

# Interner Bericht

**DLR-IB-SY-BS-2025-40**

## **Lokalisation von Rissen in strukturellen Klebverbindungen mittels faseroptischer Sensoren**

### **Bachelorarbeit**

Florian Pape

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Systemleichtbau



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**



---

# Dokumenteigenschaften

**Titel** Lokalisation von Rissen in strukturellen Klebverbindungen mittels faseroptischer Sensoren

**Betreff** Bachelorarbeit

**Institut** Systemleichtbau

**Erstellt von** Florian Pape

**Beteiligte** Dr.-Ing. Martin Schollerer

**Geprüft von** Prof. Dr.-Ing. Tobias Weber, Dr.-Ing. Martin Schollerer

**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** 29.01.2025

**Version** 1.0

**Datei Info** IB\_2025\_40\_BA\_Pape.pdf



Lokalisation von Rissen in strukturellen Klebverbindungen mittels  
faseroptischer Sensoren



Bachelorarbeit

Verfasser: Florian Pape

Matrikelnummer: 3274940

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Tobias Weber

Betreuer: Dr. -Ing. Martin Schollerer

Abgabedatum: 29.01.2025

FH Aachen

University of Applied Sciences

Fachbereich Luft- und Raumfahrttechnik

Lehrgebiet Verbundwerkstoffe & Fertigungstechnik



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit untersucht die Eignung von faseroptischen Dehnungssensoren (FOSS) zur Lokalisierung von Rissen in strukturellen Klebverbindungen. Der Fokus liegt dabei auf der Bestimmung von Risswachstumsmechanismen sowie der Bewertung der Verwendung von Rissstoppnern in Form von Oberflächenzähmodifikation.

Es wird davon ausgegangen, dass der Einsatz von FOSS eine hochauflösende Risspositionsbestimmung mit einer Auflösung von unter einem Millimeter ermöglicht. Zusätzlich wird angenommen, dass die Verwendung von Polyphenylsulfon (PPSU) und thermoplastischem Polyurethan (TPU) als Material für die Oberflächenzähmodifikation das Risswachstum über die Klebverbindung beeinflusst und als rissstoppendes Element wirkt.

Zu diesem Zweck werden Double Cantilever Beam (DCB) Tests mit integrierten und auf die Oberfläche geklebten FOSS-Sensoren gemäß ASTM D5528-21 durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass faseroptische Dehnungssensoren in der Lage sind, den Rissfortschritt mit einer Auflösung von bis zu 0,65 mm und einer mittleren Abweichung von weniger als einem Millimeter im Vergleich zur konventionellen Rissfortschrittsmethode zu messen. Es kann festgestellt werden, dass PPSU einen starken Einfluss auf das Risswachstum hat, was zu instabilen und plötzlichen Rissprüngen führt und nicht für den Einsatz in Klebeverbindungen geeignet ist. TPU hingegen hat eine signifikant verlangsamende und stoppende Wirkung auf das Risswachstum und erhöht die Energiefreisetzungsrates um 6,5 %. Dies ist deutlich weniger als die hemmende Wirkung von Polyvinylidenfluorid (PVDF) auf den Rissfortschritt, die in früheren Untersuchungen festgestellt wurde. Dennoch wird davon ausgegangen, dass TPU aufgrund seiner niedrigen Glasübergangstemperatur besser für den Einsatz bei Temperaturen unter  $-30^{\circ}\text{C}$  geeignet ist.

## **Abstract**

The following work investigates the feasibility of using a fibre optical strain sensor (FOSS) to locate cracks in bonded joints. It focuses on the determination of crack growth mechanisms whilst evaluating the effectiveness of crack arresting measures in the form of so-called Surface Toughening (ST) implementation.

It is proposed that the use of FOSS will provide high resolution crack localisation with a precision of less than one millimetre. It is also theorised that the use of polyphenylsulfone (PPSU) and thermoplastic polyurethane (TPU) as surface toughening materials may influence the crack propagation behaviour throughout the bond and potentially act as a crack arresting mechanism.

For this purpose, double cantilever beam (DCB) tests are performed with integrated and secondary bonded FOSS sensors according to ASTM D5528-21 to compare the two materials.

The results show that fibre-optic strain gages are capable of measuring crack propagation with a resolution of up to 0.65 mm, while deviating on average less than 1 mm from conventional crack tracking methods.

PPSU was found to have a strong negative effect on crack growth, causing unstable and sudden crack jumps, and is not suitable for use within bonded joints.

TPU was found to have a significant effect on crack growth, stopping crack propagation and increasing the energy release rate  $G_{IC}$  by 6.5%. This is significantly less than the effect of polyvinylidene fluoride (PVDF) on crack growth inhibition previously investigated. However, TPU is still thought to be superior for use at temperatures below  $-30^{\circ}\text{C}$  due to its low glass transition temperature.



Inhaltsangabe	I
<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>II</b>
<b>Eigenständigkeitserklärung</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung.....	2
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1 Strukturelle Klebverbindungen.....	3
2.1.1 Grundlagen der Klebtechnik.....	3
2.1.2 Oberflächenvorbehandlung bei faserverstärkten Kunststoffen.....	4
2.1.3 Klebverfahren für faserverstärkte Kunststoffe.....	7
2.1.4 Versagensarten von Klebverbindungen.....	8
2.2 Klebverbindungen in der Luftfahrt.....	9
2.3 Rissstoppelemente.....	11
2.4 Faseroptische Sensoren.....	14
2.4.1 Struktur optischer Fasern.....	14
2.4.2 Faser-Bragg-Gitter.....	15
2.4.3 Verteilte optische Sensoren.....	15
2.5 Fazit.....	16
<b>3 Methodik</b> .....	<b>17</b>
3.1 DCB-Versuche.....	17
3.1.1 Bestimmen von $G_{IC}$ .....	20

3.2	Prüfkörpergeometrie .....	22
3.3	Theorie des Biegebalkens .....	23
3.4	Risslokalisierung mit Dehnungssensoren .....	27
3.5	Messgeräte und Prüfmaschinen .....	28
<b>4</b>	<b>Voruntersuchungen .....</b>	<b>29</b>
4.1.1	Integration der faseroptischen Sensoren .....	29
4.1.2	Prüfkörperherstellung .....	30
4.1.2.1	Vorbereitung der Sensoren .....	30
4.1.2.2	Fertigung der Laminate .....	31
4.1.2.3	Verklebung der Probenhälften .....	35
4.1.2.4	Vorbereitung der Probenkörper .....	35
4.2	Versuchsdurchführung .....	36
4.3	Ergebnisse der Voruntersuchungen .....	37
4.3.1	Messungen der Prüfmaschine .....	37
4.3.2	Messung mit faseroptischen Sensoren .....	37
4.3.3	Auswertung und Verarbeitung der Messwerte .....	39
4.3.4	Geeignete Sensorintegration .....	43
4.3.5	Einfluss der FOSS-Faser auf die Probe .....	44
<b>5</b>	<b>Analyse der Oberflächenzähmodifikation .....</b>	<b>47</b>
5.1	Materialauswahl für die Oberflächenzähmodifikation .....	47
5.2	Prüfkörperaufbau .....	47
5.3	Probenherstellung .....	48
5.4	Versuchsdurchführung .....	49
5.5	Ergebnisse .....	50
5.5.1	Risswachstumsmessung mittels FOSS .....	50
5.5.2	Risstoppende Eigenschaften .....	53
<b>6</b>	<b>Diskussion und Fazit .....</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>64</b>

Inhaltsangabe	III
7.1 Risswachstumsmessung mittels faseroptischer Sensoren .....	64
7.2 TPU als Rissstoppelement.....	64
<b>8 Anhang.....</b>	<b>65</b>
<b>Anhangsverzeichnis.....</b>	<b>65</b>
8.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen .....	67
8.2 Obere Laminatschicht.....	67
8.3 Untere Laminatschicht .....	69
8.4 Aufgeklebte Sensoren .....	71
8.5 keine Sensoren .....	72
8.6 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen .....	74
8.7 PPSU .....	74
8.8 PPSU .....	76
8.9 Mikroskopische Untersuchungen .....	79
<b>9 References.....</b>	<b>81</b>

**Eigenständigkeitserklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Quellenverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Braunschweig, 29.01.2025

Florian Pape

Vorname Nachname

## Abkürzungsverzeichnis

FOSS	=	Faseroptisches Sensor System	
SB	=	Secondary Bonding	
LL	=	Lower Layer	
UL	=	Upper Layer	
TPU	=	thermoplastisches Polyurethan	
PPSU	=	Polyphenylsulfone	
PVDF	=	Polyvinylidenfluorid	
ST	=	Surface Toughening	
PTFE	=	Polytetrafluorethylen	
DCB	=	Double Cantilever Beam	
$E_{11}$	=	E Modul in erste Hauptrichtung (in Faserrichtung)	[MPa]
$E_{22}$	=	E Modul in zweite Hauptrichtung (quer zur Faserrichtung)	[MPa]
$G_{12}$	=	G Modul	[MPa]
$\nu_{21}$	=	Querkontraktionszahl	[MPa]
$\sigma_{K,Br(1)}$	=	Zugfestigkeit von Klebstoff	[MPa]
$E_K$	=	E Modul von Klebstoff	[MPa]
$G_K$	=	G Modul von Klebstoff	[MPa]
$E_{K,BN(2)}$	=	Bruchdehnung von Klebstoff	[MPa]
$T_{K,Br(1)}$	=	Torsionsmodul von Klebstoff	[MPa]
$\nu_K$	=	Querkontraktion von Klebstoff	[-]
$G_{IC}$	=	Energiefreisetzungsrate	[kJ/m <sup>2</sup> ]
$C$	=	Nachgiebigkeit unter Mode I-Belastung einer Klebschicht	[mm/N]
$b$	=	Breite der DCB-Probe	[mm]
$a$	=	Risslänge der DCB-Probe	[mm]
$\delta$	=	Traverse der DCB-Probenöffnung	[mm]

**Tabellenverzeichnis**

Tab. 1 Materialwerte des Prepregs HexPly® 8552/IM7 .....	12
Tab. 2 Materialwerte des Filmklebstoffes EA 9695 050 NW Aero .....	13
Tab. 3 Prüfkörper-Maße von DCB Proben nach Norm ASTM D5528 – 21 .....	18
Tab. 4 Probenprogramm der Voruntersuchungen.....	29
Tab. 5 Lagenaufbau der Platten zur Probenherstellung .....	31
Tab. 6 Die Materialeigenschaften der Oberflächenzähmodifikationen und des Klebstoffes. .....	47
Tab. 7 Das Probenprogramm der Hauptversuche.....	48
Tab. 8 Die Getesteten Proben der Hauptversuchsreihe mit jeweils verwendeten Sensoren. .....	49

## Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Entwicklung des Faserverbundanteils am Strukturgewicht von verschiedenen Flugzeugmodellen des Herstellers Airbus.....	1
Abb.2 Schematischer Aufbau einer einfachen Klebverbindung, die Klebschicht wird zur Veranschaulichung aus der Klebfuge herausragend dargestellt. ....	3
Abb.3: Darstellung von Kohäsion und Adhäsion in einer Klebschicht zwischen zwei Bauteilen.....	4
Abb.4 Darstellung verschiedenee Benetzungsgütern mit eingezeichnetem Benetzungswinkel.....	5
Abb.5 Die Corona Vorbehandlungsvorrichtung des Herstellers tantec zur Vorbehandlung von unter anderem Kunststoffen. ....	6
Abb.6 Atmosphärendruckplasmagerät des Herstellers tantec bei der Vorbehandlung eines Kunststoffbauteils.....	7
Abb.7 Darstellung drei verschiedener Verbindungsverfahren von Faserverbundmaterialien.....	8
Abb.8 Typische Versagensarten von Klebverbindungen.....	8
Abb.9 Klebverbindung mit zusätzlich eingebrachten Nieten.....	9
Abb.10 Darstellung einer Verklebung mit Hybrid-Bondline.....	11
Abb.11 Darstellung einer Klebverbindung mit Oberflächenzähmodifikation.....	12
Abb.12 Verhalten einer Klebverbindung mit Oberflächenzähmodifikation mit PVDF unter verschiedenen Temperaturen (links) und Materialelastizität von PVDF, TPU und dem Klebstoff EA9695 für verschiedene Temperaturbereiche (rechts). ....	14
Abb.13 Darstellung des allgemeinen Aufbaus einer optischen Faser.....	15
Abb.14 Darstellung einer optischen Faser mit eingezeichneter Lichtstreuung.....	16
Abb.15 Darstellung einer DCB Probe mit Scharnieren und eingezeichneten Dimensionen. ....	18
Abb.16 Eine eingespannte DCB-Probe mit aufgebrauchten Markierungen.....	19
Abb.17 Vereinfachte schematische Darstellung einer DCB-Probe (links) ungeprüft und (rechts) während der Prüfung. ....	19
Abb.18 Seitenansicht einer DCB-Probe während des Tests mit einer Risslänge von circa 65 mm. ....	20
Abb.19 Bestimmung des Korrekturfaktors über die Darstellung der dritten Wurzel der Nachgiebigkeit einer exemplarischen DCB-Probe über die Risslänge. ....	22

Abb.20 Darstellung einer DCB Probe mit aufgebrauchten Scharnieren und Probendimensionen.....	23
Abb.21 Vereinfachte schematische Darstellung einer DCB-Probe als zwei miteinander verbundener Balken (links) und einer Probenhälfte als vereinfachter Balken mit wirkenden Kräften und Momenten(rechts).....	23
Abb.22 Darstellung eines gebogenen Balkensegments mit entsprechenden geometrischen Beziehungen.....	24
Abb.23 Ein freigeschnittenes Balkenelement mit eingezeichneten Kräften und Momenten.....	25
Abb.24 Querschnitt eines einfachen rechteckigen Balkenprofils mit geometrischen Beziehungen zur Flächenintegration.....	26
Abb.25 Qualitative Darstellung des Dehnungsverlaufes entlang der y-Achse (links) eines rechteckigen Balkenprofils eines gebogenen Balkens (rechts).....	27
Abb.26 Qualitative Darstellung der absoluten Dehnung der Unter- oder Oberseite eines gebogenen Balkens über die Balkenlänge bei gleicher Kraft und unterschiedlicher Einspannungs-Positionen entlang des Balkens.....	27
Abb.27 Einlauf von FOSS Fasern in einen Laminataufbau auf der Probenoberseite, der obersten und untersten Laminatschicht.....	30
Abb.28 Bilder des Schneidegeräts (links) und des Spleißgeräts (rechts) mit eingelegten Fasern.....	30
Abb.29 Abbildung der mit kernloser Faser verspleißte Sensorfaser (links) in Betrachtung durch das Spleißgerät und (rechts) in Detail Aufnahme mit markierter Spleißstelle.....	31
Abb.30 FOSS Faser Position auf CFK- Platte (Angaben in mm).....	32
Abb.31 Eingeschlagene Laminataufbauten mit auf dem Werkzeug fixierten FOSS Fasern (links) vakuumierter Aufbau (rechts).....	33
Abb.32 Der Vakuumaufbau im Autoklaven (links) und der Vakuumaufbau nach Autoklav Prozess (rechts).....	33
Abb.33 Autoklav Prozess für das Material 8552 IM7 (links) und Autoklavprozess mit fehlerhaftem Druckverlauf (rechts).....	34
Abb.34 Plasmabehandlung der ausgehärteten Platten als Vorbehandlung für die Verklebung.....	35
Abb.35 Schnittmuster zum Zuschneiden der DCB-Proben aus den angefertigten Platten.....	36



