

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Zuwendungsempfänger

Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)

Titel der Förderung

WASSERSTOFF: Wartungsarme mobile Hochdruckspeicher (HyInnoTank)

Verantwortliche Autoren

Oscar Bareiro

Förderkennzeichen

03ZU1115DA

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZU1115DA gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil I – Kurzbericht

**Projekt:** WASSERSTOFF: Wartungsarme mobile Hochdruckspeicher (HylInnoTank) - A

**Projektlaufzeit:** 01.10.2021 – 30.09.2024

**Förderkennzeichen:** 03ZU1115DA

Die physikalische Speicherung von H<sub>2</sub>-Gas bei 70 MPa in Druckbehältern aus Faserverbundwerkstoff (FVW-Druckbehälter) in Verbindung mit einer Schnellbetankung (ca. 3 min) ist derzeit die bevorzugte Speichertechnologie, die in Fahrzeugen zum Einsatz kommt. Der FVW-Druckbehälter besteht aus einem inneren Kunststoff-Liner (z.B. HDPE, PA), der vollständig mit einer Faserverbundschicht ummantelt ist und über metallische Anschlussstücke, die im Dombereich des Druckbehälters angebracht sind, mit dem Betankungssystem verbunden ist.

Die auftretenden inneren sowie äußeren Kräfte werden von den Faserverbundschichten getragen. Der Liner übernimmt die Aufgabe die Dichtheit des Tanks sicherzustellen. FVW-Druckbehälter werden aufgrund der Gewichtsreduktion (bis zu 75% im Vergleich zu vollmetallischen Druckbehältern), der Ermüdungs- und Korrosionsbeständigkeit von FVW gegenüber ihren metallischen Gegenständen bevorzugt. Aufgrund des hochbeanspruchten Zustands der tragenden Faserverbundschicht in Kombination mit der Gefahr des komprimierten Wasserstoffgases ist es unerlässlich, die Betriebssicherheit über die gesamte Lebensdauer des Druckbehälters zu gewährleisten. Konventionelle Methoden der periodischen zerstörungsfreien Prüfung (ZfP), z.B. Ultraschallprüfung und Sichtprüfung, haben dazu beigetragen, die Zuverlässigkeit und mechanische Sicherheit von Druckbehältern zu verbessern.

Die Umsetzung der strukturellen Zustandsüberwachung von FVW-Druckbehältern hat das Potenzial, deren zerstörungsfreie Prüfung zu ermöglichen, noch während der Behälter im Fahrzeug montiert ist. Dies wiederum wird voraussichtlich die Wartungs- und Zeitkosten reduzieren und die Benutzerzufriedenheit erhöhen, da die Inspektion schnell durchgeführt werden kann, ohne Unannehmlichkeiten für den Fahrzeugbesitzer darzustellen. Darüber hinaus sollen die von den Sensoren übermittelten Daten und das grundlegende Verständnis des Produkt- und Materialverhaltens weitere konstruktive Entwicklungen (z.B. Verringerung des Sicherheitsfaktors) ermöglichen. Die im Projekt angestrebte Entwicklung soll die Etablierung der Zustandsüberwachung vorantreiben und die Kundenakzeptanz der Wasserstoff-mobilität erhöhen.

Das allgemeine Ziel des Teilprojekts HylInnoTank ist die experimentelle und analytische Untersuchung des Einflusses von Schädigungen (z. B. Delamination, Impactschaden, Faserschädigung, Einschluss) auf das Ermüdungsverhalten von gewickelten FVW-Druckbehältern mittels Dehnungsfeldüberwachung durch faserbasierte Sensoren zur Lebensdauerprognose.

Das ITA hat einen robusten und reproduzierbaren Ansatz für die Instrumentierung von Druckbehältern aus faserverstärkten Verbundwerkstoffen entwickelt, bei den faseroptischen Sensoren in einem Multifilament-Wickerverfahren eingesetzt werden. Diese Methode ermöglicht die Integration von Sensoren in die inneren und äußeren Schichten des Laminats. Im Anschluss an die Herstellung des Behälters wird eine gründliche Bewertung durchgeführt, um die Funktionalität der integrierten Sensoren zu überprüfen. Das ITA hat für die Sensorauswahl eine

