

# Potentiale metallischer Drahtlegierungen zur Zustandsüberwachung gewickelten Faserverbundstrukturen

Mario D. Naumann<sup>1</sup>, Lothar Krol<sup>1</sup>, Wolfgang Günther<sup>2</sup>, Eric Schubert<sup>2</sup>, Ulrich Blaschke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Inst. für Strukturleichtbau d. TU Chemnitz, Reichenhainer Str. 31-33, 09126 Chemnitz, Deutschland

<sup>2</sup>GEMAC – Gesellschaft für Mikroelektronikanwendung Chemnitz mbH, Zwickauer Str. 227, 09116 Chemnitz, Deutschland

<sup>3</sup>Eferest GmbH, Stahlstrasse 2, 57234 Wilnsdorf, Deutschland

## Zusammenfassung

Zur Steigerung des Einsatzes von Leichtbaustrukturen in Großserienanwendungen und deren Sicherheit in mit Gasdruck operierenden Prozessen wird eine Überwachung der Bauteileigenschaften faserverbundstoffverstärkter Druckbehälter zwingend notwendig. Bisherige wissenschaftliche Arbeiten und Anwendungen fokussieren speziell für Faserverbunde angepasste DMS, faseroptische und piezokeramische Sensoren sowie auf Trägermaterialien aufgestickte Metalldrähte zur Dehnungsmessung. Die genannten Technologien sind in Bezug auf große Stückzahlen und Anpassungen an konkrete Produkte kostenintensiv, bedürfen hohem Verarbeitungsaufwand und komplexer Messtechnik, oder werden nicht allen Anforderungen an eine flächendeckende Bauteilüberwachung gerecht. Metallische Drähte erlauben neben der sticktechnischen Verarbeitung zu bekannten DMS-Formen auch die Direktverarbeitung im Wickelverfahren. Diese Eigenschaft impliziert neue technologische Ansätze zur Strukturüberwachung gewickelter Faserverbundstoffe.

**Keywords:** Faserverbundleichtbau, Smart Materials, Sensorintegration, Structural Health Monitoring,

## Einleitung

Innendruckbelastete Faserverbundbauteile kommen häufig in Kleinserienanwendungen wie Feststoffraketen und kryogenen Speichern zur Anwendung. In jüngster Zeit drängen aber auch Faserverbunddruckbehälter unterschiedlichster Bauart als Tanks zur Speicherung von gasförmigen Treibstoffen in Kraftfahrzeugen, wie etwa als Wasserstofftank für Brennstoffzellen-Fahrzeuge und als CNG-Speicher für Erdgas betriebene Fahrzeuge, auf den Markt. Obwohl die Nachfrage nach derartigen Composite-Strukturen aufgrund der Gewichtsvorteile stark zunimmt, gibt es wenige wirksame Assessment-Techniken, um die Qualitätskontrolle sicher zu stellen und eine Langlebigkeit sowie die Sicherheit der Composite-Druckbehälter im Betrieb zu gewährleisten.

Neben lokalen Messverfahren wie Dehnungsmessstreifen (DMS) mit speziell für Faserverbunde entwickelten Messgitterformen aus Kupfer-Nickel-Legierungen, Mikrodehnungsmessstreifen, Folien-DMS und aerosolgedruckte Dehnungsmessstreifen, stellen optische Fasern mit Fiber-Bragg-Gitter einen fasergerechten Lösungsansatz dar. Die optischen Fasern können dabei während der Herstellung in unterschiedlichen Schichten des Faserverbundbauteils eingebracht oder nachträglich appliziert wer-

den. Für Messung der Bauteilverformungen haben sich unterschiedliche Methoden etabliert, die aber für Großserienanwendungen wie der Speicherung von Treibstoffen im Automobilbau oder mobilhydraulischen Anwendung an einer wirtschaftlichen Umsetzung scheitern [1]. Der folgende Beitrag stellt einen Überblick zum Stand der Technik möglicher Verfahren zur Strukturüberwachung von Faserverbundkomponenten dar und offeriert Lösungsansätze zur kostengünstigen und großserientauglichen Strukturüberwachung rotationsförmiger Faserverbundstoffe (FKV).

