorherzusagen sowie lokale Dehnungs- oder Spannungsspitzen zu ermitteln. Bei einer Biegelast von 1000 N und einer Wandstärke von 5 mm wurde eine maximale Biegeverformung von 4,15 mm ermittelt. Die daraus resultierende Sensorstauchung bzw. -dehnung liegt bei $< 0,4\%$ (Abbildung 2). Aus den Simulationsergebnissen konnte abgeleitet werden, dass eine Sensorgarnvordehnung von $0,5\%$ ausreichend ist, um die auftretenden Druckbelastungen aufzulösen. Gleichzeitig zeigt die Simulation, dass eine lokalisierte Messung der Druckbeanspruchung sinnvoll ist, um eine Senkung der Sensitivität aufgrund großer niedrig belasteter Bereiche zu vermeiden.

Elektromechanische Charakterisierung auf Garnebene

Grundlegend wurden vier verschiedene Sensormaterialien (carbonfaserbasiert, metallisch, sowie silberbeschichtetes Polyamid, siehe Abbildung 3) systematisch auf Garn- und Verbundebene in diversen Prüfscenarien elektromechanisch charakterisiert und miteinander verglichen. Die Sensormaterialien wurden hierfür in uniaxialen Zugversuchen bei gleichzeitiger elektrischer Vier-Leiter-Widerstandsmessung geprüft, um so das Sensorverhalten zu untersuchen (Abbildung 4).

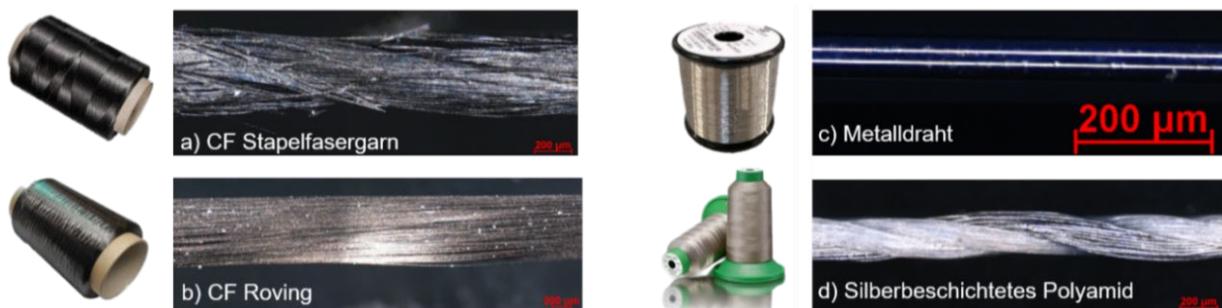


Abbildung 3: Ausgewählte Materialien für die Sensorgarne und mikroskopische Darstellung; Streckgerissenes Sigrafil Carbonfaser-Garn (Sigrafil) (a); Carbonfaser-Roving (CF1K) (b); metallischer Draht Isaohm (Isaohm) (c); Silver tech 120 (ST120) (d)

Aus den elektromechanischen Charakterisierungen der Sensormaterialien auf Garnebene können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

- Das Sensorverhalten von Sigrafil auf Garnebene korreliert nur ungenügend mit steigender Dehnung.
- CF1K zeigt ein sehr gutes lineares Sensorverhalten bis $0,8\%$ Dehnung mit einem Übertragungsfaktor von $K = 1,10$, bei höheren Dehnungen können die exponentiellen Widerstandsänderungen zur Rissdetektion verwendet werden.

- Isohm (K = 1,85) und ST120 können aufgrund ihres hohen Dehnungsvermögens einen großen Beanspruchungsbereich sensorisch abdecken, allerdings ist bei diesen Materialien die Rissdetektion vor allem für den Einsatz in CFK begrenzt. Das Sensorverhalten von ST120 kann mit der dargestellten Polynomfunktion approximiert werden.