handelsübliche Hochtemperatur-Acrylat-beschichtete Single-Mode-Faser ausgewählt. Der Einsatz integrierter faseroptischer Sensoren bei hydraulischen Prüfungen (Berstversuchen) an instrumentierten Druckbehältern erleichtert die Überwachung der Dehnungsentwicklung. Die Anordnung der Sensoren innerhalb des Laminats ist ein entscheidender Faktor für die Wirksamkeit der Dehnungsüberwachung. Bei Sensoren, die in die inneren Lagen des Laminats integriert waren, führte die starke Mikrobiegung der Sensoren zu einer geringen reflektierten Signalintensität, was zu unvollständigen Dehnungsprofilen bei hohen Dehnungswerten führte. Im Gegensatz dazu konnten die zwischen den äußeren Lagen des Laminats positionierten Sensoren die Dehnungsentwicklung bis zum Versagen des Druckbehälters überwachen. Um diese ungünstige Versagensart zu umgehen, müssen das Ventildesign und der Wickelprozess so angepasst werden, dass das Versagen des Behälters durch Faserbruch in der Trommelregion erfolgt. Dies ist die optimale Versagensart für Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen. Um diese ungünstige Versagensart zu umgehen, müssen die Ventilkonstruktion und der Wickelprozess unbedingt geändert werden. Dadurch wird sichergestellt, dass das Versagen des Behälters durch Faserbruch in der Trommelregion erfolgt. Dies ist die optimale Versagensart für Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Zuwendungsempfänger

Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)

Titel der Förderung

WASSERSTOFF: Wartungsarme mobile Hochdruckspeicher (HyInnoTank)

Verantwortliche Autoren

Oscar Bareiro

Förderkennzeichen

03ZU1115DA

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZU1115DA gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

## **Sachbericht zum Verwendungsnachweis**

### **Teil II – Darstellung der durchgeführten Arbeiten**

**Projekt:** WASSERSTOFF: Wartungsarme mobile Hochdruckspeicher (HyInnoTank) - A

**Projektlaufzeit:** 01.10.2021 – 30.09.2024

**Förderkennzeichen:** 03ZU1115DA

#### **• Notwendigkeit und Angemessenheit des Projekts**

Das übergeordnete Ziel des Teilprojektes HyInnoTank - Wartungsarme mobile Hochdruckspeicher, das im Rahmen des Zufunkclusters Wasserstoff (Gesamtlaufzeit 9 Jahre, 3 aufeinander aufbauende Teilprojekte) erreicht werden soll, ist die Reduktion des Zeit- und Kosten-aufwandes periodischer Qualitätssicherungsprüfungen im Betrieb sowie die sichere Erhöhung der Lebensdauer mittels eines Zustandsüberwachungssystem und Vorhersage der Restlebensdauer von FVW-Druckbehältern für mobile Anwendungen.

Das allgemeine Ziel des Teilprojekts HyInnoTank ist die experimentelle und analytische Untersuchung des Einflusses von Schädigungen auf das Ermüdungsverhalten von gewickelten FVW-Druckbehältern mittels Dehnungsfeldüberwachung durch faserbasierte Sensoren zur Lebensdauer-prognose.

Die spezifischen Ziele des Teilprojekts HyInnoTank sind folgendermaßen definiert:

- Auswahl geeigneter faserbasierter Sensoren und Instrumentierung von gewickelten FVW-Druckbehältern, die in unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt werden
- Experimentelle Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens unter repräsentativen Last-fällen von vorgeschädigten gewickelten FVW und FVW-Druckbehältern und gleichzeitige Beobachtung des Dehnungsfeldes
- Numerische Analyse mittels FE zur Ermittlung der Sensorplatzierung und Modellierung des Ermüdungsverhaltens von gewickelten FVW-Druckbehältern unter Berücksichtigung des Einflusses von Vorschädigungen
- Basierend auf experimentellen Ergebnissen der Dehnungsfeldüberwachung und numerischer Modellierung, Vorhersage der Restlebensdauer von vorgeschädigten gewickelten FVW-Druckbehältern
- Bewertung des Einflusses von Materialien, Herstellungsparametern und Herstellungsverfahren auf das Ermüdungsverhalten von gewickelten FVW-Druckbehältern und Überwachung der Herstellungsparameter mittels integrierter Sensoren
- Analyse der Einsetzbarkeit der entwickelten Überwachungstechnologie zur Wasserstoffspeicherung in kryogenen Druckbehälter in der Luftfahrtindustrie