## Methoden zur Dehnungsmessung mit Eignung zur Integration in Faserverbundstrukturen

Trotz angepassten Dehnungsmesssysteme für Faserverbundkonstruktionen sind Handhabungen auf Grund von Kabelstörstellen und die Messergebnisse, durch ungenaue Positionierung und Unebenheiten der Struktur selbst, bisher nicht zufriedenstellend. Darüber hinaus lassen sich herkömmliche DMS schwer in den Produktionsablauf integrieren. Die Kontaktierung des Messsystems ist zudem mit Faserschädigungen verbunden, wenn Kontaktierungsstellen durch Harz bedeckt sind.

Weiterhin stellt der Einfluss der Temperatur bei der Herstellung der Verbunde eine entscheidende Rolle dar, da die Dehnungsmesssysteme in der Regel einem herstellungsbedingten Temperaturgang unterliegen. Darüber hinaus sind bei DMS-Systemen die nur lokal messbaren Dehnungen für eine globale Strukturüberwachung nachteilig. Wird der DMS ausschließlich an der Oberfläche appliziert, verstärkt sich dieser Effekt, da nicht alle Einzelschichten des Laminats bei der Messung Berücksichtigung finden sowie dünne Harzschichten den direkten Kontakt mit dem Faserverbund verhindern. Faseroptische Sensoren (FOS) stellen ein neues Konzept zum Überwachen der strukturellen Integrität faserverwickelter innendruckbeaufschlagter Komponenten dar. Die optischen Fasern können dabei in der Herstellung in unterschiedlichen Schichten des Faserverbundbauteils eingebracht oder nachträglich aufgebracht werden. Für Messung der Bauteilverformungen haben sich im Stand der Wissenschaft und Technik unterschiedlichen Methoden etabliert.

Das Einfügeverfahren mit Durchgangsdämpfung findet zur Messung der Gesamtdämpfung einer optischen Faser Anwendung. Dazu wird an einem Ende der Faser eine definierte optische Leistung eingespeist und die ankommende Leistung am anderen Ende gemessen. Brüche und Beschädigungen der optischen Fasern können qualitativ erfasst werden, Kraft- und Temperatur-Einwirkung nicht. Zusätzlich zur Zugänglichkeit beider Faserenden ist eine räumliche Trennung der Messapparatur notwendig, was die Implementierung in Serienbauteile, die meist mit engen Bauräumen korrelieren, erschwert [1].

Die optische Zeitbereichsreflektometrie (OTDR) erlaubt die Lokalisierung von Fehlstellen der optischen Faser. Dabei werden kurze Lichtimpulse in die optische Faser eingespeist und deren Reflektionen gemessen. Die Fehlerbilder stellen sich in der Messung unterschiedlich dar. Durch Brüche der optischen Faser resultieren Reflektionen, die sich in Peaks in der Messkurve äußern. Die Verformung kann über den Abfall der Messkurve beobachtet werden. Eine Einbringung von definierten Fehlstellen, deren Abstand Rückschluss auf lokale Verformungen der optischen Faser liefert, ist möglich. Eine zusätzliche Aussage über den Temperaturverlauf der optischen Faser erlaubt die verwandte Zeitbereichsreflektometrie, die im Frequenzbereich arbeitet. Als schwierig wird hier die komplexe Messung des Streulichtes nach Betrag und Phase angesehen sowie die aufwendige Signalverarbeitung mit FFT-Berechnung.

Bei Faser-Bragg-Gitter (FBG) erfolgt die Erfassung der Längenänderung durch die Messung der Bragg-Wellenlänge der eingebetteten FBG in den optischen Fasern. Die reflektierte Wellenlänge am Bragg-Gitter ändert sich proporti-

onal zu dessen Dehnung, hervorgerufen durch mechanische und thermische Lasten.

