

C. Könke, J. P. Bergmann, M. Ganß
J. Hildebrand, M. Kuhne, S. Hammer, Y. Ali

Zustandsmonitoring von mit Kohlefaserlamellen verstärkten Stahlverbindungen unter Einsatz integrierter Fasersensorik Intelligentes CFK-Pflaster

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0242-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Materialforschungs- und
-prüfanstalt an der
Bauhaus-Universität Weimar



Zustandsmonitoring von mit Kohlefaserlamellen verstärkten Stahlverbindungen unter Einsatz integrierter Fasersensorik

„Intelligentes CFK-Pflaster“

Endbericht



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



FORSCHUNGSINITIATIVE
Zukunft BAU

Endbericht: Zustandsmonitoring von mit Kohlefaserlamellen verstärkten Stahlverbindungen unter Einsatz integrierter Fasersensorik

„Intelligentes CFK-Pflaster“

Forschungsstellen:

Materialforschungs- und -Prüfanstalt
an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA)
Coudraystraße 4/9
99423 Weimar

Fachgebiet Fertigungstechnik (IFT),
Technische Universität Ilmenau
Gustav-Kirchhoff-Platz 2
98693 Ilmenau

Projektleitung und Mitarbeit:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Könke (MFPA)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J.-P. Bergmann (IFT)
Dr.-Ing. M. Ganß (MFPA)
Dr.-Ing. J. Hildebrand (IFT)
Dr. rer. nat. M. Kuhne (MFPA)
S. Hammer M.Sc. (IFT)
Yarop Ali M.Sc. (IFT)

Projektpartner/Projektunterstützer:

Advanced Optics Solutions GmbH
FBGS Technologies GmbH
RSB Rudolstädter Systembau GmbH
Sika Technology AG
S&P Clever Reinforcement GmbH

Laufzeit: 01.08.2016-31.07.2018

Aktenzeichen: SWD 10.08.18.7-16.24

**Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative ZukunftBau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumplanung gefördert.
(Aktenzeichen: SWD 10.08.18.7-16.24)**

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Weimar, den 01.08.2018

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung	4
2. Einleitung und Motivation	5
2.1. Ausgangssituation – Nutzung von CFK-Lamellen zur Sanierung von Stahlkonstruktionen	5
2.2. Faseroptische Sensoren und Messsysteme	6
2.2.1. Faser-Bragg-Gitter-Sensoren	6
2.2.2. Verteilt-messende Systeme / optische Rückstreureflektometer	8
2.3. Gegenstand des Forschungsvorhabens	9
3. Materialien, Experimentelle Arbeiten und Methoden.....	11
3.1. Untersuchte Klebstoffe und Herstellung der Klebverbindungen.....	11
3.1.1. Herstellung der Laborprobekörper.....	12
3.1.2. Herstellung der Bauteildemonstratoren	13
3.2. Verwendete Sensoren und Messtechnik	14
3.2.1. FBG-Sensoren und Messtechnik.....	14
3.2.2. Frequenzbereichsreflektometrie (OFDR).....	14
3.2.3. Sensorkonfektionierung.....	14
3.3. Bildgebende Verfahren zur Charakterisierung der Sensoreinbettung und Schädigung	14
3.3.1. Lichtmikroskopie	14
3.3.2. Röntgen-Computer-Tomographie (X-CT)	15
3.3.3. Puls-Phasen-Thermographie.....	15
3.4. Mechanische Untersuchungen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen unter Nutzung von faseroptischen Sensoren.....	15
3.4.1. Zugversuche an Klebstoffsubstanzproben.....	15
3.4.2. Zugversuche an den Stahl-CFK-Klebverbindungen.....	16
3.4.3. Bauteilversuche - Biegebelastung	16
3.4.4. Modellbildung und Numerische Simulation.....	18
3.4.5. Mechanische Untersuchungen unter schwingender Belastung an Stahl-CFK-Klebverbindung	18
3.5. Klimagerungen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen mit in-situ Dehnungsmessungen	19
4. Ergebnisse der Untersuchungen – Bewertung der faseroptischen Messverfahren für Klebverbindungen unter verschiedenen Belastungen.....	21
4.1. Zugversuche an Klebstoffen und Faserauszugsversuche	21
4.2. Bewertung der Einbettung der faseroptischen Sensoren in die Klebfuge.....	22

4.3. Mechanische Untersuchungen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen unter Zugbelastung mit faseroptischer Sensorik	24
4.3.1. Kraft-Verformungs-Verhalten der Stahl-CFK-Klebverbindungen.....	24
4.3.2. Faseroptische Dehnungsmessungen in Stahl-CFK-Klebverbindungen.....	26
4.4. Faseroptische Messung an Stahl-CFK-Klebverbindungen unter schwingender Belastung.....	32
4.5. Faseroptische Messungen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen unter thermo-hygrischer Belastung in Klimakammern	35
4.6. Untersuchungen an den Bauteildemonstratoren.....	38
4.6.1. CFK-verstärkter HEA-Profilträger	38
4.6.2. Feldtest an einem CFK-verstärkten HEA-Profilträger	44
4.6.3. CFK-verstärkte Quadratprofile.....	46
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	52
Quellenverzeichnis	56

1. Kurzfassung

Ein neuer Ansatz zur Ertüchtigung von Stahlkonstruktionen ist die klebetechnische Applikation von Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Trotz der in der Literatur gezeigten Verstärkungspotentiale, fehlen bislang zerstörungsfreie Monitoring- und Analyseverfahren, um die Akzeptanz und das Vertrauen in strukturelle Klebung zu steigern und neue Erkenntnisse zur Lebensdauer von geklebten Stahl-CFK-Verbindungen zu generieren. In die Klebverbindung integrierte sehr dünne faseroptische Sensoren können hier helfen neue Detailkenntnisse zu den Verbundeigenschaften insbesondere zu dem Klebfugenverhalten unter komplexen Umgebungsbedingungen und Belastungen zu erlangen.

Im Vorhaben wurden die Möglichkeiten des Einsatzes von faseroptischen Sensoren für die Zustandserfassung von Stahl-CFK-Klebverbindungen experimentell und numerisch untersucht. Zum Einsatz kamen sehr dünne Faser-Bragg-Gitter-(FBG)-Sensoren und verteilt-messende Sensorfasern, bei denen die Dehnungsmessung über die Auswertung der Rayleigh-Streuung mittels Frequenzbereichsreflektometrie erfolgte. Für die Untersuchungen wurden in Stahl-CFK-Laborprobekörper und Bauteile mit aufgeklebten CFK-Lamellen FBG-Sensoren und verteilt-messenden Sensorfasern in der Klebfuge appliziert. In mechanischen Tests mit definierten Lastbedingungen und Versuchen mit thermisch-hygrischen Beanspruchungen wurden Dehnungen mit den Fasersensoren erfasst, systematisch ausgewertet und analysiert. Die Validierung der Sensordaten erfolgte hierbei mit Temperatursensoren, Kraft- und Wegdaten der Prüfmaschinen sowie mit der elektrischen Dehnungsmesstechnik, der digitalen Bildkorrelation sowie mit der numerischen Struktursimulation unter Nutzung der Finiten-Elemente-Methode. Die Einbettungscharakteristika sowie die Versagensmechanismen der Klebverbindungen wurden mit der Röntgen-Computertomografie, Lichtmikroskopie und mit Puls-Phasen-Thermografie beurteilt. Im Rahmen eines einfachen Feldtestes wurde ein Profilträger mit aufgeklebter CFK-Lamelle und integrierter Sensorik über 7 Monate im Freien gelagert und kontinuierlich Sensordaten aus dem Inneren der Verbindung erfasst und analysiert.

Die Untersuchungen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen und CFK-verstärkten Bauteilen mit in der Klebfuge integrierten faseroptischen Sensoren verdeutlichen, dass während der mechanischen und thermisch-hygrischen Belastung der Stahl-CFK-Klebverbindungen sehr genau und ortsauflösend lokale Dehnungen sowie inhomogene Dehnungszustände in Sensorfaserrichtung in der Klebfuge ermittelt werden können. Mit der Fasersensorik können somit tatsächliche Dehnungszustände und eine Schädigung des Verbundes in Form einer Delamination ortsaufgelöst und in Echtzeit detektiert werden. Die Ergebnisse des Vorhabens liefern somit einen neuen Ansatz für die Optimierung von strukturellen Klebverbindungen auf Basis einer Detailanalyse der Klebfugen. Das Projekt schafft zudem die Grundlage für den Einsatz von faseroptischen Sensoren zur Zustandserfassung von Stahl-CFK-Klebverbindungen. Auf Basis eines dehnungsbasierten Bewertungskonzeptes können kritische Dehnungen und Überbelastungen erfasst und somit Traglastgrenzen mit Vorkenntnissen zur Struktur und / oder numerischen Berechnungen abgeschätzt werden.

2. Einleitung und Motivation

2.1. Ausgangssituation – Nutzung von CFK-Lamellen zur Sanierung von Stahlkonstruktionen

Es gibt deutschlandweit einen steigenden Sanierungsbedarf zur Erhaltung und Verlängerung der Nutzungsdauer von geschweißten Stahlkonstruktionen. Dies betrifft unter anderem Brückenbauwerke aber auch Konstruktionen des Maschinenbaus wie beispielsweise Krane und andere technische Anlagen. Die Nutzungsdauer soll verlängert und Konstruktionen sich ändernden Belastungssituationen angepasst werden. Bei der Sanierung geschweißter Stahlkonstruktionen werden im Allgemeinen vorhandene Risse an Schweißverbindungen auf der Baustelle ausgeschliffen und mit einem angepassten Schweißzusatzwerkstoff erneut geschweißt. Bei Verstärkungsmaßnahmen werden Stahllaschen und -bleche an die vorhandene Stahlkonstruktion angeschweißt. Schweißen ist aber nicht immer zielführend, da die Stahlkonstruktion durch eine erneute Wärmeeinwirkung ungünstig beeinflusst werden kann. Beispielsweise wurden bei der Rheinbrücke auf der A1 bei Leverkusen mehrere „unschweißbare“ geschädigte Stellen gefunden [1]. D.h. beim Überschweißen von existierenden Rissen entstanden neue Risse. Dies verdeutlicht, dass neue Sanierungsverfahren erforderlich sind, bei denen der Gefügezustand des Grundwerkstoffes und dessen mechanischen Eigenschaften sowie die Beanspruchung der Struktur nicht negativ beeinflusst werden.

Ein Ansatz für eine schonende Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahme von Stahlkonstruktionen ist die klebtechnische Applikation von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. Die Ertüchtigung bzw. das Verstärken von Beton, Holz und Mauerwerk mit CFK gehört inzwischen zum Stand der Technik [2]. Bei dem Verfahren werden vorwiegend unidirektionale CFK-Lamellen über einen Strukturklebstoff mit dem Bauteil stoffschlüssig verbunden, was in einer Verstärkung der Strukturen resultiert [2]. CFK-Lamellen sind zur Aufnahme von Zugspannungen geeignet und werden zur Verstärkung in der Biegezugzone und vereinzelt auch in Bereichen hoher Querkräfte und bei Torsionsbelastung eingesetzt. Verschiedene Brücken wurden bereits in den 80er Jahren in der Schweiz sowie 1996 in Niederwartha bei Dresden mit CFK verstärkt [2]. Die CFK-Verstärkungstechnik kam auch bei der Sanierung des Ruhrstadions in Bochum und der Sanierung des Jüdischen Museums in Berlin zum Einsatz. Die Effektivität der Verstärkung kann durch das Vorspannen der CFK-Lamellen erhöht werden. Während bei Stahlbetonbrücken die Zugzone sowohl durch schlaffe als auch vorgespannte Lamellen bewehrt werden, beschränken sich die Maßnahmen bei anderen Baustoffen generell auf schlaffe Bewehrungen bzw. Verstärkung [3]. Für das Verstärken von Stahlbeton mit geklebten Stahl- und CFK-Lamellen gibt es bereits bauaufsichtliche Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik [4-7]. Die CFK-Applikation an Stahlstrukturen hat sich in der Praxis noch nicht durchgesetzt. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen zeigen das große Potential auf. Über eine CFK-Applikation kann nicht nur die Resttragfähigkeit einer Konstruktion gewährleistet werden, sondern es können auch Stahlkonstruktionen verstärkt werden [Bar14, Col05, Col06]. Auch zahlreiche deutsche Verbundprojekte wie das Projekt STAKOK [3, 8] und das Projekt FASS [9] zeigen die Ertüchtigungs- und Verstärkungspotentiale auf. Beispielsweise wurde in [3] mit quasi-statischen Zugversuchen an Stahl-CFK-Klebverbindungen eine Verdopplung der Kraft bei der Streckgrenze für das System mit eingespannten CFK-Lamellen festgestellt. Bei Proben mit nicht eingespannter CFK-Lamelle findet das Versagen durch Adhäsionsbruch an der Grenzfläche zwischen Stahl und Klebstoff statt [3]. Die Untersuchungen zeigen das Potential

der Verstärkung mit CFK, aber gleichzeitig die Herausforderung und den Optimierungsbedarf bezüglich Verbesserung der Adhäsion des Strukturklebstoffes zu Stahl. Hier ist insbesondere auch die unterschiedliche Wärmeausdehnung der Materialien zu beachten, die der Klebstoff kompensieren muss.

Ein weiterer Ansatz ist auch die Ertüchtigung von Stahlkonstruktionen mit Stahlblechen. Hier soll das Tragverhalten über das Aufkleben von Stahlblechen auf die Stahlkonstruktion erhöht werden. Wenngleich die klebetechnische Applikation von Strukturen (CFK-Lamellen oder Stahlbleche) explizit dafür eingesetzt werden soll, die Lebensdauer einer Stahlkonstruktionen zu verlängern, fehlen noch systematische Untersuchungen und Erkenntnisse auf Grundlage von experimentell und/oder numerisch ermittelten Daten über die Interaktion von Stahl-Klebstoff und Klebstoff-CFK und deren Interaktion. Insbesondere die zeitabhängigen Veränderungen im Strukturklebstoff sowie die Delamination an der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Fügepartner, was in verschiedenen Publikationen [3, 10, 11] festgestellt wurde, müssen beachtet werden.

Über die Nutzung in der Klebfuge integrierter Sensorik von Stahl-CFK-Klebverbindung könnten Detailinformationen über den Zustand und Zustandsänderungen der Klebfuge erzielt werden. Zudem soll es über die Entwicklung von Monitoringverfahren zukünftig möglich sein, den Zustand zu beurteilen und so die Lebensdauer und den Instandsetzungsbedarf einer Stahl-CFK-Klebverbindung in einer Stahlkonstruktion verlässlich zu prognostizieren. Hier setzte das Forschungsvorhaben an.

2.2. Faseroptische Sensoren und Messsysteme

2.2.1. Faser-Bragg-Gitter-Sensoren

Eine innovative Möglichkeit, Dehnungen orts aufgelöst zu erfassen, besteht in der Anwendung von Faser-Bragg-Gitter-(FBG)-Sensoren. Üblicherweise bestehen FBG-Sensoren aus optischen Glasfasern mit Kern und Mantel mit einem Durchmesser von 125 µm. Das Licht verläuft im Kern. Der Mantel reflektiert Streulicht zurück in den Kern und gewährleistet somit die Übertragung des Lichts durch den Kern mit minimalen Verlust. Speziell bei FBG-Sensoren wird in den Faserkern durch einen UV-Laser örtlich eine Änderung des Brechungsindex vorgenommen. Diese sogenannten Bragg-Gitter sind optische Interferenzfilter. Die Einkopplung kohärenten Lichts in die optische Glasfaser resultiert in der Reflexion definierter Lichtwellenlängen (= Bragg-Wellenlänge) am Bragg-Gitter. Diese Reflexion definierter Lichtwellenlängen macht man sich bei FBG zu nutze. Temperaturen oder mechanische Dehnungen resultieren in einer definierten Veränderung des Bragg-Gitters und somit in einer Verschiebung der reflektierten Lichtwellenlängen. Über Erfassung der Wellenlängenänderung mittels entsprechenden Messgeräten kann die mechanische Dehnung und/oder die temperaturinduzierte Dehnung quantifiziert werden [12]. Abbildung 1 zeigt schematisch das Messprinzip. Die optische Glasfaser wird durch ein äußeres polymeres bzw. organisch-anorganisches Beschichtungssystemen vor äußeren Einflüssen geschützt. Neuere Entwicklungen erlauben das Einschreiben von Bragg-Gitter mit Infrarot-Femtosekunden-Lasern. Dies ermöglicht es, Bragg-Gitter durch eine Vielzahl von Faserbeschichtungen zu schreiben.

Auf einer einzigen Sensorfaser kann eine Vielzahl von Faser-Bragg-Gitter angeordnet sein, die jeweils unabhängig voneinander zeitsynchron an verschiedenen Stellen Dehnungen und Temperaturen messen können [13, 14].

Faseroptische Sensoren können ähnlich wie elektrische Dehnungsmessstreifen auf das zu analysierende Bauteil aufgeklebt werden und somit Dehnungen unter Belastung erfassen.

Anwendung finden FBG-Sensoren bereits u.a. in der Luft- und Raumfahrt, im Schiffbau, bei einfachen Messaufgaben im Brückenbau und in Windkraftanlagen [14]. Die dünnen faseroptischen Sensoren haben sich auf Grund der Störsicherheit und Korrosionsbeständigkeit in den letzten Jahren als Lösungen für oberflächenapplizierte Belastungs- und Überwachungssensoren von Bauwerken [14] bewährt. Vorteile gegenüber elektrischen Sensor-systemen wie beispielsweise elektrischen Dehnungsmessstreifen sind unter anderem die Möglichkeiten des Einsatzes in:

- elektromagnetischen Feldern
- explosiven Umgebungen
- chemisch aggressiven und korrosiven Umgebungen
- sowie der Unterwassereinsatz

Eine Anwendung als strukturintegrierte Sensoren erfolgte bereits bei Faser-Kunststoff-Verbunden. Bei unterschiedlichen Verbundwerkstoffen konnten bereits mittels eingebetteten FBG-Sensoren lokale Dehnungen im Laminat gemessen werden [15]. Es wurde gezeigt, dass bei hohen transversalen Dehnungen in Kompositen eine Doppelbrechung die Auswertung der reflektierten Lichtwellenlängen verkompliziert [16]. Hier ist auch anzumerken, dass auf Grund der relativ großen Sensorfaserdurchmesser mit $\geq 125 \mu\text{m}$ die integrierten Sensorfasern den Verbund aus Verstärkungsfasern stören können. Dies wurde durch unterschiedliche Autoren gezeigt.

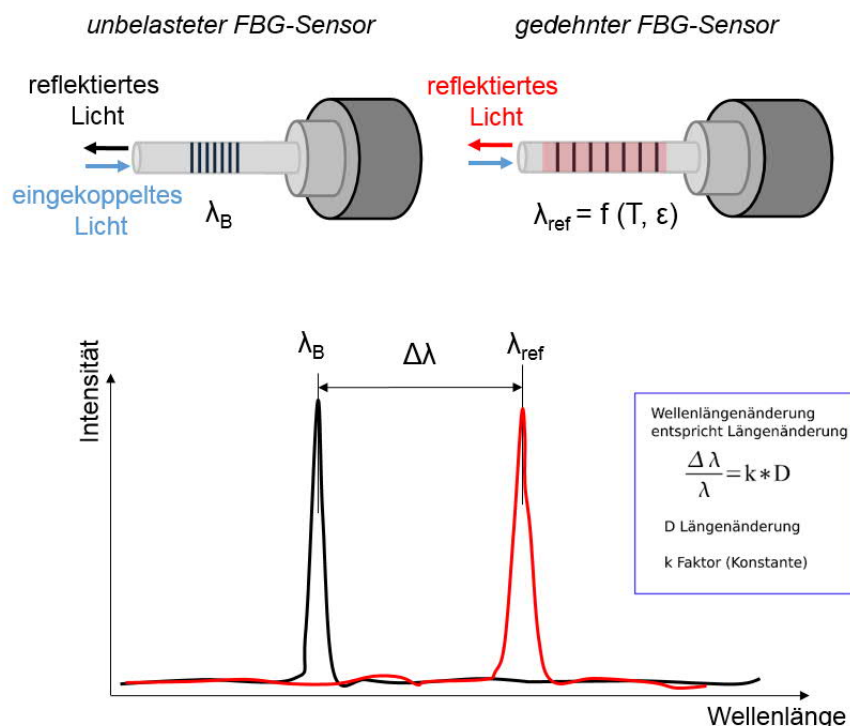


Abbildung 1: Schema des Messprinzips von FBG-Sensoren (Details siehe Text)

Die Auswertung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren erfolgt in der Regel durch die Beobachtung und Auswertung des Lichtspektrums der FBG. Aus der Verschiebung der Spektren wird die Dehnung in Faserrichtung berechnet. Hierbei wird meistens das Maximum des Spektrums mit einem Gaußfit ermittelt.

Bei der Auswertung der Spektren kommen hauptsächlich drei Technologien zum Einsatz:

- Illumination des Spektrums durch Einspeisen einer hinreichend breitbandigen Lichtquelle und Detektion des Signals durch einen optischen Spektrumanalysator (OSA).
- Illumination des Spektrums durch Einspeisen einer hinreichend breitbandigen Lichtquelle (z.B. LED) und Detektion des reflektierten Signals durch ein CCD-Element.
- Abtasten des Spektrums mittels eines schmalbandigen Lasers und Detektion der reflektierten Leistung durch Photodioden.

Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Auflösung, Geschwindigkeit und Robustheit. Für den industriellen Einsatz haben sich die letzten beiden Varianten etabliert. Aufgrund der höheren spektralen Auflösung sind Scanning-Laser Systeme etwas genauer in der Aufnahme der Spektren. Hinsichtlich Auflösung und Genauigkeit des eigentlichen FBG-Sensorsignals (= die Wellenlängenverschiebung des Spektrums) unterscheiden sich CCD-Systeme und Scanning-Laser nur wenig voneinander. Für die Dehnungsauflösung werden in der Regel 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ und für die Temperatur etwa 0,1 K erreicht. Die Höhe der zu messenden Dehnungen ist vom Wellenlängenbereich des Messgerätes und dem Faser-Bragg-Gitter-Sensoren abhängig. Bei geeigneten Konfigurationen können Dehnungen von >30.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ gemessen werden.

Neue interferometrische Messprinzipien erlauben aber auch die verteilte Messung mit Faser-Bragg-Gittern auf einer Glasfaser über Längen von einigen Metern. Hierbei werden tausende von FBG-Gittern mit gleicher Wellenlänge in die Faser eingeschrieben und Dehnungen und / oder Temperaturen mit optischen Reflektometern ermittelt [17].

2.2.2. Verteilt-messende Systeme / optische Rückstreureflektometer

Verteilt-messende Systeme erlauben eine quasi-kontinuierlich verteilte Messung über die gesamte Faserlänge. Bei verteilt-messenden Systemen wird das durch die Glasfaser selbst zurückgestreute Licht ausgewertet. Für die Messung von Dehnungen und Temperaturen über Entfernung von einigen Kilometern haben sich Messverfahren, die den Raman oder Brillouin-Anteil im zurückgestreuten Licht nutzen, bereits etabliert [18]. Die Auflösung der Messpunkte ist auf ca. ein Meter limitiert. Deutlich höhere Auflösung zwischen den Messpunkten entlang der Fasern mit bis zu 1 mm ist mit der Auswertung kleiner Brechungsindexschwankungen über die Rayleighstreuung möglich [18]. Diese Messtechnik nutzt optische Rückstreureflektometer und ermöglicht die Messung über ca. 70 m Sensorfaser mit einer hohen Ortsauflösung von ca. 1 mm. In Abbildung 2 ist beispielhaft die Dehnungen in Abhängigkeit von der Versuchszeit und Sensorposition für Messungen an Stahl-CFK-Klebverbindungen dargestellt.

Aufgrund der hohen örtlichen Auflösung ist der Informationsgewinn hoch, so dass lokale Ereignisse detektiert werden können. Das Einschreiben von speziellen Bragg-Gittern in die Sensorfasern ist bei diesem Verfahren nicht notwendig. Es muss aber sichergestellt werden, dass kein Licht am Faserende zurückreflektiert wird, da sonst die Auswertung gestört wird. Hierfür gibt es bereits spezielle Sensorfasern mit präpariertem Ende.

Für die Temperatur- und Dehnungsanalyse muss vor der Messung ein Referenzfile erzeugt werden. Dies muss immer zur Verfügung stehen, so dass die Dehnungen auf den Ausgangszustand der Fasern bezogen werden können. Dehnungen bis zu 15.000 $\mu\text{m}/\text{m}$

können gemessen und eine Ortsauflösung von 1 mm über eine Messstrecke von 70 m erreicht werden.

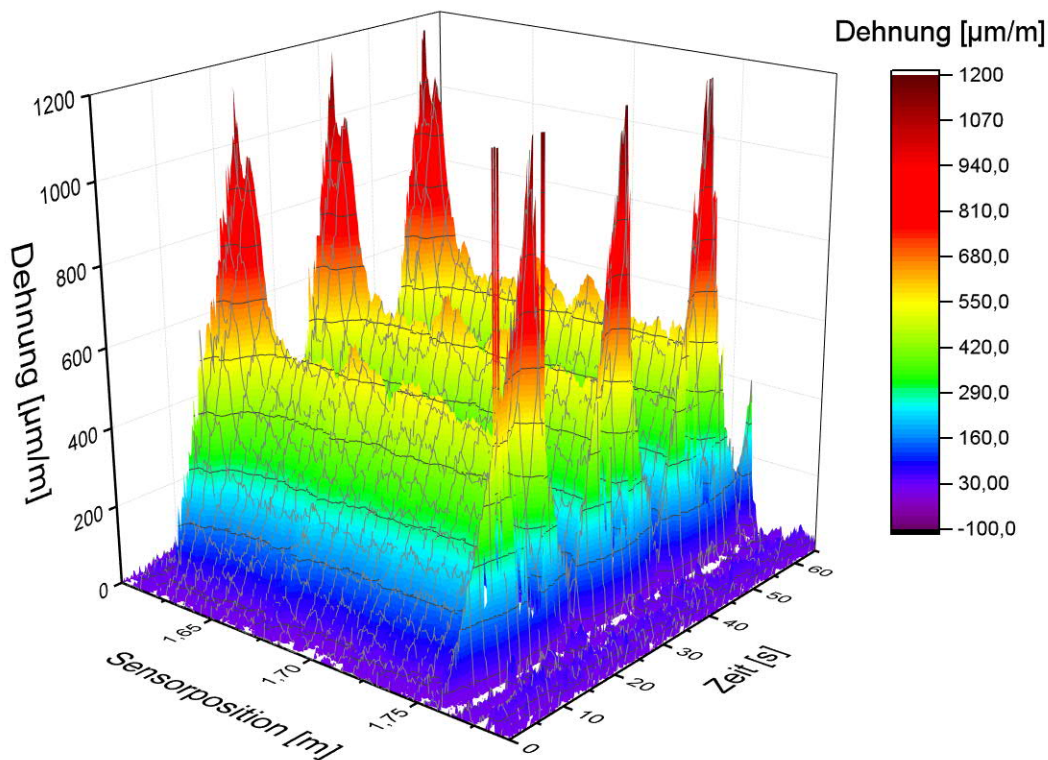


Abbildung 2: Orts- und zeitaufgelöste Dehnungswerte in der Klebfuge einer Stahl-CFK-Klebverbindung unter Zugbeanspruchung

2.3. Gegenstand des Forschungsvorhabens

Der Einsatz von Stahl-CFK-Klebverbindungen im Bauwesen ist unter anderem auf Grund fehlender Bemessungs- und Nachweisverfahren noch nicht etabliert. Zudem sind tiefgreifende Untersuchungen zu der optimalen Oberflächenvorbehandlung der Fügepartnern, den Verbundeigenschaften unter komplexen Medieneinfluss sowie den Ermüdungseigenschaften notwendig. Letzteres wird gerade in einem laufenden Forschungsvorhaben [9] untersucht. Im Rahmen des hier vorliegenden, abgeschlossenen Forschungsvorhabens wurde ein anderer Ansatz gewählt. Ziel war es ein Sensorverfahren zu entwickeln und zu untersuchen mit dem der Zustand der Klebfugen analysiert und während der Nutzung überwacht werden kann. Die Klebfuge ist auf Grund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung der Fügepartner und möglicher Alterung der Klebstoffe die stark belastete Zone und somit oftmals eine Schwachstelle der Konstruktion. Bislang fehlen hier zerstörungsfreie Monitoring- und Analyseverfahren um die Akzeptanz von Stahl-CFK-Klebverbindungen zu steigern und neue Erkenntnisse zur Lebensdauer der geklebten Stahl-CFK-Verbindung zu generieren. In die Klebverbindung integrierte Sensoren, die auf die Verbindungseigenschaften keinen oder nur sehr geringen Einfluss haben, können hier helfen neue Detailkenntnisse zu den Verbundeigenschaften insbesondere zu den Klebfugeneigenschaften zu erlangen.