#### **• Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Um die angestrebten Zielsetzungen zu erzielen, wurde ein Konsortium aus drei deutschen Unternehmen, darunter ein Großunternehmen und zwei kleine Unternehmen, sowie zwei Forschungseinrichtungen gebildet. Die Mitglieder des Konsortiums und ihre spezifischen Kompetenzen, die für das Projekt relevant sind, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. HyInnoTank Konsortium und Kompetenzen

Partner	Kategorie	Kompetenz
Nprox	Großunternehmen	Entwicklung und Herstellung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen zur Wasserstoffspeicherung, Endnutzer
Kümpers	Kleinunternehmen	Faserverstärkungsmaterial (Tow-preg)
Isatec	Kleinunternehmen	Mechanische Analyse und Auslegung von Komponenten aus Faserverbundwerkstoffen
ITA	Forschungseinrichtung	Entwicklung von Druckbehältern und deren Herstellungsverfahren, u. a. durch das Multifilament-Wickelverfahren
IKV	Forschungseinrichtung	Entwicklung von Druckbehältern und deren Herstellungsverfahren, u. a. durch das Nass-Wickelverfahren. Messtechnik für faseroptische Messungen

• **Planung und Ablauf des Vorhabens**

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

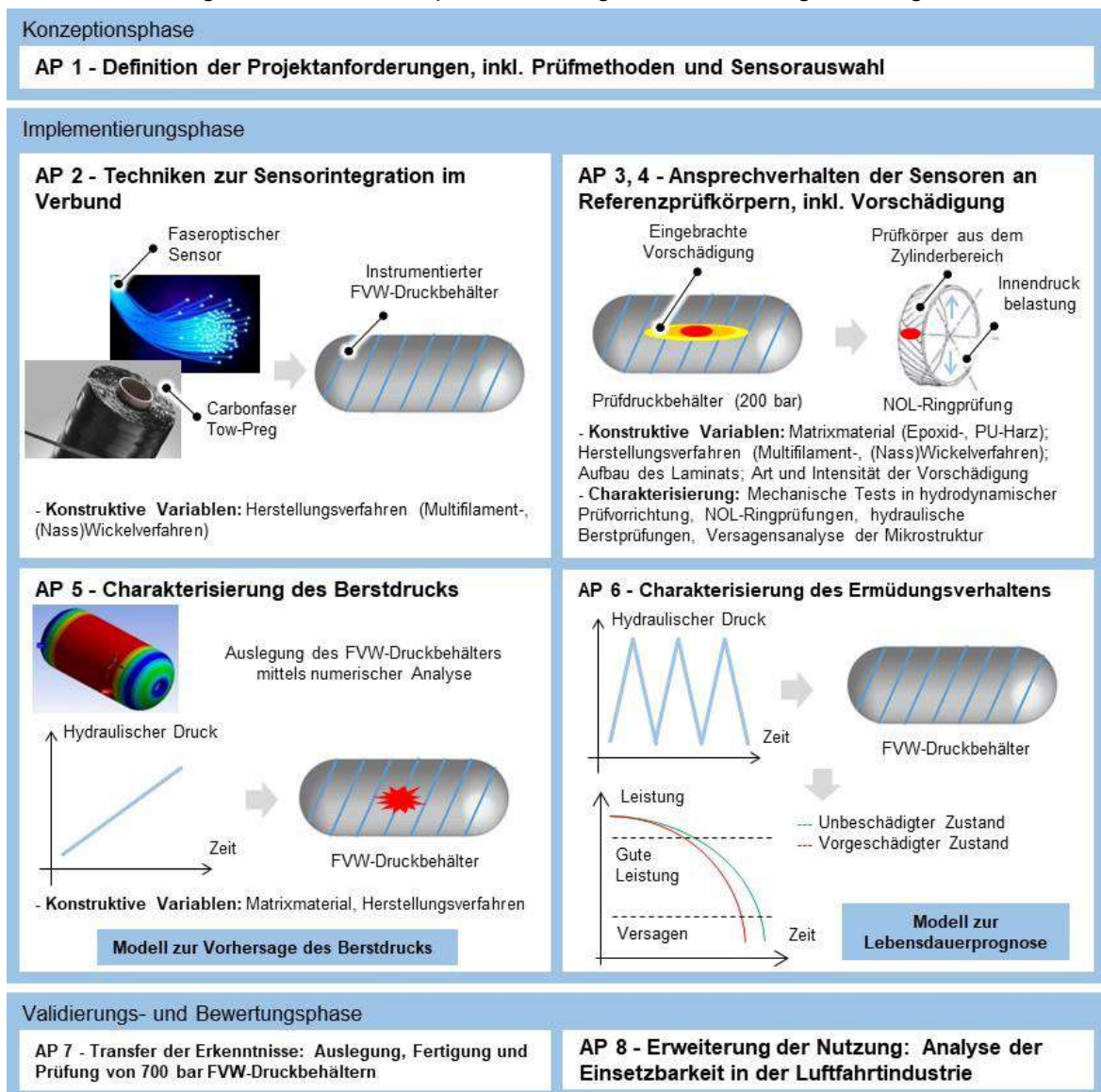


Abbildung 1. Arbeitsplan im Vorhaben HyInnoTank.



lastwechselversuchen wurde die Dehnungsentwicklung bis zu 22.000 Lastzyklen überwacht, anschließend versagte der Behälter durch Leckage.

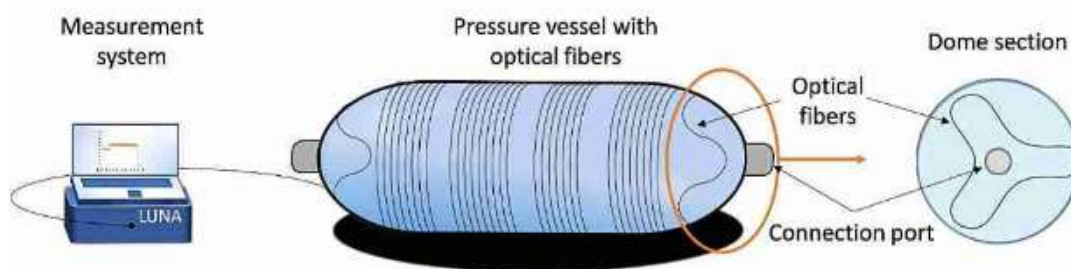


Abbildung 3. Schematische Darstellung eines Druckbehälters aus Verbundwerkstoff mit um den zylindrischen Teil gewickelten optischen Faserschichten. In den Dombereichen sind die optischen Fasern wie rechts abgebildet angeordnet [1].

