

Interner Bericht

DLR-IB-SY-BS-2024-8

**Experimentelle
Untersuchungen von sensierten
zähmodifizierten
Klebverbindungen mittels
faseroptischer Messtechnik
(FOSS) bei
Faserverbundwerkstoffen**

Studienarbeit

Lennart Rosenbrock

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Systemleichtbau



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Dokumenteigenschaften

Titel	Experimentelle Untersuchungen von sensierten zähmodifizierten Klebverbindungen mittels faseroptischer Messtechnik (FOSS) bei Faserverbundwerkstoffen
Betreff	Studienarbeit
Institut	Systemleichtbau
Erstellt von	Lennart Rosenbrock
Beteiligte	Martin Johannes Schollerer
Geprüft von	Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne
Freigabe von	Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne
Zugänglichkeit	☒ Stufe 1: Allgemein zugänglich (in elib ohne Zugangsbeschränkung)
	☐ Stufe 2: DLR intern zugänglich (in elib mit Beschränkung „nur DLR-intern zugänglich“)
Datum	11.01.2024
Version	1.0
Datei Info	IB_2024_8_SA_Rosenbrock.pdf

Experimentelle Untersuchungen von sensierten zähmodifizierten Klebverbindungen mittels faser- optischer Messtechnik (FOSS) bei Faserverbundwerkstoffen

Studienarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser: Lennart Rosenbrock

im Studiengang: Luft- und Raumfahrttechnik

Matr.-Nr.: 5373538

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne (TU Braunschweig - IMA)

Betreuer:

M.Sc. Julian Steinmetz (TU Braunschweig - IMA)

Betreuer:

M.Sc. Martin Schollerer (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

Bearbeitungszeitraum: 3 Monate Abgabedatum am: 11.01.2024

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Studienarbeit mit dem Titel „Experimentelle Untersuchungen von sensierten zähmodifizierten Klebverbindungen mittels faseroptischer Messtechnik (FOSS) bei Faserverbundwerkstoffen“ selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe bearbeitet habe und dass ich die Arbeit noch nicht für diese oder eine andere Prüfung eingereicht habe. Alle benutzten Quellen und Hilfsmittel habe ich im Sinne der guten wissenschaftlichen Praxis vollständig angegeben.

Mir ist bekannt, dass Täuschungsversuche -insbesondere nachgewiesene Plagiate sowie unvollständige Quellen- und Hilfsmittelangaben -nach §11, Abs. 4 der Allgemeinen Prüfungsordnung zum endgültigen Nichtbestehen einer Prüfung und somit zum Scheitern im Studiengang führen können.



Lennart Rosenbrock

Braunschweig, den 10. Januar 2024

Aufgabenstellung

Studienarbeit

für

Herrn B.Sc. Lennart Rosenbrock

Matr.-Nr.: 5373538

Thema:

Experimentelle Untersuchungen von sensierten zähmodifizierten Klebverbindungen mittels faseroptischer Messtechnik (FOSS) bei Faserverbundwerkstoffen

Experimental investigations of sensed and toughened bonded joints using fiber optic sensor system (FOSS) in fiber reinforced composites.

Übersicht:

In der heutigen Zeit spielt das Kleben als Verbindungstechnik eine große Rolle. Durch die homogene Lastübertragung, gute Dichtungseffekte und den großen automatisierbaren und leichtbauspezifischen Einsatzbereich, im Vergleich zu Bolzenverbindungen, ermöglicht diese Technologie viel Potential. Dennoch besitzt diese Technologie Grenzen im Bereich der Ermüdung und bringt Schwierigkeiten bei der Auslegung mit sich. Diese gilt es weiter zu erforschen.

Im Rahmen der Entwicklung von neuartigen Rissstoppkonzepten mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation in Faserverbundstrukturen wird neben dem rissstoppenden Effekt auch die Möglichkeit der Rissdetektion erforscht und entwickelt. Das Institut für Systemleichtbau des DLR e.V. nutzt hierfür ein faseroptisches System, welches bisher nur zur Dehnungsmessung in FKV Laminaten genutzt wird. Kern einer Rissdetektion im Klebstoff ist hingegen die Kenntnis über die Spannungen in der Klebschicht, welche äquivalent dazu als Dehnungen gemessen werden sollen. Durch diese Arbeit sollen Einblicke in die Dehnungs- und Spannungsverteilung von Klebverbindungen erzielt werden, wodurch die Identifikation von Rissen bzw. ein Risswachstum abgeleitet werden kann.

Aufgabenstellung:

Ziel der Arbeit ist die Untersuchung von strukturellen Klebverbindungen mittels faseroptischen Messsystem (FOSS). Verwendet werden sollen dabei Referenzproben und welche mit lokaler Oberflächenzähmodifikation für den Rissstopp. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei in der experimentellen Erstellung von Probekörpern und der Auswertung von Versuchen mittels FOSS und dem Vergleich zur bisher genutzten hochauflösenden optischen Messtechnik (HiRes DIC).

Die Arbeit umfasst folgende Schritte:

- Einarbeitung in die Grundlagen der Spannungsanalytik von Überlappungsklebungen
- Einarbeitung in die Labor- und Fertigungstechniken, Fertigung von Prepregaufbauten, Fertigung von Couponproben
- Erstellen und Umsetzen eines Probenprogramms zur sensierten Klebung mittels FOSS
- Durchführung und Auswertung von div. Zugscherprüfungen
- Auswertung und Interpretation der Messergebnisse
- Schriftlicher Bericht

Bearbeitungszeit: 3 Monate

Die Arbeit muss im TU Connect-Portal hochgeladen und in zweifach gebundener und einer elektronischen Form im Geschäftszimmer des Instituts für Mechanik und Adaptronik abgegeben werden. Ausnahmen sind in der Prüfungsordnung dokumentiert.

Betreuer am Institut für Mechanik und Adaptronik:
M.Sc. Julian Steinmetz

Betreuer am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR):
M.Sc. Martin Schollerer

Die Bearbeitung der Studienarbeit erfolgt am Institut für Mechanik und Adaptronik der TU Braunschweig. Für Planung, Berechnung, Fertigung, Untersuchungen und Dokumentation können Labore, Werkzeug, Einrichtungen, Programme und Rechenanlagen des DLR benutzt werden. Die Unterstützung durch das Institut für Systemleichtbau umfasst die Beratung sowie die Hilfe bei der Einarbeitung in die Theorie und Praxis. Die Ergebnisse sind entsprechend dem Fortschritt der Arbeit, mindestens aber einmal wöchentlich mit dem Betreuer abzusprechen.

Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des Betreuers und Prüfungsausschusses möglich.

Mit der Annahme dieser Aufgabenstellung bin ich mir darüber bewusst, dass in der Studienarbeit die Eigenständigkeitserklärung des IMA unterschrieben enthalten sein muss.

Ausgegeben am: 11.10.2023

Abgegeben am:

Hiermit bestätige ich den Empfang der Aufgabenstellung:



Lennart Rosenbrock



Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Überblick

Faseroptische Sensoren (FOS) wurden in Überlappungsklebungen (SLS) für die detaillierte Analyse von Dehnungen in zähmodifizierten Faserverbundwerkstoffen eingesetzt. Vorversuche mit variierter Faserpositionierung und Klebstoffwahl zeigten, dass die Positionierung einen entscheidenden Einfluss auf die FOS-Messwerte hat. Nach Vorstudien und der Analyse des Fertigungsprozesses wurden zwei Probenserien für den Haupttest ausgewählt: Pastös verklebte Prüfkörper mit FOS im Laminat und eine Serie mit FOS im Filmklebstoff.

Die Messdaten der Laminatsensoren ermöglichen genaue Dehnungsmessungen und die Erkennung von Spitzenbelastungen. Eine Unterscheidung zwischen Referenzproben und mit Surface-Toughening-behandelten Prüfkörpern ist möglich. Die im Klebstoff eingebetteten Sensoren zeigen ebenfalls gute Ergebnisse, jedoch bedingt durch geringe Auflösung mit abweichenden Dehnungsspitzen. Eine klare Aussage zum Effekt von Surface Toughening ist daher schwierig.

Zur Plausibilitätsprüfung wurde eine vereinfachte Finite-Elemente-Analyse (FEA) durchgeführt. Beide Testserien korrelieren mit FEA, wobei die Laminatsensoren eine höhere Übereinstimmung zeigen. FOS ermöglichen ein detailliertes Bild der Dehnungen in Schubrichtung von Klebverbindungen. Einschränkungen bestehen jedoch hinsichtlich Rissbildung, da die nicht messbare Schälspannung zu Rissinitiierung führt.

Abstract

Fiber optic sensors (FOS) were used in lap joints for the detailed analysis of strains in composites which were modified with *Surface Toughening*. Preliminary tests with varying fiber positioning and adhesive selection showed that the positioning has a decisive influence on the FOS measurement values. After preliminary studies and analysis of the manufacturing process, two sample series were selected for the main test: Paste-bonded test specimens with FOS in the laminate and a series with FOS in the film adhesive.

The measurement data from the laminate sensors enable precise strain measurements and the detection of peak loads. It is possible to differentiate between reference specimens and specimens treated with surface-toughening. The sensors embedded in the adhesive also show good results, but with deviating strain peaks due to the low resolution. A clear statement on the effect of surface toughening is therefore difficult.

A simplified finite element analysis (FEA) was carried out as a plausibility check. Both test series correlate with FEA, with the laminate sensors showing a higher level of agreement. FOS provide a detailed picture of the strains in the shear direction of bonded joints. However, there are limitations with regard to crack formation, as the non-measurable peel stress leads to crack initiation.

Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung	iii
Überblick.....	vii
Nomenklatur	xiii
1. Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung und Struktur der Studienarbeit	2
2. Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1 Grundlagen der Klebverbindungen	5
2.1.1 Spannungsanalytik von Überlappungsklebungen	7
2.1.2 Oberflächenzähmodifikation	9
2.2 Faseroptische Sensoren (FOS).....	11
2.2.1 Faseroptisches Messsystem (FOSS) zur Rissdetektion.....	12
3. Untersuchungen mit faseroptischen Sensoren (FOS)	15
3.1 Versuchsmaterialien und Prüfkörperaufbau	16
3.1.1 Faseroptischer Sensor und Pigtail	16
3.1.2 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	16
3.1.3 Klebstoffe und Zähmodifizierung.....	17
3.2 Prüfkörperdesign.....	18
3.2.1 Prüfkörperdesign für Vortest 1	18
3.2.2 Prüfkörperdesign für Vortest 2	20
3.2.3 Prüfkörperdesign Haupttest	20
3.3 Fertigung Prüfkörper	22
3.3.1 Fertigungsprozess	22
3.3.2 Verkleben Fügepartner Vortest 1.....	25
3.3.3 Verkleben Fügepartner Vortest 2.....	26
3.3.4 Verkleben Fügepartner Haupttest 1 - Interfacetest.....	27
3.3.5 Verkleben Fügepartner Haupttest 2 - Klebstofftest	28
3.3.6 Spleißen der Fasern.....	29
3.3.7 Beschädigungen im Fertigungsprozess	29
3.4 Testdurchführung SLS.....	31
3.4.1 Optisches Messsystem.....	31
3.4.2 Prüfmaschine	32
3.5 Numerische Simulation der SLS-Probe.....	33
4. Ergebnisse der Untersuchungen.....	37
4.1 Auswertung der Vortestergebnisse	37
4.1.1 Auswertung Vortest 1	37

4.1.2	Auswertung Vortest 2	42
4.1.3	Zusammenfassung Vortestergebnisse	43
4.2	Analyse der Haupttestergebnisse	44
4.2.1	Auswertung Haupttest 1 - Interfacetest	44
4.2.2	Auswertung Haupttest 2 - Klebstofftest	46
4.2.3	Zusammenfassung der Haupttestergebnisse	50
4.3	Diskussion der Ergebnisse	51
5.	Zusammenfassung und Ausblick	53
	Literaturverzeichnis	55
	Abbildungsverzeichnis	57
	Tabellenverzeichnis	59
	Anhang	60

Nomenklatur

Abkürzungen

CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
DCB	Double-Cantilever Beam
DIC	Digital Image Correlation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FBG	Fiber Bragg Grating
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FOS	Fiber Optic Sensor (Faseroptischer Sensor)
FOSS	Fiber Optic Sensing System (Faseroptisches Messsystem)
HiRes	High Resolution
IF	Interface
LC/APC	Lucent Connector / Angled Physical Contact
LDS	Life Data Sheet
MMF	Multimode-Faser
ODiSI	Optical Distributed Sensor Interrogator
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry
PVDF	Polyvinylidenfluorid
REF	Referenz
SLS	Single-Lap-Shear
SMF	Singlemode-Faser
ST	Surface Toughening

Indizes

B	Biegung
Br	Bruch
ε	Dehnung
K	Klebstoff
L	Laminat
Ref	Referenz
s	Symmetrisch
ST	Surface Toughening
T	Temperatur
Ü	Überlappung
x	x-Richtung
y	y-Richtung
z	z-Richtung

Formelzeichen Latein

A	[mm ²]	Fläche
b	[mm]	Breite
c	[mm]	Halbe Überlappungslänge
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
F	[N]	Kraft
G	[MPa]	Schubmodul
K	[-]	Dimensionsloser Koeffizient
k	[-]	Biegemomentfaktor
L	[mm]	Länge
M	[Nmm]	Moment
n	[1/s]	Drehzahl
t	[mm]	Dicke

v	[mm/s]	Vorschub
-----	--------	----------

Formelzeichen Griechisch

β	[-]	Dimensionsloser Faktor
Δ	[mm]	Abweichung, Knickpunktverschiebung
ε	[%]	Dehnung
ν	[-]	Querkontraktion / Poissonzahl
λ	[mm]	Wellenlänge
σ	[MPa]	Spannung
τ	[MPa]	Schubspannung

1. Einleitung

Die Luftfahrtindustrie befindet sich in einem Wandel, welcher sowohl von gesellschaftlichen, als auch wirtschaftlichen Einflüssen getrieben wird. Das zunehmende globale Bewusstsein für Umweltschutz und Nachhaltigkeit macht es notwendig die Luftfahrtbranche nachhaltiger zu gestalten. Diese ist aktuell für etwa 3% der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich [1]. Ein prominentes Beispiel für diese Bestrebungen ist das Konzept *Flightpath 2050*, das von der Europäischen Union entwickelt wurde und ambitionierte Ziele zur Reduzierung der Umweltauswirkungen der Luftfahrt bis zum Jahr 2050 setzt. Das zentrale Element des Konzepts ist die Emissionsreduzierung, um die Auswirkungen auf den Klimawandel zu minimieren [2]. Aktuell liegt der Fokus auf Lösungen, die sich auf alternative Antriebskonzepte und nachhaltige Flugkraftstoffe konzentrieren. Ebenso wichtig ist jedoch auch der Leichtbau mit dem Ziel Gewichtseinsparungen und somit erhöhte Effizienz zu erreichen. Im Sinne der "Downsizing"-Spirale ist es das Ziel, den Treibstoffverbrauch pro Kilometer zu reduzieren, indem sowohl die Strukturen der Flugzeuge als auch die Triebwerke und Fahrwerke leichter gestaltet werden [1].

Klebverbindungen haben ein hohes Leichtbaupotential. Daneben ermöglichen sie die Vereinfachung und Automatisierbarkeit von Fertigungsprozessen. Vorteilhaft sind zudem die homogene Lastübertragung und die guten Dichteigenschaften. Problematisch hingegen sind lokale Spannungskonzentrationen, die zu Ermüdungsrissen führen können. Im Flugzeugbau wird im Sinne des Fail-Safe-Design meistens zusätzlich genietet. Durch den Einsatz von lokaler Oberflächenzähmodifikation (*engl. local Surface Toughening, kurz ST*) können Spannungskonzentrationen an den Rändern von Klebverbindungen reduziert werden [3]. Eine genaue Vorhersage von Rissentstehung und -wachstum ist jedoch noch nicht möglich. Vor diesem Hintergrund soll in dieser Arbeit der Einfluss der Zähmodifikation mit Hilfe faseroptischer Sensoren untersucht werden. Diese ermöglichen die Analyse von Dehnungen innerhalb der Klebverbindung, wodurch eine Rissdetektion ermöglicht werden könnte. Die Skizze der zu untersuchenden Prüfkörper mit faseroptischer Messtechnik und Zähmodifikation ist in Abbildung 1 gezeigt.

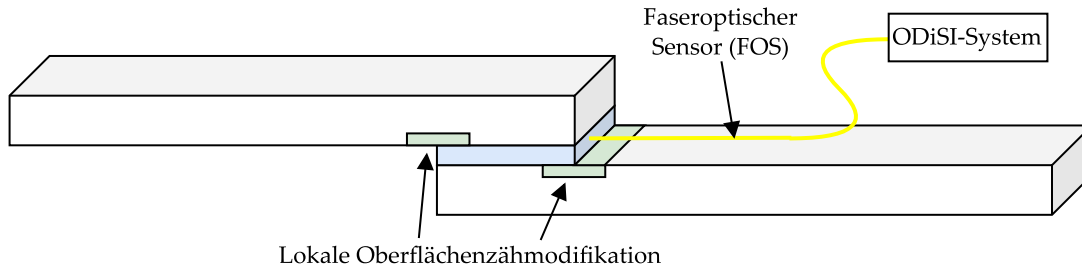


Abbildung 1: Skizze Überlappungsklebung (SLS) mit FOS

1.1 Zielsetzung und Struktur der Studienarbeit

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, experimentelle Untersuchungen von sensierten und zähmodifizierten Klebverbindungen in Faserverbundwerkstoffen mittels faseroptischer Messtechnik (FOSS) durchzuführen. Dies beinhaltet die Analyse von Referenzproben sowie Proben mit lokaler Oberflächenzähmodifikation zur Rissstopp-Verbesserung. Die Arbeit konzentriert sich auf die Erstellung von Versuchsproben, die Durchführung von Zug- und Scherprüfungen, sowie die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse. Hierzu wird auch ein Plausibilitätsabgleich mit Ergebnissen einer numerischen Simulation durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Dehnungs- und Spannungsverteilung in Klebverbindungen zu verstehen und somit die Identifikation von Rissen und Risswachstum zu ermöglichen.

Die Leitfrage der Arbeit kann zusammenfassend wie folgt formuliert werden:

Kann faseroptische Messtechnik zur Beurteilung struktureller Klebverbindungen von zähmodifizierten Faserverbundwerkstoffen hinsichtlich Rissidentifikation und -wachstum beitragen?

Die Struktur dieser Arbeit ist wie folgt aufgebaut:

Kapitel 2: Grundlagen und Stand der Technik

Es werden die Grundlagen der Klebverbindungen und deren Spannungsanalytik erläutert. Zudem wird die Oberflächenzähmodifikation vorgestellt. Des Weiteren erklärt dieser Abschnitt die Funktionsweise und Anwendung der faseroptischen Messtechnik, die in dieser Arbeit eingesetzt wird.

Kapitel 3: *Untersuchungen mit faseroptischen Sensoren (FOS)*

Hier werden die experimentellen Methoden und die Herstellung der Proben beschrieben. Insbesondere wird auf das Design und die Fertigung der mit FOS präparierten Prüfkörper eingegangen.

Kapitel 4: *Ergebnisse der Untersuchungen*

Dieser Abschnitt enthält die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse. Hierzu werden erlangte Sensordaten von Vor- und Haupttests analysiert. Die Ergebnisse werden mit der bisher verwendeten hochauflösenden optischen Messtechnik (HiRes DIC) verglichen. Zudem wird ein Vergleich mit numerischen Ergebnissen präsentiert.

Kapitel 5: *Zusammenfassung und Ausblick*

In diesem Abschnitt werden die Schlussfolgerungen der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsbereiche gegeben.

2. Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden zunächst die erforderlichen Grundlagen zum Verständnis von Klebverbindungen erläutert. Ein zentraler Punkt ist hierbei die Spannungsanalytik von Überlappungsklebungen. Des Weiteren wird die Oberflächenzähmodifikation eingeführt. Ebenso wird das verwendete Messsystem (FOSS) hinsichtlich seiner Funktion und den zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien dargestellt.

2.1 Grundlagen der Klebverbindungen

Nach DIN 923 ist Kleben „ein stoffschlüssiges Fügeverfahren, bei dem es möglich ist, gleiche oder unterschiedliche Fügepartner zu verbinden.“ Hierbei wird Klebstoff verwendet, dies ist „ein nichtmetallischer Werkstoff, der die Fügepartner durch Adhäsion und Kohäsion miteinander verbindet“ [4]. Unter Kohäsion versteht man den inneren Zusammenhalt des Klebstoffs. Eine hohe Kohäsionskraft bedeutet somit eine hohe Festigkeit der Klebstoffschicht. Adhäsion bezeichnet die Verbindung des Klebstoffs mit der Oberfläche der Fügeteile. Die Festigkeit beruht sowohl auf Nebenvalenzbindungen (zwischenmolekulare Wechselwirkungen), als auch auf Hauptvalenzbindungen (kovalente Bindungen). Der schematische Aufbau einer einfachen Klebverbindung ist in Abbildung 2 zu sehen.

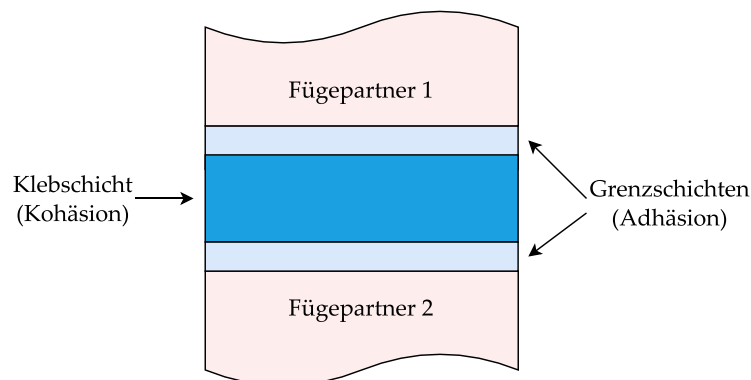


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Klebschicht [1]

Faserverbund Kunststoffe benötigen zur besseren Anbindung des Klebstoffes eine Oberflächenvorbehandlung. Der Grund hierfür ist die überwiegende unpolare Oberfläche des Epoxidharzsystems. In der Regel wird die Rauigkeit der Oberfläche durch spanende Bearbeitungsverfahren erhöht. Es ist wichtig, das optimale Verhältnis zwischen Klebschichtdicke und Rauhtiefe zu finden, um die Klebfestigkeit zu maximieren. Zu große Rauhtiefen können dazu führen, dass sich Rauigkeitsspitzen berühren und lokale Spannungsspitzen entstehen, die

die Ermüdungsfestigkeit reduzieren. Eine unzureichende Benetzung kann effektiv durch das Anwenden von Anpressdruck während der Aushärtung verhindert werden. Dies bewirkt, dass der Klebstoff in sämtliche Vertiefungen der Oberflächenrauigkeit gelangt. Die optimale Schichtdicke liegt zwischen 50 und 200 μm (siehe Abbildung 3) [5].