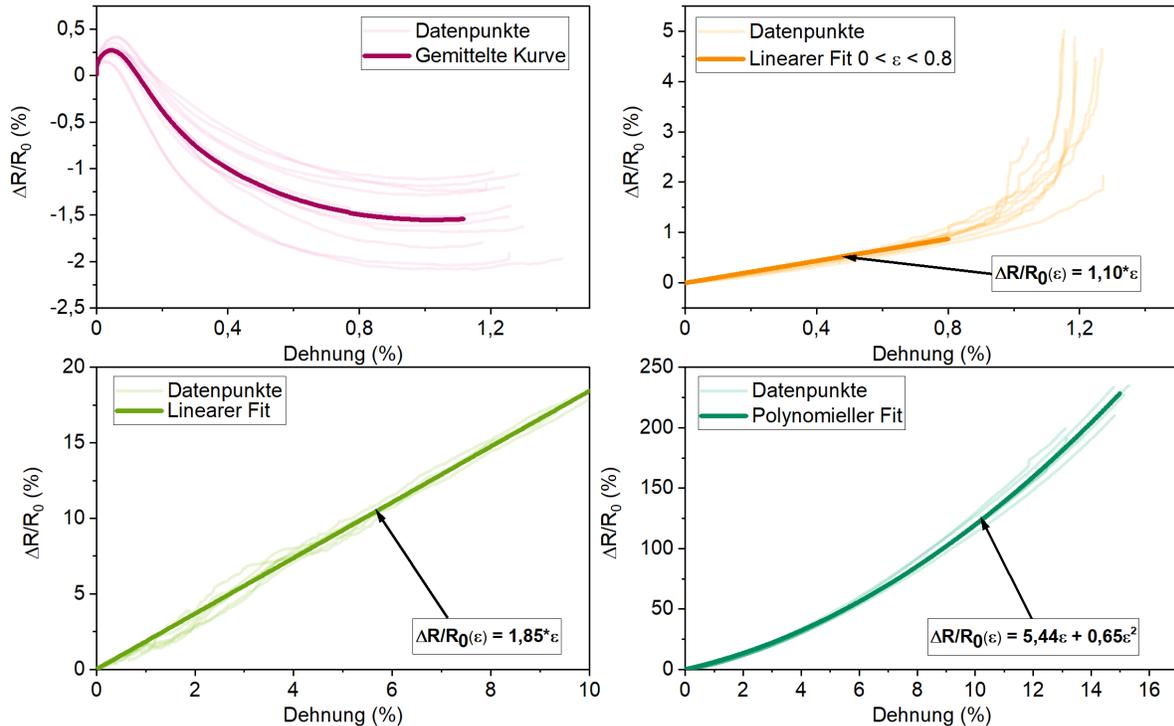


Abbildung 4: Relative elektrische Widerstandsänderung ($\Delta R/R_0$) in Abhängigkeit von der Dehnung für die vier Sensormaterialien bei quasistatischer Zugprüfgeschwindigkeit (0,1 mm/s)

Aufbringung der Sensorvorspannung und textile Fertigung

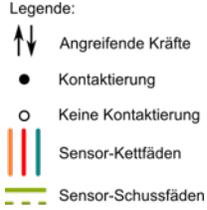
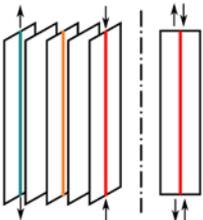
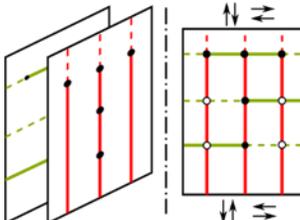
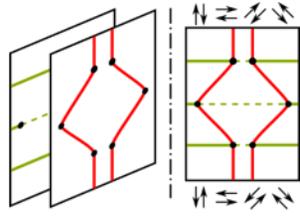
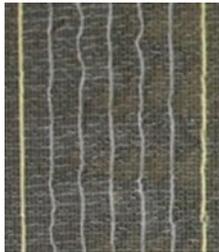
Insgesamt wurden drei Lösungsansätze (LS) zur Aufbringung und Aufrechterhaltung der Vorspannung der Sensoren in drei Funktionsmustern (FM) hinsichtlich der Umsetzbarkeit und Funktionalität umfangreich eruiert (vgl. Tabelle 1). Die Vorspannung der Sensorgarne wurde für LS I (Vorspannung auf Garnebene) und III (Vorspannung während der Konsolidierung) durch die Anbringung von Massestücke realisiert. Hierbei zeigt sich, dass die Vorspannung durch eine Teilkonsolidierung nach LS I eine bleibende Vordehnung der Sensorgarne ermöglicht. Allerdings erschwert die erhöhte Steifigkeit der stabartigen Sensorgarne die Weiterverarbeitung und textiltechnischen Integration der Sensorgarne während der Geleageherstellung. Weiterhin sind bei der Verbundbildung ausschließlich planare FKV-Geometrien mit LS I realisierbar, da durch die Struktursteifigkeit der Sensoren keine Umformungs- bzw. Drapierungsvorgänge möglich sind.

