

Schlussbericht

Projekt: smartVessel, Integration von faserbasierten Sensoren während der Herstellung von Wasserstofftanks zur intelligenten Zustandsüberwachung, Lebensdauervorhersage und -bewertung

Projektlaufzeit: 01.03.2020 – 31.01.2024

Förderkennzeichen: 03ETB015G

• Projektübersicht

1. Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsprojekts smartVessel ist es, die Wartungskosten von Wasserstofftanks zu reduzieren und die gesamte Lebensdauer dieser sicherheitsrelevanten Komponenten sicher zu nutzen. Dazu wird ein strukturelles Zustandsüberwachungssystem entwickelt, basierend durch den Einsatz von faseroptischen Sensoren, die während der Produktion in die Wasserstofftanks integriert werden. Die spezifischen Projektziele sind folgendermaßen festgelegt:

- Analyse des mechanischen Verhaltens des Verbundwerkstoffs und Auslegung eines Druckbehälters aus Verbundwerkstoff einschließlich eines Lösungsansatzes zur Sensorpositionierung
- Auswahl des faseroptischen Sensors und Ansatz zur Sensorintegration beim Wickelverfahren zur Behälterherstellung
- Bewertung des Einflusses der integrierten Sensoren auf die Mikrostruktur und das mechanische Verhalten des Faserverbundwerkstoffs
- Entwicklung eines Ansatzes zur Instrumentierung von im Wickelverfahren hergestellten Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen
- Technologievorführung zur verteilten Dehnungsmessung unter simulierten Lastbedingungen bei hydraulischen Prüfungen an instrumentierten Druckbehältern
- Entwicklung eines Zustandsüberwachungsalgorithmus basierend auf der Kombination von FE-Analyse und experimentellen Dehnungsmessungen aus hydraulischen Prüfungen an instrumentierten Druckbehältern

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Um die angestrebten Ziele zu erreichen, wurde ein Konsortium aus 5 deutschen Unternehmen, 2 Forschungseinrichtungen und 3 großen Unternehmen, die als Berater auftreten, zusammengestellt. Die Mitglieder des Konsortiums und ihre spezifischen Kompetenzen, die für das Projekt relevant sind, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. smartVessel-Konsortium und Kompetenzen.

Partner	Beteiligung	Kompetenz
Kümpers	aktiver Partner	Faserverstärkungsmaterial (Tow-preg)
Simpatec	aktiver Partner	Mechanische Analyse und Auslegung von Komponenten aus Faserverbundwerkstoffen
Heracle	aktiver Partner	Faseroptische Sensoren

FibrisTerre	aktiver Partner	Messtechnik für faseroptische Messungen
Wölfel	aktiver Partner	Ingenieurdienstleistungen, Mess- und Monitoring-Produkten
Fraunhofer IPT	aktiver Partner	Entwicklung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen und Instrumentierung
ITA RWTH Aachen	aktiver Partner	Entwicklung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen und Instrumentierung
AirLiquide	Berater	Lieferant von Wasserstoff und Prüfung von Druckbehältern
Volkswagen	Berater	Automobilindustrie
Evonik	Berater	Faserverstärkungsmaterial

Die allgemeinen Anforderungen an die Auslegung und Fertigung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen sowie eine Zusammenfassung des aktuellen Stands der Technik zur Instandhaltung von Druckbehältern und der Prüfplan sind beigefügt (Anhang 1, Projektanforderungen).

Die Instrumentierung der Druckbehälter umfasste die Auswahl geeigneter faseroptischer Sensoren und die Entwicklung eines robusten und reproduzierbaren Ansatzes für die prozessbegleitende Sensorintegration bei der Behälterherstellung. Außerdem wurde der Einfluss der Sensorintegration auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs bewertet. Darüber hinaus wurde die Fähigkeit der integrierten Sensoren zur Dehnungsüberwachung unter verschiedenen Lastbedingungen untersucht. Schließlich wurden hydraulische Versuche mit gleichzeitiger Dehnungsüberwachung durchgeführt, um die Fähigkeit der entwickelten Technologie zur Überwachung des Schadensverlaufs und des Versagens zu demonstrieren.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde gemäß dem Arbeitsplan in der folgenden Abbildung 1 durchgeführt.

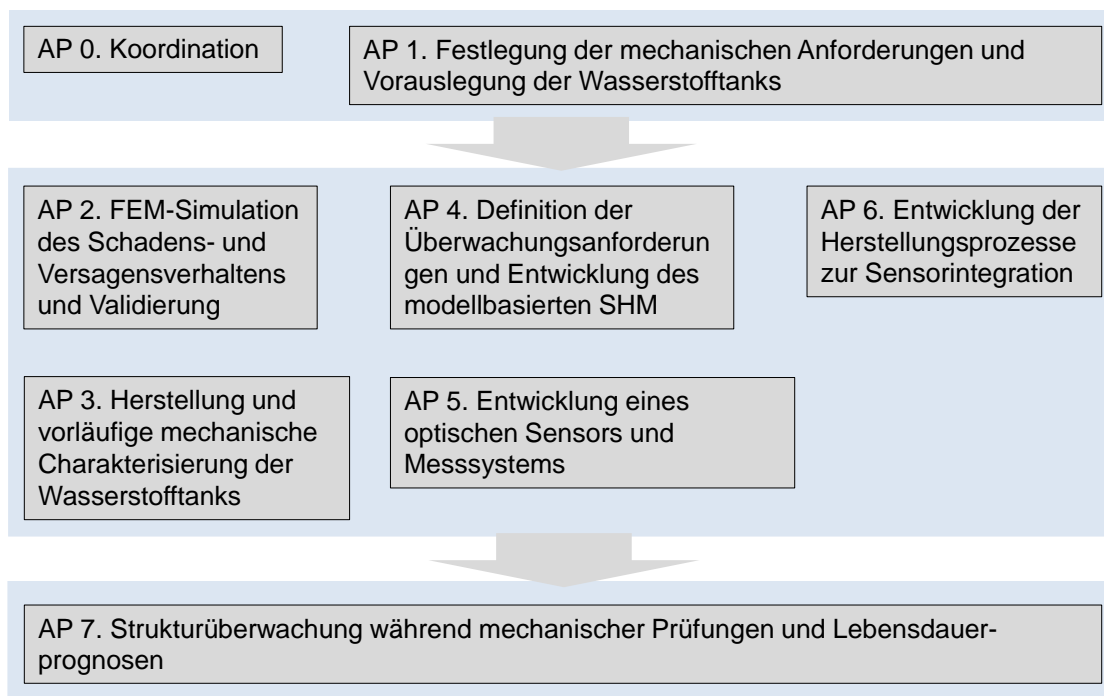


Abbildung 1. Arbeitsplan im Vorhaben smartVessel.

sind es derzeit 80. Außerdem wird Wasserstoff derzeit aus fossilen Brennstoffen wie Gas hergestellt, einer nicht erneuerbaren Erzeugungstechnik.

Was den Transport von Wasserstoff von den Produktionsstandorten zu den Tankstellen anbelangt, hat sich gezeigt, dass mittelfristig und bei geringem Marktanteil der Transport in Druckbehältern in LKWs die kostengünstigste Option ist. Langfristig würde der Transport in Pipelines zu einer rentablen Lösung werden, wenn wasserstoffbetriebene Fahrzeuge einen Marktanteil von 10 % erreichen [1]. Obwohl Pipelines als die kosteneffizienteste Option für den Transport über größere Entfernungen und für große Mengen ermittelt wurden, sind dafür hohe Kapitalinvestitionen, lange Bauzeiten und ein komplexer rechtlicher Hintergrund erforderlich, was ihren Einsatz in nächster Zukunft verhindern könnte.

Hinsichtlich der Instrumentierung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen zur Wasserstoffspeicherung mit faseroptischen Sensoren zur Dehnungsüberwachung, [4] stellt eine Instrumentierungsmethode vor, bei der die optischen Fasern auf die Außenfläche des Tanks geklebt werden (s. Abbildung 3). Hier wurde eine Single-Mode SM1500 PI-beschichtete optische Faser eingesetzt (6,4/125 μm). Es wurde berichtet, dass die Verklebung der Fasern auf der Oberfläche des Behälters eine schnelle und einfache Methode für die Instrumentierung der Behälter ist; die Sensoren liefern jedoch keine Angaben über den inneren Belastungszustand des Laminats und sind anfällig für Ablösungen und Schäden. Die Dehnungsprofile zeigten eine gute Korrelation zwischen angewandtem Druck (bis zu 800 bar), der schrittweise aufgebracht wurde, und Dehnungsmessungen (60.000 $\mu\text{m}/\text{m}$). In Lastwechselversuchen wurde die Dehnungsentwicklung bis zu 22.000 Lastzyklen überwacht, anschließend versagte der Behälter durch Leckage.

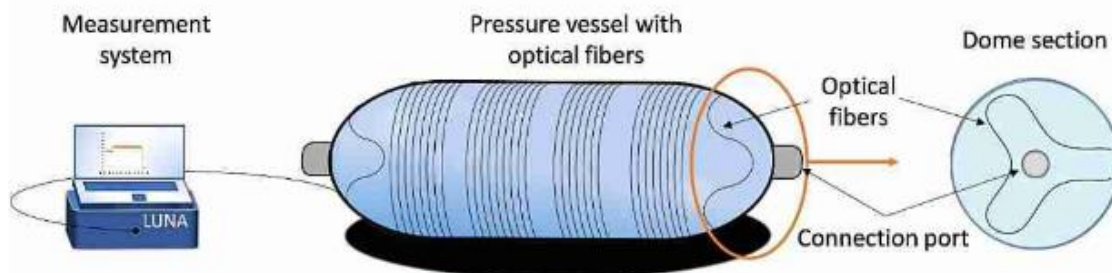


Abbildung 3. Schematische Darstellung eines Druckbehälters aus Verbundwerkstoff mit um den zylindrischen Teil gewickelten optischen Faserschichten. In den Dombereichen sind die optischen Fasern wie rechts abgebildet angeordnet [4].

[5] berichtete über die Instrumentierung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen mit einer Single-Mode SM 1500 PI-beschichteten optischen Faser (4,2/80/97 μm) (s. Abbildung 4). hier wurden die optischen Fasern in definierte Lagen des Laminats beim Wickelprozess integriert. es wurden keine weiteren Angaben zum Herstellungsprozess angegeben. es wurde eine Überlebensrate des Sensors von ca. 50 % aufgrund von Faserschädigungen an den Eintritts-/Austrittspunkten aus dem Laminat berichtet. in Lastwechseltests wurde die Dehnungsentwicklung bis zu 20.000 Zyklen überwacht, wonach die Faser am Eintrittspunkt versagte.

Nach unserem Kenntnisstand gibt es in der Literatur keinen robusten und reproduzierbaren Ansatz für die Instrumentierung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen für die Wasserstoffspeicherung mit faseroptischen Sensoren zur Überwachung von Dehnungen und Fehlern.



Abbildung 4. Druckbehälter aus Verbundwerkstoff mit akustischen Sensoren und optischen Fasern, der in der hydraulischen Innendruck-Zyklusmaschine eingebaut ist [5].

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Hydraulische Prüfungen an instrumentierten Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen mit gleichzeitiger Dehnungsüberwachung durch integrierte Sensoren wurden bei der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) durchgeführt. Zusätzlich zu ihrer Rolle als Berater wurden zusätzliche hydraulische Prüfungen (im Unterauftrag) bei AirLiquide durchgeführt.

• **Projektergebnisse**

Der folgende Abschnitt enthält eine detaillierte Beschreibung der gewonnenen Projektergebnisse und ihrer Bedeutung im Hinblick auf die zuvor dargestellten spezifischen Projektziele. Die Arbeitspakete, in denen diese Ziele bearbeitet wurden, werden herausgestellt.

• **Analyse des mechanischen Verhaltens des Verbundwerkstoffs und Auslegung eines Druckbehälters aus Verbundwerkstoff einschließlich eines Lösungsansatzes zur Sensorpositionierung (AP1, AP2)**

Die mechanischen Eigenschaften des duroplastischen Verbundwerkstoffs wurden durch das ITA experimentell charakterisiert, damit ein Materialmodell erstellt und kalibriert werden konnte. Die Ergebnisse der experimentellen Materialcharakterisierung sind in der Tabelle 2 aufgelistet. Der Aufbau des FE-Modells des Druckbehälters und ausgewählte Ergebnisse der durch Simpathec durchgeführten strukturmechanischen Analyse (Hauptspannungsverteilung über das Verbundwerkstoff) sind in Abbildung 5 dargestellt. Das zuvor kalibrierte Materialmodell wurde auf den Zylindrischen und Dombereich des Druckbehälters aufgebracht.

Tabelle 2. Experimentell durchgeführte mechanische Prüfungen am duroplastischen Verbundwerkstoff und Werte der entsprechenden mechanischen Eigenschaften.

Prüfungen	Mechanische Eigenschaften von Verbundwerkstoffen	Prüfungen	Mechanische Eigenschaften von Verbundwerkstoffen
Tensile test 0°	E = 143,97 GPa σ max = 2.411,75 MPa ε max = 1,71 % ν12 = 0,27	Compression test 90°	E = 11,29 GPa σ max = 131,95 MPa ε max = 1,16 %
Tensile test 90°	E = 7,45 GPa σ max = 32,06 MPa ε max = 0,42 %	Shear tests	G12 = 3,50 GPa F12 (0,2%) = 33,35 MPa F12, max. Scherung = 44,13 MPa max. Scherdehnung für F12 = 2,00 %
Compression test 0°	E = 139,11 GPa σ max = 1.080,90 MPa ε max = 0,76 %		

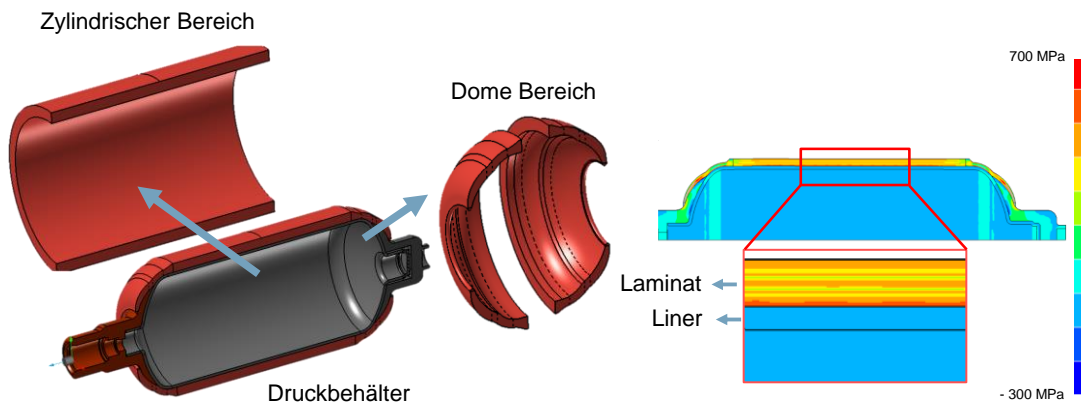


Abbildung 5. Links: Übersicht der verschiedenen Abschnitte des Mehrkörper-Modells des Druckbehälters. Das Verbundwerkstoff ist entsprechend der Verstärkungsorientierung in einen zylindrischen Bereich und zwei Dombereiche aufgeteilt. Rechts: Hauptspannungsverteilung über das Verbundwerkstoff im zylindrischen Bereich des Druckbehälters.