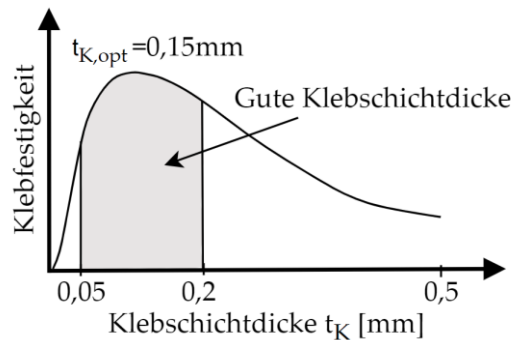


Abbildung 3: Verlauf der Klebfestigkeit über die Klebschichtdicke (vgl. [6])

Je höher die Klebschichtdicke, desto geringer sind die Schubspannungskonzentrationen am Rand der Klebschicht. Jedoch behindert eine dünne Klebschichtfuge die Querkontraktion und reduziert die Wahrscheinlichkeit für Defekte in der Klebschicht. Ein Optimum kann nach Schürmann bei etwa 0,15 mm Klebschichtdicke gefunden werden [5].

In Abbildung 4 sind die wichtigsten Versagensarten von einfach überlappenden Klebverbindungen von Faserverbundwerkstoffen dargestellt.

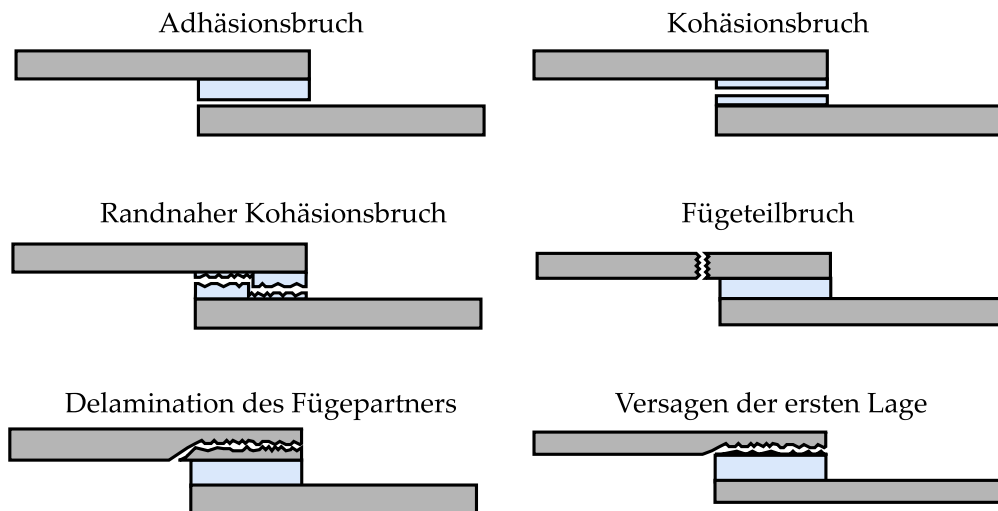


Abbildung 4: Versagensarten von Klebverbindungen (vgl. [7])

Bei einer Belastung nach Mode II (In – plane shear) wird idealerweise ein mittiger Kohäsionsbruch angestrebt, welcher jedoch nur selten auftritt. Bei SLS-Belastungen treten aufgrund der hohen Schälbelastungen am Rand der

Überlappungsklebung eher randnahe Kohäsionsbrüche auf. Für Faserverbundstrukturen typischerweise auftretende Versagensarten sind außerdem Delamination oder ein Versagen der ersten Lage [6].

2.1.1 Spannungsanalytik von Überlappungsklebungen

Im Folgenden wird die einfach überlappende Klebverbindung (*engl. Single-Lap-Shear, kurz SLS*) betrachtet, die sich besonders für dünne Profile im Flugzeugbau eignet. Sie ermöglicht eine flächige Kraftübertragung und hat großes Leichtbaupotential. Die Überlappungsfläche und -länge sind entscheidend für die Festigkeit. Aufgrund des asymmetrischen Kraftangriffspunktes der SLS-Klebeverbindung kommt es zu einer ungewollten Sekundärbiegung (siehe Abbildung 5). Diese beeinflusst die Festigkeit negativ [7]. Der Gesamtspannungszustand in der Klebschicht eines SLS-Prüfkörpers umfasst verschiedene Arten von Spannungen, wie sie in Abbildung 5 dargestellt sind. Zum einen treten Schubspannungen parallel zur Klebfläche auf (τ_v), die durch die aufgebrachte Kraft verursacht werden und zu einer Verschiebung der Fügeteile führen. Des Weiteren sind Schub- und Zugspannungen parallel zur Klebfläche vorhanden (τ_ε bzw. σ_ε zusammengefasst zu τ_ε), bedingt durch die Dehnung der Fügeteile. Zudem entstehen Zugspannungen (Normalspannungen, Schälspannungen)

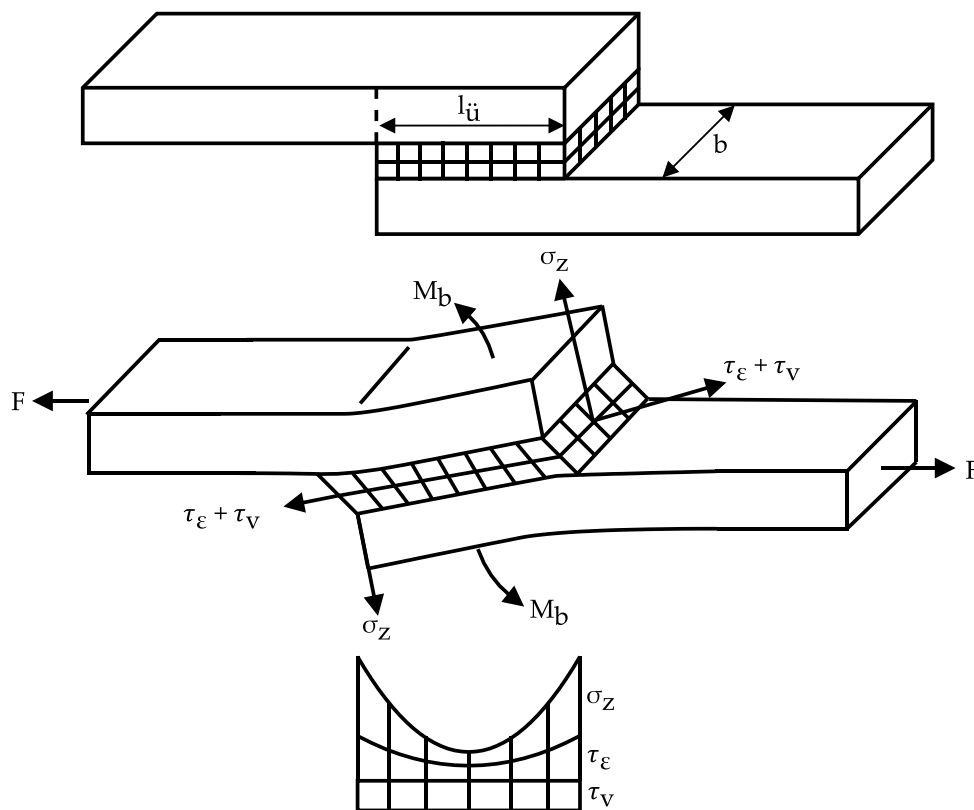


Abbildung 5: Spannungsverteilung & Verformung einer überlappten Klebung (vgl. [8])

senkrecht zur Klebfläche (σ_z), die durch das Biegemoment M_b verursacht werden. Mit zunehmender Kraft (F) addieren sich verschiedene Spannungsarten in der Klebschicht, insbesondere im Bereich der Überlappungsenden, bis schließlich bei Erreichen der Bruchspannung der Klebschicht ein Bruch zur Mitte der Klebfuge hin auftritt [7].

Die meisten analytischen Modelle zur Untersuchung von Überlappungsklebung beruhen auf der Annahme, dass die zu verbindenden Teile und die Klebstoffschicht ein linear-elastisches Materialverhalten aufweisen, insbesondere im Falle von spröden Klebstoffen bis zum Versagen. Zwei wegweisende Arbeiten von Volkersen (1938) und Goland und Reissner (1944) bilden die Grundlage für viele nachfolgende Modelle. Das Modell von Volkersen betrachtet die zu verbindenden Teile als starre Stäbe und die Klebstoffschicht als elastische Scherfedern, während Goland und Reissner Balken für die zu verbindenden Teile und die Klebstoffschicht als Kontinuum mit elastischen Federn modellieren [8].

In Golands und Reissners Modell wird zwischen Schub- und Schälspannung differenziert. Nachfolgend soll nur die analytische Gleichung der Schubspannung kurz dargestellt werden, da aus dieser auf die Dehnungen in Schubrichtung geschlossen werden kann [9].

$$\tau(x) = -\frac{1}{8} \frac{F}{cb} \left\{ \frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh\left(\frac{\beta c x}{t}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right\} \quad (1)$$

Wobei F die aufgebrachte Zuglast, c die halbe Überlappungslänge, t die Dicke der Verklebung, b die Breite der Verklebung und k der Biegemomentfaktor ist. Zur Berechnung des Biegemomentfaktors und des Faktors β , sei auf die Literatur verwiesen [9]. Die Schub- und Schälspannung nach Goland und Reissner sind für eine Kraft von 3 Kilonewton in Abbildung 6 dargestellt. Der Verlauf der Spannungen wurde über eine Überlappungslänge und -breite von 25 mm geplottet. Die Klebschichtdicke wurde mit 0,15 mm und die Fügeteildicke mit 2 mm parametrisiert. In der Praxis führt eine plastische Verformung der Klebschicht zu einem Spannungsausgleich, was die Spannungsverteilung verbessert [6].

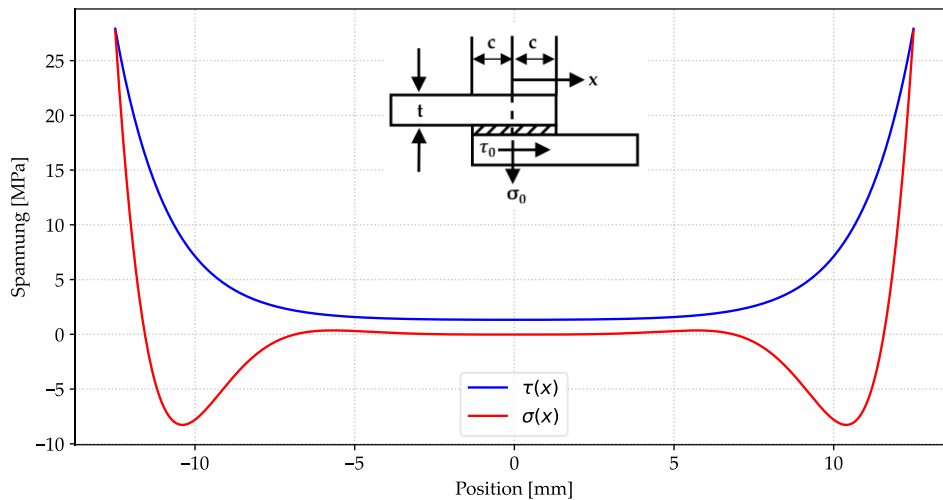


Abbildung 6: Analytische Schub- und Schälspannung nach Goland und Reissner bei 3 kN

2.1.2 Oberflächenzähmodifikation

Die Untersuchung der Schubspannungen in einer Klebeverbindung hat gezeigt, dass an den Enden erhöhte Spannungsspitzen auftreten, während der mittlere Bereich nur in geringerem Maße zur Lastaufnahme beiträgt [5].

Zur Verminderung der Spannungskonzentrationen wurde das Konzept der lokalen Oberflächenzähmodifikation (*engl. local Surface Toughening, kurz ST*) entwickelt. Dieses basiert auf der randnahen Steifigkeitsgradierung von Überlappungsklebung. Das Hauptmerkmal ist ein applizierter Streifen, welcher durch eine niedrigere Steifigkeit Spannungsspitzen absenkt. Die Schälspannungskonzentrationen und Schubspannungskonzentrationen werden an diesen Stellen reduziert und in einen Bereich mit geringerer Belastung verlagert, der außerhalb des zähmodifizierten Bereichs liegt [3].

Der qualitative Schubspannungsverlauf einer zähmodifizierten Überlappungsklebung ist in Abbildung 7 dargestellt. Bei korrekter Auswahl der Bereiche und Steifigkeiten zueinander wird die Verbindungsfestigkeit erhöht, da diese direkt von den randnahen Spannungskonzentrationen beeinflusst wird. Neben der Absenkung von Spannungskonzentrationen wird die Festigkeitssteigerung auch durch das Stoppen von Risswachstum durch die lokale Oberflächenzähmodifikation ermöglicht [3].

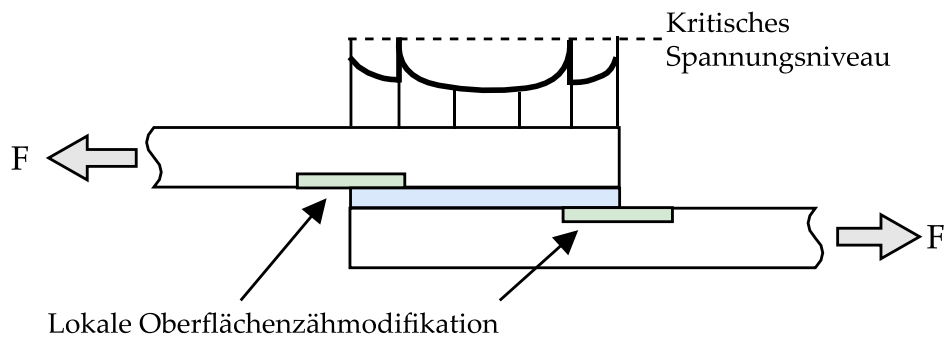


Abbildung 7: Qualitativer Verlauf Schubspannung mit lokaler Oberflächenzähmodifikation (vgl. [3])

2.2 Faseroptische Sensoren (FOS)

In den letzten Jahren hat die Verwendung von optischen Fasern, insbesondere im Telekommunikationssektor, stark zugenommen. Die Leistung wurde verbessert und die Kosten gesenkt. Dies hat die Entwicklung einer Vielzahl von faseroptischen Sensoren ermöglicht, die mit herkömmlichen, kostengünstigeren elektrischen Sensoren konkurrieren können. Faseroptische Sensoren (FOS) im Bereich des „Structural-Health-Monitoring“ (SHM) können in drei Haupttypen unterteilt werden: Interferometrische, gitterbasierte und verteilte Sensoren. Diese drei Sensorarten basieren auf unterschiedlichen Messprinzipien und bieten unterschiedliche räumliche Messauflösungen. Interferometrische Sensoren eignen sich für die Einzelpunkterfassung, während gitterbasierte und verteilte Sensoren für quasi-verteilte und verteilte Messungen verwendet werden. In Abbildung 8 wird eine schematische Übersicht über die wichtigsten verfügbaren Sensortypen gegeben [10].

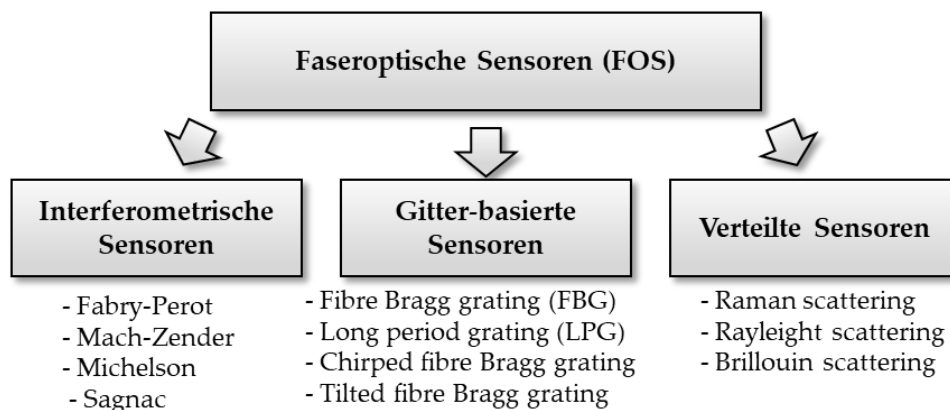


Abbildung 8: Überblick Messprinzipien und Typen von faseroptischen Sensoren [8]

Die Nutzung von glasfaserbasierten Sensoren bietet sich insbesondere dann an, wenn elektrische und andere optische Messsysteme an ihre Grenzen kommen. Beispiele sind Umgebungen mit elektromagnetischen Feldern, Situationen in denen ein geringes Sensorgewicht von Vorteil ist oder wenn Messungen innerhalb eines Materials vorgenommen werden sollen. Ein glasfaserbasierter Sensor besteht aus einer passiven Faser mit einem sehr kompakten Durchmesser sowie einer Ausleseseinheit. Diese sendet Licht aus, welches abhängig vom Dehnungszustand charakteristisch modifiziert wird [11]. Die Fasern bestehen aus einem Glaskern (*Core*), einer Glashülle (*Cladding*) und einer schützenden Beschichtung (*Coating*). Meistens ist dieser Aufbau noch von einer zusätzlichen Kunststoffummantelung geschützt [12]. Der Aufbau ist qualitativ in Abbildung 9 dargestellt.

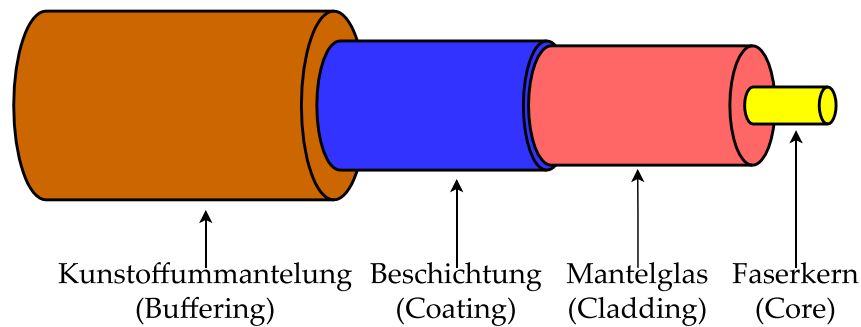


Abbildung 9: Aufbau einer Glasfaser (vgl. [12])

Die Dicke des Kerns variiert, je nachdem, ob es sich um eine Singlemode-Faser (SMF) oder eine Multimode-Faser (MMF) handelt. Single-Mode-Fasern haben typischerweise sehr kleine Kerndurchmesser von ca. $9\text{ }\mu\text{m}$. Hierdurch ist nur eine einzige Lichtmode im Kern ausbreitungsfähig, wodurch sehr geringe Dämpfungswerte und Laufzeitverschiebungen der Signale erreicht werden können. Nachteilig sind die hohen Kosten für die Laser zur Einspeisung und der erhöhte Aufwand für das Spleißen, da Verbindungen exakt aufeinander ausgerichtet sein müssen. Kerndurchmesser von Multimode-Fasern liegen bei etwa $50\text{ }\mu\text{m}$ und erlauben so die Ausbreitung mehrerer Lichtmoden. Dadurch erhöhen sich Signaldämpfung und Laufzeitverschiebung, wodurch sich die überbrückbare Distanz verringert. Verbindungen zwischen zwei Fasern sind mit weniger Aufwand herzustellen [13].

2.2.1 Faseroptisches Messsystem (FOSS) zur Rissdetektion

Zur Lokalisierung und Quantifizierung von Rissen in Klebeverbindungen wurden verschiedene zerstörungsfreie Messverfahren wie Dehnmessstreifen oder Fiber-Bragg-Gitter (FBG) bereits untersucht. Beide Sensortypen messen Dehnungen innerhalb der Messlänge allerdings nur punktuell. Somit ist es schwierig tieferliegende Risse zu lokalisieren, beziehungsweise deren Entstehung vorherzusagen. Es bräuchte eine hohe Anzahl an Sensoren, um eine ganze Struktur zu überwachen, was in realen Anwendungsfällen wenig praktikabel ist. Des Weiteren gibt es eine Reihe von Oberflächeninspektionsverfahren wie Digital Image Correlation (DIC) oder Photogrammetrie. Diese sind in der Lage Oberflächenrisse zu erkennen und zu quantifizieren, eine Detektion tiefer liegender Risse ist jedoch nicht möglich [14].

Ein faseroptisches Messsystem (*engl. Fiber Optic Sensing System, kurz FOSS*) mit verteilten FOS bietet die Möglichkeit der annähernd kontinuierlichen Dehnungsmessung, mit Auflösungen von unter einem Millimeter. Die Sensoren lassen sich

zudem in Strukturen einbetten und können somit Risse auch unterhalb der Oberfläche detektieren. Forschungen mit FOS an Beton haben gezeigt, dass „das Vorhandensein und die Entwicklung von Rissen [...] durch eingebettete verteilte Sensoren auf der Grundlage der optischen Brillouin-Zeitbereichsanalyse und der Rayleigh optical backscatter reflectometry“ möglich ist. [14] Die Sensoren zeigen eine Dehnungsverteilung, welche es ermöglicht Risse zu lokalisieren. Die Dehnungsspitzen weisen auf Risse hin und die Größe des jeweiligen Peaks lässt eine Rissbreitenabschätzung zu [14].

Das dem FOSS zugrunde liegende Funktionsprinzip ist die Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR). Eine Lichtwelle wird in den Lichtwellenleiter eingestrahlt, wodurch Rayleigh-Streuung erzeugt wird. Jede Faser hat ein unterschiedliches, charakteristisches Rayleigh-Rückstreumuster, welches als Fingerabdruck der Faser betrachtet werden kann. Vergleicht man das Gestörte mit dem Referenzrückstreumuster, so kann eine Wellenlängenverschiebung bestimmt werden. Nach Schneller-Fourier-Transformation (engl. *Fast-Fourier-Transformation*, kurz *FFT*) lässt sich hieraus die Frequenzverschiebung ermitteln (siehe Abbildung 10) [15].

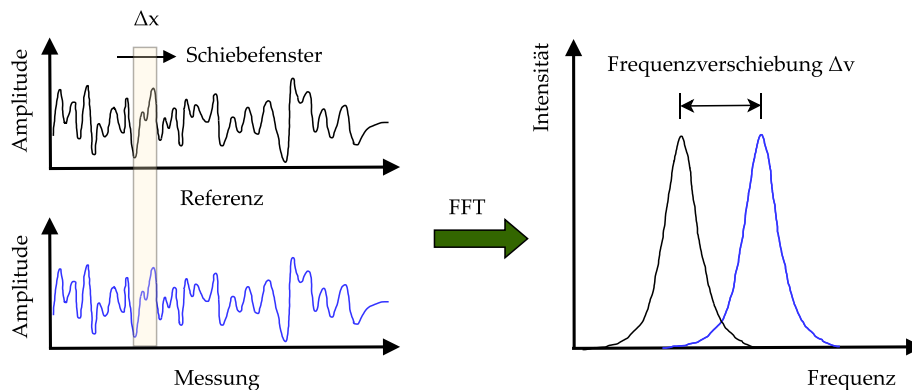


Abbildung 10: Funktionsprinzip der OFDR zur Messung der Dehnungsänderung (vgl. [1])

Aus der Frequenzverschiebung lässt sich nach mit folgendem Zusammenhang die Dehnung ermitteln:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta \nu}{\nu} = K_T \cdot T + K_\varepsilon \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Wobei λ und ν die mittlere optische Wellenlänge bzw. Frequenz und K_T und K_ε die Temperatur- bzw. Dehnungskoeffizienten sind. [14]

Im Weiteren wurden Untersuchungen zur Überwachung von Rissen in CFRP-Single-Lap-Joints durchgeführt. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass

grundsätzlich die Lokalisierung und Größenbestimmung von Rissen möglich ist. Allerdings stellte sich heraus, dass die verfügbare räumliche Auflösung des verwendeten OFDR-Systems als begrenzender Faktor wirkte, und die Bestimmung der Rissgröße für Schäden kleiner als 2 mm nicht möglich war. [16]

In der oben genannten Untersuchung wurden die FOS außerhalb des Lap-Joints platziert. Es bleibt jedoch zu klären, welche Positionierung der FOS die besten qualitativen und quantitativen Messergebnisse ermöglicht. Frühere Versuche mit FBGs haben gezeigt, dass auch eine Positionierung in der Klebschicht oder im Laminat grundsätzlich möglich ist [17].