Im Vorhaben wurden gezielt die Möglichkeiten der Integration und der Zustandserfassung in geklebten Stahl-CFK-Verbindungen mittels Faser-Bragg-Gitter-(FBG)-Sensoren und verteilt-messenden Sensorfasern erforscht. Diesbezüglich wurden unterschiedliche Stahl-CFK-Verbindungen mit integrierten Sensoren hergestellt, mechanisch und thermo-mechanisch belastet und die Sensorsignale systematisch ausgewertet, analysiert und mit unterschiedlichen Methoden validiert. Der Forschungsansatz – die Integration von faseroptischer Sensorik in die Klebfuge zur Analyse des Beanspruchungszustandes – ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

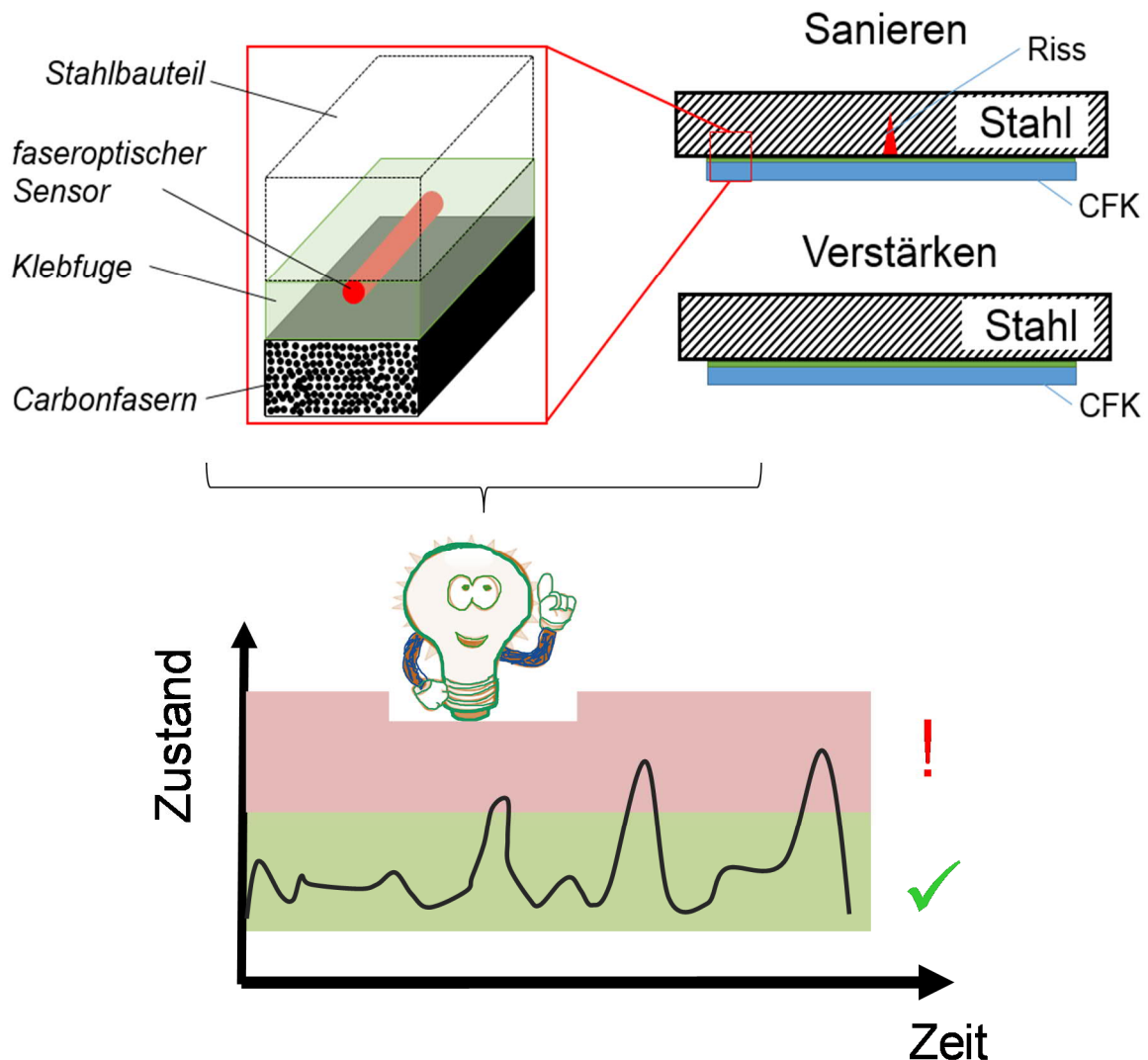


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Lösungsansatzes im Projekt „intelligentes CFK-Pflaster“

Anhand der gemessenen Sensordaten und deren Validierung sollen Aussagen zu den Messmöglichkeiten mit faseroptischen Sensoren und zur Qualität der Messdaten getroffen werden.

3. Materialien, Experimentelle Arbeiten und Methoden

3.1. Untersuchte Klebstoffe und Herstellung der Klebverbindungen

Es wurden unterschiedliche Klebstoffsysteme und CFK-Lamellen untersucht. Dabei kamen CFK-Lamellen „Standard S&P CFK-Lamelle Typ150/2000“ von der S&P Clever Reinforcement GmbH und CarboDurS-Lamellen der SIKA AG zum Einsatz. Die CFK-Lamellen bestehen aus uni-direktional orientierten Karbonfasern mit einem Faseranteil von mehr als 68 Vol.-%. Die Karbonfasern sind in einem Epoxidharz gebunden. Die CFK-Lamellen haben bauaufsichtliche Zulassungen für die Verstärkung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen. Die Anbindung an das Bauwerk erfolgt üblicherweise mit zwei-komponentigen Epoxidharzklebstoffen, die hohe Füllstoffanteile aufweisen. Hierbei wurde der Klebstoff Sikadur30 der SIKA AG für SIKA CFK-Lamellen und der Klebstoff StoPOXSK41 der Sto AG für S&P-CFK-Lamelle eingesetzt. Die Klebstoffe werden bereits für die Anbindung der CFK-Lamellen an Betonoberflächen benutzt. Da die hochgefüllten Klebstoffe in der Verarbeitung und den mechanischen Eigenschaften vergleichbar sind, wurde Sikadur30 nur für methodische Untersuchungen genutzt. Desweiteren wurde in die Untersuchungen ein zäh-modifizierter Klebstoff mit geringer Steifigkeit (SikaPower-1200 der SIKA AG) miteinbezogen.

Tabelle 1 zeigt die Eigenschaften der hier untersuchten CFK-Lamellen und Klebstoffsystem nach Angaben der Hersteller. CFK-Lamellen mit einer Breite von 50 mm und 100 mm sowie Dicken von 1,2 mm sowie 1,4 mm wurden für die Untersuchungen genutzt.

Tabelle 1: Eigenschaften der eingesetzten Materialien nach Herstellerangaben

Material	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
CFK 1 mit >70 Vol.% Karbonfasern	168	2200-2500	1,5
CFK 2 mit >68 Vol.% Karbonfasern	170	3100	1,8
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
Klebstoff 1 ^{*1}	2800	40	3,5
Klebstoff 2	ca. 11.000	≥30 ^{*2}	k. A.
Klebstoff 3	ca. 11.200	24-31	k. A.

**1 nach Aushärtung bei 4h 70°C*

**2 Biegezugfestigkeit*

Für die Herstellung der Stahl-CFK-Klebverbindungen wurden aus Stahlblechen mit einer Dicke von 4 mm Zugversuchsproben und rechteckige Proben über Wasserstrahlschneiden gefertigt. Die Stahlbleche waren aus gewöhnlichen Baustahl S235. Für die Untersuchungen an den bauteilähnlichen Demonstrator wurden HEA-Stahlträger HEA100 aus Baustahl S235 und Quadratprofile QRO 150x4 aus S355 benutzt.

3.1.1. Herstellung der Laborprobekörper

Die Stahlzugproben wurden mittig mit einer Bohrung mit einem Durchmesser von 10 mm versehen. Die Bohrung soll eine Schwächung des Stahls simulieren. Abbildung 4A zeigt die Geometrie der Probekörper sowie schematisch die Position der Sensoren. Die Geometrie der CFK-Lamellen beträgt $120 \times 40 \text{ mm}^2$. Diesbezüglich wurden die 50 mm breiten CFK-Lamellen mittels Trennschneider PowerMet 3000 der Firma Bühler unter Wasserkühlung auf 40 mm Breite geschnitten. Da sich in den Untersuchungen gezeigt hat, dass das Versagen durch Ablösen der CFK-Lamelle stattfindet, wurden in weiteren Untersuchungen die Geometrie der Stahlzugprobekörper vereinfacht (Abbildung 4B). Die Abmessungen der CFK-Lamellen betrugen $200 \times 50 \text{ mm}^2$. Ein Schneiden der Lamellen auf Breite war somit nicht mehr erforderlich. Vor der Faserapplikation und dem Klebprozess wurde die Oberflächenschicht auf den Stahlzugproben durch Schleifen (400er Körnung) entfernt. Vorher und nachher erfolgte eine gründliche Reinigung der Oberfläche mit Isopropanol. Die CFK-Lamellen wurden mit Isopropanol bzw. Spezialreiniger StoCrylVV (Sto SE&Co. KGaA) gesäubert. Die faseroptischen Sensoren (Faser-Bragg-Gitter-Sensoren und verteilt-messende Fasersensoren) wurden auf der gereinigten Stahloberfläche mit geringer Vordehnung appliziert. Anschließend erfolgten das Auftragen des Klebstoffsystems im Überschuss und das Aufbringen der gereinigten CFK-Lamelle. Die Klebschichtdicke wurde mit Teflonfolien auf 1 mm eingestellt. Die Verarbeitung des Klebstoffes erfolgte nach Herstellerangaben. Die Aushärtung betrug mindestens 7 Tage. Die Sensoren waren in Zugrichtung in einem Abstand von 10 mm vom Rand orientiert und befinden sich nach der CFK-Applizierung in der Klebfuge (Abbildung 4). Zur experimentellen Validierung wurden bei ausgewählten Proben auf die Stahlseite an definierten Stellen elektrische Dehnungsmesstreifen geklebt.

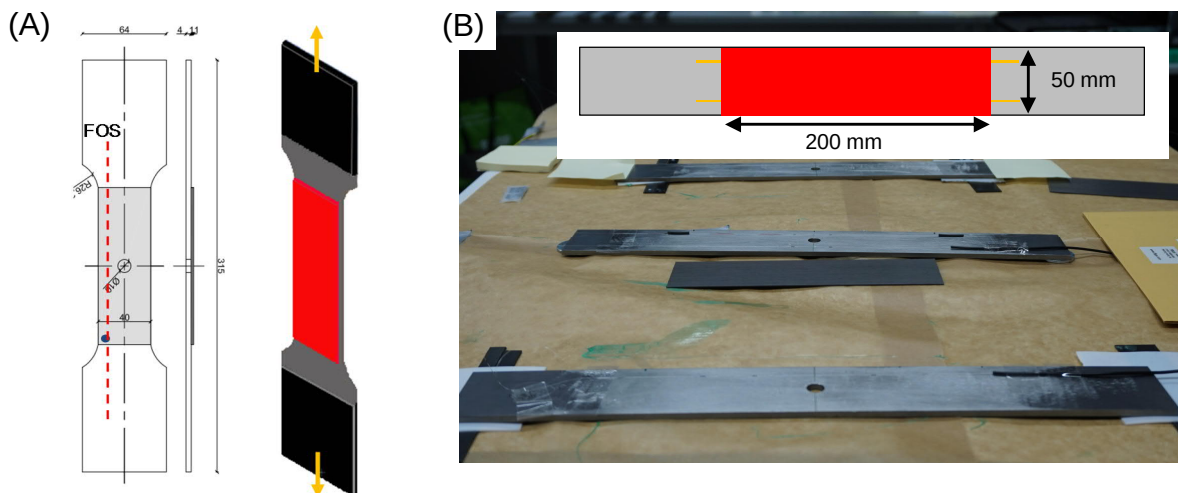


Abbildung 4: (A) Darstellung der Stahl-CFK-Zugproben mit Positionierung der Fasersensoren sowie (B) Geometrie der rechteckigen Proben und Bilder von der Präparation

Zur Charakterisierung der Klebstoffe wurden Substanzprüfkörpern des Klebstoffs mit Geometrien in Anlehnung an Norm DIN EN ISO 527-2/1B hergestellt. Diesbezüglich wurde der Klebstoff in entsprechende Silikonformen gegossen bzw. gestrichen. Anschließend erfolgte die Aushärtung bei Raumtemperatur entsprechend der Herstellerangaben.

Zur Bestimmung der Faserauszugskraft wurden Sensorfasern mit einer Länge von 3 cm in die zu untersuchenden Klebstoff eingebettet. Hierbei wurde eine spezielle Silikonform genutzt. Anschließend erfolgte die Aushärtung der Klebstoffe bei Raumtemperatur für mindestens 7 Tage.

3.1.2. Herstellung der Bauteildemonstratoren

Als bauteilähnliche Demonstratoren wurden zum einen HEA-Profilträger (HEA100, Baustahl S235) sowie Quadratprofile QRO 150x4 (S355) mit faseroptischen Sensoren ausgestattet sowie klebtechnische mit CFK-Lamellen verstärkt. Geometrie und Schema für die Bauteildemonstratoren sind in Abbildung 5 vereinfacht dargestellt.

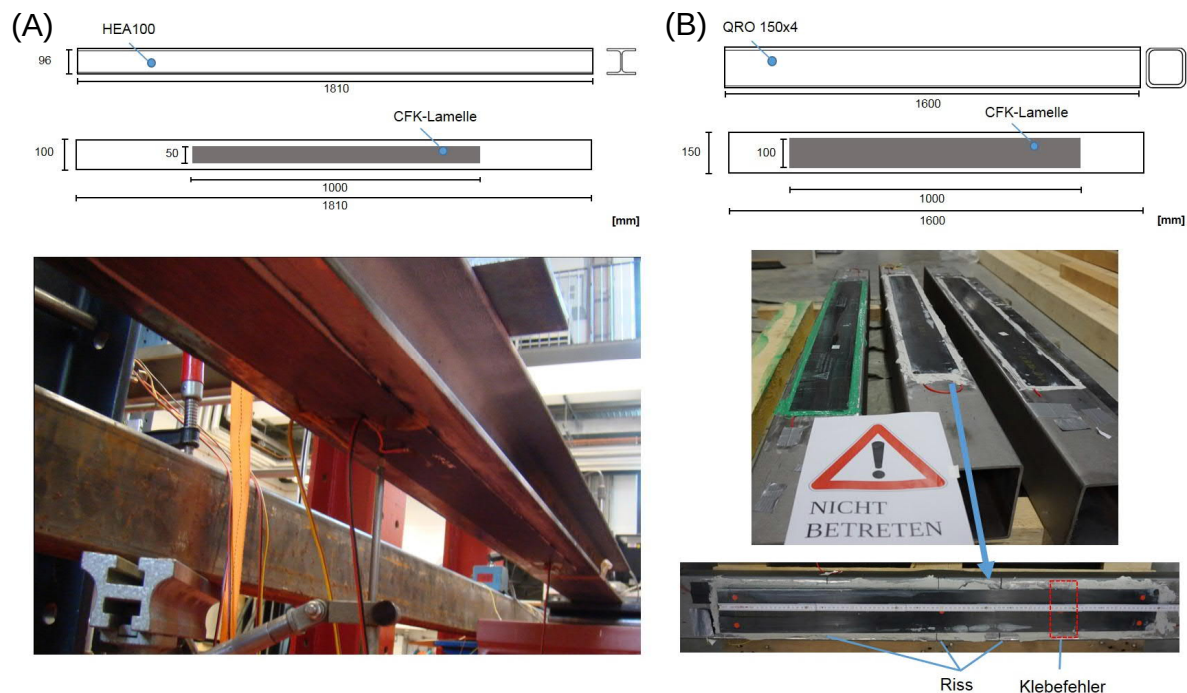


Abbildung 5: (A) Probengeometrie und Bild des CFK-verstärkten HEA-Profilträgers; (B) Geometrie und Bild der CFK-verstärkten Quadratprofile mit integrierter Fasersensorik für die Bauteilversuche (unten: CFK-verstärktes Quadratprofil mit gezielt erzeugten Fehlstellen nach Belastung bis zum Versagen)

Vor der Sensorapplikation und dem Klebeprozess wurde die Oberflächenschicht (Walzhaut) auf dem Stahl mittels Schleifen entfernt. Vorher und nachher erfolgte eine Reinigung mit Isopropanol. Die CFK-Lamellen wurden mit Isopropanol bzw. Spezialreiniger StoCryIVV (Sto SE&Co. KGaA) gesäubert.

Die Applikation der faseroptischen Sensoren erfolgte auf der gereinigten Stahloberfläche mittels Haftklebeband außerhalb der Klebung. Anschließend wurde der Klebstoff im Überschuss aufgetragen und die CFK-Lamelle appliziert. Um eine einheitliche Klebstoffdicke von 1 mm beim HEA-Profilträger zu erzeugen, wurde nach dem Aufbringen, die CFK-Lamelle mithilfe eines Hohlprofils soweit gedrückt, bis das Profil auf dem Abstandshaltern von 1 mm auflag. Bei den Quadratprofilen wurde die CFK-Lamelle händisch mit einer Rolle aufgedrückt, so dass der Klebstoff an den Seiten hervortrat. Dies entspricht der Applikation in der Praxis. Die Aushärtung des Klebstoffsystems erfolgte bei Raumtemperatur für mindestens 7 Tage. Bei einem Quadratprofil wurden zudem künstliche Fehlstellen wie Schnitte im

Quadratprofil und Klebefehler gezielt erzeugt. Das Quadratprofil wurde zudem ohne aufgeklebte CFK-Lamellen im Biegeversuch bis zu einer bleibenden Verformung beansprucht und anschließend wieder in die Ausgangsposition gebracht. Eine schematische Darstellung des CFK-verstärkten Profilträgers und der Quadratprofile mit aufgeklebten CFK-Lamellen und integrierter faseroptischer Sensorik sind in Abbildung 5 dargestellt.

3.2. Verwendete Sensoren und Messtechnik

3.2.1. FBG-Sensoren und Messtechnik

Für die faseroptischen Untersuchungen in Klebverbindungen wurden FBG-Sensoren mit Ormocer®-Coating von FBGS (DTG® LBL-1550, FBGS GmbH, Deutschland) mit einem Faserdurchmesser von ca. 195 µm verwendet. Die FBG-Sensoren enthielten Faser-Bragg-Gitter von 8 mm Länge mit Ausgangswellenlängen von ca. 1530 nm, 1540 nm und 1550 nm. Vor den eigentlichen Untersuchungen erfolgte das Sensordesign auf Basis numerischer und theoretischer Betrachtungen der auftretenden Dehnungen. Position, Lage und Art der Bragg-Gitter wurde gezielt an die Geometrie der zu untersuchten Proben und Bauteile angepasst.

Zur Auswertung der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren wurde ein Auswertesystem mit Arbeitswellenbereich von 1515 bis 1570 nm von AOS (Advanced Optics Solutions GmbH, Deutschland), bestehend aus Eingangsmodul, Lichtquelle, CCD-Spektrometereinheit, Steuermodul, Kalibrator und Auswerteinheit, benutzt. Mit Hilfe der Geräte-Software kann das Spektrum des reflektierten Lichtes gemessen bzw. der zeitliche Verlauf der Dehnungen direkt erfasst werden.

3.2.2. Frequenzbereichsreflektometrie (OFDR)

Dehnungen in den optischen Glasfasern ohne FBG wurden mit einem kohärenten Frequenzbereichsreflektometer vom Typ ODiSi B von LUNA (LUNA Innovations Incorporated, USA) gemessen. Mit dieser Messtechnik können Dehnungswerte mit einer Auflösung von ca. 1 mm entlang der Faser über einige Meter mit bis zu 250 Hz erfasst werden. Als Sensoren wurden optische Glasfasern mit unterschiedlichen Coatings untersucht.

3.2.3. Sensorkonfektionierung

Die Sensorfaserkonfektionierung sowie Anspießen der Sensorstecker erfolgte mittels 3-Achs Spleißgerät Fujikura 70S der Firma Fujikura (Fujikura Ltd, Japan). Um eine Schädigung der optischen Glasfasern außerhalb der Klebverbindung während Applikation, Transport und Prüfung zu vermeiden, wurden zum Schutz der Faser im Übergang von Klebverbindung zum freiliegenden Bereich bis Sensorstecker entsprechende Schutzmaßnahmen wie z.B. Schlauchummantelungen bzw. Schrumpfschläuche appliziert.

3.3. Bildgebende Verfahren zur Charakterisierung der Sensoreinbettung und Schädigung

3.3.1. Lichtmikroskopie

Lichtmikroskopische Untersuchungen erfolgten mit dem Mikroskop des Typs Olympus GX51 der Firma Olympus (Olympus Deutschland GmbH, Deutschland) sowie mit dem Mikroskop Zeiss AxioScope (Carl Zeiss AG, Deutschland) bei unterschiedlichen Vergrößerungen.

Diesbezüglich wurden aus den Probekörpern mittels Trennschneider PowerMet 3000 der Firma Bühler (Bühler GmbH, Deutschland) mit einer AcuThin-Trennscheibe (<HRC45 103501;

Breite: 1,6 mm) Probestücken sorgfältig herausgeschnitten. Die Proben wurden anschließend mit dem Mikroskop untersucht. Für Mikroskopiebilder mit höherer Auflösung erfolgte die Schliffpräparation über Einbettung in Kunstharz. Anschließend wurde mittels Schleifgerät Phönix 4000 der Firma Bühler (Bühler GmbH, Deutschland) die Oberfläche mit unterschiedlichen Schleifscheiben (400er bis 1200er Körnung; je 4 min bei 200 RPM) geschliffen.

3.3.2. Röntgen-Computer-Tomographie (X-CT)

Zur Visualisierung der Lage der Sensorfasern wurden X-CT-Untersuchungen mit dem System phoenix nanotom m der Firma GE (General Electrics Sensing & Inspection Technologies GmbH, Deutschland) durchgeführt. Die Messungen erfolgten mit 80 kV, 180 μ A im Modus 1 (Nanofocus mit maximal 1 Watt Strahlung), ohne Filter und mit Diamanttarget. In einer ungefähr einstündigen Messung wurde von dem jeweiligen Objekt scheibenweise 1550 Röntgenaufnahmen angefertigt. Diese wurden anschließend mit der Software VGStudio MAX der Firma Volume Graphics (Volume Graphics GmbH, Deutschland) zu einem virtuellen 3-D Objekt zusammengefügt und mit der myVGL-Software der Firma Volume Graphics (Volume Graphics GmbH, Deutschland) ausgewertet.

3.3.3. Puls-Phasen-Thermographie

Zur qualitativen Bewertung der adhäsiven Ablösungen (Delamination) bei den Stahl-CFK-Verbundsystemen wurde die aktive Thermografie eingesetzt. Hierbei erfolgte eine definierte Anregung des Verbundes mittels Halogenstrahlern mit 2 x 750 Watt für 60-120 s.

Das Abkühlungsverhalten wurde mittels Thermografie-Kamera ImageIR 8300 der Firma Infratec (Infratec GmbH, Deutschland) erfasst und einer Frequenzanalyse unterzogen. Anschließend wurden Amplituden- und Phasenbilder ausgewertet. Delaminationen wurden auch an ausgewählten Proben mittels Ultraschallmesstechnik analysiert und bestätigt.

3.4. Mechanische Untersuchungen an den Stahl-CFK-Klebsverbindungen unter Nutzung von faseroptischen Sensoren

3.4.1. Zugversuche an Klebstoffsubstanzproben

Die Zugversuche an den Klebstoffsubstanzprüfkörpern wurden mit einer Universalprüfmaschine des Typs „Z100“ der Firma Zwick GmbH & Co. KG (Zwick GmbH & Co. KG, Deutschland) bei Raumtemperatur ($23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$) und mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min in Anlehnung an Norm EN ISO 527 durchgeführt. Der E-Modul wurde bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min im linear elastischen Bereich von 0,05-0,25 % ermittelt. Mittels Bestimmung der Verlängerung und der gemessenen Kraft wurden die technische Dehnung (ϵ) und die technische Spannung (σ) in Bezug auf den Ausgangszustand der Proben berechnet.

Zur Charakterisierung der Faserauszugsfestigkeit wurden Auszugsversuche mit einer Universalprüfmaschine Typ „Z100“ der Firma Zwick GmbH & Co. KG (Zwick GmbH & Co. KG, Deutschland) bei Raumtemperatur ($23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$) und mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min durchgeführt. Über die Bestimmung der maximalen Auszugskraft erfolgte die Berechnung der Auszugfestigkeit über den Faserdurchmesser.

3.4.2. Zugversuche an den Stahl-CFK-Klebverbindungen

Die Zugversuche wurden mit einer elektromechanischen Universalprüfmaschine LFM 250/20 von Walter und Bai (Walter+Bai AG, Schweiz) sowie mit einer Universalprüfmaschine „Z100“ der Firma Zwick GmbH & Co. KG (Zwick GmbH & Co. KG, Deutschland) in Anlehnung an DIN 50125 bei Raumtemperatur ($+23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$) und mit einer Prüfgeschwindigkeiten von 5 mm/min und 10 mm/min durchgeführt. Die Proben wurden quasi-statisch bis zum Bruch, sowie zyklisch belastet. Die zyklische Belastung wurde gewählt, um Mehrinformationen (elastische, plastische Dehnungen) bei den Dehnungsmessungen mit faseroptischen Sensoren in der Klebfuge zu erhalten. Zudem sollten durch zyklische Vorbelastung mit 10 kN sollten „Sensoreinlaufeffekte“ reduziert werden. Die Messung der Kraft erfolgte über Kraftmessdosen. Die Längenmessungen wurden über den Traversenweg der Maschine und/oder Langwegextensometer realisiert. Der experimentelle Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt. Parallel zu den Zugversuchen wurden auch mittels optischer Messtechnik (Grauwertkorrelationsanalyse eines Oberflächenmusters) Dehnungen auf der CFK-Oberfläche ermittelt, um den Zeitpunkt der Delamination der CFK-Lamelle festzustellen.

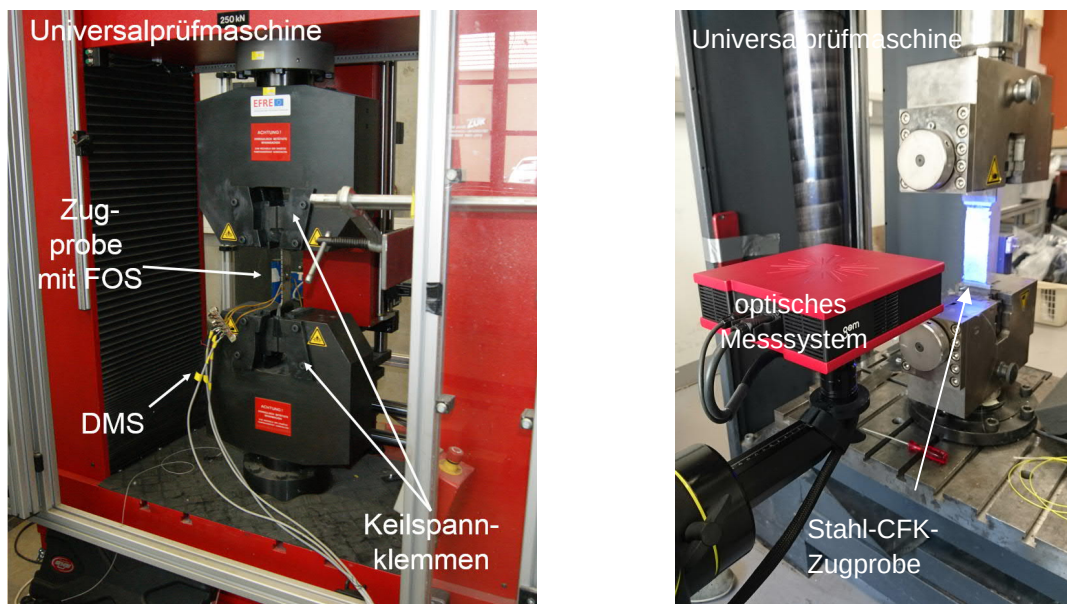


Abbildung 6: Experimenteller Versuchsaufbau für Zugversuche an Stahl und Stahl-CFK-Klebverbindungen

3.4.3. Bauteilversuche - Biegebelastung

HEA-Stahlträger – Drei-Punkt-Biegung

Die mechanischen Untersuchungen an dem CFK-verstärkten HEA-Profilträger mit integrierten Sensoren wurden im 3-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. In Abbildung 7 ist der Versuchsaufbau schematisch und bildlich dargestellt. Die Belastung erfolgte mittig mit einem Hydraulikzylinder. Die Auflager sind durch Auflagerplatten und darunterliegende Zylinder bzw. Prismen gelenkig ausgebildet. Neben den in der Klebschicht integrierten Fasersensoren sowie auf dem CFK aufgeklebten Dehnungsmessstreifen wurden induktive Wegaufnehmer im Auflager- und Trägermittigenbereich eingesetzt. Der Belastung des HEA-Profilträgers erfolgte zyklisch kraftgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,16 kN/s. Hierfür wurde die

Kraft stufenweise um je 4 kN bis zu einer Last von 44 kN erhöht. Abschließend erfolgte eine quasi-statische, weggesteuerte Belastung der Trägers mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 mm/s bis zu einer sichtbaren plastischen Verformung des Stahlträgers bei ca. 56 kN. Parallel zum Biegeversuch wurden mittels FBG-Auswerteinheit und Frequenzbereichsreflektometer Dehnungen in der Klebschicht mit FOS gemessen. Dehnungen auf dem CFK wurden mittels Dehnungsmessstreifen und entsprechenden Messverstärker erfasst.

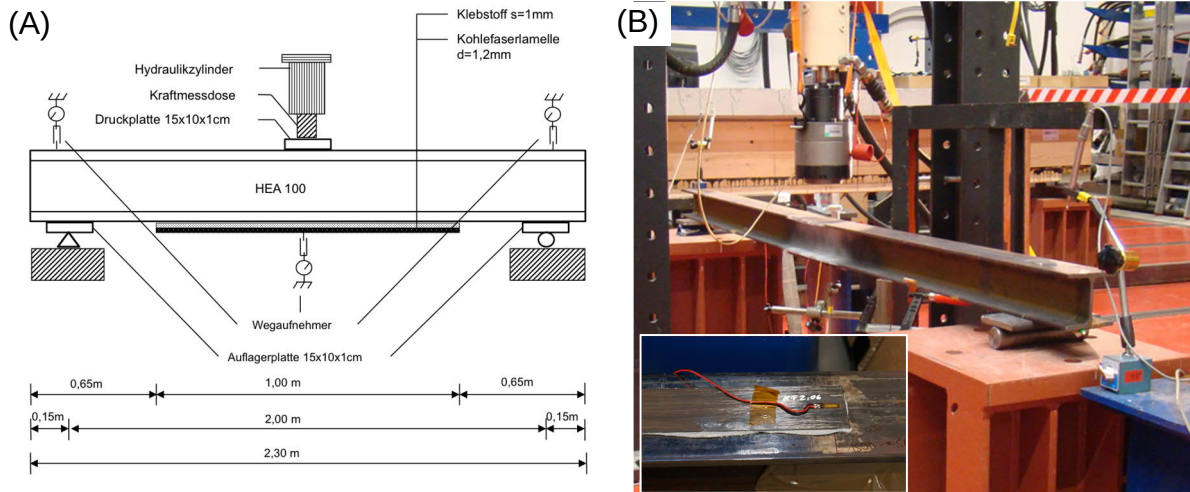


Abbildung 7: (A) Versuchsaufbau für die 3-Punkt-Biegeversuche an CFK-verstärkten HEA-Profilträgern (schematisch) und (B) Foto des Versuchsaufbaus in der Versuchstechnischen Einrichtung der Bauhaus-Universität Weimar (Bild: Stahlträger mit CFK-Lamelle von unten)

Quadratprofile - Vier-Punkt-Biegung

Die CFK-verstärkten Quadratprofile wurden im 4-Punkt-Biegeversuch belastet. In Abbildung 8 ist ein Schema und Bild des Versuchsaufbaus dargestellt. Die Kraftaufbringung erfolgte zyklisch mit Be- und Entlastung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min. Die Kraft wurde ab einer Kraft von 60 kN nach jedem Zyklus um 30 kN erhöht.

