

# Potenziale faseroptischer Messsysteme zur Überwachung faserverstärkter Primärstrukturen

## Potential of fiber optic measurement systems for monitoring fiber reinforced primary structures

M.Sc. Martin Zießler, Dipl. Ing. Christoph Albani,  
Institut für Konstruktion und Verbundbauweisen gGmbH, 04720 Döbeln, Deutschland,  
martin.ziessler@kvb-forschung.de

### Kurzfassung

Die Detektion von inneren Defekten in Faserverbundstrukturen stellt eine besondere Herausforderung dar, da bereits kleine Schädigungen zu einem abrupten Globalversagen führen können. Daher sind entweder regelmäßige, kostenintensive Wartungsintervalle erforderlich oder die Bauteile werden in der Auslegungsphase mit sehr hohen Sicherheitsfaktoren beaufschlagt, die dem allgemeinen Leichtbaugedanken widersprechen. Einen vielversprechenden Ansatz bietet die permanente Strukturüberwachung auf Basis von Lichtwellenleitern mit eingeschriebenen Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. In mehreren Forschungsvorhaben konnte die KVB gGmbH erfolgreich den Nachweis zur Integration und zum Einsatz des Messsystems erbringen und weitreichende Potenziale in den verschiedensten Industriezweigen aufzeigen.

### Abstract

The detection of internal defects in fiber reinforced structures is challenging, because even small damage could lead to sudden material failure. Therefore, either cost-intensive maintenance intervals or high safety coefficients in the design phase are necessary requirements, which conflict the fundamental idea of lightweight construction. The integration of structural monitoring systems based on optical fibers with written fiber Bragg gratings are recognized as a practical and promising approach. The KVB gGmbH successfully provided evidence for such applications in various research projects and demonstrated the far-reaching potential for different industry sectors.

## 1 Einleitung

Faserverbundwerkstoffe stellen aufgrund ihrer sehr guten spezifischen Eigenschaften in vielen industriellen Anwendungen eine Alternative zu konventionellen, metallischen Werkstoffen dar. Anfängliche Schädigungen des Faser-Matrix-Laminats, die nur sehr schwer oder mit erhöhtem Aufwand detektiert werden können, können jedoch zu einem abrupten Kollateralversagen der Struktur führen (**Bild 1**).



**Bild 1:** geborstener Druckbehälter (oben), versagte Antriebswelle (unten)

Daher werden zur Vermeidung der Gefährdung von Mensch und Umwelt insbesondere Primärstrukturen mit

sehr hohen Sicherheitsfaktoren versehen, die dem allgemeinen Leichtbaugedanken entgegenstehen und beispielsweise in Mobilitätsanwendungen die maximale Reichweite oder Nutzlast limitieren. Eine permanente oder bedarfsgerechte Überwachung solcher Komponenten stellt einen zielführenden Lösungsansatz zur Überwindung der aufgezeigten Problematik dar. Lichtwellenleiter mit eingeschriebenen Faser-Bragg-Gitter Sensoren bieten aufgrund ihrer weitreichenden Vorteile gegenüber anderen Messsystemen ein sehr hohes Potential zur Integration in den Faserverbund, sodass mögliche Belastungsabweichungen im Betrieb frühzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen vor dem Strukturversagen eingeleitet werden können.

Unter Berücksichtigung der Sensorik zur Dehnungserfassung können die Sicherheitsfaktoren von Faserverbundbauteilen drastisch reduziert und ein höchstmöglicher Leichtbaugrad erzielt werden. Damit gehen neben der wesentlichen Einsparung des Materialeinsatzes und der Fertigungszeit der Bauteile auch eine Vielzahl von Sekundäreffekten der Gesamtstruktur einher, die der Ressourcenschonung und Energieeffizienz genüge tragen.