Analog wurden am Fraunhofer IPT Probenkörper zur Materialcharakterisierung aus thermoplastischem unidirektional verstärktem Tapematerial hergestellt. Dazu wurden zunächst Platten mit dem laserunterstützten Tapelegeverfahren hergestellt, wobei die PA12/CF-Tapes von Evonik unidirektional, d. h. mit gleichbleibender Faserorientierung neben- und übereinandern abgelegt wurden, bis die angestrebte Probendicke übertroffen wurde. Anschließend wurden die Probenkörper mittels Wasserstrahlschneiden aus den Laminaten herausgetrennt, die einzelnen Prüfkörper im Nachgang auf Maß geschliffen und mit Kraffteinleitungsplatten entsprechend der angewandten Normen versehen.

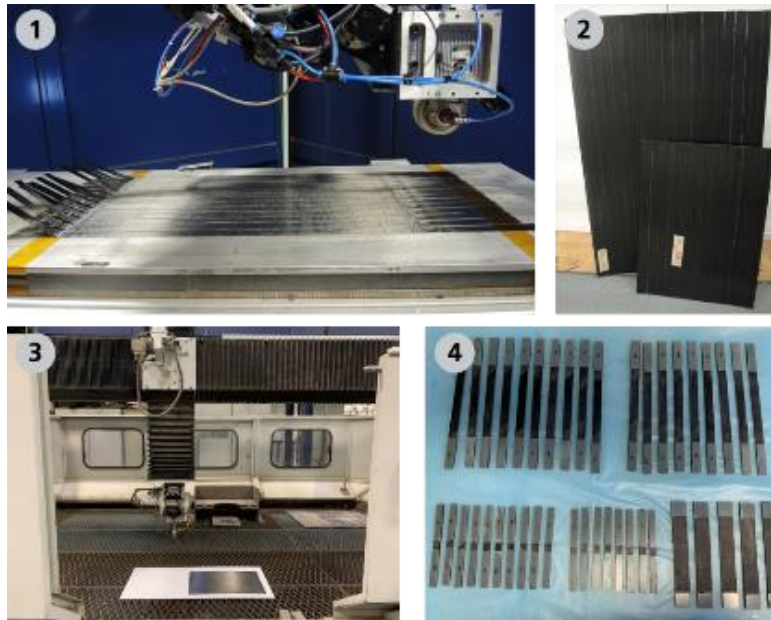


Abbildung 6: Herstellung der UD-Lamine im laserunterstützten Tapelegen am Fraunhofer IPT (1); fertige Lamine mit vorgegebener Geometrie (2); Heraustrrennen der Probekörper mittels Wasserstrahlschneiden (3); Probenkörper mit verklebten Kraffteinleitungsplatten (4).

Die Materialcharakterisierung mittels Zug-, Druck- und Scherversuchen erfolgte wiederum am ITA. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Experimentell durchgeführte mechanische Prüfungen am thermoplastischen Verbundwerkstoff und Werte der entsprechenden mechanischen Eigenschaften.

Prüfungen	Mechanische Eigenschaften von Verbundwerkstoffen	Prüfungen	Mechanische Eigenschaften von Verbundwerkstoffen
Tensile test 0°	E = 86,9 GPa σ max = 686,89 MPa ϵ max = 0,76 %	Compression test 90°	E = 37,61 MPa σ max = 66,3 MPa ϵ max = 4,63 %
Tensile test 90°	E = 3,41 GPa σ max = 29,66 MPa ϵ max = 1 %		
Compression test 0°	E = 760,64 MPa σ max = 435 MPa ϵ max = 0,656 %		

Die Rohdaten der Versuche und die Fotos der gebrochenen Versuchsproben wurden dem Projektpartner SimpaTec zur Verfügung gestellt. Um daraus eine aggregierte Masterkurve herzuleiten, die das Materialverhalten für die Zwecke der Simulation beschreiben wird.

Die Tabelle 4 enthält die in der FE-Analyse untersuchten Konfigurationen des Lageaufbaus für den ITA-Tank. Eine Optimierung des Lageaufbaus wurde unter Berücksichtigung der Laminatsteifigkeit als Auswahlkriterium durchgeführt. Hier wurde der Lageaufbau mit der Konfiguration V5 ausgewählt, da er die besten mechanischen Eigenschaften hinsichtlich der Laminatsteifigkeit aufweist. Wie im Detail des Querschnitts des Verbundwerkstoffs, der die Spannungsverteilung zeigt, erkennbar ist, entwickeln sich die maximalen Hauptspannungen auf der Innenseite des Laminats und hauptsächlich in Umfangsrichtung. Die faseroptischen Sensoren werden im Laminat positioniert, um die Dehnung aufzunehmen, die durch diese maximalen Spannungen entsteht. Die Tabelle 4 stellt die Sensorpositionierung in der ausgewählten Lageaufbau dar.

Tabelle 4. Bezeichnung der unterschiedlichen geprüften Lageaufbauten und der entsprechenden Verstärkungsorientierungen im zylindrischen Bereich (Zyl) und im Dombereich (Dom) des Druckbehälters.

Bezeichnung	Lageaufbau
V1 - Zyl	[89/-89/89/15/-15/15/55/-55/55/-55/55/-55/15/-15/15/89/-89/89]
V1 - Dom	[15/-15/15/55/-55/55/-55/55/-55/15/-15/15]
V2 - Zyl	[89/-89/89/-89/15/-15/15/55/-55/55/-55/15/-15/15/-89/89/-89/89]
V2 - Dom	[15/-15/15/55/-55/55/-55/15/-15/15]
V3 - Zyl	[89/-89/89/15/-15/15/45/-45/45/-45/45/-45/15/-15/15/89/-89/89]
V3 - Dom	[15/-15/15/45/-45/45/-45/45/-45/15/-15/15]
V4 - Zyl	[89/-89/89/-89/30/-30/30/55/-55/55/-55/30/-30/30/-89/89/-89/89]
V4 - Dom	[30/-30/30/55/-55/55/-55/30/-30/30]
V5 - Zyl	[89/-89/89/-89/15/-15/15/70/-70/70/-70/15/-15/15/-89/89/-89/89]
V5 - Dom	[15/-15/15/70/-70/70/-70/15/-15/15]
V6 - Zyl	[89/-89/89/-89/70/-70/70/15/-15/15/-15/70/-70/70/-89/89/-89/89]
V6 - Dom	[70/-70/70/15/-15/15/-15/70/-70/70]
V7 - Zyl	[89/-89/89/-89/60/-60/60/15/-15/15/-15/60/-60/60/-89/89/-89/89]
V7 - Dom	[60/-60/60/15/-15/15/-15/60/-60/60]

Tabelle 5. Schematische Darstellung des Lageaufbaus und Definition der Sensorplatzierung.

Lage	Winkel [Zylindrischer Bereich]	Winkel [Dombereich]
1	+89	
2	-89	
3	+89	
4	-89	
5	+15	+15
6	-15	-15
7	+15	+15
8	+70	+70
9	-70	-70
10	+70	+70
11	-70	-70
12	+15	+15
13	-15	-15
14	+15	+15
15	+89	
16	-89	
17	+89	
18	-89	

Anbringung
der Sensorik

Anbringung
der Sensorik

Das FE-Modell, einschließlich des kalibrierten Materialmodells des Faserverbundwerkstoffs, ermöglichte die Dehnungs-/Spannungsanalyse und die Untersuchung des Versagensmodus des Druckbehälters. Die implementierte strukturmechanische Analyse ermöglichte die Festlegung des Lageaufbaus unter Verwendung der Laminatsteifigkeit als Auswahlkriterium. Die Sensorpositionierung wurde unter Berücksichtigung von maximalen Dehnungen in Umfangsrichtung im Dombereich des Druckbehälters definiert.

Basierend auf dem Design des ITAs hat das Fraunhofer IPT ein für das in-situ Tapelegen angepasstes Tankdesign hergeleitet. Aufgrund des aktuellen Systems am Fraunhofer IPT gibt es Restriktionen welche Wickelwinkel bei welchen Polaröffnungen erreichbar sind. Darüber hinaus gibt Restriktionen für den minimalen erreichbaren Wickelwinkel und minimalen erreichbaren Durchmesser der Polaröffnung, was jeweils 22° und 95 mm beträgt. Um aus dem ITA-Tankdesign das präliminäre IPT-Tankdesign herzuleiten, wurde der Querschnitt des Tapematerials berücksichtigt und die Anzahl der notwendigen Laminat-Lagen angepasst. Das präliminäre Tankdesign, was dem Projektpartner SimpaTec zur Verfügung gestellt wurde, ist in der Abbildung 7 aufgeführt.

Umfangslage 89,1°		Kreuzlage 22°		Kreuzlage 55°	
Lage No.	Wickelwinkel [°]	Lage No.	Wickelwinkel [°]	Lage No.	Wickelwinkel [°]
1	89,1	17	55		
2	-89,1	18	-55		
3	89,1	19	89,1		
4	-89,1	20	-89,1		
5	22	21	22		
6	-22	22	-22		
7	55	23	55		
8	-55	24	-55		
9	55	25	55		
10	-55	26	-55		
11	22	27	22		
12	-22	28	-22		
13	89,1	29	89,1		
14	-89,1	30	-89,1		
15	22	31	89,1		
16	-22	32	-89,1		

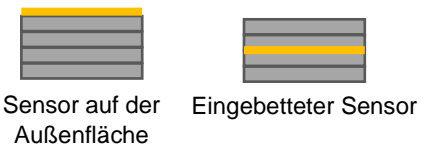
Abbildung 7: Fraunhofer IPT Tankdesign.

- Auswahl des faseroptischen Sensors und Ansatz zur Sensorintegration beim Wickelverfahren zur Behälterherstellung (AP5, AP6)**

Singlemode-optische Fasern, die von Heracle entwickelt wurden, wurden zunächst in Prüfkörpern aus Verbundwerkstoffen für verteilte faseroptische Messungen geprüft. Es wurden Sensoren mit zwei Durchmessern untersucht: 100 µm und 155 µm. Zwei Faserbeschichtungen wurden untersucht: Polyimid (PI) und Hochtemperatur-Acrylat (HTA). Die Sensoren wurden entweder auf

der Oberfläche angebracht oder in den Verbundstoff eingebettet. Die Eigenschaften der Sensoren sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Zylindrische Prüfkörper (Durchmesser = 130 mm, Länge = 220 mm), die mit Sensoren ausgestattet waren, wurden zur Bewertung des Sensorverhaltens hergestellt (s. Abbildung 8). Die optische Zeitbereichsreflektometrie (*optical time domain reflectometry*, OTDR) wurde zur Bewertung des Sensorverhaltens eingesetzt; sie ermöglicht die quantitative Bewertung des Signalintensitätsverlusts entlang der Sensorlänge, z. B. aufgrund von Mikro- und Makrokrümmung, und die Erkennung von Sensorversagen. Eine OTDR-Messkurve, welche eine glatte Linie im Abschnitt der integrierten Faser darstellt, weist auf eine geringe Lichtstreuung hin, was wiederum darauf hindeutet, dass der Sensor ohne unerwünschte Krümmung angebracht ist.

Tabelle 6. Parameter der faseroptischen Sensoren und der Sensorpositionierung, die bei der Sensorauswahl berücksichtigt werden.

Abmessungen der Faser - Kern/Mantel/Außendurchmesser [μm]	Sensor Positionierung
<ul style="list-style-type: none"> • Miniaturisierte Faser: 9/80/100 • Standard-Faser: 9/125/155 	
Beschichtungsmaterial	
<ul style="list-style-type: none"> • Polyimid (PI). E = 2.4 GPa • Hochtemperatur-Acrylat (HTA). E = ca. 5 MPa 	

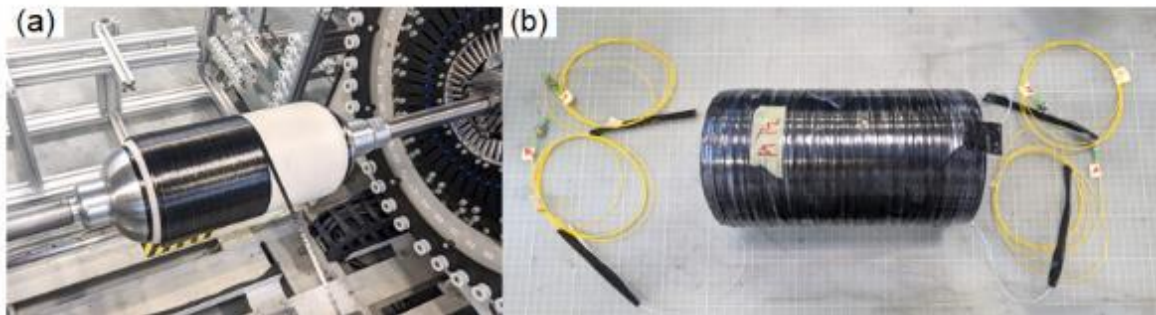


Abbildung 8. (a) Polymer-Liner mit eingebauten metallischen Ventilen und Bossen bei der Aufwicklung von Carbonfaser-Tow-Pregs in Umfangsrichtung. (b) Zylindrischer Prüfkörper ausgestattet mit faseroptischen Sensoren zur Bewertung des Sensorverhaltens.

Abbildung 5 stellt OTDR-Messkurve der faseroptischen Sensoren zur Bewertung des Sensorverhaltens dar. Die eingebetteten Sensoren entsprechen dem Abschnitt zwischen 10 - 35 m. Wie in Abbildung 9(b) zu sehen ist, ermöglichte der HTA-beschichtete Sensor die Sensorintegration in das Laminat ohne wesentlichen Signalintensitätsverlust. Der PI-beschichtete Sensor hat sich aufgrund seiner höheren Steifigkeit als anfälliger für Mikrokrümmungen beim Wickelvorgang und nach der Konsolidierung erwiesen (Abbildung 9(a)). Aufgrund des zufriedenstellenden Sensorverhaltens des HTA-beschichteten Sensors bei der Integration in das Verbundwerkstoff wurde dieser zur Instrumentierung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen ausgewählt.

Um die Sensorintegration zu vereinfachen, wurden von Kümpers Tow-Pregs mit integrierten faseroptischen Sensoren entwickelt (Abbildung 10). Diese Innovation ermöglicht die Sensorintegration in bestimmte Lagen beim Multifilament-Wickelprozess, ohne dass wesentliche Anpassungen am Wickelprozess bzw. an der Anlage vorgenommen werden müssen.

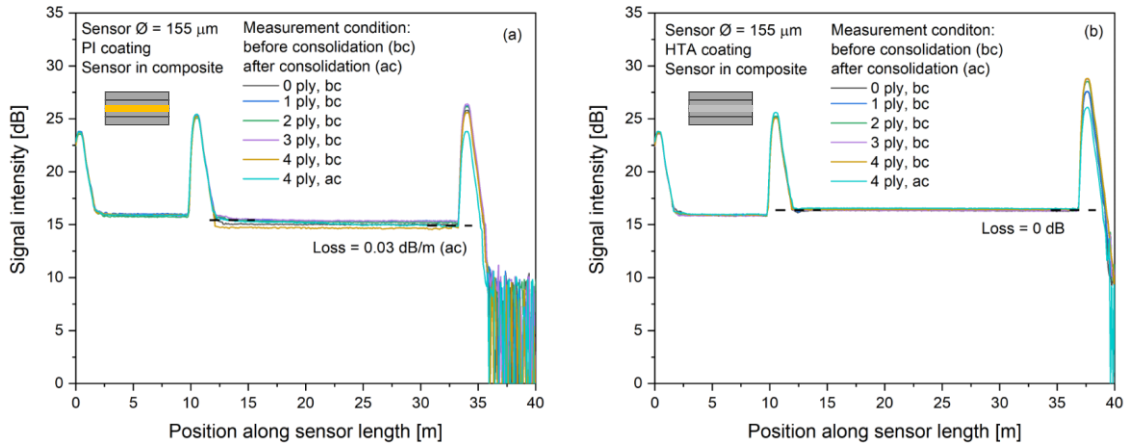


Abbildung 9. OTDR-Messkurven vom in Verbundwerkstoff eingebetteten Sensor; Sensordurchmesser = 155 µm; Sensorbeschichtung: (a) PI, (b) HTA.