[2] berichtete über die Instrumentierung von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen mit einer Single-Mode SM 1500 PI-beschichteten optischen Faser (Kern-, Cladding-, und Außendurchmesser: 4,2/80/97  $\mu\text{m}$ ) (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 [2].

<sup>2</sup> Dorit Munzke, Eric Duffner, René Eisermann, Marcus Schukar, André Schoppa, Mariusz Szczepaniak, Jörg Strohhäcker, 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>.

## • Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

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.

### AP 1 - Festlegung von Projektanforderungen und Auswahl geeigneter faserbasierter Sensoren und Instrumentierung von gewickelten FVW-Druckbehältern, die in unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt werden

- Festlegung von Projektanforderungen

Die Anforderungen an das Vorhaben wurden gemeinsam mit allen Partnern besprochen und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Druckbehälterauslegung
  - Erwarteter Berstdruck: 700 bar
  - Füllungselemente werden entworfen und auf dem Domabschnitt angebracht, um die Geometrie des Liners anzupassen und die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs zu verbessern
- Liner (Abbildung 5)
  - Der Liner ist nicht zertifiziert, für interne Prüfungen beim Lieferanten hergestellt
  - Werkstoff: HDPE. Abmessungen: Durchmesser = 130 mm; Länge = 270 mm; Volumen = ca. 4 L
- Werkstoffe
  - Tow-preg (Kümpers): K-PREG 002-002-70-00 (T700SC- Carbonfasern von Toray)
  - Fasergewichtsanteil = 70,0 +/- 1,5%
- Ansatz zur Überwachung des strukturellen Zustands des Druckbehälters
  - Dehnungsentwicklung bei Durchführung von hydraulischen Prüfungen: Berst- und Lastwechselprüfungen
  - Art der Beschädigungen am FVW-Behälter, die berücksichtigt werden sollen: Delamination, Impactschaden, Faserschädigung, Einschluss