## 2 Stand der Technik

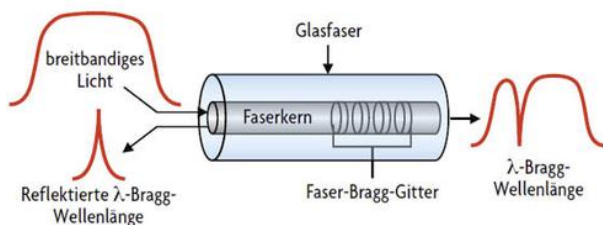
Faser-Bragg-Gitter Sensoren gehören zur Gruppe der optischen, aktiven Sensoren. In der Regel bestehen Lichtwellenleiter für den industriellen Einsatz aus Polymethylmethacrylat (PMMA) und Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>), die von einer Schutzschicht aus Polyimid (PI) oder Ormocer

umgeben sind (**Bild 2**) [1, 2]. Der optischen Leiter ist dabei nochmals in einen lichtführenden Kern und einen Mantel, der das Streulicht zurück in den Kern leitet und so minimale Verluste des übertragenden Lichtes gewährleistet, unterteilt. Die Schutzschicht hingegen dient zum Schutz vor thermischen und mechanischen Einflüssen.



**Bild 2:** Aufbau optische Sensorfaser [3, 4]

Den eigentlichen Sensor bilden die sogenannten Bragg-Gitter, die mittels eines Ultraviolett-Lasers oder einer Phasenmaske in eine Glasfaser eingeschrieben werden. Die daraus entstehenden optischen Interferenzfilter reflektieren eine spezifische Wellenlänge, welche zur Auswertung eines Messwerts (Temperatur, Dehnung) herangezogen wird (**Bild 3**).



**Bild 3:** Wirkprinzip Faser-Bragg-Gitter-Sensor [3]

Eine Änderung der Länge des Lichtwellenleiters durch Temperatur- oder Kräfteinfluss geht gleichermaßen mit einer Streckung bzw. Stauchung der Gitterperiode und somit der reflektierten Wellenlänge einher, welche wiederum proportional zur entsprechenden Dehnungs- oder Temperaturänderung ist.

Da jeweils nur eine spezielle Bragg-Wellenlänge von einem Sensor reflektiert wird und das übrige Spektrum weiterhin durch die Faser übertragen wird, können mehrere Gitter mit unterschiedlichen spezifischen Wellenlängen in einen Lichtwellenleiter eingeschrieben (Multiplexingfähigkeit) und simultan als Dehnungs- oder Temperatursensor ausgewertet werden. Weitere Vorteile dieses Sensorsystems sind die elektromagnetische Verträglichkeit, Integrierbarkeit bei minimaler Beeinflussung der umgebenen Struktur, Miniaturisierung von Faser und Messsystem, hohen Dauerfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und der Aufbau von komplexen Sensornetzwerken. [5] Demgegenüber bestehen jedoch auch eine Reihe von Herausforderungen, die beim Einsatz berücksichtigt werden müssen. Zu enge Biegeradien der Sensorfaser führen beispielsweise zu einem Lichtverlust und somit zu einem schwächeren Signal zur Auswertung der reflektierten Wellenlänge. Des Weiteren ist der Lichtwellenleiter sehr spröde, sodass es bereits während des Herstellungsprozesses

bei der Integration oder beim Applizieren zu irreparablen Schädigungen und damit zum Ausfall des Systems führen kann (**Bild 4**).



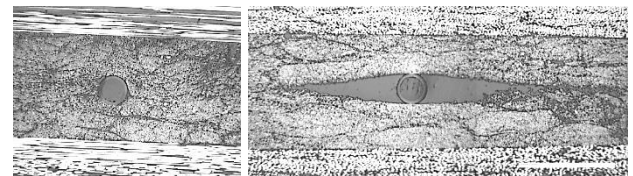
**Bild 4:** Sensorfaserbruch und -schädigung im Verarbeitungsprozess [4]

Die thermische Abhängigkeit der Sensoren beeinflusst ferner die reine Erfassung der Dehnung, wodurch stets zur zuverlässigen Signalauswertung ein Sensor zur Kompensation des Temperatureinflusses vorzusehen ist [5]. Trotz der stetigen Entwicklung neuartiger und kompakterer Auswerteeinheiten und wirtschaftlicheren Verfahren zum Einschreiben der Bragg-Gitter ist das Messsystem nach wie vor als kostenintensiv anzusehen. Mit der steigenden Nachfrage und weiteren Etablierung am Markt ist jedoch mittelfristig von einer Relativierung der Kostenstruktur auszugehen.