Abb.36 DCB Probe mit aufgeklebter Scharnier Vorrichtung und FOSS-Faser auf der Oberfläche.....	36
Abb.37 Aufgebrachte Kraft der Prüfmaschine über zurückgelegten Weg der Einspannungsklammern.....	37
Abb.38 Dehnung der FOSS Faser der Probe DCB_FOSS_LL_3 bei 615,904 Sekunden nach Messbeginn über die Sensorlänge. ....	38
Abb.39 Dehnungsverläufe entlang der Probe DCB_FOSS_LL_3 für verschiedene Messzeitpunkte. ....	39
Abb.40 Die Abweichung der Messpunktposition vom Unverformten Sensor nach Berücksichtigung der Sensorverformung (links) und der Verlauf der Dehnung des Sensors der Probe DCB_FOSS_LL_3 mit und ohne Berücksichtigung der Sensorverformung(rechts).....	39
Abb.41 Der Dehnungsverlauf des Sensors DCB_FOSS_UL_3 bei einer Traverse von 23,4 mm mit Beschrifteten Punkten zur Bestimmung der Rissposition. ....	40
Abb.42 Die bestimmte Rissposition der Probe DCB_FOSS_UL_3 über die Traverse der Prüfmaschine mit vier verschiedenen Methoden.....	41
Abb.43 Der Verlauf der Traverse über die Rissposition mit der Bestimmung über die 80% - Methode und dem Konventionellen Verfahren nach ASTM-Norm.....	42
Abb.44 Die Korrelation des Risspositionsverlaufes der 80%-Methode mit der per ASTM Norm bestimmten Rissposition. ....	42
Abb.45 Die $G_{IC}$ Verläufe der Proben UL_3 (links) und UL_4 (rechts), für die Messungen nach Norm sind die verschiedenen Phasen der Rissbestimmung dargestellt.....	43
Abb.46 Die maximalen $G_{IC}$ -Werte der Proben der Vorversuche. ....	43
Abb.47 Die absolute Abweichung der mit FOSS bestimmten Rissposition zu der nach Norm bestimmten Rissposition. ....	44
Abb.48 Die Korrelation der FOSS Rissposition mit der per ASTM Norm bestimmten Rissposition. ....	44
Abb.49 Die $G_{IC}$ -Werte der Proben ohne FOSS-Sensor und der Probe FOSS_LL_6, bestimmt mit der 80%-Methode. ....	45
Abb.50 Vergleich der Kraftverläufe zweier Proben jeweils mit und ohne FOSS. ....	46
Abb.51 Schematische Darstellung der Position des ST Streifens auf einer Probe. ....	48
Abb.52 Eingebachte Oberflächenzähmodifikation in Lagenaufbau.....	49

Abb.53 Aufgerissene DCB-Proben nach Versuch links mit TPU und rechts mit PPSU-Oberflächenzähmodifikation. ....	50
Abb.54 Der Rissverlauf der Probe PPSU_2_SB mit eingezeichneter Position der Oberflächenzähmodifikation (ST). ....	51
Abb.55 Die mittlere Abweichung der mittels FOSS bestimmten Rissposition von der per ASTM bestimmten Rissposition. ....	52
Abb.56 Die Kraft über die Traverse der Proben PPSU_1 (links) und PPSU_2 (rechts). ....	53
Abb.57 Die Traverse über Risswachstum der Probe PPSU_1_LL. ....	54
Abb.58 Der Verlauf der $G_{IC}$ -Werte der Proben PPSU_2_SB. ....	54
Abb.59 Der Verlauf der $G_{IC}$ Werte der Probe PPSU_1_SB. ....	55
Abb.60 Das Rissbild der der geöffneten DCB-Probe mit sichtbarer PPSU Folie während der Prüfung. ....	55
Abb.61 Das Rissbild der Oberflächenzähmodifizierten Seite der Probe PPSU_1 mit 20-facher Vergrößerung. ....	56
Abb.62 Das Rissbild der Seite ohne Oberflächenzähmodifizierung der Probe PPSU_1. ....	56
Abb.63 Mikroskopische Darstellung der Ablösung der PPSU-Folie vom Laminat (100-fache Vergrößerung) Rechts die Seite mit aufgebrachtener Oberflächenzähmodifikation. Die Ablösestelle ist farblich markiert. ....	56
Abb.64 Der Kraftverlauf über den Traversenweg der Proben TPU_6_SB und FOSS_LL_3. ....	57
Abb.65 Der Rissverlauf über Traverse der Proben TPU 1 LL und TPU 1 SB. ....	58
Abb.66 Die $G_{IC}$ Werte der Probe TPU_4_LL über die Rissfortschrittslänge. ....	58
Abb.67 Die $G_{IC}$ -Verlauf der Probe TPU_1_LL über die Rissfortschrittslänge. ....	59
Abb.68 Der Anstieg des $G_{IC}$ wertes ab der Oberflächenzähmodifikation. ....	59
Abb.69 Mikroskopische Darstellung der Oberflächenzähmodifikation nach testen der Probe mit 100-facher Vergrößerung. ....	60
Abb.70 Mikroskopische Darstellung der der Oberflächenzähmodifikation gegenüberliegenden Klebschicht nach testen der Probe mit 100-facher Vergrößerung. ....	61
Abb.71 Detailaufnahme zweier Risse innerhalb des TPUs am Anfang der Folie. ....	61
Abb.72 Verlauf der Energiefreisetzungsrate über die Risslänge der DCB-Probe mit und ohne ST-Streifen der Voruntersuchungen in (links) und der Ergebnisse dieser Arbeit an Probe TPU_4 und FOSS_LL_3 (rechts), ....	63

Abb.73 Rissverhalten von PPSU aus Vorangegangenen Untersuchungen aus Kraft-  
Traversenweg-Verlauf (links) und Rissbild mit und ohne Oberflächenzähmodifikation  
(rechts)..... 63

## 1 Einleitung

Klimaneutralität zu erreichen ist die größte Herausforderung der modernen Luftfahrtentwicklung. 2019 hat die Europäische Union dieses Ziel beschlossen und geplant bis zum Jahr 2050 CO<sub>2</sub> Neutralität zu erreichen [1]. Um dieses Ziel zu erreichen streben Hersteller stets an möglichst leichte und kraftstoffsparende Systeme zu entwickeln, während dabei stets die nötigen Sicherheitsvorschriften der Behörden für die Zulassung erfüllt werden müssen. So haben sich Komposit Materialien, darunter vor allem kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, als vielversprechende Werkstoffe bewiesen und werden in immer größeren Anteilen in Flugzeugmodellen verwendet (s. Abb. 1). Grund hierfür sind unter anderem die hervorragenden spezifischen Eigenschaften, die große Gewichtersparnisse ermöglichen [2].

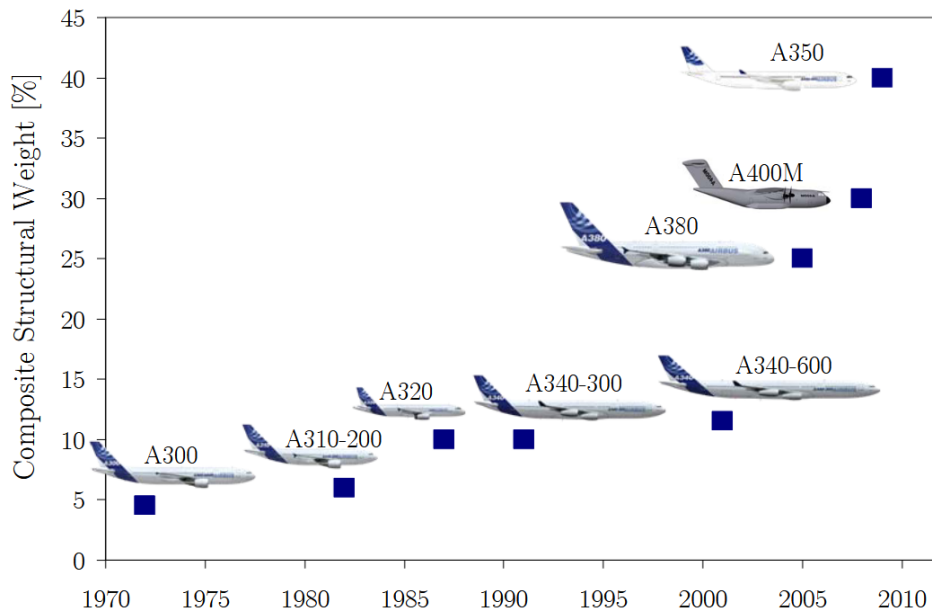


Abb. 1: Entwicklung des Faserverbundanteils am Strukturgewicht von verschiedenen Flugzeugmodellen des Herstellers Airbus. [3]

In aktuellen Modellen der beiden Hersteller machen kohlenstofffaserverstärkte Verbundwerkstoffe bereits über 40 % des strukturellen Materialgewichts aus [4]. Der Airbus A350-900 besteht aus 53% Verbundmaterial [5]. Vor allem im Verbund mit Faserverbundmaterialien bieten Klebebindungen signifikante Vorteile gegenüber konventionellen mechanischen Verbindungsmethoden. Für die Luftfahrt ist besonders das potenzielle Gewichtersparnis durch die hervorragenden massespezifischen Eigenschaften von großem Interesse. [6, 7]

## 1.1 Problemstellung

Trotz dieser Vorteile ist die Nutzung von Verklebungen für primäre Flugzeugstrukturen stark begrenzt. Zertifizierungsvorschriften stellen strenge Anforderungen an Klebverbindungen. Dies führt effektiv dazu, dass zusätzliche mechanische Verbindungselemente eingebracht werden müssen, um den Anforderungen gerecht zu werden. Dies reduziert jedoch, die durch die Verklebung gewonnenen Vorteile drastisch. [8]

Eine Möglichkeit Klebverbindungen anforderungsgerecht zu entwerfen, bietet das Rissstoppelement. Es gibt mehrere erforschte Konzepte Rissstoppelemente in Klebverbindungen einzubringen. [9]

Eine vielversprechende Möglichkeit ist das Konzept der Hybrid Bondline, und die daraus abgeleitete Oberflächenzähmodifikation. Hier werden elastische Thermoplasten in die Klebschicht eingebettet, um durch Spannungsreduktion in der Verbindung fortschreitende Risse zu stoppen. [10, 11]

Untersuchungen zeigten, dass das dort verwendete Material nicht für den Einsatz bei geringen Temperaturen geeignet ist. Weiterhin muss eine Messmethode entwickelt werden, die die genauere Untersuchung des Risswachstums über die Oberflächenzähmodifikation ermöglicht. Hierfür vorgeschlagen wurde die Untersuchung von thermoplastischem Polyurethane (TPU) sowie die Verwendung von faseroptischen Sensorsystemen (FOSS). [10]

## 1.2 Zielsetzung

*In der folgenden Arbeit wird die Eignung von faseroptischen Dehnungssensoren zur Lokalisierung von Rissen in strukturellen Klebverbindungen mit Rissstoppelementen untersucht. Dazu wird das Risswachstum in DCB-Versuchen mit FOSS untersucht. Ziel ist das Erreichen einer Genauigkeit von mindestens 1 mm im Vergleich zur konventionellen Methode nach ASTM D5528-21. Des Weiteren wird untersucht, ob die Verwendung von TPU als Oberflächenzähmodifikation einen verlangsamenden oder stoppenden Effekt auf den Rissfortschritt hat.*

## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlegenden Prinzipien von Klebverbindungen vorgestellt. Weiterhin wird auf ihre Rolle in der Luftfahrt eingegangen, und welche Herausforderungen hierbei auftreten. Daraus folgend wird das Konzept des Rissstoppelements vorgestellt. Insbesondere wird der neue Ansatz des Rissstopps durch Oberflächenzähmodifikation beleuchtet. Im Anschluss werden mögliche Untersuchungsmethoden von Risswachstum durch Dehnungsmessung diskutiert.

### 2.1 Strukturelle Klebverbindungen

#### 2.1.1 Grundlagen der Klebtechnik

Allgemein gibt es drei Kategorien von Fügeverfahren. Klebverbindungen gelten als stoffschlüssigen Verbindungen und reihen sich dabei neben kraftschlüssigen und formschlüssigen Verfahren, zu denen beispielsweise das Nieten und Schrauben zählen. Eine Stoffschlüssige Fügung wird allgemein dadurch charakterisiert, dass stets ein zusätzlicher Werkstoff zugegeben wird. [7]

Im Vergleich zu anderen Verbindungsmethoden profitieren Klebverbindungen vor allem von guten Dämpfungseigenschaften, gleichmäßiger Spannungsverteilung in der Verbindung, sowie der Schutz der Fügepartner vor Kontaktkorrosion [12]. Weiterhin werden die Fügepartner nicht durch Bohrungen geschwächt, welche beispielsweise für das Bohren und Nieten von Nöten sind und besonders schädigend auf die Lastpfade der Fasern in Faserverbundwerkstoffen wirken. [12]. In Abb. 2 ist der allgemeine Aufbau einer Klebverbindung abgebildet. Diese besteht aus jeweils den Fügepartnern zwischen die der Klebstoff aufgetragen wird. Der vom Klebstoff ausgefüllte Zwischenraum zwischen den Klebflächen, ist die Klebfuge. Der Klebstoff in der Klebfuge ist die Klebschicht.

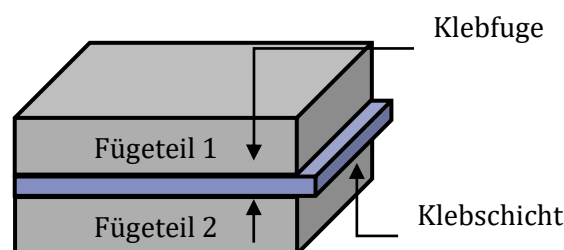


Abb. 2 Schematischer Aufbau einer einfachen Klebverbindung, die Klebschicht wird zur Veranschaulichung aus der Klebfuge herausragend dargestellt.

Die prominenten Kräfte innerhalb einer Klebschicht sind die Adhäsions- und Kohäsionskräfte (Abb. 3). Adhäsion beschreibt dabei die Bindung zwischen den Atomen, bzw. Molekülen zweier Stoffe, während die Kohäsion den Zusammenhalt innerhalb eines Stoffes beschreibt. Eine optimale Klebverbindung nutzt Adhäsions- und Kohäsionskräfte gleichermaßen aus. [13]

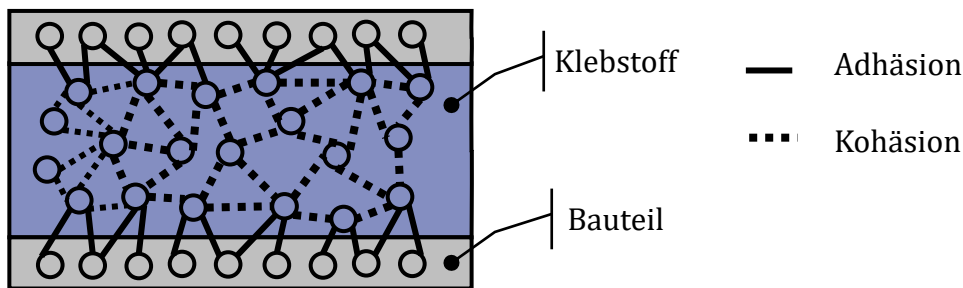


Abb. 3: Darstellung von Kohäsion und Adhäsion in einer Klebschicht zwischen zwei Bauteilen.

