Schlussbericht zum Projekt 03LB4008B

Prozessentwicklung einer CFK-Felge mit Versagens-Sensorik

Zuwendungsempfänger
Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Produktentwicklung und Leichtbau
Prof. Dr. Markus Zimmermann

Förderkennzeichen
03LB4008B

Vorhabenbezeichnung
ProVeS – Prozessentwicklung einer CFK-Felge mit Versagens-Sensorik

Laufzeit des Vorhabens
01.07.2021 – 30.06.2024

Berichtszeitraum
01.07.2021 – 30.06.2024

Inhalt

1 Kurzdarstellung 2
1.1 Aufgabenstellung 2
1.2 Voraussetzungen 2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 2
1.4 Stand der Technik 4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5
Literatur der Kurzdarstellung 5
2 Eingehende Darstellung 6
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses 6
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 13
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 13
2.4 Voraussichtlicher Nutzen 14
2.5 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 14
2.6 Geplante Veröffentlichung des Ergebnisses 14
Literatur der eingehenden Darstellung 15

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Moderne Mobilitäts- und Transportkonzepte stehen vor der Herausforderung, hohe Anforderungen an Sicherheit, Nachhaltigkeit und Effizienz zu erfüllen. Insbesondere im Bereich der Fahrzeugtechnik, wo der Einsatz von Leichtbau-Komponenten wie kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) zunehmend an Bedeutung gewinnt, sind innovative Ansätze gefragt. CFK zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit bei geringem Gewicht aus und bietet signifikantes Potential zur Verbesserung von Energieeffizienz und Leistung. Allerdings erfordert die Sicherheit solcher Bauteile häufig überdimensionierte Konstruktionen, um mögliche Versagensrisiken zu minimieren. Diese Überdimensionierung führt zu einem erhöhten Materialverbrauch, höheren Kosten und einer Einschränkung der Gewichtsreduktion.

Eine zentrale Herausforderung ist die mangelnde Möglichkeit zur kontinuierlichen Überwachung des Zustands solcher Bauteile während des Betriebs. Konkret verfügen etwa derzeitige CFK-Felgen über keine permanente Schadensüberwachung. Materialermüdung oder Schäden, die während der Nutzung durch Umwelteinflüsse oder Belastungen entstehen, können nicht frühzeitig erkannt werden. Dies gefährdet nicht nur die Sicherheit, sondern erhöht auch die Betriebskosten durch aufwändige Prüfverfahren und Wartungsintervalle.

Aus dieser Problematik ergibt sich die Motivation für das Forschungsprojekt „Prozessentwicklung einer CFK-Felge mit Versagens-Sensorik“ (ProVeS). Ziel des Projekts ist es, eine innovative CFK-Felge zu entwickeln, die mit einer integrierten Versagens-Sensorik ausgestattet ist. Diese ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung des Bauteilzustands und schafft so die Grundlage für eine ressourceneffiziente, sichere und kostengünstige Anwendung. Die Kombination von automatisierten Fertigungsverfahren, wie dem Schlauchblasverfahren, mit neuartigen Carbon-Fiber-Sensoren (CFS) stellt dabei eine technologische Innovation dar. Neben der Steigerung der Sicherheit kann durch die Schadensüberwachung der Materialeinsatz optimiert und somit Gewicht reduziert werden.

Dieses Vorhaben trägt zur Entwicklung von Leichtbaupotentialen bei und schafft eine Grundlage für die nachhaltige Anwendung von CFK in sicherheitsrelevanten Bauteilen in unterschiedlichen Industrien, von der Automobil- bis zur Luftfahrttechnik.

1.2 Voraussetzungen

Das Projekt wurde unter der Leitung von Marc Hartmann (SemsoTec GmbH) durchgeführt und in enger Kooperation mit ihm als Projektpartner abgestimmt. Die bestehenden Designs für CFK-Felgen sowie die (geplanten) Produktionsanlagen des Partners bildeten die Grundlage für die Entwicklungen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ProVeS startete am 01.07.2021 und endete am 30.06.2024, eine Übersicht über die Arbeitspakete zeigt Abbildung 1. Eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung wurde beantragt, allerdings nicht bewilligt.

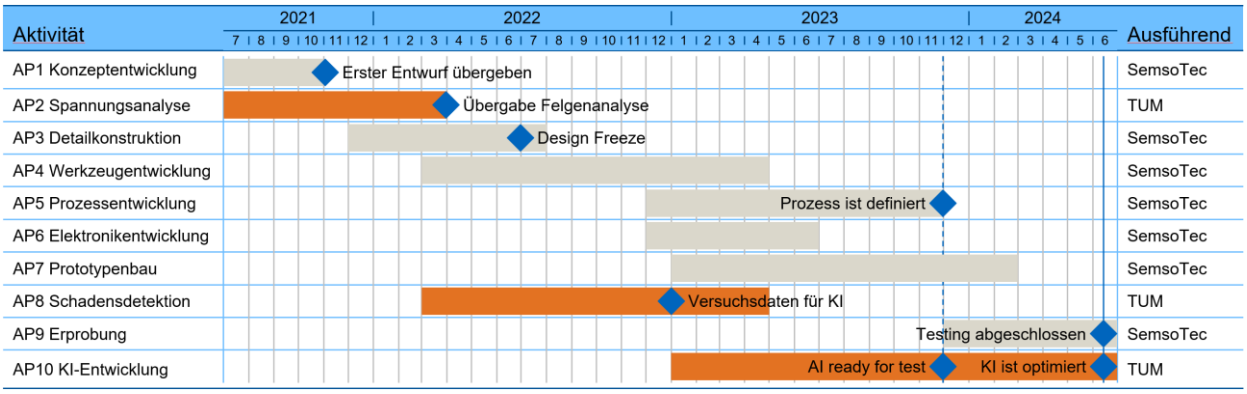


Abbildung 1: Übersicht über die Arbeitspakete im Projekt. Von der TUM bearbeitete Pakete sind farblich hervorgehoben.

Die TUM war für die Bearbeitung der folgenden Arbeitspakete verantwortlich:

- **AP2** Spannungsanalyse und Optimierung
  Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde zunächst ein vereinfachtes Fachwerkmodell der Felge erstellt, das eine schnelle und präzise Analyse der vorherrschenden Kraft- und Momentenverhältnisse ermöglicht. Anschließend wurde eine detaillierte Finite-Elemente-Spannungsanalyse (FEM) durchgeführt, die das Verhalten der Felge unter den definierten Lastfällen modellierte. Dabei wurde ein CFK-konformer Aufbau des Modells umgesetzt und validiert. Die Ergebnisse der Spannungsanalyse wurden genutzt, um die Sensorpositionierung zu optimieren und potenzielle Schwachstellen in der Felgenkonstruktion zu identifizieren.