## 3 Integration von Lichtwellenleitern in Faserverbundwerkstoffe

### 3.1 Einfluss auf die mechanischen Verbundeigenschaften

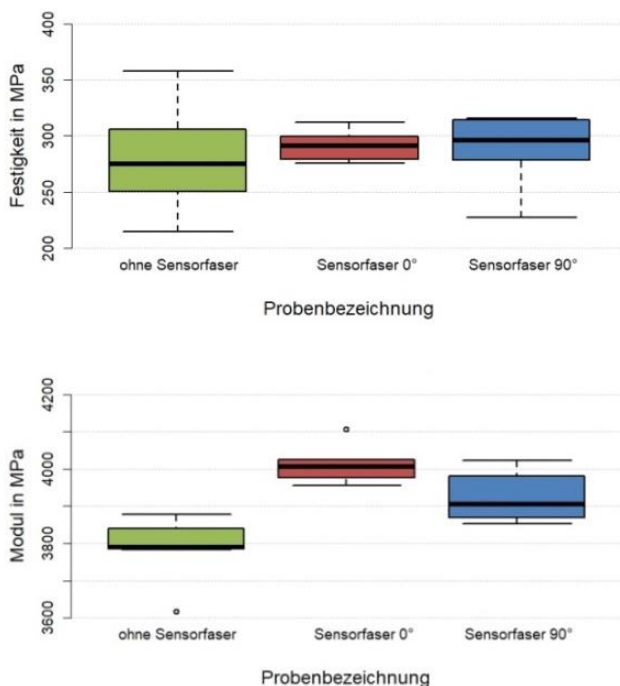
Aufgrund der in Abschnitt 2 beschriebenen Vorteile bieten Lichtwellenleiter ein hohes Potenzial zur Integration in Komponenten aus Faserverbundwerkstoffen. Die Integration des Sensorsystems ist jedoch nur zielführend, wenn die mechanischen Eigenschaften nicht oder nur in minimalen Maße beeinflusst werden. Je nachdem wie der Winkel zwischen Sensor- und Verstärkungsfaser ausgeführt ist, bildet sich ein Harzauge um die Sensorfaser, welches grundsätzlich eine Störstelle im Verbund darstellt (**Bild 5**).



**Bild 5:** Integrierte Sensorfaser unter verschiedenen Einbettungswinkeln [4]

In der Literatur sind bereits diverse Untersuchungen vorhanden, die jedoch zum Teil sehr widersprüchliche Ergebnisse liefern [6]. Daher wurden am Institut erweiterte Untersuchungen an Standardprüfkörpern mit Einbettungswinkeln parallel und senkrecht zur Verstärkungsfaser zur Charakterisierung des Einfluss der integrierten Sensorfaser auf die mechanischen Verbundeigenschaften

durchgeführt. Die Versuchsreihen beschränkten sich dabei auf Querzug-, Druck-, 3-Punkt-Biegeprüfungen sowie die Prüfung des Effekts auf die interlaminae Scherfestigkeit. Resultierend aus den mechanischen Untersuchungen konnte kein signifikanter Einfluss der Sensorfaser unabhängig von der Orientierung zur Verstärkungsfaser festgestellt werden. Lediglich für den Querzugmodul war eine Zunahme von bis zu 6 % im Vergleich zu den Referenzproben ohne integrierte Sensorfaser zu beobachten. Anhand der in **Bild 6** dargestellten Boxplots lassen sich die statistischen Trends exemplarisch verdeutlichen. Während die obere Grafik keine Signifikanz der Druckfestigkeit zeigt, ist in der unteren Grafik ein signifikanter Einfluss der Sensorfaser auf den Querzugmodul nachweisbar.



**Bild 6:** Boxplot zu Druckfestigkeit (oben) und Querzugmodul (unten)

Grundsätzlich konnten die erbrachten Ergebnisse im Rahmen diverser FEM-Simulationen bestätigt werden. Hierbei waren jedoch lokale Einflüsse bei ausgeprägtem Harzaug im Druckversuch hinsichtlich der Faserondulation im nahen Bereich der Sensorfaser zu beobachten, die bei globaler Betrachtung keinen Einfluss auf die mechanischen Verbundeigenschaften mit sich bringt.

### 3.2 Integration des Sensormesssystems

Die Integration der Sensorfaser kann sowohl in rotations-symmetrische, als auch in flächige Bauteilstrukturen erfolgen. Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt erwähnten Sensibilität des Messsystems und Schutz vor äußeren Umwelteinflüssen wird in den vom KVB entwickelten Konzepten der Sensorintegration die Steckverbindung direkt in das Bauteil integriert. In rotations-symmetrischen Strukturen, wie Druckbehälter kann der Steckver-

binder anwendungsbezogen in das Bossteil oder im Fall von flächigen Strukturen innerhalb oder auf dem Laminat integriert werden (**Bild 7**). Neben den dargestellten Varianten ist darüber hinaus noch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten der Steckerintegration unter theoretischen und praktischen Gesichtspunkten umsetzbar.