Die Kohäsion wird primär von den spezifischen Klebstoffeigenschaften bestimmt und wird unter anderem durch das Auftragen des Klebstoffs, als auch von den Aushärtungsprozessen beeinflusst. Die Adhäsion hingegen ist von Klebstoff und Füge teil abhängig und wird stark von den Oberflächeneigenschaften der Klebflächen beeinflusst. [13]

### 2.1.2 Oberflächenvorbehandlung bei faserverstärkten Kunststoffen

Zunächst ist die Benetzung der Fügeoberflächen durch den Klebstoff eine, für die Adhäsion notwendige Bedingung. Zusätzlich sind jedoch die physikalischen und chemischen Wechselwirkungen zwischen den Materialien entscheidend. [7]

Die Benetzung einer Oberfläche durch einen Klebstoff kann durch die Form eines, auf die Oberfläche gegebenen flüssigen Klebstofftropfens charakterisiert werden. Der Benetzungswinkel beschreibt den Winkel zwischen der Oberfläche des Klebstofftropfens und der Klebfläche (Abb. 4). Von einer guten Benetzung kann ab einem Benetzungswinkel von unter  $30^\circ$  gesprochen werden. [7]

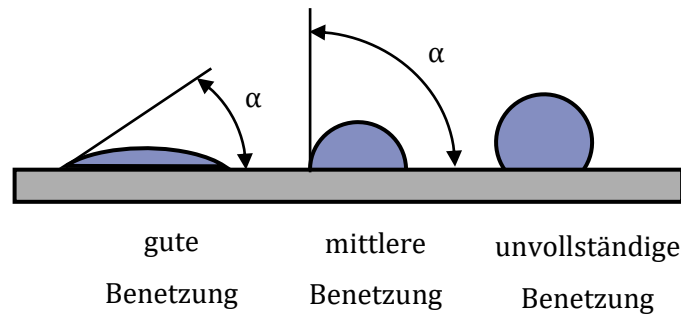


Abb. 4 Darstellung verschiedenee Benetzungsgüten mit eingezeichnetem Benetzungswinkel.

Um eine gut benetzbare Oberfläche zu garantieren, muss meist auf Vorbehandlungsmethoden zurückgegriffen werden. Je nach Werkstoffart können unterschiedliche Vorbehandlungsmethoden angewendet werden. Diese können allgemein in drei Kategorien unterteilt werden: Mechanische physikalische und chemische Vorbehandlungen. [12]

Bei der Vorbehandlung von Kunststoffen und Faserverbundmaterialien werden überwiegend physikalische Verfahren verwendet. Vor einer Vorbehandlung muss die Oberfläche von Fetten und anderen Fremdkörpern gereinigt werden. Die bei Kunststoffen am häufigsten verwendete Methode ist hier das Abwischen mit Lösungsmittel, beispielsweise Isopropylalkohol. Aufgrund ihrer Relevanz in den, in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, wird sich im Folgenden auf zwei Vorbehandlungsmethoden aus dem Bereich der Atmosphärendruck Vorbehandlung konzentriert: das Corona Verfahren und die Behandlung mit einem Plasmajet. [7]

### *Corona Verfahren*

Beim Corona Verfahren wird die Oberfläche bei Normaldruck in Luftatmosphäre durch eine hochfrequente Hochspannungsentladung zwischen zwei Elektroden behandelt. Spannungen betragen hier 10 kV bis 20 kV mit Frequenzen im Bereich 10 kHz bis 30 kHz. Die Entladung ist erkennbar als blaues Licht zwischen den Elektroden (Abb. 5). Die Luftmoleküle werden dabei ionisiert, wobei Sauerstoffatome und Ozonmoleküle entstehen. Diese Bestandteile wirken oxidativ auf die eingebrachte Oberfläche. Dieser Prozess ermöglicht es, die Haftung und das Benetzungsverhalten auf Polymermaterialien signifikant zu steigern, ohne die Oberflächentemperatur dabei stark zu erhöhen. [7, 12]



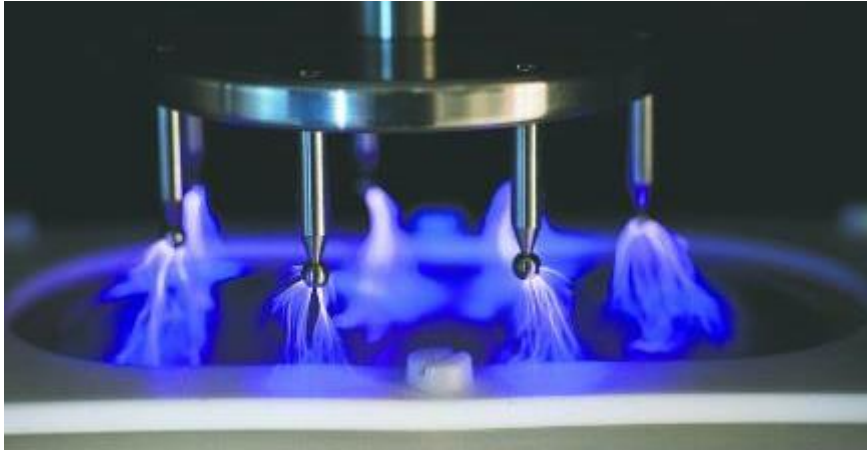


Abb. 5 Die Corona Vorbehandlungsvorrichtung des Herstellers tantec zur Vorbehandlung von unter anderem Kunststoffen. [14]

### *Plasmajet*

Bei diesem Verfahren strömt ein ionisierbares Gas (z.B. Luft oder Sauerstoff) durch ein Keramikrohr, dessen Außenwand mit isoliertem verdichtetem Metallpulver umgeben ist, welches als Elektrode dient. Im Inneren des Rohrs ist ein elektrisch leitfähiger Stab mit guter Wärmeleitfähigkeit angebracht. Im zwischen den Elektroden befindlichen Ionisierungsspalt liegt ein hochfrequentes Hochspannungsfeld an, dass das Gas ionisiert und als fokussierten Plasmastrahl an der Düse austreten lässt. Im Gegensatz zum Corona-Verfahren besitzt der erzeugte Plasma Strahl des Atmosphärendruckplasma-Verfahrens kein elektrisches Potential. Mithilfe einer gezielten Luftströmung wird dieser Strahl auf die zu behandelnde Oberfläche geleitet, wodurch sich eine vergleichbare, meist sehr gute Adhäsionsverbesserung wie bei Corona- oder anderen Vorbehandlungsverfahren erzielen lässt. Die Oberflächentemperatur wird währenddessen stark erhöht. [7, 12]



Abb. 6 Atmosphärendruckplasmagerät des Herstellers tantec bei der Vorbehandlung eines Kunststoffbauteils. [14]

### 2.1.3 Klebverfahren für faserverstärkte Kunststoffe

Aufgrund des Herstellungsprozesses ergeben sich mehrere Methoden faserverstärkte Kunststoffe zu verbinden, die sich durch ihre Platzierung in verschiedenen Stellen während der Herstellung unterscheiden. Beim sogenannten co-curing (deutsch: co-Aushärten) wird der Klebstoff, bzw. das Verbindungsmaterial mit beiden Fügepartnern zugleich ausgehärtet, während beim co-bonding (deutsch: co-Verklebung) jeweils nur einer der Fügepartner gleichzeitig mit der Verklebung ausgehärtet wird. Beim secondary bonding (deutsch: Sekundärverklebung, SB) härtet der Klebstoff separat von den Fügeteilen aus. Abb. 7 stellt die verschiedenen Methoden schematisch dar.

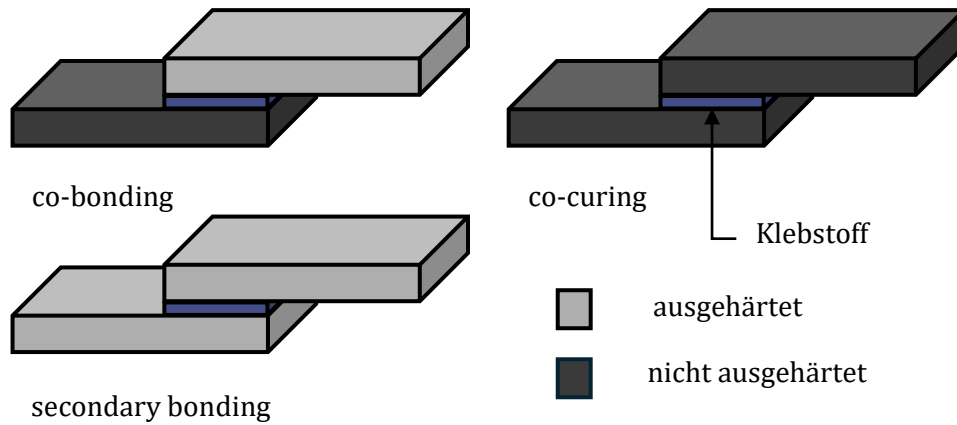


Abb. 7 Darstellung drei verschiedener Verbindungsverfahren von Faserverbundmaterialien.

Das co-curing und co-bonding Verfahren werden meist dem Sekundärverklebungsverfahren vorgezogen, da so die Anzahl der Aushärtungsprozesse verringert wird. Bei großen und komplexen Bauteilen ist die Sekundärverklebung geeigneter. [15]

#### 2.1.4 Versagensarten von Klebverbindungen

Nach der DIN EN ISO 10365 kann zwischen mehreren Versagensarten von Klebverbindungen unterschieden werden, welche in Abb. 8 abgebildet werden. Die Bezeichnung der Versagensarten orientiert sich nach den grundlegenden Ursachen des Bruchs. Der Adhäsionsbruch, beispielsweise, bei dem sich der Klebstoff von der Klebfläche löst, spricht für ein Versagen der Adhäsionskräfte, was meist durch eine unzureichende Oberflächenvorbehandlung verursacht wird.

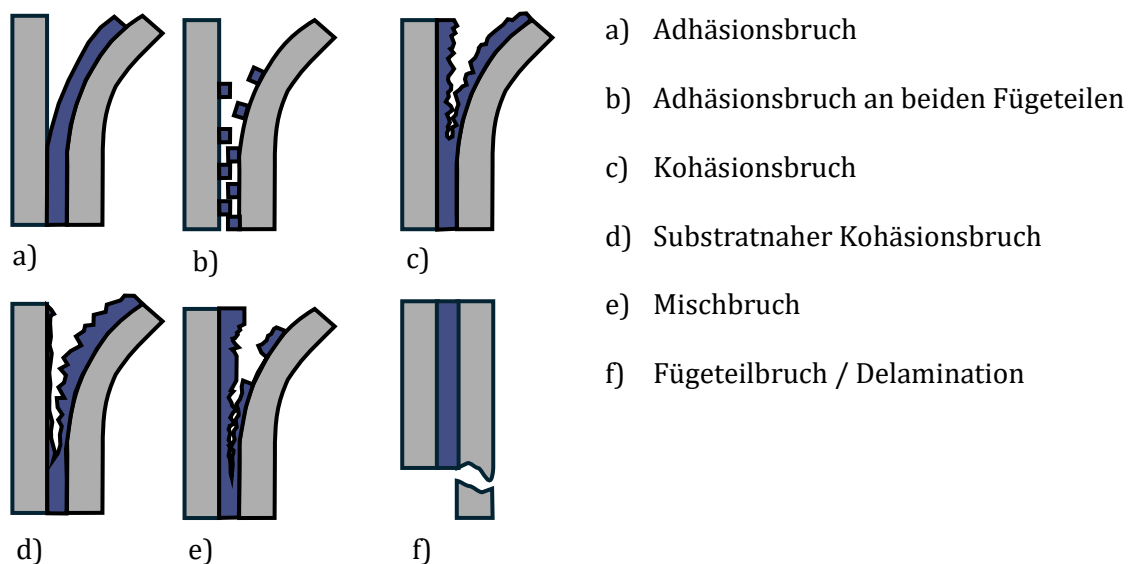


Abb. 8 Typische Versagensarten von Klebverbindungen [16].

## 2.2 Klebverbindungen in der Luftfahrt

Vor allem im Flugzeugbau zeigt die Klebeverbindung im Vergleich zu anderen Verbindungsarten, wie Nieten und Schweißen, signifikante Vorteile. Zum einen bieten Klebeverbindungen überragende Eigenschaften in Bezug auf Steifigkeit, Ermüdungsfestigkeit und Schadenstoleranz. Dies liegt unter anderem an dem über die Klebfläche verteilten Kraftfluss. Weiterhin eignen sich Klebverbindungen gut zur Verwirklichung von Sandwichstrukturen, die von den Dämpfungs- und Risswiderstands- Eigenschaften profitieren. In der Vergangenheit wurden vor allem große Metallstrukturen verklebt. Jedoch gibt es vor allem im Flugzeugbau große Anforderung an Qualität und Langlebigkeit. So ist das Kleben mit hohem Aufwand und hohen Kosten verbunden. Mit der steigenden Verwendung von Faserverbundkomponenten, welche besonders von Klebverbindungen profitieren gibt es jedoch ein wachsendes Interesse an lasttragenden, und beständigen Verklebungen. Vor allem auch unter dem Aspekt, dass kostspielige große faserverstärkte Kunststoffbauteile durch mehrere kleinere, zusammengefügte Bauteile ersetzt werden könnten. [7]

Dennoch ist die gehandhabte Methode strukturelle Verbindungen in Flugzeugen herzustellen sowohl für Metall als auch faserverstärkte Kunststoffe noch immer das Nieten. Reine Klebverbindungen wären hier jedoch die kosten- und gewichtseffizienteste Methode. [8]

Herausforderungen in der Umsetzung von sicheren Klebverbindungen setzen sich zusammen aus den extrem hohen Anforderungen an die Prozess-Sicherheit und Qualität, dem Mangel an Materialdaten durch die relativ geringe Stückzahl der Luftfahrtindustrie, als auch der Problematik, dass es bis jetzt nicht möglich ist über die genaue Belastbarkeit von schwachen, geschädigten Klebverbindungen auszusagen. Somit werden in heutigen Flugzeugentwürfen keine Klebverbindungen von primären Strukturen ohne zusätzliche lasttragende Befestigungen, wie zum Beispiel Nieten, angewendet. Ebenfalls wird keinerlei Risswachstum zugelassen. [8]

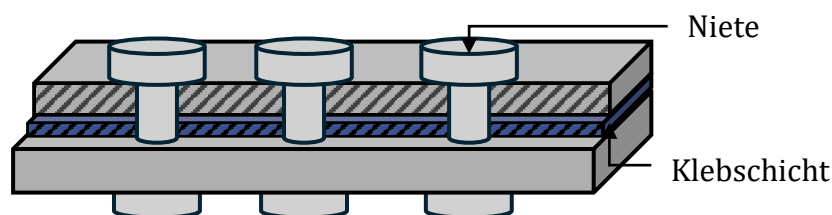


Abb. 9 Klebverbindung mit zusätzlich eingebrachten Nieten.