3. Untersuchungen mit faseroptischen Sensoren (FOS)

Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen an SLS-Prüfkörpern vorgenommen. In einem ersten Schritt soll ermittelt, wie FOS zur Messung von Dehnungen in einer SLS-Probe positioniert werden sollten, um qualitativ hochwertige Messdaten zu erlangen. Im zweiten Schritt werden alternative Fertigungsmethoden und ein alternativer Klebstoff getestet. Während des Vortest 1 und 2 soll ein optimales Fertigungsverfahren für die Probenserien der Haupttests ermittelt werden. Es ist das Ziel, das bestmögliche Signal aller Prüfkörper aufzunehmen. Im Haupttest werden in zwei separaten Testserien FOS in der Interfacelage und Klebschicht analysiert. Hierbei werden jeweils Prüfkörper mit und ohne *Surface Toughening* ausgestattet. Eine Übersicht der Testkampagne ist in Abbildung 11 dargestellt.

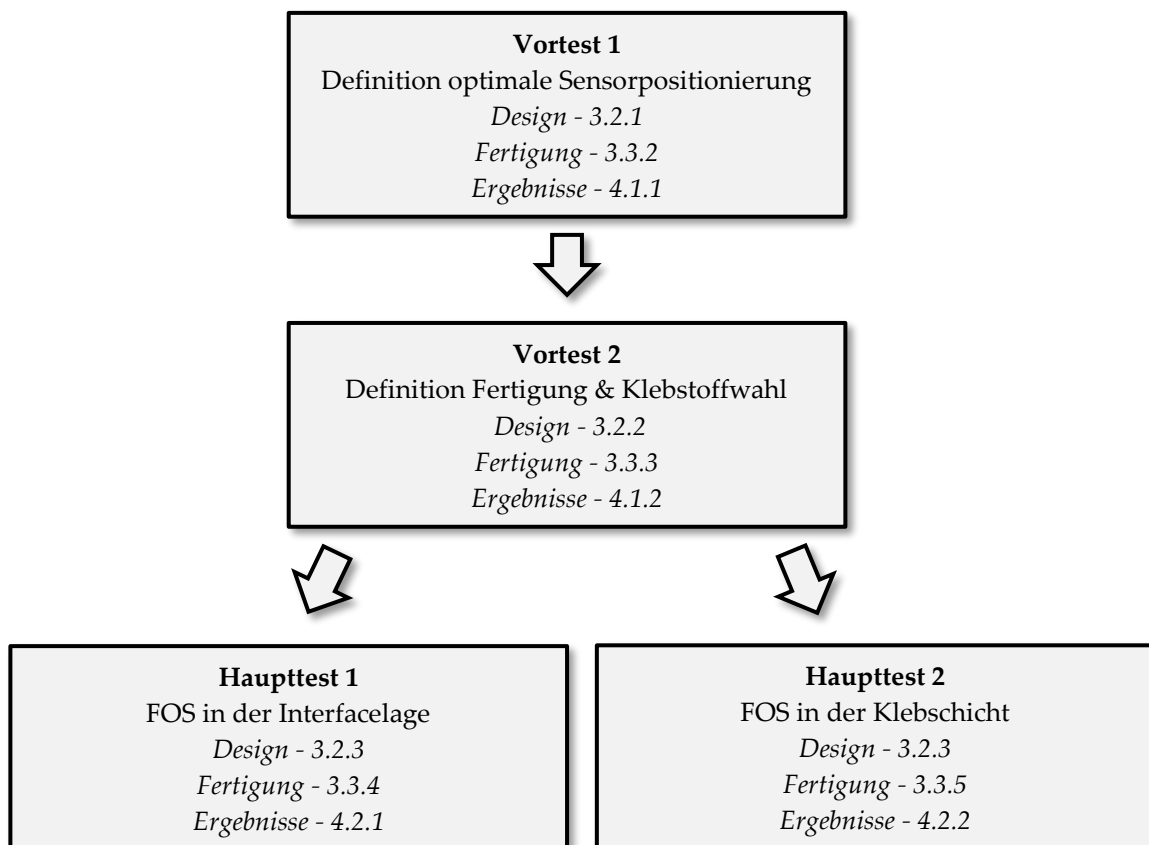


Abbildung 11: Schema SLS-Testablauf

3.1 Versuchsmaterialien und Prüfkörperaufbau

In diesem Abschnitt werden die für die Prüfkörperherstellung verwendeten Materialien erläutert. Hierbei werden neben den verwendeten FOS auch das gewählte Laminat und die verwendeten Klebstoffe vorgestellt.

3.1.1 Faseroptischer Sensor und Pigtail

Die in den Proben verwendeten Glasfasern sind wie in Abschnitt 2.2 beschrieben aus mehreren Schichten aufgebaut. Die etwaige Dicke der einzelnen Schichten ist in Abbildung 12 vermerkt. Die äußerste Schicht ist eine Art Schutzmantel. Dieser wird nur in Bereichen verwendet, wo die hochfragile Faser freiliegt. Hierdurch kann einer Beschädigung der Faser vorgebeugt werden. Der Schutzmantel hat keine feste Verbindung mit der Faser. Bei den verwendeten FOS handelt sich um Single-Mode-Fasern mit einer Beschichtung aus Polyamid. Die Gitterwellenlängen liegen zwischen 1520 und 1580 nm [18]. Die verwendeten Pigtails sind ebenfalls Single-Mode-Fasern und sind mit LC/APC Steckern bestückt. Pigtails sind kurze Stücke von Glasfaserkabeln, die an einem Ende mit einem Stecker versehen sind und mit dem im Prüfkörper befindlichen FOS nachträglich verspleißt werden.

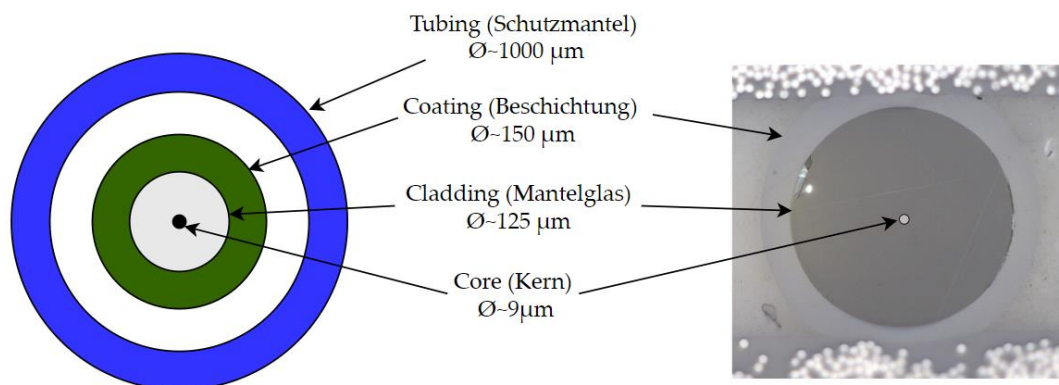


Abbildung 12: Aufbau der verwendeten FOS-Fasern

3.1.2 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Es wird das Prepreg *HexPly 8552 UD IM7* des Herstellers *HexPly* verwendet [19]. Das unidirektionale Laminat hat nach dem Aushärten eine Schichtdicke von 0,125 mm. Die Probekörper bestehen aus 16 Lagen und sind nach dem folgenden Aufbauschema gelegt worden:

$$[0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_s$$

Die Probekörperdicke des quasiisotropen Materials beträgt insgesamt 2 mm. Vorversuche haben gezeigt, dass es sinnvoll ist die Interface-Lage in 0° -Richtung

zu wählen, da 90°-Lagen oft auf Zwischenfaserbruch versagen bzw. die $\pm 45^\circ$ Lagen schnell delaminieren [3].

Die Festigkeitswerte des Laminats wurden in Vorversuchen mit Hilfe von Zugversuchen ermittelt und sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

$F_{L,max}$ [kN]	$\varepsilon_{L,Br}$ [%]	$\sigma_{L,Br}$ [MPa]	E_L [MPa]	ν_L [-]
37,03	1,46	895,04	60579	0,32

Tabelle 1: Festigkeitswerte für das verwendete Laminat [19]

3.1.3 Klebstoffe und Zähmodifizierung

Um eine Vergleichbarkeit zu Voruntersuchungen am DLR Institut für Funktionsleichtbau zu ermöglichen, wird bei den Klebstoffen und beim zähmodifizierten Material auf bereits erprobte Materialien zurückgegriffen. Als Filmklebstoff wird der auf Epoxidbasis bestehende *EA9695 050 NW Aero* verwendet [20]. Eine ausgehärtete Lage hat eine ungefähre Schichtdicke von 0,7 bis 0,8 mm. Dieser wird daher in doppelter Lage verwendet, um in der Größenordnung des FOS-Durchmessers zu liegen. Als weiterer Klebstoff wird das pastöse Klebstoffsystem *Henkel Hysol EA9394 Aero* verwendet [21]. Dieses kann ohne Autoklav bei 66 °C in einer Stunde ausgehärtet werden. Als zähmodifiziertes Material wird der Thermoplast *Polyvinylidenfluorid*, kurz PVDF, von *Nowofol* verwendet.

Die Materialwerte der Klebstoffe und des zähmodifizierten Materials sind in Tabelle 2 zusammengetragen.

Material	$\sigma_{K,Br}$ [MPa]	E_K [MPa]	$\varepsilon_{K,Br}$ [%]	ν_K [-]
EA9695	59,17	2576,8	3,44	0,43
EA9394	46,00	4237,0	1,66	0,45
PVDF	-	1716,1	35,00	0,46

Tabelle 2: Materialkennwerte Klebstoffe & zähmodifiziertes Material [3], [21], [20]

3.2 Prüfkörperdesign

In diesem Abschnitt wird das Probendesign für die beiden Vortests sowie für die Haupttests dargestellt. Die Proben werden in Anlehnung an *ASTM D5656* gefertigt. Mit diesem Prüfverfahren lassen sich die Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften eines Klebstoffs auf Scherung bestimmen und die Proportionalitätsgrenze der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermitteln [22]. Die Klebverbindung hat eine Überlappungslänge und -breite von 25 mm (1 Inch). Der Standardaufbau eine *Single-Lap-Shear* ist in Abbildung 13 zu sehen. Um den vertikalen Versatz auszugleichen werden an den Enden der Fügeiteile Doppler vorgesehen. Diese bestehen aus dem gleichen Laminat, wie die Fügeiteile selbst und werden ebenfalls verklebt.

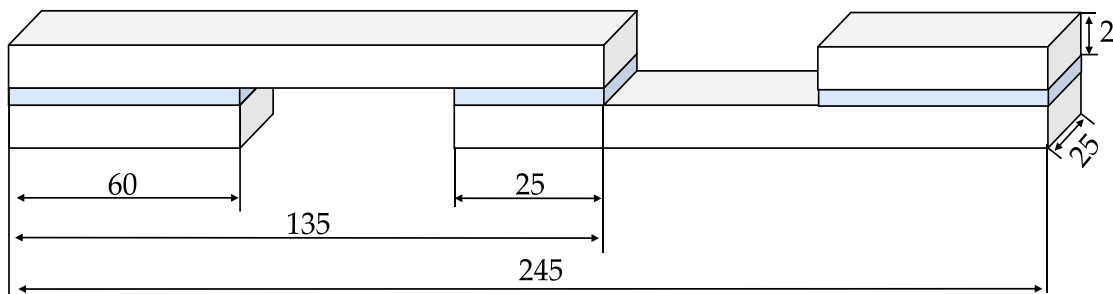


Abbildung 13: SLS - Probe Abmessungen nach ASTM D5656

3.2.1 Prüfkörperdesign für Vortest 1

In den Prüfkörpern des ersten Vortests wird die Lage des FOS variiert. Dadurch soll der optimale Probenaufbau hinsichtlich der Qualität der Ergebnisse sowie der Fertigbarkeit ermittelt werden. Folgende Varianten mit unterschiedlicher FOS Positionierung werden hierfür gefertigt:

- **FOS unmittelbar im Klebstoff** (*Abbildung 14*): Hierfür werden zwei Lagen Klebstoff verwendet, um ein „Zerdrücken“ der Faser beim Aushärten des Klebstoffs zu vermeiden.
- **FOS im Interface** (*Abbildung 15*): Die Glasfaser befindet sich in der obersten Laminatschicht. Diese wird bereits vor dem Aushärten des Laminats platziert.
- **FOS unterhalb der ersten Laminatlage** (*Abbildung 15*): Die Faser liegt geschützt zwischen erster und zweiter Laminatschicht.

Aufgrund des in der Fertigung verwendeten Autoklavprozesses und der damit einhergehenden hohen Temperaturen können keine vorterminierten oder mit Steckern versehenen FOS verwendet werden. Neue temperaturbeständige

Steckkonzepte für den Autoklavprozess sind Gegenstand aktueller Forschung. Um trotzdem eine Terminierung zu ermöglichen werden zwei unterschiedliche Verfahren verwendet:

- Terminierung durch Knoten
- Terminierung durch Auslaufen der Glasfaser im Laminat

Im Kontext dieser Arbeit ist mit Terminierung der Sensoren die Minimierung von Rückstreulicht gemeint. Dieses beeinträchtigt die Leistung des optischen Messsystems.

Zur Terminierung der Sensoren unter bzw. über der ersten Lage wird letzteres Verfahren angewandt. Dadurch ergibt sich eine vom Standard abweichende Probengeometrie (siehe Abbildung 15). Der Überhang zum Auslauf der Faser wird nicht verklebt und beim Aushärten des Klebstoffs zusätzlich mit Trennfolie separiert. Kräfte werden vom Überhang aufgrund der unter Zugbelastung auftretenden S-Verformung nicht übertragen.

Zur Terminierung der FOS, welche durch die Klebschicht verlaufen wird das Knotenverfahren ausgewählt (siehe Abbildung 14). Grund hierfür sind die bereits ausgehärteten Fügepartner, welche keine Terminierung im Laminat mehr zulassen.

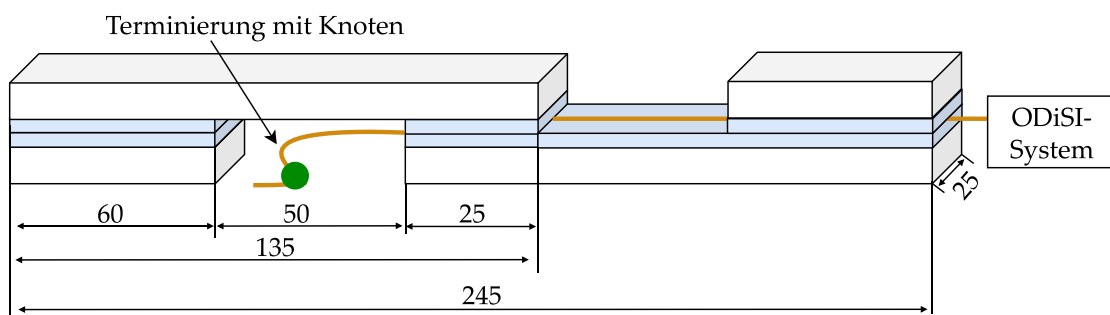


Abbildung 14: Sensorlage Klebstoff und Probengeometrie Vortest 1

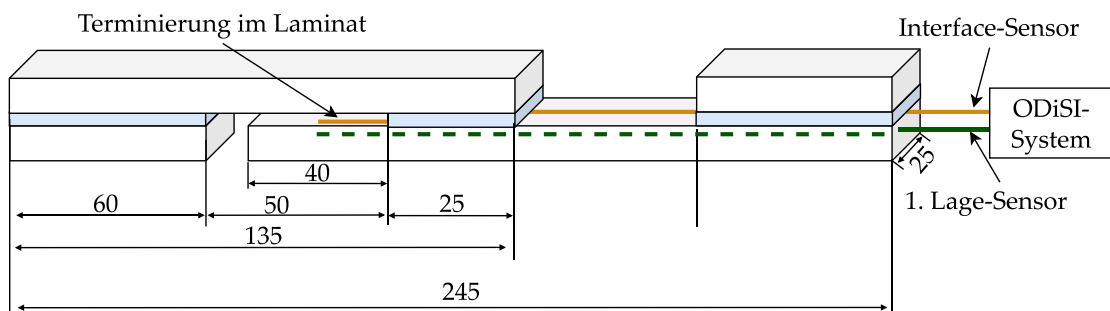


Abbildung 15: Sensorlage im Interface und in der 1. Lage

3.2.2 Prüfkörperdesign für Vortest 2

Der zweite Vortest hat das Ziel zu erproben, wie die Ausschussquote reduziert werden kann. Hierfür wurde sich dazu entschieden auf ein pastöses Klebstoffsystem (EA9394) zurückzugreifen. Dieses muss im Gegensatz zum Filmklebstoff nicht mit Hilfe eines zweiten Autoklavzyklus ausgehärtet werden. Es wird hingegen bei 60°C für eine Stunde in einem unbedruckten Ofen ausgehärtet. Hierdurch reduziert sich der Fertigungsaufwand und somit die Beschädigungsgefahr maßgeblich. Es entfallen neben dem Autoklavzyklus auch das Entformen. Ebenso das Spleißen mit Steckverbindungen, da direkt mit Steckern versehene FOS verwendet werden können, sogenannte „Pigtails“.

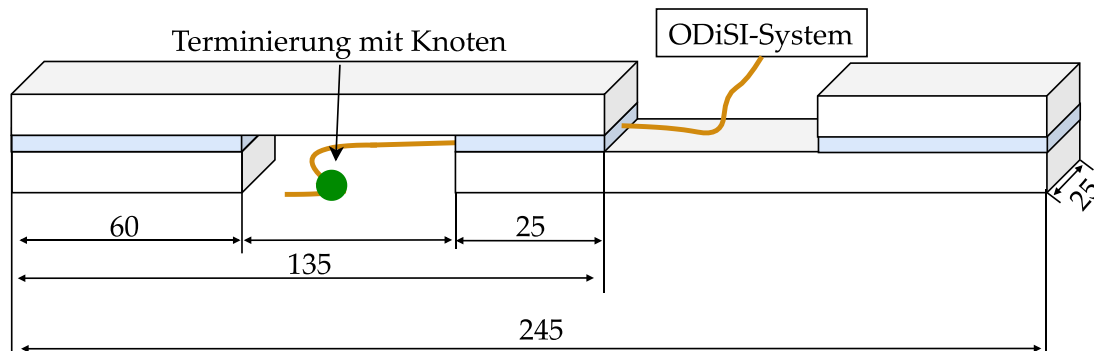


Abbildung 16: Probengeometrie Vortest 2

3.2.3 Prüfkörperdesign Haupttest

Für den Haupttest wurde sich dazu entschieden zwei verschiedene Prüfkörpervarianten zu fertigen. Zum einen wird eine Probenreihe gefertigt, bei welcher sich die Sensoren wie im Vortest 1 in der Interfacelage befinden. Um den Ausschuss zu reduzieren, werden diese Prüfkörper mit dem pastösen Klebstoff EA9394 verklebt. Zum anderen wird eine separate Probenreihe gefertigt, bei welcher der FOS sich in der Klebschicht befindet, hierbei wird der Filmklebstoff EA9695 verwendet.

Das Design des Haupttest 1 und die Lage der platzierten FOS ist in Abbildung 17 zu sehen. Die im Vortest 1 bewährte Terminierung des Interfacesensors im Laminat wird wieder angewandt. Bei den Prüfkörpern mit *Surface Toughening*

wird der FOS zuerst auf die oberste Lage appliziert und anschließend wird darauf der PVDF-Streifen angedrückt.

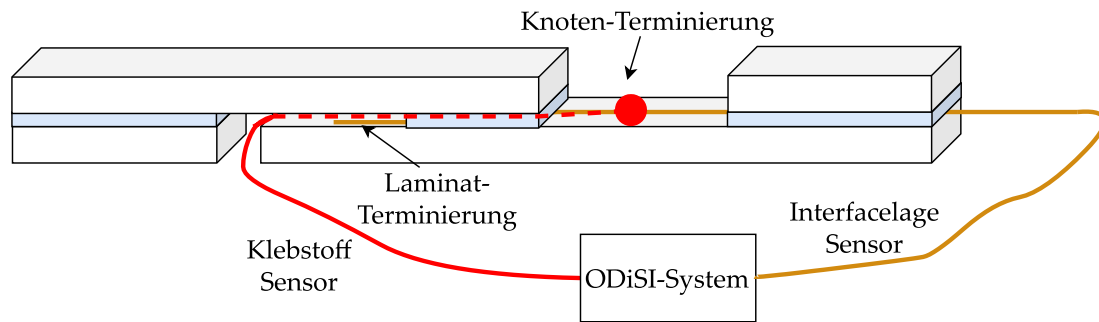


Abbildung 17: Design Haupttest 1 mit FOS im Interface und im pastösen Klebstoff

Der zweite Haupttest mit den im Klebstoff befindlichen Sensoren ähnelt im Wesentlichen dem Design des Vortest 1 (siehe Abbildung 18). Es wird, jedoch nur noch Filmklebstoff im Bereich der Überlappung verwendet, um ein übermäßiges Verlaufen des Klebstoffes während des Autoklavprozesses zu vermeiden. So kann einer Sensorbeschädigung beim Entformen vorgebeugt werden. Zudem wurde der Fertigungsprozess überarbeitet. Dieser ist im Detail in Abschnitt 3.3.4 erläutert.

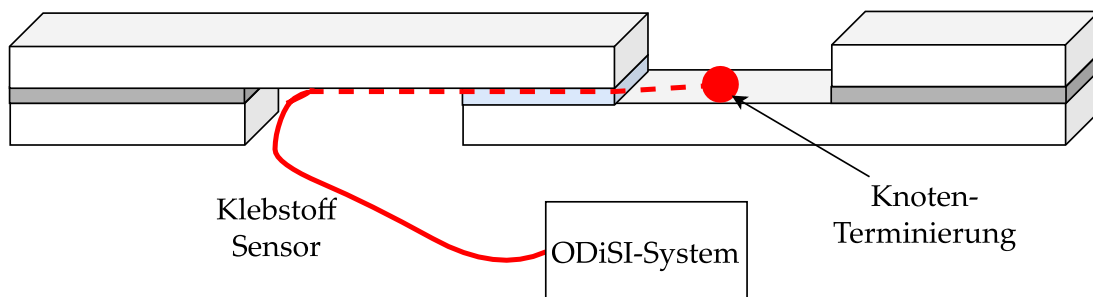


Abbildung 18: Prüfkörperdesign Haupttest 2 mit FOS im Klebstoff

3.3 Fertigung Prüfkörper

Im folgenden Abschnitt wird der Fertigungsprozess der Prüfkörper beschrieben. Hierbei wird der Fertigungsprozess der CFK-Platten allgemein dargestellt. Die individuellen Fertigungsschritte des Verklebens werden in separaten Abschnitten erläutert. Als letztes wird in diesem Kapitel auf Fehlerursachen, welche während der Fertigung zur Beschädigung von FOS geführt haben, eingegangen.