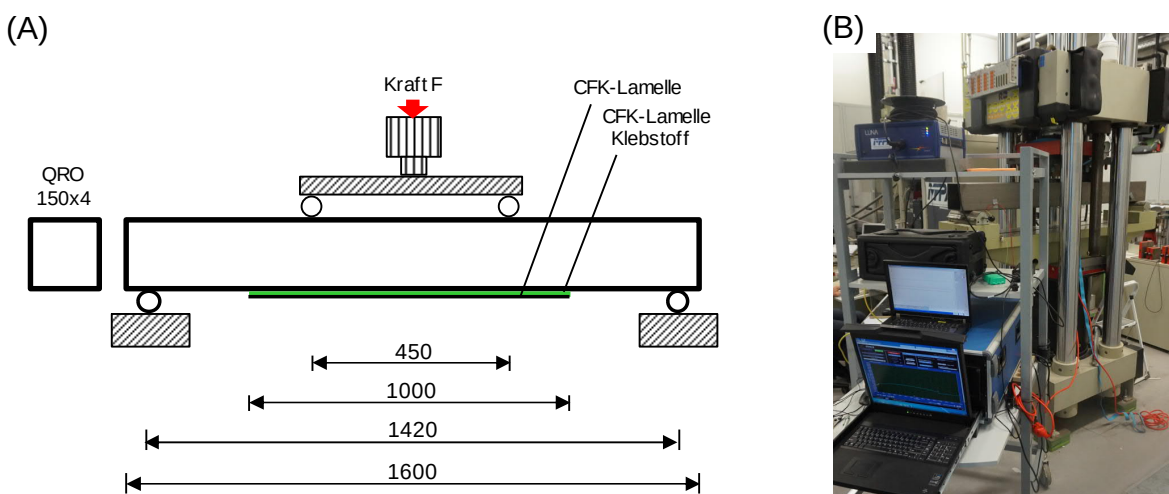


Abbildung 8: (A) Versuchsaufbau für die 4-Punkt-Biegeversuche an CFK-verstärkten Quadratprofilen (schematisch) und (B) Foto des Versuchsaufbaus in der MFPA Weimar

3.4.4. Modellbildung und Numerische Simulation

Die numerischen Untersuchungen zum mechanischen Verhalten der unterschiedlichen Klebverbindungen und Verbindungssysteme wurden parallel zu den experimentellen Analysen unter unterschiedlichen Belastungsszenarien durchgeführt. Das Ziel der numerischen Simulationen war die Unterstützung und Optimierung bei der Versuchsplanung, die Festlegung der Sensorpositionen für die faseroptischen Sensoren sowie für die Dehnungsmessstreifen sowie die Bewertung der experimentellen Ergebnisse. Die Bewertung und Verifikation der Ergebnisse der Dehnungsmessungen mit den faseroptischen Sensoren erfolgten zusätzlich über globale Versuchsdaten und mit elektrischen Dehnungsmessstreifen.

Für die numerische Modellbildung wurden die Proben- und Bauteilgeometrien sowie die Geometrie der Klebfuge idealisiert. Die numerischen Modelle für Stahl-CFK-Klebverbindungen unter Zugbelastung wurden in Ansys-Workbench erstellt und Dehnungen in der Klebfuge mit der Finiten-Elemente-Methode berechnet. Zur Modellvalidierung dienten die globalen Versuchsdaten wie Kraft und Verschiebung. Als Konstitutivmodell wurde ein isotropes linear-elastisches Werkstoffmodell für die Strukturklebstoffe sowie für die Fügepartner verwendet. Die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Klebstoffsysteme wurden in den Berechnungen berücksichtigt. Der E-Modul und die Querdehnzahl der Klebstoffe wurden in Zugversuchen ermittelt.

Da in den Untersuchungen festgestellt wurde, dass das Versagen an der Grenzschicht zwischen Stahl und Klebstoff stattfindet, wurden in weiteren FE-Berechnungen Schädigungsmodelle (Kohäsivzonenelemente (CZM)) in der Klebfuge (Grenzbereich zu Stahl) implementiert. Hierzu war es nötig Parameter für die Schädigungsmodelle zu generieren. Die Ermittlung der CZM-Parameter für das Kohäsivzonenmodell erfolgte über sukzessive Anpassung und Abgleich des experimentellen mit dem numerischen Dehnungsverlauf. Über die Nutzung der integrierten Sensorik und Informationen zur Delamination konnten so Parameter für das Schädigungsmodell abgeleitet werden. Das Alterungsverhalten der Klebstoffe wurde nicht berücksichtigt, da das Versagensauslösende Kriterium die Delamination des Klebstoffs von der Stahloberfläche war. Um die Einflüsse der Alterung in die numerische Simulation zu implementieren, ist es notwendig zustandsabhängige Materialparameter für die alterungsanfälligen Materialien (Klebstoffe, CFK-Verbund-Werkstoff) experimentell zu generieren. Dies war jedoch nicht Umfang des Projektes.

3.4.5. Mechanische Untersuchungen unter schwingender Belastung an Stahl-CFK-Klebverbindung

In verschiedenen Untersuchungen wurde bereits gezeigt, dass Faser-Bragg-Gitter-Sensoren auch zur Messung von Dehnungen bei schneller, schwingender Belastungen von Proben und Bauteilen genutzt werden können. Hierbei ist auf die Wahl des Coatings zu achten [19]. Neben Schwingversuchen an reinen Sensorfasern [19] erfolgten auch bereits Schwingversuche an unterschiedlichen Faserverstärkten Kompositmaterialien mit eingebetteten und aufgeklebten Sensorfasern. Hier konnte unter anderem gezeigt werden, dass bei hohen Dehnungen von 10.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ mehr als 300.000 Zyklen realisiert werden können, ohne dass der Sensor ausfällt [20]. Das Versagen trat in den Kompositmaterialien auf und resultierte in eine Änderung der reflektierten Spektren aufgrund inhomogener Dehnungen [20].

Erfahrungswerte zu Messmöglichkeiten in Klebverbindungen sind rar. Erste Versuche an den Stahl-CFK-Zugproben mit in die Klebfuge integrierten Sensoren unter schwingender Belastung sollen hier erste Erkenntnisse zu Messmöglichkeiten generieren. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dargestellt. Für die Untersuchungen wurden je zwei Stahl-

CFK-Zugproben (vgl. Abbildung 4) für Klebstoff 1 und Klebstoff 2 hergestellt. Für die Versuche wurden ausschließlich FBG-Sensoren genutzt. Die Bragg-Gitter wurden am oberen und unteren Rand der Verbindung sowie in der Mitte der Klebverbindung appliziert. Ein Bragg-Gitter wurde zur Temperaturmessung auf der Probenoberfläche fixiert. Die Tests wurden unter schwingender Belastung im Zugschwellbereich mit oberer Belastungsgrenze von 38 kN und 48 kN (>75% der Streckgrenze des Stahls; LCF-Bereich) realisiert. Der Versuch unter Zugschwellbelastung wurde kraftregelt mit einer Frequenz von 2 Hz gefahren. Nach 10.000 Zyklen bei 38 kN wurde die Kraft auf 48 kN erhöht und bis zum Versagen der Proben belastet. Während des gesamten Versuches wurden Dehnungen mit FBG-Messtechnik mit einer Messrate von ca. 60 Hz aufgezeichnet.

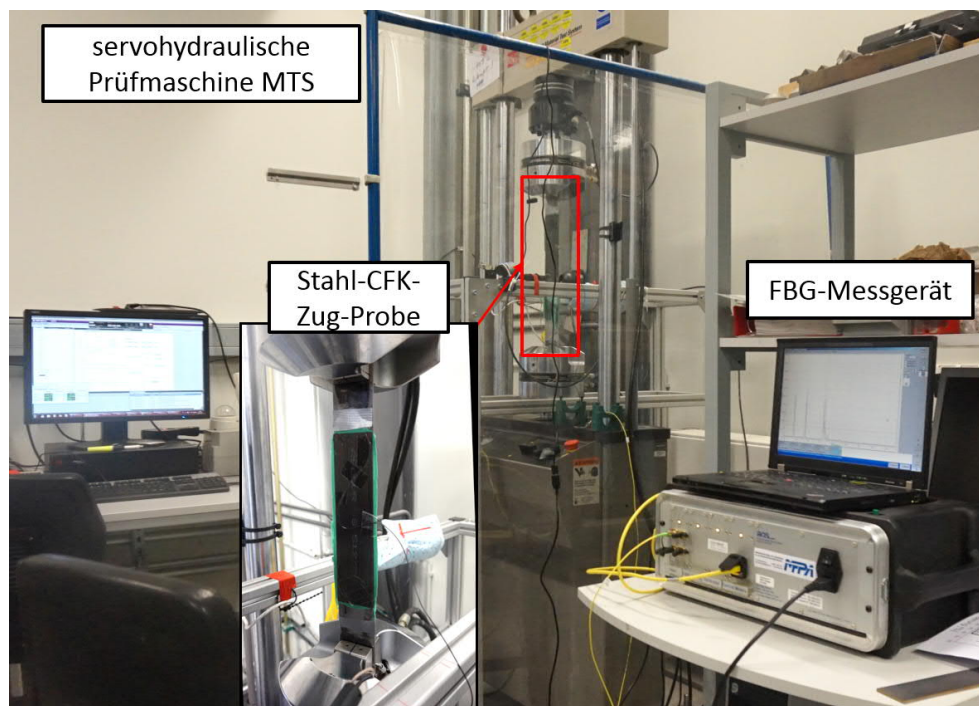


Abbildung 9: Versuchsaufbau für Versuche an Stahl-CFK-Klebverbindungen mit integrierten FBG-Sensoren unter schwingender Belastung

3.5. Klimalagerungen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen mit in-situ Dehnungsmessungen

Die Temperaturwechselbelastung und Klimalagerung von Stahl-CFK-Klebverbindungen erfolgt in zyklischen Klimatests mit Temperatur- und Feuchtwechsel zur Simulation des Langzeitverhaltens in Anlehnung an die EN ISO 9142. Als Temperaturen werden -20 °C bis 80 °C und Feuchtigkeit bis zu ca. 95 % rel. Luftfeuchte eingestellt. Während der Klimalagerung wurden Dehnungen in der Klebfuge in-situ mittels FBG-Sensoren und verteilt-messenden Sensorfasern aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist Abbildung 10 dargestellt.

Im Weiteren wurde ein CFK-verstärkter HEA-Stahlträger, vergleichbar mit Bauteil in Abbildung 5A, aber mit einer 10 cm breiten CFK-Lamelle, mit integrierten faseroptischen Sensoren hergestellt. Das „sensorisierte“ Bauteil wurde von Dezember 2017 bis Juli 2018 im Freien gelagert (siehe Abbildung 11). Die Sensorkabel sind mit Schrumpfschläuche geschützt

und werden durch eine Fensteröffnung ins Gebäudeinnere geführt, wo die Messgeräte angeschlossen werden. Haupteinflüsse auf die Klebung sind Temperatur und Feuchte sowie am Rand UV-Strahlung. Die Korrosion des Stahls könnte zudem die Verbindungseigenschaften beeinflussen. Dehnungsdaten aus dem Inneren der Klebfuge werden in regelmäßigen Zeitabständen mit FBG-Messtechnik sowie OFDR erfasst.



Abbildung 10: Versuchsaufbauten für Klimalagerung und Temperaturwechselbelastung



Abbildung 11: (A) Feldversuch an einem CFK-verstärkten Stahlträger mit in der Klebfuge integrierten Sensoren und (B) eingesetzte faseroptische Messtechnik

4. Ergebnisse der Untersuchungen – Bewertung der faseroptischen Messverfahren für Klebverbindungen unter verschiedenen Belastungen

4.1. Zugversuche an Klebstoffen und Faserauszugsversuche

Die Zugversuche an den Klebstoffsubstanzprobekörpern dienen der qualitativen Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Klebstoffe sind in Abbildung 12A dargestellt. Klebstoff 1 weist deutlich geringe Steifigkeiten als die Klebstoffe 2 und 3 auf, wohingegen die hohen Bruchdehnungen $>4\%$ bei Klebstoff 1 auf eine gute Zähigkeit und damit auch hohe Bruch bzw. Risszähigkeit hindeuten. Die Klebstoffe 2 und 3 weisen sprödartiges Materialverhalten auf. Dies ist auf den hohen Füllstoffanteil in den Klebstoffen zurückzuführen, was an der REM-Aufnahme des Klebstoffs in Abbildung 12C deutlich wird. Im Vergleich zu Klebstoff 1 mit geringen Füllstoffanteil (siehe REM-Aufnahme in Abbildung 12B) weist Klebstoff 2 einen hohen Anteil an μm -großen kantigen Partikel auf. Der hohe Anteil an μm -großen Partikeln resultiert in den höheren Steifigkeiten (Klebstoff 2: E-Modul ca. 6000 MPa und Klebstoff 3: E-Modul ca. 9000 MPa), aber gleichzeitig auch in sprödartigem Materialverhalten im Vergleich zu Klebstoff 1 mit einem E-Modul von ca. 2000 MPa.

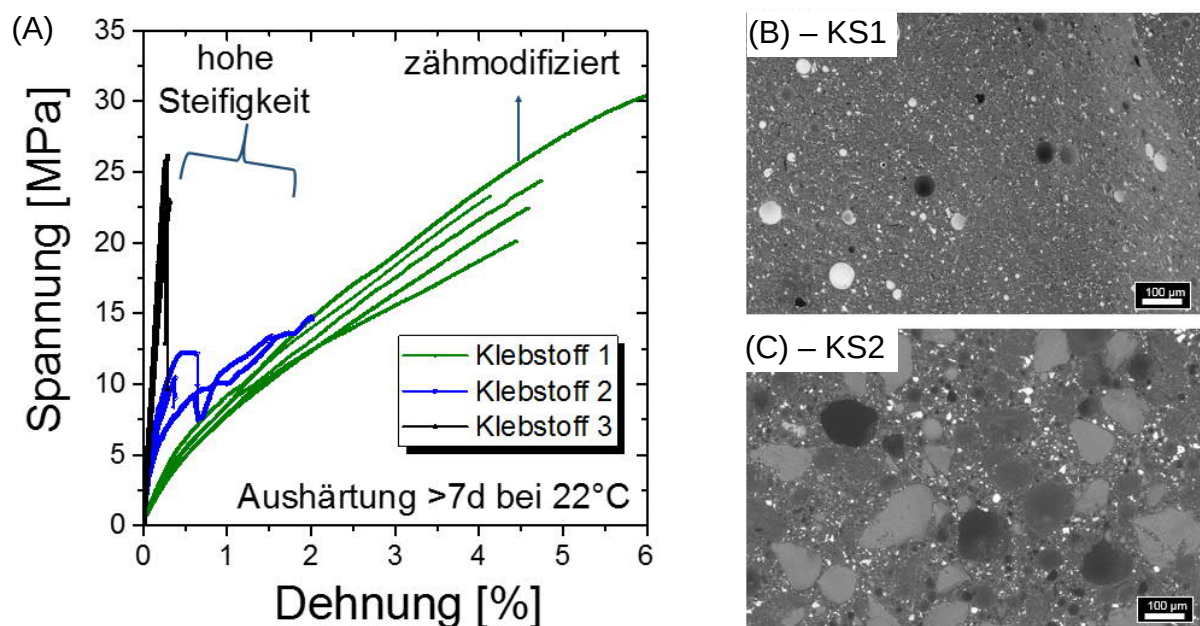


Abbildung 12: (A) Spannungs-Dehnungs-Verhalten der untersuchten Klebstoffe und REM-Aufnahmen der Bruchfläche von kryo-gebrochenen Zugstäben (B) Klebstoff 1 und (C) Klebstoff 2 mit einem hohem Partikelanteil

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme weisen zudem eine hohe Streuung auf, was auf die Probenherstellung zurückgeführt werden kann. Auf Grund des pastösen bzw. hochviskosen Charakters der Klebstoffe entstehen beim Ausstreichen der Klebstoffe Poren, die das Spannungs-Dehnungs-Verhalten und im speziellen die Festigkeit und Bruchdehnung signifikant beeinflussen. Für die Anwendung der Klebstoffe ist die Haftfestigkeit zu den Fügepartnern zudem entscheidend. Dies gilt auch beim Einsatz von faseroptischen Sensoren in

Kleilverbindungen. Die Grenzschicht zwischen Sensorfasern und Klebstoff muss dauerhaft stabil sein, so dass die Kraftübertragung gewährleistet ist.

Zur Bewertung der Auszugsfestigkeit der Sensorfasern aus den Klebstoffen wurden Auszugsversuche realisiert. Abbildung 13 zeigt ein Schema des Versuchsaufbaus (A) sowie Ergebnisse aus den Faserauszugsversuchen mit Darstellung der Kraft pro Sensorfläche als Funktion des Weges für Klebstoff 1 und Klebstoff 2 (B). Hier wird deutlich, dass das Auszugsverhalten beider Klebstoffe vergleichbar ist. Nach lineareren Anstieg der Kraft-Weg-Kurven erfolgt ein Abknicken der Kurven mit Kraftabfall. Die anschließende wechselseitige Krafterhöhung und Kraftreduzierung ist auf stufenweises Herausziehen der Sensorfaser aus dem Klebstoff zurückzuführen. Die Auszugsfestigkeiten betragen ca. 800 N/mm^2 (ca. 25 N).

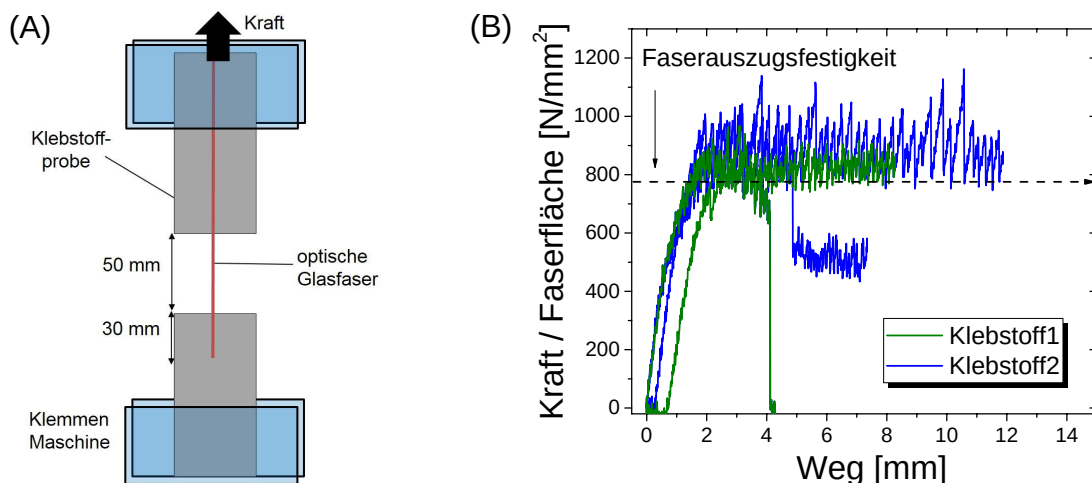


Abbildung 13: (A) Schematische Darstellung der Faserauszugsversuche und (B) Spannungs-(Kraft pro Faserfläche)-Weg-Kurven der Auszugsversuche für Sensorfaser mit Ormocer-Coating für Klebstoff 1 und Klebstoff 2

4.2. Bewertung der Einbettung der faseroptischen Sensoren in die Klebfuge

An ausgewählten Proben wurde die Lokalisierung der Fasersensoren im Klebstoff mit Lichtmikroskopie an Schnitten sowie 3D-Röntgencomputertomographie (X-CT) analysiert. Die Faserapplikation wurde jeweils identisch realisiert. In Abbildung 14 sind röntgenographische Aufnahmen versagter und intakter Kleilverbindungen (Aufnahme rechts) dargestellt. Die X-CT-Aufnahmen zeigen die Positionierung der Sensorfasern in der Klebung. Aufgrund der Applizierung auf der Stahloberfläche befinden sich die Fasern im Klebstoff in der Nähe des Fügepartners Stahl. Die Sensorfasern sind gerade ausgerichtet. Die rechte X-CT-Aufnahme in Abbildung 14 verdeutlicht auch die gute Parallelität der Sensorfasern zur Stahloberfläche. Auf Grund des geringen Dichtekontrastes zwischen Klebstoff und polymerartigen Schutzcoatings (Ormocer) der Sensorfaser kann die Einbettung der Sensorfasern mit X-CT nicht ausreichend bewertet werden. Diesbezüglich war die Analyse an Schnitten mit der Lichtmikroskopie für eine Bewertung der Sensorpositionen und Einbettung zielführender. Die lichtmikroskopische Aufnahmen in Abbildung 15 verdeutlichen, dass die Sensorfasern sehr gut vom Klebstoff umschlossen sind. Auch bei den pastösen Klebstoffsystemen mit hohen Partikelfüllgraden werden die Sensorfasern vom Klebstoff umschlossen und somit sehr gut

eingebettet. Eine Kraftübertragung vom Klebstoff auf die Sensorfasern kann realisiert werden. Folglich können die Belastungen und Kräfte sehr gut auf die Sensorfasern übertragen werden.

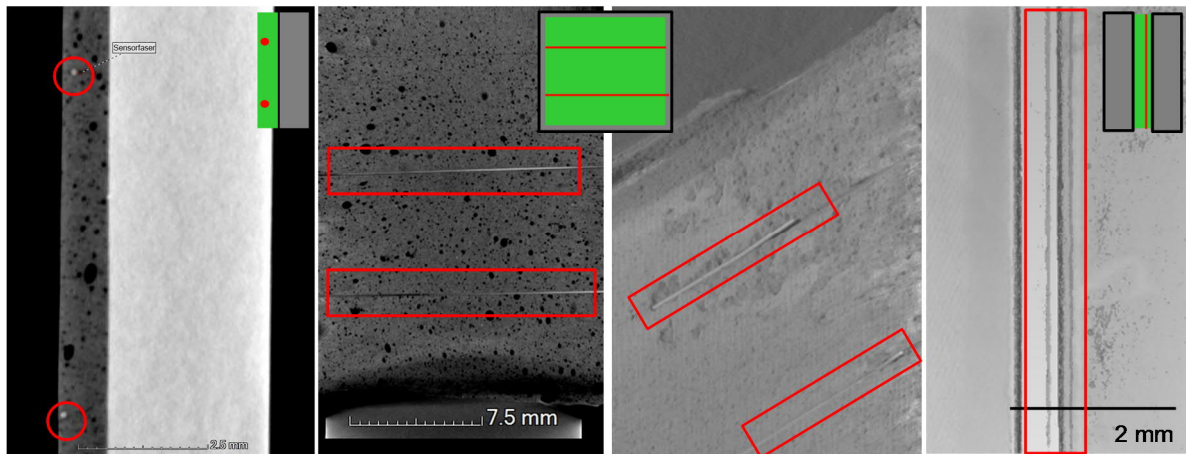


Abbildung 14: Röntgentomografische Aufnahmen von versagten und intakten Klebverbindungen mit integrierten Sensorfasern (rechts: Fügepartner und Klebstoff transparent gestellt) (Sensorfasern rot markiert)

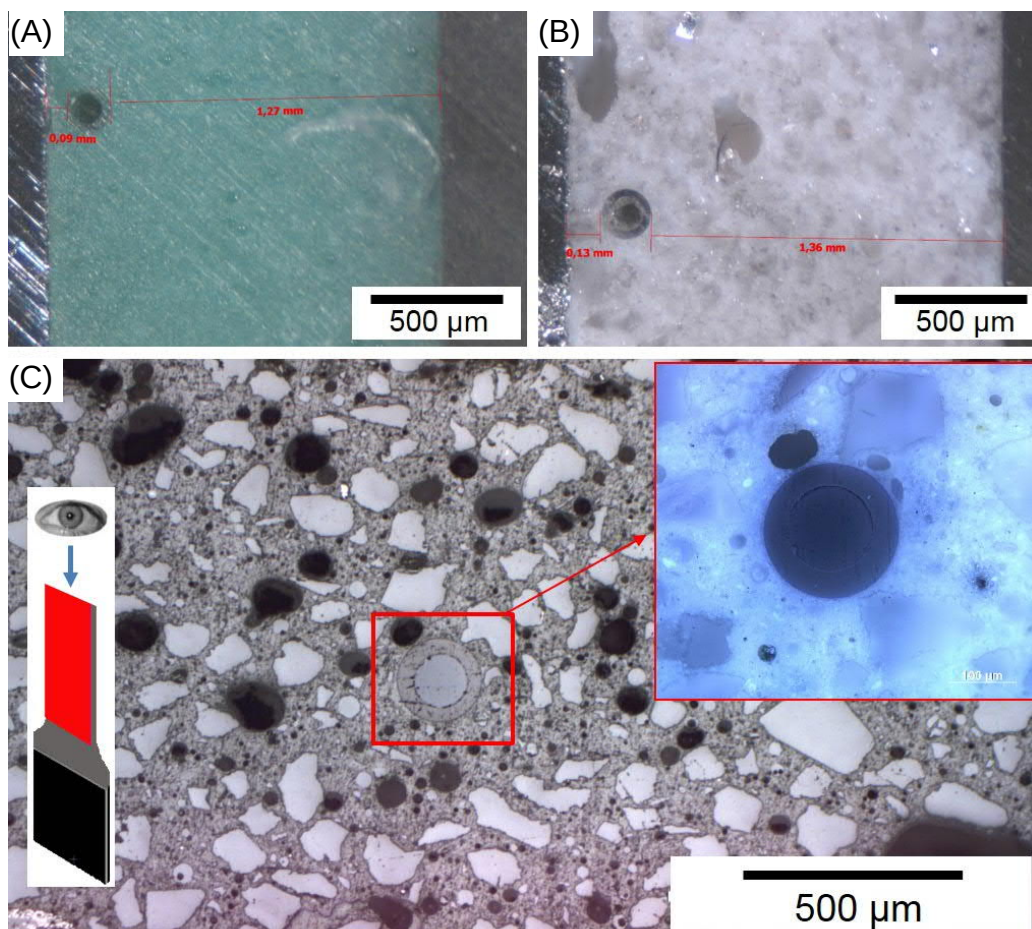


Abbildung 15: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Schnitten unbelasteter Stahl-CFK-Klebverbindungen (A) Klebstoff 1 (B) Klebstoff 2 sowie (C) Schliff einer zyklisch belasteten Stahl-CFK-Klebverbindung mit Klebstoff 2 nach ca. 33.000 Zyklen bei 48 kN (Dehnung während der Belastung $\epsilon=1000 \mu\text{m/m}$)

Es ist anzunehmen, dass bei sehr hohen Füllgraden und damit sehr hoher Klebstoffviskosität die Einbettung der Sensorfaser schwieriger wird. Hier kann die Sensorfasern mit einem vergleichbaren Klebstoffsystem lokal vor dem eigentlichen Verkleben appliziert werden. Eigene Untersuchungen an Holz-Beton-Verbundbauteilen zeigten hier sehr gute Ergebnisse. Die Sensorfasern können hierbei auch vor den scharfkantigen Partikeln geschützt werden. In Abbildung 15C ist ein Mikroskopiebild einer Stahl-CFK-Klebverbindung, die zyklisch unter Zugschwellbeanspruchung (Maximalkraft 48 kN) belastet wurde, dargestellt. Nach 33.000 Zyklen trat lokales Versagen am Rand Verbindung auf. Risse in der Klebfuge am Rand der Verbindungen deuten auf ein beginnendes Versagen an der Grenzfläche Stahl-Klebstoff hin. Die Aufnahme aus diesem Randbereich in Abbildung 15C zeigt eine intakte Grenzfläche zwischen Sensorfasern und Klebstoff, sodass weiterhin lokal die Kraft-Übertragung gewährleistet ist.

Die Mikroskopieaufnahmen verdeutlichen auch, dass die Sensorfasern auf Grund der stahlseitigen Applikation nahe am Stahlfügepartner liegen. Der Abstand Sensorfaser-Stahloberfläche variiert aber über die Länge der Einbettung. Bei den pastösen Klebstoffsystemen wurde aber auch festgestellt, dass sich die Sensorfasern bei der Applizierung der CFK-Lamelle nach außen verschieben können. Dies ist durch eine starke Vordehnung der Sensorfasern und ordentliche Fixierung, sowie sorgfältige Applikation zu vermeiden. Bei dickeren Klebfugen kann auch eine Vorfixierung und Schutz mit einem Epoxidharzklebstoff erfolgen. Dies sollte aber vor der eigentlichen Applikation auf Tauglichkeit überprüft werden.

Für hochwertige Messdaten aus der Klebfuge ist die Positionierung der Sensorfasern wesentlich. Die Dehnungen in der Klebfuge sind nicht homogen, so dass die Positionierung der Messfaser sowie der Messort bekannt sein müssen. Mit der Entwicklung von speziellen Applikationshilfsmitteln und –methoden könnte eine reproduzierbare Integration der Sensorfasern teilautomatisiert erfolgen. Dies ist unter anderem bereits in [21] dargestellt, müsste aber hinsichtlich der Anwendung bei Klebungen entwickelt werden.