Diese Auslegungsphilosophie ist zum großen Teil aus den Bauvorschriften begründet. Für Verbindungen, deren Versagen eine katastrophale Folge für das Flugzeug in Folge hätten, verlangt die Vorschrift folgende Bedingungen:

- (i) *„Die maximal zulässigen Delaminationen jeder Klebeverbindung, die mit der Fähigkeit übereinstimmen, die in Absatz (a)(3) dieses Abschnitts beschriebenen Lasten auszuhalten, müssen durch Analysen, Tests oder beides bestimmt werden. Delaminationen jeder Klebeverbindung, die diese Grenze überschreiten, müssen durch konstruktive Maßnahmen verhindert werden, oder*
- (ii) *Belastungstests müssen an jedem Produktionsartikel durchgeführt werden, um die kritische Grenzlast für jede kritische Klebeverbindung anzuwenden, oder*
- (iii) *Wiederholbare und zuverlässige zerstörungsfreie Prüfverfahren (NDI) müssen etabliert werden, die die Festigkeit jeder Verbindung gewährleisten.“*

[17]

Die Punkte (iii) und (ii) sind nicht erfüllbar, da es zum einen keine etablierten Prüfverfahren für diese Anwendung gibt und es nicht wirtschaftlich umsetzbar wäre jede angefertigte Klebschicht einzeln auf diese Weise zu testen. Somit bleibt Punkt (i), welcher nach heutigem Vorgehen erfüllt wird, indem die Klebschicht durch zusätzliche Befestigungen, wie zum Beispiel Niete, ergänzt wird. [8]

Diese mildern jedoch den Vorteil, den Klebeverbindungen im Aspekt Leichtbau bieten. Weiterhin führen Bohrungen für Befestigungen, wie Niete, zu Spannungsspitzen im Material. [9]

Zurzeit erforschte Wege, um diese Notwendigkeit zu umgehen beinhalten alternative Verklebungsprozesse, verbesserte Prozessverlässlichkeit, neue Verbindungsentwürfe, sowie sogenannte Rissstoppelemente. [8]

### 2.3 Rissstoppelemente

Rissstoppelemente sind konzeptuell dazu ausgelegt, einen bereits entstandenen, fortschreitenden Riss in einem Werkstoff zu stoppen. Speziell für die zuvor beschriebene Anwendung in der Luftfahrt bedeutet das, den Riss davon abzuhalten eine kritische Länge zu erreichen. [18]

Aus vergangener Forschung existieren bereits mehrere Konzepte, um diesen Effekt umzusetzen. Vorschläge beinhalten die Modifizierung der Klebstoff-Steifigkeit ab einer Übergangsstelle, weiche Nylon-Einsätze am Klebschichttrand, sowie eingelegte Verschachtelung verschiedener Materialien in die Klebschicht. [9]

Eine weitere Möglichkeit einen rissstoppenden Effekt in einer Klebverbindung zu erzielen, bietet die Hybrid Bondline. Das Konzept arbeitet mit der Integration von duktilen Thermoplasten in Klebebindungen. Diese werden bereits genutzt, um unerwünschtes, sprödes Klebstoffverhalten zu adressieren. Dies kann jedoch ebenfalls zu einem Verlust von Steifigkeit und Festigkeit führen. Die Hybrid Bondline agiert hier als physikalische Barriere um Risse zu stoppen. Sie reicht dabei über die gesamte Klebschichtdicke hinweg. [11]

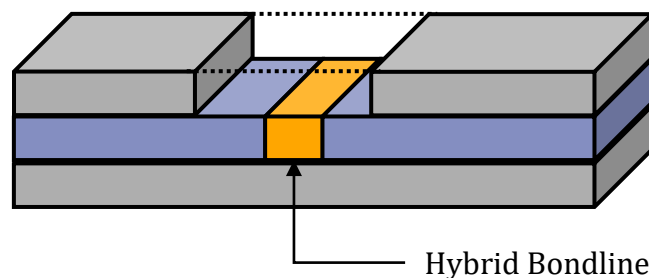


Abb. 10 Darstellung einer Verklebung mit Hybrid-Bondline.

In ersten Untersuchungen konnte ein rissstoppender Effekt des Konzepts nachgewiesen werden. Durch die hohe Elastizität werden lokale Spannungen in der Klebschicht reduziert. Das Material dehnt sich und nimmt somit einen Teil der angreifenden Kraft in Verformung auf. [11]

Die Hybrid Bondline wird angefertigt, indem der Thermoplast zunächst mit co-curing auf die Fügepartner aufgebracht wird. Daraufhin werden die beiden Thermoplast Streifen, nach aufbringen des Klebstoffes während des Aushärtprozesses des Klebstoffes durch die hohen Temperaturen verschweißt. Als Werkstoff wurde hier Polyvinylidenfluorid (PVDF) verwendet. [11]

Da der Fertigungsprozess mit hohem Aufwand verbunden ist und so keine reproduzierbaren Ergebnisse über eine Laborprobe erzeugt werden konnten wurde von M.Schollerer ein angepasstes Konzept vorgestellt. [10]

Das neue Konzept, die lokale Oberflächenzähmodifikation engl. Local Surface Toughening (ST), ist eine Weiterentwicklung auf Basis der Hybrid Bondline. Hier wird der elastische Kunststoff nun zwischen Bauteil und Klebschicht gelegt. [10]

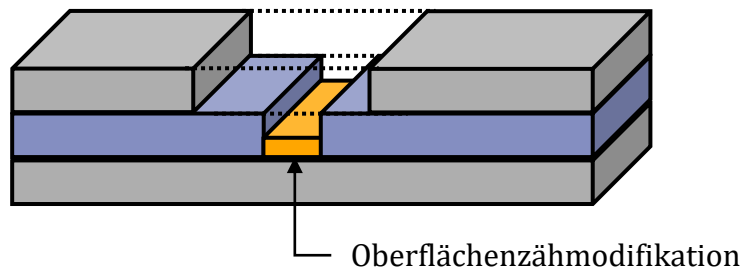


Abb. 11 Darstellung einer Klebverbindung mit Oberflächenzähmodifikation.

Bei Platzierung der Oberflächenzähmodifikation mittig an eine beliebige Stelle in der Klebverbindung wirkt sie an dieser Stelle rissstoppend. Die Bedingung für diesen Effekt ist, dass die Steifigkeit des Oberflächenzähmodifikations-Werkstoffs deutlich geringer ist als die des Klebstoffs, während die Bruchzähigkeit über der des Klebstoffs liegen muss. [10]

Der rissstoppende Effekt wurde an DCB als auch an ENF-Proben getestet, welche die Klebverbindung jeweils auf Schäl- und auf Scherbelastung prüfen. Bei beiden Versuchen konnte ein rissstoppender Effekt festgestellt werden. [10]

Im Folgenden wird genauer auf die DCB-Versuche eingegangen.

Als Material der Fügebauteile wurde das Prepreg HexPly® 8552/IM7 verwendet. Dieses Material wurde für Einsätze entworfen, bei denen hohe Steifigkeiten, Festigkeiten und Schadenstoleranzen vorausgesetzt werden. Oft wird dieses in der Luft und Raumfahrt, unter anderem für primäre Flugzeugstrukturen eingesetzt. Die Materialwerte der Unidirektionalen Lage können Tab. 1 entnommen werden. [19]

Tab. 1 Materialwerte des Prepregs HexPly® 8552/IM7 [20].

$E_{11}$	$E_{22}$	$G_{12}$	$\nu_{21}$
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
172322	9291	5450	0,32

Als Klebstoff wurde der Epoxid- Filmklebstoff EA 9695 050 NW Aero verwendet [10]. Die Materialwerte können Tab. 2 entnommen werden.

Tab. 2 Materialwerte des Filmklebstoffes EA 9695 050 NW Aero [10].

$\sigma_{K,Br(1)}$	$E_{K(1)}$	$G_K$	$E_{K,Bn(2)}$	$\gamma_{K,Br}$	$T_{K,Br}$	$\nu_K$
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[-]
59,17	2576,8	640	3,44	0,33	51,4	0,43

Als Materialien für die Oberflächenzähmodifikation wurden PVDF und PEEK aufgrund ihrer Materialwerte, vor allem der Steifigkeit, als auch der Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen gewählt. [10]

### *Ergebnisse*

Bei der Untersuchung der DCB-Proben konnte im Bereich der Oberflächenzähmodifikation ein rissstoppender Effekt beobachtet werden. Im Weiteren wird die Energiefreisetzungsrates über dem Risswachstum beurteilt. Hier konnte ein Anstieg des Wertes um etwa 25,1% beobachtet werden. Eine genauere Beurteilung der  $G_{IC}$ -Werte über den Bereich der Oberflächenzähmodifikation konnte jedoch nicht getroffen werden. Durch den Rissprung während des instationären Risswachstums konnte der Probenabschnitt nur grob über zwei Messpunkte aufgelöst werden. [10]

Schollerer schlägt den Einsatz von FOSS-Sensoren zur Lokalisierung der Rissposition und Validierung des Effekts der Zähmodifikation vor [10].

### *Temperaturbeständigkeit*

Für den Einsatz der Oberflächenzähmodifikation in der Luftfahrt stellen sich bei PVDF jedoch Probleme im niedrigen Temperaturbereich dar. Die Elastizität von PVDF sinkt ab circa  $-30\text{ °C}$  stark, da die Glasübergangstemperatur des Werkstoffes bei etwa  $-40\text{ °C}$  liegt [21]. Mit Verminderung der Elastizität sinkt auch der Oberflächenzähmodifikations-Effekt. Der Einsatzbereich für Verkehrsflugzeuge liegt jedoch bei etwa  $-55\text{ °C}$  [22]. Daher wurde in [10] die Verwendung von TPU als Material für die Oberflächenzähmodifikation vorgeschlagen. Dieses besitzt bis  $-30\text{ °C}$  ein ähnliches Dehnungsverhalten wie PVDF, besitzt jedoch eine deutlich geringere Glasübergangstemperatur bei etwa  $-60\text{ °C}$  [10].



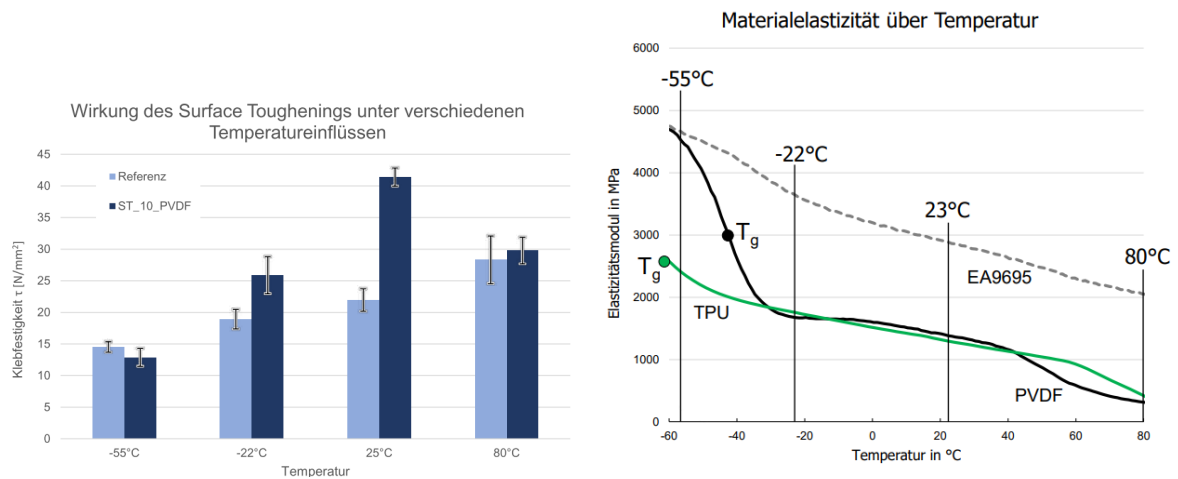


Abb. 12 Verhalten einer Klebverbindung mit Oberflächenzähmodifikation mit PVDF unter verschiedenen Temperaturen [21] (links) und Materialelastizität von PVDF, TPU und dem Klebstoff EA9695 für verschiedene Temperaturbereiche [10] (rechts).

Die geringe Glasübergangstemperatur kann mit der Inkorporation von Nanopartikeln erreicht werden [23].

## 2.4 Faseroptische Sensoren

Faseroptische Sensoren nutzen im Allgemeinen den Einfluss von Umweltbedingungen auf die optischen Eigenschaften einer Glasfaserleitung. Die Nutzung dieses Effekts als Sensor ist keinesfalls eine neue Entwicklung. Internationale Konferenzen zu faseroptischen Sensoren werden beispielsweise bereits seit 1983 etwa jedes Jahr von hunderten Teilnehmern besucht. Besonders der weite Einsatz von optischen Fasern in der Telekommunikation hat diese günstiger und verfügbarer gemacht, was signifikant zu Fortschritten in der Entwicklung von faseroptischen Sensoren beitragen konnte. [24]

### 2.4.1 Struktur optischer Fasern

Im Allgemeinen werden meist einfache telekommunikationsfasern als Sensor für faseroptische Sensorsysteme verwendet. Der Aufbau einer solchen Faser ist in Abb. 13 dargestellt. Die Lichtwellen verlaufen im Kern und werden an der Grenze zum Mantel durch den unterschiedlichen Brechungsindex der beiden Komponenten reflektiert (). So können sich mit sehr geringen Verlusten in Längsrichtung der Faser ausbreiten. Die Hülse um den Mantel dient als Schutz vor äußeren Einflüssen. [24]

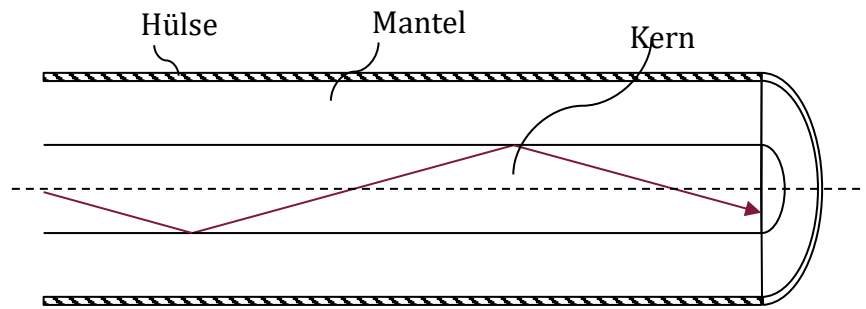


Abb. 13 Darstellung des allgemeinen Aufbaus einer optischen Faser.

### 2.4.2 Faser-Bragg-Gitter

Das Einbringen von Gitterstrukturen wurde bereits kurz nach der Erfindung der optischen Faser erforscht. Die Qualität und der herstellungsaufwand dieser frühen Versuche waren jedoch nicht geeignet für die praktische Anwendung. Die Entdeckung der Fotosensitivität der Faser ermöglichte später das Einbringen von Gittern durch Behandlung der Faser mit Lasern. Dies führte dazu, dass sich Gitterstrukturen in optischen Fasern in den letzten zwei Jahrzehnten zu ausgereiften Technologien entwickeln konnten. Eine dieser Gitterstrukturen ist das Faser-Bragg-Gitter. Das Gitter reflektiert ein Teil der Lichtwellen, dessen Eigenschaften von Temperatur und Dehnung der Faser abhängig sind. So kann an diesen lokal in die Faser eingebrachten Punkten die Temperatur beziehungsweise die Faserdehnung durch die Reflexion des Signals am Gitter gemessen werden. [24]

### 2.4.3 Verteilte optische Sensoren

Eine weitere Methode optische Fasern als Sensor einzusetzen, bietet der Rückstreuungseffekt innerhalb der Faser. Der Vorteil ist hier, dass sich die Faser als verteilter Sensor einsetzen lässt, also ein hochauflösender Sensor über die gesamte Faserlänge. [24]

Hier liegt der Vorteil gegenüber der Messung mit Faser-Bragg-Gittern oder klassischen Messstreifen. Zusätzlich lässt sich die optische Faser in Materialien einbetten. Vorangegangene Forschung konnte zeigen, dass mit verschiedenen verteilten faseroptischen Messmethoden Rissposition und Rissbreite akkurat gemessen werden konnten. [25]

Das in dieser Arbeit angewandte grundlegende Prinzip des verteilten optischen Sensors ist die Rayleigh Streuung. Diese ist eine von mehreren Streuungseffekten, die zur Umsetzung von faseroptischen Sensoren verwendet werden. [24]

Die Rayleigh-Streuung wird durch die Interaktion der Photonen mit den Atomen der Faser hervorgerufen. Ein Anteil der Streuung, wird von der Faser zurück in Richtung des Messgeräts geleitet (Abb. 14). [24]

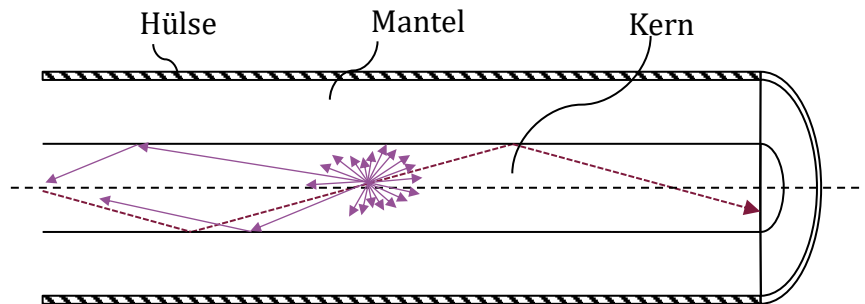


Abb. 14 Darstellung einer optischen Faser mit eingezeichneter Lichtstreuung.