3.3.1 Fertigungsprozess

In einem initialen Schritt werden die erforderlichen 16 Lagenzuschnitte gemäß Kapitel 3.1.2 aus dem Prepreg *HexPly 8552 UD IM7* mithilfe eines automatischen Cutters in unterschiedlichen Ausrichtungen präzise herausgeschnitten. Die Abmessungen der zu fertigenden CFK-Platte belaufen sich auf 220 mal 450 mm. Die Anordnung der Prüfkörper auf der Platte ist in Abbildung 13 dargestellt. Sieben Prüfkörper sind über die Breite der Platte verteilt. Dabei wurde ein Überschuss für das Besäumen sowie jeweils etwa 2,5 mm Verschnitt der Diamantsäge berücksichtigt. Die Länge der Platte ermöglicht die Herstellung von zwei Fügeteilen und zwei dazugehörigen Dopplern (siehe Abbildung 19). Es wurde gleichfalls bedacht, dass Prüfkörper mit *Surface Toughening* sowie Referenzprüfkörper ohne Modifikation aus demselben Material gefertigt werden. Für alle Prüfkörper, die ein Auslaufen des FOS im Laminat ermöglichen sollen, wurde ein entsprechender Überhang einkalkuliert.

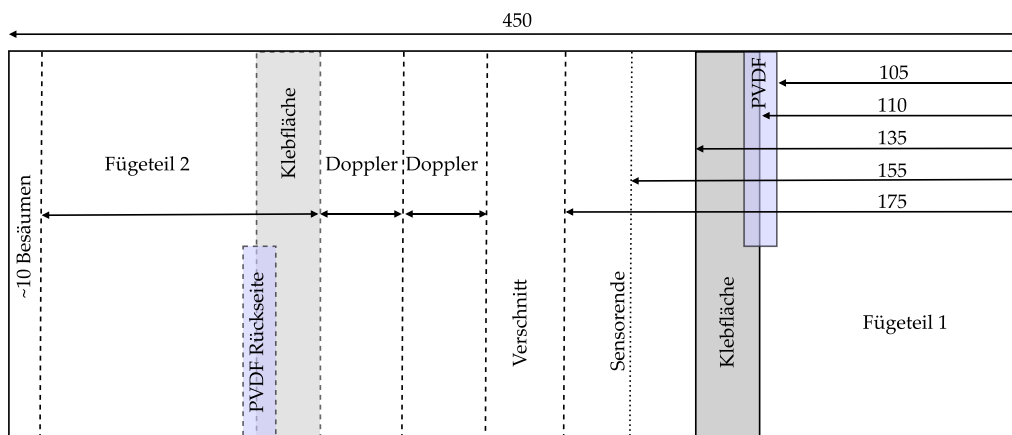


Abbildung 19: Verteilung der Prüfkörperelemente auf der CFK-Platte

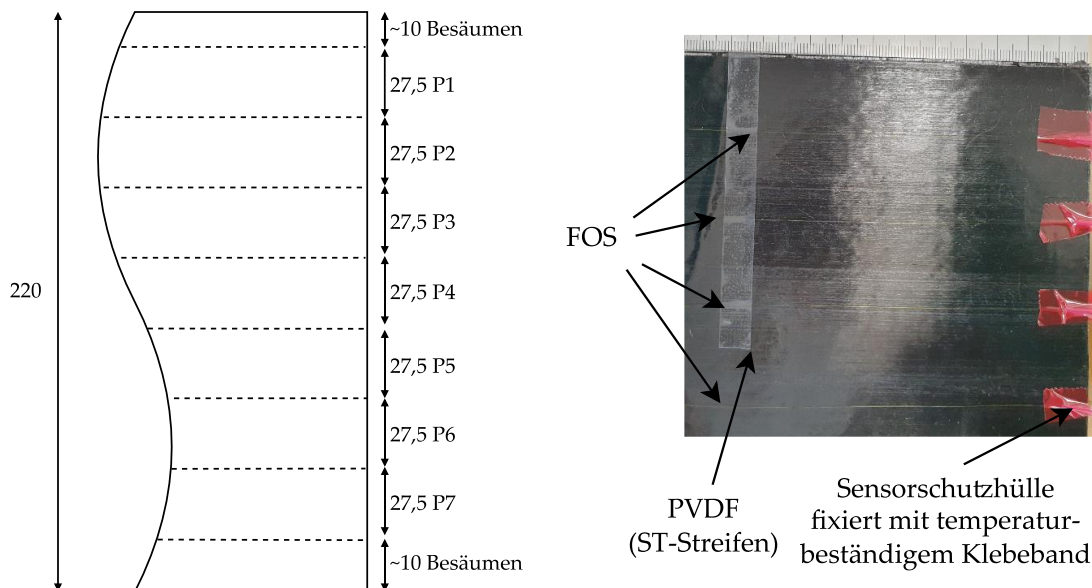


Abbildung 20: Prüfkörperverteilung auf CFK-Platte und FOS Platzierung

Die FOS unter der obersten Lage sowie die FOS im Interface werden nach dem Anordnen der 15. (beziehungsweise 16.) Lage auf das Laminat appliziert. Hierbei kommen FOS ohne Stecker mit einer Polyamid-Beschichtung zum Einsatz, da diese den Aushärtetemperaturen im Autoklaven standhalten. Um die aus dem Laminat austretende Faser vor Beschädigungen während des weiteren Fertigungsprozesses zu schützen, wird ein Schutzmantel am freien Ende aufgezogen und am Rand des Fügeteils mit temperaturbeständigem Klebeband fixiert (siehe Abbildung 20). Vor dem Aufbau des Vakuumsystems wird die Platte gedreht, sodass die FOS möglichst nah an der Grundplatte liegen und somit keinerlei Scherkräften ausgesetzt sind. Der schematische Aufbau des Vakuumsystems ist in Abbildung 21 dargestellt.

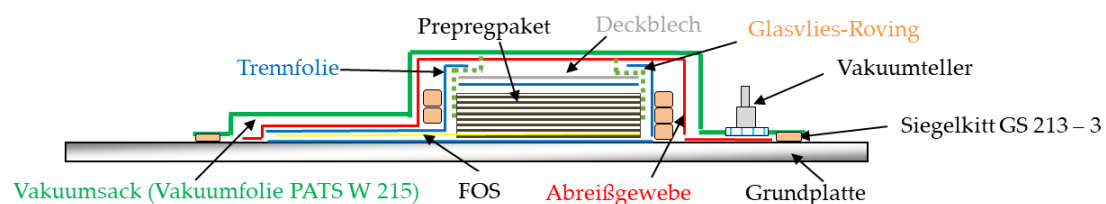


Abbildung 21: Vakuumaufbau Prepreg mit FOS

Zunächst werden die CFK-Platten mit Glasfaser-Rovings ausgestattet, um eine vollständige Entlüftung des Mehrschichtverbundes zu ermöglichen. Subsequent wird das Laminat in Trennfolie verpackt. Nachdem die CFK-Platte auf die eingebrachte Grundplatte positioniert wurde, wird diese mittels Siegelkitt

umschlossen, um ein übermäßiges Harzaustreten an den Seiten zu unterbinden. Zwischen Siegelkit und FOS wird ebenfalls Trennfolie platziert, um später ein beschädigungsfreies Entformen zu erleichtern. Ein aufgebrachtes Abreißgewebe gewährleistet einen gleichmäßigen Luftentzug während des Vakuumierens. Ein Vakuumstutzen wird auf einem mit Abreißgewebe umwickelten Fließ platziert. Nach dem Aufbringen des Vakuumsacks wird das Gegenstück des Vakuumstutzens verschraubt, und der Aufbau wird vakuumiert. Das Prepreg wird bei einer Temperatur von 180 °C und einem Druck von 7 bar über einen Zeitraum von sieben Stunden ausgehärtet. Der detaillierte Autoklav-Zyklus für *HexPly 8552 IM7* ist in Abbildung 22 veranschaulicht.

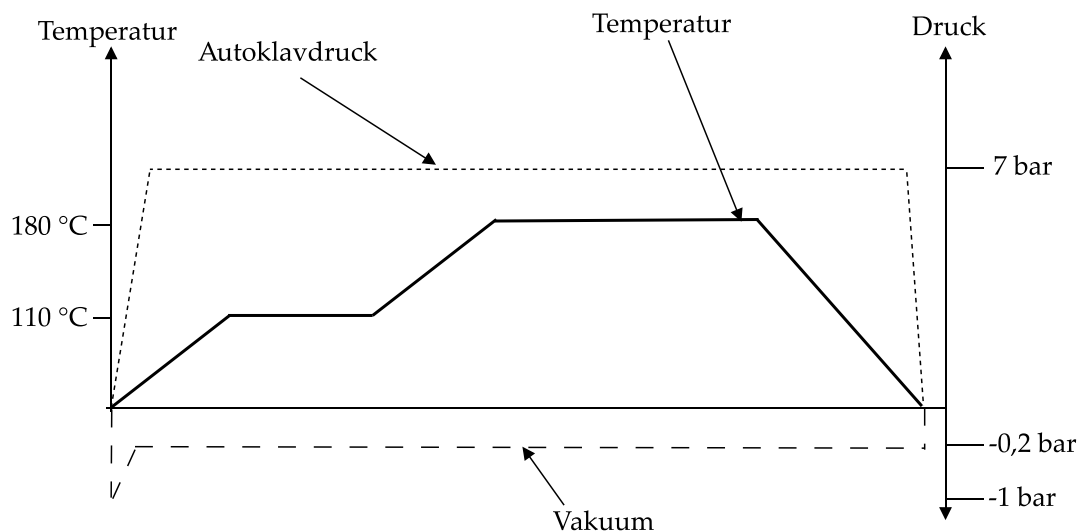


Abbildung 22: Autoklavzyklus *HexPly 8552 IM7* [19]

Nach dem Entformen der Platten werden diese besäumt und die Füge­teile gemäß Abbildung 19 zersägt. Anschließend werden sämtliche zu verklebenden Füge­teile mit Isopropanol gereinigt und einer Vorbehandlung mittels Atmosphärendruckplasma unterzogen (siehe Abbildung 23). Die Plasmabe­handlung führt zur Aktivierung der Oberfläche, indem chemische Bindungen aufgebrochen werden. Dadurch wird die Reaktivität des Kunststoffs verbessert, indem reaktive Gruppen an der Oberfläche erzeugt werden, was zu einer verbes­serten Benetzbarkeit führt [6].

Im Weiteren unterscheiden sich die Fertigungsverfahren für das Verkleben mit dem pastösen Klebstoff EA9394 und dem Filmklebstoff EA9596. Zudem erfolgt in den Vortests und Hauttests eine abweichende Vorgehensweise während des Fertigungsprozesses.



Abbildung 23: Plasmavorbereitung Fügepartner

3.3.2 Verkleben Fügepartner Vortest 1

Die Prüfkörper des ersten Vortests werden mit dem Filmklebstoff EA9596 mit Hilfe eines zweiten Autoklavganges gefügt. Der Vakuumaufbau des nachträglichen Verklebens, auch *Secondary Bonding* genannt, ähnelt stark dem Vorherigen (siehe Abbildung 25). Hierbei sind die Grund- und Deckplatte nicht mehr notwendig.

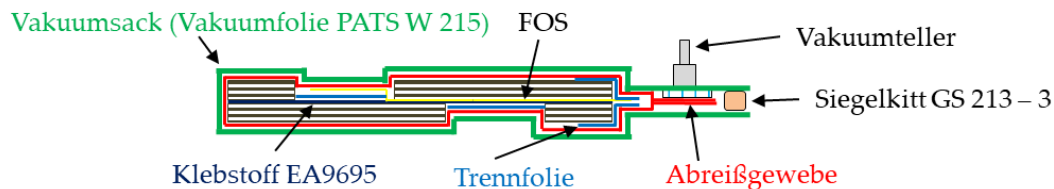


Abbildung 24: Vakuumaufbau Secondary Bonding

Der Vakuumaufbau wird wie in Abbildung 24 zu sehen, um die ganzen Fügepartner geschlagen. Für die Fertigung der Probenkörper mit den im Klebstoff befindlichen FOS, werden die FOS zwischen zwei Klebstoffschichten gelegt (siehe schematisch Abbildung 14). Beim Entformen hat sich gezeigt, dass das gewählte Fertigungsverfahren eine sehr hohe Beschädigungsquote der FOS aufweist. Nach dem Entformen werden die gefügten Platten mithilfe einer Diamantkreissäge auf Prüfkörpergröße zugesägt.

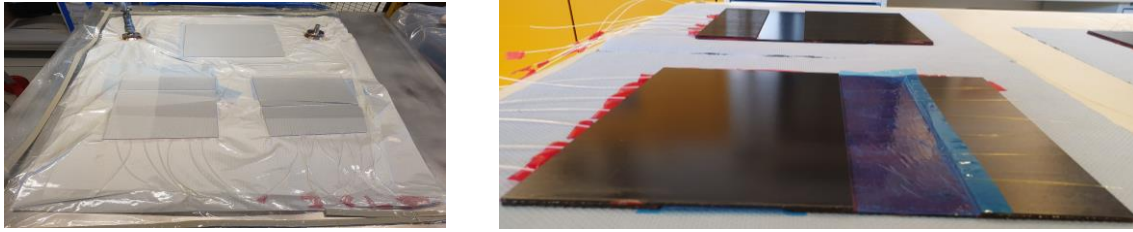


Abbildung 25: Vakuumaufbau (links), Vorbereitete Fügepartner mit FOS (rechts)

3.3.3 Verkleben Fügepartner Vortest 2

Die Fügepartner werden mithilfe des pastösen Klebstoffs EA9394 gefügt. Die in der Klebschicht liegenden Sensoren werden zunächst auf einem der beiden Fügepartner mit einer Knotenterminierung fixiert. Um eine definierte Überlappungslänge zu erreichen werden die beiden Fügepartner mithilfe einer additiv gefertigten Passform positioniert. Im Vortest 2 geschieht dies mit bereits zugesägten 25 mm breiten Prüfkörpern. In Abbildung 26 (links) sind die gefügten Prüfkörper vor dem Aushärten zu sehen. Hierbei sind die oberen drei mit *Surface Toughening* wie in Abbildung 26 (rechts) zu sehen ausgestattet. Die unteren drei Prüfkörper dienen als Referenz. Die Aushärtung findet bei 60 °C für eine Stunde in einem unbedruckten Ofen statt. Dies ermöglicht das Verwenden sogenannter *Pigtails*. Dies sind FOS, welche bereits einen Verbindungsstecker besitzen. Diese müssen somit nicht mehr verspleißt werden, lediglich der Schutzmantel muss vor Applikation in die Klebschicht mit Hilfe eine Glasfaserzange entfernt werden. Zur einfacheren Handhabung werden die Doppler erst nach dem Aushärten mit Sekundenkleber verklebt. Die hierfür ebenfalls mit Plasma vorbehandelten Klebflächen werden während des Fertigungsprozesses abgeklebt, um Verunreinigungen zu vermeiden.

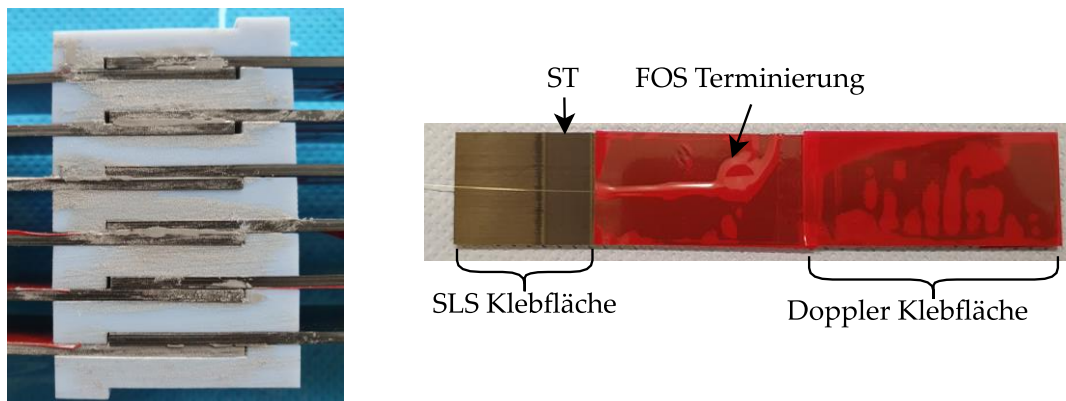


Abbildung 26: Secondary Bonding Vorversuche 2 mit pastösem Klebstoff

3.3.4 Verkleben Fügepartner Haupttest 1 - Interfacetest

Für den ersten Haupttest wird ebenfalls der pastöse Klebstoff *EA9394* verwendet, um eine höhere Funktionsquote der Sensoren zu erreichen. Anders als im Vortest 2 wird die gesamte Platte auf einmal verklebt und die einzelnen Prüfkörper erst nach dem Aushärten zersägt. Hierfür wird ebenfalls eine additiv gefertigte Form verwendet, welche es ermöglicht beide Fügepartner passgenau zu verkleben. Hierdurch soll eine erhöhte Vergleichbarkeit zwischen den Proben gewährleistet werden.

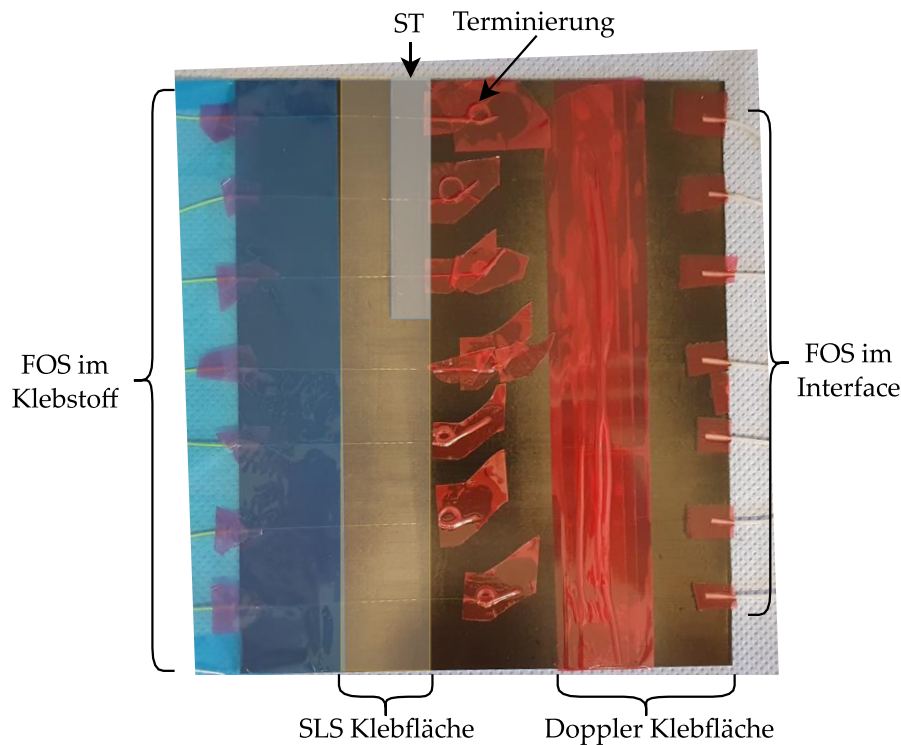


Abbildung 27: Haupttest 1 rechter Fügepartner mit applizierten FOS

3.3.5 Verkleben Fügepartner Haupttest 2 - Klebstofftest

Die im Klebstoff befindlichen FOS sind an beiden Ausgängen aus der Klebschicht stark beschädigungsanfällig. Für das zu terminierende FOS-Ende wird wie im Haupttest 1 vorgegangen, indem FOS-Knoten mit temperaturbeständigem Klebeband direkt auf dem Fügepartner fixiert werden (siehe auch Abbildung 27). Am anderen Ausgang aus der Klebschicht wird der FOS durch eine übergezogene Hülle geschützt. Um ein Fließen des Klebstoffs hierin zu verhindern, wird diese Hülle mit Tape versiegelt. Wichtig ist ebenfalls, dass der FOS, wie in Abbildung 28 zu sehen, auf dem zweiten Fügepartner ausläuft. Dadurch kann ein Abknicken an der Plattenkante aufgrund des Vakuumsacks verhindert werden.

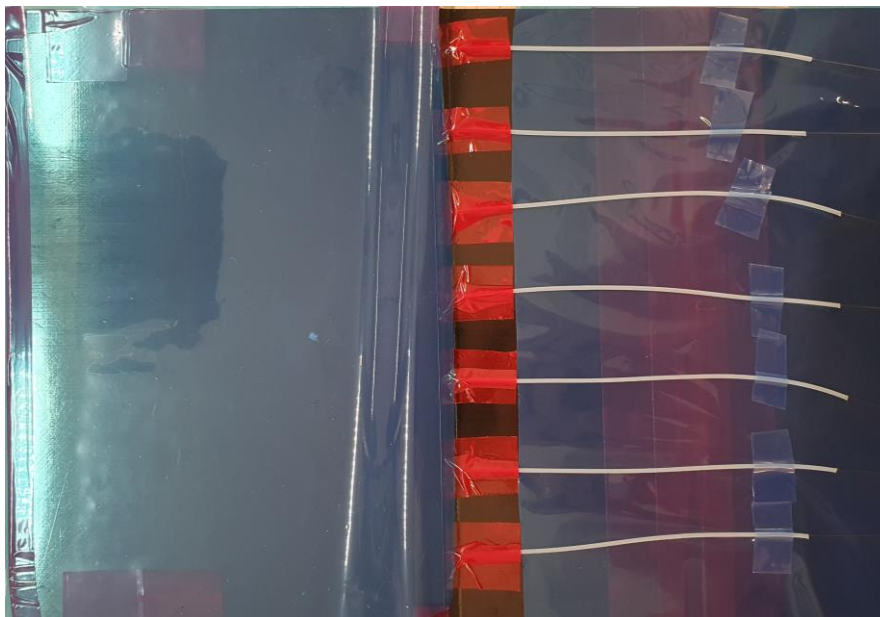


Abbildung 28: Prüfkörperfertigung Haupttest 2 mit Fokus auf FOS Positionierung

Im Vortest 1 wurden zudem zahlreiche Sensoren beim Entformen beschädigt. Grund hierfür ist überschüssiger Klebstoff gewesen, welcher sich verteilt hatte und an Sensoren sowie Abreißgewebe gehaftet hat. Zur Reduktion des Klebstoffs im Aushärteprozess werden die Doppler erst nach dem Aushärten mit *Schnellklebstoff Z70* aufgeklebt. Zudem wird Trennfolie über und unter den Sensoren gelegt, um ein Anhaften am Abrissgewebe zu verhindern (siehe Abbildung 28).