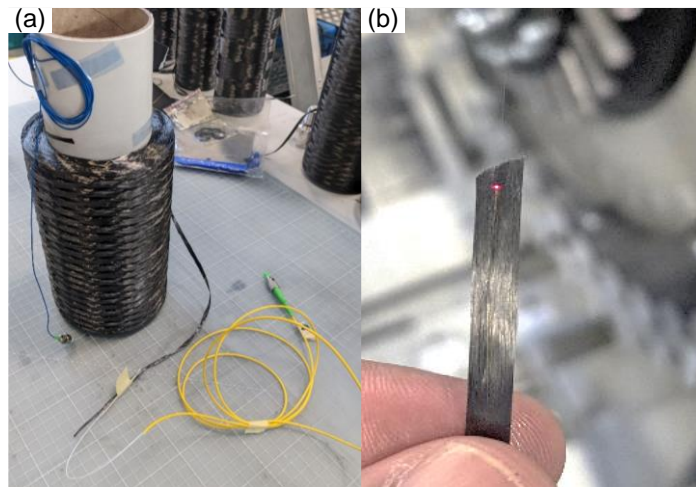


Abbildung 10. (a) Spule von Carbonfaser (Toray T700) mit integriertem faseroptischem Sensor. (b) Faseroptischer Sensor auf dem Tow-Preg.

Die geeignete Auswahl des faseroptischen Sensors zusammen mit dem Einsatz von Carbonfaser Tow-Pregs mit faseroptischen Sensoren ermöglichte die prozessbegleitende Sensorintegration in den Multifilament-Wickelverfahren ohne Verluste bei der Signalintensität.

Am Fraunhofer IPT wurden in ersten Versuchen Rohrkörper mit integrierter Sensorfaser, welche von der Fa. Heracle GmbH zur Verfügung gestellt wurde, hergestellt. Die Rohrgeometrie wurde so gewählt, dass eine Ähnlichkeit zu den später hergestellten Druckbehältern gewährleistet ist. Die im Umfangwickeln applizierten Tapes wurden mit einer geringen Lücke von < 1 mm hergestellt, in welche der Sensor manuell nach Vollendung einer Lage eingelegt wurde. Das Schema des Herstellungsverfahrens sowie die hergestellten Rohrkörper sind in Abbildung 11 abgebildet. Hierbei wurden zum einen große kontinuierliche Sensorlängen von ca. 50 m (Proben PA1 und PA2) und zum anderen mehrere Sensorfasern mit Längen zwischen 10 und 30 m (Proben P_B1 und PB2) integriert. Die Proben wurden zunächst an Heracle versendet, wo die Funktionsfähigkeit der Sensoren positiv begutachtet wurde. Anschließend wurden die Proben zur Fa. fibrisTerre GmbH gesendet, um die Messwerte bei Auslesen der Sensoren zu bewerten.

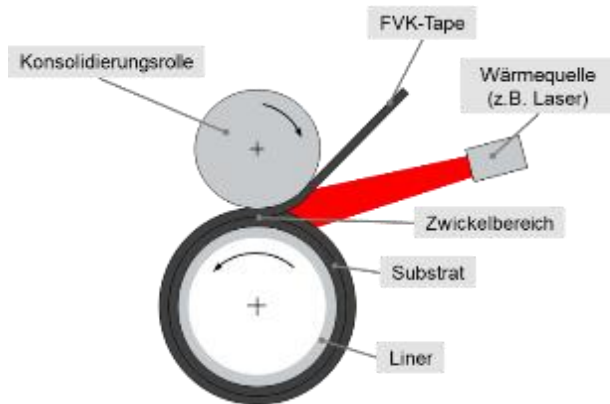


Abbildung 11: Schema des laserunterstützten Tapewickels (links) und hergestellte Rohrkörper mit integrierter Sensorfaser (rechts).

Aus den Messergebnissen wurde geschlossen, dass größere Faserlängen um die 50 Meter für einen validen Eindruck der optischen Verluste innerhalb der Sensorfasern vorteilhaft sind. Die hergestellten Rohrproben galten grundsätzlich als gelungener Proof of Concept, zeigten jedoch auch Verbesserungspotential hinsichtlich der Vermeidung optischer Verluste sowie unerwünschter Fluktuationen der Dehnung innerhalb der optischen Faser auf. Laut Aussage des Projektpartners fibrisTerre lassen sich derartige optische Verluste am ehesten auf enge Biegeradien, etwa an Kreuzungspunkten zweier optischer Fasern oder engen Umlenkungen zurückführen. Da der Prozess des Rohrwickels bis auf Start- und Stopp-Vorgänge als stationär mit gleichmäßigen Prozessparametern bewertet werden kann, wird angenommen, dass die Fluktuationen durch den manuellen Umwickel- und Integrationsvorgang der Fasern hervorgerufen wurden. Außerdem wird angenommen, dass insbesondere bei der Umlenkung der Fasern zwischen zwei Lagen lokale Belastungen aufgetreten sind, die sich in dem Messsignal der Sensorfaser zeigen. Während der Herstellung der Rohrproben hat sich darüber hinaus die Handhabung der Sensorfaser als herausfordernd dargestellt, da es mehrmals bei der Umspulung zum Faserbruch kam.

- **Bewertung des Einflusses der integrierten Sensoren auf die Mikrostruktur und das mechanische Verhalten des Faserverbundwerkstoffs (AP2, AP6)**

Um diese Zielsetzung zu erreichen, wurden flache Prüfkörper aus Verbundwerkstoff, die mit dem zuvor ausgewählten Sensor ausgestattet waren, hergestellt und unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen bei gleichzeitiger Dehnungsüberwachung über die integrierten Sensoren eingesetzt. Der entwickelte Ansatz zur Herstellung der instrumentierten Prüfkörper ist in Abbildung 12 dargestellt.

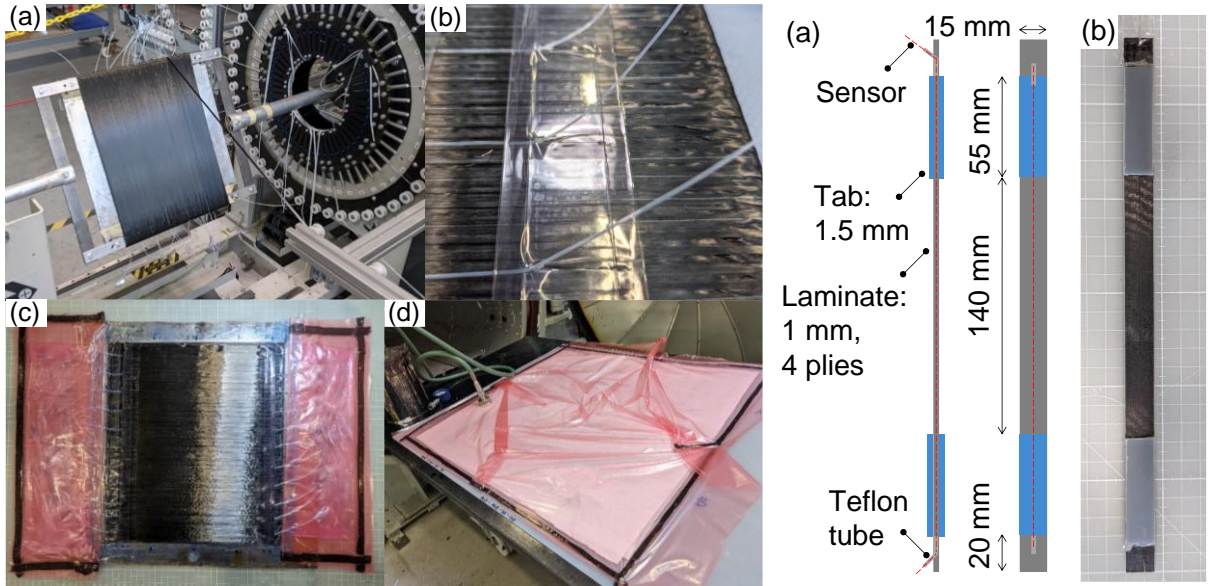


Abbildung 12. Links: Herstellung von Prüfkörpern (a) Aufwickeln von Carbonfaser und Sensor auf die Platte, (b) Anbringung des Schlauches, (c) Vakuummolie um die Sensoren, (d) Vakuummolie um die Platte. Rechts: Probekörper für quasi-statische Zugversuche. (a) Abmessungen und (b) Fotografie eines fertigen Probekörpers.

Die Mikrostruktur des Verbundwerkstoffs mit eingebettetem Sensor ist in Abbildung 13 dargestellt. Im Querschnitt ist eine gleichmäßige Konsolidierung um den Sensor herum zu erkennen (Abbildung 13(a)), was zu erwarten war, da die Sensoren parallel zu den Verstärkungsfasern angeordnet wurden. Darüber hinaus wird im Längsschnitt eine gute Ausrichtung des Sensors zu den Verstärkungsfasern festgestellt (Abbildung 13(b)).

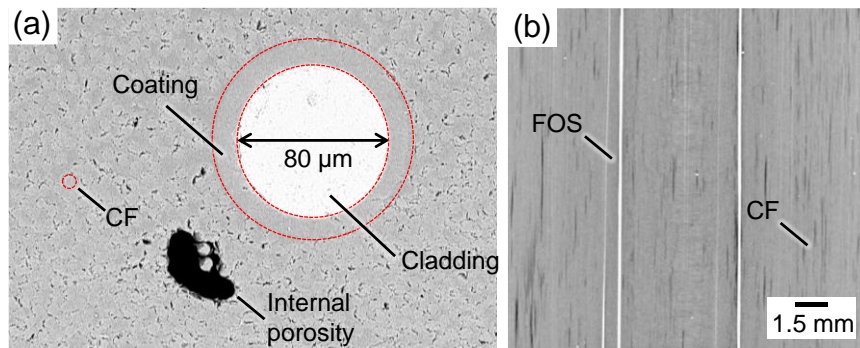


Abbildung 13. Mikrostruktur des Verbundwerkstoffs mit eingebettetem faseroptischem Sensor: 80 µm Mantel-Durchmesser, 100 µm Außendurchmesser, HTA-Beschichtung. CF = Carbonfaser. (a) REM-Aufnahme des Querschnitts. (b) CT-Aufnahme des Längsschnitts.

Die Ergebnisse der verteilten Dehnungsmessung in Prüfkörpern aus Verbundwerkstoff bei der Durchführung von Zug- und Druckversuchen sind in Abbildung 14 dargestellt. Hier wurde eine gute Korrelation zwischen den aufgetragenen Belastungen und den gemessenen Dehnungen über die integrierten optischen Fasern erreicht. Die Dehnungsmessungen über die optischen Fasern wurden durch zusätzliche Methoden validiert. Die optische Frequenzbereichsreflektometrie (*optical frequency domain reflectometry*, OFDR) wurde vom Fraunhofer IPT zur verteilten Dehnungsmessung eingesetzt.

Die mechanische Leistung der instrumentierten Verbundwerkstoffe im Vergleich zu Proben ohne Sensoren ist in Abbildung 15 zusammengefasst. Hierbei ist zu erkennen, dass die Integration der faseroptischen Sensoren die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs (gemessen in quasistatischen Zug- und Druckversuchen) nicht wesentlich beeinträchtigt hat. Der faseroptische Sensor wurde in der getesteten Konfiguration parallel zu den Verstärkungsfasern angebracht.

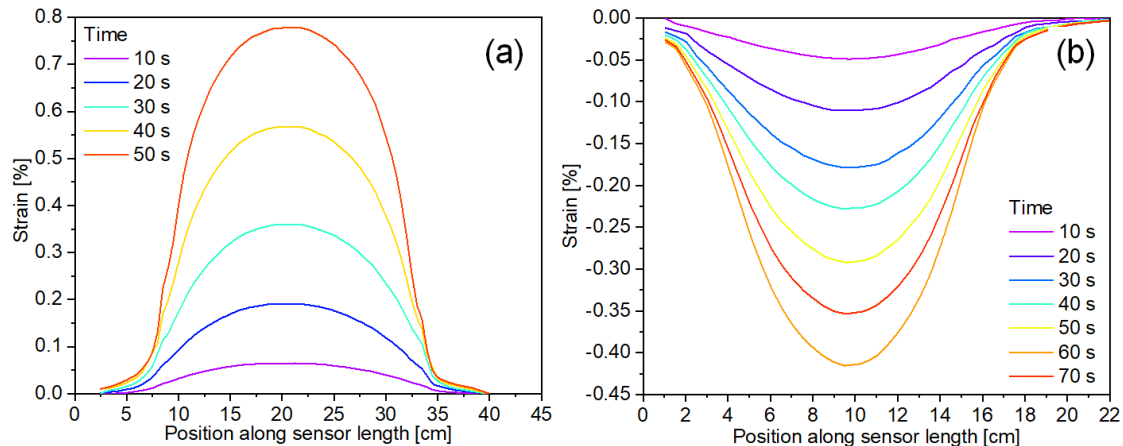


Abbildung 14. Verteilte Dehnungsmessungen im Verbundwerkstoff durch integrierte Sensoren mittels OFDR bei der Durchführung von mechanischen Prüfungen: (a) Zug- und (b) Druckprüfungen.

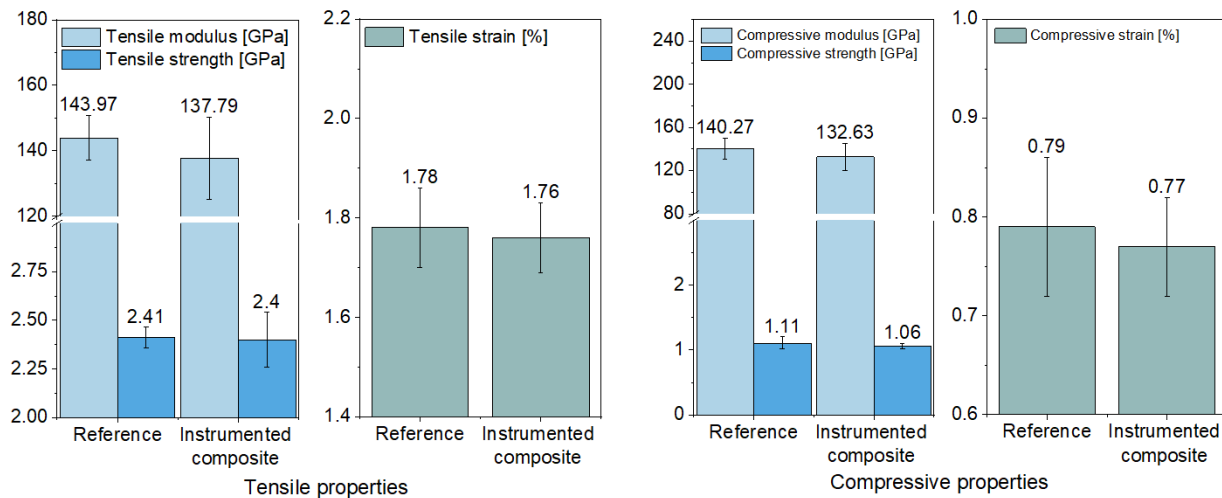


Abbildung 15. Einfluss des integrierten faseroptischen Sensors auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs: (Links) Zug- und (Rechts) Druckeigenschaften.