- **AP8** Bauteilprüfung und Schadensdetektion
  Im Arbeitspaket lag der Fokus auf der Detektion von Materialfehlern, v.a. durch thermografische Prüfmethoden. Die Messaufbauten wurden konzipiert, konstruiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Eine thermische Anregung der CFK-Felgen wurde durchgeführt, um Defekte wie Delaminationen und Materialunregelmäßigkeiten zu erkennen. Die Ergebnisse zeigten, dass deutliche Temperaturgradienten für die Identifikation subtiler Defekte unerlässlich sind. Zusätzliche Methoden, wie die zweite zeitliche Ableitung der Wärmebilder, verbesserten die Diagnostik erheblich.

- **AP10** Entwicklung einer künstlichen Intelligenz (KI) für die Schadensdetektion
  Für die verwendete Sensorik konnten nicht mehr genügend Trainingsdaten für eine KI gesammelt werden. Dies ist vor allem der umfangreichen Bauteilprüfung und der komplexen Sensorintegration geschuldet, welche vorherige Arbeitspakete verzögerten. Die geplanten Aktivitäten umfassten Prüfstands- und Feldtests, um ausreichend Trainingsdaten für eine KI zu generieren. Teile des Arbeitspaketes wurden in Absprache mit SemsoTec zur vertieften Bauteilprüfung für die serielle Fertigung umgewidmet.

Die Bearbeitung der Arbeitspakete folgte einem iterativen Ansatz, um den Erfolg bzw. die Zielsetzung der Arbeitspakete stets vergleichen und ggfs. anpassen zu können. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SemsoTec konnten Synergien genutzt werden, die den Fortschritt der Arbeiten begünstigten.

1.4 Stand der Technik

Eine strategische Literaturrecherche wurde durchgeführt, um relevante Veröffentlichungen zu identifizieren. Dabei wurden die in Tabelle 1 dargestellten Schlüsselwörter logisch miteinander verknüpft und in der Datenbank SCOPUS für eine erweiterte Suche eingesetzt. Abkürzungen wurden als eigenständige Suchbegriffe behandelt. Ergänzend wurden White Paper, Firmenbroschüren und Normen konsultiert. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde zusätzlich weitere Literatur zu CFK-Strukturen, Finite-Elemente-Analysen (FEA) und zerstörungsfreien Prüfverfahren zu Rate gezogen.

Die Ergebnisse der Recherche wurden auf das Ingenieurwesen begrenzt und gefiltert. Vorrangig wurden neuere Veröffentlichungen berücksichtigt. Insgesamt wurden mehr als 200 Abstracts auf ihre Relevanz geprüft, was schließlich zu etwa 60 Schlüsselpublikationen führte, die die Grundlage dieser Projektarbeit bilden.

Die Literaturrecherche identifizierte zahlreiche Ansätze im Bereich des Structural Health Monitoring (SHM) für Faserverbundwerkstoffe (FVW). Die Grundlage für viele Arbeiten legt Chung (1998) mit seinen Überlegungen, die Eigenschaften von FVW für SHM nutzbar zu machen. Darauf basierend untersuchten etwa Sebastian et al. (2014) die Verwendung von mit Kohlenstoffnanoröhren beschichteten Glasfasern als eingebettete Sensoren in Verbundwerkstoffen. Diese Sensoren ermöglichen die Erkennung von Belastungen und Schäden durch elektrische Signale und zeigen das Potenzial für neue Überwachungsmethoden. Alsaadi et al. (2019) demonstrieren ein System, das die elektrische Widerstandsänderung in Gewebeverbunden aus CFK nutzt, um Belastungen und Schäden zu überwachen. Zhang et al. (2015) heben die multifunktionalen Eigenschaften von Kohlenstoffnanoröhren für SHM hervor, die sowohl zur Schadensüberwachung als auch zur Verstärkung der Verbundmaterialien beitragen können. Herrmann et al. (2014) untersucht SHM-Potentiale für Automobilkomponenten untersucht. Die Studie zeigt, dass der Einsatz solcher Technologien nicht nur die Sicherheit erhöht, sondern auch signifikante Gewichts- und Kosteneinsparungen ermöglicht – ein wesentlicher Treiber für die CFK-Felgenentwicklung.

Die genannten Veröffentlichungen bestätigen das Projektvorhaben, indem sie die Relevanz der Schadensdetektion in faserverstärkten Bauteilen hervorheben. Die Recherche zeigte allerdings auch, dass derzeit keine CFK-Felgen mit integrierter permanenter Schadensüberwachung auf dem Markt verfügbar sind.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Schlagworte und Synonyme für die Literaturrecherche

CFK-Felge	Versagens-Sensorik	Leichtbau	Schadensdetektion
Carbon Composite	Stress Sensor	Lightweight Design	Damage Detection
Carbon Rim	Strain Gauge Sensor	Weight Optimization	Failure Detection Sensor
Composite Wheel	MFC-Sensor	Composite Structures	Structural Health Monitoring
Fiber-reinforced materials	Carbon Fiber Sensor	Mass Reduction	Predictive Maintenance
Fiber composites		Function Integration	Crack Detection

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit SemsoTec war geprägt durch zweiwöchentliche Abstimmungen und den unkomplizierten Austausch von Produktions- und Prüfmustern. Zudem wurden Partner des eigenen Netzwerkes bei Bedarf zur Klärung von Detailfragen eingebunden, etwa Prof. Horoschenkoff von der Hochschule München oder der Lehrstuhl für Carbon Composites von der Technischen Universität München.

Literatur der Kurzdarstellung

Alsaadi, A., Meredith, J., Swait, T., Curiel-Sosa, J. L., Jia, Y., & Hayes, S. (2019). Structural health monitoring for woven fabric CFRP laminates. *Composites Part B: Engineering*, *174*, 107048. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107048

Chung, D. D. L. (1998). Self-monitoring structural materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *22*(2), 57–78. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(97)00021-1

Herrmann, S., Wellnitz, J., Jahn, S., & Leonhardt, S. (2014). Structural Health Monitoring for Carbon Fiber Resin Composite Car Body Structures. In J. Wellnitz, A. Subic, & R. Trufin (Hrsg.), *Sustainable Automotive Technologies 2013* (S. 75–96). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01884-3_8

Sebastian, J., Schehl, N., Bouchard, M., Boehle, M., Li, L., Lagounov, A., & Lafdi, K. (2014). Health monitoring of structural composites with embedded carbon nanotube coated glass fiber sensors. *Carbon*, *66*, 191–200. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.058

Zhang, H., Bilotti, E., & Peijs, T. (2015). The use of carbon nanotubes for damage sensing and structural health monitoring in laminated composites: A review. *Nanocomposites*, *1*(4), 167–184. https://doi.org/10.1080/20550324.2015.1113639