Die Temperaturkompensation von faseroptischen Sensoren mit FBG erfolgt beispielsweise mit Hilfe der Fluoreszenz-Lebensdauer-Methode. Dabei wird das Licht einer Laserdiode dem Sensor, der aus einer Erbium und Ytterbium dotierten Glasfaser besteht, zugeführt. Der Fluoreszenz-Effekt ergibt sich durch die Anregung der Ionen, was in einer Änderung der Teilchenenergie mündet. Diese Energie wird entsprechend dem Zerfallsgesetz als spontane Emission von Licht in einer bestimmten Wellenlänge abgegeben. Die Intensität der Lichtemission zeigt einen temperaturabhängigen exponentiellen Abfall mit der Zeit, dessen Zusammenhang mit der Temperatur in der Regel nichtlinear ist. Das Verfahren fordert eine zusätzliche Dotierung der optischen Fasern, einen erhöhten Aufwand durch Erzeugung bzw. Einkopplung des anregenden Lichtes und Detektoren zur Aufzeichnung sowie eine individuelle Kalibrierung auf Grund des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Temperatur und emittierter Wellenlänge [2].

Piezoelektrische-Sensoren bestehen aus einem Netz derselben, das in die Verbundstruktur integriert wird. Der sogenannte SMART Layer, der als Sensorträger fungiert, kann in unterschiedlichen Laminattiefen eingebettet werden und bildet eine separate Schicht im Aufbau der Faserverbundarchitektur. Dieses Verfahren erlaubt die Detektion von äußerlich nicht sichtbaren Strukturschäden, wie Delamination und Faserrisse. Die gegen Temperatur empfindlichen piezoelektrischen Sensoren besitzen auf Grund ihrer Einbettung in den Verbund als eigenständige Schicht Auswirkungen auf Steifigkeit und Dehnfähigkeit der Gesamtverbundstruktur. Darüber hinaus erhöht sich der Aufzeichnungsaufwand mit Zunahme der Sensordichte und der damit korrelierenden zu überwachenden Fläche.

#### **Einsatz optischer und piezo-keramischer Sensoren für innendruckbelasteten Faserverbundbauteile**

Um die Qualitätskontrolle sicher zu stellen und eine Langlebigkeit sowie die Sicherheit der Composite-Druckbehälter im Betrieb zu gewährleisten, sind insbesondere für mikroskopische Schäden spezielle Detektionstechnologie erforderlich, da Schäden wie Risse und Delaminationen in Verbundwerkstoffen schlagartig und unbemerkt zu einem kritischen Versagen der Strukturen führen können. Unter der Fülle an zerstörungsfreien Prüfungsmethoden (ZfP) für Composite-Strukturen, besitzen optische Fasern als Sensor, auf Grund ihrer hohen Empfindlichkeit, ihres geringen

Gewichts und ihrer geringen Größe, eine besondere Attraktiv [1].

Diese Art der Überwachung dient der Vermeidung von katastrophalen Ausfällen und zur Verlängerung der Lebensdauer solcher Komponenten. Inspektionen zur Detektion von strukturellen Schäden, die während der Herstellung, der Lagerung, des Transports und des Betriebs entstehen können entfallen, bzw. werden auf ein Minimum reduziert. Dabei wird der Charakterisierung von Rissen, Abplatzungen und Überbeanspruchungen ein besonderer Stellenwert zugeordnet. Zusätzlich bieten derartige Systeme eine robuste und wirtschaftliche Lösung für die Integration überwachender Systeme in Faserkunststoffverbunden. Mit geringen Herstellungskosten kann eine sichere Verwendung von Composite-Druckbehältern geschaffen werden, die auch die Entscheidung für den Einsatz genannter Systemkomponenten in Hochdruckanwendungen erleichtert. In-situ Datenerhebungen und -verarbeitungen erlauben darüber hinaus auch eine drastische Reduzierung der Inspektionskosten während der Betriebsdauer [2, 3].