In der eingesetzten Ausführung (Verstärkungsfasern parallel zu faseroptischen Sensoren) wird keine Beeinträchtigung auf die Mikrostruktur bzw. die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs festgestellt.

Das Fraunhofer IPT hat analog mehrere ebene Laminats mit integrierten faseroptischen Sensoren (FOS) gefertigt. Die Integration der FOS in den Laminats erfolgte manuell zwischen den Legeprozessen einzelner Lagen. Das Ziel dieser Vorversuche war es, zu untersuchen, wie die FOS integriert werden können und ob die FOS die Dehnungszustände des Laminats richtig messen. Die Fertigung der mit FOS integrierten Laminats erfolgte in sechs Schritten. In den

Schritten 1 bis 3 wurden die ersten Lagen mithilfe von Kapton® für die bessere Haftung an dem Heiztisch abgelegt:

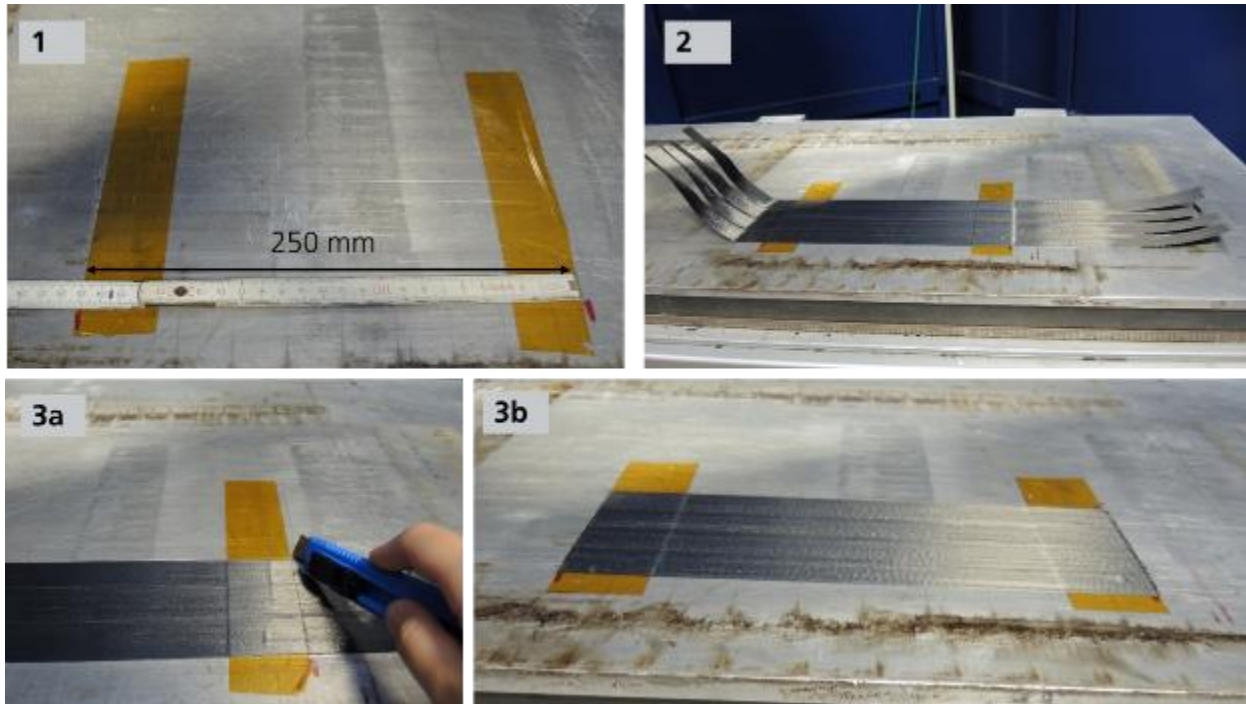


Abbildung 16: In-situ laserbasiertes Legen mit PrePro3D System von Laminaten mit faseroptischen Sensoren - Fertigungsschritte 1 -3.

Nach dem Legen der ersten Lagen wurden die maschinenbedingten Tapeüberreste manuell (Schritt 3a) entfernt und die FOS ebenfalls mithilfe von Kapton® positioniert (Schritt 4). Anschließend wurden die restlichen Lagen gelegt (Schritt 5) und das Laminat entformt und nachbearbeitet, wobei die Tapeüberreste entfernt wurden:

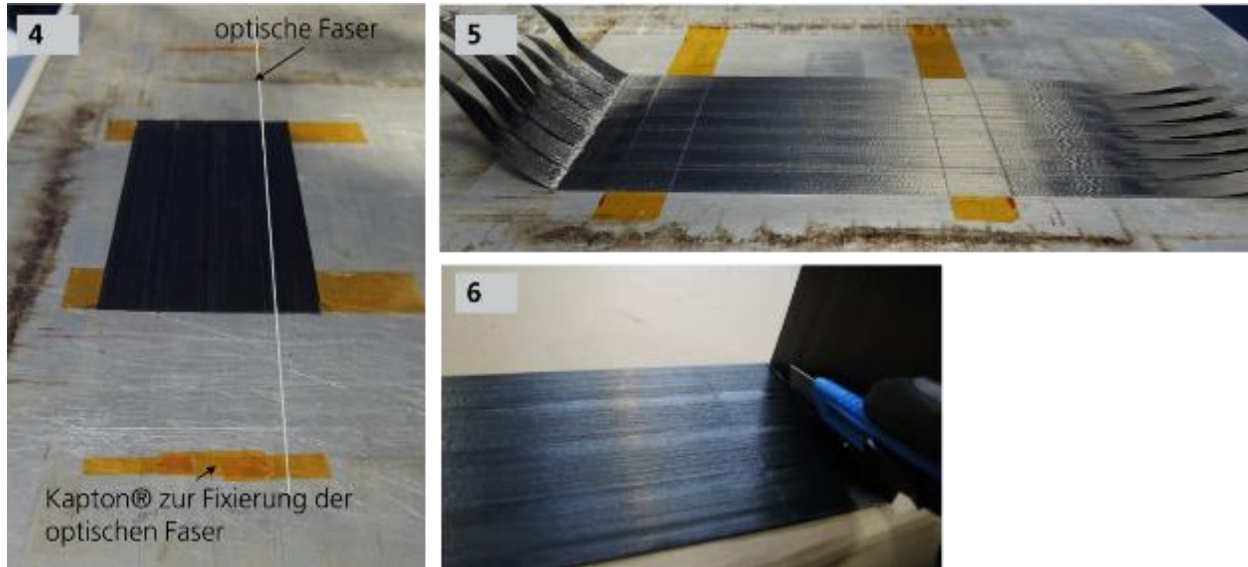


Abbildung 17: In-situ laserbasiertes Legen mit PrePro3D System von Laminaten mit den faseroptischen Sensoren - Fertigungsschritte 4 - 6.

Mit diesem Verfahren wurden mehrere Laminat mit unterschiedlichen Integrationsstrategien der FOS gefertigt (Abbildung 18).

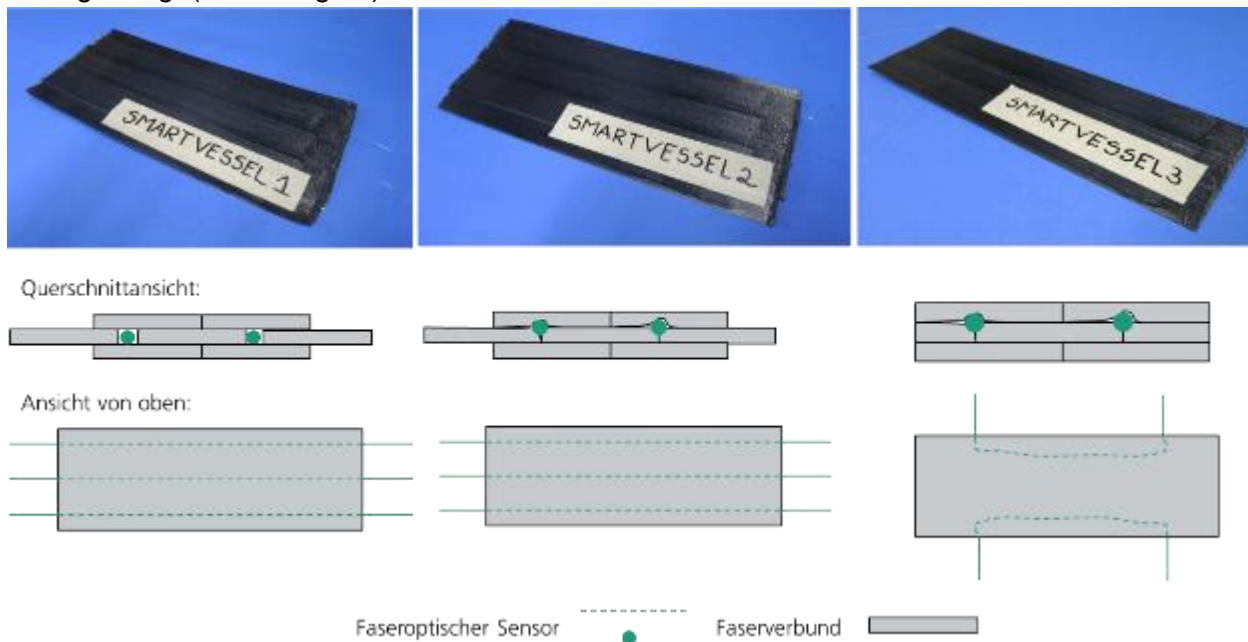


Abbildung 18: Unterschiedliche Strategien der Integration von faseroptischen Sensoren.

Das Fraunhofer IPT hat ebenfalls weitere Laminat mit FOS mit unterschiedlichen Beschichtungen (doppelschichtige Polyacrylat und Polyimide) gefertigt. Die Beschichtung des doppelschichtigen Polyacrylat hat sich als zu wenig temperaturbeständig bewiesen, was die Handhabung der FOS zusammen mit dem Laminat nach Fertigung sehr stark erschwerte und sehr oft zu den Brüchen der FOS an der Ausgangsstelle aus dem Laminat führte.

- **Entwicklung eines Ansatzes zur Instrumentierung von im Wickelverfahren hergestellten Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen (AP3, AP5)**

Die einzelnen Schritte der Instrumentierung mit faseroptischen Sensoren für Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen, die am ITA im Multifilament-Wickelverfahren hergestellt wurden, sind in Abbildung 11 dargestellt. Eine schematische Darstellung des Wicklungsverlaufs und des daraus resultierenden Sensornetzes ist in Abbildung 20(a) zusammen mit einem Abbild eines instrumentierten Druckbehälters dargestellt (s. Abb. 12(b)). Die Abbildung 20(c) stellt das Gehäuse dar, das auf dem Tank angebracht ist, um die Sensoranschlüsse und die Ein- und Austrittspunkte des Sensors hervorzuheben, um eine vorzeitige Beschädigung bzw. ein Versagen des Sensors bei Handling und Transport zu verhindern.

In Abbildung 21 werden typische OTDR-Messkurven von eingebetteten faseroptischen Sensoren in Druckbehältern dargestellt. Hier wurde ein Sensor mit einer Länge von ca. 35 m integriert, wobei die Signalintensität während der gesamten Behälterherstellung nicht beeinträchtigt wurde.

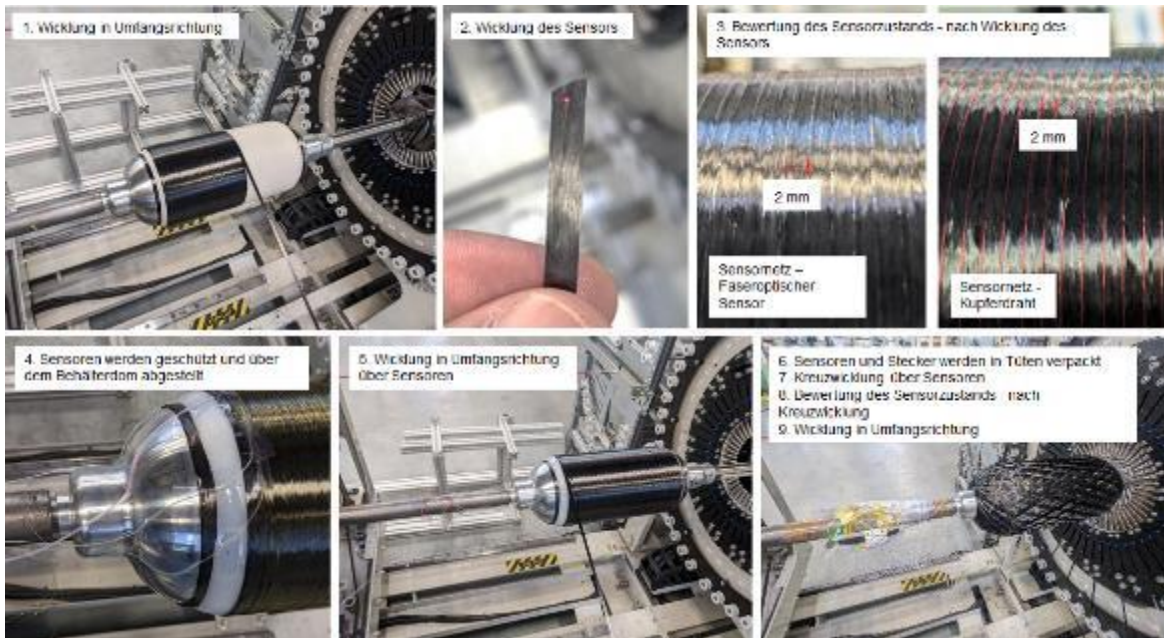


Abbildung 19. Schrittweise Beschreibung des Ansatzes zur Instrumentierung mit faseroptischen Sensoren von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen im Multifilament-Wickelverfahren.

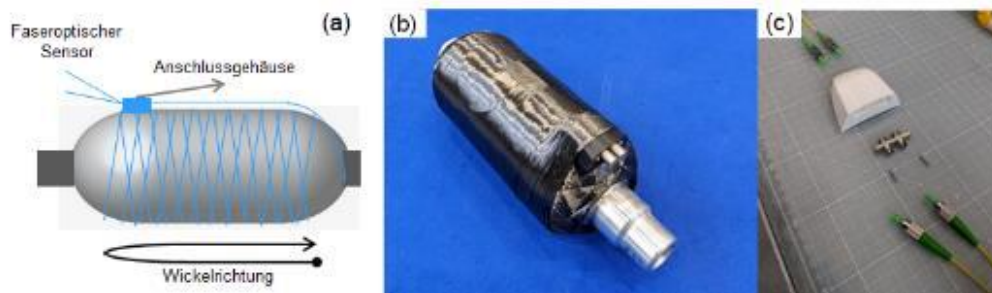


Abbildung 20. (a) Schematische Darstellung des Sensornetzes. (b) Instrumentierter Druckbehälter. (c) Gehäuse mit den Sensoranschlüssen, das auf dem Dombereich des Druckbehälters angebracht wurde.

