



## Sachbericht zum Verwendungsnachweis

**Teil I: Kurzbericht**

**Teil II: Eingehende Darstellung**

|   |  |
|---|--|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>mefex GmbH   | <b>Förderkennzeichen:</b><br>03B11021B |
| <b>Vorhabenbezeichnung:</b><br>NIP II - FuE - Verbund: HyMon - Sensorbasierte Strukturüberwachung von automobilen Wasserstoff-Faserverbund-Druckbehältern; Teilvorhaben: Sensorbasierte Verbesserung der Behältermodellierung und Werkstoffbeschreibung |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2021 bis 31.10.2024   |  |
| <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.09.2021-31.10.2024   |  |



## Teil I: Kurzbericht

### 1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde

Durch die Speicherfähigkeit und vielseitige Anwendbarkeit spielt Wasserstoff eine zentrale Rolle, um zukünftige steigende Mobilitätsansprüche zu befriedigen und die einhergehenden Risiken des Klimawandels zu minimieren. H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen bieten sich hierbei als wirkungsvolle Technologie für elektrifizierte Fahrzeuge an, deren breite Markteinführung aber bislang mit vielen technischen und systemischen Risiken sowie hohen wirtschaftlichen Herausforderungen verbunden ist. Drucktanks zur Speicherung des gasförmigen Treibstoffs stellen ein Kernelement von H<sub>2</sub>-Antriebssystemen für Kraftfahrzeuge dar. Durch hohe Betriebsdrücke führt jeder Tankzyklus zu Zugspannungen im Material. Aufgrund des hohen Gefährdungspotentials des unter Druck stehenden Gases werden die Behälter mit hohen Sicherheitsfaktoren ausgelegt und im Betrieb regelmäßig überprüft. Die Prüfung des Tanks erfolgt derzeit in der Regel nur durch eine oberflächliche Sichtprüfung. Aus Sicht der Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit ist diese Validierung des Zustandes unzureichend aufgrund ihres subjektiven Charakters. Durch die On-Board-Strukturüberwachung von Druckbehältern mittels geeigneter Sensoren und Auswerteelektronik soll die Bewertung auf Basis von Structural-Health-Monitoring-(SHM)-Daten objektiviert und zukünftig eine dauerhafte bzw. regelmäßige Überwachung von mobilen H<sub>2</sub>-Speichern z.B. in Brennstoffzellenfahrzeugen oder Transportcontainern ermöglicht werden. Neben der Nutzung der SHM-Daten im Reparatur- und Servicefall, eröffnet sich zukünftig die Möglichkeit, im Rahmen von Rettungseinsätzen bei Fahrzeugunfällen oder Missbrauchsfällen, zielgerichtete Maßnahmen für eine sichere Fahrzeugbergung einleiten zu können.

### 2. Ablauf des Vorhabens

Die Partner des Projektkonsortiums Hymon setzten sich aus den Firmen Hexagon Purus GmbH (Kassel) -Projektleitung-, FEV Europe GmbH (Aachen), mefex GmbH (Darmstadt), dem Fraunhofer Institut LBF (Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit; Darmstadt), der Technische Hochschule Köln (Campus Gummersbach, AG Composites) und der RWTH Aachen University (Institut für Textiltechnik, ITA) zusammen.

Im Projekt erfolgte zunächst die gemeinsame Definition einer Anforderungsliste für das Sensorsystem. Daraus wurde durch FHG LBF eine Bewertungsmatrix abgeleitet anhand derer, in Abstimmung mit den Partnern, die Auswahl der verfolgten Messprinzipien Piezo-(Summer)-Sensoren, Dehnungsmessstreifen (DMS) und faseroptische Bragg-Sensoren getroffen wurde. Darüber hinaus verfolgte die TH Köln einen kostengünstigen Sensor-Ansatz mittels ringförmigem Dehnungsaufnehmer.

Die Methoden zur Sensorintegration und Signalauswertung wurden zunächst an Probekörpern und dünnwandigen Modellbehältern von mefex, FHG LBF, und Hexagon entwickelt und schließlich auf dickwandige H<sub>2</sub>-Druckbehälter übertragen. FHG LBF, mefex, TH Köln, Hexagon und FEV erarbeiteten gemeinsam die Schadensbewertung an den geprüften Probekörpern und Drucktanks. Wesentliche Arbeitsschwerpunkte waren hierbei die Unterscheidung unterschiedlicher Schädigungsmechanismen (Zwischenfaserbruch, Faserbruch, Delamination), die Integration der Messdaten unterschiedlicher Sensorarten, sowie die Entwicklung zusammenfassender Signal-Auswertemethoden. Das ITA



entwickelte eine Ablegeeinheit zur Integration von faseroptischen Sensoren bei der Herstellung der Druckbehälter im Nasswickelverfahren.

Die FEV definierte das Anforderungsprofil der Sensorik bezüglich der Fahrzeuganwendung und untersuchte zunächst die Nutzung bereits im Fahrzeug vorhandener Sensoren und Auswerteeinheiten, z.B. Airbag-Controller oder Fahrdynamiksensor. Es erfolgte der Aufbau eines Schlittenmodells, um realitätsnahe Schäden am Behälter zu erzeugen. Die FEV entwickelte ein „Proof-of-Concept“ eines on-Bord Überwachungssystem auf Basis einer Piezo-Summer-Sensorik zusammen mit einem freiprogrammierbaren Prototypen-Steuergerät samt externen Ladungsverstärkern. Das Messsystem wurde im Rahmen eines Fahrzeugdemonstrators/Prüfaufbaus umgesetzt und mittels Crash-Schlitten, sowie Behälterimpakt-Versuchen validiert.

### **3. Wesentlichen Ergebnisse**

Hymon konnte erfolgreich die Eignung der untersuchten Low-Cost Sensoren, insbesondere die „Piezo-Summer-Sensoren“ für AE-Anwendungen an Flachproben und Behälter aus Faser-Verbundmaterialien demonstrieren. Mittels kommerzieller Piezo-Summer wurden die in der Literatur bekannten typischen Frequenzbereiche für die Schädigungsmechanismen Faserbruch, Matrixbruch und Delamination an speziell gestalteten Flachproben bestätigt. Zusätzlich konnte die Steifigkeitsdegradation bei der zyklischen Prüfung als weiterer Indikator für Laminatschäden herangezogen werden.

Die auf Probenebene identifizierten Frequenzbereiche wurden als Basis zur Klassifizierung der Schädigungsereignisse verwendet und erfolgreich bei zyklischen Behälterprüfungen angewendet. Auf Behälterebene sind die Merkmale für Faserrisse zwar reproduzierbar, es konnte aber noch keine Warngrenze für bevorstehendes Behälterversagen abschließend ermittelt werden. Hierzu müssen in weiterführenden Untersuchungen der Rauschpegel der Sensoren weiter reduziert werden, um das Einkoppeln von elektrischen und mechanischen Störsignalen stärker zu verringern.