4.3. Mechanische Untersuchungen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen unter Zugbelastung mit faseroptischer Sensorik

4.3.1. Kraft-Verformungs-Verhalten der Stahl-CFK-Klebverbindungen

Die Zugversuche an den hier untersuchten Stahl-CFK-Klebverbindungen verdeutlichen, dass durch Applikation der CFK-Lamelle mit Klebstoff eine Verstärkung der Stahlzugproben mit Bohrung erreicht werden kann. Die Kraft-Verformungs-Kurven der Stahl-CFK-Klebverbindung sind in Abbildung 16A und B dargestellt. Alle Systeme zeigen eine geringfügige Erhöhung der Steifigkeit sowie einen Verstärkungseffekt im Bereich der Streckgrenze des Stahls. Die Kraft erhöht sich im Bereich der Streckgrenze des Stahls (=Erhöhung der Streckspannung). Aus den Kraft-Verformungs-Diagrammen wurde die Kraft bei Streckgrenze ermittelt und im Diagramm in Abbildung 17A aufgetragen. Die Krafterhöhung im Bereich der Streckgrenze ist bei Systemen mit Klebstoff 2 und Klebstoff 3 im Vergleich zum Stahl mit einer Erhöhung um ca. 9 kN vergleichbar (siehe Abbildung 17A). Die Kraft bei der Streckgrenze erhöht sich von 34 kN für Stahl auf ca. 43 kN bei den Stahl-CFK-Klebverbindungen mit Klebstoff 2 und 3. Bei der Stahl-CFK-Verbindung mit Klebstoff 1 erhöht sich die Kraft bei der Streckgrenze im Vergleich zu den Stahlzugproben um ca. 24 kN auf ca. 58 kN. Dies verdeutlicht die hohe Haftzugfestigkeit und das hohe Verformungsvermögen für Klebstoff 1.

Oberhalb der Streckgrenze des Stahls gibt es bei allen Systemen einen Kraftabfall bei einer bestimmten Verformung. Hier wurde in den Versuchen ein Ablösen der Lamelle vom Stahl beobachtet. Das Ablösen der CFK-Lamelle während des Versuchs ist in Abbildung 18B dargestellt. Hierbei wurde festgestellt, dass die Ablösung am Rand der Klebverbindung (oben oder unten) beginnt und Richtung Probenmitte wandert. Dieses Verhalten der Klebverbindungen trat bei allen Klebstoffsystemen auf. Der weitere Kraft-Verformungs-Verlauf entspricht dem der Stahlzugprobe. In der Praxis würde dies eine Reduzierung der Tragfähigkeit der Verbindung bedeuten, wobei die Stahlkonstruktion die auftretenden Lasten komplett aufnimmt (Resttragfähigkeit).

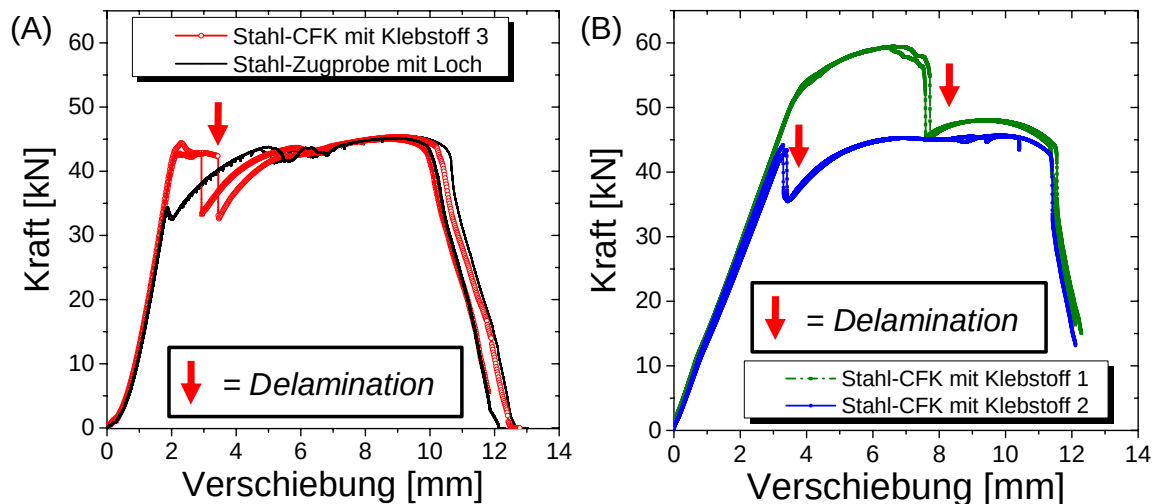


Abbildung 16: (A) Kraft-Verformungs-Verhalten der Stahlzugprobe und Stahl-CFK-Proben mit Klebstoff 3 (B) Kraft-Verformungs-Verhalten Stahl-CFK-Klebverbindungen mit Klebstoff 1 und 2

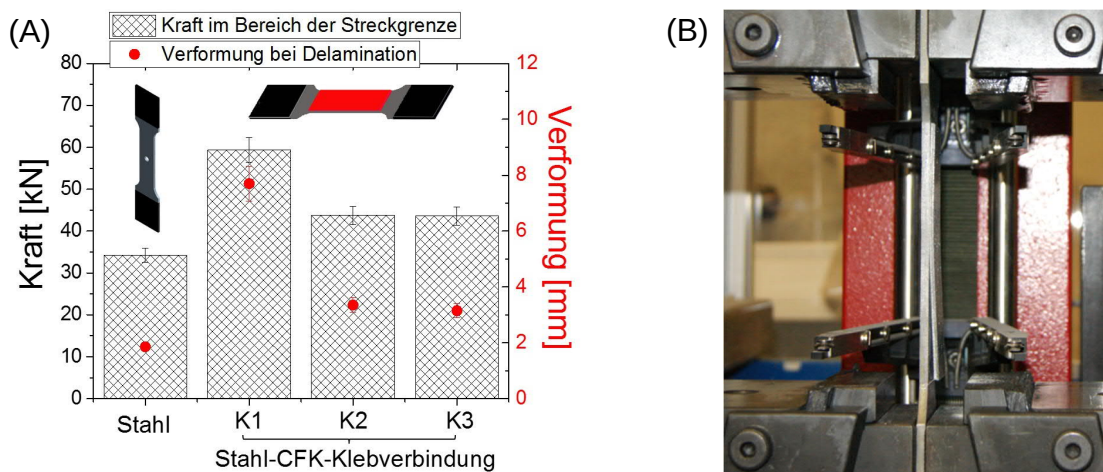


Abbildung 17: (A) Vergleich der Verstärkung und Verformung bei Delamination für die untersuchten Stahl-CFK-Klebverbindungen (Probenbreite 40 cm) und (B) Foto des Versagensmechanismus (Ablösen der Klebschicht vom Stahl)

Der Wert der Verschiebung, bei dem das Ablösen der CFK-Lamelle stattfindet, ist abhängig vom Klebstoffsystem (siehe Abbildung 17A). Bei den Klebstoff 2 und 3 tritt das Ablösen bereits bei Verschiebungen von ≥ 3 mm ein, wohingegen beim bruchzähen Klebstoff 1 das Ablösen

erst bei Verschiebungen von 7,5 mm eintritt (siehe Abbildung 17A). Eine visuelle Analyse der Bruchflächen verdeutlicht, dass bei den verwendeten Klebstoffen ein adhäsives Versagen zwischen Stahloberfläche und Klebstoff eintritt. Die in den quasi-statischen Zugversuchen festgestellte Delamination der CFK-Lamellen bzw. des Klebstoffes wurde bereits durch andere Wissenschaftler festgestellt [3, 10, 11].

Hier soll darauf hingewiesen werden, dass die Haftfestigkeit durch eine optimale Oberflächenvorbehandlung verbessert werden kann. Dies war nicht Ziel der vorliegenden Untersuchungen. Um Maßnahmen zur Vermeidung der Delamination zu entwickeln und zu optimieren, ist es neben der optimalen Oberflächenvorbehandlung wichtig, dass Verformungsverhalten der Klebschicht zu analysieren und zu verstehen. Ziel der weiteren Untersuchungen war es mit integrierten faseroptischen Sensoren Dehnungen in der Klebfuge zu ermitteln und zu bewerten.

4.3.2. Faseroptische Dehnungsmessungen in Stahl-CFK-Klebverbindungen

Die Nutzung von integrierten Sensorfasern zur Bewertung von Klebverbindungen ist neu. Bisher liegen keine oder nur sehr wenig Erfahrungswerte zu den Messmöglichkeiten und Genauigkeiten sowie speziellen Effekten in Klebverbindungen vor. Ziel der vorliegenden Untersuchungen war die Nutzung und Bewertung von faseroptischen Sensoren und Messtechnik zur Messung von Dehnungen in der Klebfuge von Stahl-CFK-Klebverbindungen. Diesbezüglich wurden faseroptische Sensoren in Klebfugen integriert und die Messsignale der Sensorfasern analysiert. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten an Stahl-CFK-Klebverbindungen zeigen generell, dass mit den in Klebfugen integrierten Fasersensoren Änderungen der Lichteigenschaften wie Verschiebung der reflektierten Lichtwellenlängen bei Faser-Bragg-Gittern gemessen werden können. Die Änderungen der Lichteigenschaften sind auf Dehnungsänderungen in Sensorrichtung im Bereich der Klebfuge zurückzuführen. Aus den Änderungen der Lichteigenschaften können die Dehnungen berechnet werden. Die Validierung der Dehnungswerte der faseroptischen Sensoren erfolgte mit elektrischen Dehnungsmessstreifen und der numerischen Simulation.

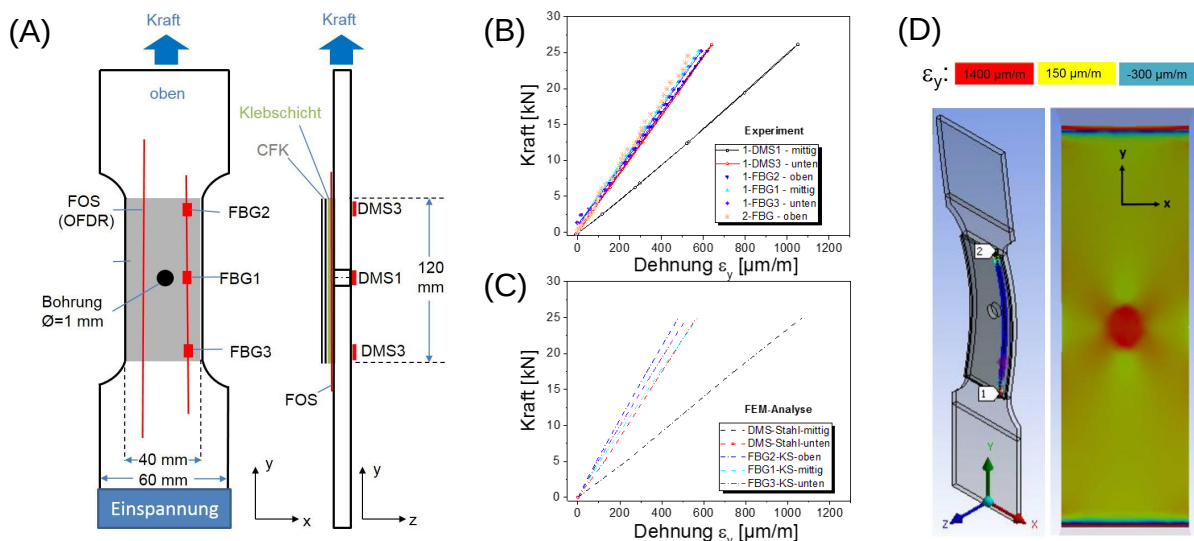


Abbildung 18: (A) schematisches Bild der „sensorisierten“ Stahl-CFK-Klebverbindung und (B) Kraft-Dehnungs-Daten der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren in der Klebfuge und elektrischen DMS aus dem Experiment; (C) Kraft-Dehnungs-Kurven aus der FEM-Simulation sowie (D) FEM berechnete Dehnungen in der Klebfuge bei 25 kN

Die sensorisierte Stahl-CFK-Klebverbindung ist in Abbildung 18A dargestellt. Dehnungen in der Klebfuge der Stahl-CFK-Verbindung wurden mit verteilt-messenden Sensorfasern und FBG-Sensoren erfasst. Auf der Stahlrückseite wurden elektrische Dehnungsmessstreifen an denselben Positionen wie die FBG appliziert. Die Abbildung 18B mit dem Vergleich zwischen den FBG-Sensoren und elektrischen DMS bis 25 kN Belastung zeigt eine gute Übereinstimmung der Dehnungswerte beider Messmethoden. Aufgrund der abweichenden Sensorpositionen (abweichender Messort - Stahlrückseite) treten aber auch Dehnungsunterschiede auf. Beispielsweise werden im Bereich des DMS1 auf der Stahloberfläche höhere Dehnungen erzielt, da der nicht symmetrische Aufbau der Probe in einer Durchbiegung resultiert und somit im mittleren Bereich höhere Dehnung im Stahl auftreten. Von der Klebverbindung wurde zudem ein numerisches Modell erstellt und Dehnung mit FEM-Simulationen berechnet.

Abbildung 18D zeigt eine überhöhte Darstellung der Durchbiegung der Probe auf Grund der einseitigen CFK-Applikation sowie die Dehnungsverteilung (ϵ_y) in der Klebfuge bei 25 kN. Die Dehnungen im Bereich der Bohrung sowie am Rand der Klebfuge sind nicht homogen. Am Rand der Klebung treten Dehnungsspitzen auf und im Bereich der Bohrung komplexe Dehnungsfelder auf Grund der Lochstruktur. Die Auftragung der errechneten Dehnungen gegen die Kraft und abhängig von der Sensorposition ist in Abbildung 18C dargestellt. Die Dehnungen erhöhen sich wie bei den experimentellen Daten linear mit der Kraft. Die über die FEM berechneten Dehnungen stimmen sehr gut mit den experimentellen Dehnungen überein (vergleiche Abbildung 18B mit Abbildung 18C).

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass mit FBG-Sensoren sehr genau Dehnungen in der Klebfuge von Stahl-CFK-Klebverbindungen unter Zug- bzw. Zugscherbelastung erfasst werden können. Für die exakte Bewertung der auftretenden Dehnungen sollte die Lage der FBG in der Klebverbindung bekannt sein, da die Dehnungen in der Klebschicht nicht konstant sein müssen. Dies setzt das Design und die Festlegung der Bragg-Gitter auf der Sensorfaser vor der Messung sowie eine sorgsame Applikation der Sensorfasern voraus.

Im Gegensatz zu punktuellen Dehnungsmessungen mit FBG-Sensoren können mit der Frequenzbereichsreflektometrie orts aufgelöst Dehnungen gemessen werden. Bereits in Abbildung 2 sind orts- und zeitaufgelöste Dehnungsdaten aus einem zyklischen Laststeigerungsversuch (3 Zyklen) dargestellt. Das zyklische Belastungsregime zeigt Abbildung 19A mit der Darstellung der Kraft in Abhängigkeit der Zeit. Die Kraft wurde nach jedem Be- und Entlastungszyklus um 1 kN erhöht. Die zeit- und orts aufgelösten FOS-Dehnungswerte als Antwort auf die Belastung sind in Abbildung 19B dargestellt. Die Höhe der Dehnungen ist hierbei farblich gekennzeichnet. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass mit einer hohen Ortsauflösung Dehnungen mit den FOS in der Klebschicht während der Belastung gemessen werden können. Der Farbverlauf spiegelt die Kraftzyklen wieder. Mit Zunahme der Kraft erhöhen sich die Dehnungswerte. Über eine Linienanalyse bei konstanter Zeit (=Kraft) und / oder Sensorposition kann einer Detailauswertung erfolgen. Beispielhaft ist in Abbildung 19C der mit FOS ermittelte Dehnungsverlauf über die gesamte Verbindung bei einer konstanten Kraft von 32 kN (ca. 132 s) dargestellt. Hier wird sehr gut deutlich, dass am Rand der Klebfuge Dehnungsspitzen auftreten. Die Dehnungsinhomogenitäten in der Mitte sind auf die inhomogenen Dehnungen im Bereich der Bohrung zurückzuführen. Der Vergleich mit den über die FEM berechneten Dehnungsprofilen in der Klebschicht zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Hier ist zu beachten, dass der FEM-berechnete Dehnungsverlauf ideal ist

und Klebfugen-dickenunterschiede oder in der Bohrung befindlicher Klebstoff nicht berücksichtigt worden

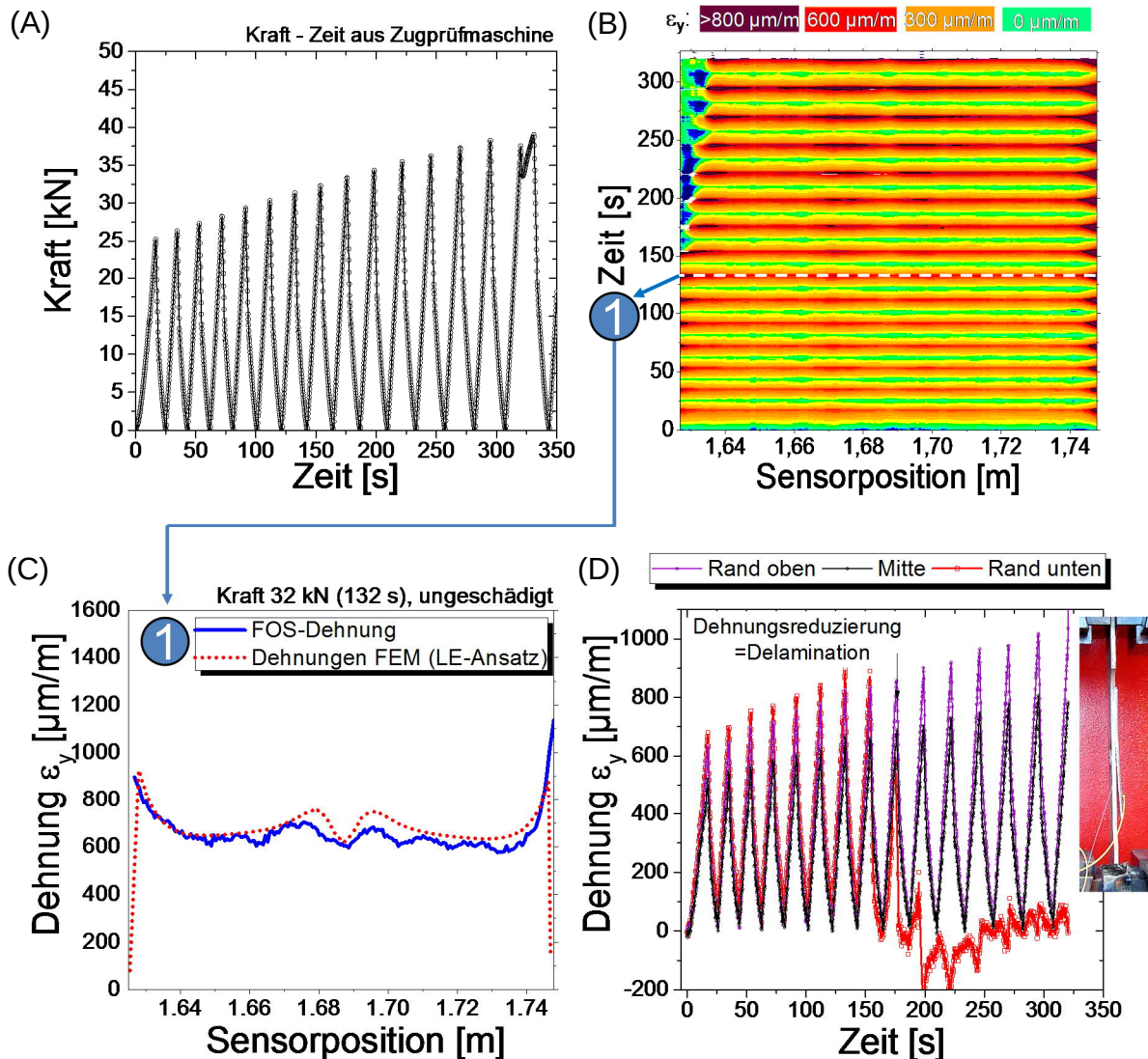


Abbildung 19: (A) Kraft-Zeit-Diagramm des zyklischen Laststeigerungsversuches für eine Stahl-CFK-Klebschicht mit Klebstoff 3; (B) zeit- und orts aufgelöste FOS-Dehnungen (dunkelrot $>800 \mu\text{m/m}$, rot: $600 \mu\text{m/m}$, orange $300 \mu\text{m/m}$, grün $0 \mu\text{m/m}$); (C) orts aufgelöstes Dehnungsprofil bei 32 kN im nicht geschädigten Zustand mit FEM-Vergleich und (D) zeitaufgelöste FOS-Dehnungen am Rand der Klebschicht

Eine Detailauswertung der Dehnungen erfolgte auch in Abhängigkeit von der Sensorposition. In Abbildung 19D sind Dehnungswerte der Sensorposition in Probenmitte sowie am Rand dargestellt. Bis zu einer Zeit von ca. 150 s folgen die Dehnungen dem zyklischen Kraftverlauf. Oberhalb von 150 s verringern sich die Dehnungswerte am unteren Rand der Klebschicht drastisch. Die Dehnungswerte in Probenmitte und am oberen Rand folgen immer noch dem zyklischen Kraftverlauf und erhöhen sich entsprechend der Kraft. Die Dehnungsreduzierung am unteren Rand der Klebschicht ist auf ein Ablösen der Klebschicht/CFK-Lamelle von der Stahloberfläche und die damit einhergehende fehlende Kraftübertragung zwischen Stahl und CFK zurückzuführen. Die Delamination konnte bei höheren Belastungen auch visuell

festgestellt werden (siehe Bild der Delamination in Abbildung 19A). Das Puls-Phasen-Bild der Thermografieuntersuchungen in Abbildung 20A unten zeigt qualitativ die großflächige Ablösung der Lamelle nach dem Versuch. Der obere Teil der Klebverbindung ist intakt, was auch mit den FBG-Sensordaten aus diesem Bereich (siehe Abbildung 20B bestätigt werden kann). Hierbei konnten Dehnungswerte bis zum Versagen der Stahlprobe gemessen werden. Die verteilt-messende Sensorfaser wurde durch Abheben der Lamelle und die damit verbundenen hohen lokalen Verformungen abgerissen.

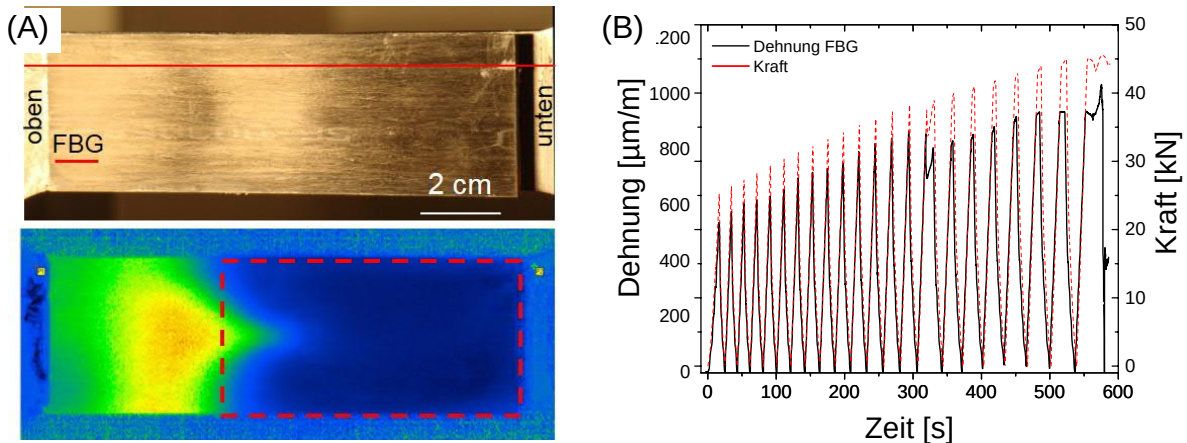


Abbildung 20: (A) Bild sowie Puls-Phasen-Bild der Stahl-CFK-Klebverbindung mit Klebstoff 3 aus den Thermografie-Untersuchungen und (B) Dehnungswerte sowie Kraftdaten des Laststeigerungsversuchs eines FBG-Sensors bis zum Versagen der Stahlprobe (Position des FBG siehe A)

Die Untersuchungen mit OFDR-Messtechnik verdeutlichen somit, dass mit faseroptischen Sensoren zeit- und orts aufgelöst Dehnungen in der Klebschicht gemessen werden können. Daraus resultiert ein Informationsgewinn mit Detektion lokaler Ereignisse. Zudem ist es möglich, die Schädigung in Form der Delamination der CFK-Lamelle sowie die zeitliche Veränderung der Delamination zu erfassen. Dies ist prinzipiell auch mit FBG-Sensoren möglich. Wichtig hierbei ist die exakte Definition der Sensorpositionen und sorgfältige Applikation.

Im Weiteren wurde gezielt das Verformungsverhalten der Stahl-CFK-Klebverbindungen unter Verwendung unterschiedlicher Klebstoffsysteme mit verteilt-messenden Sensorfasern untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Kinetik der Delamination abhängig vom eingesetzten Klebstoffsystem ist. Die Dehnungswerte als Funktion der Sensorposition für den Klebstoff 1 und Klebstoff 2 für globale Kräfte von ca. 16,5 kN und 36 kN sind Abbildung 21A und B dargestellt.

Bei Stahl-CFK-Verbindungen mit Klebstoff 1 erfolgte eine Parallelverschiebung des Dehnungsprofils bei höheren Kräften. Die Dehnungsunterschiede zwischen Rand und Probenmitte sind größer geworden. Bei der Stahl-CFK-Verbindung mit Klebstoff 2 ändert sich das Dehnungsprofil sehr stark am Rand der Verbindung. Die Reduzierung der Dehnungen deutet auf fehlende Kraftübertragung und damit Ablösen der CFK-Lamelle hin. Die zeitliche Entwicklung der Dehnungen am Rand der Klebfuge für Klebstoff 1 in Abbildung 21C offeriert, dass sich die Dehnungen nahezu linear mit der Kraft erhöhen. Ab ca. 55 kN erhöhen sich die Dehnungen stärker, was auf ein visko-elastisches Verhalten hindeutet. Bei ca. 60 kN löst sich die CFK-Lamelle, erkennbar an der starken Dehnungsreduzierung in den Kraft-Dehnungs-Kurven in Abbildung 21C. Diese Dehnungsreduzierung tritt bei der Stahl-CFK-Verbindung mit Klebstoff 2 bereits bei 20 kN am oberen Rand auf (Abbildung 21D). Das heißt, die

Delamination beginnt bereits lokal am oberen Rand beim hoch-gefüllten Klebstoffsystem (Klebstoff 2) bereits bei Kräften von ca. 20 kN. Die CFK-Lamelle löst sich lokal am unteren Rand bei einer Kraft von ca. 40 kN. Hier ist aber festzuhalten, dass die lokale Dehnungsreduzierung (i.e. Ablösung der Lamelle) am Rand der Verbindung noch nicht zu einem globalen Versagen der Verbindung führt. Globales Versagen der Klebverbindung tritt bei Proben mit Klebstoff 2 erst bei Kräften von >45 kN ein (siehe hierzu Abbildung 16B). Alle untersuchten Systeme versagten durch Ablösung der CFK-Lamelle mit Klebstoff von der Stahloberfläche. Das adhäsive Versagen tritt in der Grenzfläche zwischen Stahl und Klebstoff ein. Nach dem Versagen der Verbindung nehmen die Stahlproben die gesamten Kräfte auf. Es erfolgt eine Einschnürung mit hohen plastischen Dehnungen im Bereich der Bohrung und anschließendes Versagen im Bereich der Bohrung.

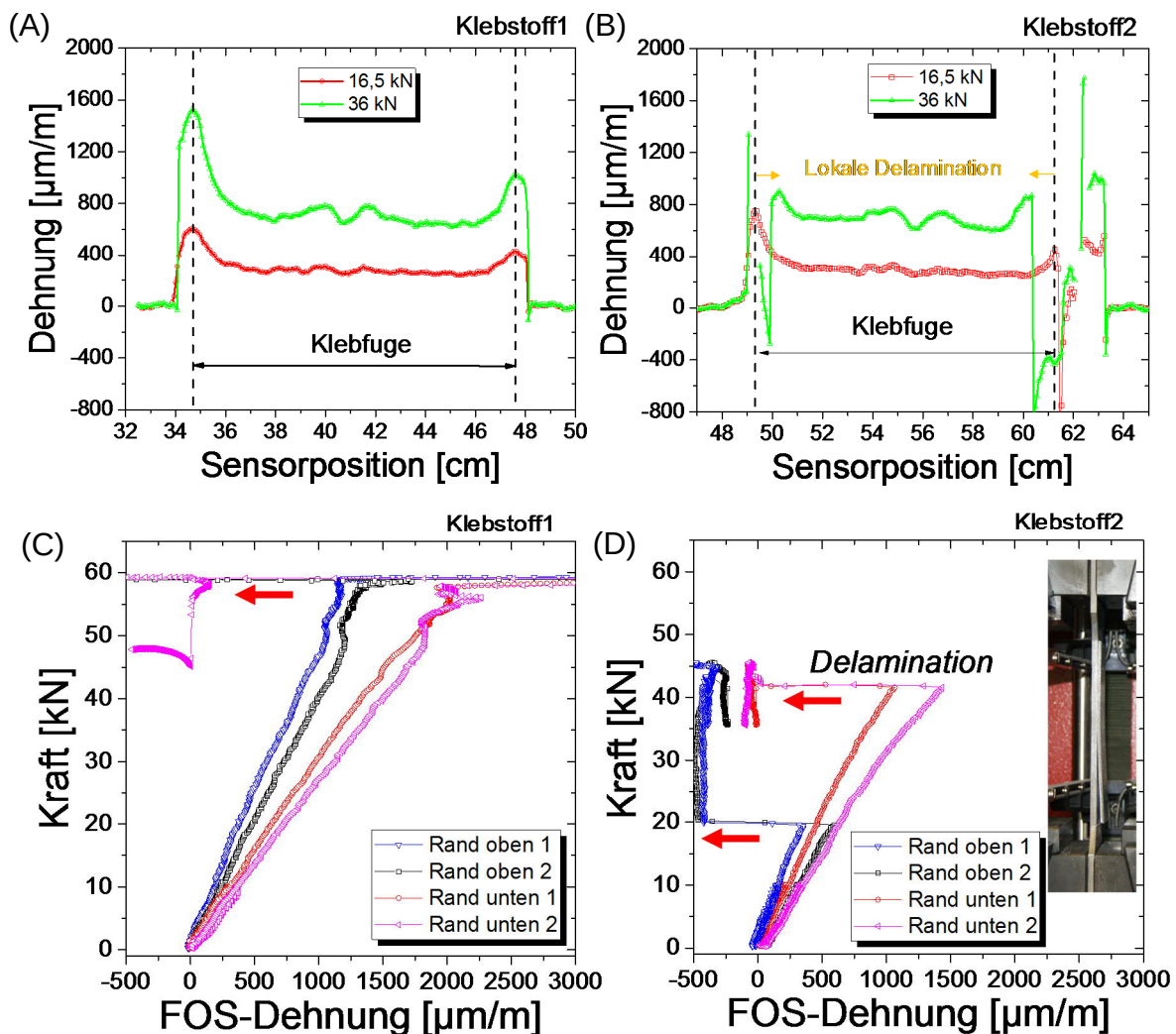


Abbildung 21: Vergleich der Dehnungsprofile für 16,5 kN und 36 kN für (A) Klebstoff 1 und (B) Klebstoff 2 sowie die Kraft-Dehnungs-Diagramme für (C) Klebstoff 1 und (D) Klebstoff 2 (Hinweis: Die Dehnungen wurden lokal am Rand der Klebverbindung mit FOS ermittelt, Kraft = globale Kraft aus Prüfmaschine)

Im Folgenden soll am Beispiel der Stahl-CFK-Verbindung mit Klebstoff 2 auf unterschiedliche Effekte bei der faseroptischen Messung aufmerksam gemacht werden. Diesbezüglich ist in

Abbildung 22 der zeit- und orts ausgelöste Dehnungsverlauf einer faseroptischen Messung dargestellt. Die Sensorfaser wurde, wie im Schema in Abbildung 22 links dargestellt, zweifach durch die Klebverbindung geführt. Die Messpositionen in der Verbindung sind durch Pfad 1 und Pfad 2 gekennzeichnet. Auf Grund dieser Sensorpositionierung ist der Dehnungsverlauf nahezu symmetrisch, was in Abbildung 22 mit der Symmetrieachse gekennzeichnet ist. Es wird aber auch deutlich, dass die Dehnungswerte nicht absolut identisch sind. Dies kann auf unterschiedliche Pfadposition, Variation der Sensorposition in z- und x-Richtung, aber auch auf nicht ideale Prüfbedingungen oder Inhomogenitäten in der Klebfuge zurückgeführt werden. Ein weiterer Effekt der bei den Klebverbindungen mal mehr und mal weniger auftrat, war das Fehlen von Messdaten. In Abbildung 22 ist dies anhand der weißen Flächen ersichtlich und durch Nummer 2 gekennzeichnet. Das Fehlen der Messdaten trat teilweise bereits bei Beginn der Messung, aber speziell bei hohen Dehnungen und Dehnungsspitzen auf. Nach Angaben des Geräteherstellers können bei hohen Dehnungsspitzen die optischen Messdaten nicht mehr ordentlich ausgewertet werden.