Gemessen wird über die Optische Frequenzbereichs Reflektometrie. Für diese Methode wird ein frequenzeinstellbarer Laser verwendet, welcher einen spezifischen Frequenzbereich abtastet. Die rückgestreute Frequenzantwort wird daraufhin durch die Fourier-Transformation in den Zeit-/Raum- Bereich umgewandelt. Somit ist die räumliche Auflösung des Sensors von der Bandbreite des Lasers abhängig. [26]

## 2.5 Fazit

Kleben ist eine weit verbreitete Fügetechnologie, die vor allem im Leichtbau viele Vorteile bietet. Im Flugzeugbau ist sie daher bereits weit verbreitet und ermöglicht gegenüber herkömmlichen Verfahren wie Nieten oder Schweißen eine deutliche Gewichtseinsparung, sowie eine höhere Steifigkeit und Ermüdungsfestigkeit. Herausforderungen bestehen jedoch nach wie vor in der Prozesssicherheit und der zerstörungsfreien Prüfung. Darüber hinaus schränken Bauvorschriften den uneingeschränkten Einsatz in primären Flugzeugstrukturen ein. Ein vielversprechender Ansatz zur Erhöhung der Schadenstoleranz und Zuverlässigkeit von Klebverbindungen ist die Integration sogenannter Rissstoppelemente. Hier gibt es eine Vielzahl unterschiedlich weit erforschter Konzepte, von denen sich insbesondere die Oberflächenzähmodifikation als einfache und effektive Lösung hervorhebt. Weiterer Forschungsbedarf besteht jedoch in der Untersuchung anderer Materialien für den Einsatz bei Temperaturen unter  $-50\text{ °C}$  sowie in der Verwendung von faseroptischen Sensoren zur Messung des Risswachstums über den oberflächenzähmodifizierten Bereich.

### 3 Methodik

Im vorangegangenen Kapitel wurden neben den Grundlagen struktureller Klebverbindungen und deren Rolle in der Luftfahrt ebenfalls Konzepte für rissstoppende Elemente durch Surface Toughening vorgestellt. Es wurde auch diskutiert, wie Dehnungssensoren, insbesondere FOSS, bei der Untersuchung dieser Verbindungen eingesetzt werden können. Das Kapitel widmet sich der Entwicklung eines Prüfkonzeptes, das auf der Norm für Dual Cantilever Beam (DCB)-Verfahren als zentrale Untersuchungsmethode basiert. Dazu werden zunächst die theoretischen Grundlagen des Probenverhaltens definiert.

#### 3.1 DCB-Versuche

Zur Analyse des Risswachstums in strukturellen Klebverbindungen wurde die sogenannte Double Cantilever Beam Methode herangezogen. Diese Methode fokussiert sich insbesondere auf das Mode I-Versagen und die interlaminare Energiefreisetzungsrate  $G_{IC}$  von monolithischen Faserverbundmaterialien mit einer unidirektionalen Faserausrichtung parallel zur Rissebene [27]. Das Messen des Risswiderstandes von Klebverbindungen bei Mode I-Belastungen ist weit verbreitet [28]. Die Schälbeanspruchung einer Klebverbindung ist, zusammen mit der Spaltbelastung, der ungünstigste Belastungsfall, da sich die resultierende Spannung vor allem in einem schmalen Bereich entlang der Vorderkante, bzw. der Rissspitze konzentriert [13]. Das Vorgehen für die DCB-Versuche erfolgt gemäß der Norm ASTM D5528 – 21. Die Proben weisen eine vorgegebene Länge, Breite und Höhe auf, wobei die Norm zusätzlich eine Initialriszlänge vorschreibt (Tab. 3, Abb. 15).

Tab. 3 Prüfkörper-Maße von DCB Proben nach Norm ASTM D5528 - 21 [27].

Länge (l)	>140 mm
Höhe (h)	3-5 mm
Breite (b)	20-25 mm
Initialrisslänge (e)	76 mm
Initialrisslänge von Lasteinleitungspunkt (a <sub>0</sub> )	50mm

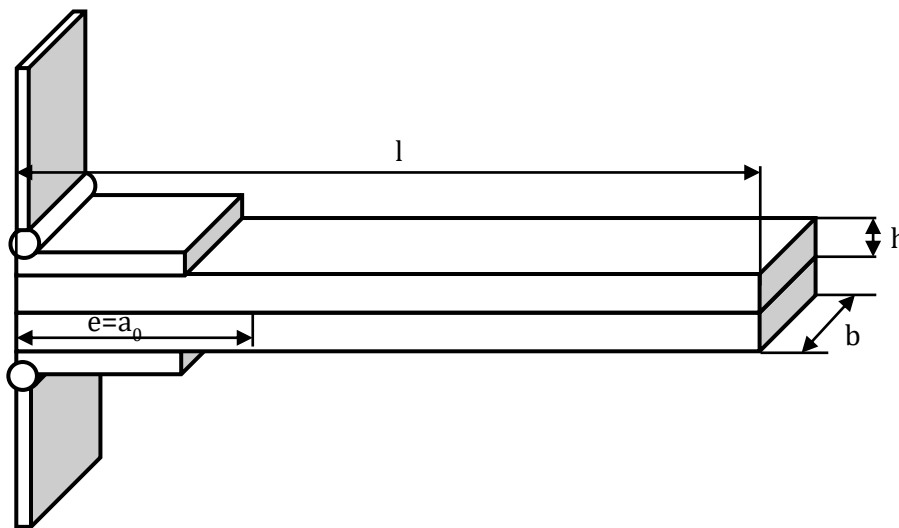


Abb. 15 Darstellung einer DCB Probe mit Scharnieren und eingezeichneten Dimensionen [27].

Der Initialriss wird durch das Einlegen von Trennfolie in die Mitte der Probe zwischen den Laminatschichten realisiert, während die Scharniere zur Krafteinleitung am Probenende angebracht werden, an dem der Initialriss liegt. Nach der Vorbereitung der Prüfkörper werden die Dicke und Breite der Proben in der Mitte und 50 mm von beiden Enden entfernt gemessen. Beide Probenseiten werden vor dem Test dünn mit weißer Farbe beschichtet und anschließend auf beiden Seiten mit einer Reihe dünner vertikaler Striche markiert. Diese beginnen an der Stelle der Initialrisspitze mit einem Abstand von jeweils

1 mm für die ersten 10 mm und einem Abstand von 2 mm für weitere 20 mm (Abb. 16). [27]

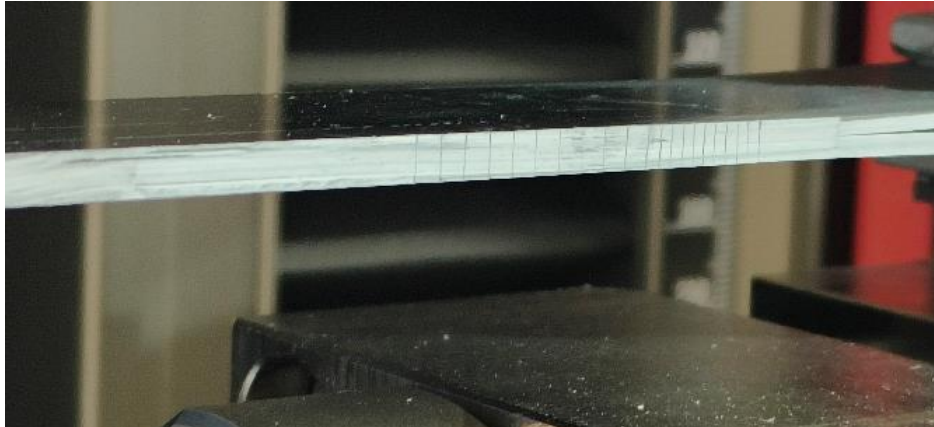


Abb. 16 Eine eingespannte DCB-Probe mit aufgebrauchten Markierungen.

Im Anschluss wird die Probe in die Prüfmaschine eingespannt. Der Rissfortschritt wird an der Seite der Probe mithilfe eines optischen Mikroskops verfolgt und die Probe wird zunächst mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis 5 mm/min auseinandergezogen (Abb. 17).

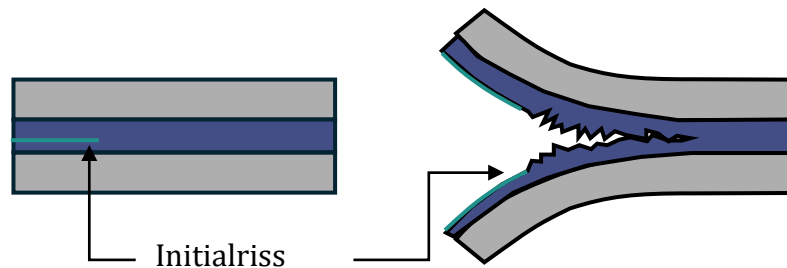


Abb. 17 Vereinfachte schematische Darstellung einer DCB-Probe (links) ungeprüft und (rechts) während der Prüfung.

Dabei werden Kraft und Traverse der Prüfmaschine aufgezeichnet. Wenn bei einer Risslänge von 3 mm bis 5 mm stabiles Risswachstum vorherrscht wird die Probe bis auf die Hälfte der maximal aufgetretenen Kraft entlastet. Dieser Vorgang wird als Pre-Crack-Phase (PC) bezeichnet, und dient dazu, ein gleichmäßiges Risswachstum zu Beginn der Messung zu garantieren. Daraufhin wird dokumentiert, ob der sichtbare Riss nicht jeweils weiter als 2 mm von der anderen Seite der Probe abweicht. Daraufhin erfolgt eine Entlastung der Probe auf 0 N, gefolgt von einer erneuten Belastung mit derselben Geschwindigkeit wie im vorangegangenen Schritt. Im weiteren Verlauf werden Kraft, Traverse sowie Risslänge kontinuierlich erfasst. Die Risslänge wird hierbei anhand der Markierungen an der Probenseite abgelesen.

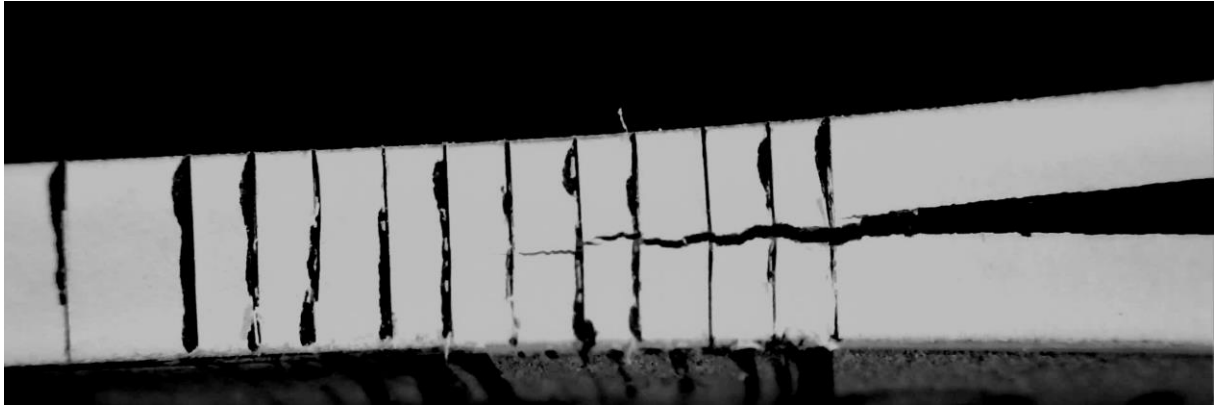


Abb. 18 Seitenansicht einer DCB-Probe während des Tests mit einer Risslänge von circa 65 mm.

Sobald der Riss eine Länge von mindestens 30 mm über die Initialriss-Länge hinaus erreicht hat, wird die Probe wieder auf 50 Prozent der Maximalkraft entlastet. Nun wird die Risspitze markiert, bevor die Probe vollständig entlastet wird. Bleibende Deformationen der Probe werden im Anschluss dokumentiert. [27]

Die Messung der Risslänge mit dieser Methode ist einigen Fehlerquellen ausgesetzt. Zunächst muss die gemessene Verformung der Probe um die Verformung der Prüfmaschine korrigiert werden. Dies wird ebenfalls in der Norm empfohlen [27]. Weiterhin entstehen durch das visuelle Ablesen des Rissfortschritts an der Probenseite mögliche Ungenauigkeiten. Die Messgenauigkeit ist abhängig von der Riss-Form innerhalb der Probe, welche jedoch meist keine gerade Linie über die Probenbreite annimmt, sondern eine parabel-förmige Form besitzt [28]. Weiterhin sind die Ergebnisse durch das manuelle, optische Ablesen des Risses, stark von der prüfenden Person abhängig [29]. So können Messungenauigkeiten von mehreren Millimetern entstehen [29].

### 3.1.1 Bestimmen von $G_{IC}$

Der  $G_{IC}$ -Wert eignet sich, zur Bewertung der Bruchzähigkeit über die Risslänge in der Risswiderstandskurve (R-Kurve). Die R-Kurve veranschaulicht den Widerstand des Materials gegenüber einer progressiven Rissausbreitung unter anhaltender statischer Belastung. Für die Auswertung von  $G_{IC}$  existieren vier verschiedene Ansätze. Diese sind die Beam Theory (BT), die Modified Beam Theory (MBT), die Compliance Calibration-Methode (CCM) und die Modified Compliance Calibration-Methode (MCCM). Die Methode der Beam Theory basiert auf der Annahme der Probe als idealer Balken, bei der die Energiefreisetzungsrates durch einfache Balken und Elastizitätstheorie berechnet wird. Die Compliance Calibration-Methode basiert auf der experimentellen Kalibrierung der Nachgie-

bigkeit. Die Energiefreisetzungsrates wird aus der Compliance-Kurve abgeleitet. Die Ergebnisse zwischen den verschiedenen Methoden weichen jedoch nicht mehr als 3,1% voneinander ab. [27]

Die Ergebnisse der folgenden Arbeit werden mit der Modified-Beam-Theory bestimmt, um eine Vergleichbarkeit mit vorangegangenen Untersuchungen zu gewährleisten. Hier wird der  $G_{IC}$ -Wert mit der MBT bestimmt, da diese die konservativsten Ergebnisse erzeugt. [10]

Die Grundlage der  $G_{IC}$ -Wert Bestimmung nach MBT wird durch die BT mit folgender Gleichung geliefert:

$G_{IC}$  nach BT

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (1)$$

Aufgrund der Annahme in einer perfekt eingespannten Probe in (1), was Rotationen an der Rissfront vernachlässigt, tendiert diese Methode dazu  $G_{IC}$  zu überschätzen. Infolgedessen kann diese Formel nach der MBT um einen Korrekturwert  $\Delta$  erweitert werden. Demnach wird von einer verlängerten Risslänge  $a + |\Delta|$  ausgegangen.