Mit dem in Hymon entwickelten Messprinzip, einer Piezo-Summer-Sensorik zusammen mit einem freiprogrammierbaren Prototypen-Steuergerät samt externen Ladungsverstärkern, konnte erstmalig die prinzipielle Machbarkeit eines On-Board-Messkonzept für eine Behälterüberwachung im Mobilitätssektor aufgezeigt werden. Diese Entwicklung stellen die Grundlagen zur Serienentwicklung eines zukünftigen, automotiven Steuergerätes mit integrierten Ladungsverstärkern für die Piezosensoren und dem neu entwickelten ASIC dar.

Das Projekt Hymon hat somit wesentliche Schritte zur On-Board-Überwachung von H<sub>2</sub>-Speichersystemen in Fahrzeugen, aber auch bei H<sub>2</sub>-Transportanwendungen, durch sensorbasierte, objektivierbare Strukturüberwachung aufzeigen können, um so zukünftig die Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit von H<sub>2</sub>-Anwendungen und letztlich deren Kundenakzeptanz zu erhöhen.

## **Teil II: Eingehende Endbericht (mefex)**



## **1. Wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, erreichten Nebenergebnisse, gesammelten wesentlichen Erfahrungen**

### **AP 1: Definition der Anforderungsprofile**

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden Anforderungsprofile definiert. Zusammen mit Hexagon wurden die Anforderungen für die Dehnungssensoren anhand von bereits berechneten Behältern abgeleitet.

#### **AP 1.1: Definition Anforderungsprofil Fahrzeuganwendung**

Dieser Punkt wurde hauptsächlich von FEV, Hexagon und dem LBF bearbeitet. mefex unterstützte die Partner mit Informationen zum Behälterversagen und den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen bei Faser-Kunststoff-Verbunden.

#### **AP 1.2: Definition Anforderungsprofil Behälterentwicklung**

Unterstützung bei der Definition und der Aufstellung des Anforderungslisten. Schwerpunkt waren behälterbezogene Fragestellungen, die aus der Berechnung abgeleitet werden konnten. Auf Basis bereits berechneter und optimierter Behälter deren Funktion in Versuchen nachgewiesen wurde, konnten Schichtanzahl und Winkel abgeschätzt werden. Damit wurden grobe Steifigkeiten und zu erwartende Maximaldehnungen im Behälter abgeschätzt. Zudem wurde ein Versuchsplan aufgestellt der Probekörper- und Behälterprüfungen beinhaltet.

#### **AP 1.3: Technologie-Recherche, Bewertungsmatrix, Sensorvorauswahl**

Unterstützung bei der Sensorauswahl. Schwerpunkt waren hier Fragestellungen rund um den Werkstoff und auftretende Dehnungen im Behälter. Anhand von Beispielrechnungen konnten z.B. maximale Dehnungen unter bestimmten Lasten abgeschätzt werden. Da die Behälter mit einem Sicherheitsfaktor von 2.35 ausgelegt werden und gängige Kohlenstofffasern eine Bruchdehnung von 1.8% besitzen, sind mit Dehnungen zwischen 0.8 und 1.8% zu rechnen. Für die Dauerversuche muss eine Zyklusfestigkeit der Sensorik bei etwa 1% Dehnung und 50000 Zyklen gewährleistet werden. Zudem entstehen auf der Behälteroberfläche Zwischenfaserbrüche, die die Funktion der Sensoren nicht beeinträchtigen dürfen.

### **AP 3: Applikationsentwicklung von Sensorsystemen auf der Basis von Probekörpern**

AP3 wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer LBF, der ITA, der TH-Köln und Hexagon bearbeitet. mefex war in diesem AP für die Auslegung und Herstellung der Probekörper zuständig. Die Proben wurden am LBF geprüft.

#### **AP 3.1: Definition/Simulation/Fertigung geeigneter Probekörper**



Um die ausgewählten Sensortypen zu bewerten und eine Vorauslese durchzuführen, wurden verschiedene Probekörpertypen entwickelt und gefertigt. Für die unterschiedlichen Versagensarten, die im Behälter erwartet werden, wurden folgende Probekörper auf Plattenbasis genutzt:

- 1.) UD Hybrid Proben (hohe Dehnungen und Faserbruch ohne Komplettversagen)
- 2.) Kreuzproben mit Zwischenfaserbruch in der Probe und auf Oberfläche
- 3.) TCT-Proben zur Untersuchung von Delaminationen

Die Berechnung der Probekörper und der erwarteten Versagenskräfte wurden mit der Software  $\mu$ Chain von mefex durchgeführt.

Die Probekörperfertigung wurde iterativ auf Basis von bei mefex erstellten Schlibfbildern und Prüfungen von Testproben optimiert. Die ersten hergestellten Platten wiesen einen hohen Gradienten im Faservolumenanteil auf. Durch die Optimierung der Fertigung und der verwendeten Halbzeuge konnten schlussendlich deutlich gleichmäßigere Schichtdicken und ein eindeutigeres Versagen der Probekörper generiert werden. Die in diesem Projekt entwickelten und beim Fraunhofer LBF / mefex geprüften Probekörper konnten im Anschluss genutzt werden, um die verschiedenen Schädigungsmechanismen einzeln zu detektieren.

Um den Wickelprozess in den Probekörpern besser abzubilden, wurden zusätzlich Rohrproben eingesetzt. Diese haben den großen Vorteil, dass keine Randeefekte den Schädigungsverlauf beeinflussen. Der Schichtaufbau wurde von mefex berechnet und die Probekörper dann in Teilen bei mefex, am Institut für Textiltechnik in Aachen (im Folgenden ITA) und bei Hexagon gewickelt.