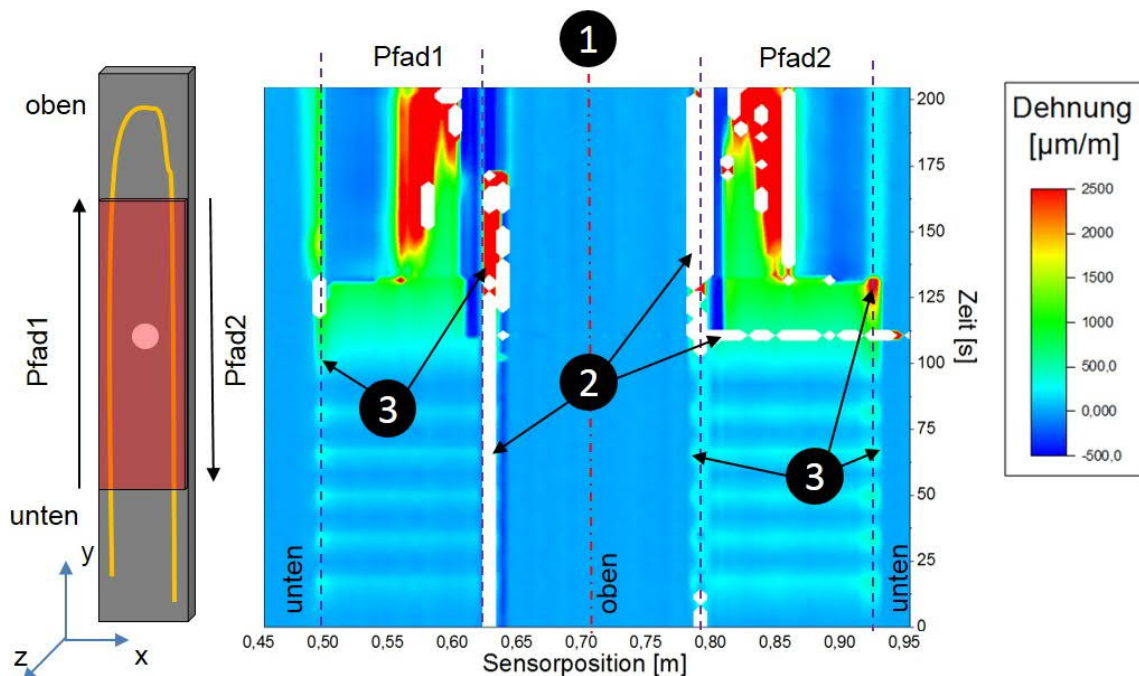


Abbildung 22: zeit- und orts ausgelöster Dehnungsverlauf einer faseroptischen Messung unter Nutzung verteilt-messender Sensorfasern mit OFDR (Dehnungen sind farblich dargestellt) und Kennzeichnung auftretender Messeffekte

Zudem traten außerhalb der Klebfuge aber direkt am Rand der Verbindung, gekennzeichnet mit Nummer 3 in Abbildung 22, Dehnungserhöhungen auf. Diese Dehnungen sind real und auf Klebstoffreste am Rand der Verbindung zurückzuführen. Die Klebstoffreste mit den eingebetteten Sensoren dehnen sich im Belastungsversuch mit der Stahlzugprobe, so dass hier ebenfalls Dehnungen mit FOS gemessen werden können. Dies wird besonders in den Dehnungsdaten ersichtlich, wenn sich die CFK-Lamelle bereits abgelöst hat und der Klebstoff noch gute Anbindung zum Stahl hat. Dieser Effekt kann zu Fehlinterpretationen der Dehnungswerte in der Klebverbindung führen, wenn die Klebfugenlänge unbekannt ist. Eine sorgfältige Applikation und Entfernen der Klebstoffreste ist notwendig.

4.4. Faseroptische Messung an Stahl-CFK-Klebverbindungen unter schwingender Belastung

Neben den quasi-statischen Versuchen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen wurden auch Schwingversuche an jeweils vier Proben (2x Klebstoff 1 und 2x Klebstoff 2) realisiert, um erste Aussagen zur Eignung der faseroptischen Sensoren für die Messung von Dehnungen in Stahl-CFK-Klebverbindungen unter schwingender Belastung zu erhalten. Für dauerhafte Messungen mit den eingebetteten Sensorfasern muss die Sensorfasern sowie der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Sensorfaser für eine gute Kraftübertragung intakt bleiben. Im Rahmen der Arbeiten wurden für die Schwingversuche hohe Belastungen für die Klebverbindungen i.e. 38 kN und 48 kN im Bereich der Streckgrenze des Stahls gewählt, um nach wenigen Zyklen ein Versagen der Verbindung zu erzielen (im englischen genannt: Low Cycle Fatigue (LCF)).

Die ermittelten Dehnungen der FBG-Sensoren und Wegdaten der Prüfmaschine sind in Abhängigkeit von der Versuchszeit exemplarisch für eine Stahl-CFK-Verbindung mit Klebstoff 1 in Abbildung 23 dargestellt. Die FBG-Sensoren haben bei den Stahl-CFK-Klebverbindungen mit Klebstoff 1 bis zum Versagen der Verbindung gemessen.

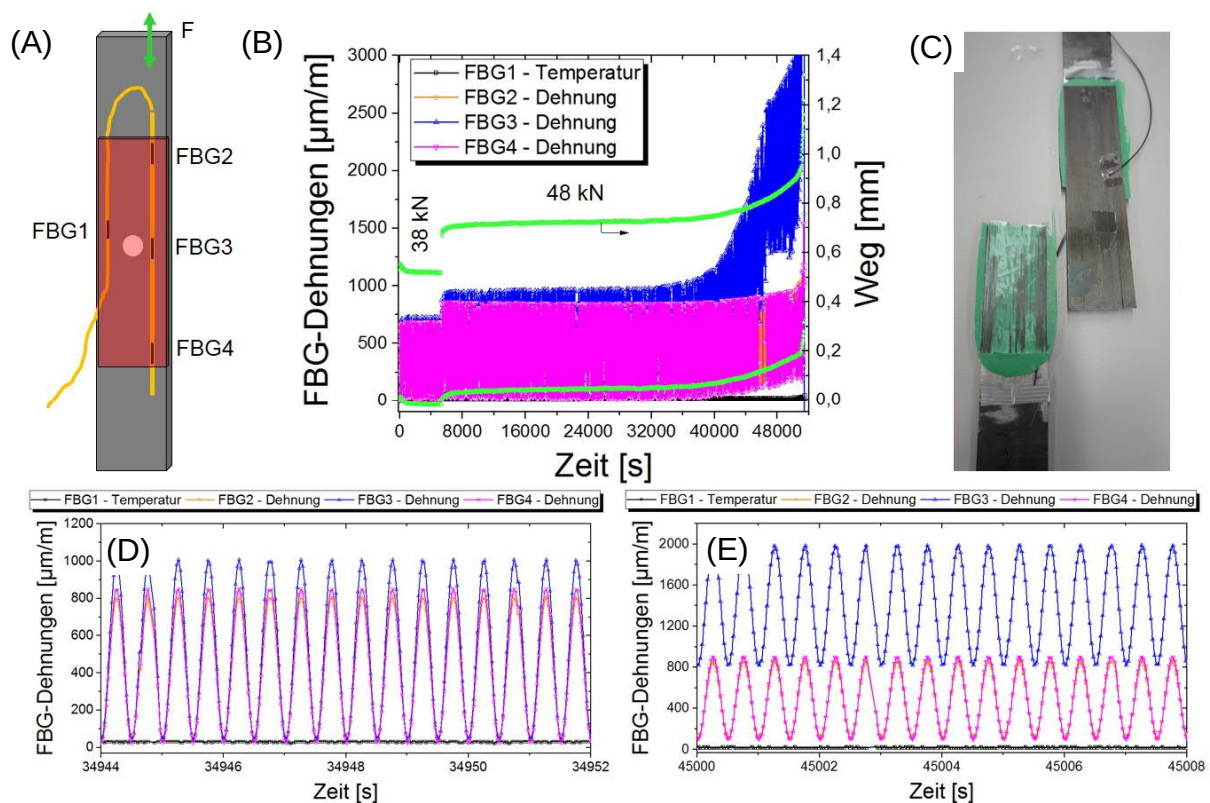


Abbildung 23: Versuchsergebnisse für Stahl-CFK-Klebverbindung mit Klebstoff 1 unter schwingender Belastung: (A) Schema Zugprobe mit Sensorpositionen; (B) FBG-Dehnungen und Wegdaten der Prüfmaschine in Abhängigkeit der Zeit bis zum Versagen; (C) Bild der versagten Stahl-CFK-Klebverbindung; (D) und (E) Dehnungsverlauf der integrierten FBG-Sensoren für unterschiedliche Zeiten (ausgewählte Zeiten aus Abbildung 23B)

Die Zeit-Weg-Kurven in Abbildung 23B verdeutlichen die Krafterhöhung von 38 kN auf 48 kN sowie den Beginn einer Veränderung - ersichtlich an der Erhöhung des Weges bei ca.

38.000 s. Die zeitliche Wegänderung äußert sich auch in Dehnungswerten der FBG-Sensoren, welche ebenfalls in Abbildung 23B dargestellt sind. Generell erhöhen sich die Dehnungswerte der in die Klebfuge integrierten FBG geringfügig mit steigender Zyklenanzahl. Die Erhöhung des Prüfmaschinen-Weges bei ca. 38.000 s zeigt sich auch signifikant in den Dehnungsdaten des FBG3, welches sich in der Probenmitte befindet (siehe Abbildung 23A). Die Dehnungen des FBG3 steigen ab einer Zeit von ca. 40.000 s drastisch an. Restdehnungen bei Entlastungen deuten bereits auf plastische Verformungen in der Klebverbindung hin. Abbildung 23D und E zeigen Detailaufnahmen des Dehnungsverlaufes zu unterschiedlichen Zeiten. Prinzipiell folgen die FBG-Dehnungen sehr gut der sinusförmigen Belastung durch die servo-hydraulische Prüfmaschine. Nach 45.000 s haben sich die Dehnungen bei FBG3 bei maximaler Belastung von 48 kN auf ca. 2.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ erhöht. Bei Entlastung bleiben Restdehnungen in Höhe von ca. 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ übrig, wohingegen die FBG2 und FBG4 keine signifikanten Dehnungsänderungen aufweisen. Interessanterweise erfolgt unter schwingender Belastung kein adhäsives Versagen an der Stahl-Klebstoff-Grenzfläche. Vielmehr tritt das Versagen in der Grenzschicht zwischen CFK und Klebstoff auf (siehe Abbildung 23C). Aus dem CFK herausgerissene Karbonfasern deuten aber auf eine gute Anbindung zwischen CFK und Klebstoff 1 hin. Die drastische Dehnungserhöhung mit bleibenden Verformungen in Probenmitte, lässt vermuten, dass die Schädigung im Bereich der Bohrung beginnt. Vor dem Versagen der Verbindungen nach mehr als 100.000 Lastzyklen erhöhen sich auch die Dehnungen am Rand der Klebverbindung (FBG2 und FBG4), was mit einer Erhöhung des Prüfmaschinen-Weges einhergeht.

Schwingversuche wurden auch an Stahl-CFK-Klebverbindungen mit Klebstoff 2 realisiert. Der Vergleich zwischen den Klebstoffsystemen bei maximaler Belastung von 38 kN in Abbildung 24 zeigt geringfügige Änderungen in den Dehnungswerten der FBG-Sensoren. Die Dehnungen der Stahl-CFK-Verbindung mit Klebstoff 2 sind um ca. 40-50 $\mu\text{m}/\text{m}$ geringer als bei dem Klebstoffsystem 1. Dies kann auf die höhere Steifigkeit auf Grund der hohen Partikelfüllgrade bei Klebstoff 2 zurückgeführt werden.

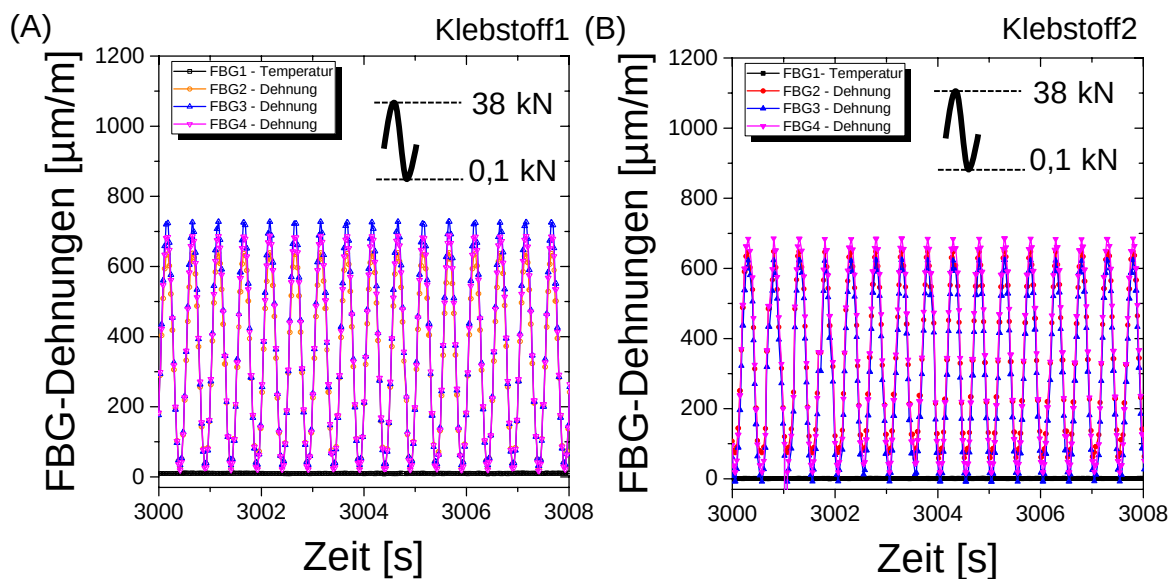


Abbildung 24: FBG-Dehnungen von Stahl-CFK-Klebverbindungen unter schwingender Belastung in Abhängigkeit der Zeit für (A) Klebstoff 1 und (B) Klebstoff 2

Nach etwa 10.000 Belastungszyklen kam es bei den Klebverbindungen mit Klebstoff 2 zu Fehlauswertungen der maximalen Lichtwellenlängen der jeweiligen FBG-Spektren. Dies zeigt die Auftragung der Wellenlänge als Funktion der Zeit in Abbildung 25B. Die Wellenlängen von FBG4 und FBG3 springen auf niedrigere Wellenlängenwerte. Dieser Effekt trat auch bei der zweiten untersuchten Probe bei Belastungen um die 38 kN auf, so dass der sinusförmige Dehnungsverlauf nicht ordentlich abgebildet werden konnte. Die Ursache hierfür lag in einer starken Entartung des Lichtspektrums des FBG2. Exemplarisch ist dies für drei Spektren in Abbildung 25C mit der Lichtintensität als Funktion der Wellenlänge für den Wellenlängenbereich von 1534 nm bis 1548 nm dargestellt. Das Spektrum des FBG2 verändert sich stark mit Belastung und weist eine starke Verbreiterung und Mehrfachpeaks auf, welche gleichzeitig zu einer Verringerung der Lichtintensität im Vergleich zu FBG3 resultieren. Diese Effekte stören die Messwerterfassung, könnten aber durch die Detailauswertung der Spektren und andere Auswertalgorithmen berücksichtigt werden.

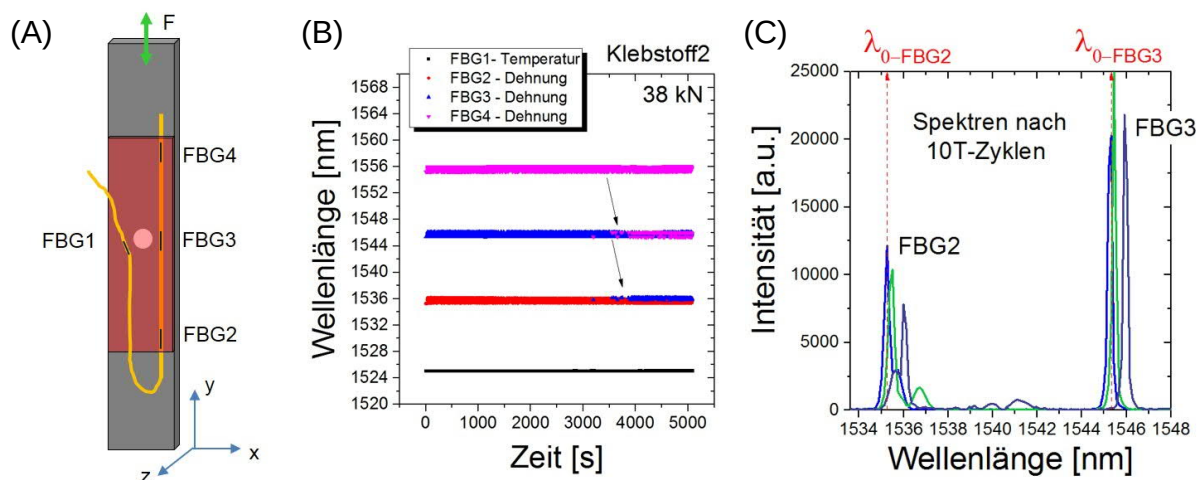


Abbildung 25: Versuchsergebnisse für Stahl-CFK-Klebverbindung mit Klebstoff 2 unter schwingender Belastung (A) Schema Sensorpositionen, (B) Wellenlänge als Funktion der Zeit bei Belastung mit 38 kN; (C) Spektren mit Intensität in Abhängigkeit der Wellenlänge für FBG2 und FBG3.

Momentan gibt es aber kein Messgerät, welches die Spektrenentartung in der Auswertung berücksichtigt und Detailinformationen zu den vorliegenden Dehnungszuständen liefert. Sensortechnisch kann dieser Effekt über Nutzung einzelner FBG-Sensorfasern verhindert werden, ist aber auf Grund vieler Zuleitungskabel aufwendiger. Im Projekt befanden sich die einzelnen Bragg-Gitter auf einer Sensorfaser.

Die Spektrenänderung hat einen physikalischen Hintergrund. Bereits Peters et al. [22] verdeutlichte mit Simulationsrechnungen, dass inhomogene Dehnungen im Bereich des FBG in einer Spektrenentartung (Verbreiterung, Mehrfachpeaks, Reduzierung der maximalen Lichtintensität) resultieren können. Die Dehnungsmessungen in den quasi-statischen Zugversuchen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen mit verteilt-messende Sensoren in Kapitel 4.3.2 haben gezeigt, dass am Rand der Klebverbindung Dehnungsspitzen auftreten. Bei den Stahl-CFK-Zugproben mit Klebstoff 2 kam es auch zu einer lokalen Ablösung am Rand der Klebverbindung oberhalb der Streckgrenze des Stahls. Die damit einhergehenden inhomogenen Dehnungen können Ursachen für eine Spektrenentartung sein. Um die Ursachen für die Spektrenentartung zu klären, wurden mikroskopische Untersuchungen an den Proben durchgeführt. Die Lichtmikroskopieaufnahmen an Schnitten, die im Randbereich der Klebverbindung herauspräpariert wurden in Abbildung 25D und E zeigen einen Mikroriss

in der Klebfuge. Dieser Riss beginnt außerhalb der Verbindung in Höhe der CFK-Lamelle im Klebstoff und wandert in die Klebfuge im Bereich der Stahloberfläche. Der Riss mit einer Länge von ca. 8 mm kann in einem inhomogenen Dehnungsfeld im Bereich des FBG resultieren, so dass eine Spektrenentartungen auftritt. Die Mittenpositionen der FBG sind ca. 5 mm vom Rand der Klebverbindung entfernt.

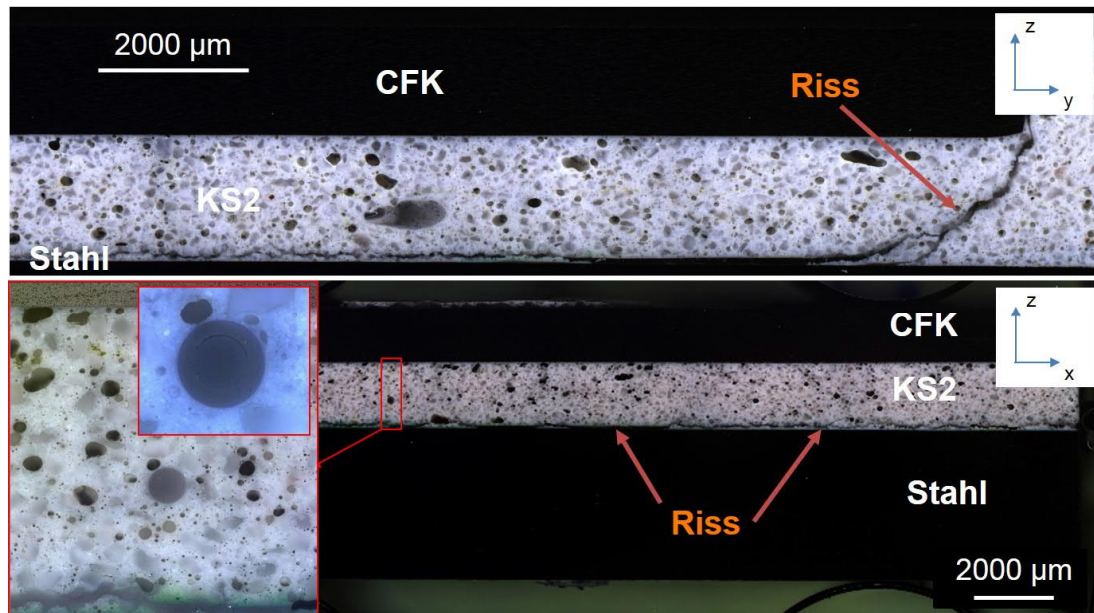


Abbildung 26: Mikroskopieaufnahmen an Schnitten unterschiedlicher Ansichten (siehe Abb. 25A) der Stahl-CFK-Klebverbindung mit Klebstoff 2 (Probe1) nach ca. 11.000 Zyklen

Für die Anwendung der FBG-Sensoren für Zustandserfassung in der Praxis bedeutet dies, dass die Positionen und Abstände der FBG vor der Applikation sehr genau geplant und festgelegt werden muss. Somit können Fehlinterpretationen vermieden bzw. gezielt Mehrinformationen gewonnen werden.

Die mikroskopischen Untersuchungen an den Stahl-CFK-Verbindungen mit Klebstoff 1 und Klebstoff 2 zeigen zudem, dass die Grenzfläche zwischen Sensorfasern und Klebstoff nach dem Versagen der Verbindung intakt ist.

Um die Erkenntnisse bezüglich des Einsatzes von faseroptischen Sensoren für die Dehnungsmessung unter schwingender Belastung zu vertiefen sowie das Ermüdungsverhalten von Klebverbindungen mit integrierter Sensorik aber auch der Sensorik selbst sowie Grenzfläche zwischen Sensoren und Klebstoff besser zu verstehen, sind weitere Schwingversuche auch unter geringen Lasten mit hoher Zyklenanzahl erforderlich.

4.5. Faseroptische Messungen an den Stahl-CFK-Klebverbindungen unter thermo-hygrischer Belastung in Klimageräten

Die thermo-mechanischen Untersuchungen hatten das Ziel Dehnungsänderung in der Klebfuge während zyklischer Temperatur- und Klimawechsel mit Feuchtänderung mit faseroptischen Sensoren während der Lagerung zu erfassen. Hierbei wurden die Möglichkeiten von FBG-Sensoren aber auch von verteilt-messenden Sensorfasern untersucht und analysiert. In vier Klebverbindungen wurden mit verteilt-messenden Sensoren und FBG-Sensoren Temperaturen und Dehnungen in der Klebfuge während der Klimagerung gemessen. In Abbildung 27 sind Dehnungsmessungen der eingebetteten FBG-Sensoren unter

Temperatur und Feuchteinfluss dargestellt. Die FBG-Sensoren befanden sich jeweils 5 cm von Probenmitte entfernt. Nicht eingebettet FBG-Sensoren dienten der Temperaturmessung in der Klimakammer. Anhand der konstanten Dehnungszyklen wird deutlich, dass mit eingebetteten Sensoren sehr gut Dehnungen während der Temperatur und Feuchtebelastung in Klebverbindungen gemessen werden können.

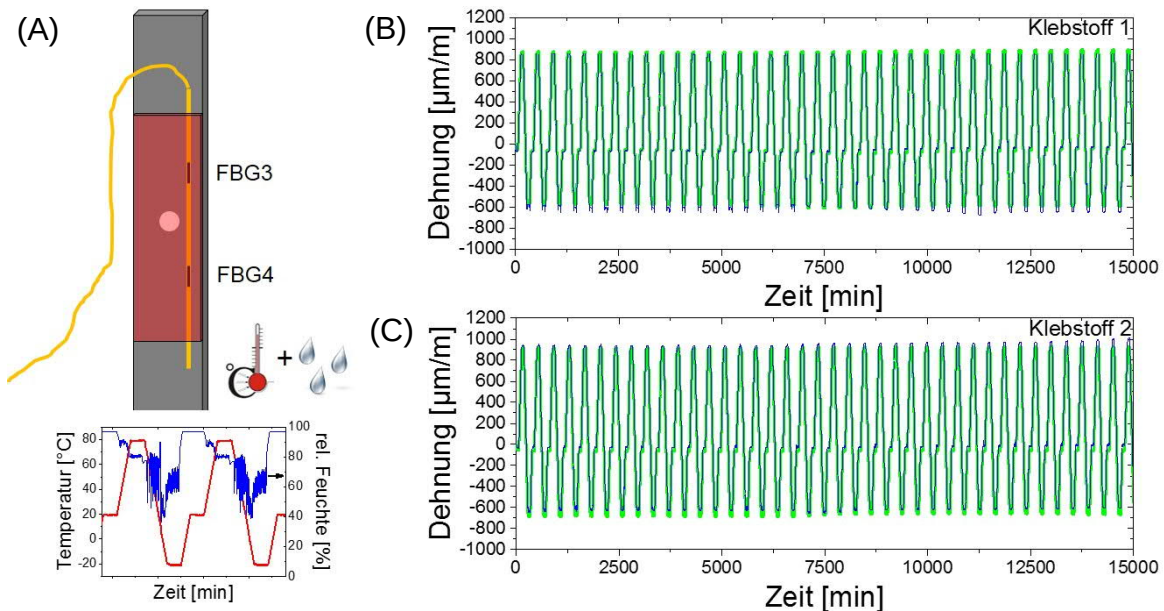


Abbildung 27: Ergebnisse der in-situ Dehnungsmessung mit FBG-Sensoren in der Klebfuge während der Klimalagerungen (A) Schema der Klebverbindung mit Positionen der Bragg-Gitter sowie aufgebrachtes Temperatur und Feuchteprofil sowie die mit integrierten Sensoren (FBG3 und FBG4) gemessenen Dehnungen für die Verbindung mit (B) Klebstoff 1 und (C) Klebstoff 2

Die maximalen Temperaturdehnungen beider untersuchten Systeme bei 80 °C betragen ca. 800 µm/m bis 900 µm/m und die minimalen Dehnungen bei -20°C ca. -600 bis -700 µm/m. Die Auftragung der Dehnungen gegen die Temperatur ergibt einen Wärmeausdehnungskoeffizienten für den Temperaturbereich von -20 bis 80 °C von ca. 15 ppm/K für die untersuchten Stahl-CFK-Klebverbindungen.

Messungen parallel zu den Klimalagerungen mit Frequenzbereichsreflektometrie und verteilt-messenden Sensorfasern bei unterschiedlichen Temperaturen in Abbildung 28 verdeutlichen sehr schön die Dehnungsverteilung in der Klebfuge für die Stahl-CFK-Klebverbindungen. Die Dehnungsmessung erfolgt über die gesamte Klebfuge mit einer Ortsauflösung von 0,65 mm. Der Messpfad durch die Klebfuge ist schematisch in Abbildung 28A dargestellt.