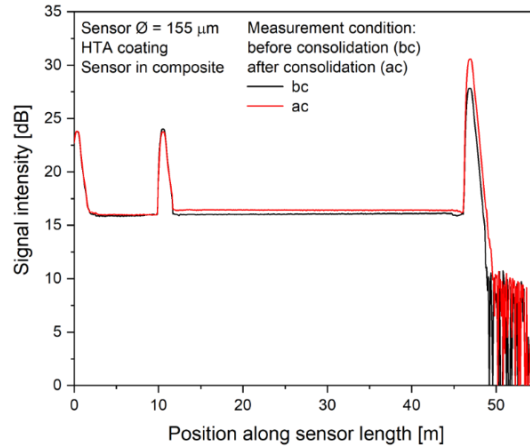


Abbildung 21. OTDR-Messkurven aus einem instrumentierten Druckbehälter aus Verbundwerkstoff in verschiedenen Fertigungsstufen

Es wurde ein robuster und reproduzierbarer Ansatz zur Instrumentierung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen mit faseroptischen Sensoren im Multifilament-Wickelverfahren entwickelt.

Das Fraunhofer IPT hat in einem ersten Ansatz zur Integration der FOS in einem Drucktank einen 52 L Tank mit dem Verfahren der laser-basierten in-situ Tapeverarbeitung gefertigt:

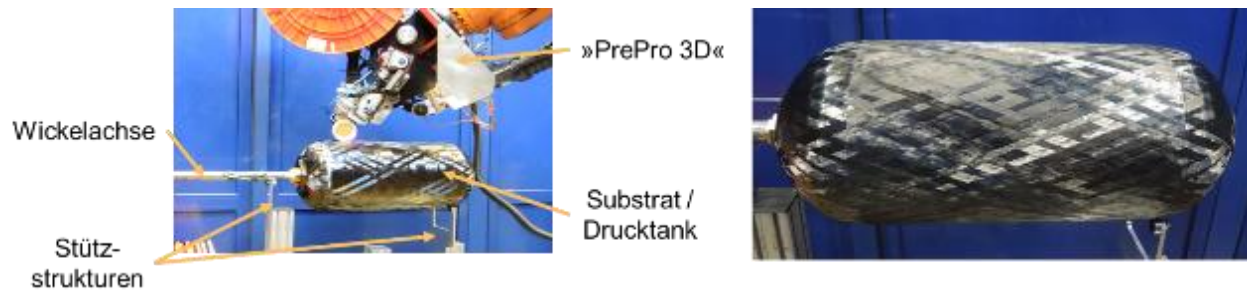


Abbildung 22: Darstellung des Fertigungsprozesses mittels des laserunterstützten Tapelegeprozesses (links) sowie der gefertigte Drucktank (rechts).

Die letzte Lage des gewickelten Drucktanks ist eine Kreuzlage, welche aus sich wiederholenden, rotatorisch versetzten Wickeltrajektorien besteht und in ihrer Gesamtheit das flächendeckende Wickelmuster ausmachen. In Abbildung 23 sind vier dieser sich wiederholenden Wickeltrajektorien von zwei Blickwinkeln dargestellt:

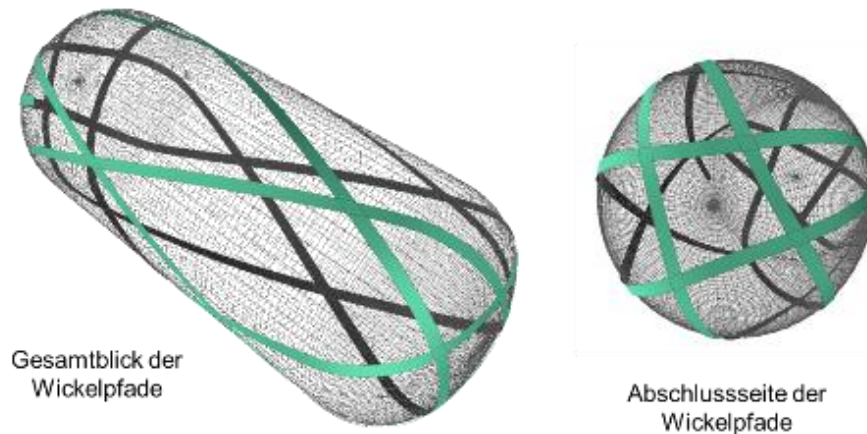


Abbildung 23: Visualisierung der Wickelpfade einer Kreuzlage.

Nachdem der Drucktank gefertigt wurde, wurden faseroptische Sensoren mit Polyimid-Beschichtung manuell mit moderater Spannung auf den letzten sechs sich wiederholenden Wickeltrajektorien positioniert und an selektierten Stellen mit einem hochtemperaturbeständigen Klebeband aus Polyimid fixiert:

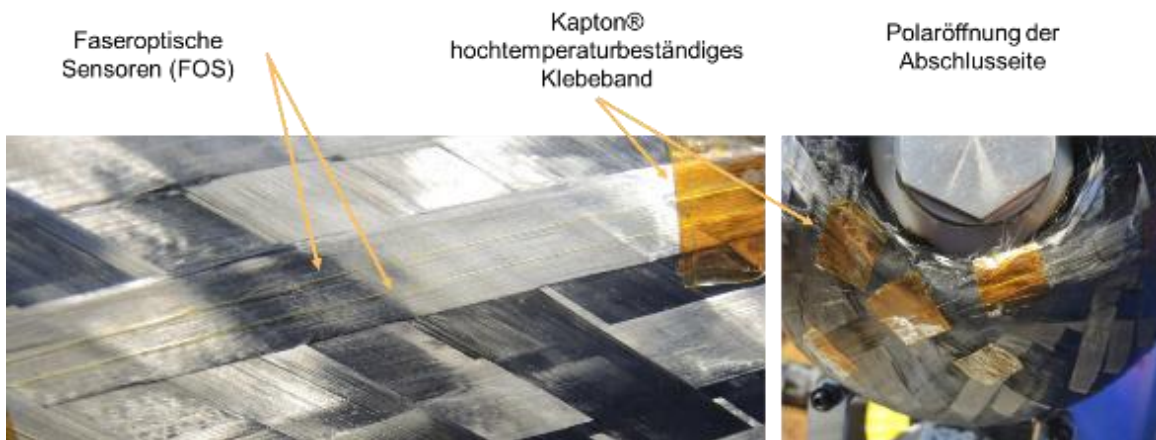


Abbildung 24: Methode der Integration von faseroptischen Sensoren auf der letzten Lage des Drucktanks.

Die FOS wurden dabei sehr nah an der Polaröffnung positioniert, was strukturmechanisch eine interessante Stelle des Drucktanks ist. In Abbildung 25 ist der Ein- und Ausgang der faseroptischen Sensoren in die Faserverbundstruktur dargestellt. Diese erfolgten an der Polaröffnung, weil an dieser Stelle der Drucktankstruktur eine gute Zugänglichkeit gewährleistet ist. Der ein- und ausgehende Sensor wurde mit Polyimid-Klebeband geschützt, um einen Bruch zu des Sensors zu vermeiden. Der Ein- und Ausgang der Sensoren wurde an der Anschlussseite des Drucktanks positioniert, sodass die beiden Enden der faseroptischen Sensoren auf der Wickelstange fixiert werden konnten und während des späteren Wickelprozesses mitrotierten.

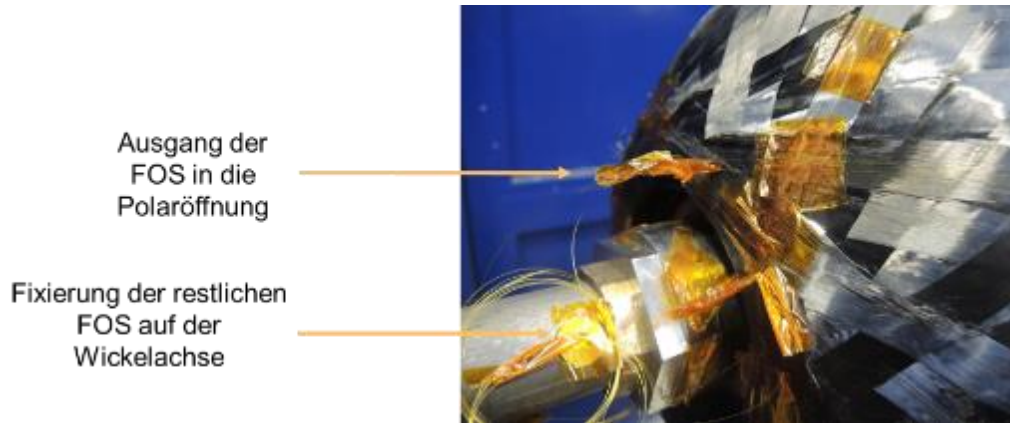


Abbildung 25: Ein- und Ausgänge der faseroptischen Sensoren an der Polaröffnung.

Während der manuellen Fixierung der faseroptischen Sensoren hat sich herausgestellt, dass diese sehr empfindlich gegen eine sprunghafte Änderung der Grundgeometrie sind. In dem ersten Versuch die faseroptischen Sensoren auf den Drucktank aufzubringen, brach die Sensorfaser an der Stelle einer Dickenänderung im Laminat. Nach dem zweiten erfolgreichen Versuch der manuellen Fixierung der faseroptischen Sensoren, wurde ein Tape genau auf die platzierten Sensoren gelegt. Damit konnte eine kontinuierliche Fixierung der Sensoren erreicht werden und die Empfindlichkeit der Sensoren auf die Andruckkraft und die Verarbeitungstemperatur während des Wickelprozesses überprüft werden.

Die integrierten Faseroptischen Sensoren wurden im nächsten Schritt mittels OBR vermessen. Dadurch soll die Länge der Fasern und die Dämpfung innerhalb der Faser durch die Integration in das Laminat untersucht werden. In Abbildung 26 ist die entsprechende Messung für zwei der integrierten Fasern dargestellt. Dabei entsprechen die ersten zwei Meter der Fasern einem sogenannten Faserpigtail (Faser mit einseitiger Besteckerung), welcher an die integrierten Fasern mittels Spleiss angefügt wurde. Erkennbar ist, dass die hohe Amplitude der Rückreflektion, welche das Faserende markiert, für Faser 1 und 2 bei 3,6 m, für Faser 3 bei 6 m und für Faser 4 bei 4 m auftritt. Dies zeigt deutlich, dass die Fasern bereits auf den ersten Metern Integration im Laminat gebrochen sind und keine valide Messung über den gesamten Tank möglich war.

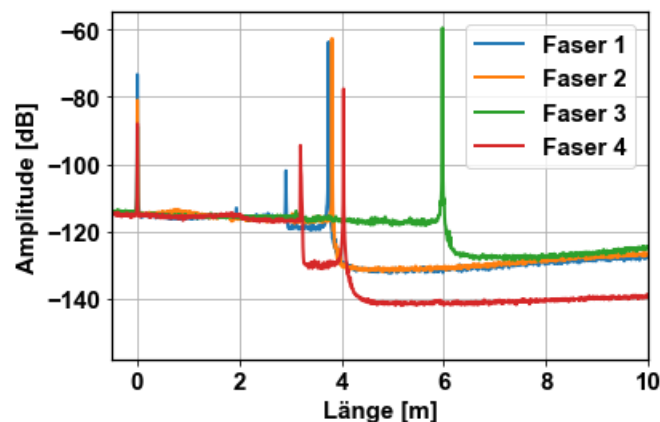


Abbildung 26: OBR-Messung der integrierten Fasern.

Es wurden mehrere Konzepte für die automatisierte Integration der FOS ausgearbeitet (vgl. Abbildung 27). Die Konzepte A bis C variieren in Komplexität und in der Genauigkeit der Regelung der Faserspannung. Die Faserspannung muss sich innerhalb eines bestimmten maximalen und minimalen Wertes während der Integration befinden. Zu hohe Faserspannung führt zum Bruch der Faser und zu niedrige Faserspannung zu der erhöhten Mikrowelligigkeit und somit zum erhöhten optischen Leistungsverlust. Die Konzepte A und B sind in dem Aufbau sehr ähnlich. Die Führungen der faserförmigen Sensoren sind in den Abbildungen nur schematisch dargestellt und würde in der Realität komplexer sein, um größeren Freiraum bei der Positionierung der FS Spule auf dem PrePro3D Tapelegekopf zu ermöglichen. In dem Konzept A wird die FS Spule an einer Bremse und in dem Konzept B an einem regelbaren Motor angekoppelt. Das Konzept C ist konzeptionell komplexer und beinhaltet eine Tänzeinheit, die in der Kombination mit einem regelbaren Motor die Faserspannung noch viel genauer regeln könnte.

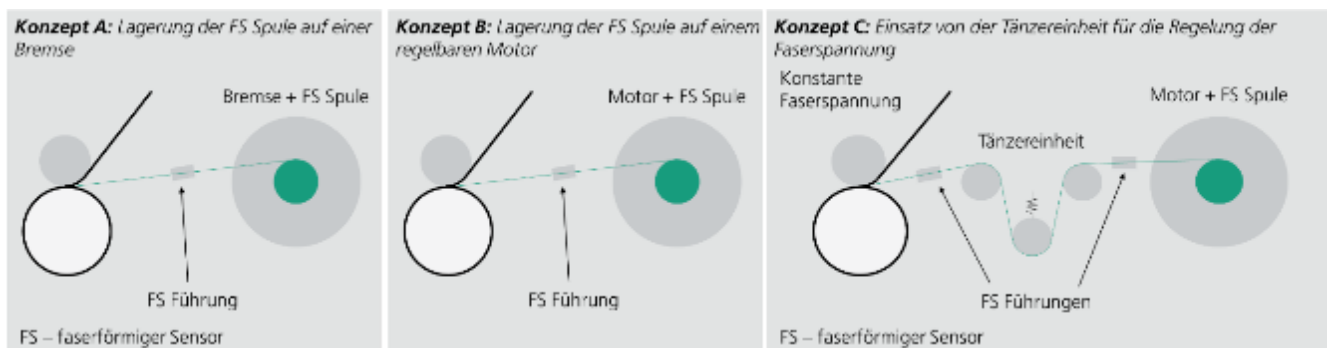


Abbildung 27: Konzepte für die automatisierte Integration der faserförmigen Sensoren während des Wickelprozesses.

Um erste Einblicke in die Anforderungen hinsichtlich der notwendigen Genauigkeit der Regelung der Faserspannung zu finden, wurde in einem ersten Schritt ein einfaches Konzept basierend auf Konzept A implementiert. Die Bremswirkung der FOS Spule wurde dabei durch Klemmwirkung über eine Schraubverbindung gelöst. In Abbildung 28 ist das CAD-Design des PrePro3D System am Fraunhofer IPT in Kombination mit der FOS Spule und Führungselementen abgebildet.