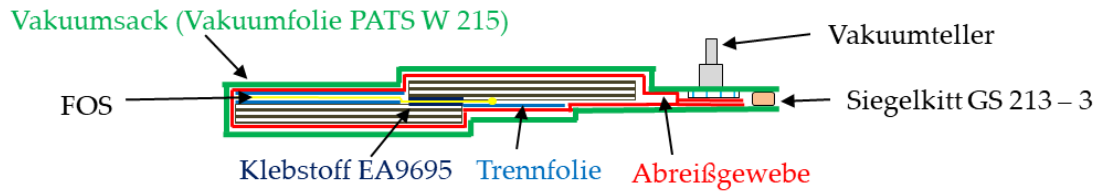


Abbildung 29: Schematischer Vakuumaufbau Verklebung Probekörper Haupttest 2

3.3.6 Spleißen der Fasern

Die FOS im Laminat müssen vor dem Zugversuch mit *Pigtails* verspleißt werden, damit diese an das *ODiSI*-Messsystem angeschlossen werden können. Hierfür müssen zunächst vom *Pigtail* die Schutzhülle sowie die Schutzschicht aus Acryl mit einer Zange vorsichtig abgezogen werden. Ebenfalls muss vom FOS die Polyamid Schutzschicht und die gegebenenfalls vorhandene Schutzhülle entfernt werden. Anschließend werden beide Enden verspleißt. Dies geschieht mit Hilfe des optischen Fusionsspleißers *OFS-95S*. In diesen werden die beiden zu verspleißenden Fasern links und rechts eingelegt und daraufhin in der Mitte verschmolzen und zusammengefügt (siehe Abbildung 30).

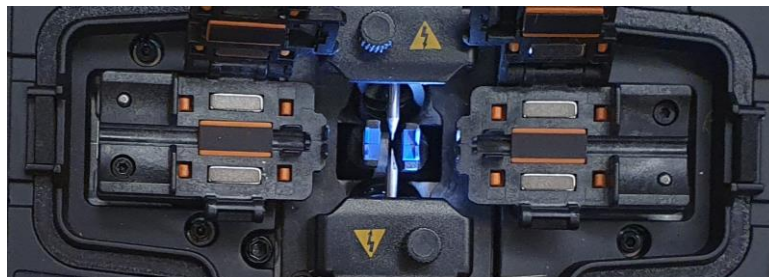


Abbildung 30: Fusionsspleißer OFS-95S

3.3.7 Beschädigungen im Fertigungsprozess

Im Fertigungsprozess, insbesondere bei der Fertigung der Vortests, sind zahlreiche FOS beschädigt worden. Dies führte dazu, dass diese nicht mehr verwendbar waren oder ein nicht lesbares Signal ausgaben. In Tabelle 3 werden diese Fehlerquellen und die zugehörigen Ursachen näher betrachtet. Zudem werden Fertigungshinweise gegeben, welche bereits bei der Fertigung der Haupttests Berücksichtigung fanden.

Bezeichnung	Ursache	Verbesserung Fertigung
Harz bzw. Klebstoff im Schutzmantel behindert Spleißen	Austreten und Fließen von Harz und EA9695, während der Aushärtung	▪ Ausreichend langer Schutzmantel ▪ Versiegelung Schutzmantel temperaturbeständigem Klebeband ▪ Ausweichen auf Prozess ohne Spleißen (EA9394)
FOS Beschädigung bei Entformen	Anhaften FOS an Siegelkit, Abreißgewebe oder Grundplatte	▪ Unterlegen und abdecken der FOS mit Trennfolie ▪ Doppler mit Schnellklebstoff aufbringen
Fehlerhaftes FOS-Signal bei Test	Mutmaßliches Abknicken des FOS im Autoklavprozess	▪ FOS-Austritt möglichst dicht an Grundplatte ▪ Bei Secondary Bonding mit Filmklebstoff nicht umsetzbar

Tabelle 3: FOS Beschädigungsarten und Lösungsansätze

In Abbildung 31 ist zu sehen, wie Klebstoff in den Schutzmantel eingedrungen. Ein Entfernen von Schutzmantel, ausgehärteten Klebstoff und Schutzschicht ist vor dem Spleißen essentiell, jedoch praktisch nicht mehr umsetzbar.

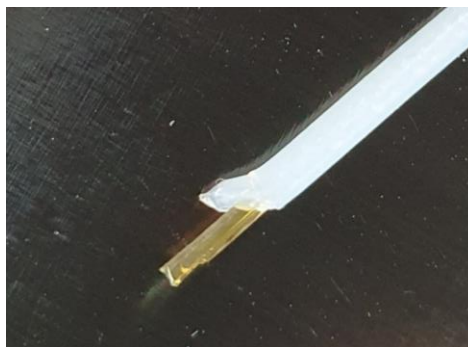


Abbildung 31: Schadensbild - Harz/Klebstoff am FOS

3.4 Testdurchführung SLS

In diesem Abschnitt werden die bei den Tests eingesetzten Mess- und Prüfsysteme kurz eingeführt und deren Betriebsparameter erläutert.

3.4.1 Optisches Messsystem

Zur Messung der Dehnung des selbst nur passiven FOS wird das optische Messsystem *ODiSI 6000* von *Luna Innovation* verwendet. Das *ODiSI*-System verwendet die *Optical Frequency Domain Reflectometry* (OFDR), um das Signal von faseroptischen Sensoren zu interpretieren und somit Dehnungsmessungen am Prüfkörper durchzuführen. Das *ODiSI*-System kann das reflektierte Signal entlang eines Sensors in unabhängige Dehnungs- oder Temperaturmessungen über die gesamte Länge der Faser in Intervallen von 0,65 mm auswerten [23]. Der Hardwareaufbau ist vereinfacht in Abbildung 32 dargestellt.

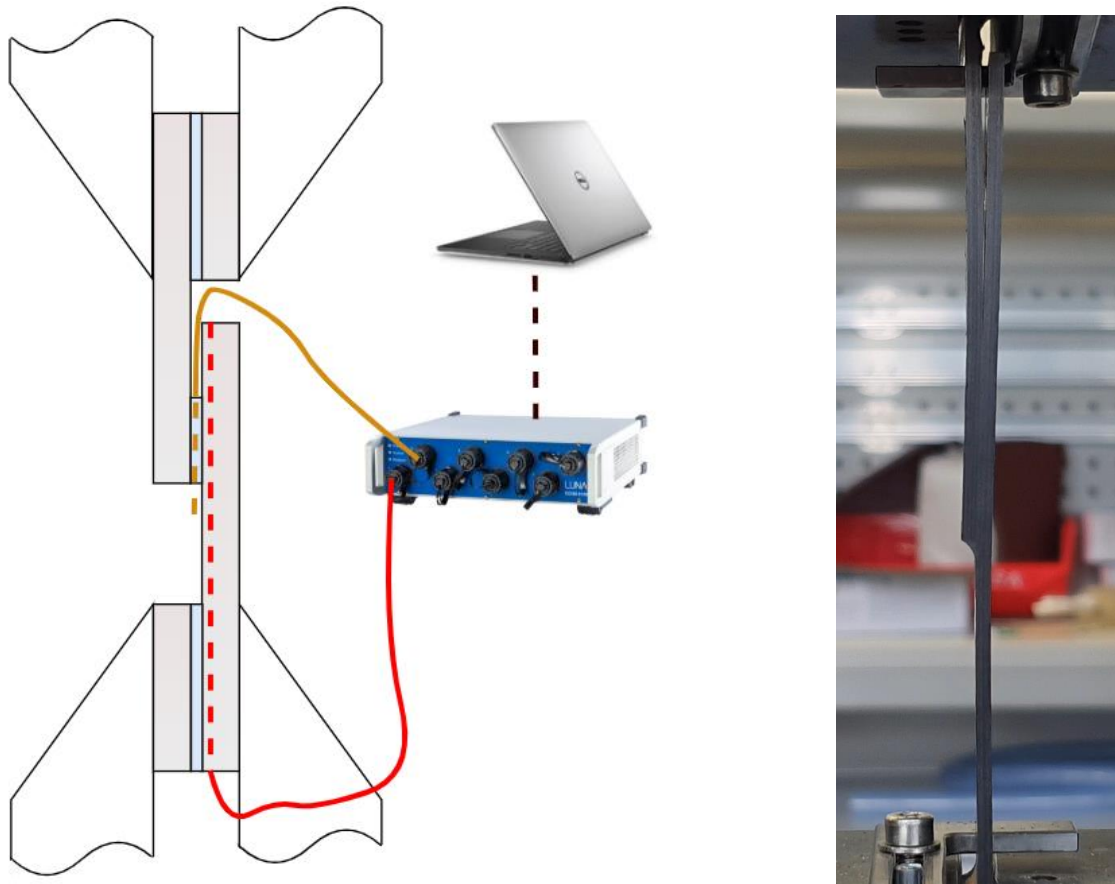


Abbildung 32: Prüfkörper mit ODiSI (links), Prüfkörper unter Zugspannung (rechts)

Nach dem Starten der Software muss zunächst für neue Sensoren ein *Key* erstellt werden. Dieser dient als Referenzdatensatz und wird mit Messdaten verglichen, um die Dehnung zu berechnen. Anschließend werden mithilfe von Kältespray die Position von Anfang und Ende der Überlappung bestimmt. Diese werden als

sogenannte *Gages* im System gespeichert. Es ist anzumerken, dass dieses Verfahren sehr ungenau ist und somit Anfang und Ende der Überlappungsklebung in den Messdaten nicht genau feststellbar ist. Anschließend wird der Prüfkörper in die Prüfmaschine eingespannt. Bevor die Prüfung gestartet wird, werden die Dehnungen genullt, um bereits beim Einspannen aufgetretene Dehnungen sowie die Vorspannkraft in der Messung zu vernachlässigen.

3.4.2 Prüfmaschine

Es wird mit der Prüfmaschine *Zwick Z400* getestet. Deren relevante Prüfparameter sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Parameter	Wert	Einheit
Maximalkraft	400	KN
Anpressdruck	150	Bar
Freie Länge	175	mm
Vorspannkraft	100	N

Tabelle 4: Parameter Prüfanlage Zwick Z400

Für Vortest 1 wurde bei einer Traversengeschwindigkeit von 2 mm/min bis zum Bruch getestet. Da das ODiSI-System und die Prüfanlage keine Schnittstelle besitzen wurde die zeitliche Korrelation mittels Videoaufnahme ermittelt. Um bei diesem Vorgang eine höhere Genauigkeit zu erzielen wurde im Vortest 2 die Traversengeschwindigkeit auf 0,5 mm/min reduziert. Zudem wurden für jeden Prüfkörper 3 und 6 kN separat angefahren, um diese Dehnungsmessung für einen statischen Vergleich der Dehnungen untereinander einfacher verwenden zu können. Im Haupttest wurde aus praktischen Gründen wieder eine Traversengeschwindigkeit von 2 mm/min gewählt, da die hohe Anzahl der Prüfkörper die Testdauer und Datensatzgröße erheblich erhöht hätten. Zudem wurde jeder Versuch durch eine an die Prüfmaschine gekoppelte Videoaufnahme aufgezeichnet.

3.5 Numerische Simulation der SLS-Probe

Zur Verifikation der Zugprüfung wird zusätzlich ein numerisches Simulationsmodell erstellt. Das lineare Finite-Elemente Modell, kurz FEM, wird mit der FE-Software *Patran* erstellt und implizit mit dem Solver *MSC Nastran* berechnet.

Zunächst wird ein 2D Modell der SLS-Probe direkt in *Patran* erstellt. Dieses besitzt die in Abbildung 33 aufgetragenen Maße.

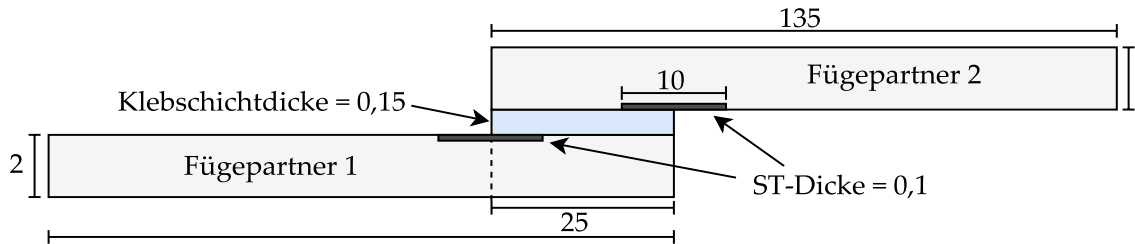


Abbildung 33: Bemaßung 2D-Modell Patran

Anschließend werden die Flächen mit Materialeigenschaften parametrisiert (siehe Tabelle 5). Die E-Module wurden in Vorarbeiten von Schollerer ermittelt (siehe Kapitel 3.1).

Material	E-Modul [MPa]	Poissonzahl [-]	Materialtiefe [mm]
CFK-Fügeteil 1 und 2	60 579	0,31	25
Klebstoff EA9695	2576	0,43	25
Klebstoff EA9394	4237	0,45	25
PVDF	1716	0,46	25

Tabelle 5: Materialparametrisierung FE-Modell [3]

Im nächsten Schritt wird ein *IsoMesh* bestehend aus *Quad4* erstellt. Dieses wird im Bereich der Überlappungsklebung mit einer Kantenlänge von 0,025 mm vernetzt. Um den Rechenaufwand zu reduzieren wird das Mesh, ab einer Entfernung von 10 mm von der Klebung gröber und hat dort eine Kantenlänge von 0,25 mm. Eine Netzfeinheitsstudie hat gezeigt, dass 1000 Elemente über die Klebschichtlänge ausreichend sind.

Am Fügepartner 1 werden die Knoten am freien Ende auf einer Länge von 60 Millimetern fest eingespannt. Dies entspricht der Einspannlänge an der Prüfmaschine. Um dies zu erreichen, wird das *Displacement* der entsprechenden außenliegenden Knoten in alle Koordinatenrichtungen auf 0 festgesetzt. Am

Fügepartner 2 werden die Knoten am freien Ende auf einer Länge von 60 Millimetern losgelagert. Hierfür wird das *Displacement* dieser Knoten in y und z Koordinatenrichtung auf 0 festgesetzt. Am Fügepartner 2 wird des Weiteren eine Kraft von 3 kN am freien Ende angelegt. Eine Übersicht der Randbedingungen und angreifenden Kräfte sind in Abbildung 34 dargestellt.

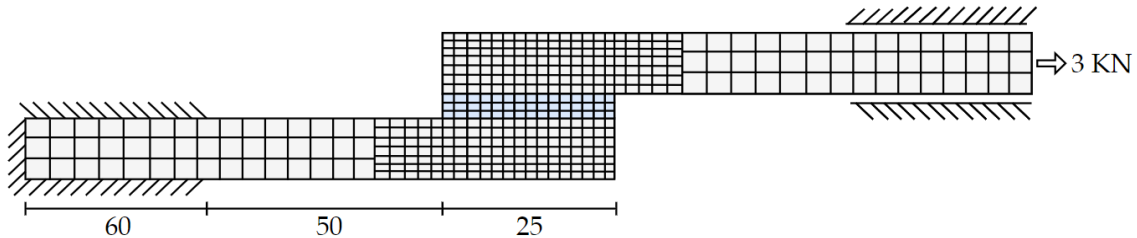


Abbildung 34: Übersicht Mesh-Aufbau, Kräfte und Randbedingungen

Nach der FEA (*Finite Elemente Analyse*) durch MSC Nastran werden die Ergebnisse als *xdb*-Datei zur weiteren Analyse zur Verfügung gestellt. Hierbei werden Datensätze für die Sensorlage im Interface und in der Klebschicht erzeugt. Die Auswertung der Dehnung erfolgt in x-Richtung und wird den Messergebnissen des ODiSI-Systems in Kapitel 4 gegenübergestellt. Im Wesentlichen werden vier Variationen des FE-Modells herangezogen:

1. Filmklebstoff EA9695 **ohne** *Surface Toughening*
2. Pastöser Klebstoff EA9394 **ohne** *Surface Toughening*
3. Filmklebstoff EA9695 **mit** *Surface Toughening*
4. Pastöser Klebstoff EA9394 **mit** *Surface Toughening*

In der Auswertung werden die unterschiedlichen Sensorlagen durch Analyse der zugehörigen Elemente berücksichtigt. Die FEM Ergebnisse der vier unterschiedlichen Varianten sind für die Interfacelage in Abbildung 35 und für die Sensorlage in der Klebschicht in Abbildung 36 dargestellt. Die Auswertung erfolgt zusammen mit den FOS-Messdaten in Kapitel 4.

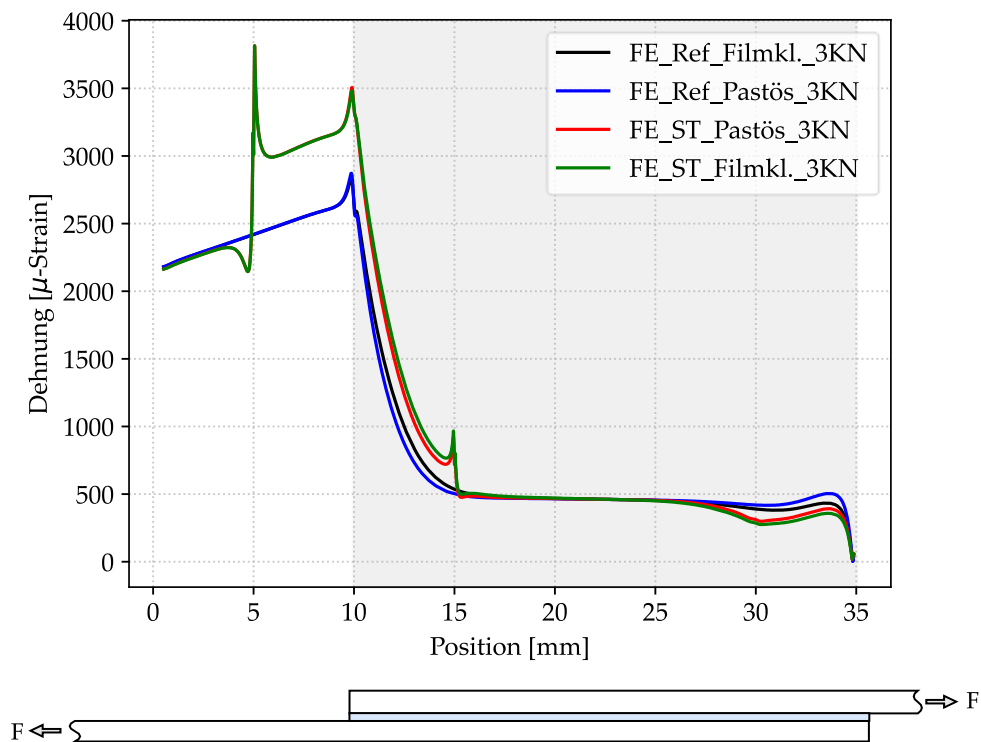


Abbildung 35: Auswertung FEM in der Interfacelage mit 25 mm Überlappung

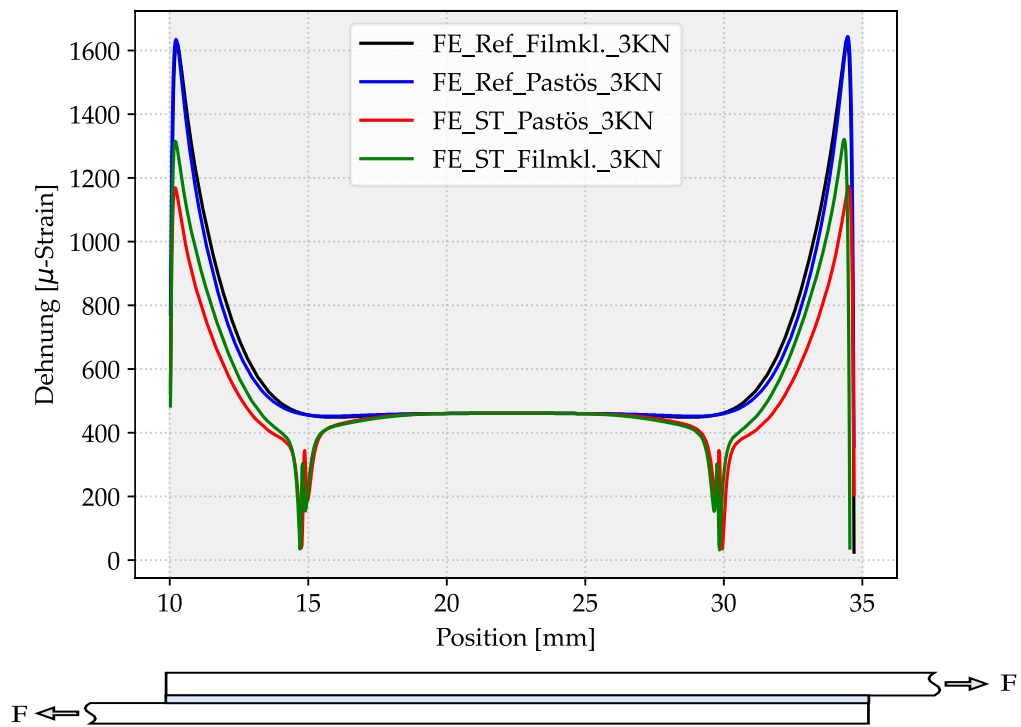


Abbildung 36: Auswertung FEM in der Klebschicht mit 25 mm Überlappung

4. Ergebnisse der Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Tests ausgewertet. Hierbei werden FOS-Messdaten, FEA-Vergleichsdaten sowie Bruch- und Schliffbilder analysiert. Nach der Auswertung der Vortestergebnisse wird mit der detaillierten Analyse der Haupttests fortgefahren.

4.1 Auswertung der Vortestergebnisse

Für die Vortests wurden SLS-Prüfkörper hergestellt, die jeweils mit FOS ausgestattet worden sind. Ziel der Vortest war es herauszufinden, wie ein Prüfkörper hergestellt werden kann, mit dem möglichst gute FOS-Datensätze erfasst werden können. Die Auswertung konzentriert sich auf die Analyse der verfügbaren FOS-Daten und der Ursachen für Sensorausfälle.

4.1.1 Auswertung Vortest 1

Im Vortest 1 wurden insgesamt 14 Prüfkörper gefertigt, in welche jeweils entweder ein oder zwei FOS appliziert wurden. In Summe könnten somit theoretisch 21 Sensoren getestet werden. Bei der Fertigung der Sensoren gab es jedoch folgende Sensorverluste:

- 5-mal war Spleißen aufgrund von Klebstoff im Mantel nicht möglich.
- 1-mal wurde ein Sensor beim Sägen beschädigt.
- 4-mal wurden Sensoren beim Entformen beschädigt/abgerissen.

Von den verbleibenden 11 Sensoren waren 7 defekt. Diese wurden mutmaßlich überwiegend am Laminatauslauf abgeknickt oder anderweitig während des Autoklavprozesses beschädigt. Die verbleibenden Sensoren sind in Tabelle 6 aufgelistet, nur diese wurden getestet.