**Bild 7:** Beispielhafte Steckerintegration an rotations-symmetrischen (oben) und flächigen (unten) Strukturen [4]

Die Positionen und die Ausrichtung der Sensoren im Bauteil an den lastkritischen Bereichen sind aus der FEM – Simulation abzuleiten. Für die positionsgenaue Ablage der optischen Leiter auf bzw. in das Faserverbundlaminat gemäß den evaluierten Stellen, existieren prozess- und anwendungsbezogen unterschiedliche Methoden. Bei der Applikation der Sensorfaser auf flächigen Strukturen wird der Lichtwellenleiter auf einem Trägermaterial mittels einer Schablone vorkonfektioniert und im Anschluss im Herstellungsprozess des Bauteils integriert (**Bild 8**).

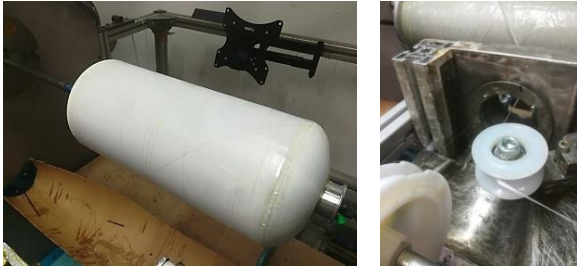


**Bild 8:** Sensorablage (li.) und Applikation der Trägerlage auf dem Bauteil (re.) [4]

Eine automatisierte Ablage der Sensorfaser ist hingegen bei der Herstellung von Komponenten im computer-gesteuerten Wickelverfahren in jeder beliebigen Lage des Laminataufbaus möglich (**Bild 9**).

Insbesondere die hohe Sensibilität des Lichtwellenleiters bringt in diesem Fall eine Vielzahl an Herausforderungen mit sich, die weitreichende Anpassungen zur zerstörungsfreien und reproduzierbaren Applikation an konventionellen Wickelanlagen erfordern.





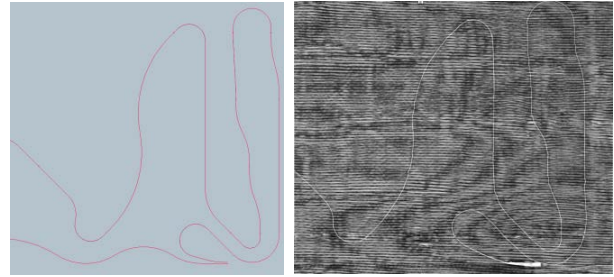
**Bild 9:** Sensorfaserablage auf einem Kunststoffliner (li.) und simultane Ablage von Sensor- und Verstärkungsfaser in einer beliebigen Lage (re.) [4]

Verfahrensbedingt wirken bei der Herstellung von Faser-verbundstrukturen stets Kräfte, die die Position der Sensorfaser beeinflussen können. Zum einen befinden sich daraus resultierend die Sensoren nicht mehr an den vorgesehen Stellen und zum anderen kann die Verschiebung zu einem starken Signalverlust oder sogar zum Ausfall des Messsystems aufgrund von Faserbruch oder zu kleinen Biegeradien führen. Die genaue Position und Ausrichtung der Sensoren ist jedoch zwingend erforderlich, da sie sich in der Regel in Bereichen befinden, die für die zuverlässige Überwachung der Struktur zwingend erforderlich sind. Faserverbundbauteile aus glasfaserverstärkten Materialien besitzen in der Regel nach dem Aushärteprozess ein transparentes Erscheinungsbild, somit kann die Lage und Ausrichtung der einzelnen Sensoren mittels Sichtprüfung und eingestreuten Laserlicht untersucht werden (**Bild 10**).