Im Vergleich zu den Ausgangsdehnungen bei 25 °C werden die durch die Temperatur induzierten Dehnungen in den Klebverbindungen (gelb markierter Bereich) sowie das Verhalten der unterschiedlichen Klebstoffe ersichtlich. Sowohl bei tiefen als auch hohen Temperaturen treten Dehnungsspitzen am Rand der Klebfuge auf. Temperaturerhöhungen resultieren in Dehnungen im Randbereich abhängig vom Klebstoff bis zu 2000 µm/m. Die Temperaturreduzierung auf -20 °C erzeugt negative Dehnungen (Stauchungen) in den Klebverbindungen mit maximalen Dehnungen im Randbereich von bis zu -2000 µm/m. Die Dehnungen im mittleren Bereich bei 80 °C und -20 °C entsprechen ungefähr den mit den FBG-Sensoren ermittelten Dehnungen (siehe Abbildung 27B und C). Beim Klebstoff 2 mit hohem

Partikelanteil ist zwar die gemittelte Temperaturdehnung (mittlerer Bereich) geringer, wohingegen die Dehnungsspitzen am Rand der Klebfuge ausgeprägter sind. Der zähmodifizierte Klebstoff 1 dehnt sich prinzipiell mehr mit Temperaturerhöhung. Die Dehnungsspitzen am Rand der Klebfuge sind aber weniger ausgeprägt.

Die Form der Dehnungsprofile ist prinzipiell vergleichbar zu den Dehnungsprofilen, die in mechanischen Zugversuchen in der Verbindung ermittelt wurden. Am Rand der Verbindung treten Dehnungsspitzen auf.

Eine klebstoffabhängige Detailauswertung wird auf Grund der komplexen thermo-mechanischen Zusammenhänge hier nicht durchgeführt. Zugversuche an den Klebverbindungen unter Temperaturbelastung könnten hier weitere wichtige Detailinformationen zu Relaxations- und / oder Kriecheffekten in der Klebfuge erbringen, war aber nicht Ziel der vorliegenden Untersuchungen.

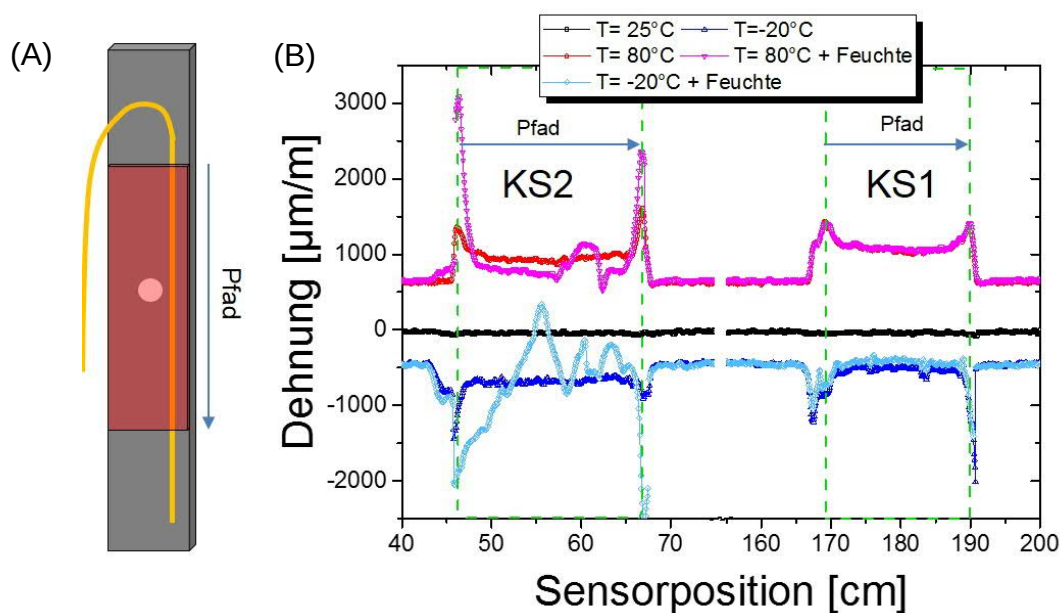


Abbildung 28: Ergebnisse der Klimalagerungen: (A) Schema der Klebverbindung mit Darstellung des Messpfades sowie (B) in-situ Dehnungsmessung mit verteilt-messenden Sensorfasern zu ausgewählten Klimalasten

In Abbildung 28B wird aber in der Dehnungsmessungen mit verteilt-messenden Sensorfasern eine signifikante Änderung bei Klebstoff 2 ersichtlich. Nach einer gewissen Zeit unter Feuchteinfluss erfolgt eine Änderung des Dehnungsprofile (Abbildung 28B: Kurven $T = 80^\circ\text{C} + \text{Feuchte}$ und $T = -20^\circ\text{C} + \text{Feuchte}$). Die Dehnungsspitzen am Rand werden größer und im mittleren Bereich tritt ein lokales Maximum bzw. Minium auf. Die Kurven für Klebstoff 1 sind hingegen weiterhin deckungsgleich. Die Änderung bei Klebstoff 2 deutet auf eine Änderung in der Klebfuge - möglicherweise auf ein lokales Ablösen hin. Um eine mögliche Schädigung zu beurteilen, wurden nach den Klimalagerungen die Stahl-CFK-Klebverbindungen quasi-statisch im Zugversuch bis zum Bruch belastet. Die Kraft-Verformung-Diagramme in Abbildung 29 zeigen den Vergleich des mechanischen Verhaltens zwischen den nicht gelagerten und gelagerten Stahl-CFK-Klebverbindungen. Hier wird deutlich, dass die gelagerten Stahl-CFK-Klebverbindungen mit Klebstoff 1 höhere Kräfte (Spannungen) bei der Streckgrenze des Stahls aufweisen als die nicht gelagerten Klebverbindungen. Die Temperaturen bis 80°C bei der Lagerung resultierten in einer Nachvernetzung des Klebstoffs und somit in höheren

Festigkeiten der Klebverbindung. Im Gegensatz dazu weisen die Kraft-Verformungs-Kurven der Stahl-CFK-Verbindung mit Klebstoff 2 bereits vor Erreichen des lokalen Maximums („Kraft bei Streckgrenze“) einen Kraftabfall bei 46 kN und 50 kN auf (siehe Abbildung 29B). Zudem erfolgt die Delamination der CFK-Lamelle bei den gelagerten Stahl-CFK-Klebverbindungen mit Klebstoff 2 bereits bei kleineren Verformungen als bei der nicht gelagerten Proben. Die Kraftreduzierung vor Erreichen der Streckgrenze und die vorzeitige Delamination der CFK-Lamelle ist wahrscheinlich auf eine Vorschädigung der Verbindungen durch die Klimalagerung unter Temperatur und Feuchteinfluss zurückzuführen, was anhand der Dehnungsänderungen bei den faseroptischen Messungen ersichtlich wurde. Alle untersuchten Verbindungen zeigten eine Verstärkungswirkung im Vergleich zur einfachen Stahlzugprobe.

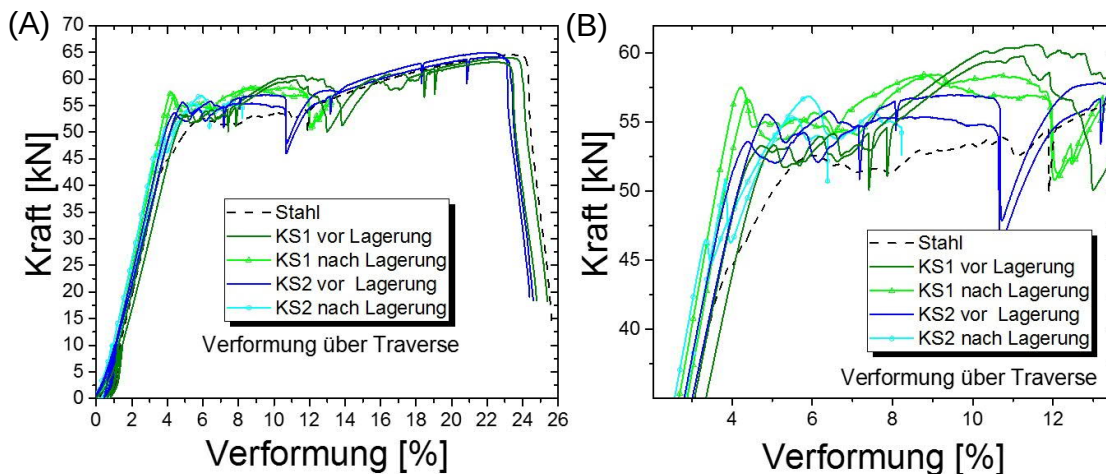


Abbildung 29: qualitativer Vergleich der Zugversuchsergebnisse der gelagerten mit nicht gelagerten Stahl-CFK-Klebverbindungen (Hinweise: Verformung ist die Gesamtverformung der Probe) (A) Kraft-Verformungs-Kurven aller untersuchten Klebverbindungen und (B) Details der Kraft-Verformungs-Kurven zur Darstellung der Änderungen

Die Sensordaten zeigen prinzipiell vergleichbare Ergebnisse. Da in Untersuchungen mit FBG-Sensoren nur zwei Bragg-Gitter in der Klebverbindungen integriert waren, ist die Ortsauflösung der Sensordaten gering und lokale Effekte können nicht erfasst werden. Hier war das Ziel die zeitliche Änderung (Messung je 1 min) an zwei Messstellen in der Klebverbindung zu erfassen. Dies ist prinzipiell auch mit Frequenzbereichsreflektometrie möglich, erfordert aber den Umgang und die Verarbeitung großer Datenmengen wenn eine hohe Ortsauflösung gewünscht ist.

4.6. Untersuchungen an den Bauteildemonstratoren

4.6.1. CFK-verstärkter HEA-Profilträger

Im Rahmen des Projektes wurden die Erkenntnisse aus den Untersuchungen an Laborproben auf definierte Bauteile übertragen. Ziel war die Evaluierung der Möglichkeiten der Nutzung von faseroptischen Sensoren zur Dehnungsmessung in Bauteilen. Ein Vergleich zwischen unterschiedliche Klebstoffsystem wurde hier nicht angestrebt. Als Demonstratorbauteil wurde im ersten Schritt ein HEA-Profilträger mit einer über Klebstoff 3 applizierten CFK-Lamelle in der Zugzone des Trägers untersucht. In die Klebfuge wurden FBG-Sensoren und verteilt-messende Sensoren appliziert. Zur Validierung der Dehnungsdaten der Sensorfasern wurden elektrische Dehnungsmesstreifen auf die CFK-Lamelle appliziert. Die Sensorpositionierung ist

in Abbildung 30A als Foto und Schema dargestellt. Die DMS und FBG-Sensoren befanden sich am Rand der Klebung als auch in der Mitte. Wie bereits in Abbildung 5 dargestellt, wurde das sensorisierte Bauteil im 3-Punkt-Biegeversuch zyklisch belastet. Die Dehnungsergebnisse der verteilt-messenden Faser-sensoren (OFDR-Messung) und FBG-Sensoren im Vergleich mit Dehnungen der elektrischen DMS zeigt Abbildung 30B und C.

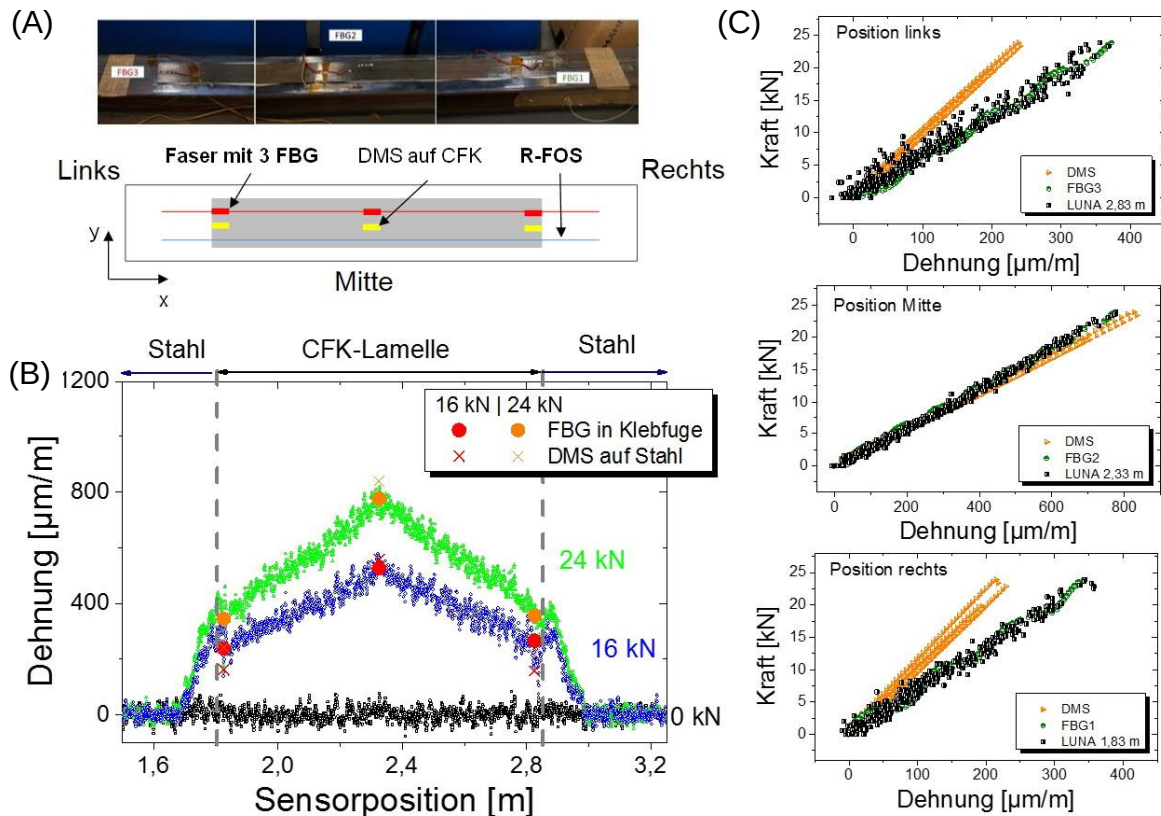


Abbildung 30: (A) Foto und Schema der Sensorpositionen auf dem CFK-verstärkten HEA-Profilträger (Klebstoff 3); (B) Dehnungsverläufe gemessen mit OFDR sowie Punktanalyse mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren und Dehnungsmessstreifen für Belastungen von 0 kN, 16 kN und 24 kN; (C) Darstellung der Kraft als Funktion der Dehnungen für FBG-Sensoren, verteilt-messende Sensoren und DMS

Die Auftragungen der mit OFDR gemessenen Dehnungen als Funktion der Sensorposition bei unterschiedlichen Lastzuständen in Abbildung 30B geben einen Überblick über die Dehnungsverteilung in Faserrichtung entlang der Klebfuge. Über die gesamte Faserlänge konnten hierbei mit einer örtlichen Auflösung von 0,65 mm Dehnungen erfasst werden. Die Dehnungen zeigen einen charakteristischen Dehnungsverlauf mit einem Dehnungsmaximum in Trägermitte für die 3-Punkt-Biege-Belastung. Mit Zunahme der Kraft erhöhen sich die gemessenen Dehnungen in der Klebfuge. Die mit OFDR gemessenen Dehnungswerte stimmen sehr gut mit Dehnungen der FBG-Sensoren, die sich am Rand und der Mitte der Klebverbindung befanden, überein (siehe Abbildung 30B). Die mit DMS gemessenen Dehnungen sind abhängig von der Lage auf der CFK-Lamelle etwas höher oder niedriger als die faseroptischen Sensordaten. Die Unterschiede zwischen den Messmethoden werden in der Auftragung der Kraft als Funktion der Dehnung in Abbildung 30C deutlich. Hier wurden definierte Messpositionen am Rand und in der Mitte der Verbindung ausgewertet. Es zeigt sich auch hier, dass die faseroptischen Messmethoden vergleichbare Dehnungswerte liefern. Die

Datenstreuung ist bei den OFDR-Messungen höher als bei FBG-Sensoren. Tendenziell stimmen die faseroptischen Daten mit den DMS-Dehnungsdaten überein. In der Mitte des Trägers sind die DMS-Dehnungen auf der CFK-Lamellen oberhalb von Kräften von 10 kN geringfügig höher als in der Klebfuge. Am Rand sind die DMS-Dehnungen geringer als die FOS-Dehnungen in der Klebfuge. Je höher die Belastungen umso größer werden die Unterschiede zwischen FOS und DMS-Messwerten am Rand. Die Abweichungen zwischen den Dehnungswerten sind auf die unterschiedliche Sensorposition zurückzuführen. Die DMS befinden sich auf der CFK-Lamelle und messen damit geringere Dehnungen als die faseroptischen Sensoren, welche sich in der Klebfuge befinden. Zudem kann es, wie bereits bei den Stahl-CFK-Zugproben festgestellt, zu Dehnungserhöhungen am Klebfugenrand kommen.

Bereits während des zyklischen 3-Punkt-Biegeversuches wurde beim Erhöhen der Kraft auf 30 kN eine Dehnungsreduzierung des DMS am linken Rand der Verbindung festgestellt, was auf eine Schädigung des Verbundes hindeutet. Beim Ablösen der Klebschicht vom Stahl kann keine Kraftübertragung zwischen Stahl und CFK stattfinden, was eine lokale Dehnungsreduzierung in diesem Bereich zur Folge hat. Die Detailanalyse der Dehnungsverläufe als Funktion der Zeit und Sensorposition im Randbereiche der Klebverbindung für die verteilt-messenden Sensorfasern in Abbildung 31 verdeutlicht, dass ab einer bestimmten Zeit eine Dehnungsreduzierung (blaue Farbe, Abbildung 31A) im linken Randbereich der Verbindung eintritt.

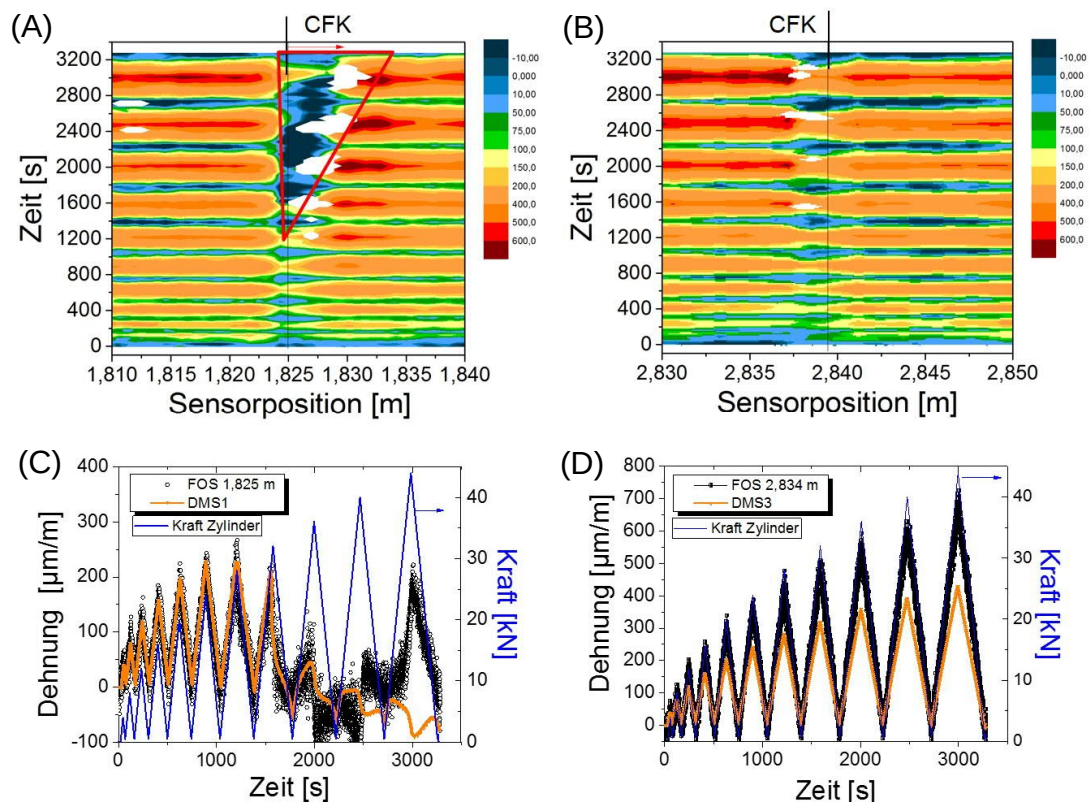


Abbildung 31: Auftragung der Dehnungen als Funktion der Zeit und der Sensorposition für die Klebfuge: (A) am linken Rand und (B) am rechten Rand (Dehnung in Faserrichtung farblich dargestellt – siehe Skala) sowie die Dehnungen als Funktion der Zeit für (C) eine definierte Sensorposition am linken Rand und (D) für die Sensorposition am rechten Rand der Klebfuge (Dehnungen mit DMS auf der CFK-Lamellen und FOS in der Klebfuge gemessen)

Dieser Effekt breitet sich in Richtung Klebfugenmitte aus und wird bei Zunahme der Belastung stärker, ist aber im rechten Randbereich der Klebverbindung in Abbildung 31B nicht vorhanden. Die FOS-Punktanalyse bei 1,825 m im linken Randbereich der Verbindung und die Dehnungen des DMS, welcher sich an vergleichbarer Stelle auf dem CFK befindet, zeigen eine signifikante Dehnungsreduzierung in Abbildung 31C oberhalb einer Zeit von 1500 s (entspricht ca. 30 kN). Diese Dehnungsreduzierung ist auf ein Ablösen der Klebschicht mit CFK-Lamelle von der Stahloberfläche und die damit einhergehende fehlende Kraftübertragung zwischen Stahl und CFK zurückzuführen. Im rechten Randbereich findet keine Dehnungsreduzierung (vergleiche Abbildung 31D) statt. Die Verbindung im rechten Randbereich ist bei Belastungen von 45 kN noch intakt. Mit FBG-Sensoren wurden bei diesen Lasten noch keine Ablösen der CFK-Lamelle nachgewiesen, was möglicherweise auf ein ungleichmäßiges Ablösen der Klebschicht zurückgeführt werden kann.

Das Verbundsystem wurde abschließend bis zu einer sichtbaren plastischen Verformung des Stahlträgers (ca. 56 kN) quasi-statisch belastet und anschließend wieder entlastet. Die Dehnungsdaten der faseroptischen Sensoren der letzten Belastungsphase in Abbildung 32 zeigen anhand einer signifikanten Dehnungsreduzierung, dass bei diesen Lasten auch eine Ablösung der CFK-Lamelle im rechten Randbereich oberhalb einer Kraft von 50 kN stattgefunden hat.

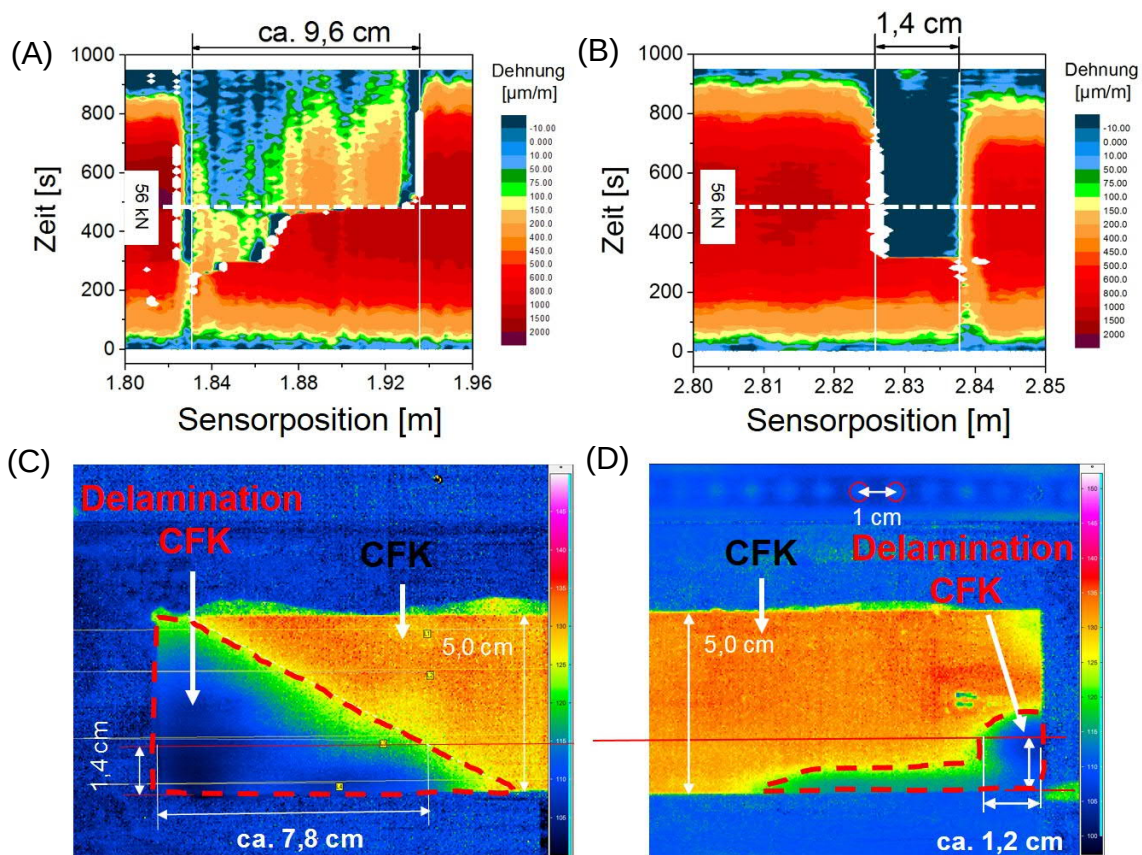


Abbildung 32: Faseroptische Dehnungsmessungen in Abhängigkeit der Sensorposition und Zeit mit Darstellung der CFK-Ablösung in den Randbereichen für (A) den linken Rand der Verbindung und (B) den rechten Rand der Verbindung; Phasenbilder der Puls-Phasen-Thermografie zur zerstörungsfreien Detektion der Delamination nach dem Belastungsversuch (C) am linken Rand und (D) am rechten Rand der Stahl-CFK-Klebverbindung

Zudem hat sich die CFK-Lamelle im linken Bereich auf einer Länge von 10 cm gelöst. Die Delamination findet nicht kontinuierlich, sondern eher stufenweise statt. Nach Erreichen der Kraft von 56 kN nach ca. 500 s erfolgt bei der Entlastung der Verbindung keine weitere Ablösung. Die Delamination der CFK-Lamelle bestätigen auch qualitativ Untersuchungen mit Puls-Phasen-Thermografie. Die blauen Bereiche in den Phasenbildern (eingegrenzt mit roter Strichlinie) in den Phasenbildern in Abbildung 32C und D verdeutlichen den fehlenden Kontakt zwischen Stahl und CFK. Rote bzw. orange Flächen sind Bereiche mit intakter Verbindung. Mittels punktueller Ultraschallmessung konnte die Ablösung bestätigt werden. In den Phasenbildern wird ebenso ersichtlich, dass keine symmetrische, einheitlich Ablösung stattgefunden hat. Entsprechend der FOS-Ergebnisse ist die Ablösung am linken Randbereich mit ca. 7,8 cm größer (siehe Abbildung 32C) als am rechten Randbereich der Stahl-CFK-Verbindung mit ca. 1,2 cm (Abbildung 32D). Beim FBG-Sensor im rechten Randbereich trat keine Dehnungsreduzierung während der Belastung auf (Daten hier nicht gezeigt), was auf die mit Puls-Phasen-Thermografie nachgewiesene intakte Klebverbindung zurückgeführt werden kann.

Ergebnisse der numerischen Simulation am CFK-verstärkten HEA-Profilträger - Vergleich mit den Sensordaten

Um Dehnungen direkt in der Klebfuge zu analysieren, wurden FEM-Simulationen mit einem linear-elastischen Materialmodell für den verwendeten hoch-gefüllten Klebstoff (Klebstoff3) durchgeführt. Das numerische Modell wurde mit den experimentell gemessenen, globalen Verschiebungen und Kräften des Belastungsversuchs validiert. Dehnungen wurden in der Klebfuge des CFK-verstärkten HEA-Profilträgers über einen Pfad ermittelt (siehe Abbildung 33A). Der Vergleich zwischen experimentellen und berechneten Dehnungen für einzelne Laststufen in Abbildung 33B macht die sehr gute Übereinstimmung zwischen den Dehnungen bei Kräften von 16 kN und 24 kN deutlich. Bei höheren Kräften (in Abbildung 33B beispielhaft für 36 kN) sind die errechneten Dehnungen deutlich geringer als die experimentell ermittelten Dehnungen.

Wie oben bereits diskutiert, wurde bei einer Kraft von ≈ 30 kN ein Ablösen der CFK-Lamelle festgestellt, so dass eine Schwächung des Gesamtsystems eintritt. Der Rest der intakten Verbindung trägt die Kräfte ab. Dies führt zwangsläufig dazu, dass sich die Durchbiegung des Systems und damit die Dehnungen in der Zugzone erhöhen. Bei dem „idealen“ FEM-Modell wird das Ablösen der CFK-Lamelle nicht berücksichtigt, so dass eine Diskrepanz zwischen den errechneten und experimentellen Dehnungswerten bei Kräften von 36 kN entsteht.