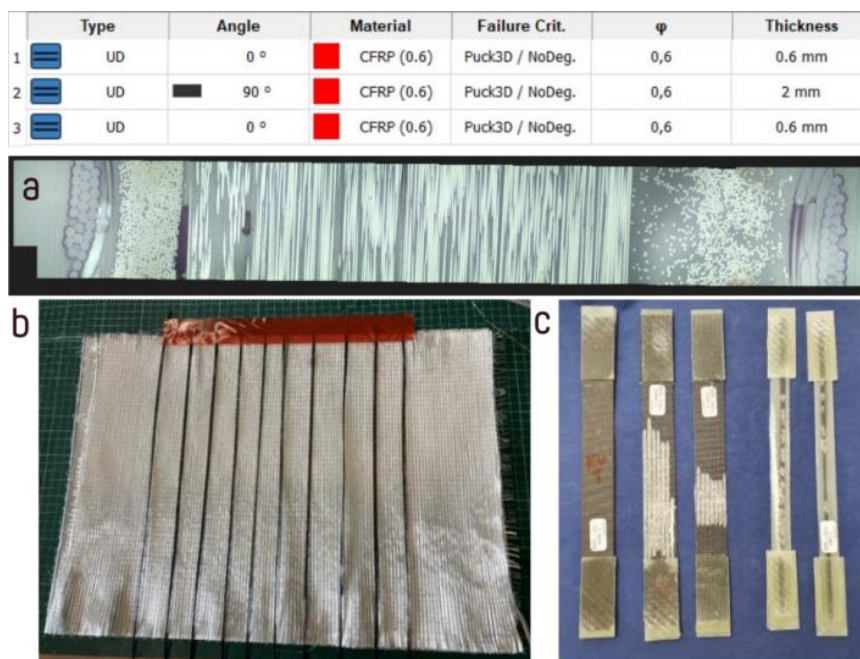
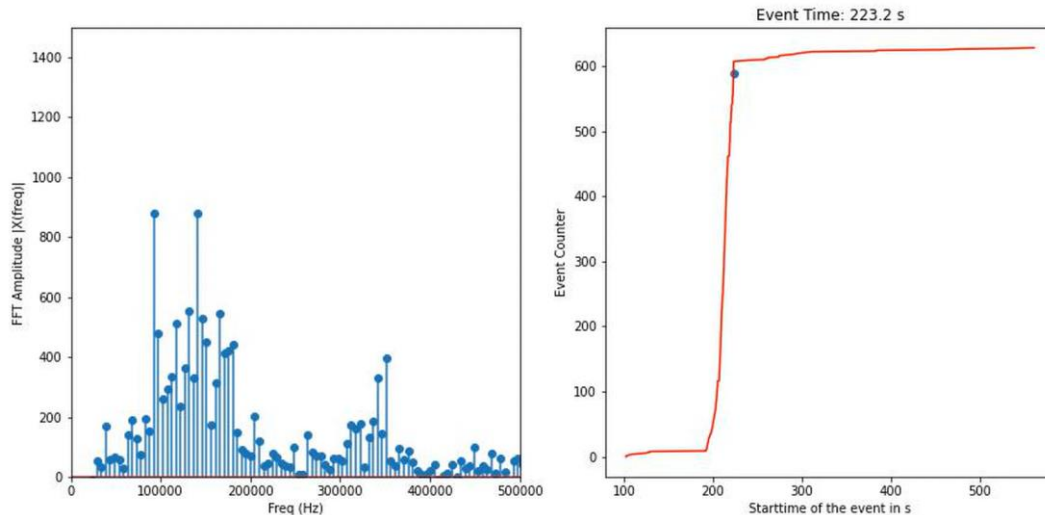


Abbildung 1: (a) Auslegung in  $\mu$ Chain - Kreuzverbund im Schlibfbild. Erste Iteration mit Gradienten im Faservolumenanteil. (b) Herstellung der Platten. (c) Geprüfte Probekörper. Von links nach rechts: Kreuzverbundprobe, TCT-Proben und Hybridproben.



### AP3.2: Applikationsentwicklung zu Schallemissionsmessungen

Die Prüfungen an den Probekörpern wurden in enger Absprache mit mefex beim Fraunhofer LBF durchgeführt. Die Messdaten wurden parallel bei beiden Projektpartnern ausgewertet.



*Abbildung 2: Beispiel einer Auswertung der Piezo-Sensorik (Hybridprobe). Zu erkennen sind Frequenzspektren zwischen 100 und 150 kHz und über 300 kHz. Die Rohdaten vom LBF wurden in Python ausgewertet.*

Anhand der Probekörpermessungen konnten die Frequenzspektren der erwarteten Versagensarten ermittelt werden. Zusätzlich wurden Dehnungen mittels DMS und Fiber-Bragg-Sensorik aufgenommen und verglichen. Die an den Probekörpern aufgenommenen Messdaten wurden mit Hilfe von Python-Skripten analysiert. Schlussendlich wurde zu jeder Prüfung ein Video erstellt, in dem die einzelnen Ereignisse dargestellt werden. Die Videos wurden zusammen mit den Projektpartnern analysiert und ausgewertet.

### AP 3.3: Applikationsentwicklung für dehnungsbasierte Sensorik

Da Dehnungsmessstreifen bei den erwarteten hohen Dehnungen nicht zyklensfest sind, wurden zusätzlich Versuche mit Fiber-Bragg-Gittern durchgeführt. Im Behälter entstehen bei niedrigem Druck bereits Zwischenfaserbrüche, die Störungen verursachen können. Zur Untersuchung der Eignung der Sensoren wurden zusätzlich zu den Flachproben gewickelte Rund-Probekörper entwickelt und in Zusammenarbeit mit der ITA in Aachen hergestellt. Die Prüfung wurde dann wieder bei mefex durchgeführt. Für die genutzte Messtechnik war das Fraunhofer LBF verantwortlich.

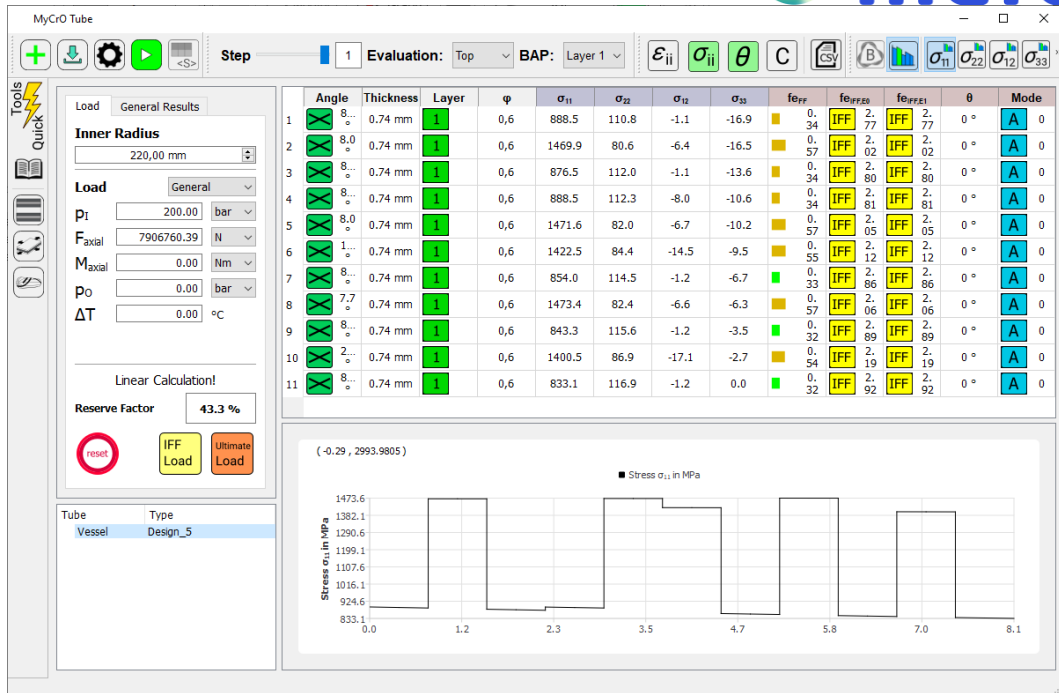


Abbildung 3: Typischer 200 bar Behälter. Bereits unter Arbeitsdruck sind alle Schichten mit Zwischenfaserbrüchen gesättigt. Die Zwischenfaserbruchanstrengung liegt bei über 2.

Es zeigte sich, dass die Zwischenfaserbrüche einen großen Einfluss auf die zu messenden Dehnungen haben können. Durch eine komplexe Verformung der Glasfaser scheint das Messsignal deutlich an Qualität zu verlieren. Ähnliche Probleme wurden auch in AP4 in den Messungen am Behälter identifiziert.