Das Aufbringen der Vorspannung im Zuge der Garnzuführung bei der Textilfertigung ist die

effektivste Methode, Textilien mit vorgespannten Sensorgarnen auszurüsten. Allerdings ist die Aufrechterhaltung der Vorspannung durch eine kraftschlüssige Fixierung während der textilen Flächenbildung (LS II) besonders herausfordernd, da nach der Entnahme des Geleges ein „Rückspringen“ der Sensoren beobachtet wurde. Es konnte keine ausreichende Fixierung der vorgespannten Sensorgarne durch den Wirkfaden erzielt werden.

Bei LS III besteht der große Vorteil einer nachträglichen Aufbringung der Vorspannung bei der Verbundherstellung, sodass eine gestreckte sowie vorgespannte Sensorlage gewährleistet wird. Weiterhin können individuell einzelne Sensorgarne vorgespannt werden. Aufgrund dessen wurde als zielführende Lösung der Ansatz LS III gewählt und fortführend umgesetzt.

Tabelle 1: Lösungsansätze zur Aufrechterhaltung der Vorspannung von Sensorgarnen und FM mit integrierten Sensoren mittels Multiaxialkettenwirken

LS vorgespannte Sensorgarne	LS I (Garnebene)	LS II (Textilebene)	LS III (Verbundebene)
Beschreibung	Fixierung im vorgespannten Zustand auf Garnebene mittels Teilkonsolidierung	Bindungstechnische Variation zur gezielten Vorspannung während der textil-technischen Integration	Gezielte Vorspannung während des Konsolidierungsprozesses
Funktionsmuster	FM1	FM2	FM3
Beschreibung	Sensor-Kett- <u>oder</u> Sensor-Schussfäden (Material)	Sensornetzwerk aus Sensor-Kett- <u>und</u> Sensor-Schussfäden (Kontaktierung)	Sensornetzwerk aus lastpfadgerechten Sensor-Kett- und gestreckten Sensor-Schussfäden (Kettfadenversatz)
Legende: 			
Exemplarische Darstellung der realisierten FM			

Zur systematischen Charakterisierung der funktionalisierten Multiaxialgelege wurden auf einer konstruktiv-technologisch modifizierten Multiaxialkettenwirkmaschine die Funktionsmuster 1-3 erfolgreich hergestellt (vgl. Tabelle 1). Bei FM 2 und 3 wurden durch gezielte

punktueller, elektrischer Kontaktierung von Sensoren untereinander oder von Sensor zu Zuleitungen Sensornetzwerke realisiert. Hierbei ist anzumerken, dass die Kontaktpunkte einen vergleichsweise hohen manuellen Aufwand (Abisolieren, Crimpen, Isolieren) hervorrufen und potenzielle Fehlerquellen darstellen. Für die grundlegenden elektromechanischen Charakterisierungen und Funktionsprüfung der Druckmessfähigkeit auf Verbundebene wurde vorwiegend auf FM 1 zurückgegriffen.

Elektromechanische Charakterisierung auf Verbundebene

Die funktionalisierten Multiaxialgelege wurden im „Vacuum assisted resin infusion“ (VARI)-Verfahren zu Verbundprüfkörper für Zug-, Druck- und Biegeprüfungen nach Norm (DIN EN ISO 527-4, 14126 bzw. 14125) weiterverarbeitet. Quasistatische und zyklische Prüfserien wurden mit gleichzeitiger Widerstandsmessung durchgeführt. Das jeweilige Sensorverhalten der vier untersuchten Sensormaterialien zeigte im Allgemeinen eine hervorragende Korrelation mit den in die CFK-Strukturen induzierten Zug-, Druck und Biegebeanspruchungen. In Abbildung 5 sind exemplarische Ergebnisse der zyklischen elektromechanischen Untersuchung für das Sensormaterial Sigrafil dargestellt.