**Bild 10:** Applizierter Lichtwellenleiter auf einem Kunststoffliner (li.) und ausgehärteter Glasfaser-Druckbehälter mit eingestreutem Faserlicht (re.) [4]

Kohlefasern hingegen besitzen wesentlich höhere spezifische Eigenschaften als Glasfasern und sind daher zum Erreichen eines höchstmöglichen Leichtbaugrads prädestiniert für den Einsatz in lasttragenden Primärstrukturen. In Bezug auf die Überprüfung des integrierten Sensornetzwerks ist es hingegen bei diesem Werkstoff nachteilig, dass das innere der Komponente nicht mehr sichtbar ist. Der Verlauf der Sensorfaser ist daher nur mit zerstörungsfreien Prüfverfahren, wie beispielsweise Röntgenstrahlung oder Computertomographie zu erfassen (**Bild 11**).

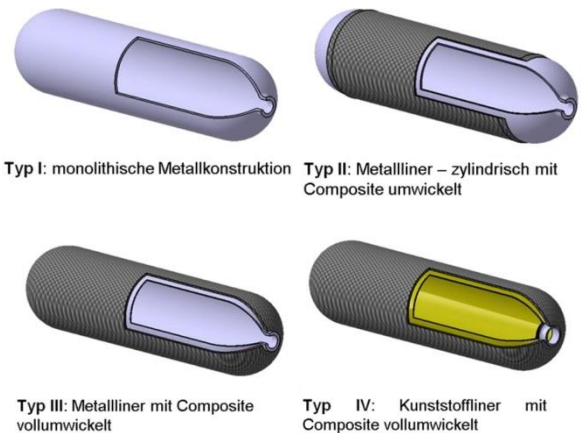


**Bild 11:** theoretische Ablage der Sensorfaser (li.) und CT-Aufnahme eines CFK-Bauteils mit realem Sensorfaserverlauf (re.) [4]

Die vorangegangenen Darstellungen zeigen deutlich, dass mit den beschriebenen Verfahren zur Applikation der Sensorfaser die theoretisch definierten Sensorpositionen nach dem Aushärten des Bauteils gewährleistet werden können und Belastungen im Fertigungsprozess von bis zu 10 bar standhalten.

#### 4 Potenziale von FBG – Sensoren in Wasserstoffbehältern

Wasserstoff wird im Allgemeinen als Energieträger der Zukunft angesehen und bildet der „Nationalen Wasserstoffstrategie“ der Bundesregierung zur Folge eine der entscheidenden Säulen zur Weiterentwicklung und Vollendung der Energiewende. Daraus resultierend stehen Druckbehälter aufgrund der aktuell steigenden Nachfrage und nach Lösungen zur Speicherung von Wasserstoff im allgemeinen Fokus der Forschung. Druckbehälter zur Speicherung von gasförmigem Wasserstoff werden nach aktuellem Stand der Technik für Nenndrücke bis zu 700 bar ausgelegt und anhand ihres Aufbaus charakterisiert. Während Druckbehälter des Typ-I bis Typ III aus einem metallischen Liner und teilweiser oder vollständiger Faserverbundumwicklung bestehen, sind Wasserstoffdruckspeicher des Typ-IV mit einem nichttragenden Kunststoffliner und vollständiger Composite-Ummantelung aufgebaut (**Bild 12**).



**Bild 12:** Klassifizierung von Druckbehältern [7]

Im Bereich der Mobilität kommen aus Gewichtsgründen fast ausschließlich Behälter vom Typ III und IV zum Ein-

satz. Diese werden in der Auslegungsphase mit Sicherheitsfaktoren von 2,35 versehen und besitzen in der Folge ein vergleichsweise hohes Bauteilgewicht. Um den Leichtbaugrad der Druckbehälter künftig weiter zu steigern und überflüssige Strukturmasse einzusparen, müssen die Auslastungsgrade der Laminatstrukturen signifikant erhöht und damit Sicherheitsfaktoren reduziert werden. Insbesondere in Mobilitätsanwendungen ist dieser Aspekt von großer Bedeutung, da somit die Reichweite bzw. die Nutzlast von Fahrzeugen gesteigert werden kann. An dieser Stelle setzt der Einsatz der permanenten Strukturüberwachung an und stellt aufgrund der bereits beschriebenen Vorteile eine effiziente Lösung dar. Bei gleichen Sicherheitsanforderungen für Typ IV Druckbehälter, ist dem KVB zufolge eine Herabsetzung des Sicherheitsfaktors auf 1,8 realistisch.