Für den Spezialfall Behälter mit sehr früher Schädigung des Laminats durch Zwischenfaserbrüche, scheinen Fiber-Bragg-Sensoren deshalb weniger geeignet zu sein.

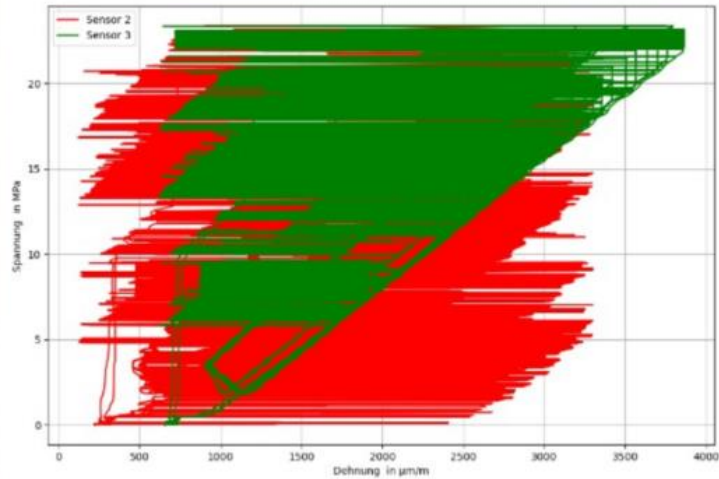


Abbildung 4: Fiber-Bragg-Probekörper und aufgenommenener Dehnungsverlauf. Durch Störungen springt das Signal extrem.

#### AP 3.4: Bewertung der Sensorkonzepte auf der Basis von Probekörpern

Die Versuche an Probekörpern ergaben folgendes Ergebnis:

- 1.) Dehnungsmessstreifen scheiden aufgrund der Zyklfestigkeit aus. Können aber gut zum Abgleich der Simulationsmodelle ohne Schädigungsberücksichtigung genutzt werden.
- 2.) Fiber-Bragg-Sensoren sind aufgrund der Störungen des Messsignals durch Zwischenfaserbrüche weniger geeignet.
- 3.) Mit Hilfe von den ausgewählten Piezo-Sensoren konnten die Schädigungstypen detektiert und unterschieden werden

Piezo-Sensoren scheinen am besten geeignet zu sein die Behälterschädigungen zu detektieren und richtig einzuordnen. In den Behälterversuchen wurde sich deshalb auf diese Sensorart konzentriert. Trotzdem wurden Dehnungsmessstreifen und Fiber-Bragg-Sensoren parallel weiter genutzt, um möglichst viele Informationen aus den sehr zeitintensiven Versuchen zu generieren. Verformungsdaten, die aus Versuchen mit Behältern gewonnen wurden, konnten zur Validierung der Behältermodelle genutzt werden. Damit konnte sichergestellt werden, dass die berechneten Versagenstypen und -Orte richtig vorausgesagt wurden. Auf Basis dieser Modelle wurden die Sensorpositionen bestimmt.

#### AP 4: Applikationsentwicklung von Sensorsystemen auf der Basis von Druckbehältern

AP4 wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer LBF, der ITA, der TH-Köln, Hexagon und dem FEV bearbeitet. mefex war für die Berechnung der Behälter und Applikation der Dehnungssensoren zuständig. Hierzu wurden die Prüfungen bei Hexagon begleitet und die aufgezeichneten Dehnungen mit den Messdaten vom LBF synchronisiert.

##### AP 4.1: Auswahl und Auslegung Versuchsbehälter



In Absprache mit Hexagon wurden von mefex zwei neue Behälterdesigns entwickelt, um verschiedene Versagenstypen reproduzierbar abprüfen zu können:

- 1.) Modellbehälter 1A (MB1A) – Zylinderversagen
- 2.) Modellbehälter 1B (MB1B) – Domversagen

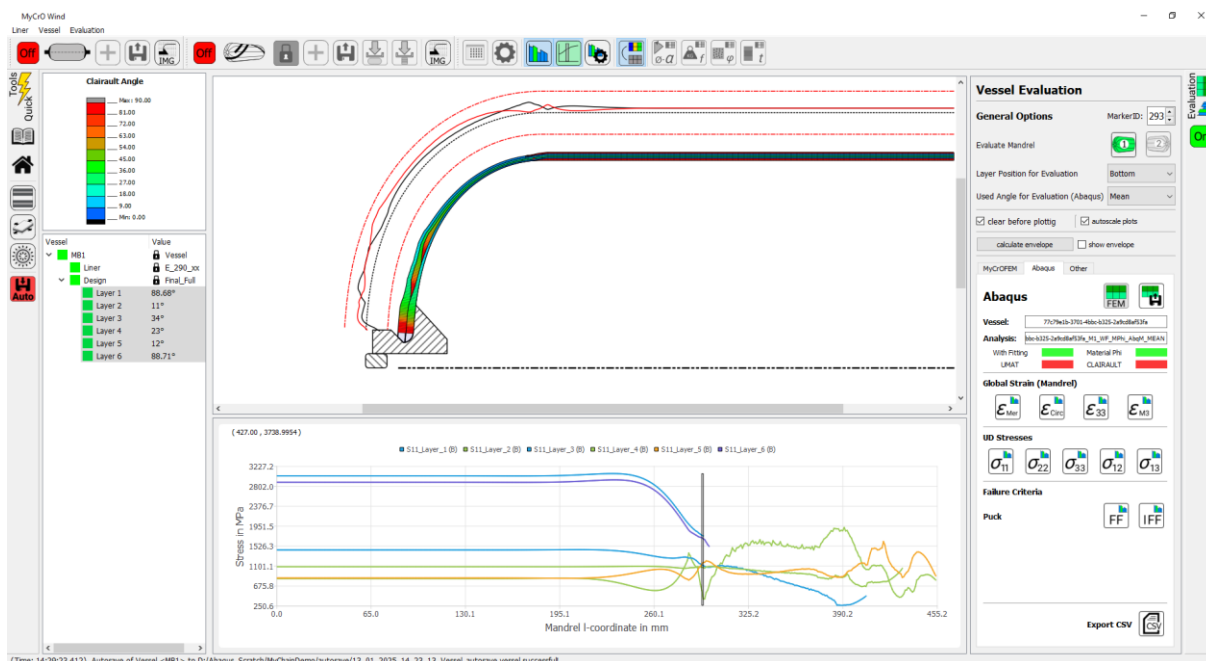
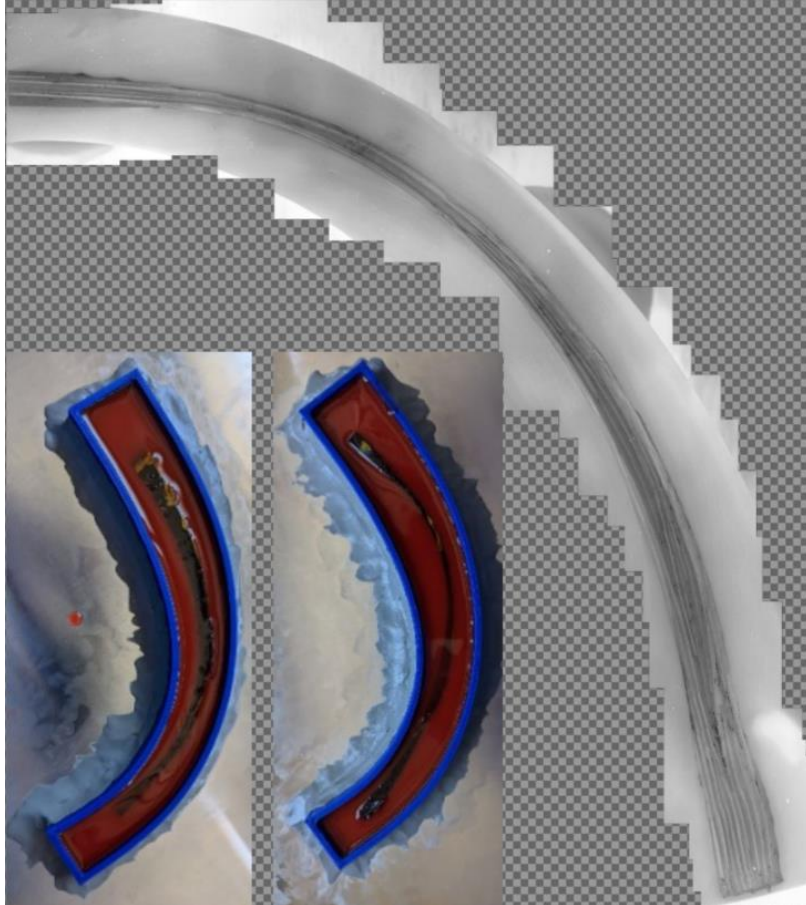