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Die im Rahmen des Projekts ProVeS bereitgestellten Zuwendungen wurden eingesetzt, um die im Förderantrag definierten wissenschaftlichen und technologischen Ziele zu erreichen. Die Mittel wurden für Personal-, Material- und Betriebsmittelkosten verwendet, insbesondere zur Entwicklung und Erprobung neuer Prüfmethoden, zur Konstruktion von Prototypen und Prüfständen sowie zur Durchführung umfangreicher Analysen. Die wichtigsten erzielten Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

2.1.1 Spannungsanalyse (AP2)

- **Definition und Komplettierung der Use Cases sowie der Anforderungen an eine sensorisch überwachte Felge**
  In Absprache mit dem Projektpartner SemsoTec wurden die Anforderungen an die sensorisch überwachte Felge detailliert ausgearbeitet. Hierzu wurde seitens der TUM eine Use Case Study durchgeführt, um etwaige Anwendungspotentiale der sensorisch überwachten Felge zu erkennen, welche ggfs. noch nicht berücksichtigt wurden, aber für den Nutzer interessant sein könnten. Beispielsweise ist die Nutzung der sensorischen Überwachung zur Unfalldetektion möglich und kann langfristig ein wichtiger Baustein in der Rettungskette werden. Als die wichtigste Nutzung wurde die Rückversicherung über den Status der Felge erkannt, vgl. Abbildung 2. Entsprechend der gefundenen Use Cases wurden die Anforderungen an die Sensorik formuliert bzw. aktualisiert.

- **Definition der Lastfälle für die Spannungsanalyse**
  In Absprache mit dem Projektpartner SemsoTec wurden vier Lastfälle definiert, welche die gebrauchsgemäße Nutzung einer Felge simulieren sollen. Diese Lastfälle betrachten etwa die dynamische Belastung durch längere Fahrten, harte Einschläge durch Geländefahrt oder die Belastung durch Reifenwechsel am Felgenhorn, vgl. Abbildung 3. Alle Lastfälle können bis zum Versagen der Felge skaliert werden, sind in ihrer grundlegenden Form allerdings als Prüfanforderung in Anlehnung an ISO 4210-7 definiert. Von diesen vier Lastfällen wurde der statische Lastfall 1 zur Erstellung, Verifizierung und Validierung der Spannungsanalyse gewählt. Lastfall 3 wurde in Absprache dagegen nicht weiterverfolgt.

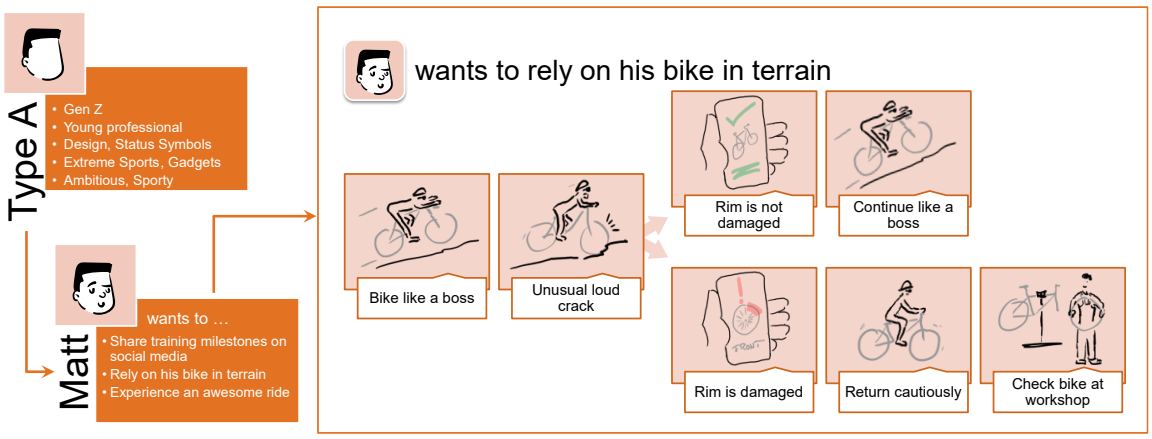


Abbildung 2: Eine der entwickelten User Stories mit Entwicklung des zugrundeliegenden Nutzerprofils.

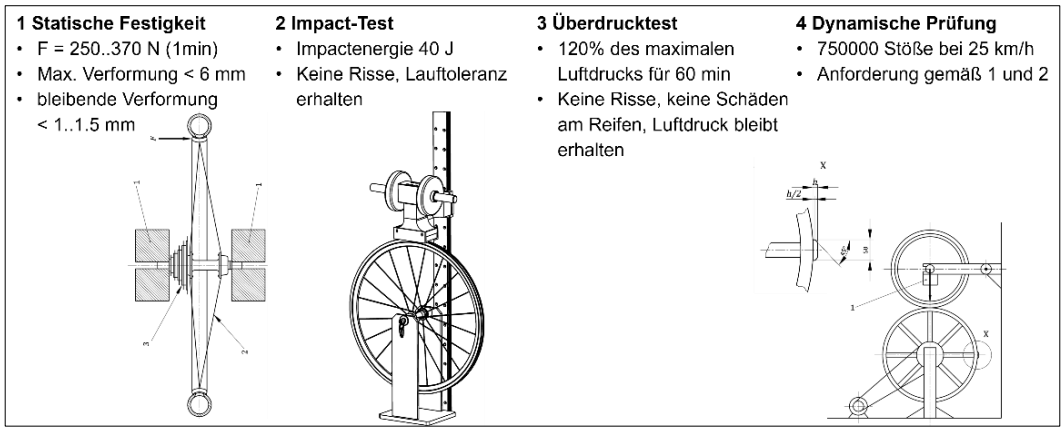


Abbildung 3: Übersicht der in Anlehnung an ISO 4210-7 definierten Lastfälle.

- **Aufbau und Durchführung der Spannungsanalyse**
  Zur Vorbereitung der Spannungsanalyse wurde ein vereinfachtes Fachwerkmodell der eingespeichten Felge (Laufrad) erstellt und ausgewertet. Dieses hat gegenüber einer umfangreichen Spannungsanalyse den Vorteil der deutlich verkürzten Rechenzeit bei gleichzeitig einfacherem Pre- und Post-Processing. Die Ergebnisse können zwar nicht die Genauigkeit einer detaillieren Spannungsanalyse erreichen, bieten aber den Einblick in die im Laufrad wesentlich vorherrschenden Kraft- und Momentenverhältnisse, vgl. Abbildung 4. Hierbei konnten einerseits vorherrschende Druck- und Zugstäbe in der Einspeichung abgeleitet werden, und andererseits die Schnittkräfte und -momente in der Felge in Abhängigkeit des Lastfalls bestimmt werden. Zudem kann das Ergebnis zur Verifizierung der FEM-Spannungsanalyse herangezogen werden. Zusätzlich wurde eine detaillierte FEM-Analyse durchgeführt, wobei die spezifischen Materialeigenschaften von CFK berücksichtigt wurden.