Prüfungen an blanken optischen Fasern (Fiber Optical Sensor – FOS) mit einem Fiber-Bragg-Gitter (FBG) demonstrieren eindrucksvoll die Machbarkeit der Verwendung dieser Sensoren zur Dehnungsmessung. Eingebettete FOS mit FBG in einfache Verbundlaminate und mit statischer Biegebelastung, liefern einen linearen Zusammenhang mit der wirkenden Kraft. In Druckbehälter eingewickelte faseroptische Sensoren mit FBG zeigen bei statischen und langsam variierenden Belastungsschemen nahezu lineare Dehnungskurven entsprechend der Innendruckbelastung. Diese Ergebnisse belegen die Anwendbarkeit der Bragg-Sensoren für die kontinuierliche Überwachung von Verbundwerkstoffen, insbesondere von Composite-Druckbehältern [4].

Bereist geringe Aufprallgeschwindigkeiten von etwa 10 m/s während der Durchführung von Wartungsarbeiten oder im Betrieb können dazu führen, die Berstfestigkeit der Verstärkungsstruktur zu senken. Mit eingebetteten faseroptischen Sensoren während der wickeltechnischen Herstellung können Informationen über Schäden im Betrieb in ausgewählten Ebenen detektiert werden. Speziell entwickelte, auf Silizium basierende, optische Fasern,

liefern Informationen über die Auswirkungen der Schädigungen in definierten Ebenen des Bauteils. Dabei ist der chemischen Kompatibilität zwischen optischen Fasersensor und Epoxidharz besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Einbettung der optischen Fasern zur Impactbestimmung ist dabei als trivial einzustufen. Bereits ein Aufprall mit geringer Energie auf ein dreischichtiges dünnwandiges Rohr führt zu Matrixrissen unter dem Auftreffpunkt sowie zu Rissen an abgewandten Stellen ausgehend vom Auftreffpunkt. Dabei erfolgt die Rissdetektion durch das Brechen eines optischen Sensors. Weiterhin sind Steifigkeitsänderungen in Folge von Rissen mit Hilfe des optischen Sensors erkennbar [5, 6].

Es zeigt sich, dass die Interaktion optischer Sensoren im Verbundmaterial keinen Einfluss auf die Berstfestigkeit der Verbunddruckbehälter hat. Auch hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit führen nicht zu Beschädigungen der Fasersensoren. Ebenso ist eine signifikante Verringerung der Strukturfestigkeit in gewickelten Faserverbundkomponenten, wie beispielsweise hochbelasteten Raketen-Boostern, in Berstversuchen nicht nachzuweisen. Mikroskopische Aufnahmen und Finite-Elemente-Analysen hingegen zeigen, dass die Bildung von Reinharzstellen in Standard-Kohlenstofffaser-Epoxy-Druckbehältern mit Aluminiumliner, signifikant von der Orientierung des optischen Sensors abhängt, die auch die optische Leistung von FBG zunehmend beeinflussen. Zur Temperaturkompensation sind Stahl oder Glassensoren auf der Oberfläche der Faserverbundstruktur vorzusehen. Eingebettet sind derartige FOS beispielsweise direkt auf einem Aluminiumliner, oder in den obersten Schichten der Verstärkungsstruktur sinnvoll [7, 8, 9, 10].

Die Genauigkeit der FOS mit FBG in Druckbehältern mit Kohlenstofffaser/Epoxidharz-Systemen ist im Vergleich zu applizierten DMS-Messungen und FE-Rechnungen in der Mitte des Zylinders in den umfangsgewickelten Lagen mit einer Abweichung von -1,2% sehr gering. In den äußeren Umfangslagen beträgt die Abweichung bis zu 11%. Sensoren in Kreuzwicklungen zeigen eine Abweichung von -1,6% im Zylinder und 24% an den Druckbehälterenden [11].

Die Praxistauglichkeit zur kontinuierlichen Fernüberwachung von Druckbehälter mit

integrierten optischen Fasersensoren mit FBG wird auf Grund der Verformungshistorie und der linearen Beziehung zwischen Bragg-Wellenlänge und Innendruck als sehr gut eingeschätzt. Auch kommen optische Sensoren zur Detektion von Amino-Konzentrationen in duroplastischen Harzsystemen zu Anwendung [12, 13].