Diesbezüglich wurde in den numerischen Untersuchungen ein Kohäsivzonenmodell (CZM), bei dem eine Kontaktablösung durch vordefinierte Grenzspannungen (Materialparameter) definiert werden können, benutzt, um die Delamination zu beschreiben. Kohäsivzonenelemente wurden stahlseitig in der Klebfuge im numerischen Modell implementiert. Herausforderung bei Nutzung solcher CZ-Modelle ist die Auswahl der richtigen Materialparameter („Ablösecharakteristika“), welche in aufwändigen mechanischen Versuchen ermittelt werden müssen. Hier wurde ein neuartiger Ansatz zur Parameteridentifikation gewählt, der Sensormessungen und FEM-Simulationen nutzt. Über den Einsatz der faseroptischen Sensoren kann der Zeitpunkt der Rissinitiierung / Delamination erfasst werden. Damit war es möglich, den numerisch berechneten Dehnungsverlauf mit dem experimentellen Dehnungsverlauf kurz vor der Delamination abzugleichen und die notwendigen Parameter wie die maximale Kontaktspannung aus den numerischen

Simulationen abhängig vom Versagensmode (Mode I oder II) zu ermitteln. Dieses Vorgehen wurde an den Stahl-CFK-Klebverbindungen unter Zugbeanspruchung (siehe Kapitel 4.3.2) realisiert. Die ermittelten Materialparameter für die CZ-Modelle wurden für die numerische Simulation unter Einsatz der Kohäsivzonenelemente für die Stahl-CFK-Zugproben und für den CFK-verstärkten HEA-Profilträger benutzt und getestet. Die Ergebnisse der Simulationen für den Stahlträger in Form der Dehnung als Funktion der Sensorposition sind in *Abbildung 34* dargestellt. Parallel wurde die Ablösung durch ein einfaches numerisches Modell mit einer Risslänge von 5 mm (entspricht mit FOS-gemessener Risslänge bei 36 kN), bei welchem einfach Kontaktelemente weggelassen wurden, beschrieben.

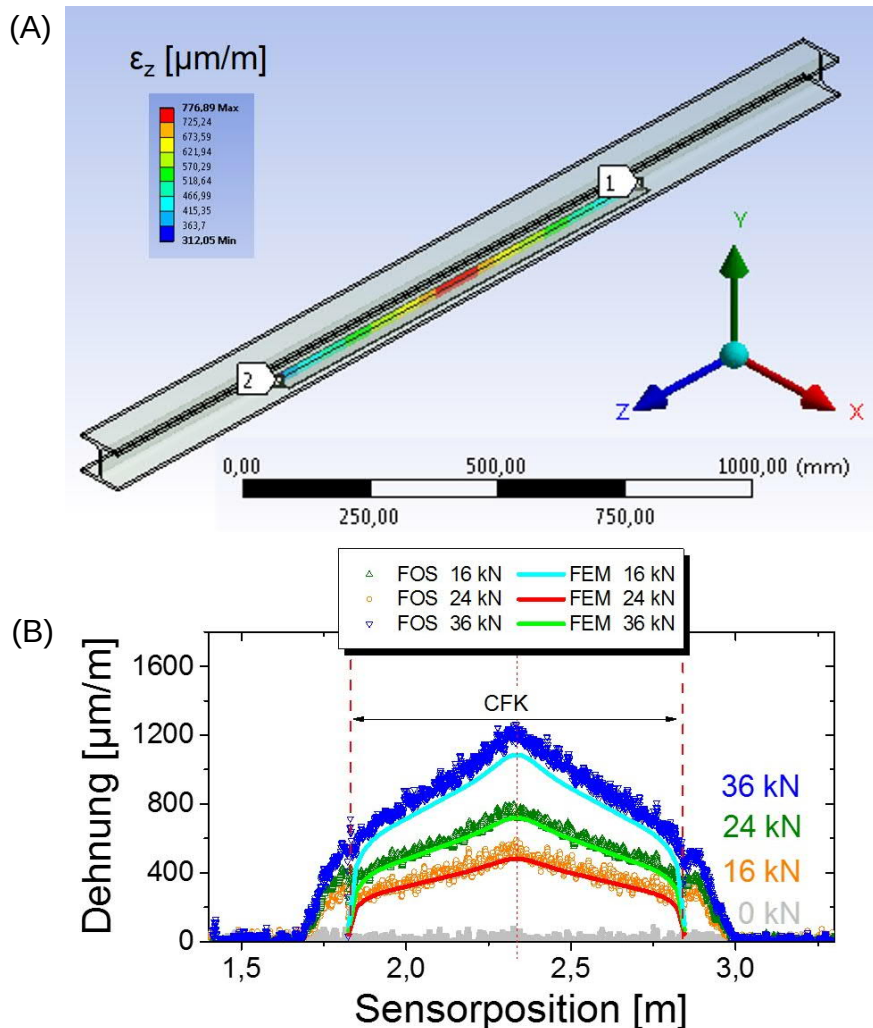


Abbildung 33: (A) numerisches Modell mit analysierten Dehnungspfad in der Klebfuge und (B) Vergleich der experimentellen mit den errechneten Dehnungswerte als Funktion der Sensorposition

Die Ergebnisse der Simulation in *Abbildung 34B* mit im linken Klebstoffrand implementierten Kohäsivzonenelementen (siehe *Abbildung 34A*) zeigen eine Verbesserung der Übereinstimmung der numerischen mit den experimentellen Ergebnissen. Somit können bessere Prognosen für die Resttragfähigkeit beim Ablösen der CFK-Lamelle getroffen werden. Die Prognosequalität ist noch an Bauteilen, bei denen eine starke CFK-Delamination auftritt, nachzuweisen.

Die Parameteridentifikation über den Einsatz von Fasersensoren in den Klebfugen und die damit einhergehende Gewinnung von orts- und zeitaufgelösten Dehnungsinformationen in Verbindungen mit FEM-Simulationen kann somit eine Alternative zu aufwändigen Parameterversuchen sein. Dies könnte es ermöglichen, Materialparameter direkt an Bauteildemonstratoren im Technikumsmaßstab zu ermitteln. Hierbei ist aber anzumerken, dass bei Nutzung dieses Konzepts und Übertagung auf Bauteile und / oder Szenarien in der Anwendung gleiche Versagensmodi vorliegen müssen. Um die Robustheit dieser Methodik zu bewerten, ist es zudem empfehlenswert, die vorgestellte Methodik auch an den üblichen Prüfkörpern mit integrierten Fasersensoren (DCB, ENF, MMB) durchzuführen. Weiterführende Arbeiten müssen auch exponentielle Kohäsivgesetze mit einbeziehen, damit die Vorhersagequalität noch präziser werden kann.

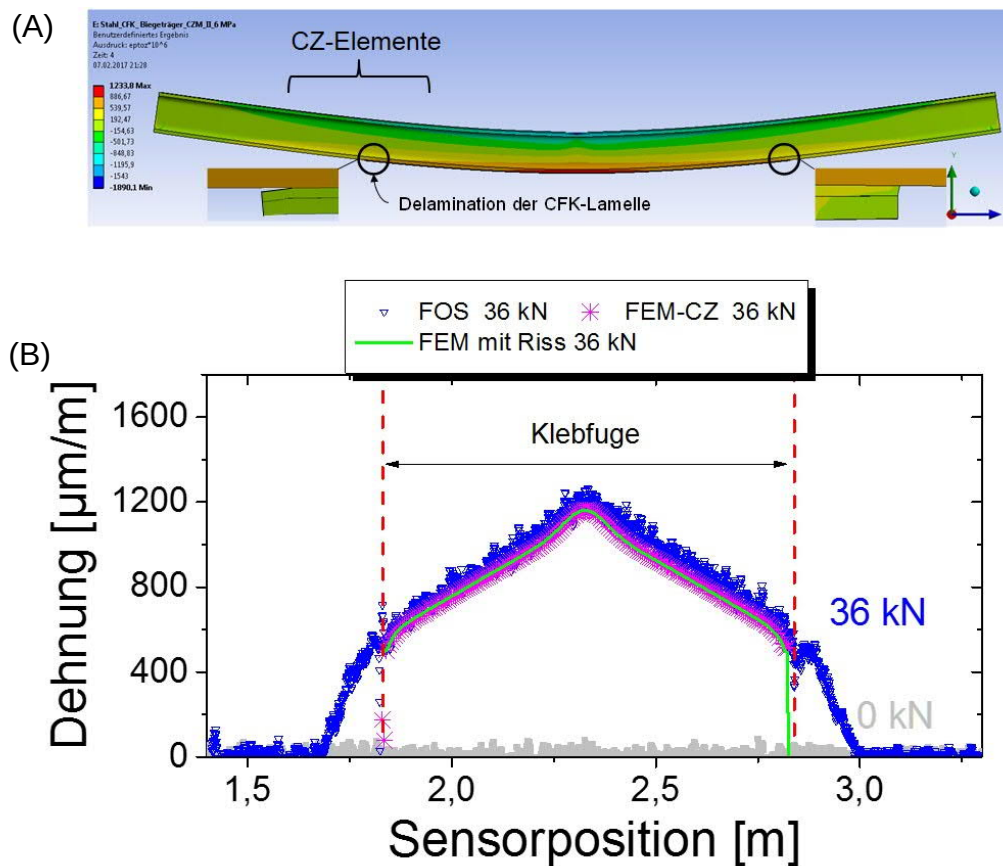


Abbildung 34: (A) Darstellung der CFK-Delamination in der Simulation unter Nutzung von Kohäsivzonenelementen in der Klebfuge und (B) Vergleich der experimentellen und mit den berechneten Dehnungen unter Nutzung von Kohäsivzonenelementen als Funktion der Sensorposition

4.6.2. Feldtest an einem CFK-verstärkten HEA-Profilträger

Im Weiteren wurde ein CFK-verstärkter HEA-Profilträger mit integrierten faseroptischen Sensoren hergestellt. Hierbei wurden eine 10 cm breite CFK-Lamelle mit Klebstoff 2 auf den HEA-Profilträger appliziert. Nach Aushärtung des Klebstoffs wurde das Bauteil im Freien gelagert. Das „sensorisierte“ Bauteil ist direkt der Witterung (siehe Abbildung 35A) ausgesetzt. Haupteinflüsse auf die Klebung sind somit Temperatur und Feuchte sowie am Rand UV-Strahlung. Dehnungsdaten aus dem Inneren der Klebfuge werden in regelmäßigen Zeitabständen mit FBG-Messtechnik sowie OFDR erfasst. Es zeigte sich, dass die Dehnungen

bzw. Dehnungsverläufe vergleichbar zu den Klimageräten an den Laborprüfkörpern (siehe Kapitel 4.5) exakt gemessen werden können. Der Dehnungsverlauf in der Klebfuge wird hauptsächlich durch die Temperaturbelastung bestimmt. Die Dehnungsdaten als Funktion der Zeit über einen Zeitraum von 7 Monaten in Abbildung 35B zeigen die jahreszeitliche Erwärmung sowie die Tag/Nacht-Zyklen. Hier wird darauf hingewiesen, dass die Lücken bei der Datenaufzeichnung keine Fehlmessungen sind. In diesen Zeiträumen wurde die Messtechnik für die mechanischen und thermo-mechanischen Untersuchungen eingesetzt.

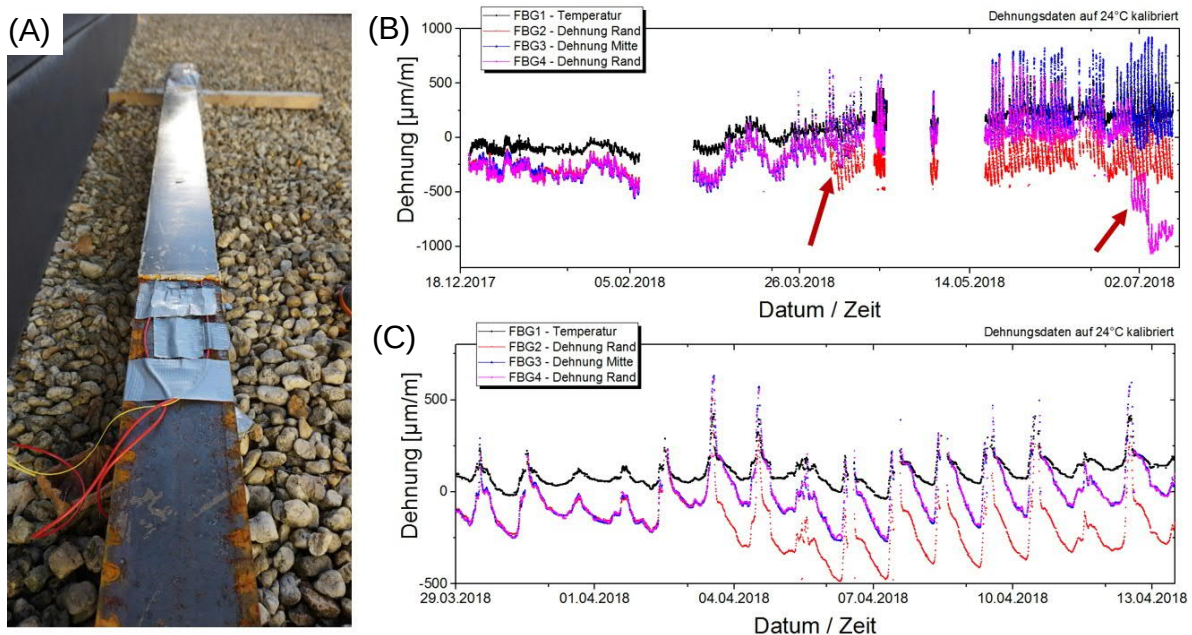


Abbildung 35: Dehnungsmessungen während der Lagerung des CFK-verstärkten HEA-Profilträgers im Freien (A) Foto des Trägers von der Unterseite mit Blick auf die CFK-Lamelle nach ca. 7 Monaten; (B) Überblick über die Dehnungsmessungen vom Dezember 2017 bis Juli 2018 und (C) Detaildarstellung der Dehnungen März/April 2018

Das nicht integrierte FBG1 misst direkt die Temperatur und stimmt mit den Daten einer wenige Meter entfernten Wetterstation überein. Die in die Klebverbindung integrierten Faser-Bragg-Gitter (FBG2 befindet sich Rand links, FBG3 in der Mitte und FBG4 am Rand rechts) erfassen die Temperaturdehnung der Verbindung und weisen bis zum 3. April nahezu identische Werte auf. Die deutliche Reduzierung der Dehnungen beim FBG2 am 3. April, ersichtlich in Abbildung 35C, deutet auf eine erste Veränderung im Randbereich hin. Mit den Ergebnissen und Wissen aus Kapitel 4.4. und 4.5 deutet dies auf ein Ablösen der Klebschicht am linken Rand hin. Selber Effekt tritt bei FBG4, welches sich am linken Rand befindet, im Juli 2018 ein.

Die Auswertung der Dehnungsverläufe in Abbildung 36A aus den OFDR-Messungen bestätigt die mit FBG-Sensoren festgestellten Dehnungsänderungen. Auch bei den OFDR-Messungen ändern sich die Dehnungsverläufe mit der Lagerungszeit. Zu Beginn der Messkampagne im Dezember 2017 und Anfang März 2018 sind die Dehnungsverläufe relativ homogen. Am Rand treten Dehnungsspitzen auf. Im Juni 2018 deutet die signifikante Reduzierung der Dehnungen im Randbereich bei einer Sensorposition von 600-700 mm sowie im Randbereich bei Sensorpositionen von 1450-1650 mm auf starke Veränderungen hin. Die Dehnungswerte in der Mitte sind nahezu unverändert, abgesehen von lokalen Dehnungsspitzen. Eine visuelle Analyse am CFK-verstärkten Profilträger macht ersichtlich,

dass im Randbereich der Klebung Risse auftreten sowie starke Korrosionserscheinungen am Stahl ersichtlich sind. Abbildung 36B zeigt hier beispielhaft Kameraaufnahmen von den Randbereichen der Klebung mit Blickrichtung auf die Klebfuge. Korrosionserscheinungen und makroskopische Risse sind am Klebfugenrand zuerkennen. Die Schädigung im Inneren der Klebfuge muss nach abschließender Lagerung mit zerstörungsfreien Methoden wie Thermografie oder Ultraschalluntersuchungen nachgewiesen werden.

Die Autoren weisen darauf hin, dass die ausgewählten Lagerungsbedingungen Extremfälle darstellen, die bisher bei der Nutzung von CFK-Lamellen zur Ertüchtigung und Sanierung für Stahlbeton oder Holzkonstruktionen nicht auftreten. Die CFK-Lamellen und der Klebstoff sind üblicherweise vor UV-Strahlung und Regen geschützt. Die Analyse der Messmöglichkeiten mit faseroptischen Sensoren stand im Projekt im Mittelpunkt.

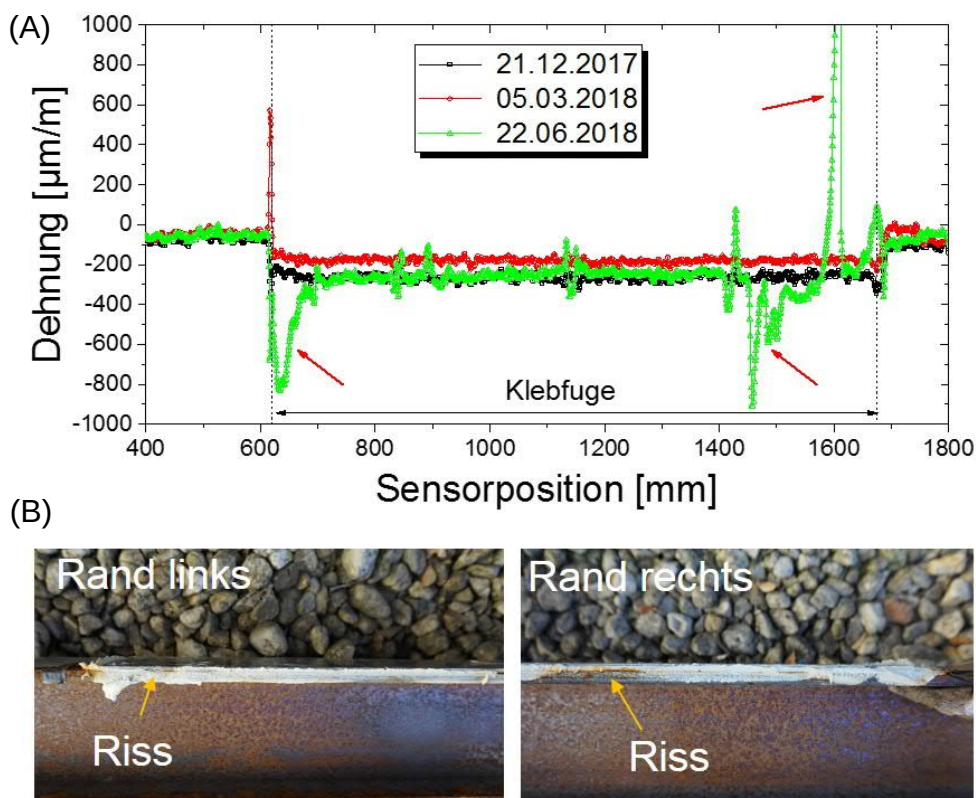


Abbildung 36: (A) Vergleich der Dehnungsverteilung in der Klebfuge gemessen mit OFDR zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei vergleichbaren Umgebungstemperaturen und (B) Foto des Trägers von der Seite zur Darstellung der Schädigungen am Rand der Klebverbindung

4.6.3. CFK-verstärkte Quadratprofile

Als weitere Bauteile wurden Quadratprofile mit aufgeklebten CFK-Lamellen untersucht. FBG-Sensoren und verteilt-messende Sensorfasern wurden bei der Applikation der CFK-Lamelle mit Klebstoff stahlseitig in die Klebfuge integriert. Die Klebungen erfolgten mit Klebstoff 1 und Klebstoff 2. Die Geometrie der Bauteile ist in 3.1.2 erläutert und in Abbildung 5B dargestellt. Zusätzlich wurde ein Bauteildemonstrator gezielt mit Fehlstellen hergestellt und untersucht. Die CFK-verstärkten Quadratprofile wurden in 4-Punkt-Biegung zyklisch belastet. Die zyklische Kraftaufbringung als Funktion des Weges ist für die CFK-verstärkten Quadratprofile in Abbildung 37A und B dargestellt. Die Kraft-Weg-Kurven sind nur bei geringen Belastungen

linear. Bei Belastungen ab 150 kN stellt sich ein signifikanter Hysterese-Effekt mit bleibenden Verformungen ein. Die mit FBG-Sensoren gemessenen Dehnungen während der Belastung in Abbildung 37C und D zeigen eine Zunahme der Dehnungen mit steigender Last. Die Dehnungen in der Mitte der Verbindungen sind auf Grund der Biegebelastung höher als im Randbereich. Beide Klebstoffe zeigen ein vergleichbares Dehnungsverhalten mit einem leichten Hysterese-Effekt in der stark beanspruchten Mitte des Bauteils und bleibenden Dehnungen oberhalb von 180 kN Belastung.

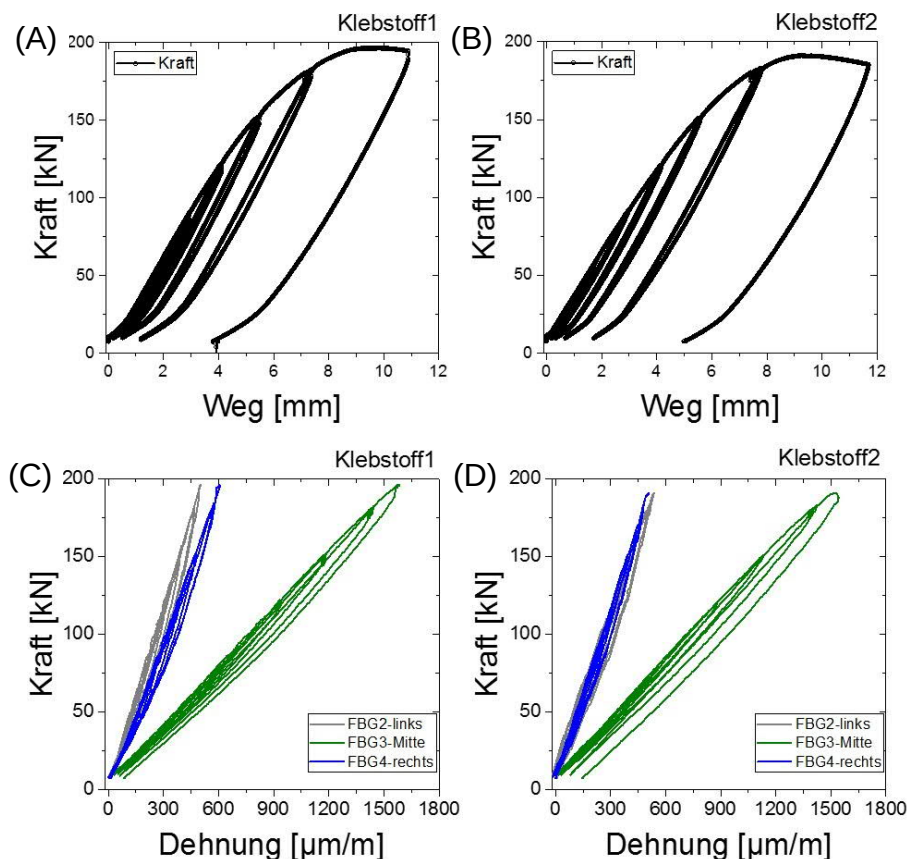


Abbildung 37: Verformungsverhalten der CFK-verstärkten Quadratprofile mit integrierten Fasersensoren: Kraft-Weg-Diagramme für das Bauteil mit (A) Klebstoff 1 und (B) Klebstoff 2 sowie Kraft-Dehnungs-Kurven mit lokalen Dehnungen aus dem Klebfugenrand und Mitte für (C) Klebstoff 1 und (D) Klebstoff 2

Eine Detailanalyse über die gesamte Breite der Klebfuge ermöglichen OFDR-Messungen. Hier zeigten sich adäquat zu den FBG-Messungen keine großen Unterschiede zwischen den Klebstoffen. Exemplarisch sind in Abbildung 38 die Dehnungsdaten für das mit Klebstoff 1 gefügte Bauteil dargestellt. Die farbliche Darstellung der Dehnungen als Funktion der Sensorposition und der Versuchszeit in Abbildung 38 gibt einen Gesamtüberblick über die während des Versuchs auftretenden Dehnungen. Für eine Detailanalyse können Dehnungen als Funktion der Sensorposition bei definierten Zeiten (bzw. Kräften) und Dehnungen als Funktion der Versuchszeit an definierten Sensorpositionen ausgewertet werden. Aus dem farblichen Diagramm wurden vertikale (Abbildung 38 rechts) und horizontale Schnitte (Abbildung 38 oben) erstellt, die entweder die zeitabhängigen Dehnungen an einer definierten Sensorposition oder die ortsabhängigen Dehnungen bei einer definierten Belastung darstellen.

Die Schnitte sind der Übersicht halber in der farblichen Darstellung eingezeichnet. Die Dehnungen folgen dem zyklischen Kraftverlauf, wohingegen geringere Dehnung im Randbereich der Klebung auftreten als im mittleren Bereich mit konstantem Biegemoment. Interessanterweise ändert sich das Dehnungsverhalten oberhalb von 180 kN. Der Dehnungsverlauf im mittlern Bereich ist nicht mehr konstant und es treten Dehnungsmaxima auf. Die Positionen der Maxima entsprechen den oberen Auflagern zur Krafteinleitung. Bei einer Belastung mit einer Kraft von 180 kN finden lokal im Bereich der Krafteinleitung starke Deformationen mit bleibenden Verformungen (Beulen) im Quadratprofil statt. Die lokal höheren Verformungen resultieren auch in einer Erhöhung der Dehnungen in der Klebfuge, ersichtlich an den lokalen Dehnungsmaxima bei 180 kN und 195 kN in Abbildung 38 oben. Vergleichbare Ergebnisse werden auch mit Klebstoffsystem 2 erzielt. Bei beiden Systemen findet keine Delamination der CFK-Lamelle statt.

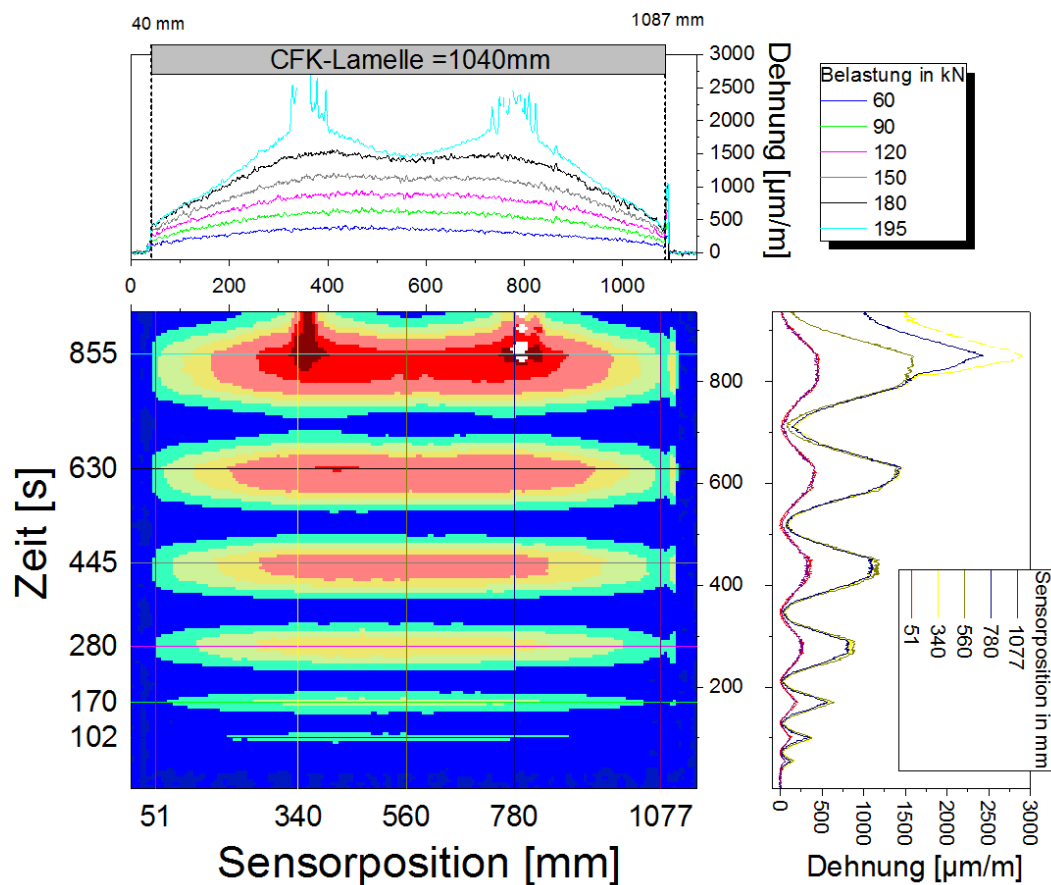


Abbildung 38: Darstellung der zeit- und orts aufgelösten Dehnungswerte für CFK-verstärkte Quadratprofile mit Klebstoff1 (farbliche Darstellung: Dehnung in Faserrichtung blau: 0 $\mu\text{m/m}$; dunkelrot: >2000 $\mu\text{m/m}$ und Profildaten – Erklärung siehe Text)

Ergebnisse der numerischen Simulation am CFK-verstärkten Quadratprofil - Vergleich mit den Sensordaten

Vergleichbar zu den Untersuchungen am HEA-Profilträger wurden auch für die Quadratprofile FE-Simulationen durchgeführt. Die Berechnung beschränkt sich im Projektrahmen auf ein linear-elastisches Materialmodell für den Klebstoff. Aus den folgenden Ergebnissen ist ersichtlich, dass bei höherem Lasteintrag auf erweiterte Materialmodelle mit Beschreibung der Plastizität und / oder Schädigung zurückgegriffen werden sollte. Aus der numerischen

Simulation wurden die Normaldehnungen in Faserrichtung in der Mittellinie der verteiltemessenden Faser herangezogen, um diese mit den gemessenen Dehnungen abzugleichen. Abbildung 39A zeigt die Gesamtverformung (leicht überhöht dargestellt) des Simulationsmodells des Quadratrohrprofils mit applizierter CFK-Lamelle bei einer 4-Punkt-Biegebelastung von 195 kN.