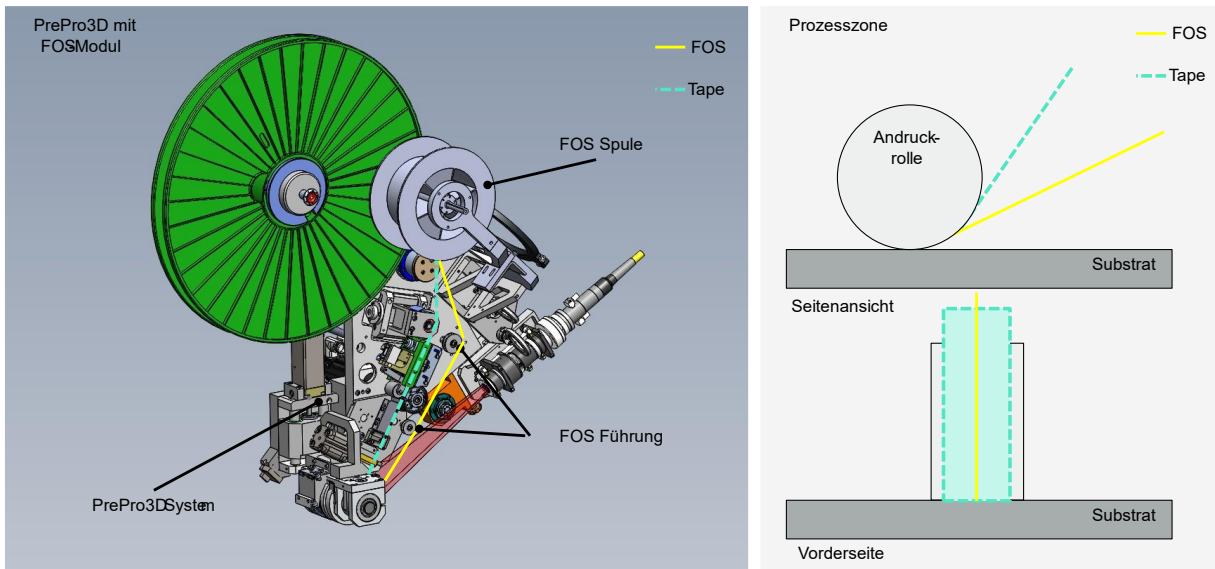


Abbildung 28: CAD-Design der Maschinenerweiterung (links) und Skizze der Prozesszone (rechts) für die automatisierte Integration faseroptischer Sensoren.

Die Komponenten der Maschinenerweiterung wurden hergestellt und am Tapelegekopf montiert:

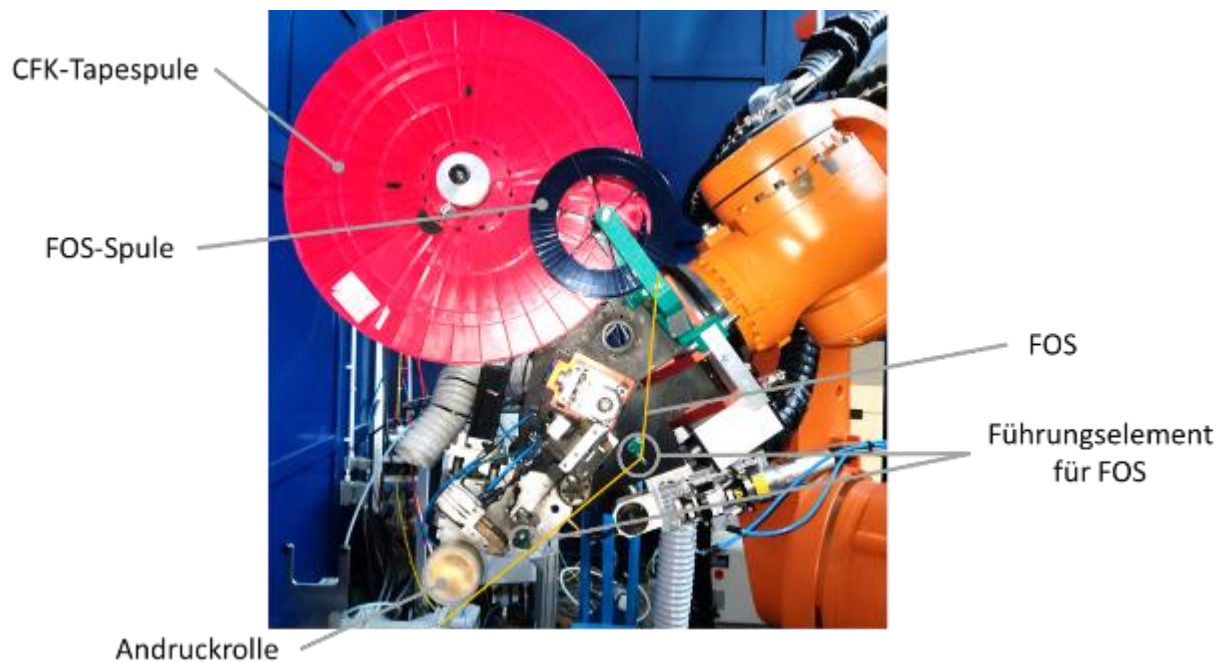


Abbildung 29: PrePro3D System des Fraunhofer IPT mit FOS Spule zur automatisierten Integration der faseroptischen Sensoren im Ablegeprozess

In Ablegeversuchen wurden mit der automatisierten Sensorintegration Ringproben hergestellt und die Sensorfaser am Fraunhofer IPT ausgelesen:

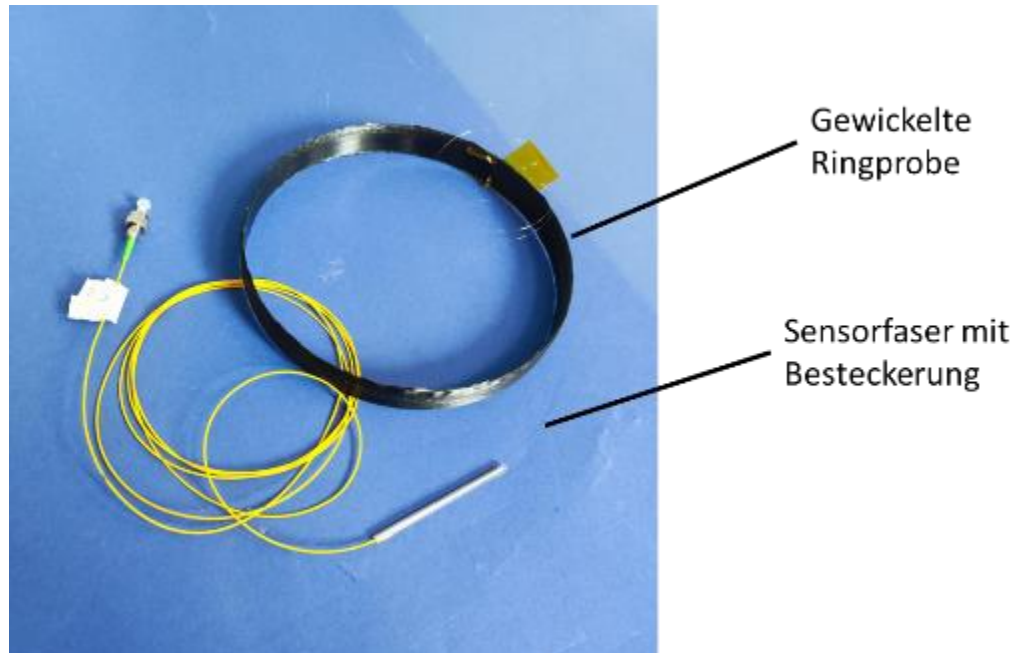


Abbildung 30: Gewickelte Ringprobe mit einseitiger Besteckung.

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Dämpfung des Sensorsignals, was vermutlich auf Microbending zurückzuführen ist:

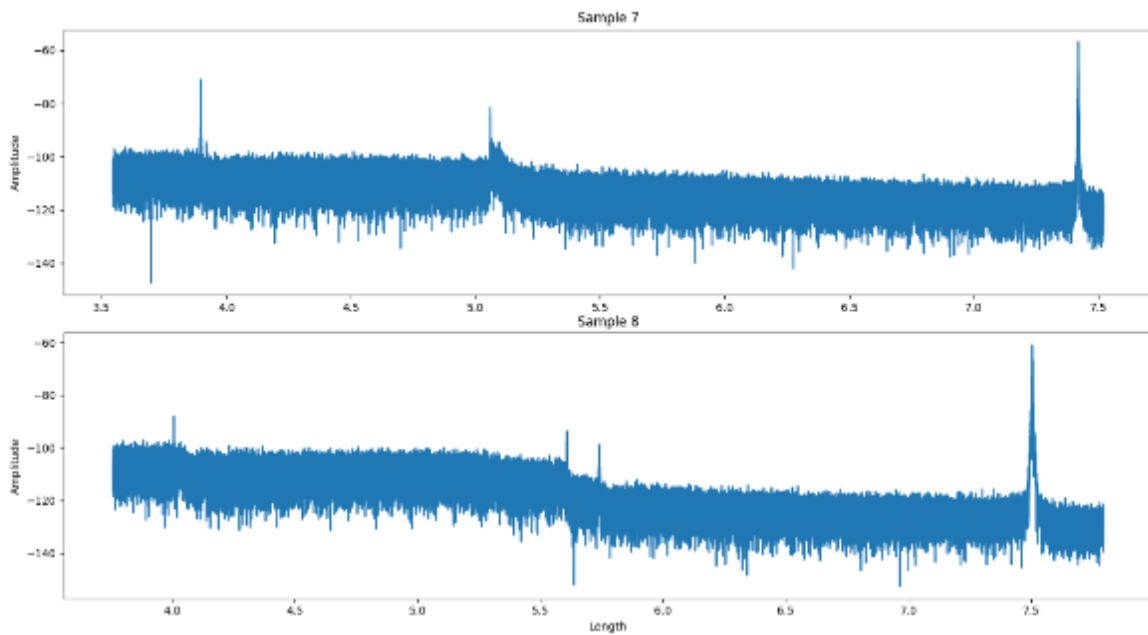


Abbildung 31: Auswertung der automatisiert integrierten Sensorfaser.

Mögliche Ursachen sind:

- Der durch die Andruckrolle hervorgerufene Biegeradius ist zu hoch. Anders als bei den vorherigen Versuchen wurde die Sensorfaser direkt unter der Andruckrolle eingeführt und erfährt dadurch eine Umlenkung mit dem der Rolle entsprechenden Biegeradius.
- Die zur Konsolidierung des CFK-Tapes nötige Andruckkraft (150 N) welche über die Andruckrolle eingebracht wird ist zu groß, so dass die Sensorfaser in dem Bereich direkt unter der Rolle einen zu großen Biegeradius erfährt.
- Das implementierte Konzept lässt keine genau genügende Kontrolle der Faserspannung zu. Eine zu niedrige Faserspannung bewirkt erhöhte Mikrowelligkeit und somit einen erhöhten optischen Leistungsverlust während eine zu hohe Faserspannung einen Faserbruch hervorrufen kann.
- In dem automatisierten Ablegeverfahren wird die FOS unmittelbar in der heißen Prozesszone eingebracht, eine Schädigung durch die Lasereinstrahlung und damit verbundene Temperaturbedingungen sowie sehr schnelle Aufheiz- und Abkühlraten ist nicht auszuschließen.

Neben dem Schutz der Sensorfaser an den Ein- und Ausgängen mit Polyimid Tubings wurden unterschiedliche Prozessparameter getestet, zufriedenstellende Messergebnisse konnten mit der automatisierten Sensorfaserintegration im Verlauf des Projekts jedoch nicht mehr erreicht werden.

- **Technologievorführung zur verteilten Dehnungsmessung unter simulierten Lastbedingungen bei hydraulischen Prüfungen an instrumentierten Druckbehältern (AP7)**

- *Technik zur verteilten Dehnungserfassung und Versuchsaufbau für hydraulische Versuche*
Verteilte faseroptische Messungen wurden mittels optischer Brillouin-Frequenzbereichsanalyse (Brillouin optical frequency domain analysis, BOFDA) bzw. optischer Rayleigh-Frequenzbereichsreflektometrie (*Optical frequency domain reflectometry*, OFDR) durchgeführt. Die Brillouin-BOFDA-Messungen wurden von der fibrisTerre Systems GmbH mit dem fTB 5020 Interrogator (fibrisTerre) durchgeführt. Die Rayleigh-OFDR-Messungen wurden vom Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik mit dem ODiSI-Interrogator (Luna Innovations Inc., USA) durchgeführt.

Die Druckbehälter wurden in hydraulischen Berst- und Lastwechselversuchen geprüft. Bei den Berstversuchen wurde der hydraulische Druck schrittweise bis zum Versagen des Behälters erhöht (siehe Abbildung 32(a)). Die Lastwechselversuche umfassten eine Kombination aus schnellen Lastwechselzyklen, um ein Versagen des Behälters durch Ermüdung herbeizuführen, und anschließende Zyklen mit langsamen Lastwechseln, die eine Dehnungsmessung unter quasi-statischen Bedingungen ermöglichten (siehe Abbildung 32(b)). Der Versuchsaufbau zur Durchführung der Berst- und Lastwechselversuche ist in den Abbildung 33 bzw. Abbildung 34 dargestellt.

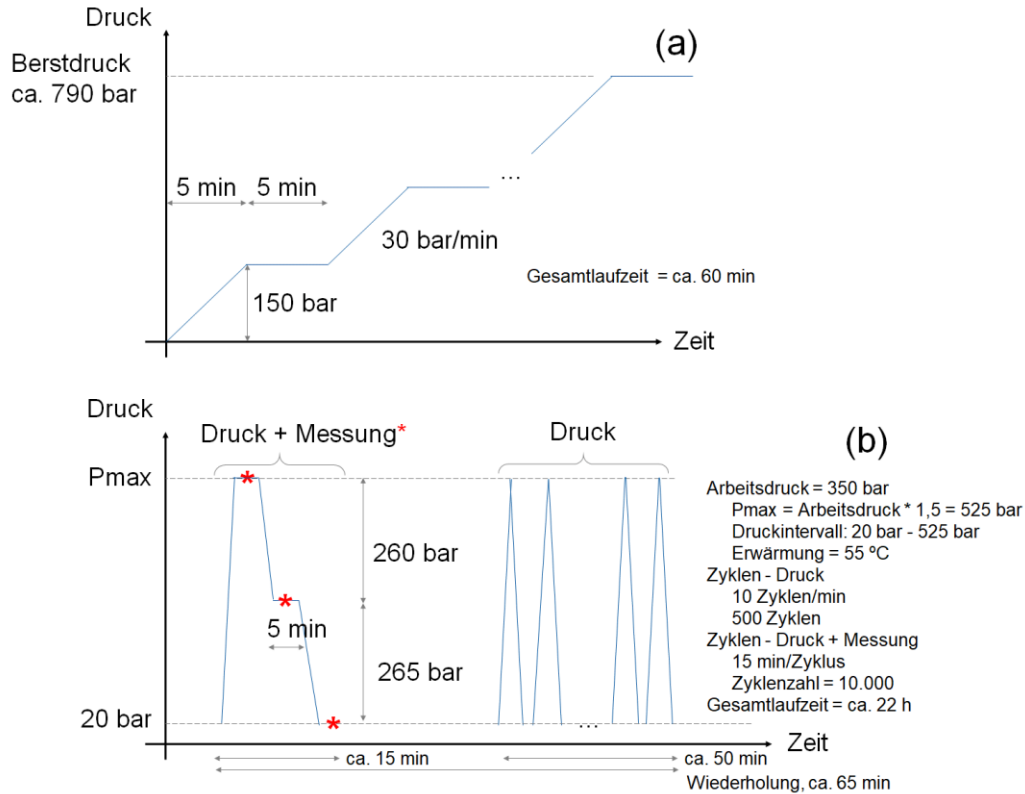


Abbildung 32. Programmierte Druckverläufe im Zeitverlauf zur Durchführung von (a) Berst- und (b) Lastwechselfersuchen.