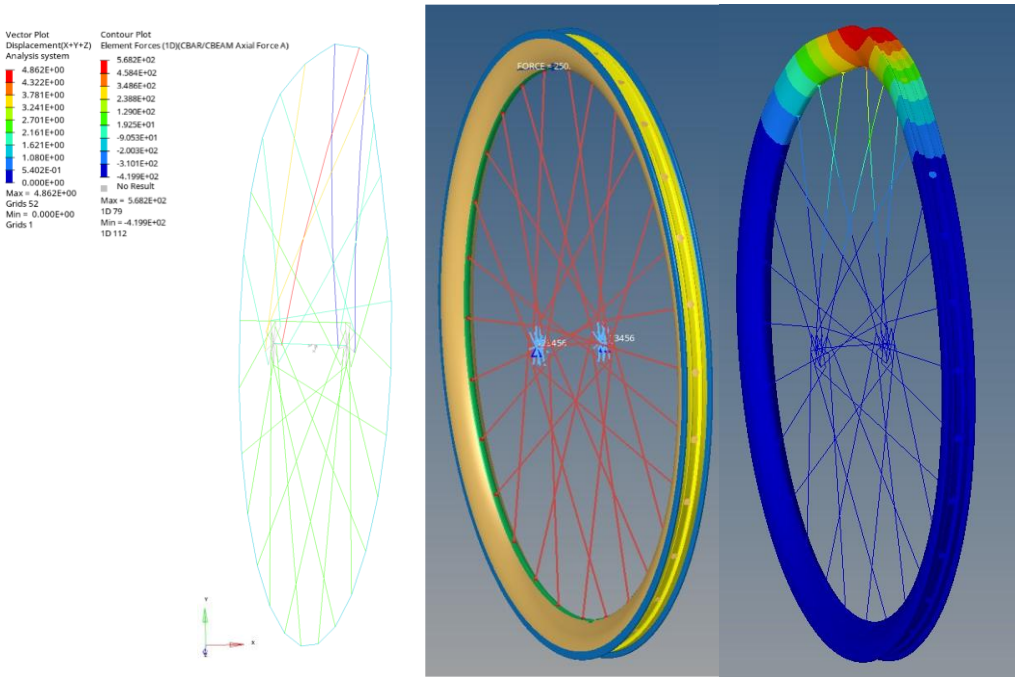


Abbildung 4: Darstellung des Fachwerkmodells (links), des CFK-konformen Aufbaus des Felgenmodells (mitte) sowie die Verformung der Felge (rechts), jeweils beispielhaft an Lastfall 1.

Die Ergebnisse halfen, kritische Bereiche der Felge zu identifizieren, die bei zukünftigen Tests und der Sensorintegration besonders berücksichtigt werden müssen

Auf Basis der Erkenntnisse aus der vereinfachten Spannungsanalyse wurde das vom Projektpartner SemsoTec bereitgestellte CAD-Modell der Felge in ein FEM-fähiges Modell übertragen und gemäß den CFK-Spezifika hinsichtlich Laminataufbau und Materialeigenschaften adaptiert. Zur Berechnung wurde der Solver *optistruct* von *Altair* genutzt. Die Ergebnisse wurden dem Projektpartner SemsoTec zur weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt, etwa zur Ausgestaltung der Sensorpositionierung oder einer optionalen Optimierung der Felgengeometrie. In Abbildung 4 auf der vorherigen Seite ist das Ergebnis für Lastfall 1 dargestellt.

1 Statische Festigkeit

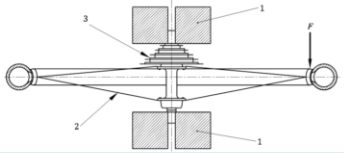
- Laufrad einspannen und auflagern
- Vorlast 5 N an einer Speiche senkrecht zur Laufradebene
- statische Kraft F für 1 min aufbringen
- Die Kraft auf 5 N verringern und 1 min Rückstellzeit abzuwarten
- Nach dieser Rückstellzeit und bei weiterhin andauernder Belastung mit 5 N erneut messen
- Reifen geeigneter Größe auf Laufrad, max. aufgepumpt
- Messverfahren einmal zwischen zwei Speichen wiederholen

→ **Anforderung**
keine Schädigung, keine bleibende Verformung größer als angegeben

Fahrradtyp	City- und Trekking-Fahrräder	Jugendfahrräder	Geländefahrräder	Rennräder
Bleibende Verformung	1,5	1,5	1,0	1,0

Kraft in Newton

Fahrradtyp	City- und Trekking-Fahrräder	Jugendfahrräder	Geländefahrräder	Rennräder
Kraft F	250	250	370	250

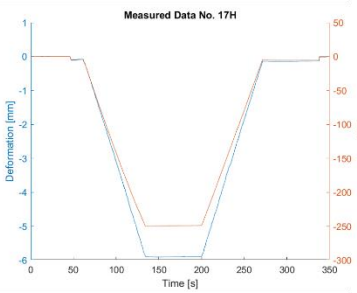


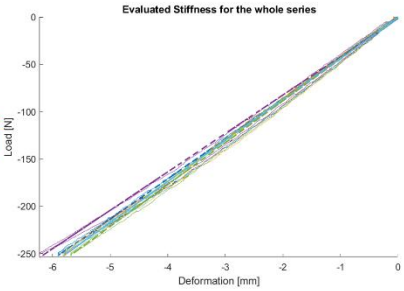
Messmittel
- Zugprüfmaschine
  - Kraftmessung
  - Traverse
  - Lasertriangulation
- Photometrie (opt.)

Prüflinge
- **Coupon**
  - Blank vs. Sensor
  - Vorgeschädigt vs. ungeschädigt
- **Felge**
  - Blank vs. Sensor
  - Vorgeschädigt vs. ungeschädigt

Ergebnisse
- Kraft-Weg
- Steifigkeit Felge
- DIN-Konformität
- Verformung an Lasteinleitung
- Verformung als Punktewolke (opt.)

Nutzen
- Messvalidierung
- Strukturvergleich Blank vs. Sensor
- Validierung FE Modell
- Erste Trainingsdaten
- Basis für Sensoroptimierung





No.	Bleibende Verformung [mm]	Maximale Verformung [mm]	Steifigkeit [N/mm]	Std.-Abw. der Steifigkeit [N/mm]	Tendenz der Steifigkeit
17H	0,13	5,91	42,24	0,06	-4,0E-05
18H	0,18	5,79	43,15	0,06	-4,2E-05
19H	0,17	5,83	42,93	0,02	-1,4E-05
20H	0,19	6,22	40,08	0,05	-4,6E-05
21H	0,15	5,69	43,91	0,06	-3,7E-05
22H	0,14	5,81	43,03	0,04	-3,7E-05
Mittelwert			**42,56**	**0,05**	

Abbildung 5: Messkarte zu Lastfall 1 (oben), der Messaufbau hierzu (unten links), mit exemplarischen Messergebnissen aus der Kalibriermessung als Diagramm und Tabelle (unten rechts).