Abbildung 5: MB1A Behälterdesign. Das Design wurde speziell für das Projekt entwickelt. Die Auslegung erfolgte mit der Software  $\mu$ Chain

Die Behälterdesigns wurden mit der Software  $\mu$ Chain und Abaqus von mefex ausgelegt und bei Hexagon gefertigt. Aus den ersten Behältern wurden Schlifffbilder vom Dom hergestellt und unter dem Mikroskop untersucht. Die aus 40 Einzelbildern zusammengesetzten Bilder konnten mit der Berechnung verglichen werden und zeigten wieder eine sehr gute Übereinstimmung in den berechneten Polöffnungen und Dickenverläufen.



*Abbildung 6: Eingegossene Behälterdome und nach dem Polieren erstelltes Schliffbild.*

Zusätzlich wurden weitere bereits bei Hexagon vorhandene Behälterdesings nachgerechnet (MB2-MB4), um die gemessenen Verformungen mit den Rechnungen zu vergleichen und die Belastungen für die anstehenden Versuche zu ermitteln. Dazu mussten die Geometrien und Wickeldaten übernommen werden. Im Gegensatz zu den dünnwandigen MB1 Designs waren diese Behälter deutlich dickwandiger.

Die Modelle wurden entsprechend komplexer. Mit Hilfe von  $\mu$ Chain wurde die Behälterwicklung simuliert und FE-Modelle exportiert. Neben statischen Berechnungen (Berstdruck) wurden zusätzlich Fallturmversuche simuliert, um die notwendige Prüfenergie zu bestimmen. Dazu wurde der Fallturm in Teilen nachgebildet und die Eindringung der Fallturmspitze simuliert. Die Behälter wurden anschließend im Fallturm vorgeschädigt und mit voller Sensorik geprüft.

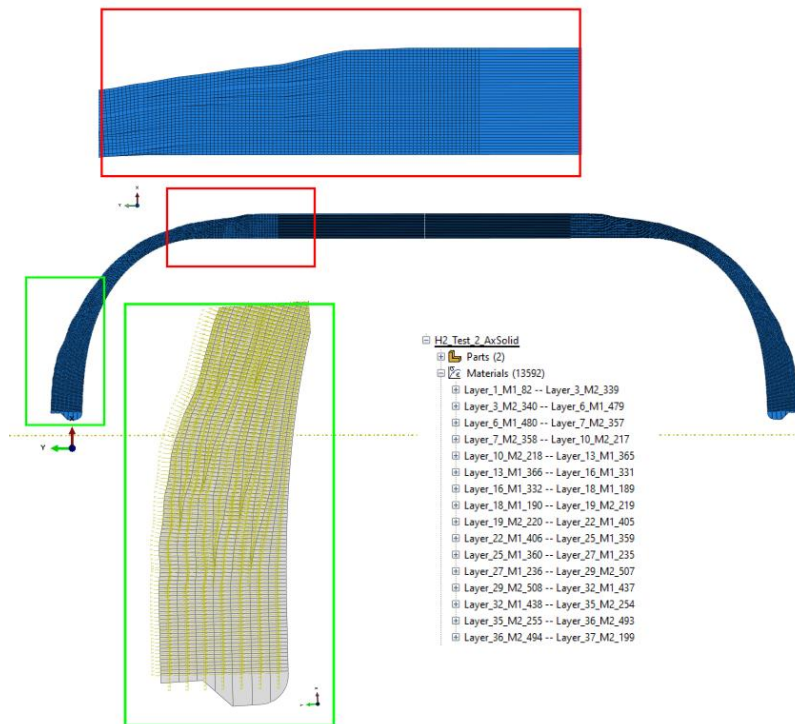


Abbildung 7: H2 Beispielbehälter mit etwa 40 Lagen. Die FE-Modelle sind sehr komplex, da sehr viele verschiedene Werkstoffkombinationen berücksichtigt werden müssen. In diesem Beispielbehälter, der ähnlich viele Schichten wie MB4 besitzt, müssen 14000 Werkstoffe generiert werden.

Auch diese Prüfung wurde wieder simuliert und mit dem Versuch verglichen. Aufgrund des komplexen Versagens mit großflächigen Delaminationen ist eine genaue Abschätzung der Resttragfähigkeit sehr schwierig. Die benötigten Energien für den Fallturm konnten aber vorab gut abgeschätzt werden, um die Schädigung in den Versuchen richtig einzustellen. Die Vorschädigung sollte nicht zu groß sein, damit der Schädigungsverlauf im Zyklenversuch aufgenommen werden konnte.

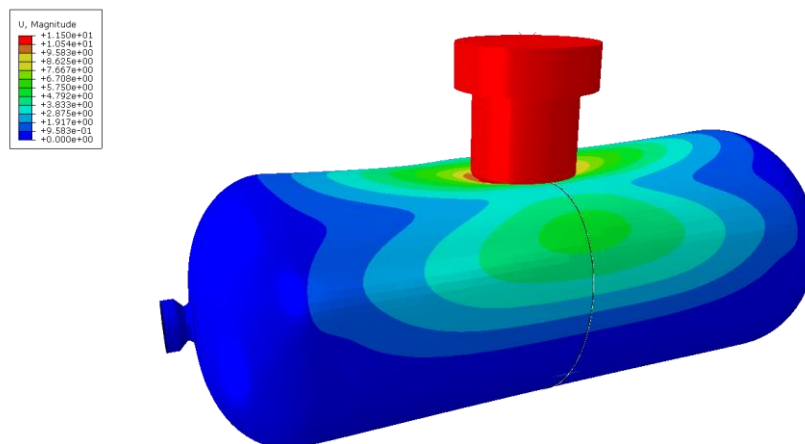


Abbildung 8: Behältermodell zur Bestimmung der notwendigen Schädigungsenergie im Fallturmversuch



Für die oben genannten Berechnungsmodelle wurden zusätzliche Materialparameter ermittelt. Hexagon stellte Fasern und Harz zur Verfügung. Bei mefex wurde mit den Komponenten ein Rohr gewickelt. Daraus konnten NOL-Ringe hergestellt und geprüft werden.