In [14] sind zur Überwachung eines Rohres aus Glasfaser/Epoxy FOS mit Bragg-Gitter wendelförmig und parallel zu den 45° und 5° Schichten schraubenförmigen mit eingebracht. Die Ergebnisse der inneren Kurz- und Langzeitbelastungen zeigen, dass FBG-Sensoren zur Messung der Schrumpfung während der Aushärtung sowie zur Detektion von thermischen Restspannungen geeignet sind. Auch die Ergebnisse der Dauerversuche zeigen, dass FBG-Sensoren sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzmessungen aus den beigefügten Dehnungsmessstreifen aufweisen. Die Bestimmung des Young-Modul der Rohre durch die FBG-Sensoren ist während der Ermüdungsprüfungen nahezu konstant obwohl Querrisse in den parallelen Schichten auftreten. Jedoch ist die spektrale Form der FBG-Sensor von Ermüdungsrissen betroffen [15].

Eine Herausforderung bei faseroptischen Sensoren stellt die faserorientierte und störungsfreie Integration der Sensoren dar. Dieser Thematik wird in [16] mit einem speziell gefertigten Dorn begegnet. Dieser Dorn besitzt eine Kabelführungsbohrung. Im ersten Schritt erfolgt das Einlegen der FOS und der Thermosensoren in den Dorn, im Anschluss wird die erste Lage mit Epoxidharz und Fasern gewickelt und die Sensoren tangential und axial angeordnet. Die Bedeckung der Sensoren erfolgt ebenfalls mit Epoxidharz verstärktem Wickellaminat. Nach der Aushärtung ist der Dorn im Inneren maschinell zu entfernen. Das System zeigt, dass mittlere mechanische Belastungen und Temperatur messbar sind. Das erlaubt eine Prozessüberwachung während des Herstellungsprozesses als auch während der Betriebsphase. Auch eine einhergehende Qualitätskontrolle sowie die Detektion von Restspannungen nach der Herstellung sind möglich. Das in über 1100 Mikrobelastungen beobachtete Dehnungsverhalten kann einen Ansatz zur Charakterisierung von zukünftigen Fehlerkriterien darstellen. Weitere Entwicklungen zeigen,

dass FOS ebenso zur Temperaturmessung des inneren Laminats gut geeignet sind [17, 18, 19].

Beispiele für die Echtzeitmessung mit Faser-Bragg-Gitter stellen ein Flüssigwasserstoff-Druckbehälter mit Aluminiumliner und Kohlenstofffaser verstärktem Kunststoff in einer Rakete vom Institut für Raumfahrtssysteme und Raumfahrtwissenschaft der japanischen Aerospace Exploration Agency (ISAS/JAXA) sowie Unterwasser-Pipelines dar. Hier stehen vor allem die Konsolidierungseigenschaften des FOS in einer Epoxidharzmatrix bei niedrigen Temperaturen im Fokus der Untersuchungen. Dabei haben sich Polyurethan-Klebstoffe bewährt. [20, 21].

Als Beispiel piezo-keramischer Sensoren rücken nach [22] bei der NASA seit 2003 SMART-Layer-Aktor-Netzwerkssysteme zur Entwicklung eines kompletten Structural Health Monitoring Systems für gewickelte Druckbehälter, einschließlich Datenverarbeitungstool, in den Fokus der Forschungsarbeiten. Das NASA-System setzt dabei unter anderem SMART-Layer zur Erkennung von versteckten Schädigungen ein. Das System besteht aus einem Netz piezoelektrischer Aktoren und Sensoren, die mit einer Diagnosehardware mit Datenverarbeitung und Analyse-Software verbunden sind. Dieses Netz von Aktoren und Sensoren ist in die Verbundstruktur integriert. Alle piezoelektrischen Elemente erlauben eine Einbettung in unterschiedliche Laminattiefen. Das Signal ist über alle Schichten hinweg sehr gut auslesbar. Diese Sensorsignale im Frequenzbereich von 35 bis 65 kHz haben sich zur Erfassung von Impact Schäden bewährt. Auch eine Temperaturkompensierung ist gegeben. Das System bietet somit eine In-situ Datenerfassung und Verarbeitung [23, 24].