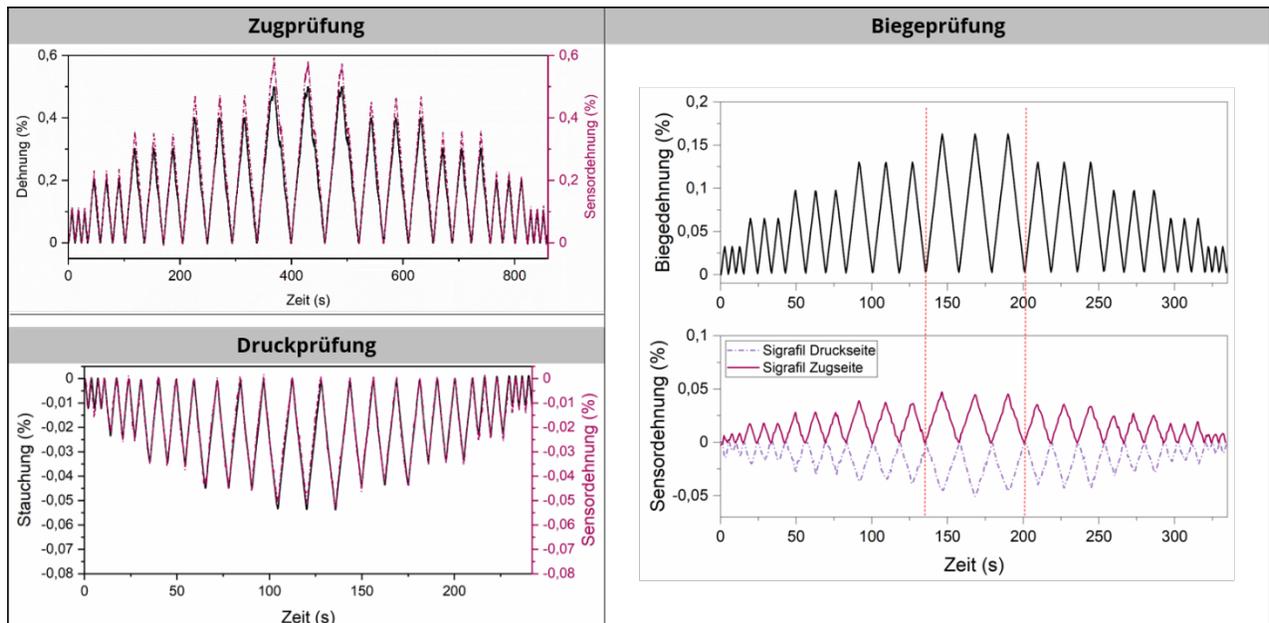


Abbildung 5: Exemplarische Ergebnisse der erfassten Sensordehnung der vorgespannten Sigrafil Sensoren in FKV unter zyklischer Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung

Hierbei wird ersichtlich, dass die Sensordehnungen mit der induzierten Dehnung (Zugprüfung) und Stauchung (Druckprüfung) qualitativ und quantitativ übereinstimmen. Dabei verursacht die induzierte Dehnung eine positive elektrische Widerstandsänderung und dadurch Sensordehnung, wohingegen die Stauchung ein negatives Sensorsignal generiert. Auch in der Biegeprüfung (zwei integrierte Sensoren, jeweils auf der Zug- und Druckseite) wird

in Abhängigkeit von der Sensorposition, die Ausprägung eines positiven Sensorsignals auf der Zugseite und eines negativem auf der Druckseite beobachtet.