- **Validierung der FEM-Modelle**
  Die Ergebnisse der Spannungsanalyse wurden verifiziert und validiert. Die Verifizierung erfolgte einerseits durch den Abgleich mit den Ergebnissen der vereinfachten Spannungsanalyse, und andererseits durch die erfolgreiche Prüfung auf die Gitterunabhängigkeit des Modells. Die Validierung erfolgte durch Abgleich der Ergebnisse der Spannungsanalyse mit den Ergebnissen der Kalibriermessung (vgl. Ausführungen zu Arbeitspaket 8). Als Metrik diente hierbei die ermittelte bzw. gemessene Steifigkeit sowie die Verformung der Felge.

2.1.2 Schadensdetektion (AP 8)

- **Aufbau der Messstände**
  Auf Basis der definierten Lastfälle wurden Versuchspläne und Messprotokolle abgeleitet. Damit wurde sichergestellt, dass einerseits der Messaufbau koordiniert erfolgen kann, und andererseits die nötigen Messungen effizient durchgeführt und ausgewertet werden können. Die Messstände wurden auf Basis der Messkarten konzipiert, entworfen und aufgebaut. Der Messstand zum Lastfall 1 sowie die zugehörige Messkarte sind in Abbildung 5 dargestellt.

- **Inbetriebnahme und Verifizierung der Messstände**
  Die aufgebauten Messstände konnten durch initiale Kalibriermessungen verifiziert werden, d.h. ihre Funktion entsprechend der Messkarten wurde nachgewiesen. Die Kalibriermessungen wurden mit Felgen ohne Sensorapplikationen des Projektpartners SemsoTec durchgeführt. Diese Messergebnisse erlauben zusätzlich den Abgleich der strukturellen Integrität zukünftiger Felgen mit Sensorapplikation. Einige Ergebnisse der Kalibriermessungen zu Lastfall 1 sind beispielhaft ebenfalls in Abbildung 5 dargestellt.

- **Messergebnisse**
  Auf den Prüfständen wurden vom Projektpartner SemsoTec bereitgestellte Felgen (mit Sensorapplikation an der Außenflanke der Felge auf Höhe des Felgenhorns) gemäß Prüfprotokoll vermessen. Die Ergebnisse einer der Felgen im Lastfall 1 zeigt Abbildung 6. Hierbei wurde festgestellt, dass die Qualität der Applikation unzureichend ist, wodurch die Sensoren keine reproduzierbaren Ergebnisse liefern konnten. Als Gegenmaßnahme wurden Coupon-

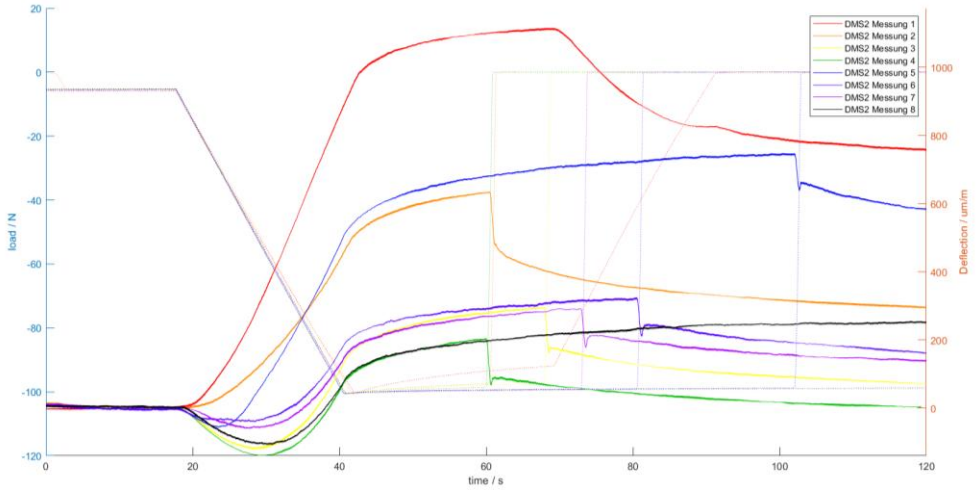


Abbildung 6: Darstellung der mittels auf die Felge applizierter Sensorik ermittelten Messwerte in Lastfall 1. Gut erkennbar ist die unterschiedliche Sensorantwort bei ansonsten gleicher Belastung.

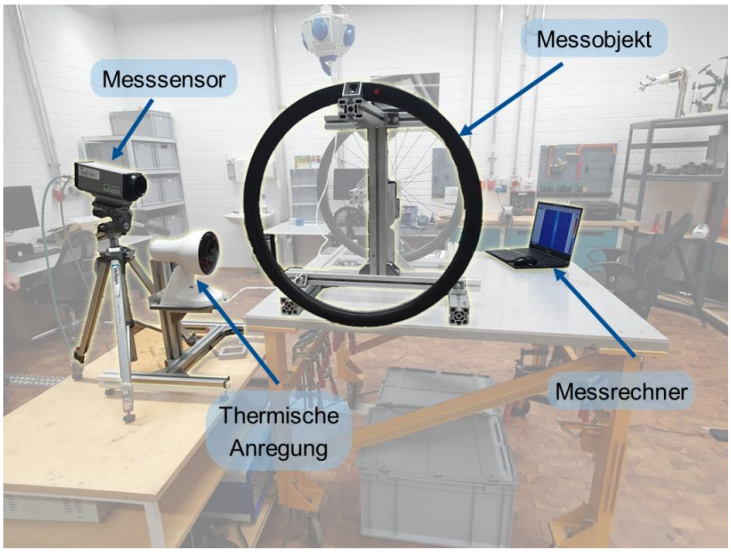


Abbildung 7: Prüfstand zur Durchführung thermographischer Analysen.

Proben geplant und deren Vermessung durchgeführt, welche Rückschlüsse auf den Einfluss der Applikationsgüte auf die Messergebnisse ermöglichen. Die Ergebnisse hierzu sind den Ausführungen zu Arbeitspaket 10 in Abschnitt 2.1.3 zu entnehmen.