Prüfkörper	Sensorlage	Messsignal	Bruchkraft [N]
3	Interfacelage	gut	13 294
4	Interfacelage	gut	13 875
6	Interfacelage	gut	13 391
8	Klebschicht	mäßig	13 481

Tabelle 6: Messergebnisse Vortest 1

Auffällig ist, dass von den funktionierenden Sensoren, drei im Interface liegen. Die Sensoren unterhalb der ersten Lage in Prüfkörper 3 und 4 lieferten trotz mutmaßlich gleicher Handhabung kein Signal, welches weiter als zum Lamineingang reichte. Drei mögliche Hypothesen sind:

- Abscheren am Lamineingang im Vakuumsack
- Zufall: Insgesamt sehr hohe Ausfallquote im Vortest 1
- Beschädigung / Zerdrücken zwischen den Laminatschichten

Letztere These kann weitergehend mit Hilfe des Schliffbilds in Abbildung 37 analysiert werden. Hierbei erkennt man, dass beide Sensoren sich quasi in die 0°-Interfacelage eingefügt haben. Bei der Fertigung wurde der Sensor unterhalb der ersten Lage, jedoch an die darunter befindliche 45°-Lage angeedrückt. Dennoch scheint der Sensor unterhalb der ersten Lage im Schliffbild intakt. Ein Zerdrücken kann als Beschädigungsgrund somit ausgeschlossen werden. Beim Vergleich der FE-Ergebnisse mit den Messergebnissen von den Interface-Sensoren 3, 4 und 6 lassen sich korrelierende Verläufe erkennen. Wie in Abbildung 38 zu erkennen liegen die Messergebnisse in der Größenordnung der Simulation. Hierbei soll wiederholt angemerkt werden, dass die Simulation rein linear elastisch durchgeführt wurde und eine deutliche höhere Auflösung als die 0,65 mm des ODiSI-Systems bietet. Für einen einzigen Sensordatenpunkt des FOSS besitzt die FEM 26 Knoten.

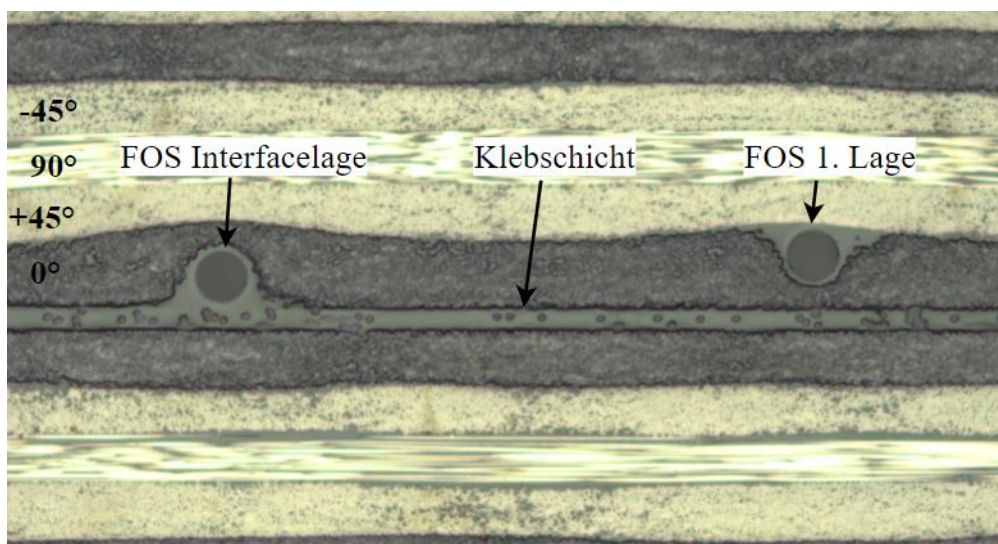


Abbildung 37: Schliffbild FOS Interfacelage und FOS unter der ersten Lage

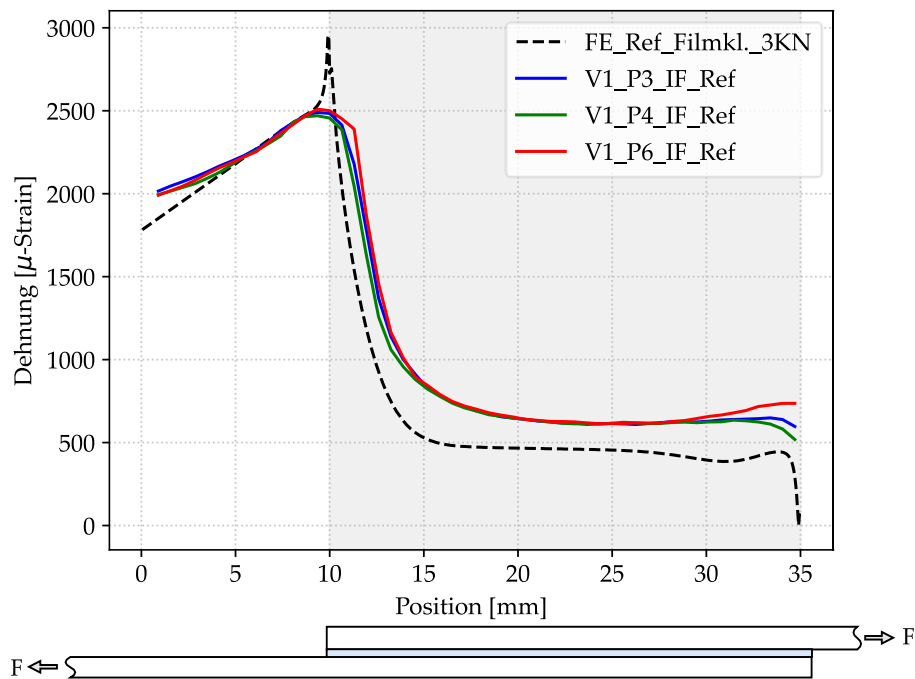


Abbildung 38: Vergleich FOS-Messung mit FE-Analyse bei 3 kN in der Interfacelage

Das Bruchbild der von Prüfkörper 3 (siehe Abbildung 39 links) weist ein überwiegend kohäsives Bruchverhalten auf. Die schuppige Verteilung des Klebstoffs entsteht als Folge der vorherrschenden Schubbelastung. Neben dem vorherrschenden kohäsiven Bruchverhalten zeigt sich an einigen Stellen zusätzlich das Versagen der ersten Faserschicht, erkennbar ist dies an der 0° Faserausrichtung. Für Prüfkörper 8 ist ein sehr randnaher Kohäsionsbruch zu erkennen. Diese zeigt durch den Wechsel der Klebschichtanhaftung auf die gegenüberliegende Seite.

Im Vergleich von Prüfkörper 3 und 8 ist zu beachten, dass bei Prüfkörper 8 die doppelte Klebschichtdicke vorliegt. Diese wurde gewählt da sonst der in der Klebschicht befindliche FOS zwischen den bereits ausgehärteten Fügepartnern zerdrückt werden könnte. Die doppelte Klebschichtdicke beträgt gemittelt etwa 0,15 mm. Dies entspricht genau dem FOS Durchmesser bestehend aus Kern, Mantel und Beschichtung (siehe Abschnitt 2.2). In Abbildung 40 ist ein in der Klebschicht befindlicher FOS im Schliffbild gezeigt.

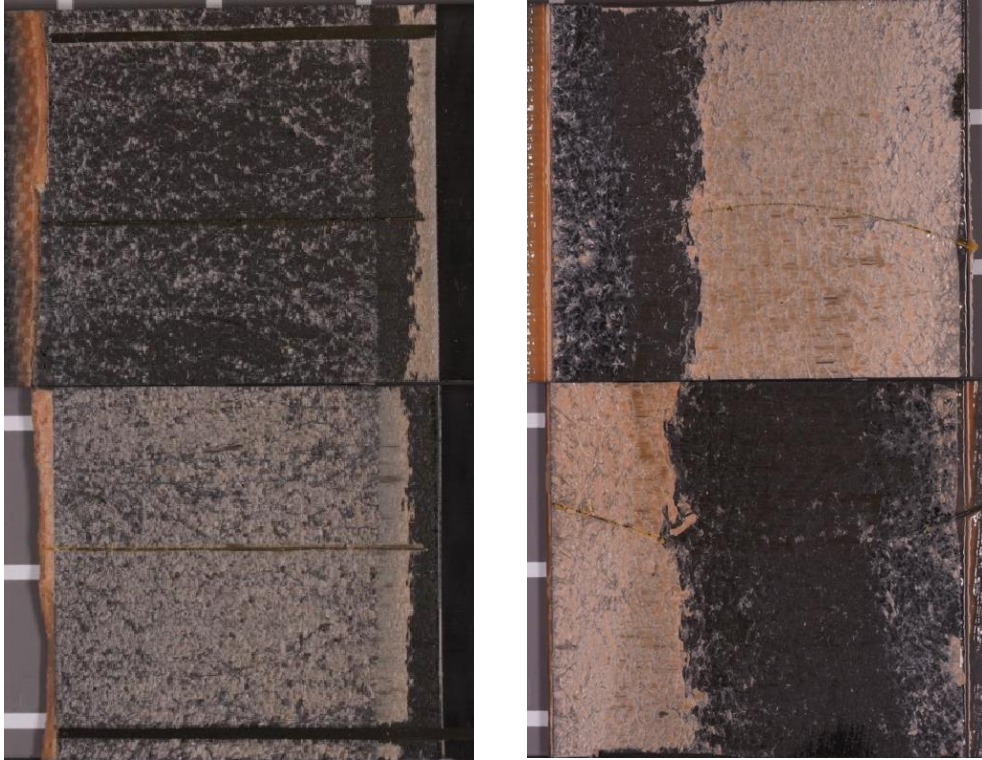


Abbildung 39: Bruchbilder Vortest 1: Probe 3 (links) und Probe 8 (rechts)

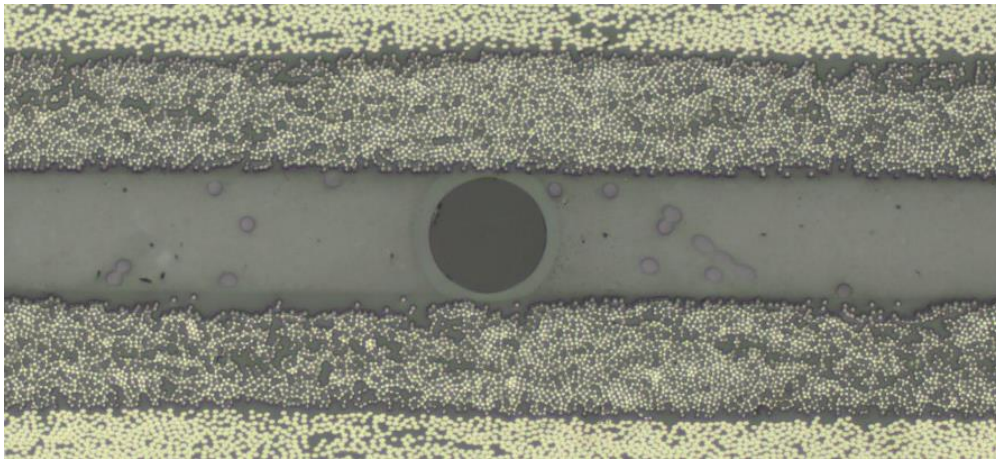


Abbildung 40: Schliffbild Prüfkörper mit FOS in der Klebschicht

Von den im Klebstoff befindlichen FOS konnte lediglich einer ausgewertet werden, da entweder der FOS bereits im Fertigungsprozess beschädigt wurde oder das gemessene Signal zu fehlerbehaftet war. Das Dehnungssignal des getesteten Prüfkörper 8 ist in Abbildung 41 zu sehen. Der Dehnungsverlauf ähnelt weitestgehend dem der Interfacesensoren. Dies lässt sich mit dem Probendesign in Abbildung 14 erklären. Der FOS befindet sich außerhalb des Überlappungsbereichs in einer auf dem Fügepartner befindlichen Klebstoffschicht, hierdurch wird in diesem Bereich ein dem Interfacesensor ähnliches Dehnungssignal gemessen. Am rechten Überlappungsende sollte theoretisch auch eine klare Dehnungsspitze zu erkennen sein. Hier ist allerdings nur ein leichter Anstieg zu erkennen. Ein Erklärungsansatz ist, dass die Qualität des Messsignal nur mäßig war, das heißt, dass Messpunkte zeitweise keine Daten enthielten und diese somit linear interpoliert worden sind, um einen durchgehenden Verlauf plotten zu können.

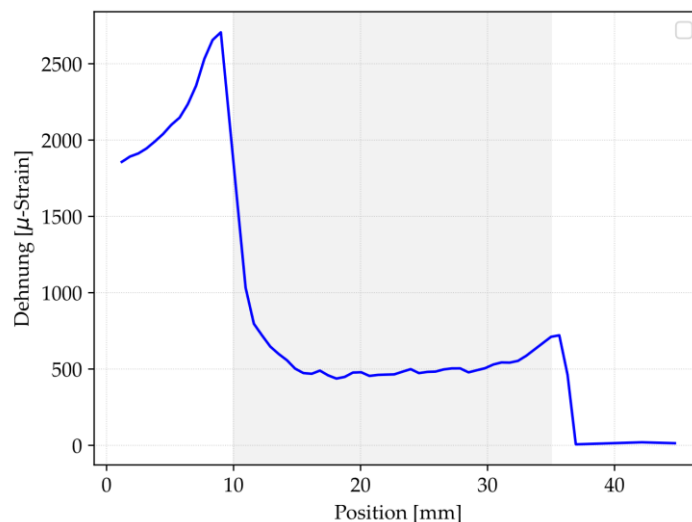


Abbildung 41: FOS Dehnungssignal im Klebstoff Prüfkörper 8

Zusammenfassend hat der Vortest 1 gezeigt, dass es bei dem verwendeten Fertigungsverfahren eine hohe Ausfallquote gibt. Um vergleichbare, aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, muss das Fertigungsverfahren angepasst werden. Hierbei steht insbesondere das zweifache Aushärten im Autoklav im Fokus. Durch das Verwenden eines pastösen Klebstoffsystems kann der zweite Aushärtezyklus eingespart werden. Dieses Vorgehen wurde im Vortest 2 angewandt.

4.1.2 Auswertung Vortest 2

Für den Vortest 2 wurden wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben sechs Prüfkörper gefertigt, welche mit dem pastösen Klebstoffsystem EA9394 verklebt worden sind. Alle Prüfkörper wurden zunächst mit statischen Kraftwerten von 3 und 6 kN belastet. Daraufhin wurde Prüfkörper 1 bis 5 von 0 N bis zum Bruch belastet. Der Prüfkörper 6 wurde zur Erstellung eines Schliffbildes verwendet und dementsprechend nicht bis an die Bruchgrenze belastet. Die Messergebnisse sind Abbildung 42 dargestellt.

Die Messergebnisse weisen stets eine erhöhte Dehnung im Bereich der Überlappung auf. Es lassen sich, jedoch keine klaren Unterschiede zwischen den Prüfkörpern mit und ohne *Surface Toughening* erkennen. Ebenso lässt sich keine Korrelation wie beim Vortest 1 mit der FEA erkennen.

Als Erklärungsansatz konnte im Nachgang an die Auswertung das abweichende *Coating* der Glasfasern herangezogen werden. Dieses besteht nicht wie bei den FOS ohne Stecker aus Polyamid, sondern aus Acryl, welches keine starke Verbindung zum Kern bzw. Mantelglas besitzt. Hierdurch werden Dehnungen nicht in ausreichendem Maße an den messenden Teil des FOS übertragen. Die gemessenen Sensorsignale haben somit nur eine äußerst geringe Aussagekraft.

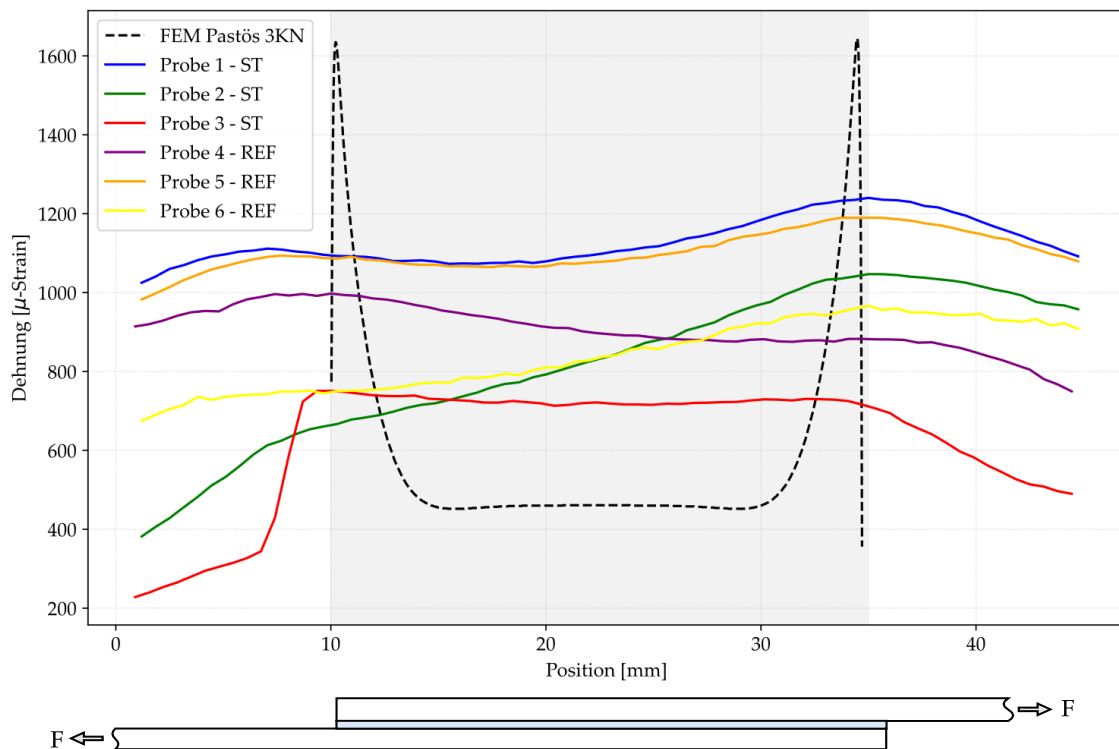


Abbildung 42: Dehnungsvergleich FEM und FOS bei 3kN im pastösen Klebstoff

Die Bruchbilder zeigen für die ST-Proben und die Referenzproben einen Kohäsionsbruch. Im Schliffbild der pastös verklebten Prüfkörper erkennt man die mittige Lage des FOS im pastösen Klebstoff. Die Klebschichtdicke betrug im Schnitt rund 0,5 mm.

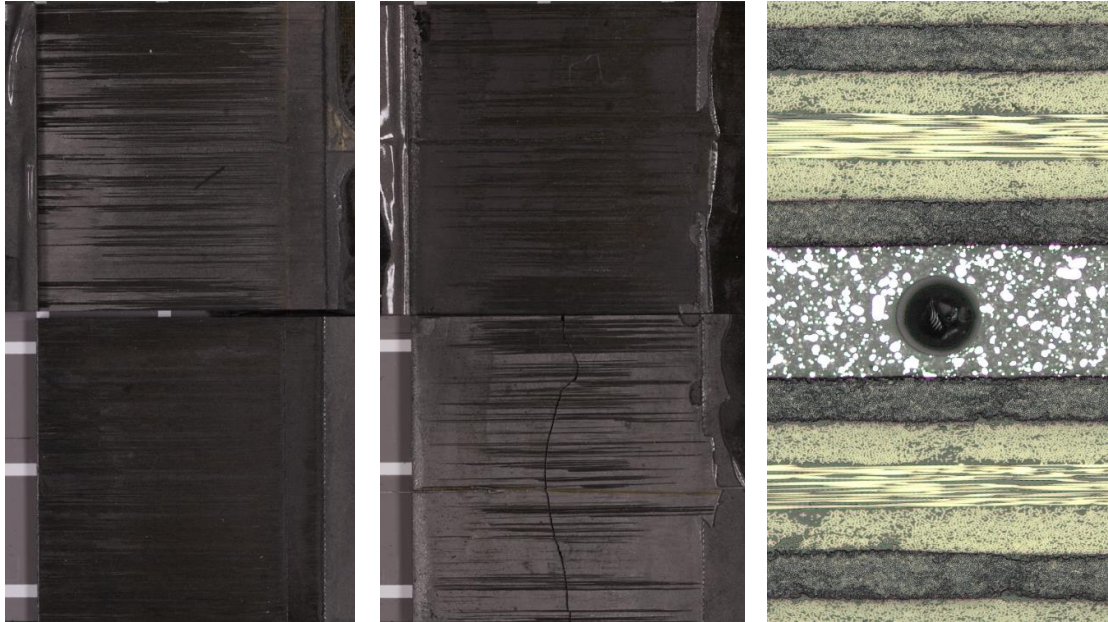


Abbildung 43: Bruchbilder P2-ST (Links) & P5-Referenz (Mitte) & Schliffbild (Rechts)

4.1.3 Zusammenfassung Vortestergebnisse

Vortest 1 hat verdeutlicht, dass FOS hoch fragile Messsensoren sind und ein hohes Maß an Genauigkeit und Aufmerksamkeit bei der Fertigung von Prüfkörpern mit FOS erforderlich ist. Es hat sich gezeigt, dass die Sensoren in der Interfacelage die geringste Ausfallwahrscheinlichkeit aufweisen. Ebenso hatten die Interfacesensoren die mit Abstand stabilsten Messsignale mit sehr geringen Schwankungen. Der Vortest 2 hat gezeigt, dass sich mit Hilfe des pastösen Klebstoffsystems der fertigungsbedingte Ausfall von FOS deutlich reduzieren lässt. Es musste festgestellt werden, dass das direkte Platzieren von Pigtails im Klebstoff nicht den erhofften Vorteil bringen konnte. Für das Design des Haupttests wurde sich daher dazu entschieden zwei Testserien zu fertigen, welche jeweils Referenz- und ST-Proben beinhalten. Die erste Haupttestreihe fokussiert sich auf die Interfacesensoren. Um möglichst viele gute Messsignale aufnehmen zu können wurde sich dazu entschieden die Prüfkörper mit den FOS in der Interfacelage pastös zu verkleben. Parallel wird eine zweite Haupttestreihe gefertigt, bei welchen die FOS nur in der Filmklebstoffschicht platziert werden. Erwartet wird, dass durch die Reduzierung der Komplexität der Prüfkörper eine höhere Funktionalität der in der Klebschicht befindlichen FOS erreicht werden kann.

4.2 Analyse der Haupttestergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die beiden Hauptuntersuchungen ausgewertet. Hierfür werden die aufgenommenen FOS-Messdaten graphisch aufbereitet und hinsichtlich ihrer Qualität eingeordnet. Ein Fokus liegt auf der Unterscheidung zwischen Referenzproben und denen mit *Surface Toughening*. Zur Unterstützung werden die FEA Ergebnisse hinzugezogen.

4.2.1 Auswertung Haupttest 1 - Interfacetest

Der erste Haupttest besteht aus insgesamt 7 Prüfkörpern, welche mit dem pastösen Klebstoffsystem *EA9394* verklebt worden sind. Durch den Wechsel des Klebstoffs konnte die Funktion aller FOS erzielt werden. Lediglich der Sensor von Probe 5, lieferte ein etwas lückenhaftes Signal. Dieser wird daher in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt und wird für ein Schliffbild verwendet. Wie in Abbildung 44 zu erkennen ist, zeichnen die Messdaten der Interfacesensoren sehr ähnliche Dehnungsverläufe. Die Dehnungen mit *Surface Toughening* liegen in der Spitze etwa 300 μ -Strain über den Dehnungen der Referenzproben.