Die beschriebenen Verfahren sind auf Grundlage der verwendeten Materialien wie optische Fasern und piezoelektrischen Sensoren kostenintensiv und aufwendig in der Verarbeitung und damit für mittlere bis große Serienbauteile ungeeignet. Alternativen stellen Sensoren auf Basis von metallischen Drähten dar.

## Einsatz von Sensoren in innendruckbelasteten Faserverbundbauteilen auf Basis von Metalllegierungen

In Versuchsreihen an Druckbehältern mit Stahl liner und Kohlenstofffaser verstärkten Kunststoffen (CFK) als Wickelstruktur wurden die Dehnungen während eines Befüllvorgangs mit Hilfe von speziell für diesen Anwendungsfall konzipierten Dehnungsmesssensoren erfasst und analysiert. Hierfür erfolgte eine Applizierung von textiltechnisch hergestellten Sticksensoren. Dabei wurden Drähte aus Metalllegierungen auf einem Polyestervlies sticktechnisch aufgebracht und anschließend auf den Stahl liner sowie in die Faserverbundstruktur einlaminiert. Die Orientierung entsprach den Hauptspannungsrichtungen Axial und Tangential (vgl. Abb. 1).



Abb. 1: Sticksensoren auf metallischem Liner; links: axiale Orientierung, rechts: tangentiale Orientierung [25]

Die Isolierung konnte mit dem Stickvlies und einem Deckvlies erreicht werden. Für die Analyse der Dehnungen im Stahl liner und der Faserverbundstruktur sowie des Dämpfungsverhaltens im Laminat wurden zwei gleichgerichtete Dehnungsmesssensoren auf dem Liner sowie im Wickelverbund eingebracht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Liner und die Wickelstruktur ein nahezu identisches Dehnungsverhalten, gemessen an den Absolutwerten, aufweisen. Folglich ist eine Betrachtung der Verformung des Gesamtbauteils auf innenliegende Einzelschichten und den Liner im globalen Koordinatensystem übertragbar. In vorangegangenen Untersuchungen konnten Dämpfungsunterschiede in Faserverbundbauteilen in Abhängigkeit des Schichtaufbaus nachgewiesen werden. Die Dämpfungsunterschiede können je nach Laminataufbau variieren

und sind nicht ausschließlich von der Gesamtdicke des Winkelverbunds abhängig [25, 26]. Damit wurde gezeigt, dass Metalldrähte zur Verformungsmessung eine kostengünstige, schonend verarbeitbare und damit großserientaugliche Alternative zu FOS und piezokeramischen Sensoren darstellen, aber lokal operieren.

Als Alternative zu den etablierten DMS-Verfahren wird ein Dehnungsmessdraht aus Metalllegierungen vorgeschlagen. Die Einbettung des Sensordrahtes erfolgt zeitgleich mit dem Verlegen des Rovings auf dem rotationsförmigen Wickelkern oder Liner. Der Dehnungsmessdraht besitzt eine definierte Länge und einen bekannten spezifischen Widerstand. Die Herstellung der Rohrprüfkörper erfolgt mittels des duroplastischen Wickelverfahrens (vgl. Abb. 2), aber auch thermoplastische Anwendungsszenarien sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.



Abb. 2: Herstellung eines Faserverbundrohres und Dehnungsverläufe an einem Rohrprobekörper

Die Längenänderung des Dehnungsmessdrahtes induziert eine Widerstandsänderung, die wiederum als Messsignal aufgezeichnet und ausgewertet werden kann. Zur Überprüfung der Messergebnisse kommen auch handelsübliche DMS entlang der Faserrichtung zum Einsatz. Die Torsionsbelastung des Rohrprüfkörpers erfolgt in 10 Stufen bis zu einem Torsionsmoment von 50 Nm sowie deren Entlastung in gleicher Weise. Der Dehnungsempfindlichkeitswert ( $k$ -Faktor), ermittelt für den Draht in Vergleichsmessungen mit herkömmlichen DMS, erlaubt die Ermittlung realer Dehnungen in  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Die Verformungsverläufe sind in Abb. 3 über der Zeit des DMS und des Dehnungsmessdrahtes in einer  $80^\circ$  Lage gegenübergestellt. Die gemessenen Werte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen DMS und dem fasergerechte integrierten Dehnungsmessdraht