Für einen großserientauglichen Prozess bietet das automatisierte Nass-Wickelfahren zur reproduzierbaren Herstellung von Druckbehältern die wirtschaftlichste Methode. Die vom KVB entwickelte Technologie erlaubt es die Ablage der Sensorfaser direkt in den Fertigungsprozess zu integrieren und die Sensorfaser in den relevanten Belastungsrichtungen zu orientieren. Insbesondere steht dabei die Erfassung der Dehnungen in Faserrichtung im Vordergrund. Daher werden je nach Behältergröße bis zu 20 Sensoren pro Faserstrang entsprechend der Orientierung von Helix- und Radialwicklungen gleichmäßig über den Behälter verteilt, sodass der globale Belastungszustand überwacht werden kann.

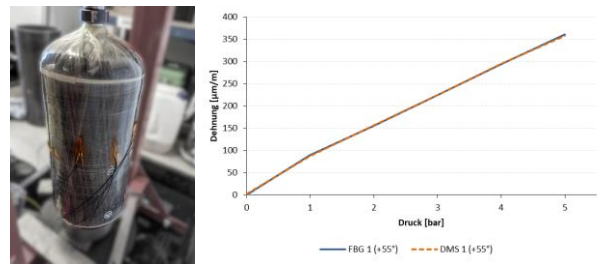


**Bild 13:** Druckbehälter mit 9 FBG-Sensoren [4]

Sollte ein Versagen der Struktur eintreten, ist die Lokalisierung der auftretenden Fehlstelle anhand der entsprechenden Sensorposition ohne erhöhten Aufwand durchführbar. Dies erspart gleichermaßen die zeit- und kostenintensiven Fehlersuche, da die Position bereits bekannt ist. Weiterhin dienen die FBG-Sensoren als Bindeglied zwischen dem realen und einem virtuellen Bauteil (digitaler Zwilling) wodurch der äußere Einfluss anhand der computergestützten Simulationen zustandsabhängig dargestellt und bewertet wird. Daraus resultierend besteht die Möglichkeit frühzeitig Maßnahmen (bedarfsgerechte Wartung) zur Vermeidung des Versagensfortschritts zu ergreifen und ein kollaterales Strukturversagen zu verhindern.

Vergleichsmessungen zwischen klassischen Dehnmessstreifen und den FBG Sensoren erbrachten in mehreren Versuchsreihen eine hervorragende Übereinstimmung der

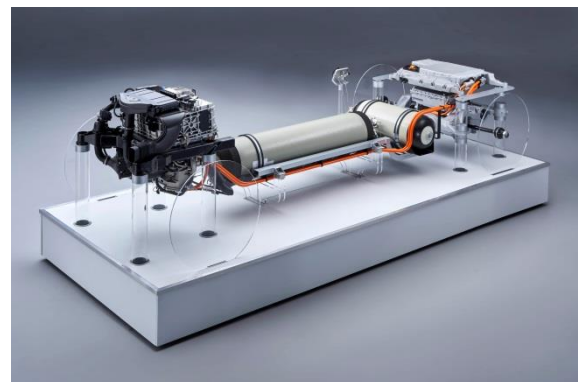
Messergebnisse wodurch der Nachweis der Funktionsfähigkeit grundlegend erbracht wurde (**Bild 14**).



**Bild 14:** Versuchsaufbau der Vergleichsmessung (li.) und exemplarisches Versuchsergebnis (re.) [4]

Neben der Dehnungserfassung des Bauteils im Betrieb erlaubt die Sensorik auch die Prozessüberwachung bei der Herstellung des Druckspeichers zur Gewährleistung hochwertiger Bauteilqualitäten. Dies beinhaltet beispielsweise die Bestimmung des Aushärtegrads des Matrixwerkstoffs, der Aushärtetemperatur, die Identifikation unzulässiger Faserondulationen im Wickelprozess, sowie die Aufzeichnung der durch den Herstellungsprozess eingebrachten Dehnungen. Durch die Kenntnis des genauen Eigenspannungszustandes, bedingt durch den Fertigungsprozess, erschließen sich weitere Potenziale zur Senkung der Kosten und Masse, da sie bereits während des Engineering-Prozesses berücksichtigt werden können.