$G_{IC}$  nach MBT

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (2)$$

Die Bestimmung von  $\Delta$  erfolgt durch die Berechnung von  $C^{1/3}$  über die Risslänge  $a$ .  $C$  repräsentiert dabei die Nachgiebigkeit. Der Wert  $\Delta$  wird anschließend aus dem  $a$ -Wert abgelesen, der am Schnittpunkt der Gerade mit der x-Achse nach Abb. 19 abgelesen werden kann.

$$C^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{\delta}{P}} \quad (3)$$



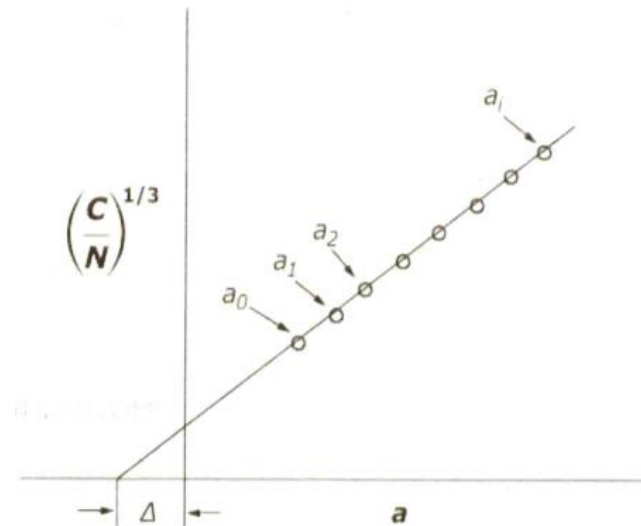


Abb. 19 Bestimmung des Korrekturfaktors über die Darstellung der dritten Wurzel der Nachgiebigkeit einer exemplarischen DCB-Probe über die Risslänge [30].

### 3.2 Prüfkörpergeometrie

Die Geometrie, der in dieser Arbeit für die Untersuchungen verwendeten Proben, weicht in einigen Punkten geringfügig von der Norm ab. Die Gesamtdicke mit 3 mm, die Breite mit 25 mm und die Länge mit 260 mm liegen alle im Rahmen der per Norm vorgegebenen Maße. Zur Einspannung der Probe in die Prüfmaschine werden Scharniere verwendet. Die Achse des Scharniers und damit der Kräfteinleitungspunkt liegt am Anfang der Probe, so dass der Angriffspunkt der Prüflast genau auf dem Balkenanfang fällt und nicht zusätzlich berücksichtigt werden muss. Das Scharnier hat eine Länge von 25 mm (Abb. 20).

Die gewählte Anfangsrisslänge von 60 mm weicht von dem in der Norm vorgegebenen Wert ab. Diese wurde aus vorangegangenen Untersuchungen übernommen, und berücksichtigt den verschobenen Kraftangriffspunkt an Probenanfang. [10]

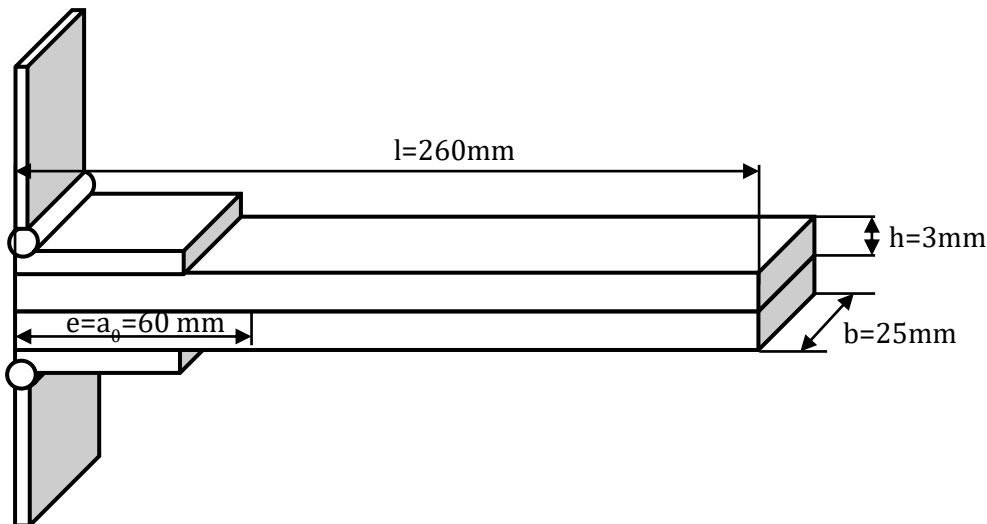


Abb. 20 Darstellung einer DCB Probe mit aufgebrauchten Scharnieren und Probendimensionen.

### 3.3 Theorie des Biegebalkens

Um eine Methode zu finden, das Risswachstum innerhalb einer DCB-Probe mittels Dehnungsmessung nachvollziehbar verfolgen zu können, müssen zunächst die grundlegenden Dehnungszustände innerhalb der Probe analysiert werden.

Zur Vereinfachung der Betrachtung wird eine Probenhälfte eines DCB-Versuches als einfacher Biegebalken angenommen, wobei die angreifenden Kräfte und Reaktionskräfte der Einspannung gemäß Abb. 21 dargestellt werden. Am freien Balkenende, wo der in der Prüfmaschine eingespannte Scharnier auf die Probe aufgeklebt ist, wirkt die Kraft  $F$ , die die Probe nach oben biegt. Zudem wird an dieser Stelle die Bewegung der Probe in  $x$ -Richtung begrenzt. An der Stelle der Risspitze ist das Balkenende in zwei Freiheitsgraden eingeschränkt. Während des Versuches kann sich die Probe in  $x$ -Richtung frei verschieben, wird jedoch von der Klebverbindung zur anderen Probenhälfte und von der restlichen verklebten Probenhälften-Länge im Moment und  $Y$ -Bewegungsrichtung beschränkt. Diese Annahme ist jedoch mit der Prämisse verbunden, dass der verklebte Teil der Probenhälfte ideal steif ist.



Abb. 21 Vereinfachte schematische Darstellung einer DCB-Probe als zwei miteinander verbundener Balken (links) und einer Probenhälfte als vereinfachter Balken mit wirkenden Kräften und Momenten(rechts).

Zur vereinfachten Beschreibung eines gekrümmten Balkens kann unter den gegebenen Bedingungen die Balkentheorie erster Ordnung herangezogen werden. Diese Theorie fußt auf der Betrachtung der Kräfte und Momente am unverformten Balkenquerschnitt. Die Anwendung dieses Modells setzt die Bedingung voraus, dass die Höhe des Balkenquerschnitts maximal ein Zehntel der Balkenlänge beträgt. Diese Werte sind in der zugrunde liegenden Norm vorgegeben. Die initiale Risslänge beträgt 50 mm, während die Laminatdicke einer Probenhälfte auf maximal 2,5 mm festgelegt ist. Es sei darauf hingewiesen, dass das Balkenmodell nur in ungestörten Profilquerschnitten Gültigkeit besitzt. Aus diesem Grund können keine Aussagen über Bereiche in der Nähe von Lasteinleitungen und Einspannungen getroffen werden.

Da die Proben einen vollen rechteckigen Querschnitt aufweisen, kann unter der Annahme, dass die Lasteinleitung im Flächenschwerpunkt angreift, von einer reinen Biegung ausgegangen werden. Dies gestattet die Anwendung der Bernoulli-Hypothese. Gemäß dieser Hypothese bleiben ebene Balkenquerschnitte auch unter Belastung relativ zur gebogenen Mittellinie eben und erfahren keine Veränderung ihrer Geometrie [31]. Die in Abb. 22 dargestellten geometrischen Verhältnisse ergeben sich aus dieser Annahme.

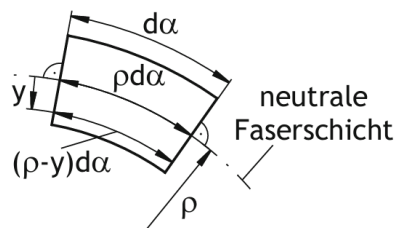


Abb. 22 Darstellung eines gebogenen Balkensegments mit entsprechenden geometrischen Beziehungen [31].

Es kann abgeleitet werden, dass die Dehnung entlang der Balkenachse  $x$  über den Balkenquerschnitt in Richtung der Krümmung linear verläuft. Sie ist abhängig von der  $y$ -Position im Balkenquerschnitt sowie vom Krümmungsradius.

$$\varepsilon_x = \frac{(\rho - y)d\alpha - \rho d\alpha}{\rho d\alpha} = -\frac{y}{\rho} \quad (4)$$

Eine Seite des Balkens wird unter reiner Biegebelastung gestaucht, während die andere Seite gedehnt wird. In der Mitte des Balkens muss demnach eine Faser liegen, die keine

Dehnung erfährt. Diese wird als neutrale Faser bezeichnet. Um den Zusammenhang zwischen Dehnung und angreifender Kraft herzustellen, müssen die Stoffgesetze berücksichtigt werden. Unter der zusätzlichen Annahme eines homogenen Werkstoffs und ungehinderter Querkontraktion kann aus dem Stoffgesetz folgender Zusammenhang geschlossen werden (vgl. [31]).

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = -E \frac{y}{\rho} \quad (5)$$

Die Normalspannungsverteilung kann durch eine lineare Funktion dargestellt werden.

$$\sigma_x(x, y, z) = a_{00}(x) + a_{10}(x)y + a_{01}(x)z \quad (6)$$

Nach [31] kann (6) unter Berücksichtigung des Balkenquerschnitts und der Annahme, dass der Koordinatenursprung im Flächenschwerpunkt liegt und mit den Hauptachsen des Profils zusammenfällt, zu folgender Gleichung vereinfacht werden.

$$\sigma_x = \frac{N}{A} - \frac{M_{bz}}{I_z} + \frac{M_{by}}{I_y} z \quad (7)$$

Die in (7) enthaltenen Kräfte und Momente sind in Abb. 23 am Balkenquerschnitt dargestellt.

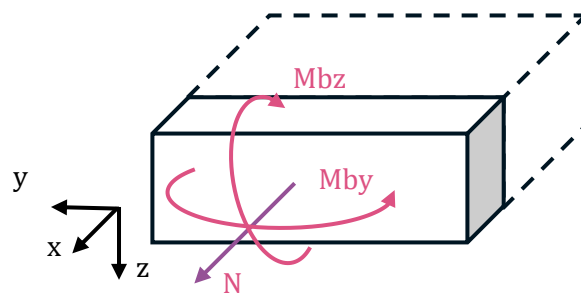


Abb. 23 Ein freigeschnittenes Balkenelement mit eingezeichneten Kräften und Momenten.

Die Normalspannung im Balken ist somit in Abhängigkeit der im Querschnitt wirkenden Normalkraft und Momente. Für den in diesem Fall betrachteten Belastungsmodus fallen Momente um die z-Achse, sowie Normalkräfte weg. (7) lässt sich somit wie folgt vereinfachen.

$$\sigma_x = \frac{M_{by}}{I_y} z \quad (8)$$

Das Flächenträgheitsmoment  $I_y$  kann aus der Querschnittsgeometrie bestimmt werden.

$$I_y = \int_A z^2 dA \quad (9)$$

Das Integral kann unter folgender geometrischer Betrachtung gelöst werden (Abb. 24).

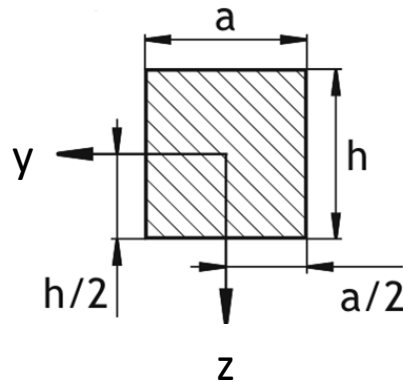


Abb. 24 Querschnitt eines einfachen rechteckigen Balkenprofils mit geometrischen Beziehungen zur Flächenintegration [31].

$$dA = ydz = bdz \quad (10)$$

(10) in (9) eingesetzt ergibt folgenden Zusammenhang.

$$I_y = \int_{h/2}^{-h/2} z^2 bdz = \frac{bh^3}{12} \quad (11)$$

Für die Dehnung erhält man so mit (5) und (8) folgende Formel.

$$\varepsilon_x = \frac{M_{by}}{I_y} z \frac{1}{E} \quad (12)$$

Für einen Balken mit einer Dicke von 1,5 mm erhält man für eine Biegung durch eine Querkraft in entgegengesetzte Richtung der  $z$ -Achse den in Abb. 25 dargestellten Dehnungsverlauf entlang der  $x$ -Achse.

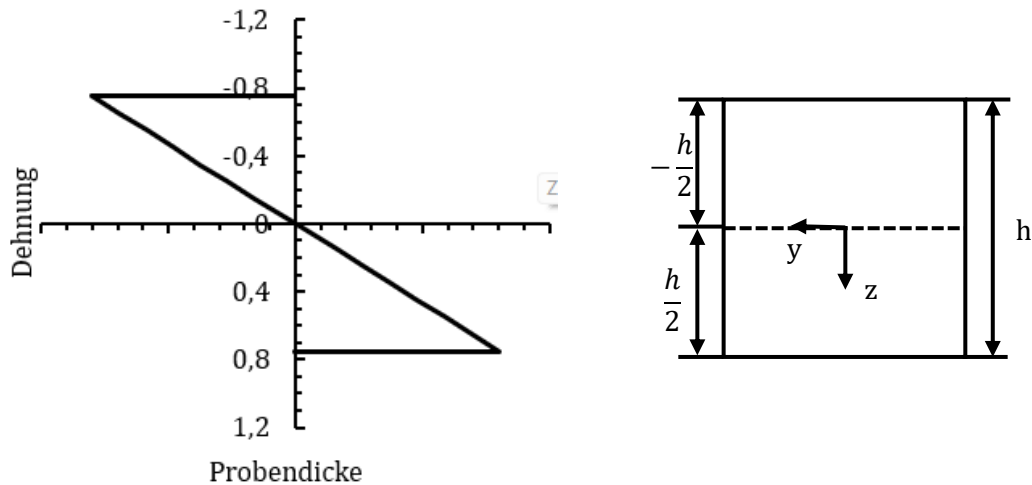


Abb. 25 Qualitative Darstellung des Dehnungsverlaufes entlang der y-Achse (links) eines rechteckigen Balkenprofils eines gebogenen Balkens (rechts).

Es lässt sich eindeutig feststellen, dass der Betrag der Dehnung an der Ober- und Unterseite des Balkens maximal ist. In der Mitte des Balkens befindet sich die neutrale Faser, deren Dehnung dem Normkraftverlauf in der Probe entspricht. In der hier vereinfachten Annahme werden diese Normkräfte vollständig von der noch verklebten Probe aufgenommen, ohne dass eine Verformung in x-Richtung eintritt.

### 3.4 Risslokalisierung mit Dehnungssensoren

Unter Betrachtung des Dehnungsverlaufes an der Unterseite des Balkens über die Balkenlänge für verschiedene Risspositionen, also verschiedene Einspannungspositionen, ergeben sich für eine konstante Kraft die in Abb. 26 dargestellten Verläufe.

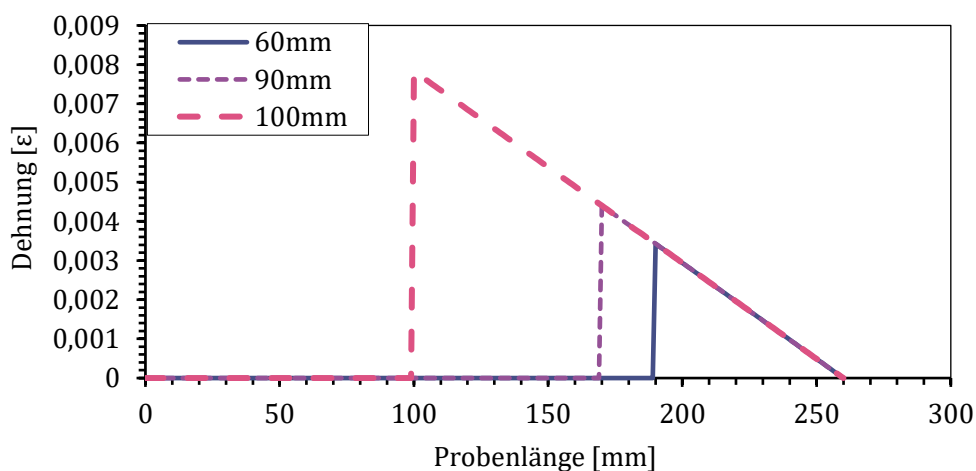


Abb. 26 Qualitative Darstellung der absoluten Dehnung der Unter- oder Oberseite eines gebogenen Balkens über die Balkenlänge bei gleicher Kraft und unterschiedlicher Einspannungs-Positionen entlang des Balkens.