Abbildung 33. Versuchsaufbau zur Durchführung von hydraulischen Berstversuchen an instrumentierten Druckbehältern bei gleichzeitiger Dehnungsmessung.



Abbildung 34. Versuchsaufbau zur Durchführung von hydraulischen Lastwechselfersuchen an instrumentierten Druckbehältern bei gleichzeitiger Dehnungsüberwachung.

- *Ergebnisse von Berstversuchen bei gleichzeitiger Dehnungsmessung*

Die geprüften Behälter, die bei Berstversuchen unterschiedliche Versagensmechanismen aufweisen, sind in Abbildung 35 dargestellt. In einigen Fällen wurde eine Leckage des Prüfmediums (Wasser) am Ventil des Druckbehälters festgestellt (s. Abbildung 35(a)). Bei Leckagen musste die Prüfung abgebrochen werden, wobei kein Versagen des Behälters erreicht wurde. Durch eine Überarbeitung der Auslegung und Herstellung des Behälterventils und seines entsprechenden Adapters konnten weitere Fälle von Leckagen verhindert werden. In einzelnen Fällen wurde ein Druckbehälterversagen im Übergang zwischen dem zylindrischen und dem Dombereich festgestellt (s. Abbildung 35(b)). Hierbei handelt es sich um eine instabile und deshalb unerwünschte Versagensweise, die auf eine fehlerhafte Behälterauslegung bzw. -herstellung hindeutet. Darüber hinaus wurde bei einigen Behältern im zylindrischen Bereich ein Versagen infolge von Faserbrüchen (stabiles Behälterversagen) festgestellt (s. Abbildung 35(c)).



Abbildung 35. (a) Leckage des Prüfmediums am Druckbehälterventil (b) Tankversagen am Übergang zwischen Zylinder und Dombereich (c) Tankversagen am Zylinder.

Brillouin-BOFDA wurde zur Überwachung der Dehnung eines instrumentierten Druckbehälters eingesetzt; die Dehnungsprofile bei unterschiedlichen Druckstufen sind in Abbildung 36(a) dargestellt. Die Positionen entlang der Sensorlänge bei 10 m und 80 m entsprechen jeweils den Eintritts- und Austrittspunkten des Sensors; 10 - 40 m und 50 - 80 m entsprechen dem zylindrischen Bereich; und 40 - 45 m entsprechen dem Übergang zwischen Zylinder und Dom. Die Dehnungsschwankungen sind auf lokale Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs angewiesen. Wie erwartet, nimmt die Dehnung mit steigendem Druck zu. Geringere Dehnungszunahmen werden im Zylinder-Dom-Übergang beobachtet; am Druckbehälterdom wurden metallische Bosse angebracht (siehe Abbildung 19), wodurch die Endstücke des Druckbehälters steifer werden. Die Dehnungsschwankungen im zylindrischen Abschnitt nehmen mit zunehmendem Druck zu. Der maximal aufgebrachte Druck beträgt 1262 bar, bei dem eine durchschnittliche Dehnung von $6450 \pm 596 \mu\text{m}$ gemessen wird. Da Brillouin BOFDA absolute Dehnungsmessungen ermöglicht, wird die bei der Konsolidierung eingeführte Schrumpfungdehnung ($- 540 \pm 144 \mu\text{m}$) im unbelasteten Zustand gemessen. Wird der Druck entfernt, entsprechen die Dehnungswerte wieder denen, die im unbelasteten Zustand gemessen wurden, was die Reversibilität der Dehnungsmessungen im elastischen Bereich beweist.

Ein weiterer instrumentierter Druckbehälter wurde mit Rayleigh OFDR untersucht; die Dehnungsprofile sind in Abbildung 9(b) dargestellt. Die mit Rayleigh OFDR ermittelten Dehnungsprofile weisen ähnliche Merkmale auf wie die von Brillouin BOFDA-Messungen. Die Dehnungsmessungen mittels Rayleigh-OFDR zeigen jedoch höhere Dehnungsschwankungen bei gleichem Mittelwert. Beispielsweise wurden $3116 \pm 1024 \mu\text{m}$ (Rayleigh OFDR) und $3155 \pm 231 \mu\text{m}$ (Brillouin BOFDA) aufgezeichnet; dies ist die maximale Dehnung, die mit Rayleigh OFDR bei

449 bar aufgezeichnet wurde, kurz nachdem der eingebettete Sensor im zylindrischen Teil des Druckbehälters versagte.

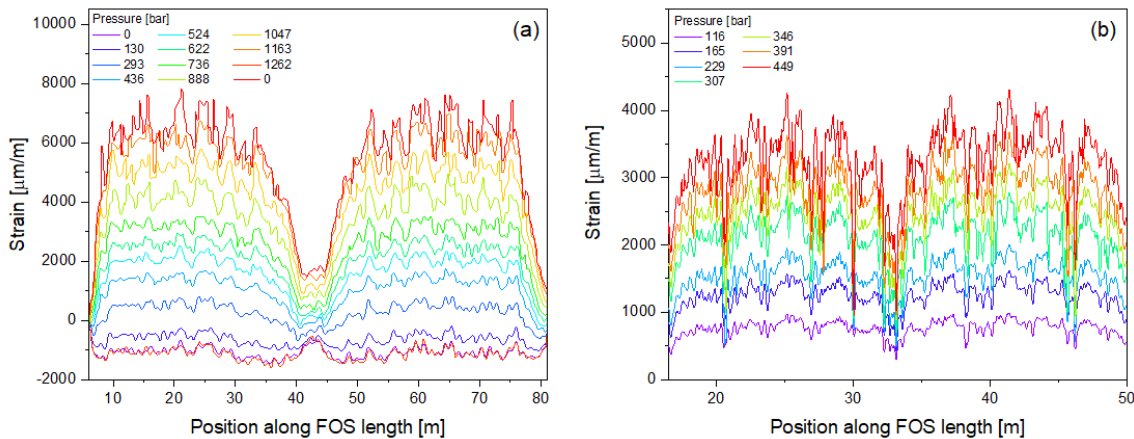


Abbildung 36. Dehnungsprofile, gemessen bei hydraulischen Berstversuchen an instrumentierten Druckbehältern. Messungen mittels (a) Brillouin BOFDA und (b) Rayleigh OFDR.

Neben den Berstversuchen wurden außerdem noch zwei Tanks mit Fasern instrumentiert, um zyklische Versuche zu durchlaufen. Die zyklischen Versuche wurden aufgrund der kürzeren Messzeit von 2 s mit dem OFDR System durchgeführt.

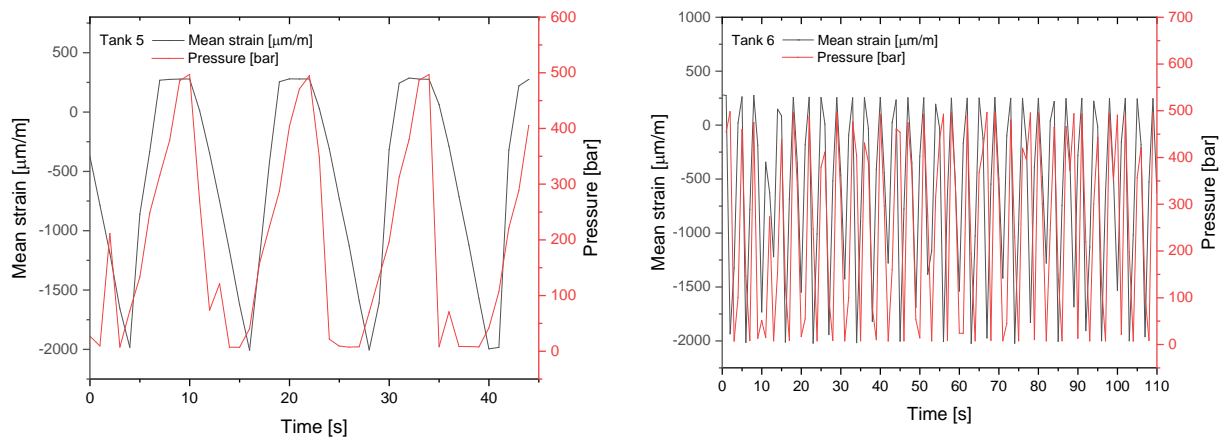


Abbildung 37: Dehnungsprofile gemessen bei zyklischen hydraulischen Versuchen mit fünf Lastwechseln pro Minute.

Abbildung 37 zeigt Ausschnitte, der während der Lastwechsel gemessenen Dehnung und des angelegten Drucks für die beiden Tanks über die Zeit. Aufgrund von Leakagen, die nach einigen Stunden am Ventil aufgetreten sind, ist keiner der beiden Tanks geborsten.

- **Entwicklung eines Zustandsüberwachungsalgorithmus basierend auf der Kombination von FE-Analyse und experimentellen Dehnungsmessungen aus hydraulischen Prüfungen an instrumentierten Druckbehältern (AP4, AP7)**

Grundlage für die Unterscheidung struktureller Änderungen ist die Interpretation von Messwerten basierend auf nachvollziehbaren Schädigungsmechanismen. Diese können idealisiert in der Simulation abgebildet werden. Ziel ist es den Einfluss von Schädigungen bzw.

Strukturänderungen mittels FE-Simulationen zu untersuchen. Durch geänderte lokale oder globale Dehnungsniveaus können in der Folge mögliche Indikatoren für das Schädigungsverhalten zum Structural Health Monitoring abgeleitet werden.

Für die Simulation mit entsprechendem Lagenaufbau wurde Abaqus genutzt, zum Aufbau des Modells seitens Wölfel die Software woundSim verwendet, da ein Abaqus-basiertes Modell auf Grundlage von Simpatex-Vorarbeiten nicht erstellbar war. Nach einer erfolgreichen Bewertung des Tools für den vorliegenden Verwendungszweck (zügiger Modellaufbau von FKV-Drucktanks) wurde dieses für eine Nutzungsdauer von 6 Monaten beschafft. Insgesamt wurden verschiedene Modelle von Drucktanks aufgebaut, da diese - wie in Abbildung 38 dargestellt - unterschiedliche Lagenaufbauten aufweisen.

Die Modellierung dient hierbei rein dem Verständnis von Schädigungen und deren Einfluss auf das Strukturverhalten, stellt aber kein Modell zur Auslegung des Drucktanks dar. Übliche Schädigungen im Zusammenhang mit FKV sind geschwächte Anbindung oder sogar Delaminationen einzelner Rovings bspw. durch zu geringe Kompaktierung oder Imprägnierung während der Herstellung oder in Folge einer Impact-Schädigung. Diese Laminatdefekte können je nach Detailgrad durch fehlende (Delamination) oder geschwächte Interfaces mittels Kohäsivzonen abgebildet werden. Zusätzlich wird Laminatschädigung auf Grundlage von Tsai-Hill-Versagenskriterien abgebildet.

Die Validierung des Modellierungsansatzes erfolgte durch Abgleich mit verschiedenen (ausgewählten) im Projekt zur Verfügung stehenden Schädigungsphänomenen für ein repräsentatives strukturmechanisches Modell. Ein Vergleich auf allen zur Verfügung stehenden Schäden und Layups ist nicht erfolgt – ist aber auch nicht zur Modellierung eines repräsentativen Strukturverhaltens mit dem Ziel virtuelle Sensorsignale zu erzeugen notwendig.

Die Simulation eines Drucktanks und Implementierung eines Schadens kann am besten anhand eines Modells des Wasserstofftanks V4 nachvollzogen werden. Dieser wurde mit Hilfe von woundSim aufgebaut und in der Simulation mit Innendruck beaufschlagt. Das Modell konnte anhand des Versagensbildes mit dem realen Tank validiert werden. Hierbei zeigt sich, dass der Punkt der größten Spannungsüberhöhung mit dem Versagenspunkt eines geprüften Drucktanks übereinstimmt (vergleiche Abbildung 38).

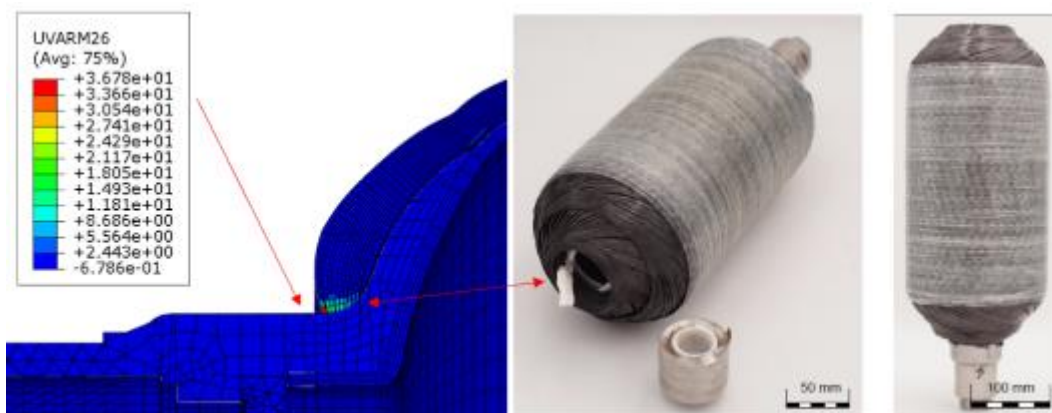


Abbildung 38: Validierung des Simulationsmodells anhand des Versagensbildes eines repräsentativen Drucktanks

In dem Drucktank wurde im Simulationsmodell ein Schadensbild entsprechend einer nach Annahme einer Delamination in Folge eines Impacts (lokale Kurzzeitbelastung) abgebildet. Die Delamination zwischen den Lagen wurde durch Lösung der Verbindung zwischen den Elementen

der einzelnen Lagen in einem typischerweise trichterförmigen Schadensbild dargestellt und ist im Detail in Abbildung 39 zu finden.

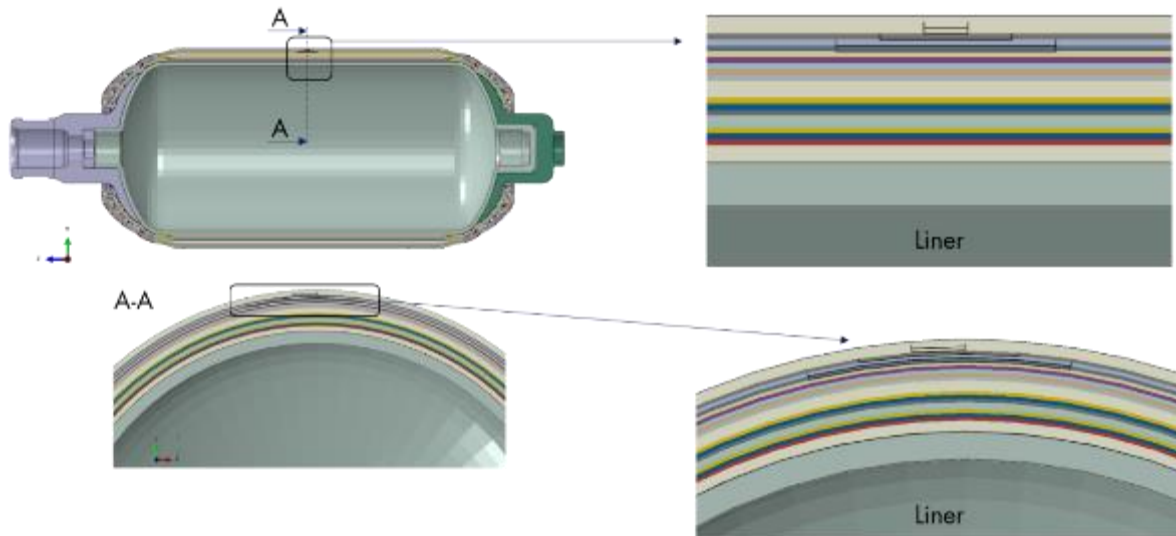


Abbildung 39. Implementierung eines Delaminationsschadens infolge eines Impacts am Drucktank im Simulationsmodell - Schnittansicht in axialer Richtung (oben) und radialer Richtung (unten)

Unter Last zeigt sich hierbei entsprechend Abbildung 40 ein klarer Unterschied zwischen geschädigtem und nicht geschädigtem Drucktank in Form einer Dehnungsüberhöhung in Folge einer Schädigung.