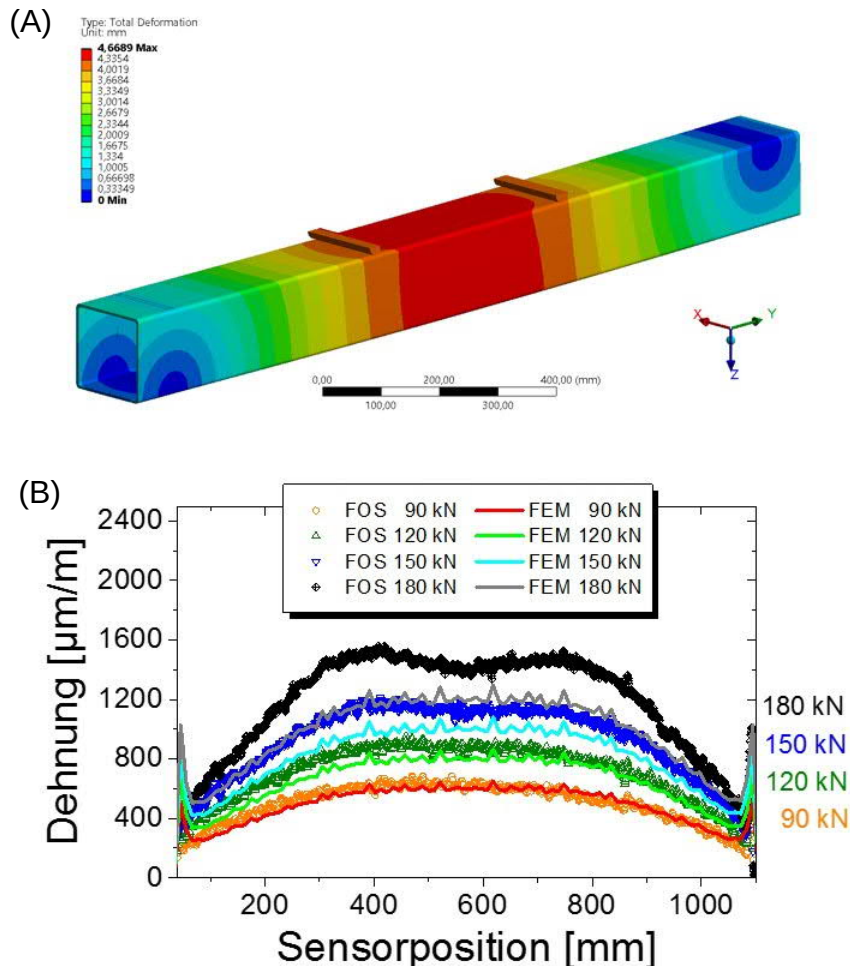


Abbildung 39: (A) Darstellung der Gesamtverformung bei Laststufe 195 kN am numerischen Modell des CFK-verstärkten Quadratprofils und (B) Vergleich der experimentellen mit den berechneten Dehnungen (Dehnungen als Funktion der Sensorposition dargestellt.)

Der Vergleich zwischen den FE-berechneten Dehnungen und experimentell mit faseroptischen Sensoren gemessenen Dehnungen als Funktion der Sensorposition in Abbildung 39B verdeutlicht, dass die Dehnungen bei geringen Lasten bis ca. 100 kN mit einer Abweichung von <7 % gut übereinstimmen. Der mit FOS-gemessene Dehnungsverlauf wird mit den Simulationen bestätigt. Bei Lasten größer als 100 kN liegen die Abweichungen zwischen der Messung und Simulation oberhalb von 7,0 %. Der Dehnungsverlauf ist aber vergleichbar. Die errechneten Dehnungen sind bedeutend geringer als die gemessenen Dehnungen. Die Simulationen bilden das System steifer ab. Die Ursache für die höheren Dehnungen bei der Messungen ist vorwiegend auf die hohen Verformungen im Quadratprofil an den Krafteinleitungsstellen zurückzuführen, die gleichzeitig in höheren Verformungen des Gesamtsystems resultieren. Die äußert sich auch in höheren Dehnungen in der Verbindung.

Der Einfluss der lokal hohen Verformungen an den Krafteinleitungsstellen wird auch an den lokalen Dehnungsmaxima in der Klebfuge bei 180 kN deutlich. Bleibende Dehnungen und Verformungen deuten auf hohe lokale plastische Deformationen des Stahls hin. Das Simulationsmodell beinhaltet keine Stabilitätsanalyse, somit sind keine Imperfektionen vorhanden und das Modellverhalten ist ideal. Tendenziell wird der Dehnungsverlauf in der Klebfuge bei geringen Lasten abgebildet. In weiteren Untersuchungen ist ein plastisches Materialmodell für den Stahl zu verwenden und Imperfektionen einzupflegen. Die CFK-Lamellen sind in der Untersuchungen bis zu Kräften von 200 kN nicht delaminiert. Der Versuch wurde aufgrund der starken plastischen Verformungen im Bereich der Krafteinleitung (Beulen) abgebrochen.

Dehnungsmessungen am CFK-verstärkten Quadratprofil mit eingebrachten Fehlstellen

Die Dehnungsmessungen an dem mit Fehlstellen präparierten CFK-verstärkten Quadratprofil unterscheiden sich deutlich von den beiden anderen Systemen ohne künstliche Fehlstellen. Die Übersicht über die zeit- und orts aufgelösten Dehnungen sind in Abbildung 40 dargestellt. Bereits oberhalb einer Belastung von 90 kN bleiben im System plastische Restdehnungen, was ganz deutlich in der Auftragung der Dehnung als Funktion der Zeit in der Mitte der Verbindung deutlich wird (Sensorposition 543 mm, Abbildung 40 rechts).

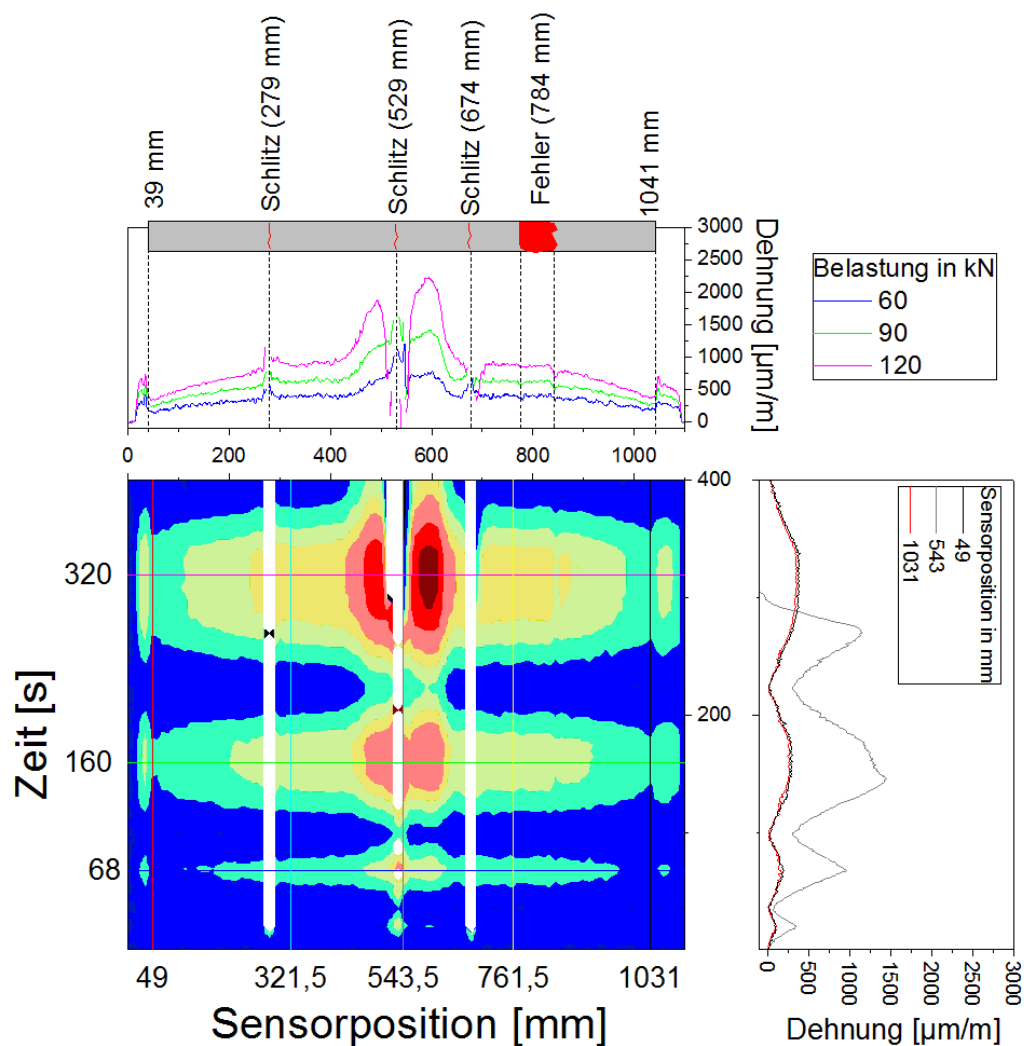


Abbildung 40: Darstellung der zeit- und orts aufgelösten Dehnungswerte für das CFK-verstärkte Quadratprofil Klebstoff2 (farbliche Darstellung: Dehnung in Faserrichtung blau: 0 $\mu\text{m}/\text{m}$; dunkelrot: $>2000 \mu\text{m}/\text{m}$)

Bei Entlastung nach einer Kraft von 90 kN bleiben Restdehnungen im System von ca. 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ in Probenmitte (Sensorposition 543 mm). Auf Grund der Fehlstellen gibt es zudem keinen konstanten Dehnungsverlauf im mittleren Bereich trotz 4-Punkt-Biegung.

Die Risse im Quadratprofil werden bis 90 kN durch eine Dehnungserhöhung ersichtlich. Hier zeigt sich aber, dass genau an der Stelle der Risse keine Dehnungen mit OFDR (weiße Bereich im Farbdigramm) gemessen werden können. Über die Dehnungserhöhung im Bereich der Risse kann aber auf die Fehlstellen geschlossen werden. Nach Aussage des Geräteherstellers kann der im Messsystem implementierte Auswertalgorithmus bei sehr starken Dehnungssprüngen keine Werte ermitteln. Dehnungssprünge treten unter anderem bei Fehlstellen oder anderen Inhomogenitäten auf, so dass bei zu großen Dehnungssprüngen keine Dehnungswerte erfasst werden können.

Die Fehlstelle in der Klebung ist in diesem Versuch auf Grund der Belastungssituation schwierig zu detektieren. Das Versagen erfolgt durch Delamination der CFK-Lamelle ausgehend von der Probenmitte.

Die Messungen an den CFK-verstärkten Quadratprofilen und CFK-verstärkten Profilträgern als Bauteildemonstratoren verdeutlichen, dass faseroptische Sensoren sehr gut für die Gewinnung von Detailinformationen aus der Klebfuge genutzt werden können. Es können quantitativ Dehnungen und Dehnungsänderungen in Faserrichtung im Bereich der Sensorfasern erfasst werden. Dies ermöglicht eine dehnungsbasierte Optimierung der Klebfuge von Stahl-CFK-Klebverbindungen. Mit Kenntnissen zum Verformungsverhalten der CFK-verstärkten Struktur können zudem Versagenskriterien für die Zustandserfassung festgelegt werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es gibt deutschlandweit einen steigenden Sanierungsbedarf zur Erhaltung und Verlängerung der Nutzungsdauer von geschweißten Stahlkonstruktionen. Dies betrifft unter anderem Brückenbauwerke aber auch Konstruktionen des Maschinenbaus wie beispielsweise Krane und andere technische Anlagen. Ein Ansatz zur schonenden Sanierung von Stahlkonstruktionen ist die klebtechnische Applikation von Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Die Verstärkung von Stahlstrukturen mit geklebten CFK-Lamellen hat sich auf Grund fehlender Bemessungs- und Nachweisverfahren in der Praxis noch nicht etabliert. Die Klebfuge ist auf Grund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung der Fügepartner und möglicher Alterung der Klebstoffe die stark belastete Zone und somit oftmals eine Schwachstelle. Bislang fehlen hier zerstörungsfreie Monitoring- und Analyseverfahren auf Basis integrierter Sensorik, um die Akzeptanz von Stahl-CFK-Klebverbindungen zu steigern und neue Erkenntnisse zur Lebensdauer der geklebten Stahl-CFK-Verbindung zu generieren. In die Klebverbindung integrierte Sensoren, die auf die Verbindungseigenschaften keinen oder nur sehr geringen Einfluss haben, können hier helfen neue Detailkenntnisse zu den Verbundeigenschaften insbesondere zu den Klebfugeneigenschaften zu erlangen.

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung der Möglichkeiten des Einsatzes von faseroptischen Sensoren für die Detailanalyse der Klebung und die Zustandserfassung von geklebten Stahl-CFK-Verbindungen. Faseroptische Sensoren sind sehr dünne Lichtwellenleiter, bei denen über die Auswertung einer optischen Messgrößen Temperaturen und Dehnungen gemessen werden können. Im Vorhaben wurden die Möglichkeiten der Integration und der Zustandserfassung in geklebten Stahl-CFK-Verbindungen mittels Faser-Bragg-Gitter-(FBG)-Sensoren und verteilt-messenden Sensorfasern, bei denen Dehnungen über die Messung der Änderung des Rayleighrückstreusignals über Frequenzbereichsreflektometrie bestimmt wird, erforscht. Diesbezüglich wurden mit drei unterschiedlichen Klebstoffsystemen Stahl-CFK-Verbindungen mit integrierten Sensoren hergestellt und in verschiedenen Belastungsversuchen die Sensorsignale analysiert. Folgende Belastungsszenarien wurden bei den Laborprobekörpern gewählt:

- quasi-statische, zyklische Zugversuche an Stahl-CFK-Klebverbindungen
- thermo-hygrische Belastung der Stahl-CFK-Klebverbindungen durch Klimalagerung
- Stahl-CFK-Klebverbindungen unter schwingender Belastung im LCF-Bereich

Parallel zur Belastung wurden mit den faseroptischen Sensoren die Lichtsignale erfasst, systematisch ausgewertet, analysiert und mit unterschiedlichen Methoden validiert.

Die Einbettungscharakteristika sowie die Versagensmechanismen wurden an Originalproben sowie an versagten Probekörpern mit Röntgen-Computertomografie, Lichtmikroskopie und mit Puls-Phasen-Thermografie beurteilt.

Um die Praxistauglichkeit sicherzustellen, wurden im Weiteren die faseroptischen Messmöglichkeiten an Bauteildemonstratoren wie Profilträgern und Quadratprofilen mit aufgeklebten CFK-Lamellen untersucht und bewertet. Die Belastung der Bauteildemonstratoren erfolgte unter Biegung. Parallel wurden Sensordaten aufgezeichnet und analysiert. Die Validierung der faseroptischen Sensordaten erfolgte mit Kraft- und Wegdaten der Prüfmaschinen sowie mit elektrischen Dehnungsmesstreifen, der digitalen Bildkorrelation sowie der numerischen Simulation mit der FEM. Im Rahmen eines einfachen Feldtestes wurde ein Profilträger mit aufgeklebter CFK-Lamelle und integrierter Sensorik über 7 Monate im Freien gelagert und kontinuierlich Sensordaten aus dem Inneren der Verbindung erfasst.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten hat sich gezeigt, dass faseroptische Sensoren in Klebfugen von Stahl-CFK-Verbindungen und den Bauteildemonstratoren während der Herstellung integriert werden können. Die Sensorfasern waren nach der Einbettung intakt, müssen aber beim Austritt aus der Klebfuge mit Schrumpfschläuchen oder ähnlichem geschützt werden. Einfache Applikationstechniken ermöglichten eine vollständige Einbettung für die untersuchten Klebstoffe sowie die Lokalisation der Sensorfasern im Bereich der Stahloberfläche. Die Lage der Sensorfasern in der Klebfuge variierte geringfügig und kann in einer Streuung der Sensordaten resultieren. Für hoch-genaue Messungen könnte die Positionierung zukünftig mit der Entwicklung von Applikationstechniken optimiert werden.

In den Untersuchungen an Laborprobekörpern konnten generell unter den jeweiligen Belastung mit den in der Klebfuge integrierten faseroptischen Sensoren Dehnungen und Dehnungsänderungen in Faserrichtung zeit- und ortsabhängig ermittelt werden. FBG-Sensoren erlauben hierbei die zuverlässige Ermittlung von Dehnungen an vorher festgelegten Messstellen, wohingegen mit der Frequenzbereichsreflektometrie Dehnungen über die gesamte optische Glasfasern mit einer hohen Ortsauflösung von ca. 0,65 mm ermittelt werden konnten. Auf Grund auftretender starker Dehnungsspitzen in den Klebfugen wurden über die Frequenzbereichsreflektometrie nicht immer zuverlässig Dehnungen erfasst. Die Kombination aus FBG-Sensoren und optischen Reflektometern könnte hier eine Verbesserung erbringen.

Die faseroptische Dehnungsmessung während der quasi-statischen Zugversuche an Stahl-CFK-Klebsverbindungen macht deutlich, dass die faseroptischen Dehnungswerte sehr gut mit den Dehnungen der elektrischen Dehnungsmessstreifen sowie mit der über die FEM-berechneten Dehnungswerten bei geringen Lasten übereinstimmen. Geringfügige Unterschiede in den Dehnungen konnten auf die Positionierung der Messstellen zurückgeführt werden. Bei höheren Lasten wurde eine Dehnungsreduzierung (gemessen mit FBG-Sensoren und verteilt-messenden Sensoren) am Rand der Klebsverbindung auf eine lokale Delamination der CFK-Lamelle zurückgeführt. Die Delamination trat bei allen untersuchten Klebstoffsystemen in den Zugversuchen auf. Der Zeitpunkt der lokalen Delamination der CFK-Lamellen am Rand der Verbindung konnte mit faseroptischen Sensoren erfasst werden und war stark vom eingesetzten Klebstoff abhängig. Über verteilt-messende Sensoren kann die Delaminationskinetik bestimmt werden.

In den Klimagerungen mit Temperaturänderungen von -20 °C bis 80 °C konnten die durch die Temperaturen induzierten Dehnungsänderungen (Temperaturdehnungen) in den Verbindungen in-situ mit FBG-Sensoren ermittelt werden. Ortsaufgelöste Dehnungsdaten der verteilt-messenden Sensorfasern offerierten zudem eine lokale Vorschädigung (starke Dehnungsänderung) einer Verbindung bei Kombination von Temperatur und Feuchte in den Klimagerungen. Die Schädigung der Verbindungen wurde durch einen vorzeitigen Kraftabfall in den Kraft-Weg-Kurven in quasi-statischen Zugversuchen nach der Lagerung bestätigt.

Auch während der zyklischen Schwingversuche an den Stahl-CFK-Verbindungen konnten Dehnungen mit faseroptischen Sensoren gemessen werden. Das sinusförmige Belastungsregime wird durch die Sensormessungen bestätigt. Wichtig ist, dass die Sensorfasern sowie die Grenzfläche zur Kraftübertragung zwischen Klebstoff und Sensor intakt bleiben. Die Untersuchungen mit Lichtmikroskopie an Schnitten der versagten Probekörper offerieren, dass die Sensorfaser und die Grenzfläche während der schwingenden Belastung intakt bleiben. Weitere Untersuchungen zu dem Ermüdungsverhalten sowie Schwingversuche bei hoher Zyklenanzahl sind hier notwendig, um ein fundiertes Verständnis zu Sensor-Klebstoff-Wechselwirkung zu schaffen.

Die Untersuchungen an Laborprobekörpern werden durch die Bauteilversuche am Profilträger und den Quadratprofilen mit aufgeklebten CFK-Lamellen bestätigt. Mit FBG-Sensoren und verteilt-messenden Sensorfasern mit OFDR können auch in der Klebfuge der Bauteile Dehnungen in Faserrichtung unter Belastung ermittelt werden. Die mit den Fasersensoren experimentell ermittelten Dehnungen konnten am Profilträger mit auf der CFK-Lamelle applizierten Dehnungsmesstreifen sowie FEM-Untersuchungen bei geringen Belastungen bestätigt werden. Bei höheren Belastungen erfolgte eine Delamination der Lamelle, so dass die vereinfachte FEM-Analyse den Dehnungszustand nicht mehr abbilden kann. Unter Nutzung von Kohäsivzonenmodellen, welche die Ablösung der CFK-Lamelle im Modell beschreiben, konnten bessere Simulationsergebnisse mit Dehnungen vergleichbar zu den faseroptischen Messungen erzielt werden. Die mit faseroptischen Sensoren gemessene zeitliche Änderung der Delamination der CFK-Lamelle mit steigender Belastung wurde mit elektrischen Dehnungsmesstreifen sowie mit Puls-Phasen-Thermographie nach dem Belastungsversuch verifiziert. Auch hier kann die Kinetik der Delamination mit faseroptischen Sensoren erfasst werden.

In den Untersuchungen an den Quadratprofilen mit aufgeklebten CFK-Lamellen konnten auch während des gesamten Versuchs Dehnungen orts aufgelöst gemessen werden. Unterschiede zwischen den eingesetzten Klebstoffsystemen wurden nicht festgestellt. Neben der orts aufgelösten Dehnungsmessung in der Klebfuge zwischen Stahl und CFK konnten auch lokale Ereignisse wie das Beulen der Profile in den Lasteinleitungsstellen sowie Dehnungserhöhungen durch künstlich eingebrachte Fehlstellen mit in der Klebfuge integrierten Sensoren erfasst werden. Ein einfacher Feldtest an einem im Freien gelagerten Träger über einen Zeitraum von 7 Monaten zeigte zudem, dass über beide Sensorverfahren Messdaten aufgezeichnet werden konnten.

Die Ergebnisse verdeutlichen die vielfältigen Möglichkeiten der faseroptischen Messtechnik zur Detailanalyse der hier untersuchten Stahl-CFK-Klebverbindungen. Die Entscheidung zur Auswahl einer faseroptischen Messtechnik sollte anhand der Messaufgabe, Realisierbarkeit und Kosten erfolgen. Beide Messmethoden haben abhängig von der Messaufgabe Vor- und Nachteile. FBG-Sensoren und die OFDR-Messtechnik haben an den untersuchten Proben und Bauteilen im Vorhaben vergleichbare Ergebnisse erbracht, wohingegen die Datenstreuung mit Höchstwerten von ca. 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ bei den OFDR-Messungen höher war als bei FBG-Messungen mit Streuungen um die 10 $\mu\text{m}/\text{m}$. Die Messtechnik der FBG-Sensoren ist robust, seit vielen Jahren etabliert und einfach in der Handhabung. Zuleitungskabel von mehreren Kilometern sind möglich. Es zeigte sich, dass mit FBG-Sensoren abhängig von der Art des Bragg-Gitters und eingesetzter Messtechnik höhere Dehnungen von bis zu 3 % als mit OFDR-Messtechnik (ca. 1,5 %) gemessen werden können. Der Einsatz von FBG-Sensoren erfordert aber die gezielte Auslegung der FBG-Messstellen und Design der Sensornetzwerke abgestimmt auf die Anwendung. Die OFDR-Messtechnik ermöglicht hingegen die orts aufgelöste Dehnungsmessung über Messbereiche von einigen Metern. Daraus resultiert ein höherer Informationsgewinn, da somit auch lokale Ereignisse über die gesamte Klebfuge erfasst werden können. Verteilt-messende Sensoren erleichtern zudem die Applizierung im Bauteil verglichen mit FBG-Sensoren, bei denen kritische Stellen vor der Einbringung bekannt sein sollten. Der hohe Informationsgewinn erfordert aber den Umgang und die Auswertung großer Datenmengen. Die eigentliche OFDR-Messtechnik basierend auf einem durchstimmbaren Laser ist sensibler gegen äußere Einflüsse als die FBG-Messtechnik. Beide Sensorverfahren bieten aber für die Analyse und Zustandserfassung von den hier untersuchten strukturellen Klebverbindungen einen hohen Informationsgewinn. Mit der Fasersensorik konnten bei den

untersuchten Stahl-CFK-Klebverbindungen tatsächliche Dehnungszustände und eine Schädigung des Verbundes (Delamination) orts aufgelöst und in Echtzeit detektiert werden. Mit dem Detailverständnis zum Verformungs- und Schädigungsverhalten der Klebfuge können diese Verbindungssysteme somit effektiv optimiert werden. Hierbei ist aber zu beachten, dass für valide Sensordaten eine gute Haftung zwischen Sensorfasern und Klebstoff vorhanden sein muss, so dass die Dehnungen (bzw. Kräfte) aus der Klebfuge auf die Sensorfasern übertragen werden. Dies war für die untersuchten Systeme hier gegeben. In weiteren Forschungsprojekten muss aber die Dauerhaftigkeit der Grenzfläche zwischen Sensorfasern und Klebstoffen unter komplexen Belastungssituationen (dynamische Lasten, Temperaturen und Feuchte) untersucht werden. Für den Transfer der faseroptischen Messmethodik auf andere Klebstoffsysteme und Anwendungen müssen vorab tiefgreifende Untersuchungen zur Eignung und Anwendbarkeit erfolgen.

Der Einsatz der faseroptischen Messtechnik als Monitoring-System könnte es zudem ermöglichen kritische Zustände von Klebverbindungen zu erkennen sowie die Traglastgrenzen abzuschätzen. Vorkenntnissen zum mechanischen Verhalten der Bauteile bzw. Strukturen sind hierbei aber erforderlich. Für ein industrietaugliches Monitoring von CFK-Verstärkungsmaßnahmen muss zusätzlich ein Monitoringkonzept und ein Nutzer orientiertes „Decision Supporting System“ entwickelt werden. Für die Zustandserfassung von Klebverbindungen mit dünneren Klebschichten werden in Zukunft dünnere Sensorfasern und auf die Anwendung abgestimmte Applikationstechnologien benötigt. In der Entwicklung befindliche faseroptische Messtechniken sowie neue Sensorfasern lassen in den nächsten Jahren einen weiteren Innovationsprung erwarten.

Quellenverzeichnis

- 1 VDI Nachrichten, „Krankenakte einer Brücke, Nr. 39/40 September 2014.
- 2 Curbach, M., Scheerer, S., Carbon im Brückenbau, S. 109; in VDI-Fachbereich Bautechnik in der VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik Verein Deutscher Ingenieure e.V., Jahresausgabe VDI-Bautechnik 2014 / 2015 der Fachzeitschrift Bauingenieur. Springer-VDI Verlag GmbH & Co. KG.
- 3 Bartholome, S., Götz, F., Ummenhofer, T. Geßler, A., Feldmann, M.: Zum Kleben von CFK-Lamellen im Stahlbau; TU Stahlbau-Symposium 2014, 2014, Cottbus; 83.
- 4 Z-36.12-67, Verstärken von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch in Schlitzschubfest mit "StoPox SK 41" eingeklebte "Sto S&P CFK Lamelle".
- 5 Z-36.12-70, Verstärkung von Stahlbetonbauteilen durch mit dem Baukleber "StoPox SK 41" schubfest aufgeklebte Kohlenfaserlamellen "Sto S&P CFK Lamellen" nach DIN 1045-1:2008-08.
- 6 Z-36.12-76, Verstärken von Stahlbetonbauteilen durch in Schlitz verklebte "Sto S&P CFK Lamellen".
- 7 Z-36.12-79, Verstärken von Stahlbetonbauteilen durch in Schlitz verklebte MC-Dur CFK-Lamellen nach DIN 1045-1:2008-08.
- 8 Pasternak, H., Ciupack, Y., Bartholomé, S., Feldmann, M., Richter, C., Geßler, U. J., Ummenhofer, T., Götz, F., Ruff, D.: Systematische Untersuchungen zur Verstärkung von Stahlkonstruktionen mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK), - STAKOK, Düsseldorf / DVS (2015), Berichtsnummer: IGF-Vorhaben 17700 BG.
- 9 Einsatz von geklebten Kohlestoff-Faserverbundwerkstoffen zur Sanierung ermüdungsgeschädigter Stahlkonstruktionen AiF-Projekt der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS , IGF-Nr. 19032 BG.
- 10 Colombi, P., Poggi, C.: An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips, Composites: Part B, 37, (2006), 64.
- 11 Colombi, P., Poggi, C.: Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates, Construction and Building Materials, 20, (2006), 22.
- 12 Othonos, A., Kalli, K., Fiber Bragg Grating sensors and Applications in Telecommunications and Sensing, Artech House Print, 1999.
- 13 Peters, K., Chapter 61, S. 1103 „Fibre Bragg Gratings Sensors“ in C. Boller, C., Chang, F.-K., Fujino, Y.: "Encyclopedia of Structural Health Monitoring", 2, (2009), Wiley & Sons.
- 14 Zhou, Z., Graver, T.W., Hsu, L., Ou, J.; Pacific Science Review, 5, (2003), 116.

-
- 15 Bosia, F., Botsis, J., Facchini, M., Giaccari, P.: Deformation characteristics of composite laminates—part I: speckle interferometry and embedded Bragg grating sensor measurements, *Composites Science and Technology*, 62, (2002), 41.
 - 16 Lee, J-R., Tsuda, H., Koo, B-Y.: Single-mode fibre optic Bragg grating sensing on the base of birefringence in surface-mounting and embedding applications, *Optics & Laser Technology*, 39, (2007), 157.
 - 17 Saruta, K. Kobayashi, T.: Multi-point strain measurement using FBG-OTDR optical fibre sensor, 10th International Conference on Non Destructive Evaluation in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Cannes (France), 2013.
 - 18 Samiec, D.; *Photonik*, 6, 2011, 34.
 - 19 Frieling, G., Walther, F.: Tensile and Fatigue Properties of Fiber-Bragg-Grating (FBG) Sensors, *Sensors & Transducers*, 154, 7, (2013), 143.
 - 20 Davis, C., Tejedor, S., Grabovac, I., Kopczyk, J., Nuyens, T.: Fatigue Testing of Military Aircraft, *Photonic Sensors* 2, 3, (2012) 215.
 - 21 Voet, E., Ahmed, T., Lindner, E., Luyckx, G., Brødsjø, A., Degrieck, J.: Smaller diameter optical fibre sensor for automated embedding in composite laminates, 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2014, Nantes.
 - 22 Park, C., Peters, K. ; *Meas. Sci. Technol.*, 23, (2012), 025105.

Danksagung

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative ZukunftBau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumplanung gefördert. (Aktenzeichen: SWD 10.08.18.7-16.24).

Wir danken für die Förderung.

Dank gilt den unterstützenden Industriepartnern insbesondere:

- AOS GmbH
- FBGS Technologies GmbH
- Polytec GmbH
- Rudolstädter Systembau GmbH
- SIKA Technology AG
- S&P Clever Reinforcement GmbH

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen bedanken wir und bei den Mitarbeitern der Versuchstechnischen Einrichtung der Bauhaus-Universität Weimar sowie Mitarbeitern der Materialforschungs- und -prüfanstalt Weimar.

Wir danken Christoph Hartmann, Johannes Barnickel, Justus Käßlinger und Rafael Reimann für die Unterstützung bei den Untersuchungen.

Herr Dr. Michael Brüggemann vom Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau bedanken wir für die Projektbetreuung.