Als Vorzugslösung für die Struktur- bzw. Riss- und Delaminationsüberwachung von CFK wurde das Sensormaterial Sigrafil aufgrund folgender Parameter und Erkenntnisse identifiziert:

- Artgleicher Sensor, dadurch ähnlicher bzw. höhere Dehnbereich und Werkstoffverhalten
- Sensorisch empfindlich gegenüber Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung
- Sehr gute textile Verarbeitbarkeit und Handhabbarkeit
- Geeignet für die Detektion von Riss- und Delaminationsvorgängen

Funktionsdemonstrator

Anhand des ausgewählten Funktionsdemonstrators wurde die prinzipielle technologische Machbarkeit und Umsetzung von der Herstellung der Sensorgarne und funktionalisierten Multiaxialgelegen bis hin zur Herstellung eines CFK-Profiles mit druckmessfähigen, textilbasierten Sensoren exemplarisch dargestellt. Zur Veranschaulichung der Sensormessfähigkeit wurde der in Abbildung 6 a dargestellte interaktive Versuchsstand konzeptioniert und umgesetzt.

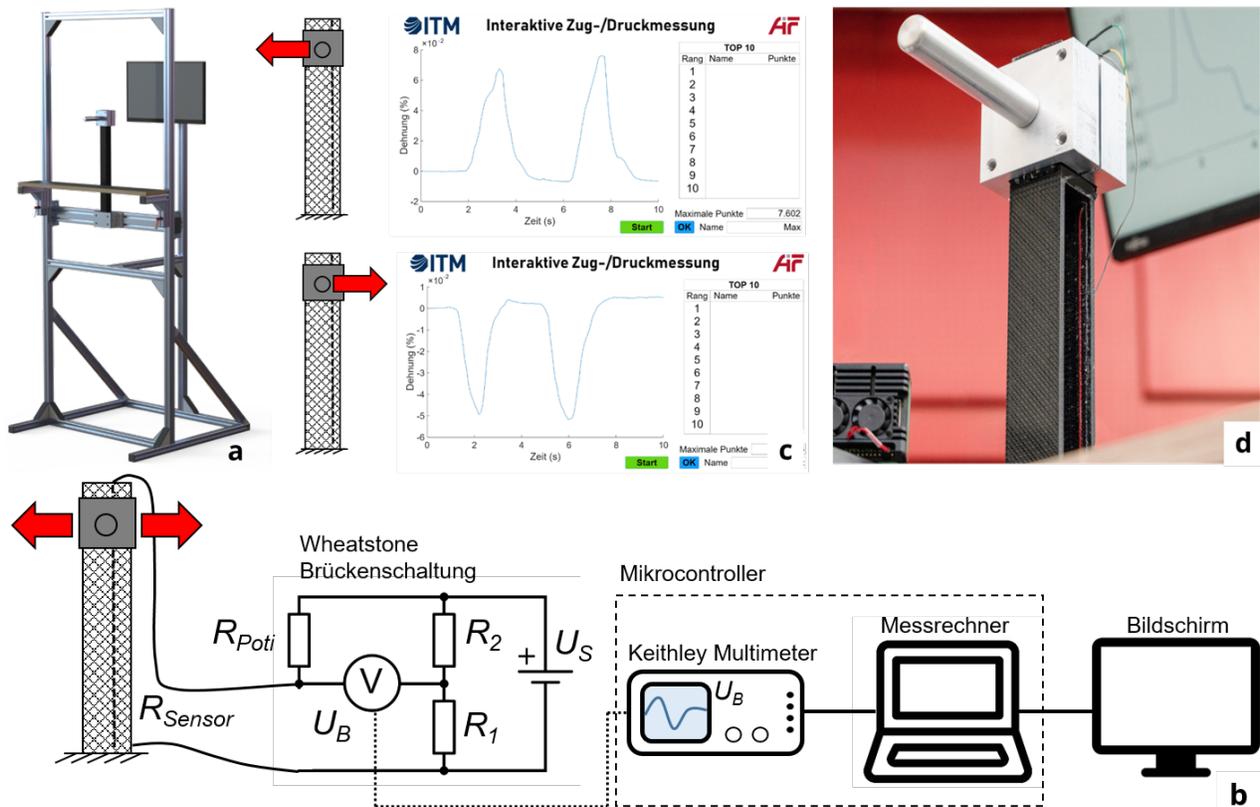


Abbildung 6: Konzeptionierter und umgesetzter Versuchsstand zur interaktiven Zug- und Druckmessung mit simultaner Visualisierung der Sensordehnung (a, c, d), schematische Darstellung der Messkette zur Echtzeit-Erfassung der Sensordehnung durch interaktive Krafteinwirkung (b)