Was die mögliche Masseinsparung für den PKW Bereich bedeutet, soll folgendes Beispiel exemplarisch grob skizzieren (**Bild 15**). Derzeit besitzen Personenkraftwagen mit Wasserstoffantrieb dem Stand der Technik zur Folge Druckspeicher mit einem Fassungsvermögen von 4 – 8 kg, was einem Volumen zwischen 100 l und 200 l gasförmigen H<sub>2</sub> bei einer Lagerung von 700 bar entspricht [8].



**Bild 15:** Aufbau Wasserstoffantrieb BMW i Hydrogen Next [9]

Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 2,35 beträgt somit das Behältergewicht ca. 55 kg bzw. 110 kg. Durch das integrierte Sensorsystem und der damit verbundenen Reduktion der Sicherheitsfaktoren können bis zu 25 kg Strukturgewicht allein durch den Wasserstoffspeicher eingespart werden. Daraus resultierende Sekun-

däreffekte, und damit einhergehende Erweiterung der Reichweite, finden hierbei keine Betrachtung. Blomberg NEF prognostiziert bis zum Jahr 2040 eine weltweite Flotte von 8,6 Millionen wasserstoffgetriebenen Fahrzeugen [10]. Bei der Annahme einer durchschnittlichen Gewichtseinsparung von 20 kg entspricht dies einer globalen Einsparung von 172 Mt von Faser- und Harzmaterial. Des Weiteren sinkt durch die Reduktion der benötigten Rohstoffe die Fertigungszeit der Behälter. Die Fertigungskosten bewegen sich hingegen auf einem etwas höheren Niveau, da die Komponenten der Sensorik noch verhältnismäßig hohe Kosten verursacht. Die fortschreitende Abnahme der Kosten für die Sensorik sollte diesen Nachteil bezogen auf die Fertigung in den kommenden Jahren aufheben. Über den Lebenszyklus gesehen werden sich die Mehrkosten des Behälters schon zum jetzigen Zeitpunkt amortisieren, da Wartungsintervalle bei gleichzeitiger Erhöhung der Lebensdauer drastisch minimiert werden können.

## 5 Weitere Anwendungsbeispiele

Die Integration von Faser-Bragg-Sensoren ist jedoch nicht nur auf den Einsatz von Wasserstoffdruckbehältern oder Druckbehältern im Allgemeinen beschränkt, sondern kann in allen lasttragenden Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen Anwendung finden. Mehrere repräsentative Bauteilstudien des KVB haben bereits die Prinziptauglichkeit der technologieabhängigen Integration der Sensorik nachgewiesen.

Ein großes Potenzial liegt dabei in der Bahnindustrie, die gegenwärtig vermehrt Primärstrukturen aus Faserverbundwerkstoffen entwickelt und zur Serienreife bringt. Insbesondere das Drehgestell, auf dem der Wagenkasten aufliegt, dient als Referenzprojekte der Strukturüberwachung (Bild 16).



**Bild 16:** Längsträger eines Drehgestellrahmens mit integrierten FBG-Sensoren in Prepreg-Autoklav Bauweise [4]

Als weitere Beispiele sind die Torsionsstabfeder des Drehgestells oder die Bugnase zur Detektion von Stein schlägen zu nennen.

Auch im Automobilbereich geht die Überwachung von Strukturbauteilen weit über das Monitoring von Wasserstoffspeichern hinaus. Grundsätzlich sind alle Fahrwerkskomponenten, bei denen der Einsatz von Verbundwerkstoffen sinnvoll ist, potenzielle Anwendungsfälle. Exemplarisch hat das KVB bereits erfolgreich einen Drei-

eckslenker mit FBG-Sensoren im RTM-Verfahren herstellen können (Bild 17).



**Bild 17:** Dreiecksquerlenker [4]

Weitere Anwendungsfelder ergeben sich im Maschinenbau, bei denen entweder hohe Genauigkeiten notwendig sind oder die Sicherheit der Umwelt zu gewährleisten ist. Hochpräzise Bearbeitungsmaschinen benötigen bei gleichzeitig hoher Dynamik, sehr steife Achsen, was den Einsatz von Faserverbundmaterialien unabdingbar macht. Sind die wirkenden Dehnungen der Achse im Bearbeitungsprozess bekannt, können beispielsweise steuerungs-technische Maßnahmen ergriffen werden, um die Präzision und Bauteilqualität weiter zu steigern. Ferner ist die Strukturüberwachung von großen Hydraulikzylindern, wie sie in Baumaschinen zum Einsatz kommen, zum Schutz des Bedieners zweckmäßig (Bild 18).