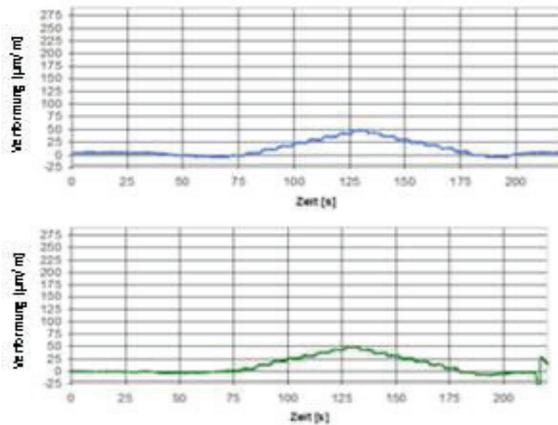


Abb. 3: Dehnungsverlauf gemessen mit DMS (oben), Dehnungsverlauf an einem fasensorientierten und integrierten Dehnmessdraht (unten)

### Literaturnachweis

- [1] Mizutani, T., Hayashi, K., Nishi, T., Takeda, N., Tanaka, K., Namiki, F.: Structural health monitoring for composite pressure vessels using fiber optic sensors. International Astronautical Federation - 56th International Astronautical Congress; Fukuoka; 2005.
- [2] Knapp, R. H., Robertson, I.N.: Fiber optic sensor system for filament-wound pressure vessels. 10th International Offshore and Polar Engineering Conference; Seattle, WA, USA; 2000.
- [3] Degrieck, J., De Waele, W.: Embedded optical Bragg-sensors for monitoring of filament wound pressure vessels. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering; 1999.
- [4] Degrieck, J., De Waele, W., Verleysen, P.: Monitoring of fibre reinforced composites with embedded optical fibre Bragg sensors, with application to filament wound pressure vessels. NDT E and International, Volume 34, Issue 4; 2001.
- [5] Martin Anthony R., Hayes, Simon A., Fernando, Gerad F., Hale, Ken F.: Impact damage detection in filament wound tubes utilizing embedded optical fibers; Smart Structures and Materials. Smart Sensing, Processing, and Instrumentation; San Diego, CA, USA; 1995.
- [6] Park, S.W., Kang, D.H., Bang, H.J., Park, S.O., Kim, C.G.: Strain monitoring and damage detection of a filament wound composite pressure tank using embedded fiber bragg grating sensors. Key Engineering Materials, Volume 321-323 I, 2006, Pages 182-185; 2006.
- [7] Foedinger, R., Sirkis, J., Chang, C. C., Vandiver, Terry L.: Structural integrity of filament wound composite structures with embedded fiber optic sensors. International SAMPE Symposium and Exhibition; Anaheim, CA, USA; 1997.
- [8] Foedinger, R., Rea, D., Sirkis, J., Wagreich, R., Troll, J., Grande, R., Davis, C., Vandiver, Terry L.: Structural health monitoring of filament wound composite pressure vessels with embedded optical fiber sensors. International SAMPE Symposium and Exhibition; Anaheim, CA, USA; 1998.
- [9] Park, S.-W., Kang, S.-G., Kim, M.-G., Kim, C.-G.: Structural health monitoring of cryogenic composite tank using embedded fiber Bragg grating sensors. 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring; Granada; 2006.
- [10] Rea, D., Flis, W. J., Foedinger, R., Vandiver, T.: Analytical model prediction of strain measured by fiber optic sensors embedded in composites. 45th International SAMPE Symposium and Exhibition; Long Beach, CA, USA; 2000.
- [11] Foedinger, R. C., Rea, D. L., Sirkis, J. S., Baldwin, C. S., Troll, J. R., Grande, R., Davis, C. S., VanDiver, T. L.: Embedded fiber optic sensor arrays for structural health monitoring of filament wound composite pressure vessels. Smart Structures and Materials – Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials; Newport Beach, CA, USA; 1999.
- [12] Degrieck, J., De Waele, W.: Embedded optical Bragg-sensors for monitoring of filament wound pressure vessels. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering; 1999.
- [13] Liu, T., Fernando G. F.: Processing of polymer composites: an optical fibre-based sensor-system for on-line amine monitoring. composites: Part A 32, 2000.
- [14] Kosaka, T., Nakamura, A., Ohsaka, K., Sawada, Y.: Real-time cure and health monitoring of FW FRP by using built-in FBG sensors. Journal of the Society of Materials Science; Zairyo, Japan; 2005.
- [15] Hernández-Moreno, H., Collombet, F., Douchin, B., Davies, P., González-Velázquez, J.L.: Development of instrumented composite cylinders. Advanced Structural Materials Symposium of the Annual Congress of the Mexican Academy of Materials Science; Cancun Quintana Roo; 2006.
- [16] Hernández-Moreno, H., Collombet, F., Douchin, B., Choqueuse, D., Davies, P., González Velázquez, J. L.: Entire Life Time Monitoring of Filament Wound Composite Cylinders Using Bragg Grating Sensors. I. Adapted Tooling and Instrumented Specimen: Appl Compos Mater; 2009.
- [17] Hernández-Moreno, H., Collombet, F., Douchin, B., Choqueuse, D., Davies, P., González Velázquez, J. L.: Entire Life Time Monitoring of Filament Wound Composite Cylinders Using Bragg Grating Sensors: II. Adapted Tooling and Instrumented Specimen: Appl Compos Mater; 2009.
- [18] Hernández-Moreno, H., Collombet, F., Douchin, B., Choqueuse, D., Davies, P., González Velázquez, J. L.: Entire Life Time Monitoring of Filament Wound Composite Cylinders Using Bragg Grating Sensors: III. Adapted Tooling and Instrumented Specimen: Appl Compos Mater; 2009.
- [19] Xu, J., Nie, B., Qiao, M.: The study of the internal curing technology of filament wound composite based on fiber Bragg grating detection. International Conference on Environmental Biotechnology and Materials Engineering, EBME 2011; Harbin; 2011.
- [20] Tadahito, M., Nobuo T., Hajime T.: On-board Strain Measurement of a Cryogenic Composite Tank Mounted on a Reusable Rocket using FBG Sensors. Miyashimo, Sagami-hara-City, Kanagawa, Japan; 2006.