Am Ort der Eispannung, d.h. an der Stelle, an der sich im DCB-Versuch die Risspitze befindet, ist ein deutlicher Dehnungssprung zu erkennen. Diese nimmt über die restliche Balkenlänge linear ab, bis sie schließlich am freien Balkenende, an dem die Belastung angreift, 0 erreicht.

Mithilfe eines verteilten Dehnungssensors, der die Dehnung über die gesamte Probe misst, kann dieser Dehnungsverlauf ermittelt werden. Es sollte erkennbar sein, dass der Dehnungssprung genau an der Risspitze liegt und sich mit dem Riss über die Probenlänge im Prüfverlauf verschiebt.

Ebenso sollte die rissstoppende Wirkung der TPU-Oberflächenzähmodifikation beim Risswachstum dadurch erkennbar werden, dass die Dehnungsspitze an diesen Stellen nicht konstant über die Probenlänge bewegt, sondern verlangsamt oder gestoppt wird. Die Messung zur Erfassung des Dehnungssprungs ist an der Stelle mit der betragsmäßig größten Dehnung durchzuführen, wobei die Messpunkte jeweils an der Stelle mit dem größten Abstand zur neutralen Faser liegen. Die Messpunkte befinden sich an der Ober- und Unterseite der beiden Probenhälften.

### **3.5 Messgeräte und Prüfmaschinen**

Die Dehnung der faseroptischen Sensoren wird mit dem System Odisi 6100 gemessen. Das Messsystem ist ein hochauflösender faseroptischer Mehrkanal-Interrogator, der auf dem Prinzip der Rayleigh-Rückstreuung basiert. Dieses Messsystem ermöglicht die Realisierung eines verteilten Dehnungssensors mit einer Auflösung von 0,65 mm und einer Messrate von bis zu 62,5 Hz. Die Dehnungsmessung erfolgt mit einer Auflösung von 0,1  $\mu\epsilon$  und einer Genauigkeit von  $\pm 25 \mu\epsilon$ . Als Sensor wird eine Singlemode-Glasfaser mit einer Gitterwellenlänge zwischen 1520 nm und 1580 nm verwendet, die mit einer Polyimidbeschichtung versehen ist. Zum Anschluss des Sensors an das FOSS-Messgerät werden sogenannte Pigtails verwendet. Dies sind ebenfalls Singlemodefasern, welche mit LC/APC-Steckern versehen sind und an die Messfaser gespleißt werden. Für die Durchführung der DCB-Tests wird die zwickiLine Z5.0 TN mit einer maximalen Prüfkraft von 5 kN verwendet. Das verwendete Prüfprogramm testXpert 3 korrigiert die Messdaten mittels eines internen Prozesses automatisch und berücksichtigt so die Verformung der Prüfmaschine während des Tests. [32, 33]

## 4 Voruntersuchungen

Ziel der Voruntersuchungen ist eine erste Beurteilung der Eignung des FOS-Systems zur Messung des Rissfortschritts. Zu diesem Zweck werden verschiedene Methoden zur Integration von FOS in den Versuchskörper getestet. Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei die Einbettung der FOS-Faser in die Schichten der CFK-Probe auf der Ober- und Unterseite sowie die Applikation der Faser über Aufkleben auf der Probenoberfläche. Darüber hinaus wird der Einfluss der Faser auf das Probenverhalten untersucht.

### 4.1.1 Integration der faseroptischen Sensoren

Für die Voruntersuchungen werden vier Probenvarianten angefertigt. Bei zwei Probenreihen werden die Sensoren in den Lagenaufbau des Prepreg-Laminats integriert. Dies geschieht jeweils direkt unter der obersten Laminatschicht auf der Außenseite der Probe zur Klebschicht (upper layer, UL) und direkt über der untersten Laminatschicht, die direkt an der Verklebung liegt (lower layer, LL). Zusätzlich wird eine Probenreihe mit Sensoren, die auf der Probenoberfläche aufgeklebt werden (secondary bonding, SB) und eine Probenreihe ohne FOS-Sensoren hergestellt [Abb. 27] [Tab. 4]. Die Sensorpositionen werden separat an verschiedenen Proben getestet, um die Fertigung der Proben zu erleichtern, und mögliche Einflüsse der Sensoren auf das Probenverhalten je Sensor Position isoliert beurteilen zu können. Weiterhin wurde in [34] festgestellt, dass die Sensoren sehr empfindlich und anfällig für Beschädigungen sind. Daher dient die Aufteilung der Sensoren auf mehrere Proben ebenfalls der Redundanz im Falle von Beschädigungen.

Tab. 4 Probenprogramm der Voruntersuchungen.

Probenbezeichnung	Sensor Position	Probenanzahl
DCB_kein_FOSS	kein faseroptischer Sensor	7
DCB_FOSS_UL	Sensor an oberster Laminatschicht zur Klebverbindung	7
DCB_FOSS_LL	Sensor an unterster Laminatschicht zur Klebverbindung	7
DCB_FOSS_SB	Sensor auf Probenoberfläche verklebt (eng. secondary bonding)	7



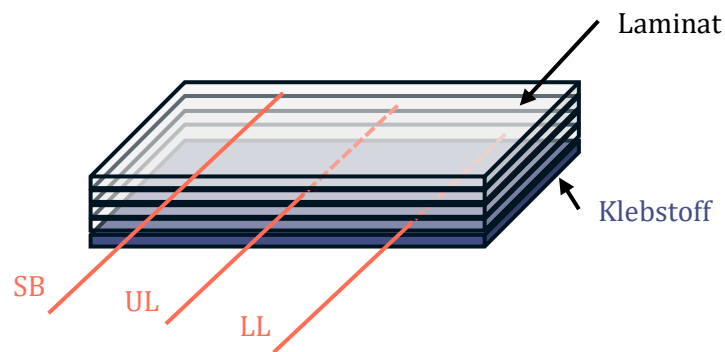


Abb. 27 Einlauf von FOSS Fasern in einen Laminataufbau auf der Probenoberseite, der obersten und untersten Laminatschicht.

Die aufgeklebten Fasern werden vom Ende der Probe bis kurz vor das Scharnier gelegt. Die integrierten faseroptischen Sensoren werden von der Rückseite in die Probe eingeführt und 250 mm in die Probe eingelegt.

## 4.1.2 Prüfkörperherstellung

### 4.1.2.1 Vorbereitung der Sensoren

Die Sensorfaser wird auf eine Länge von 400 mm zugeschnitten und an einem Ende mit einem 20 mm langen Abschnitt einer kernlosen Faser verspleißt. Dadurch wird verhindert, dass das optische Messsignal, das durch die Faser gesendet wird, am Ende der Faser reflektiert wird, was die Messung stören würde. Zunächst werden die Ummantelungen beider Fasern entfernt. Anschließend werden beide Fasern an einem Ende mit einem Faserschneidwerkzeug abgeschnitten und mit einem Spleißgerät verbunden. Abb. 28 und Abb. 29 zeigen den Verspleiß-Prozess der Sensorfaser mit der kernlosen Faser.



Abb. 28 Bilder des Schneidegeräts (links) und des Spleißgeräts (rechts) mit eingelegten Fasern.



Abb. 29 Abbildung der mit kernloser Faser verspleißte Sensorfaser (links) in Betrachtung durch das Spleißgerät und (rechts) in Detail Aufnahme mit markierter Spleißstelle.

Auf die gleiche Weise werden die Pigtails am anderen Ende der Messfaser angebracht. Diese Verbindung wird zusätzlich mit einem Spleißschutz versehen, um eine Beschädigung des Sensors an dieser besonders empfindlichen Stelle zu vermeiden. Zusätzlich wird der Teil der Messfaser, der außerhalb der Probe liegt, mit einem PTFE-Schlauch versehen. Dieser wird an der Stelle, an der die Faser in die Probe eintritt, abgeschrägt, um ein Abknicken der Faser im Laminat am Übergang vom Schlauch zur Probe am geraden Schlauchende zu verhindern, was zu einem Verlust der Signalstärke führen würde.

#### 4.1.2.2 Fertigung der Lamine

Als Material für die Lamine wird das unidirektionale Prepreg aus dem Faser-Matrix-System 8552 IM7 des Herstellers Hexply, analog zu den vorangegangenen Untersuchungen, verwendet (vgl. 2.3). Es werden jeweils zwei platten für jede Probenreihe gefertigt, die anschließend verklebt werden. Platte A ist dabei stets die Platte, an der die Sensoren platziert werden. Für jede Platte werden 12 Lagen des Prepregs maschinell auf die Plattengröße 225 mm x 270 mm zugeschnitten. und mit einer Faserrichtung von  $0^\circ$  in allen Lagen abgelegt. Bei den Platten A der Proben mit integrierten FOSS-Sensor werden die Fasern jeweils zwischen der ersten und zweiten bzw. elften und zwölften Schicht eingelegt. Der für die jeweiligen Lamine erforderliche Aufbau kann aus Tabelle 3 entnommen werden.

Tab. 5 Lagenaufbau der Platten zur Probenherstellung

Platte A1	Platte A2	Platte A3/A4	Platte B(1-4)
DCB_FOSS_UL	DCB_FOSS_LL	(kein_FOSS/FOSS_SB)	(alle Proben)
[0/FOSS Faser/0 <sub>11</sub> ]	[0 <sub>11</sub> /FOSS Faser/0]	[0 <sub>6</sub> ] <sub>s</sub>	[0 <sub>6</sub> ] <sub>s</sub>

Die FOSS-Fasern werden in den in Abb. 30 festgelegten Abständen auf die Prepreg Lage aufgelegt und angedrückt. Dabei wird der PTFE-Schlauch 10 mm in das Laminat mit eingelegt, um den Übergang von Faser zu Probe zu verstärken.

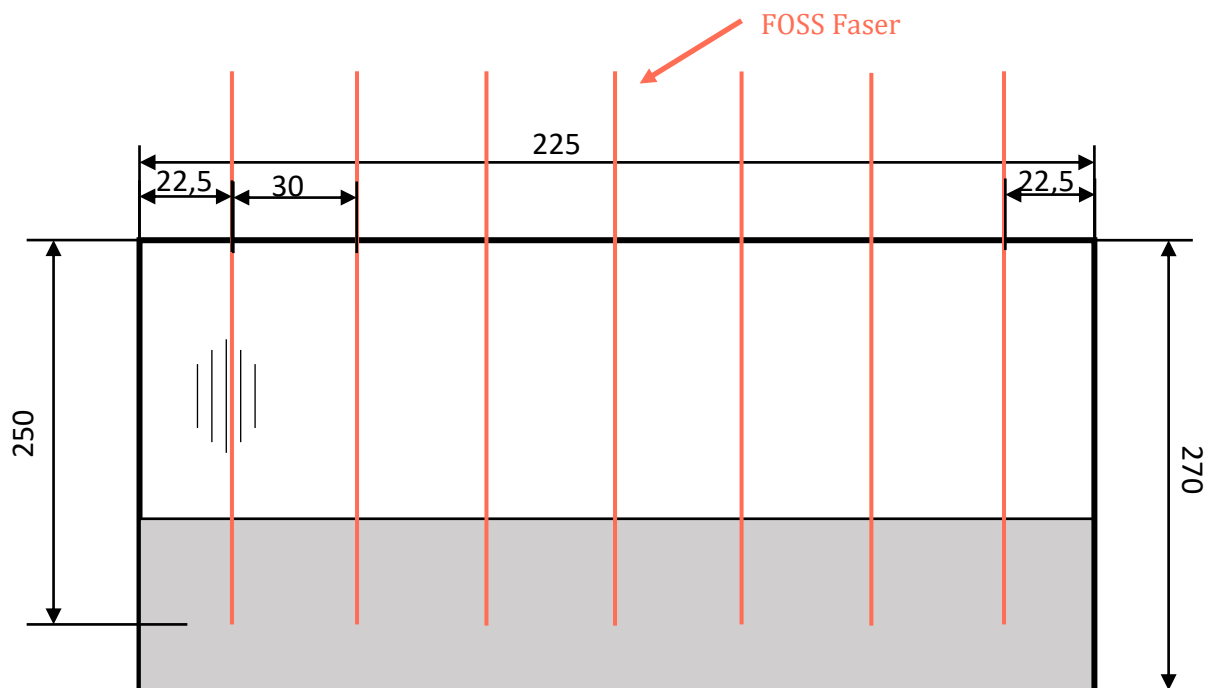


Abb. 30 FOSS Faser Position auf CFK- Platte (Angaben in mm).

Nach dem Verlegen der Lagen wird zunächst auf jeder Seite der Plattenunterseite im Abstand von 150 mm ein Glasfaserroving befestigt. Dies dient zur Unterstützung der Entlüftung der Platte während des Aushärteprozesses. Anschließend wird die Platte mit der Unterseite auf eine Lage Trennfolie gelegt, die auf jeder Seite circa 20 mm übersteht. Während des gesamten Herstellungsprozesses wird die Trennfolie Nowoflon ET6235 mit einer Dicke von 25 µm verwendet. Als Deckblech wird ein 1,5 mm dickes Aluminiumblech mit den Abmessungen 215 mm x 260 mm verwendet. Die kleinere Deckblechgröße wurde aufgrund falscher Annahmen gewählt. Die Bleche werden faltenfrei in Trennfolie gewickelt und auf die Oberseite des Laminataufbaus gelegt. Anschließend werden Trennfolie und Glasfaserrovings an den Seiten ohne FOSS-Sensor umgeschlagen und so auf der Blechoberseite fixiert, dass das Roving nicht von der Trennfolie bedeckt wird. Die Platten

werden an den Seiten, an denen keine FOSS-Sensoren herausragen, mit dem Versiegelungskit umwickelt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Deckbleche so sauber wie möglich an das Prepreg angedrückt werden und an diesen Stellen kein Harz austritt. Die Seite, an der die PTFE-Schläuche mit den FOSS-Sensoren aus der Probe herausragen, wird zusätzlich mit Trennfolie umwickelt. Auf den nicht abgetrennten Rand wird Versiegelungsmittel aufgetragen. Je nach Autoklavenkonfiguration werden nun eine oder zwei Vakuumplatten auf Saugkissen gelegt. Eine Lage Abreißgewebe wird über das gesamte Bauteil gelegt. Anschließend wird die Vakuumfolie möglichst faltenfrei über die Struktur gelegt und mit dem Versiegelungskit verklebt. Mit dem Gegenstück der Vakuumsaugdüsen wird die Folie über den Vakuumplatten eingeschnitten. Die Folie wird darauf entfernt, bevor die Vakuumstutzen fest verschraubt werden (Abb. 31, Abb. 32).

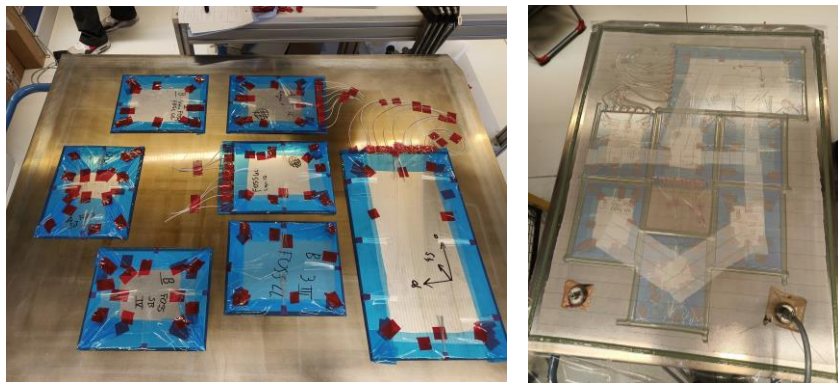


Abb. 31 Eingeschlagene Laminataufbauten mit auf dem Werkzeug fixierten FOSS Fasern (links) vakuumierter Aufbau (rechts).