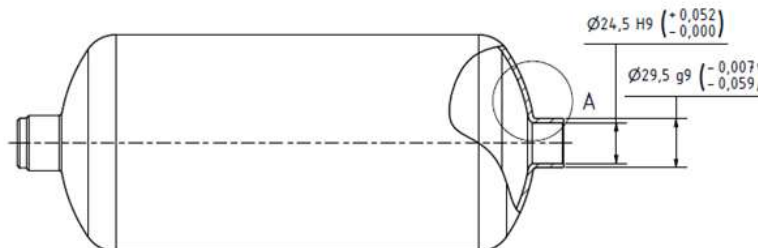


Abbildung 5. Liner-Geometrie zur Auslegung, Fertigung und Prüfung von Druckbehältern im kleinen Maßstab.

- Bei der Sensorwahl hat sich das ITA für eine kommerziell erhältliche, mit Hochtemperatur-Acrylat beschichtete Singlemode-Faser entschieden.
- ITA hat einen robusten und reproduzierbaren Ansatz zur Instrumentierung von Druckbehältern aus Faserverbundwerkstoffen mit faseroptischen Sensoren im Multifilament-Wickelverfahren entwickelt. Das Verfahren ermöglicht die Integration von Sensoren in die Innen- und Außenschichten des Laminats. Die Bewertung nach der Behälterherstellung beweist die einwandfreie Funktion der integrierten Sensoren.

### **AP3, AP6 - Experimentelle Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens unter repräsentativen Lastfällen von vorgeschädigten gewickelten FVW und FVW-Druckbehältern und gleichzeitige Beobachtung des Dehnungsfeldes**

- Die Dehnungsmessung mittels integrierter faseroptischer Sensoren bei hydraulischen Prüfungen (Berstversuchen) an instrumentierten Druckbehältern ermöglicht die Überwachung der Dehnungsentwicklung. Die Positionierung der Sensoren im Laminat spielt eine wichtige Rolle bei der Dehnungsüberwachung. Bei Sensoren, die in die inneren Lagen des Laminats integriert sind, führte die hohe Mikrokrümmung der Sensoren zu einer geringen Intensität des reflektierten Signals, was zu unvollständigen Dehnungsprofilen bei hohen Dehnungswerten führte. Außerdem waren Sensoren, die zwischen den äußeren Lagen des Laminats positioniert waren, geeignet, die Dehnungsentwicklung bis zum Versagen des Druckbehälters zu überwachen.
- Zur Vermeidung dieser unerwünschten Versagensart sollten die Ventilauslegung und das Wickelverfahren mittels Multifilament-Wickelverfahren angepasst werden, um zu gewährleisten, dass der Behälter durch Faserbruch im Zylinderbereich versagt, was die erstrebenswerte Versagensart von Druckbehältern aus Verbundwerkstoffen ist.

### **AP 8 - Analyse der Einsetzbarkeit der entwickelten Überwachungstechnologie zur Wasserstoffspeicherung in kryogenen Druckbehälter in der Luftfahrtindustrie**

Die Erforschung der Umsetzbarkeit der Wasserstoffspeicherung in kryogenen Druckbehältern für die zivile Luftfahrtliteratur wurde vom ITA in Zusammenarbeit mit dem Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen (IST) durchgeführt, die Erkenntnisse sind hier zusammengefasst.

Klimaneutralität und Nachhaltigkeit sind seit Jahren die Hauptziele in der Luftfahrtforschung. Im Jahr 2019 hat die Luftfahrt das Klima mit knapp 785 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> belastet, was 3,06 % aller weltweit verursachten CO<sub>2</sub> Emissionen entspricht. Abbildung 14 ist zu entnehmen, dass dieser Anteil für die nächsten Jahre weiter steigen wird [3]. Um ein klimaneutrales Fliegen zu ermöglichen, müssen beispielsweise die durch die Luftfahrt entstehenden Emissionen reduziert, eine nachhaltige Methode zur Erzeugung der Antriebsleistung gefunden und die dazu passende Technik entwickelt werden. Hierzu steht die Verwendung von Batterien, E-Fuels oder Wasserstoff zur Diskussion.

---

<sup>3</sup> <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1200488/um-frage/weltweite-co2-emissionen-des-passagierflugver-kehrs/>. Letzter Zugriff am 08.09.2023.