- **Entwicklung und Durchführung der thermografischen Analysen**
  Der Messstand für zerstörungsfreie, thermografische Prüfung wurde entwickelt, konstruiert und in Betrieb genommen. Die Prüfungen konzentrierten sich auf instationäre thermische Anregungen, um Defekte in CFK-Felgen zu identifizieren. Die Ergebnisse zeigten, dass thermografische Analysen eine zuverlässige Methode zur Detektion von Delaminationen und anderen Materialfehlern darstellen. Den Messaufbau zeigt Abbildung 7.

- **Verschiedene Prüf- und Auswertungsansätze im Vergleich**
  Verschiedene thermografische Methoden wurden getestet, darunter die zweite zeitliche Ableitung der Wärmebilder, um eine präzisere Schadensdiagnostik zu ermöglichen (vgl. Abbildung 8). Darüber hinaus erwiesen sich Messungen mit leistungsstarken Lichtquellen von 2500 W als deutlich effektiver im Vergleich zu schwächeren Lampen. Die leistungsstärkere

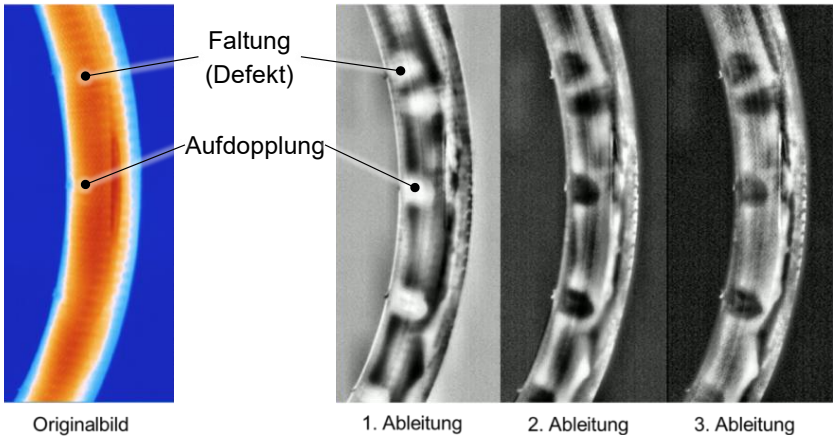


Abbildung 8: Darstellung der thermographischen Aufnahme einer Felge sowie der zeitlichen Ableitungen.

Beleuchtung führte zu klaren Temperaturgradienten, die auch subtile Defekte in den CFK-Felgen sichtbar machen.

- **Analyse von Fehlstellen**
  Es wurden Defekte wie Faltenbildung und Delaminationen erfolgreich identifiziert und analysiert. Die Ergebnisse unterstützen die Weiterentwicklung des Herstellungsprozesses und die Positionierung von Sensorik.

  Die Abfolge der thermografischen Bilder in Abbildung 9 zeigt die Entwicklung des thermischen Profils im Laufe der Zeit oder unter verschiedenen thermischen Bedingungen. Die Bilder zeigen konsistente Positionen von Aufdopplungen und teilweise Faltungen (Defekten), was das Vorhandensein dieser Merkmale in den Scans bestätigt. Eine abschnittsweise Analyse wurde auch an einer Reihe von thermographischen Aufnahmen durchgeführt, die den gesamten Umfang einer Fahrradfelge erfassten. Die Aufnahmen wurden in einer kontrollierten Umgebung gemacht, um die Konsistenz der thermischen Reaktion des Materials zu erhalten. Die Bilder zeigen die Felge in Segmenten, die die Verteilung der Wärme entlang der Oberfläche zeigen. Jedes Segment zeigt ein einheitliches Muster von Löchern und strukturellen Merkmalen, die für eine Fahrradfelge typisch sind. Die meisten Felgenabschnitte weisen eine gleichmäßige Wärmesignatur auf, was auf einen einheitlichen Herstellungsprozess und eine gleichmäßige Materialverteilung schließen lässt. Bestimmte Bereiche weisen Unregelmäßigkeiten auf, die sich von dem einheitlichen Muster abheben. Diese könnten auf potenzielle Probleme wie Materialunregelmäßigkeiten, Spannungskonzentrationen oder Herstellungsfehler hinweisen. Schwankungen in den Wärmesignaturen um die Felgenlöcher herum deuten auch auf Unterschiede in der Materialstärke oder -dichte hin, die sich auf die Leistung und Haltbarkeit der Felge auswirken können.

  Die thermografische Analyse hat erfolgreich zwei kritische Merkmale innerhalb der Verbundwerkstoffprobe identifiziert: Die Aufdopplungen deutet auf ein strukturelles Designelement hin, während die Faltungen einen möglichen Defekt anzeigen, der weitere Untersuchungen erfordert. Die Analyse unterstreicht den Nutzen der zerstörungsfreien thermografischen Prüfung bei der Identifizierung von Unstimmigkeiten in Verbundwerkstoffen und erleichtert die frühzeitige Erkennung möglicher Probleme im Herstellungsprozess.

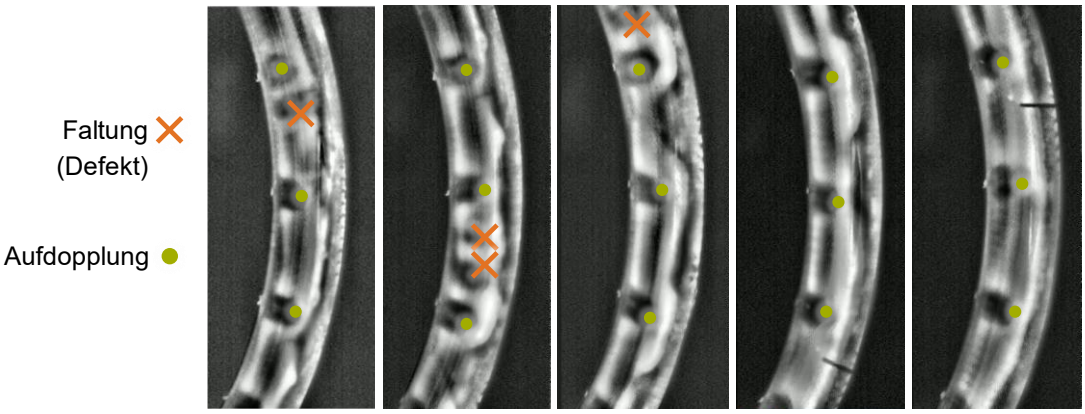


Abbildung 9: Eine Messreihe der thermographischen Analyse an unterschiedlich vorgeschädigten Felgen. In der ersten Analyse sind Aufdopplungen und Defekte zusätzlich hervorgehoben.