Abbildung 9: Bei mefex hergestellte NOL-Ringe vor und nach der Prüfung.

Mithilfe eines FE-Modells des Probekörpers wurden die wichtigsten Kennwerte für die Behältermodelle ermittelt. Die Auswertung des Modells ergab Festigkeiten und Moduln in Faserrichtung. Die so ermittelten Kennwerte wurden anschließend in die Behältermodelle übernommen. Die übrigen Kennwerte sind für die Auslegung der Behälter weniger von Bedeutung und wurden aus Erfahrungswerten bzw. Datenblattangaben geschätzt.

#### AP 4.2: Vorbereitung der Behälterprüfung

Die bei Hexagon hergestellten Behälter wurden bei mefex und dem Fraunhofer LBF für die Prüfung vorbereitet. Sensorpositionen wurden über Berechnungsmodelle ermittelt und dokumentiert. Nach der Applikation der Sensoren wurden alle Sensorpositionen noch mal exakt vermessen. Abschließend wurden Testmessungen bei mefex und dem LBF durchgeführt, um sicherzustellen, dass in den Versuchen bei Hexagon alles funktioniert. Die Verkabelung musste im letzten Schritt noch gegen Transportschäden gesichert werden. Insgesamt wurden 15 Behälter mit Sensoren bestückt und anschließend bei Hexagon geprüft.



Figure 1: Behälter vor und nach der Sensorapplikation bei mefex. Dehnmessstreifen wurden aufgebracht und für die Messung bei Hexagon vorbereitet.

#### AP 4.3: Simulative Übertragung der Lasten auf die Schädigung in Hochdrucktanks Analyse der kritischen Schadensausmaße

Mit Hilfe der Behältermodelle wurden kritischer Druck und Energien für den Fallturm berechnet. Zudem wurden Abschätzungen für die TH-Köln durchgeführt welche Dehnungen unter Berücksichtigung der Zwischenfaserbrüche erwartet werden.

Hierzu konnte das analytische Modell von  $\mu$ Chain genutzt werden. Über das enthaltende Python Interface wurden Schädigungen simuliert und die Dehnungsverläufe über dem Innendruck berechnet. So konnte die Messtechnik der TU-Köln an die verschiedenen Behälter angepasst werden.

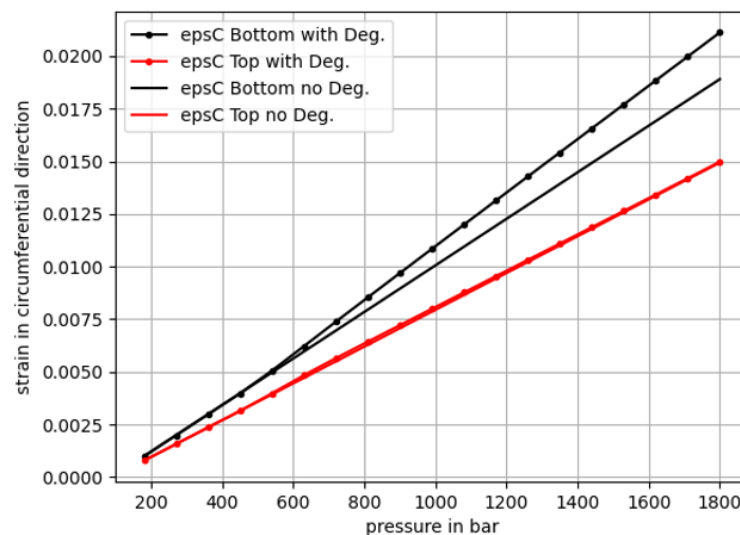


Abbildung 10: Erwartete Dehnungen im Zylinder bei unterschiedlichen Schädigungen



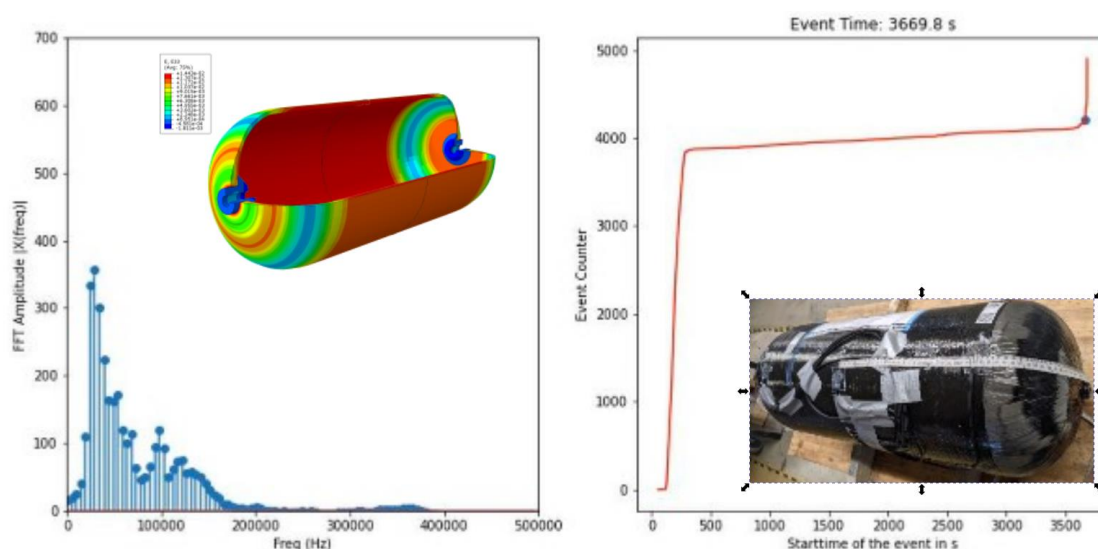
Ja nach Schädigungsgrad und Druck reduzieren sich die Dehnungen nur um bis zu 0.05%. Diese Dehnungsänderung tritt allerdings nur sehr lokal auf und ist deshalb schwer mittels Sensorik zu detektieren.

#### AP 4.4: Herstellung Modellbehälter und Sensorapplikation

Die Behälter wurden bei Hexagon hergestellt und anschließend zu mefex geschickt. Hier wurden die DMS und Piezo-Sensoren appliziert. Anschließend wurden die Behälter zusammen mit der benötigten Messtechnik in den Prüfanlagen von Hexagon geprüft. Die Messungen im Versuch wurden dabei vom Fraunhofer LBF und mefex durchgeführt. Anschließend wurden die Daten in enger Abstimmung mit den beteiligten Partnern ausgewertet und verglichen.