- [21] Roberts, D.: Subsea pipeline monitoring using fibre optic strain sensors: 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE; San Diego, CA, USA; 2007.
- [22] Xinlin P. Q., Shawn J. B., Amrita K., Hian-Leng C., Roy I.: Advances in the development of built-in diagnostic system for filament wound composite structures. Composites Science and Technology, Sunnyvale, CA, USA; 2006
- [23] Xinlin P. Q., Shawn J. B., Amrita K., Teng K. O.; Fu-Kuo C.: Built-in Sensor Network for Structural Health Monitoring of Composite Structure. Journal of Intelligent Material Systems and Structures; 2007.
- [24] Collombet, F., Mulle, M., Hernández, M.H., Douchin, B., Zitoune, R., Olivier, P., Grunevald, Y.-H.: On the use of optical fibres with bragg gratings for the identification of process-properties relations of composite structures. 16th International Conference on Composite Materials, ICCM-16 ; Kyoto; 2007.
- [25] Klärner, M.; Marburg, S.; Kroll, L.: Vibro-Acoustic Characterisation of Thermo-plastic Fibre Reinforced Composites. In: Burgess, M.; Davey, J.; Don, C.; McMinn, T.: Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010: Incorporating Proceedings of the 2010 annual conference of the Australian Acoustical Society. Sydney: 2010.
- [26] Naumann, M. D.; Kroll, L.; Blaschke, U.; Fuchs, F.: Leichte Hochdruckbehälter in Faserverbundbauweise. In: Tagungsband 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung: Wertschöpfungspotenzial Textiltechnik. Chemnitz: 2012. ISBN: 978-3-9812554-7-8, S. 318-324.