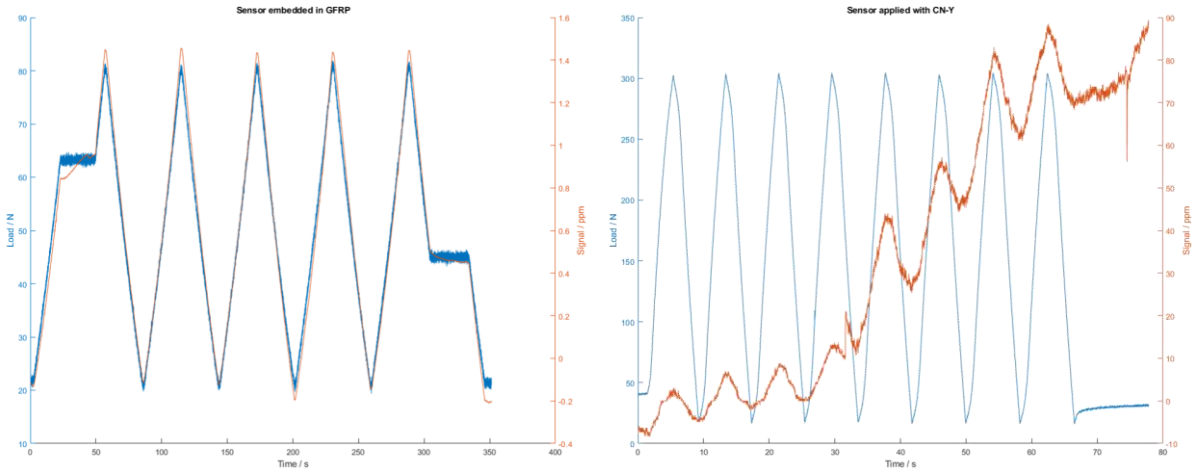


Abbildung 10: Reproduzierbarkeit der Messergebnisse (Lastfall 1) bei unterschiedlicher Sensorapplikation. Links mit einlaminiertem Sensor, rechts mit Cyanacrylat-Klebstoff appliziertem Sensor. Die Sensorantwort ist orange dargestellt.

2.1.3 Validierung und Integration der Sensorik (AP 10)

- **Prüfung der Reproduzierbarkeit der Sensorik**
  Wie bereits ausgeführt, wurde in AP 8 festgestellt, dass die mit Sensoren bestückten Felgen teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse zeigten. Die schlechte Reproduzierbarkeit dieser Ergebnisse – teilweise bei demselben Prüfkörper – machte weitere Untersuchungen nötig. So wurde die Applikation der Sensorik untersucht und als entsprechende Hauptursache erkannt, vgl. Abbildung 10. Da sich für den Prototypenbau das Einlaminieren der Sensoren in die Felgen als nicht praktikabel herausgestellt hatte, wurden die Sensoren verklebt. Je nach Güte der Haftung ist die Sensorantwort entsprechend schlecht reproduzierbar. Während der Projektlaufzeit konnte ein Verfahren zum reproduzierbar Laminieren der Sensoren nicht umgesetzt werden.

- **Plan und Hürden der KI-Integration**
  Die Integration der KI-gestützten Schadensdetektion wurde trotzdem bereits geplant, sowie die Herausforderungen erkannt, vgl. Abbildung 11. Die Schadensdetektion muss in der Lage sein, Schäden unter verschiedenen äußeren Einflüssen, wie Abnutzung, Laufzeit oder Bodenbeschaffenheit zuverlässig zu erkennen.

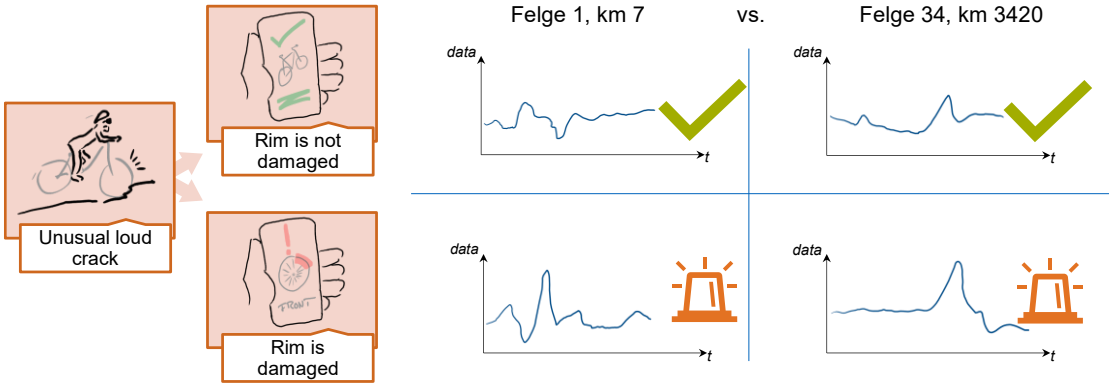


Abbildung 11: Herausforderung der KI-gestützten Schadensdetektion am Beispiel einer User Story: Trotz unterschiedlicher Umwelteinflüsse und Fertigungstoleranzen muss ein Schaden zweifelsfrei erkannt werden können.

Zudem dürfen fertigungsbedingte Abweichungen keine Rolle spielen. Dies stellt jedoch erhebliche Herausforderungen dar, da bereits schwankende Temperaturverhältnisse einen signifikanten Effekt auf die Sensordaten haben können. Die Erstellung eines ausreichend diversifizierten und repräsentativen Datensatzes, der diese Variabilität abbildet, wurde wie beschrieben nicht mehr umgesetzt.

- **Umwidmung des Ziels des Arbeitspaketes 10**
  In Absprache mit SemsoTec wurde die verbleibende Zeit im Projekt daher nicht zur Erstellung einer KI zur Schadensdetektion genutzt, da reproduzierbare Ergebnisse mit auf den Felgen verklebten Sensoren nicht erreicht wurden. Stattdessen wurde sich auf eine konzentrierte Untersuchung der Prüfverfahren zur seriellen Fertigung der Felgen verständigt. Diese Untersuchungen führten zur Einführung des thermographischen Prüfverfahrens, welches in Arbeitspaket 8 (Abschnitt 2.1.2) bereits beschrieben ist.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 2 stellt den vorläufigen zahlenmäßigen Nachweis seitens TUM dar. Aufgrund eines Personalwechsel wurden die Personalkosten nicht vollständig abgerufen. Durch strategische Nutzung von Synergien mit dem Projektpartner konnten Sachkosten deutlich reduziert werden. Zudem entfielen Reisetätigkeiten. Die tatsächlichen Ausgaben werden mit dem zahlenmäßigen Verwendungsnachweis genau bestimmt, dieser geht dem Projektträger bis 28.02.2025 zu.