Zur Dehnungsmessung wurden die Sigrafil Sensoren in Wheatstone Viertelbrücken verschalten. Das zur Funktionsvalidierung eingesetzte Hochpräzisions-Multimeter und Messrechner wurde anschließend durch einen Mikrocontroller (Raspberry Pi 4) ersetzt (Abbildung 6 b). Die gemessenen Sensordehnungen, hervorgerufen durch die interaktive Krafteinwirkung, wurden mit Hilfe einer entwickelten Matlab-Benutzeroberfläche (Abbildung 6 c) auf einem Monitor in Echtzeit grafisch dargestellt. Abhängig von der Richtung der Krafteinwirkung wurden, ähnlich wie in den elektromechanischen Grundprüfungen positive und negative Sensorsignale (Zug bzw. Druck) erfasst werden. Ein Detailbild des CFK-Profiles mit Krafteinleitung ist in Abbildung 6 d dargestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die kontinuierliche Strukturüberwachung von FKV-Bauteilen vor allem in komplexen, wechselnden Belastungsszenarien stellt einen effizienten Lösungsansatz dar, um frühzeitig potenziell auftretende Ermüdungserscheinungen oder Schäden zu detektieren. Gerade in FKV-Bauteilen sind textilbasierte Sensoren eine wirtschaftliche Lösung zur kontinuierlichen In-situ-Strukturüberwachung, aufgrund ihrer direkten textiltechnischen Integration während der Flächenbildung und hohen Strukturkompatibilität.

Das in diesem Forschungsprojekt entwickelte textilbasierte Sensorkonzept wurde auf der Garn- und Verbundebene elektromechanisch charakterisiert und wurde im Multiaxialkettenwirken zu funktionalisierten Gelegen und fortführend in etablierten Verbundbildungstechnologien zu CFK-Proben weiterverarbeitet sowie umfangreich in Zug-, Druck- und Biegeversuchen charakterisiert. Anhand eines CFK-Profil Demonstrators wurde die praktische Umsetzbarkeit und Funktionsfähigkeit erprobt und bewiesen. Diese „Smart-Composites“ ermöglichen nicht nur eine kontinuierliche In-situ-Strukturüberwachung von FKV-Bauteilen unter Zug-, Biege- und vor allem Druckbeanspruchung, sondern können auch für die Detektion von Riss- und Delaminationsvorgängen eingesetzt werden. Dadurch können sowohl das Verständnis des Materialverhaltens verbessert und für zukünftige Auslegungen berücksichtigt als auch erforderliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems eingeleitet werden.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 21169 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstr. 12-14, 10117 Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Autoren danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel. Der Forschungsbericht und weiterführende Informationen sind am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden erhältlich.

Literaturverzeichnis

- [1] CHERIF, C.: Textile Materials for Lightweight Constructions. Band 1, 1 Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag GmbH, 2016. - ISBN 978-3-662-46340-6.
- [2] ORLIK, S.: Bauen der Zukunft: Erstes Carbonbeton-Haus entsteht in Dresden. G-Pulse .
- [3] ERIC HÄNTZSCHE; RALF MUELLER; TRISTAN RUDER; ANDREAS NOCKE; CHOKRI CHERIF: Integrative Manufacturing of Textile-Based Sensors for Spatially Resolved Structural Health Monitoring Tasks of Large-Scaled Composite Components. .
- [4] VLADAN KONCAR: Smart Textiles for In Situ Monitoring of Composites: Woodhead Publishing, 2019. - ISBN 978-0-08-102308-2.
- [5] SALVADO, R.; LOPES, C.; SZOJDA, L.; ARAÚJO, P.; GORSKI, M.; VELEZ, F. JOSÉ; CASTRO-GOMES, J.; KRZYWON, R.: Carbon fiber epoxy composites for both strengthening and health monitoring of structures. Sensors (Basel, Switzerland) 15(2015)5, S. 10753–10770.
- [6] QUADFLIEG, T.; STOLYAROV, O.; GRIES, T.: Carbon rovings as strain sensors for structural health monitoring of engineering materials and structures. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 51(2016)7, S. 482–492.