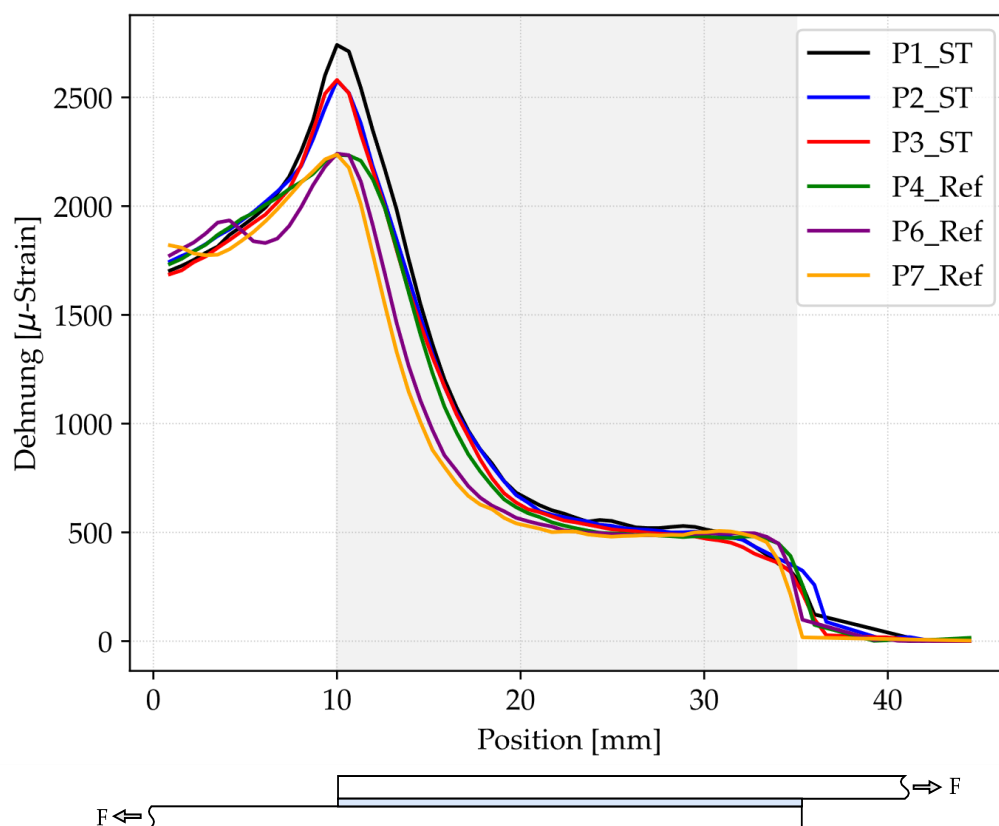


Abbildung 44: Messergebnisse FOS in der Interfacelage bei 3 kN

Um einen besseren Vergleich mit der FEA zu ermöglichen, werden die FOS-Messdaten je Messserie gemittelt. Die gemessenen Dehnungen des FOSS liegen in den Spitzen sowie außerhalb der Überlappung etwas niedriger (siehe Abbildung 45). Im mittleren Bereich der Überlappung liegen die Dehnung der FEA und des FOS sehr nah beieinander. Die FE-Analyse bestätigt die höheren Spitzendehnungen bei den Proben mit *Surface Toughening*. Insgesamt korrelieren die Verläufe gut, jedoch mit Versatz. Dieser könnte auf einen möglichen plastischen Dehnungsanteil hinweisen. Ebenso muss beachtet werden, dass die Interface-sensoren sich in der steiferen 0°-Lage befinden und die FEA vereinfacht als isotrop simuliert wurde.

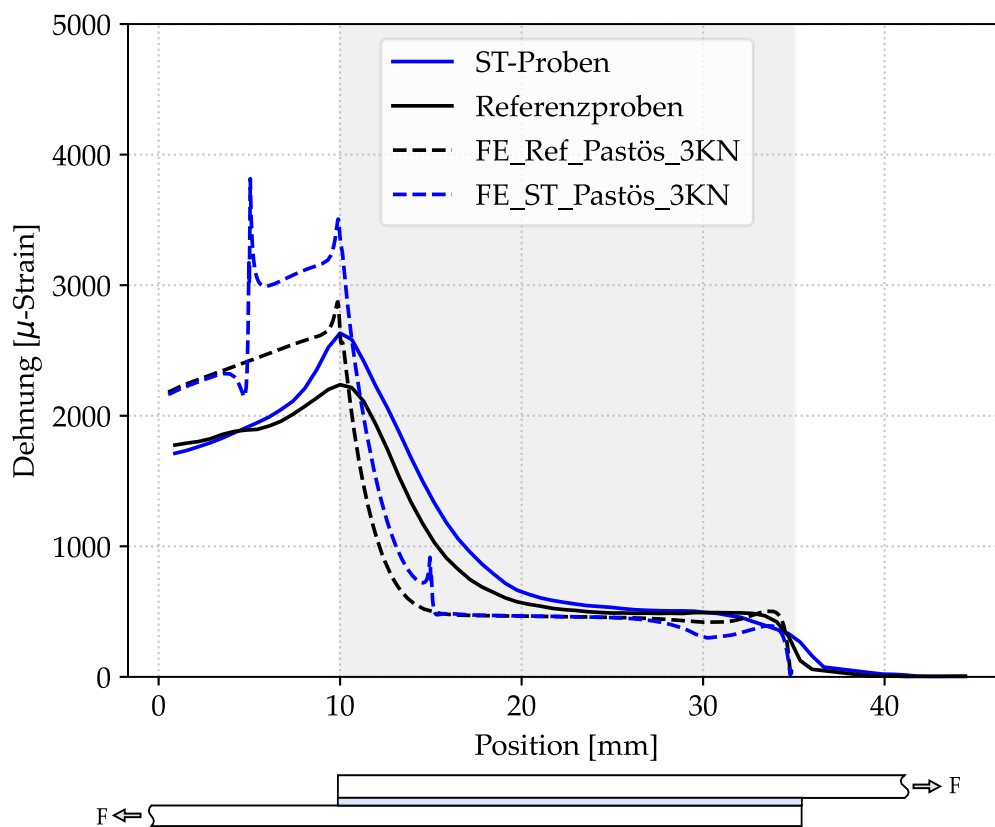


Abbildung 45: Vergleich FOS-Daten in der Interfacelage mit FE-Analyse

4.2.2 Auswertung Haupttest 2 - Klebstofftest

Für den zweiten Haupttest wurden insgesamt 14 Prüfkörper gefertigt. Diese wurden auf zwei Platten gefertigt, eine mit und eine ohne *Surface Toughening*. Die Platten wurden, wie im Abschnitt 3.2.3 beschrieben, mit zwei Lagen Filmklebstoff EA9695 verklebt. Zwischen den beiden Lagen befand sich jeweils ein FOS. Alle FOS konnten verspleißt werden. Von den sieben Referenzprüfkörpern hatten zwei ein schlechtes bzw. fehlerhaftes Signal. Von den sieben ST-Prüfkörpern waren drei nicht auswertbar. Dies bedeutet eine Messquote von 64 %, welches eine beträchtliche Steigerung zu den 19 % aus Vortest 1 darstellt. Die Messergebnisse werden wie bei den vorangegangenen Auswertungen bei einer Kraft von 3 KN verglichen. Die FOS-Daten der Referenzproben sind Abbildung 46 geplottet. Die Messdaten der Proben mit Surface Toughening sind Abbildung 47 dargestellt. Für beide Probenserien lässt sich das charakteristische Dehnungsbild mit Spitzendehnungen an den Rändern der Überlappung erkennen.

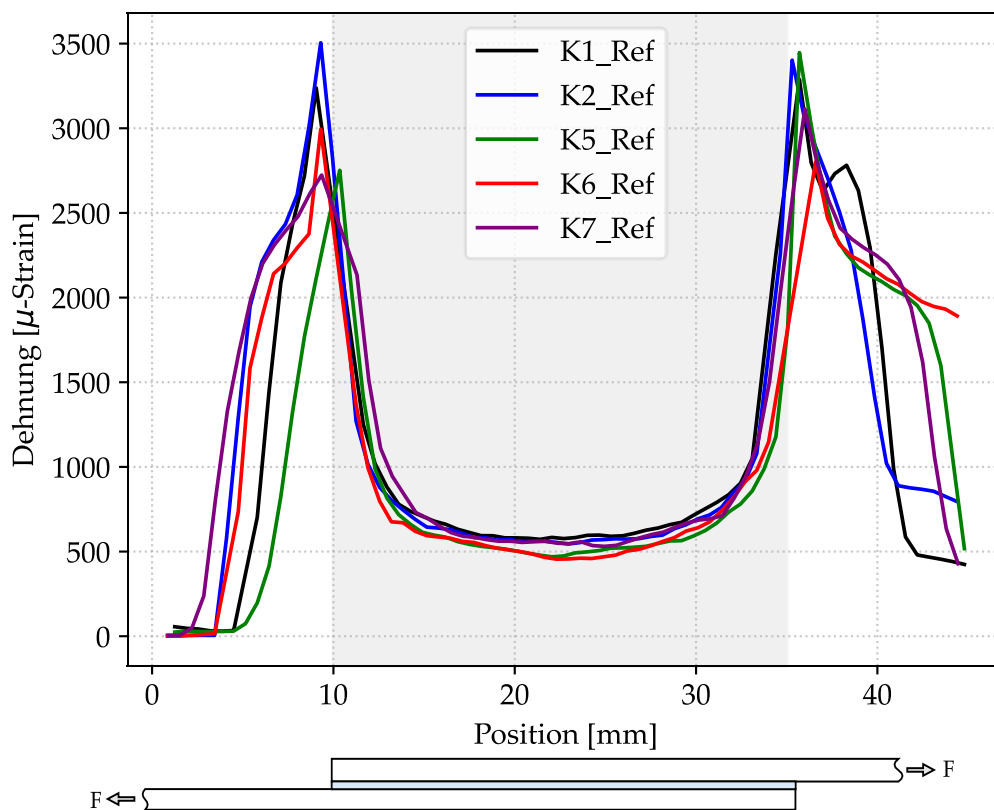


Abbildung 46: FOS Messergebnis Referenzproben bei 3 KN

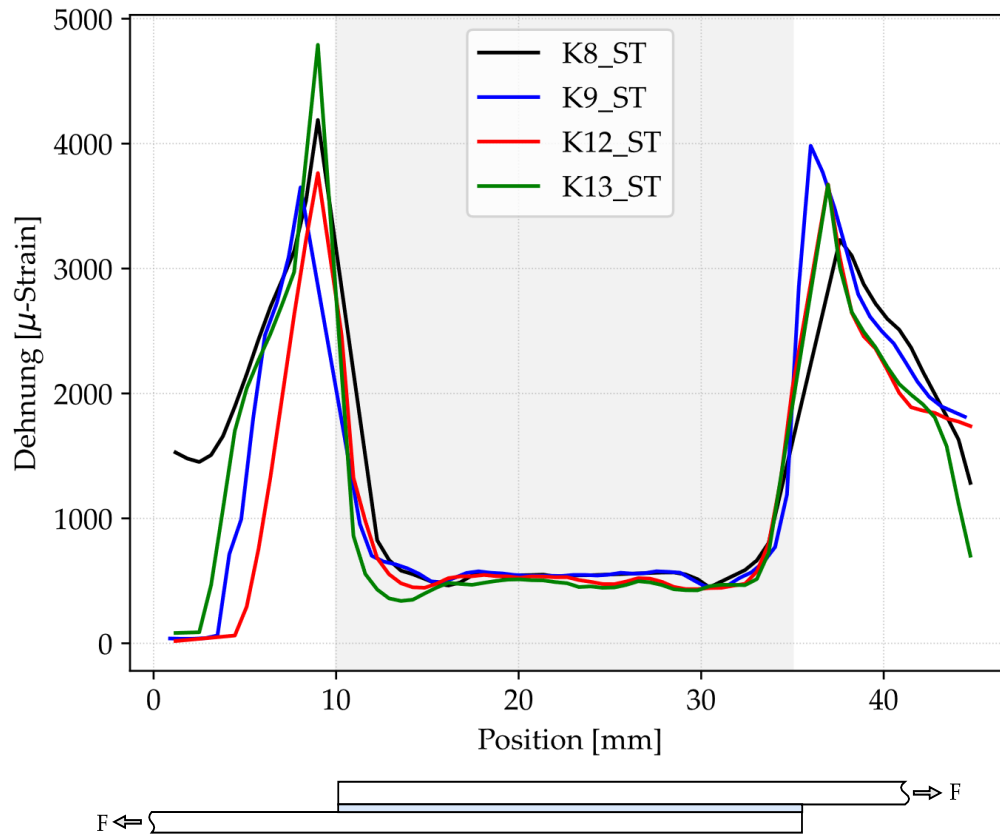


Abbildung 47: FOS Messergebnis ST-Proben bei 3 kN

Die Mittelung beider Probenserien ermöglicht einen besseren Vergleich sowohl untereinander, als auch mit der FE-Analyse. Die Dehnungen in Schubrichtung sind in Abbildung 48 zusammen dargestellt. Man erkennt, dass für die Prüfkörperreihe mit *Surface Toughening* höhere Dehnungen in der Spitze gemessen werden, als bei den Referenzproben. Das mittlere Grundniveau in der Mitte der Überlappung hingegen ist nahezu identisch bei ca. 530 $\mu\text{-Strain}$. Dies korreliert mit der numerischen Dehnung in der Überlappungsmitte. Auffällig sind auch lokal begrenzte Spannungsabsenkungen in der Überlappung im Bereich des *Surface Toughenings*. Hier liegen die Dehnungen der ST-Proben kontinuierlich unter den Dehnungen der Referenzproben. Beim Vergleich mit der FE-Analyse wird deutlich, dass die gemessenen Dehnungen in x-Richtung vor allem an den Rändern höher liegen als die numerischen Dehnungswerte in der Klebschicht. Die Erklärung hierfür ist, dass die Spitzenspannungen außerhalb der eigentlichen Überlappung gemessen worden sind. Dies ist möglich da die FOS durch das Fließen des Klebstoffs quasi zu Interfacesensoren außerhalb der Überlappungslänge werden. Dadurch werden in der Spitze Dehnungen, wie im Interface gemessen. Vernachlässigt man die hohen Dehnungsspitzen der FE im Interface, so korrelieren FEA und Messung quantitativ sehr stark.

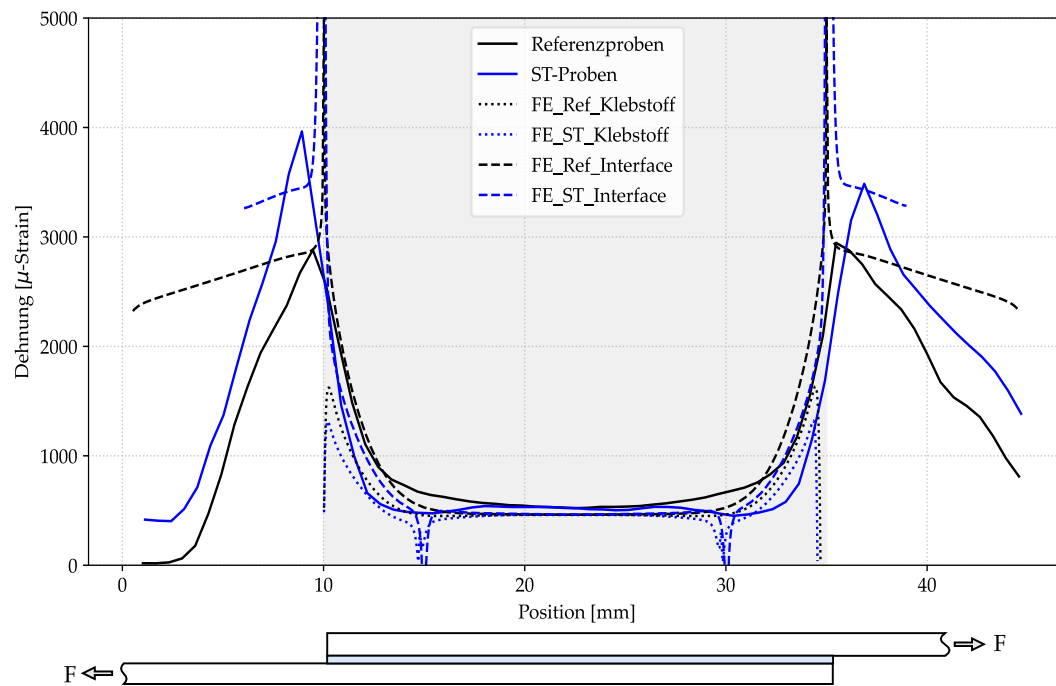


Abbildung 48: Vergleich gemittelter FOS-Daten in Klebschicht mit numerischen Ergebnissen bei 3 kN

Der Übergang von der Überlappung zum einfachen Fügepartner und der dabei ausgetretene Klebstoff ist in Abbildung 49 gezeigt.

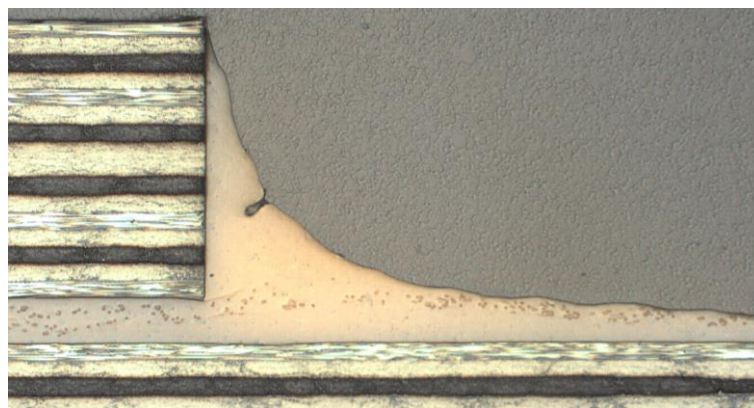


Abbildung 49: Ausgetretener Filmklebstoff aus Überlappungsklebung

Die Bruchbilder des zweiten Haupttest zeigen für die Referenzproben das typische Bild eines randnahen Kohäsionsversagen. Man kann somit von einer hohen Qualität der Klebung ausgehen. Stellvertretend für die Referenzproben ist in Abbildung 50 (links) das Bruchbild von Prüfkörper K7 gezeigt. Das Bruchbild der *Surface Toughening* Probenserie setzt sich aus kohäsivem Bruch und Faserbündelversagen der ersten Laminatschicht zusammen (siehe Abbildung 50 Mitte). Dies deutet daraufhin, dass beim Aushärtprozess eines Fügeteils Abweichungen gab. Dieses spiegelt sich auch in einer sehr verteilten Festigkeit wieder. Die FOS-Messdaten können dennoch als aussagekräftig bewertet werden, da stets der statische Belastungsfall von 3 KN betrachtet wurde. Das Schliffbild der ST-Proben zeigt, dass der FOS sich teilweise in den PVDF-Streifen eingefügt hat. Dies bedeutet, dass auch Dehnungen des *Surface Toughening* einen Einfluss auf das Messergebnis haben könnten. Dies liefert eine mögliche Begründung, warum die Dehnungswerte der ST-Proben, wie in Abbildung 48 zu sehen, über denen der Referenzproben liegen.

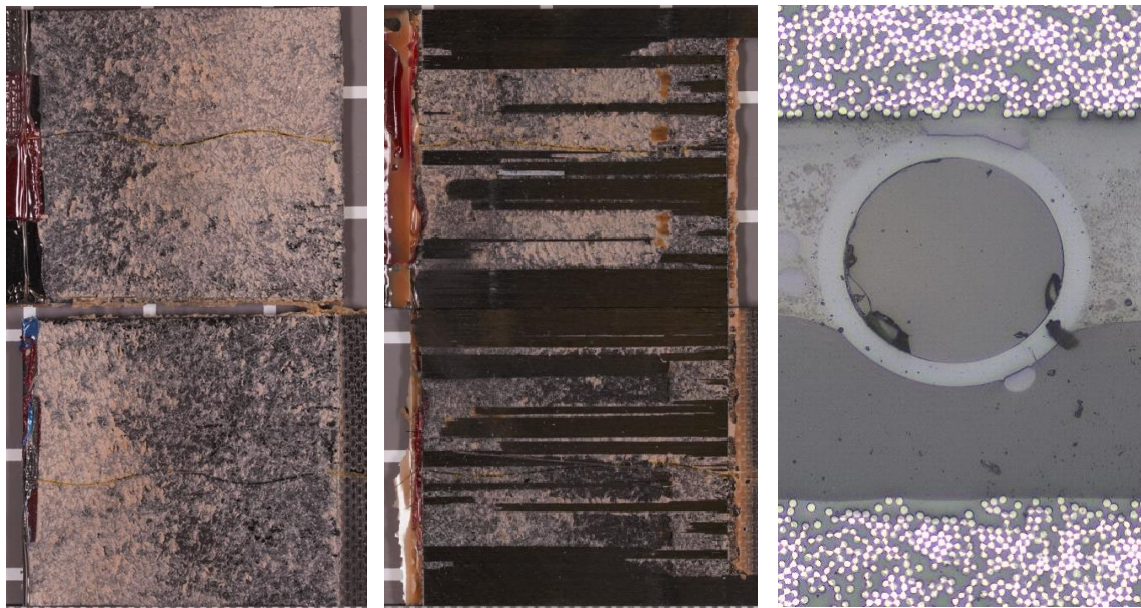


Abbildung 50: Bruchbilder K7-Referenz (Links) & K9-ST (Mitte) & Schliffbild mit ST (Rechts)

4.2.3 Zusammenfassung der Haupttestergebnisse

Der erste Haupttest hat verdeutlicht, dass im Laminat applizierte FOS eine hohe Signalqualität bei geringer Ausfallquote bieten. Es konnten klare, wiederholende Verläufe der Referenz- bzw. ST-Proben mit den im Interface befindlichen Sensoren gemessen werden. Zudem konnte eine klare Korrelation mit der FE-Analyse erkannt werden. Die Prüfkörper mit Surface Toughening zeigten eine höhere Spitzendehnung. Der zweite Haupttest hat gezeigt, dass mit einem optimierten Fertigungsprozess auch komplexere FOS-Positionierungen ermöglicht werden können, wie eben die im ausgehärteten Filmklebstoff EA9695. Es konnte eine deutlich höhere Messquote als im Vortest erreicht werden. Die charakteristischen Dehnungsbilder zeigten Spitzendehnungen an den Rändern der Überlappung. Die Mittelung der FOS-Daten ermöglichte den Vergleich mit der FEA. Eine Korrelation gleicher Größenordnungen war erkennbar, wenngleich die Verläufe der Dehnungen nicht präzise aufeinanderliegen.