Tabelle 2: Vorläufiger zahlenmäßiger Nachweis seitens TUM

	Zuwendung	**Ausgaben**
Personalkosten – wiss. MA TV-L	242.786,83 €	218.252,49 €
Personalkosten – wiss. Hilfskräfte	14.241,36 €	15.645,31 €
Sachkosten	17.150,00 €	2.661,81 €
Reisekosten	14.600,00 €	0,00 €
Gegenstände >410€	39.389,00 €	39.270,00 €
Gesamt	**328.167,19 €**	**275.829,61 €**

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt ProVeS geleistete Arbeit war sowohl notwendig als auch angemessen, um die Ziele des Vorhabens zu erreichen. Die durchgeführte Spannungsanalyse (AP 2) schuf eine belastbare Grundlage für die Bewertung der mechanischen Integrität der Felge und die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen für Material- und Geometrieauslegung. Die Arbeit an der Schadensdetektion (AP 8) durch thermografische Analysen ermöglichte es, ein Prüfverfahren zu entwickeln, welches die Identifikation von Materialfehlern deutlich präzisiert. Diese Methoden sind essenziell für die Qualitätssicherung und Sicherheit von CFK-Felgen. Gleichzeitig zeigten die durchgeführten Tests die Grenzen bestehender Technologien auf und führten zu spezifischen Verbesserungsvorschlägen, etwa bei der Sensorapplikation. Die geplante Integration von Sensorik (AP 10) baut direkt auf diesen Arbeiten auf und ist ein logischer nächster Schritt, welcher aufgrund der schlechten Reproduzierbarkeit der Sensorergebnisse nicht mehr finalisiert werden konnte.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Der voraussichtliche Nutzen liegt v.a. im Erkenntnisgewinn und den damit verbundenen wirtschaftlichen Vorteilen. Die erstellte Spannungsanalyse in Kombination mit den getesteten thermografischen Prüfmethoden erhöhen die Sicherheit und Zuverlässigkeit von CFK-Felgen erheblich. Insbesondere hervorzuheben sind die Ergebnisse der Thermographie in Bezug auf die Überwachung der seriellen Fertigung von CFK-Felgen. Zudem konnten die wesentlichen Unterschiede in der Sensorapplikation gemessen, und somit Handlungsempfehlungen für die Applikation formuliert werden. Die entwickelten Prüfmethoden und Erkenntnisse sind zudem auf andere CFK-Strukturen übertragbar, was das Potenzial für eine breite Anwendung und einen langfristigen Nutzen weiter erhöht.

Der darüber hinaus aus Sicht des Projektpartners voraussichtliche Nutzen kann dem von SemsoTec separat eingereichten Abschlussbericht entnommen werden.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf dem Gebiet des Structural Health Monitoring von Verbundwerkstoffen wurden während der Projektlaufzeit bedeutende Fortschritte erzielt. Besonders hervorzuheben sind Arbeiten, die den Einsatz von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG) untersuchen, welche präzise Messungen von Belastungen und Schäden ermöglichen. Neuere Studien kombinierten FBG-Sensoren mit fortgeschrittenen Algorithmen, wie beispielsweise künstlicher Intelligenz, um die Schadensdetektion in komplexen Anwendungen, wie Rohrleitungssystemen, zu verbessern (Altabey et al., 2023; Kaman et al., 2022).

Ein weiterer Fortschritt ist die Integration von piezoelektrischen Eigenschaften in Verbundwerkstoffe, wodurch externe Sensoren überflüssig werden. So stellt die Nutzung dehydrofluorierter PVDF-Materialien eine innovative Alternative für multifunktionale selbstüberwachende Verbundwerkstoffe dar (Groo et al., 2021).

Im Bereich der datenbasierten Ansätze bieten Studien zur Schadensmechanik in 3D-gewebten Verbundwerkstoffen sowie zur akustischen Emission bei CFK-Bauteilen neue Möglichkeiten zur Quantifizierung und Lokalisierung von Schäden (Jacot et al., 2023; Jung et al., 2022).

Diese Entwicklungen zeigen das Potenzial, SHM-Systeme weiter zu automatisieren und die Genauigkeit der Schadensdiagnostik in verschiedenen Anwendungen, von Luftfahrt über Marine bis hin zu Brückenstrukturen, signifikant zu erhöhen (Demo et al., 2023; Young et al., 2022; Mieloszyk et al., 2021).

Allerdings ist ebenfalls zu betonen, dass weder eine Anwendung der im Projekt genutzten Sensorik noch ein vergleichbarer Anwendungsfall während der Projektlaufzeit bekannt wurde. Das unterstreicht nach wie vor das Alleinstellungsmerkmal und die Wichtigkeit des Projektes.

2.6 Geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Teile des Projektergebnisses wurden auf dem Münchner Leichtbausymposium 2023 vorgestellt (Nikita, 2023). Darüber hinaus sind keine Veröffentlichungen geplant. Schutzrechte oder Patente sind seitens TUM oder SemsoTec nicht geplant.

Literatur der eingehenden Darstellung

Altabey, W. A., Wu, Z., Noori, M., & Fathnejat, H. (2023). Structural Health Monitoring of Composite Pipelines Utilizing Fiber Optic Sensors and an AI-Based Algorithm—A Comprehensive Numerical Study. Sensors, 23(8), 3887. https://doi.org/10.3390/s23083887

Demo, L. B., Tronci, E. M., & Feng, M. Q. (2023). Multifunctional Fiber-Reinforced Polymer Composites for Damage Detection and Memory. Journal of Composites Science, 7(9), 383. https://doi.org/10.3390/jcs7090383

Groo, L., Inman, D. J., & Sodano, H. A. (2021). Dehydrofluorinated PVDF for structural health monitoring in fiber reinforced composites. Composites Science and Technology, 214, 108982. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108982

Jacot, M., Champaney, V., Chinesta, F., & Cortial, J. (2023). Parametric Damage Mechanics Empowering Structural Health Monitoring of 3D Woven Composites. Sensors, 23(4), 1946. https://doi.org/10.3390/s23041946

Kaman, M. O., Yilmaz, M. A., AytiMur, G., Altin, E., & Erdem, S. (2022). Structural Health Monitoring by Using Fiber Optic Sensors in Composite Materials. Hacettepe Journal of Biology and Chemistry, 50(3), 313–318. https://doi.org/10.15671/hjbc.1066965

Mieloszyk, M., Majewska, K., & Ostachowicz, W. (2021). Application of embedded fibre Bragg grating sensors for structural health monitoring of complex composite structures for marine applications. Marine Structures, 76, 102903. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102903

Nikita, N. (2023, November 15). Integration eines CF-Sensors in eine Leichtbaufelge. MUNICH SYMPOSIUM ON LIGHTWEIGHT DESIGN 2023, München.

Young, S., Penumadu, D., Patchen, A. D., Laggis, G., Michaud, J., Bradley, A., Davis, R., Unser, J., & Davis, M. (2022). Smart Polymer Composite Deck Monitoring Using Distributed High Definition and Bragg Grating Fiber Optic Sensing. Sensors, 22(11), 4089. https://doi.org/10.3390/s22114089