**Bild 18:** Maschinenachse einer CNC-Fräsmaschine und Hydraulikzylinder mit Strukturüberwachung [4]

Ein wesentlicher Vorteil der Sensorik liegt darin, dass in einem Lichtwellenleiter sowohl Sensoren zur Dehnungsmessung als auch zur Temperaturerfassung simultan genutzt und ausgewertet werden können. Daraus resultierend ist die Anwendung eines Sensors als Warnsystem im Brandfall denkbar und führt zu einer Funktionserweiterung des Messsystems.

## 6 Ausblick

Trotz des Nachweises für die Prinziptauglichkeit und der aufgezeigten Potenziale von FBG-Sensoren zur Strukturüberwachung von Faserverbundbauteilen gibt es noch eine Reihe Herausforderungen, die dem industriellen Einsatz entgegenstehen.

Da das Monitoring von Faserverbundkomponenten erst seit wenigen Jahren in den Fokus der Forschung getreten ist, fehlen nach wie vor Studien zum Langzeitverhalten

der Sensorik im Verbund. Darüber hinaus fallen bei der permanenten Strukturüberwachung eine große Menge Daten an, die es auszuwerten und zu verarbeiten gilt. Die aktuellen Softwarelösungen sind zumeist für Laboranwendungen ausgelegt, sodass in diesem Bereich nach wie vor ein hohes Entwicklungspotenzial besteht. Insbesondere die Interpretation der Messergebnisse und Rückschlüsse auf eventuell auftretende Schädigungsmechanismen des Verbundes sind bisher nicht weitreichend erfasst. Des Weiteren ist die stetige Weiterentwicklung hin zu kabellosen und autark arbeitenden Systemen und der Miniaturisierung der Auswerteeinheiten zwingend erforderlich. All den aufgeführten Themenstellungen stellt sich das KVB in Zusammenarbeit mit seinen Partnern in aktuellen und zukünftigen Forschungsprojekten, um den Einsatz von FBG-Sensoren zur Strukturüberwachung von Faser-verbundbauteilen im industriellen Umfeld mittelfristig zu ermöglichen.

## 7 Danksagung

Ein ausdrücklicher Dank gilt der EuroNorm GmbH für die Unterstützung der Finanzierung der bereits durchgeführten und derzeit laufenden Forschungsprojekte (MF 170057, MF 170114, MF 21033) im Rahmen des Förderprogramms Innovationskompetenz (INNO-KOM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Ohne diesen Beitrag wäre die erfolgreiche Bearbeitung der verschiedenen Themenstellungen nicht möglich gewesen.

## 8 Literatur

- [1] Y. Nathan, „Fundamentals of FBG optical sensing,“ *EngineerIT*, pp. 52-55, April 2011.
- [2] C. Li, W. Yang, M. Wang, X. Yu, J. Fan, Y. Xiong, Y. Yang und L. Li, „A Review of Coating Materials Used to Improve the Performance of Optical Fiber Sensors,“ *Sensors*, Bd. 20, Nr. 15, 29 Juli 2020.
- [3] A. Goldbacher, „Grundlagen der optischen Sensormessung mit Faser-Bragg-Gittern,“ *Elektronik messen+testen*, Nr. 2, pp. 35-37, 2010 März 2010.
- [4] Institut für Konstruktion und Verbundbauweisen KVB gGmbH.
- [5] J. M. López-Higuera, *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Michigan: Wiley, 2002.
- [6] J. Carrión und M. Frövel, „Extensive characterisation of the intrusiveness of Fibre Bragg Grating Sensors embedded in a carbon fibre reinforced polymer,“ in *European Workshop on Structural Health Monitoring*, Krakau, 2008.
- [7] F. Ruprecht, G. Kepplinger, F. Schmalhofer und S. Mohorko, *Vorgehensweise zur rechnergestützten Strukturoptimierung von faserverstärkten Hochdruckspeichern*, MAGNA STEYR AG & Co KG, 2013.
- [8] Shell Deutschland Oil GmbH, *Shell Wasserstoff Studie - Energie der Zukunft?*, Bd. 68, Hamburg, 2017, pp. 126-135.
- [9] Auto-Medienportal, *BMW i Hydrogen Next*, 2020.
- [10] Bloomberg NEF, *Elektric Vehicle Outlook 2021*, 2021.