#### AP 4.5: Sensorprüfung an Modellbehältern

Auf die MB1 und MB2 Behälter wurden Dehnungsmessstreifen aufgebracht, um die Verformung mit den Berechnungsmodellen zu vergleichen.



*Abbildung 11: Auswertung eines mit DMS und Piezo-Sensoren bestückten Behälters.*

Zusätzlich wurde ein vorhandenes Hybridbehälterdesign (MB2) nachgerechnet. Die Dehnungen wurden während der Behälterprüfungen mitgemessen und nachträglich mit den Berechnungen verglichen.

Die berechneten Dehnungen unterschieden sich nur minimal von den gemessenen. Die Behältermodelle konnten somit sehr gut zur Bewertung der auftretenden Schädigungen und zur Ermittlung des Berstdrucks genutzt werden. Anhand der Behältermodelle konnte bestimmt werden in welchem Bereich des Behälters die verschiedenen Schädigungstypen wahrscheinlich auftreten und wo mit dem finalen Versagen zu rechnen ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Rechnungen das statische Versagen im Bersttest voraussagen und eine wechselnde Belastung aufgrund von zusätzlichen möglichen Schädigungen wie z.B. Delaminationen das Versagen bei schlechter Auslegung ändern kann. Auf Basis

dieser Informationen wurden die dehnungs- und schallbasierten Sensoren auf dem Behälter verteilt aufgebracht.

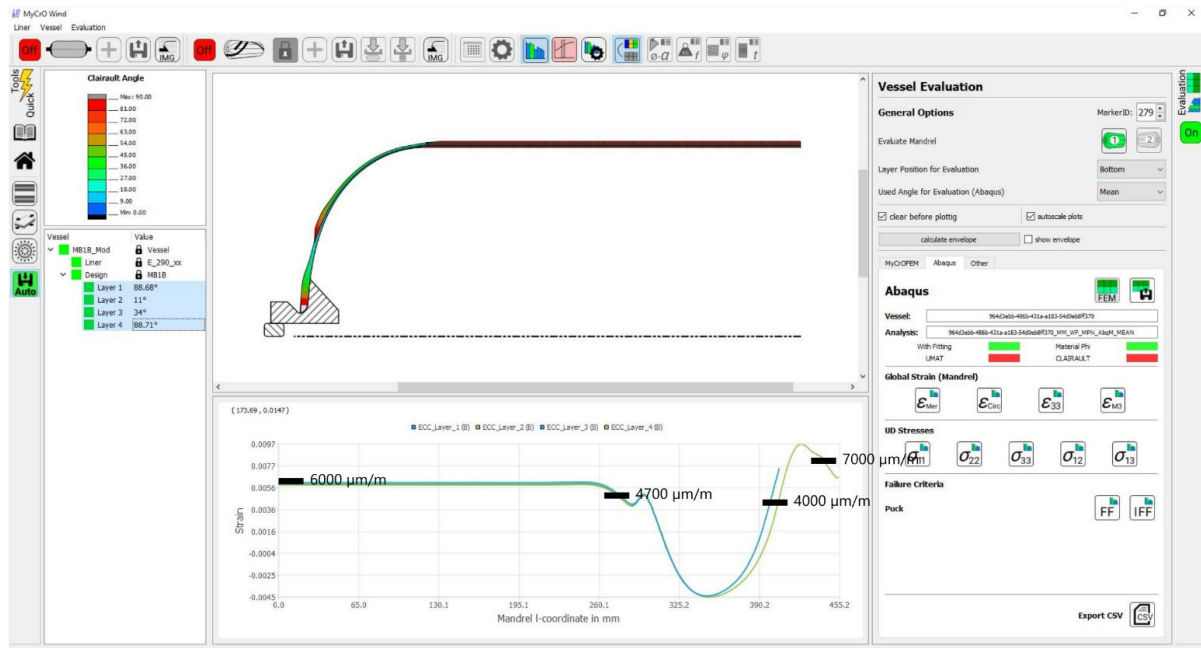


Abbildung 12: Beispiel eines Vergleichs der berechneten und gemessenen Dehnungen beim MBI Behälter. Die berechneten und gemessenen Verformungen stimmen sehr gut überein.

#### AP 4.6: Übertragung Sensorapplikation an Wasserstoff-Druckbehältern und Behälterherstellung

Nachdem die Verfahren an eher dünnwandigen Behältern erfolgreich getestet wurden, musste noch sichergestellt werden, dass dickwandigere Wasserstoffbehälter die gleichen Ergebnisse aufzeigen. Hierzu wurden vorhandene Wasserstoffdesigns von Hexagon genutzt.

Damit Behälter-Modelle trotz Geheimhaltung bei den Partnern (FEV) genutzt werden konnten, wurde von mefex ein verschmiertes Schalenmodell neu entwickelt, das die Steifigkeiten des Behälters sehr gut abbildet aber keinerlei Informationen zum Laminataufbau enthält. Hierfür wurden die Schalenparameter für Abaqus direkt berechnet und mit einem speziellen Element-Ansatz genutzt. Das Modell wurde unter anderem bei der FEV genutzt, um Berechnungen für den Crash-Versuch durchzuführen.

In Fahrzeugmodellen werden Submodelle der Behälter benötigt, die die Steifigkeit möglichst exakt abbilden bei gleichzeitig minimalem Rechenaufwand. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus der Behälter sind die Modelle in der Regel sehr fein vernetzt und sehr komplex. Diese Modelle können in einer Gesamtfahrzeugsimulation, wie man sie für Crash Rechnungen durchführen muss, nicht genutzt werden. Die neuen Behälter-Modelle sind für diese Art der Berechnung ideal geeignet.

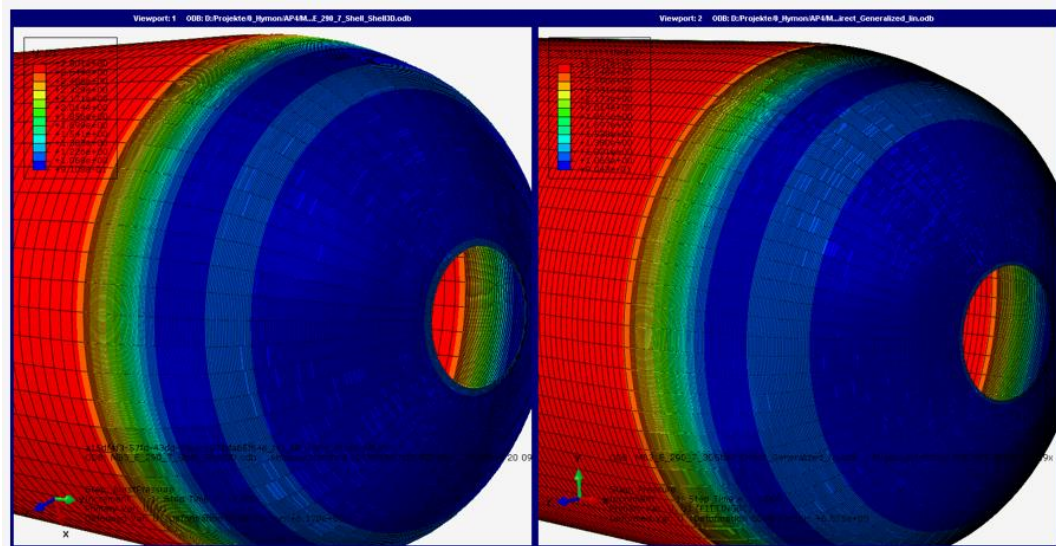


Abbildung 13; Vergleich der berechneten Verformungen des Detailmodells mit vollem Informationsgehalt und des neuen Modells ohne Laminatinformation. Die Verformungen sind nahezu identisch.