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Applikation von faseroptischen Sensoren in Überlappungsklebung hat es ermöglicht die charakteristischen Dehnungsverläufe in Schubrichtung zu messen. Durch den Einsatz von FOS in der Interfacelage konnte gezeigt werden, dass im Bereich des *Surface Toughenings* erhöhte Dehnungen auftreten. In der Klebschicht platzierte FOS zeigten eine Reduktion der Dehnung im Überlappungsbereich der ST-Proben. Durch unvermeidbaren Klebstoffausfluss sowie ungenaue Spitzendehnungen fällt es jedoch schwer eine exakte quantitative Aussage zum Effekt des *Surface Toughenings* in den Randbereichen der Überlappungsklebung zu treffen. Die Schliffbilder der Prüfkörper haben zudem verdeutlicht, dass es unklar ist, welche Materialdehnungen tatsächlich gemessen werden. Der FOS steht im Kontakt zu Klebstoff, *Surface Toughening* und Laminat. Am wahrscheinlichsten ist eine Vermischung der den FOS umgebenden Materialdehnungen. Hinsichtlich der Rissentstehung ist anzumerken, dass diese wesentlich von den Dehnungen in Schälrichtung abhängt. Die Messung dieser ist aufgrund der Probengeometrie mit FOS nicht möglich.

Zur besseren Einordnung und Plausibilitätsprüfung der Messdaten wurden zusätzlich Ergebnisse einer Finite-Elemente-Analyse (FEA) betrachtet. Im Gesamtbild korrelieren die Verläufe qualitativ sehr gut. Auch quantitativ liegen die gemessenen und berechneten Dehnungen nah beieinander, jedoch gibt es gerade in den interessanten Randbereichen mit hoher Dehnung Abweichungen. Ein Problem ist hierbei die Auflösung der FOS. Die Sensoren mitteln über eine Strecke von 0,65 mm, dadurch werden die wahren Spannungsspitzen nicht abgebildet. Die FEA kann hingegen, je nach Feinheitsgrad des Meshs, hohe Dehnungsspitzen sehr detailliert abbilden. Die FEA bietet dennoch Raum für Weiterentwicklung und Verbesserung. Diese ist ausschließlich linear-elastisch und berücksichtigt somit kein Auftreten von plastischen Verformungen. Zusätzlich basiert die FEA auf vereinfachenden Annahmen wie einem isotropen Materialverhalten und idealen Klebstoffkanten. Eine Berücksichtigung des Lagenaufbaus ist in diesem Fall sinnvoll, da sich der Interface-Sensor in der steiferen 0°-Lage befindet.

Es ist notwendig, eine präzisere FEA mit detailliertem nichtlinearem Materialverhalten zu erstellen. Diese sollten ebenfalls den FOS selbst berücksichtigen, da dieser Einfluss auf die ihn umgebenden Dehnungen nimmt.

Der Abgleich mit vorherigen Testreihen, die *High-Resolution Digital Image Correlation* (kurz *HiRes-DIC*) Auswertungen umfassen, bestätigt das Auftreten von hohen Dehnungen an den Rändern der Überlappungsklebung. In SLS-Prüfkörpern können Faseroptische Sensoren lediglich so platziert werden, dass die Dehnungen in Schubrichtung (x-Koordinate) gemessen werden können. Daher wurden die ARAMIS-Aufnahmen hinsichtlich ihrer Dehnung in Schubrichtung bei einer Zugkraft von 3 kN ausgewertet (siehe Abbildung 51). Es sind hohe Dehnungen an den Überlappungsenden zu erkennen, welche nahe 10 000 μ -Strain liegen. Damit werden die Spitzenwerte der FOS-Messungen deutlich überschritten. Betrachtet man Dehnungsmesswerte unweit vom exakten Überlappungsende, so liegen die Schubdehnungen im Bereich von 1500 bis 2500 μ -Strain. Dies entspricht in etwa den FOS-Messungen in der Spitze. Im Vergleich zwischen Referenz und ST-Probe fällt auf, dass es einen größeren Bereich erhöhter Dehnung beim Prüfkörper mit *Surface Toughening* gibt. Qualitativ bestätigt die ARAMIS-Auswertung die Dehnungen des FOS. Quantitativ sind hingegen deutliche Abweichungen vorhanden.

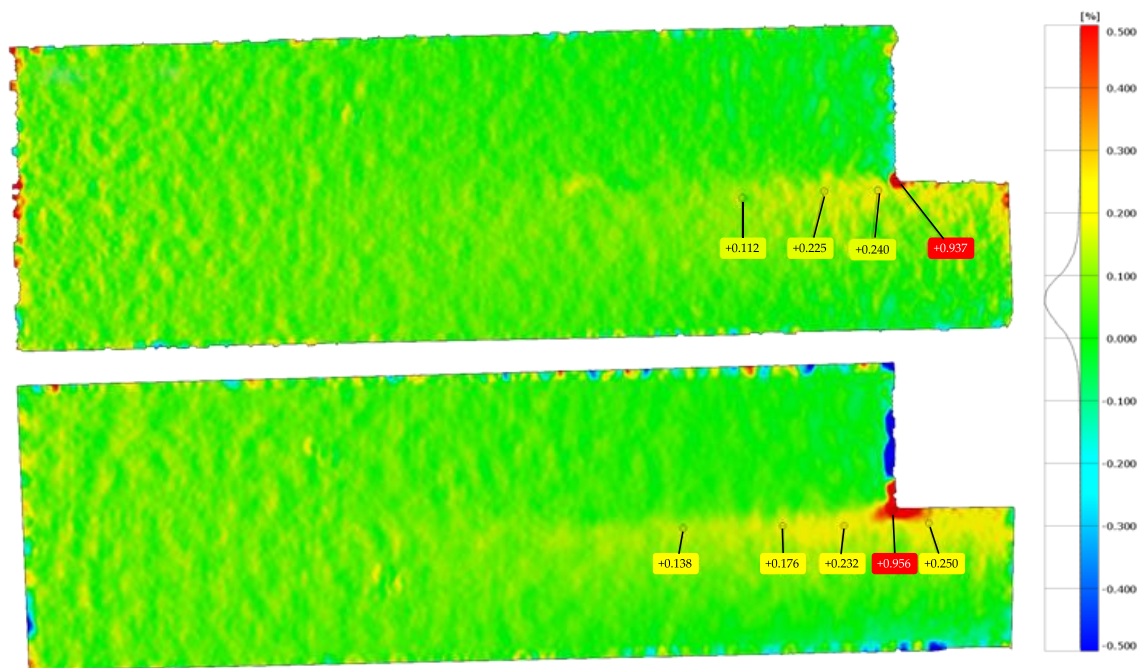


Abbildung 51: ARAMIS-Auswertung von Referenz (oben) & Surface Toughening (unten)

5. Zusammenfassung und Ausblick

Kleerverbindungen bieten der Luftfahrt ein hohes Leichtbaupotential. Problematisch sind lokale Spannungskonzentrationen im Klebstoff, welche zu Ermüdungsrissen führen können. Als gängige Praxis im Rahmen des Fail-Safe-Designs erfolgt daher häufig zusätzliches Nieten. Durch den Einsatz von lokaler Oberflächenzähmodifikation, *Surface Toughening*, können Spannungskonzentrationen an den Rändern von Klebverbindungen reduziert werden.

Um eine genauere Betrachtung von Klebverbindungen von zähmodifizierten Faserverbundwerkstoffen zu ermöglichen, wurden faseroptische Sensoren (FOS) in einfache Überlappungsklebung (SLS) appliziert. Hierfür wurde in Vortests die Positionierung der Fasern sowie die Klebstoffwahl variiert. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Positionierung einen entscheidenden Einfluss auf Messwerte und Funktionalität des FOS hat. Nach der Auswertung der Vorstudien und einer Analyse des Fertigungsprozesses wurde für den Haupttest ein Konzept mit zwei Probenserien gewählt. In der ersten Prüfserie erfolgt die Verklebung pastös, wobei die FOS im Laminat platziert sind. Die zweite Serie hingegen enthält FOS, die im Filmklebstoff appliziert werden.

Die Messdaten der Sensoren im Laminat zeigen eine hohe Genauigkeit der Dehnungsmessung und ermöglichen die Erkennung von Dehnungsspitzen. Eine klare Differenzierung von Referenzproben und den mit *Surface Toughening* präparierten Prüfkörpern ist möglich. Ebenso ist eine Reproduzierbarkeit der Messwerte gelungen. Die im Klebstoff befindlichen Sensoren lieferten ebenfalls qualitativ hochwertige Verläufe. Jedoch waren aufgrund der geringen Auflösung der FOS voneinander abweichende Spannungsspitzen gemessen worden. Eine exakte quantitative Aussage zum Effekt von *Surface Toughening* konnte daher nicht getroffen werden.

Zur Plausibilitätsprüfung der Dehnungsmessungen wurde eine vereinfachte linear-elastische Finite-Elemente-Analyse (FEA) durchgeführt. Beide Testserien ließen eine Korrelation mit der FEA erkennen, wobei die Verläufe der Sensoren im Laminat eine deutliche höhere Übereinstimmung hatten.

Insgesamt bieten FOS die Möglichkeit ein detailliertes Bild vorherrschender Dehnungen in Schubrichtung einer Klebverbindung zu erhalten. Ausgehend hiervon lassen sich jedoch nur begrenzt Aussagen zur Rissbildung und zum Risswachstum ableiten, da die in diesem Fall nicht messbare Schälspannung zu Rissinitiierung führt. Zudem bedarf es hierfür des Wissens, wann genau ein Riss

auftritt. Daher ist ein sinnvoller nächster Schritt mit FOS präparierte DCB-Prüfkörper unter *Mode I* zu belasten. Hierbei kann die Rissentstehung mit dem FOS Signal korreliert werden. Ebenfalls sollte eine präzisere nichtlineare FEA mit detailliertem nichtlinearen Materialverhalten erstellt werden, um eine gesteigerte Vergleichbarkeit mit erzeugten Messdaten zu ermöglichen.

Die faseroptische Messtechnik hat sich als äußerst unterstützend in der Forschung bewährt. Neben ihrer Anwendung zur Analyse von Klebverbindungen besteht auch Potenzial für den Einsatz in praktischen Anwendungsfällen wie dem *Structural Health Monitoring*. Hierfür bedarf es jedoch einer Steigerung der Auflösung und Zuverlässigkeit der Sensoren, um eine optimale Anwendbarkeit in diesem Bereich zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

Literaturangaben

- [1] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft: Klimaschutz im Luftverkehr. <https://www.bdl.aero/de/themen-positionen/nachhaltigkeit/klimaschutz/>, abgerufen am: 03.11.2023
- [2] Flightpath 2050: Europe's vision for aviation. Maintaining global leadership and serving society's needs: report of the High-Level Group on Aviation Research. Studies and reports KI-30-12-812-EN-C, Europäische Kommission, Luxembourg 2012
- [3] Martin J. Schollerer: Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation. 2023
- [4] *Klebstoffe_- Benennungen und Definitionen; Deutsche Fassung EN_923:2015*
- [5] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Mit 39 Tabellen. VDI. Berlin, Heidelberg, New York, NY: Springer 2007
- [6] Habenicht, G.: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009
- [7] Kleben Grundlagen Technologien Anwendungen
- [8] Stein, N.: Analytische und semi-analytische Berechnungsmodelle zur Auslegung von Strukturklebverbindungen, Technische Universität Darmstadt Dissertation. Darmstadt
- [9] M. Goland, E. R.: The Stresses in Cemented Joints. Journal of Applied Mechanics 1944
- [10] Raffaella Di Sante: Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications (2015)
- [11] Dirk Samiec: Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung, 2011. <https://www.polytec.com/fileadmin/website/optical-systems/allgemein/pdf/fachartikel-photonik-verteilte-faseroptische-temperaturmessung.pdf>
- [12] Neele Grundmann, Hauke Brüning, Konstantinos Tserpes u. Tim Strohbach and Bernd Mayer: Influence of Embedding Fiber Optical Sensors in CFRP Film Adhesive Joints on Bond Strength 2020
- [13] Glasfaserkabel.de: Der Unterschied: Singlemode und Multimode LWL-Kabel, 2023. https://www.glasfaserkabel.de/Der-Unterschied-zwischen-Singlemode-und-Multimode-LWL-Kabeln:_13.html
- [14] Xiao Tan u. Yi Bao: Measuring crack width using a distributed fiber optic sensor based on optical frequency domain reflectometry

- [15] Lima, R., Migliavacca, F., Martulli, L. M., Carboni, M. u. Bernasconi, A.: Distributed fibre optic monitoring of mode I fatigue crack propagation in adhesive bonded joints and comparison with digital image correlation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 121 (2022), S. 103501
- [16] Bernasconi, A., Martulli, L. M. u. Carboni, M.: Fatigue crack growth analysis in composite bonded joints by back face distributed strain sensing and comparison with X-ray microtomography. *International Journal of Fatigue* 154 (2022), S. 106526
- [17] Canal, L. P., Sarfaraz, R., Violakis, G., Botsis, J., Michaud, V. u. Limberger, H. G.: Monitoring strain gradients in adhesive composite joints by embedded fiber Bragg grating sensors. *Composite Structures* 112 (2014), S. 241–247
- [18] Robert Prussak: Fibre Optic Sensor Daten. E-Mail. DLR Braunschweig 2023
- [19] HexPly® 8552. Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix). 2013. https://energy.ornl.gov/CFCrush/materials/uou/8552_eu.pdf
- [20] Henkel Corporation Aerospace: LOCTITE EA 9695 AERO. Epoxy Film Adhesive. 2013. https://www.pccomposites.com/wp-content/uploads/2015/07/PCA250350-03_TDS.pdf
- [21] Henkel Corporation Aerospace: LOCTITE EA 9394 AERO. Epoxy Paste Adhesive. 2013. https://www.heatcon.com/wp-content/uploads/2015/08/HCS2407-141_Henkel-Resin-Kit-LOCTITE-EA-9394-AERO.pdf
- [22] 2014. *D5868-01: Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding*
- [23] Luna Innovations Inc.: Optical Distributed Sensor Interrogator Model O-DiSI 6:. Blacksburg, VA 24060 2020

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizze Überlappungsklebung (SLS) mit FOS.....	2
Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Klebschicht [1].....	5
Abbildung 3: Verlauf der Klebfestigkeit über die Klebschichtdicke (vgl. [6]) ...	6
Abbildung 4: Versagensarten von Klebverbindungen (vgl. [7])	6
Abbildung 5: Spannungsverteilung & Verformung einer überlappten Klebung (vgl. [8])	7
Abbildung 6: Analytische Schub- und Schälspannung nach Goland und Reissner bei 3 KN.....	9
Abbildung 7: Qualitativer Verlauf Schubspannung mit lokaler Oberflächenzähmodifikation (vgl. [3])	10
Abbildung 8: Überblick Messprinzipien und Typen von faseroptischen Sensoren [8]	11
Abbildung 9: Aufbau einer Glasfaser (vgl. [12])	12
Abbildung 10: Funktionsprinzip der OFDR zur Messung der Dehnungsänderung (vgl. [1]).....	13
Abbildung 11: Schema SLS-Testablauf.....	15
Abbildung 12: Aufbau der verwendeten FOS- Fasern.....	16
Abbildung 13: SLS - Probe Abmessungen nach ASTM D5656	18
Abbildung 14: Sensorlage Klebstoff und Probengeometrie Vortest 1	19
Abbildung 15: Sensorlage im Interface und in der 1. Lage	19
Abbildung 16: Probengeometrie Vortest 2.....	20
Abbildung 17: Design Haupttest 1 mit FOS im Interface und im pastösen Klebstoff	21
Abbildung 18: Prüfkörperdesign Haupttest 2 mit FOS im Klebstoff.....	21
Abbildung 19: Verteilung der Prüfkörpererelemente auf der CFK-Platte	22
Abbildung 20: Prüfkörperverteilung auf CFK-Platte und FOS Platzierung.....	23
Abbildung 21: Vakuumaufbau Prepreg mit FOS.....	23
Abbildung 22: Autoklavzyklus <i>HexPly 8552 IM7</i> [19].....	24
Abbildung 23: Plasmavorbehandlung Fügepartner.....	25
Abbildung 24: Vakuumaufbau Secondary Bonding	25
Abbildung 25: Vakuumaufbau (links), Vorbereitete Fügepartner mit FOS (rechts).....	26
Abbildung 26: Secondary Bonding Vorversuche 2 mit pastösem Klebstoff.....	26
Abbildung 27: Haupttest 1 rechter Fügepartner mit applizierten FOS	27
Abbildung 28: Prüfkörperfertigung Haupttest 2 mit Fokus auf FOS Positionierung	28
Abbildung 29: Schematischer Vakuumaufbau Verklebung Probekörper Haupttest 2	29
Abbildung 30: Fusionsspleißer OFS-95S	29
Abbildung 31: Schadensbild - Harz/Klebstoff am FOS.....	30

Abbildung 32: Prüfkörper mit ODiSI (links), Prüfkörper unter Zugspannung (rechts)	31
Abbildung 33: Bemaßung 2D-Modell Patran	33
Abbildung 34: Übersicht Mesh-Aufbau, Kräfte und Randbedingungen	34
Abbildung 35: Auswertung FEM in der Interfacelage	35
Abbildung 36: Auswertung FEM in der Klebschicht	35
Abbildung 37: Schliffbild FOS Interfacelage und FOS unter der ersten Lage	38
Abbildung 38: Vergleich FOS-Messung mit FE-Analyse bei 3 KN in der Interfacelage	39
Abbildung 39: Bruchbilder Vortest 1: Probe 3 (links) und Probe 8 (rechts)	40
Abbildung 40: Schliffbild Prüfkörper mit FOS in der Klebschicht	40
Abbildung 41: FOS Dehnungssignal im Klebstoff Prüfkörper 8	41
Abbildung 42: Dehnungsvergleich FEM und FOS bei 3KN im pastösen Klebstoff	42
Abbildung 43: Bruchbilder P2-ST (Links) & P5-Referenz (Mitte) & Schliffbild (Rechts)	43
Abbildung 44: Messergebnisse FOS in der Interfacelage bei 3 KN	44
Abbildung 45: Vergleich FOS-Daten in der Interfacelage mit FE-Analyse	45
Abbildung 46: FOS Messergebnis Referenzproben bei 3 KN	46
Abbildung 47: FOS Messergebnis ST-Proben bei 3 KN	47
Abbildung 48: Vergleich gemittelter FOS-Daten in Klebschicht mit numerischen Ergebnissen bei 3 KN	48
Abbildung 49: Ausgetretener Filmklebstoff aus Überlappungsklebung	48
Abbildung 50: Bruchbilder K7-Referenz (Links) & K9-ST (Mitte) & Schliffbild mit ST (Rechts)	49
Abbildung 51: ARAMIS-Auswertung von Referenz (oben) & Surface Toughening (unten)	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Festigkeitswerte für das verwendete Laminat [19].....	17
Tabelle 2: Materialkennwerte Klebstoffe & zähmodifiziertes Material [3], [21], [20]	17
Tabelle 3: FOS Beschädigungsarten und Lösungsansätze.....	30
Tabelle 4: Parameter Prüfanlage Zwick Z400	32
Tabelle 5: Materialparametrisierung FE-Modell [3]	33
Tabelle 6: Messergebnisse Vortest 1	37
Tabelle 7: Vortest 1 & 2 Überblick Prüfkörper	60
Tabelle 8: Haupttest 1 & 2 Überblick Prüfkörper.....	61

Anhang

	Probennr.	Sensoren	Klebst.	Messung	Bemerkung
Vortest 1	V1_P1_IF	IF + 1st Ply	EA9695	Defekt	IF + 1st Ply defekt
	V1_P2_IF	IF + 1st Ply	EA9695	Defekt	IF + 1st Ply defekt
	V1_P3_IF	IF + 1st Ply	EA9695	IF gut	FOS IF gutes Signal; 1st Ply defekt
	V1_P4_IF	IF + 1st Ply	EA9695	IF gut	FOS IF gutes Signal; 1st Ply defekt
	V1_P5_IF	IF + 1st Ply	EA9695	Defekt	IF + 1st Ply Spleißen nicht möglich (Harz/Kleber im Mantel)
	V1_P6_IF	IF + 1st Ply	EA9695	IF gut	FOS IF gutes Signal; 1st Ply Spleißen nicht möglich (Harz/Kleber im Mantel)
	V1_P7_IF	IF + 1st Ply	EA9695	Defekt	1st Ply Faser abgerissen; IF FOS defekt
	V1_P8_K	Klebstoff	EA9695	Mäßig	Messung geht, schlechtes Signal
	V1_P9_K	Klebstoff	EA9695	Defekt	Spleißen nicht möglich; Harz/Kleber im Mantel
	V1_P10_K	Klebstoff	EA9695	Defekt	Faser gerissen beim Auspacken
	V1_P11_K	Klebstoff	EA9695	Defekt	Faser eine Seite abgerissen
	V1_P12_K	Klebstoff	EA9695	Defekt	Spleißen nicht möglich; Harz/Kleber im Mantel; FOS defekt
	V1_P13_K	Klebstoff	EA9695	Defekt	Sensor beim Sägen beschädigt
	V1_P14_K	Klebstoff	EA9695	Defekt	beide Enden beim Entformen abgerissen
Vortest 2	Probennr.	Sensoren	Klebst.	Messung	Bemerkung
	V2_P1_ST	Klebstoff	EA9394	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis 8kN; kein Bruch --> Schliffbild
	V2_P2_ST	Klebstoff	EA9394	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	V2_P3_ST	Klebstoff	EA9394	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch; Bruch im Laminat
	V2_P4_REF	Klebstoff	EA9394	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	V2_P5_REF	Klebstoff	EA9394	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	V2_P6_REF	Klebstoff	EA9394	gut	Test 1: 3 & 6kN; kein Bruch --> Schliffbild

Tabelle 7: Vortest 1 & 2 Überblick Prüfkörper

	Probennr.	Sensoren	Klebst.	Messung	Bemerkung
Haupttest 1 - Interface	P1_ST	IF + Klebstoff	EA9394	IF gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	P2_ST	IF + Klebstoff	EA9394	IF gut	Test 1: 3kN und Bruch vor 6 kN
	P3_ST	IF + Klebstoff	EA9394	IF gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	P4_Ref	IF + Klebstoff	EA9394	IF gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch; hohe
	P5_Ref	IF + Klebstoff	EA9394	IF mäßig	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	P6_Ref	IF + Klebstoff	EA9394	IF gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	P7_Ref	IF + Klebstoff	EA9394	IF gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	Probennr.	Sensoren	Klebst.	Messung	Bemerkung
Haupttest 2 - Klebstoff	K1_Ref	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K2_Ref	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K3_Ref	Klebstoff	EA9695	schlecht	Verwendung Schliffbild
	K4_Ref	Klebstoff	EA9695	schlecht	0 bis Bruch
	K5_Ref	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K6_Ref	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K7_Ref	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K8_ST	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K9_ST	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K10_ST	Klebstoff	EA9695	schlecht	Verwendung Schliffbild
	K11_ST	Klebstoff	EA9695	schlecht	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K12_ST	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K13_ST	Klebstoff	EA9695	gut	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
	K14_ST	Klebstoff	EA9695	schlecht	Test 1: 3 & 6kN; Test 2: 0 bis Bruch
					Generell gute Signalqualität, jedoch ungenau in den Spitzenwerten
					Generell gute Signale bei 3 kN, jedoch Fehler beim Aushärten, daher Festigkeit insgesamt stark variierend

Tabelle 8: Haupttest 1 & 2 Überblick Prüfkörper