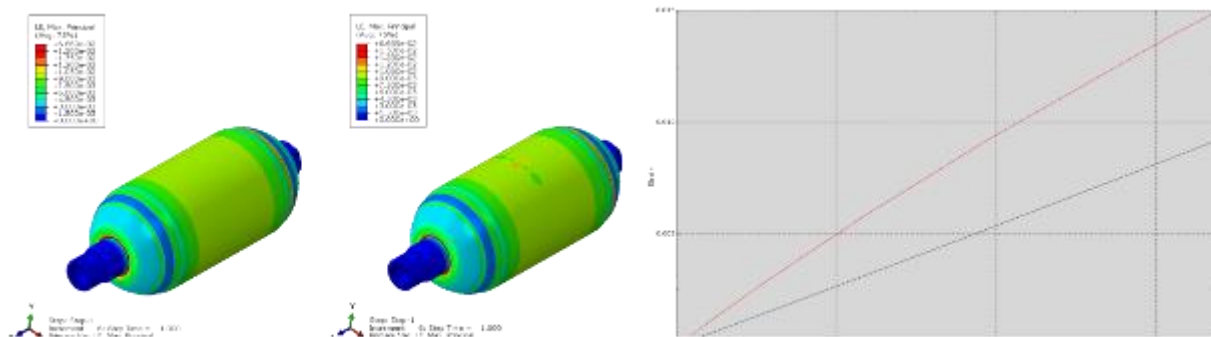


Abbildung 40. Vergleich zwischen ungeschädigtem Drucktank (links) zu geschädigtem (Mitte) mit sichtbarer Dehnungsüberhöhung im geschädigten Bereich. Darstellung des Dehnungsverlaufs lokal im geschädigten Bereich mit zunehmendem Druck

Dementsprechend kann unter quasistatischer Belastung der Einfluss von lokal eingebrachten Schäden zu lokalen Spannungsüberhöhungen nachgewiesen und demonstriert werden. Allerdings stellt das Modell in seiner Form keinen Bezug zu fertigungsbedingten Einflüssen oder schlechter Anhaftung eines faseroptischen Sensors oder Widerstandsdrahts dar, da dies in dem Rahmen und im Detailgrad der Simulation nicht abbildbar ist.

Weiterhin sind fertigungsbedingte Fehler nicht bekannt und können daher auch nicht in der Modellierung betrachtet werden – haben aber unter Umständen einen Einfluss auf das in Realität erzielte Messergebnis.

Dabei weisen die realen Rahmenbedingungen in der Breite verschiedenste mögliche Versagensverhalten auf, die vom SHM-System interpretiert werden müssen. Die wesentlichen Ergebnisse der Zustandsüberwachung lassen sich im Folgenden kurz erläutern:

- Eine Vorschädigung konnte im Versuch auf Basis der vorhandenen Daten noch nicht nachgewiesen werden. Dabei konnten die letzten Versuchsreihen nicht in der Projektlaufzeit ausgewertet werden. Je nach Versagensverhalten ist allerdings die Interpretation einer möglichen Vorschädigung notwendig, um die Kritikalität der strukturellen Änderung bewerten zu können.
- Zudem lassen variable Versagensverhalten (wie vorab dargestellt) mit unterschiedlichen Begründungen keinen direkten Schluss zwischen vorliegender Schädigung und Strukturverhalten zu. Die Korrelation zwischen einzelnen lokalen Dehnungsereignissen zur Struktur stellt sich als komplex dar, wie bspw. anhand eines Versagens am Boss. Dort werden niedrige Dehnungen detektiert, es kommt aber auch dort zum Versagen. Die strukturelle Integrität muss daher basierend auf der Bewertung lokaler Dehnungsänderungen betrachtet werden.
- Abschließend ist der Einfluss der Anhaftung / Integration der FO-Sensoren bzw. der Dehnungssensoren über den gesamten Verlauf nicht vollends nachvollziehbar. Es muss die Annahme gelten, dass die Anhaftung überall ideal ist, da ein Versagen der Interphase zwischen FO-Sensor und Harz zwar strukturell für den Drucktank nicht kritisch ist, die Interpretation der Messergebnisse allerdings schon. Auch ein Sensorversagen muss ausgeschlossen werden können, da dieser das SHM-System unbrauchbar macht.
- Der Einfluss der Faserorientierung auf das Versagensverhalten kann mit dem vorab dargestellten Tsai-Hill-Kriterium abgedeckt werden.

Abschließend kann konstatiert werden, dass ein SHM am Drucktank grundsätzlich nur strukturelle Änderungen (lokal aufgelöst) darstellen kann. Der Grund für die strukturelle Änderung muss anschließend geprüft werden. Ein Modell zur Lebensdauervorhersage konnte nicht geprüft werden, da v.a. statische Versuchsgrundlagen vorliegen, da die Betrachtung einer Steifigkeitsdegradation infolge von Ermüdung nicht im Rahmen der Projektlaufzeit möglich war. Hierbei gilt es aber weiterhin zu beachten, dass bisher keine Schädigung oder Materialdegradation aufgrund von Ermüdung mit den Messsignalen in Verbindung gebracht werden konnte. Eine Korrelation des Dehnungssignals mit Schädigungen war im Rahmen eines weiteren FuE-Projekts geplant. Allerdings wurde die Förderschiene der Einreichung im Rahmen der Änderungen des Bundeshaushalts ersatzlos gestrichen. Wölfel plant nach wie vor das Thema Wasserstoff und SHM in seinem Portfolio weiterzuverfolgen und ist hierzu auf Forschungsebene mit verschiedenen Partnern im Austausch. Bisher haben sich aber noch keine weiteren konkreten Projekte ergeben.

Basierend auf den erzielten Projektergebnissen schätzt Wölfel die ursprünglich geplante Verwertung als nicht umsetzbar ein. Die eigentliche Projektidee zur Weiterentwicklung zu einem Prototyp eines SHM-Systems kann auf der bestehenden Grundlage nicht in dem Rahmen und Zeithorizont des im Projektantrag beschriebenen Verwertungsplans weiterverfolgt werden. Dennoch ist eine Basis für Verwertungsmöglichkeiten der Projektergebnisse gegeben, die im Folgenden kurz erläutert werden.

- **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die kurz- bis langfristige wirtschaftliche Machbarkeit von Elektro- und Wasserstoff-Fahrzeugen wurde bewertet und lässt sich wie folgt zusammenfassen. Infolge technologischer Entwicklungen

sind sowohl bei Batterie- als auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen zwischen 2020 und 2030 erhebliche Preissenkungen zu verzeichnen, die sich von 2030 bis 2040 verlangsamen. Bei stabilen Strompreisen, abnehmenden Wasserstoffpreisen und leicht steigenden Dieselpreisen liegen die TCO von Elektro-LKW i.d.R. unter denen von Diesel-Lkw, noch bevor sich deren Anschaffungskosten angleichen. Bis 2025 erreichen die meisten batteriebetriebenen Lkw wettbewerbsfähige TCO, wobei die Amortisationszeiten bis 2030 auf <4 Jahre sinken. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen sind die Amortisationszeiten aufgrund der hohen Wasserstoffkosten jedoch länger. Bis 2025 erreichen die meisten batteriebetriebenen Lkw wettbewerbsfähige TCO, wobei die Amortisationszeiten bis 2030 auf <4 Jahre sinken. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen sind die Amortisationszeiten aufgrund der hohen Wasserstoffkosten jedoch länger. Bis 2030, sobald die Wasserstoffkosten unter 7 \$/kg fallen, können Brennstoffzellen- LKWs eine Amortisationszeit von 3 bis 5 Jahren erreichen, und Brennstoffzellen- Busse können ihre Kosten innerhalb eines Jahres wieder einspielen. Bis 2030 dürften sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellen- LKWs preislich mit Dieselfahrzeugen konkurrenzfähig sein, sofern die Batterie- und Brennstoffzellenkosten weiter sinken und die Strom- und Wasserstoffpreise stabil bleiben. Bei der Entwicklung von Lösungen zur Wasserstoffspeicherung in Druckbehältern für PKWs bzw. LKWs sollten diese Marktanalysen berücksichtigt werden.

Für die Weiterentwicklung des Wasserstofftransports in großem Maßstab in Druckbehältern, die in Lastwagen eingebaut sind, sind Parameter wie die zurückgelegte Entfernung und die Wasserstoffmenge entscheidend für die Konkurrenzfähigkeit dieser Lösung im Vergleich zu Pipelines.

Die hier entwickelten Verfahren zur Instrumentierung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen mit faseroptischen Sensoren zur Dehnungs- und Versagensüberwachung zeigt Potenzial zur Anwendung in der strukturellen Zustandsüberwachung. Es wurden erhebliche Fortschritte bei der Sensorintegration, der Analyse des Sensoreinflusses auf das mechanische Verhalten und der Dehnungsüberwachung während der hydraulischen Prüfung der Druckbehälter erzielt.

Die in smartVessel untersuchten Methoden für die Einbettung und Validierung der Sensorfasern in FVK-Drucktanks können auch auf andere Branchen übertragen werden und somit die Basis für weitere instrumentierte Produkte bilden. Darüber hinaus können mit Sensorfasern ausgestattete FVK-Drucktanks ein USP für Drucktankhersteller sein und damit wirtschaftlichen Erfolg begünstigen. Daraus ergeben sich für das Fraunhofer IPT Kooperationsmöglichkeiten für bilaterale Forschungsprojekte mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Ziel kann neben dem Materialverständnis und der Validierung von Simulationsmodellen auch die Entwicklung von mit Sensorfasern instrumentierten Komponenten sein, um Defekte während der Lebenszeit frühzeitig zu erkennen.

Bezüglich der Simulation und dem technischen Verständnis von Wasserstoff-Drucktanks bestand ein Mehraufwand an Arbeiten, wodurch allerdings auch mehr Erkenntnisse in diesem Gebiet generiert werden konnten. Eine Schädigung wurde erfolgreich in ein Modell implementiert und deren Einfluss auf Dehnungssignale untersucht. Dafür war aus den genannten Gründen die Datenanalyse von Messergebnissen nicht in einem Umfang möglich, der zum jetzigen Stand erweiterte Erkenntnisse oder eine Kopplung zwischen Datenanalyse und Simulation für erweiterte SHM-Erkenntnisse zulässt. Für die Datenanalyse von Messsignalen an Wasserstoffdrucktanks konnten dennoch innerhalb des Forschungsprojekts grundsätzliches Verständnis und Werkzeuge aufgebaut werden. Für Wölfel besteht somit die Möglichkeit, Dienstleistungen, entweder im Bereich der Simulation oder der Datenanalyse, direkt nach Projektabschluss anzubieten. Die

SimpaTec wird, durch ihre neu gewonnenen Kenntnisse aus ihre Simulationsaufgaben während dem Projekt, ihre Referenzen erweitern können und den Fokus in den nächsten Jahren bleibt die Erweiterung des Zielmarktes durch technische Marketing-Maßnahmen und die Skalierung der Technologie zur Erschließung weitere Anwendungsfelder bzw. alternative zu fossilen Brennstoffen.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse ist die Auslegung des Druckbehälters zu optimieren, um einen angemessenen und konsistenten Versagensmodus zu erreichen. Das Langzeitverhalten der in den Verbundwerkstoff integrierten Sensoren ist weiter zu untersuchen, und ggf. sind Anpassungen am faseroptischen Sensor bzw. an seinem Integrationsansatz vorzunehmen, um ein frühzeitiges Sensorversagen zu verhindern. Weitere hydraulische Prüfungen an instrumentierten Druckbehältern mit gleichzeitiger Dehnungsüberwachung sind erforderlich, um den empfohlenen Überwachungsansatz basierend auf Dehnungsmessungen zu validieren.

- **Erfolge und geplante Veröffentlichungen**

O. Bareiro, C. Girmen, N. Nöther, T. Gries. Robust instrumentation of composite pressure vessels manufactured via multi-filament winding for distributed fiber optic sensing. 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024), Juni 10-13, 2024 Potsdam.
<https://www.ndt.net/?id=29740>

O. Bareiro, C. Girmen, T. Gries. Instrumentation of composite material for distributed fiber optic sensing and influence on mechanical properties. Poster bei 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024), Juni 10-13, 2024 Potsdam.
<https://ewshm2024.com>

C.Girmen, H. Dirksen, O. Bareiro. Energie der Zukunft mit sicheren Wasserstofftanks nutzen. Industr Energy. Oktober 2022.
<https://www.industr.com/de/energie-der-zukunft-mit-sicheren-wasserstofftanks-nutzen-2670028>

Michael Klaus, Öffentlich gefördertes F&E Projekt smartVessel, SimpaTec Newsletter, März 2022,
<https://www.simpatec.com/en/news/publicly-funded-rd-project-smartvessel/416>

Michael Klaus, Anwendertreffen SimpaTec März 2023,
https://www.simpatec.com/media/filer_public/96/22/9622797f-577a-406a-9f5e-377be5478d59/simpatec_anwendertreffen2023_details.pdf

Michael Klaus, smartVessel - Integration von faserbasierten Sensoren während der Herstellung von Wasserstofftanks, SimpaTec Newsletter, Juli 2023,
<https://www.simpatec.com/de/news/smartvessel-integration-von-faserbasierten-sensoren-waehrend-der-herstellung-von-wasserstofftanks/600>

- **Literatur**

[1] Jean André, Stéphane Auray, Daniel de Wolf, Mohamed-Mahmoud Memmah, and Antoine Simonnet. 2014. Time development of new hydrogen transmission pipeline networks for France.

International Journal of Hydrogen Energy 39, 20, 10323–10337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.190>.

[2] Alissa Ganter, Paolo Gabrielli, and Giovanni Sansavini. 2024. Near-term infrastructure rollout and investment strategies for net-zero hydrogen supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 194, 114314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114314>.

[3] Hydrogen Europe. *HYDROGEN EUROPE – TECH: Hydrogen applications*. Retrieved from <https://hydrogeneurope.eu/in-a-nutshell/tech-descriptions/>.

[4] Christos Karapanagiotis, Marcus Schukar, Mathias Breithaupt, Eric Duffner, Alexander Ulbricht, Jens Prager, and Katerina Krebber. 2024. Structural health monitoring of hydrogen pressure vessels using distributed fiber optic sensing. *eJNDT* 29, 7. DOI: <https://doi.org/10.58286/29701>.

[5] Dorit Munzke, Eric Duffner, René Eisermann, Marcus Schukar, André Schoppa, Mariusz Szczepaniak, Jörg Strohäcker, and Georg Mair. 2021. Monitoring of type IV composite pressure vessels with multilayer fully integrated optical fiber based distributed strain sensing. *Materials Today: Proceedings* 34, 217–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.872>.