#### AP 4.7: Sensorprüfung an Wasserstoff-Druckbehälter

Die Wasserstoffbehälter wurden bei Hexagon geprüft. Die vom Fraunhofer LBF aufgezeichneten Daten wurden mit mefex und dem FEV geteilt. So konnten alle Partner parallel Auswertungen vornehmen.

Aus den Zeitsignalen wurden FFTs berechnet und in einem Video bestehend aus allen aufgezeichneten Signalen zusammengefasst. Mit Hilfe der Probenversuche aus AP3 konnten die verschiedenen Versagensarten unterschieden werden. Teilweise wurden Frequenzbänder identifiziert, die mehreren Versagensarten zugewiesen werden konnten. Faserbrüche erzeugen z.B. immer auch Zwischenfaserbrüche und Delaminationen. Deshalb findet man sehr häufig Schallereignisse mit einem breiten angeregten Frequenzband.

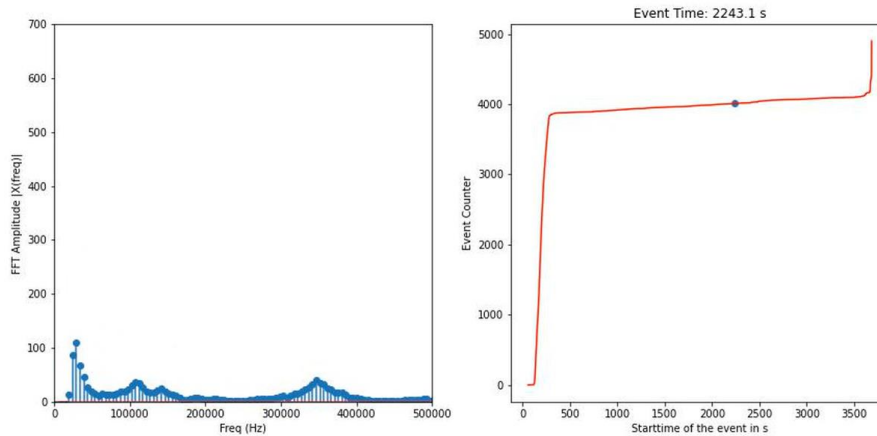


Abbildung 14: FFT eines Schallereignisses mit Frequenzen im Bereich Faserbruch ( $>250$  kHz) und Zwischenfaserbruch / Delamination (30-150 kHz)

In den Behälterversuchen werden zu Beginn sehr viele Schallereignisse detektiert, da Zwischenfaserbrüche entstehen. Danach erfolgt die eigentliche Belastung, in der wenige Ereignisse detektiert werden. Kurz vor Versagen steigt die Ereigniszahl dann wieder stark an und es kommt zum finalen Versagen.

Die Messungen bestätigten die Versuche mit dünnwandigen Behältern. Dauerversuche mit dickwandigen Behältern sind extrem zeitaufwendig. Um die Datenmengen und Messzeiten zu reduzieren wurden viele Versuche mit erhöhter Last durchgeführt. So konnte ein Versagen innerhalb 1-2 Tagen erreicht werden. Eine Wasserstoffbehälterprüfung mit laut Norm vorgeschriebenem Druck kann mehrere Wochen laufen. Im Projekt war es nicht möglich mehrere dieser langlaufenden Prüfungen durchzuführen. Auf Basis der Ergebnisse dieses Projekts sollten zur Absicherung weitere unverkürzte Zyklentests durchgeführt werden. Optimalerweise auch mit verschiedenen Behälterdesigns.

#### AP 4.8: Bewertung der Sensorkonzepte auf der Basis von Druckbehältern

Schallbasierte Sensoren erzielten die besten Ergebnisse bei der Detektion von Schädigungen. Mit Hilfe der Piezo-Sensorik konnten vor allem die kritischen Faserbrüche detektiert werden. Vor dem finalen Versagen wurden erhöhte Schallemissionen detektiert. Dehnungsbasierte Sensoren müssen zyklensfest sein. Dehnungsmessstreifen versagen erwartungsgemäß nach einigen Zyklen. Fiber-Bragg Sensoren haben Probleme aufgrund der vielen Zwischenfaserbrüche und fallen häufig nach wenigen Zyklen ebenfalls aus, bzw. das Messsignal ist aufgrund von Störungen nicht mehr auswertbar.

#### AP 5: Fertigungskonzepte für die Integration von faseroptischen Sensoren im industriellen Nasswickelverfahren

In AP5 wurde das ITA von mefex bei der Fertigung der Behälter unterstützt. Die Fertigung und Integration der Fiber-Bragg Sensoren wurde bei der Firma Roth Composite Machinery als Unterauftrag



durchgeführt. In Zusammenarbeit mit Roth wurde der G-Code mittels CompositiCAD erstellt und mit der Berechnung abgeglichen.

#### AP 7: Umsetzung und Validierung des Gesamtsensorsystems am Demonstratorfahrzeug

Für Abschätzungen des Behälterverhaltens beim Crash wurden Behältermodelle zur Nutzung im Gesamtfahrzeugmodell erstellt. Hierfür wurde das neu entwickelte verschmierte Schalenmodell genutzt. Damit war es möglich das Verhalten des Behälters realitätsnah in die Fahrzeugmodelle zu übernehmen, ohne den Laminataufbau preisgeben zu müssen. Die deutlich geringere Anzahl an Unbekannten beim verschmierten Modell wirkt sich zudem vorteilhaft auf die Rechenzeiten aus, ohne dass Genauigkeit verloren geht.

#### AP 7.6: Bewertung der Last- und Schadensdetektion auf Basis Gesamtsensorsystem

Im Hymon-Projekt konnte ein Sensorsystem entwickelt werden, das mit Low-Cost Piezo-Summern eine Detektion von möglichen Impakts und eine fortschreitende Schädigung ermöglicht. Zahlreiche Versuche an Behältern haben gezeigt, dass eine Detektion der unterschiedlichen Schadensmechanismen mit dem verwendeten System möglich ist. Trotz des sehr geringen Preises der Sensoren konnten auch hochfrequente Ereignisse gemessen werden.

Um in der zur Verfügung stehenden Zeit möglichst viele Daten zu generieren, wurden alle Versuche im Projekt bei erhöhten Lasten durchgeführt. Um das System in Fahrzeugen und in Serie anwenden zu können, sollten noch weitere Versuche mit verringerter Last durchgeführt werden. Dies ist sehr zeitaufwendig.

Zudem müssen noch weitere Tests zur möglichen Dämpfung der Signale durchgeführt werden um den optimalen Abstand der Sensoren je nach Behältergeometrie und -Aufbau zu ermitteln.