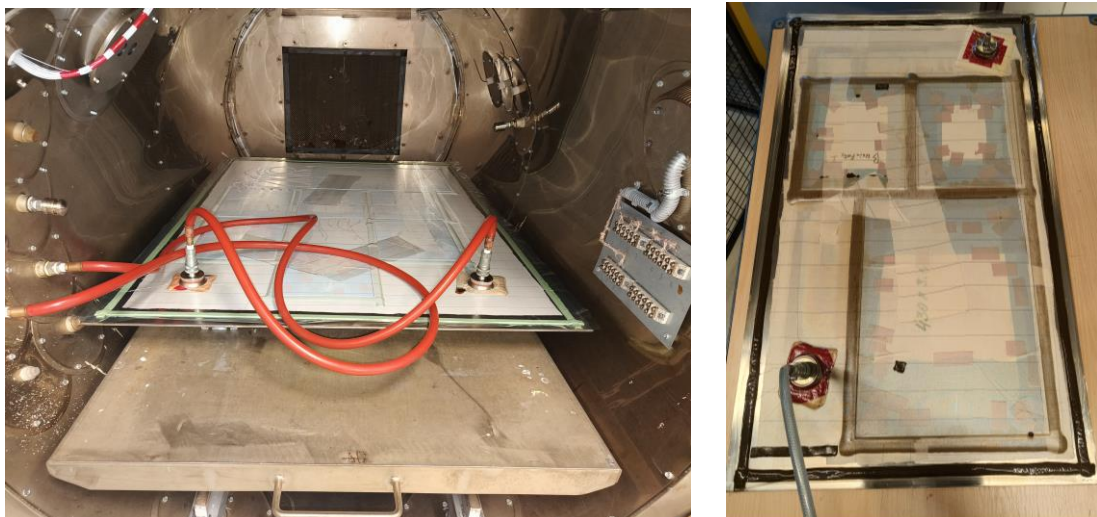


Abb. 32 Der Vakuumaufbau im Autoklaven (links) und der Vakuumaufbau nach Autoklav Prozess (rechts).

Der Vakuumaufbau wird über einen Absaugstutzen an eine Vakuumpumpe angeschlossen und evakuiert. Anschließend wird das Material nach dem in Abb. 33 dargestellten Autoklav-Verfahren ausgehärtet.

Die Platten B der Probenreihen DCB\_kein\_FOSS und DCB\_FOSS\_SB wurden aus Platzgründen getrennt ausgehärtet. Bei beiden Aushärtungen traten Fehler im Autoklavprozess auf. Hier konnte das Vakuum im Aufbau nicht aufrechterhalten werden, so dass bei beiden Prozessen ab der zweiten Temperaturerhöhung auf 180 °C kein Unterdruck mehr im Aufbau herrschte.

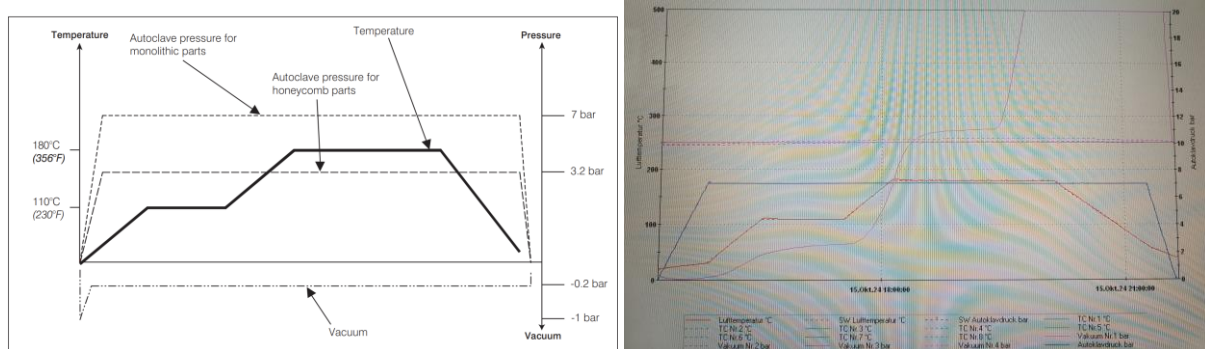


Abb. 33 Autoklav Prozess für das Material 8552 IM7 [20] (links) und Autoklavprozess mit fehlerhaftem Druckverlauf (rechts).

Ein unvollständiges Vakuum während des Aushärtungsprozesses kann zu deutlichen Beeinträchtigungen der mechanischen Materialeigenschaften führen. Es entsteht Porosität in der Matrix, da eingefangenes Gas im Harz nicht aus dem Aufbau austreten kann. Außerdem wird die Harzverteilung innerhalb des Bauteils, sowie das Verpressen des Laminats, deutlich vermindert. So kann die Interlaminare Scherfestigkeit um 34% abfallen. [35], [36]

Untersuchungen haben jedoch zeigen können, dass ein Versagen des Vakuums nach der ersten Temperaturerhöhung kaum Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Materials hat. Dies liegt daran, dass die Viskosität des Harzes bereits während der ersten Temperaturrampe ansteigt. Hier geht das Harz von fest zu gelförmig über, wobei die meisten Gase entstehen. [35]

Da das Vakuum erst lange nach der zweiten Temperaturerhöhung versagt hat, wird angenommen, dass die Festigkeit des Materials nicht signifikant beeinträchtigt wurde. Hinzu kommt, dass die Scherfestigkeit des Laminats bei optimaler Aushärtung mit 2724 MPa deutlich über der Festigkeit von 34,5 MPa des Klebstoffes liegt [19, 37]. Es ist somit anzunehmen, dass selbst bei einem Festigkeitsverlust von 34% der Klebstoff deutlich vor dem



Laminat versagt. Somit wurde entschieden das Material für die Vorversuche zu verwenden.

#### 4.1.2.3 Verklebung der Probenhälften

Zur Verklebung der Platten wird der Filmklebstoff LOCTITE® EA 9695 AERO mit einer Dicke von 0,05 mm verwendet. Der Klebstoff wurde für den Einsatz in der Luftfahrt verwendet und wurde ebenfalls in den vorangegangenen Untersuchungen genutzt [10]. Die Platten werden mit Isopropanol gereinigt und mit Atmosphärendruckplasma vorbehandelt. Dies geschieht durch das Abfahren der Platte durch einen Roboterarm (s. Abb. 34).

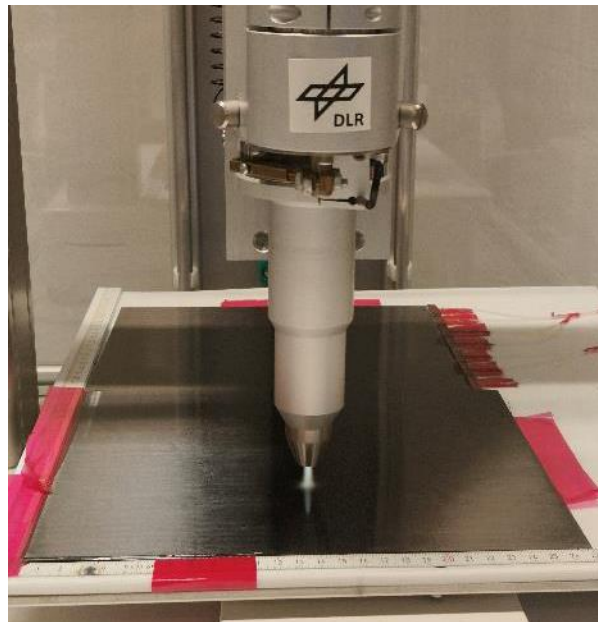


Abb. 34 Plasmabehandlung der ausgehärteten Platten als Vorbehandlung für die Verklebung.

Der Klebstoff wird zunächst auf eine Platte aufgetragen und angedrückt. Danach werden zwei Stücke Trennfolie übereinander entsprechend der Länge des Initialrisses 70 mm auf die Platte gelegt. Im nächsten Schritt wird die zweite Platte auf den Klebstoff gedrückt. Die geklebten Platten werden anschließend in Abreißgewebe gewickelt und in einem Vakuumbeutel aus Vakuumfolie und Siegelset im Autoklaven ausgehärtet. Nach einem Prozess bei 180 °C und 3 bar erreicht der Filmklebstoff eine Klebschichtdicke von 0,1 mm.

#### 4.1.2.4 Vorbereitung der Probenkörper

Nach Aushärten des Klebstoffs werden die Proben nach dem in Abb. 35 entnehmbaren Schnittmuster mit einer Plattenkreissäge der Firma MAIKO zugeschnitten.

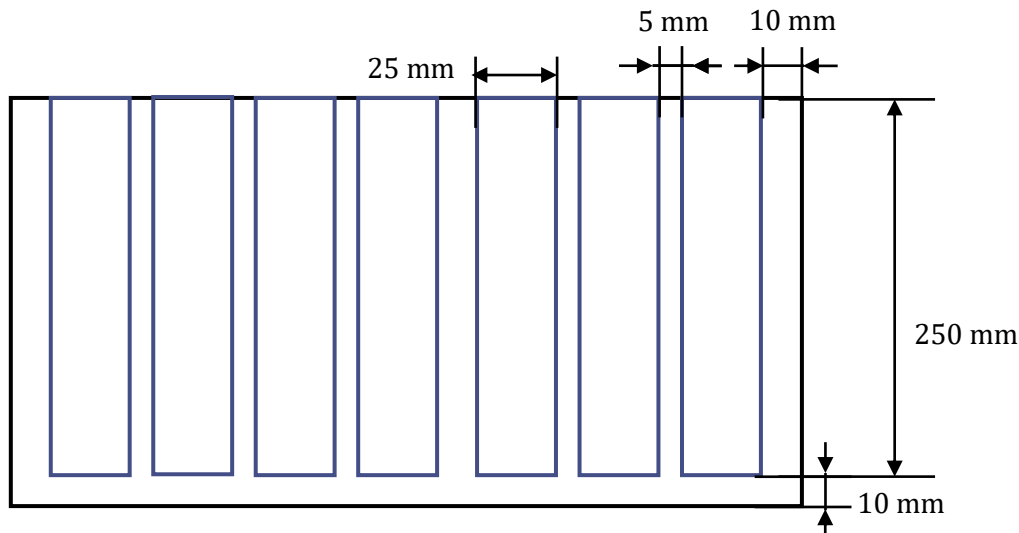


Abb. 35 Schnittmuster zum Zuschneiden der DCB-Proben aus den angefertigten Platten.

Anschließend werden die Proben an den Enden, an denen der Anfangsriß beginnt, mit Körnung 260 geschliffen und mit Isopropanol gereinigt. Danach erfolgt das Anschleifen der Metallstempel zur Befestigung der Scharniere, ebenfalls mit Körnung 260, bevor diese gerade auf die Proben aufgeklebt werden. Hierfür wird der Zweikomponentenkleber Henkel Loctite EA 9394 Aero verwendet.

Zuletzt werden die Pigtails mit den integrierten Messfasern verspleißt und die Messfasern aufgeklebt. Für die Applikation der Messfasern wird ebenfalls der Zweikomponentenkleber verwendet. In vorangegangenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass dieser den geringsten Einfluss auf die Messungen hat. Die Applizierung des FOSS-Sensors wird in Abb. 36 beispielhaft an der Probe FOSS\_SB\_7 gezeigt.



Abb. 36 DCB Probe mit aufgeklebter Scharnier Vorrichtung und FOSS-Faser auf der Oberfläche.

## 4.2 Versuchsdurchführung

Die FOSS-Sensoren werden vor jedem Versuchsdurchgang an das FOSS-Messgerät angeschlossen. Die FOSS-Messung wird gleichzeitig mit dem Start des Versuchs an der Prüfmaschine gestartet. Zu Beginn wird die Faser leicht gebogen, um die Position des Sensors zu bestimmen. Dies führt zu einer Spitze in der gemessenen Dehnungskurve an der Stelle, an der die Faser in die Probe eintritt oder an der Probe klebt.

### 4.3 Ergebnisse der Voruntersuchungen

#### 4.3.1 Messungen der Prüfmaschine

In Abb. 37 ist am Beispiel der Probe DCB\_FOSS\_LL\_3 die aufgebrachte Kraft der Prüfmaschine über den zurückgelegten Einspannweg dargestellt. Die Belastung steigt zunächst mit fortschreitendem Verfahrensweg linear an. Nach Erreichen einer Spitze fällt die Kraft kurz ab und wächst dann instationär weiter, bis die Länge des Pre-Cracks erreicht ist. Daraufhin wird die Probe entlastet, was im durch einen Linearen Verlauf zurück zum Koordinatenursprung im Diagramm erkennbar ist. Nach Entlasten wird die Probe erneut belastet und die Kraft steigt wieder linear an, bis sie erneut ein maximum erreicht und daraufhin mit steigender Risslänge ungleichmäßig abfällt.

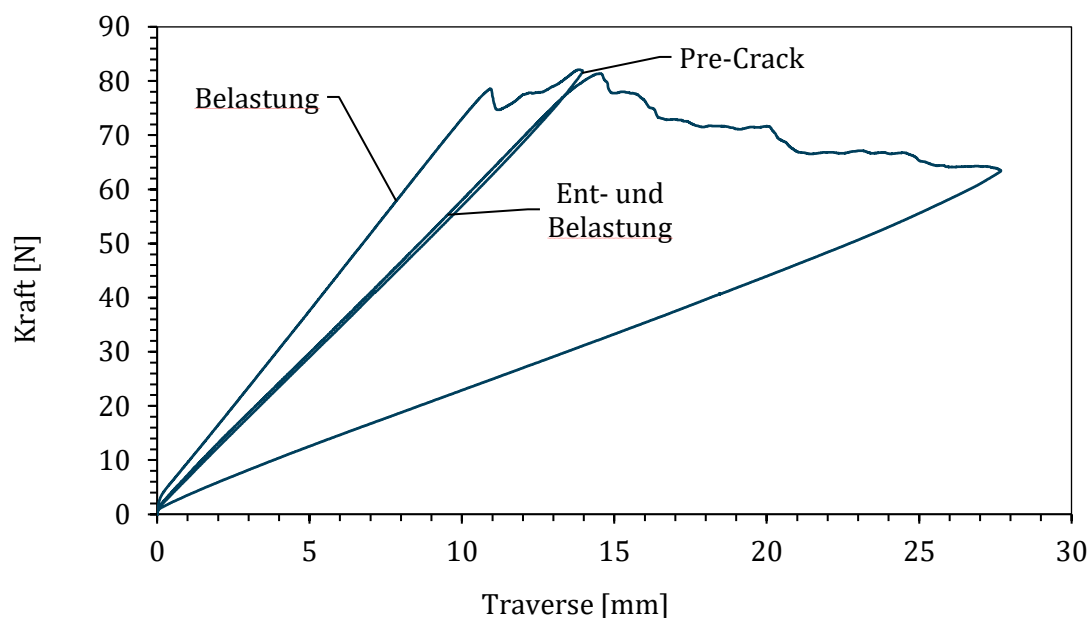


Abb. 37 Aufgebrachte Kraft der Prüfmaschine über zurückgelegten Weg der Einspannungsklammern.

#### 4.3.2 Messung mit faseroptischen Sensoren

Zunächst wird der Dehnungsverlauf der FOSS-Faser entlang der Probenlänge für einen einzelnen Zeitpunkt betrachtet. In Abb. 38 ist die Dehnungsmessung der Probe DCB\_FOSS\_LL\_3 am Zeitpunkt der maximalen Dehnung, bei einer Messzeit von 615,904 sek. dargestellt. Der Verlauf ist repräsentativ für alle weiteren Proben und wird hier exemplarisch betrachtet. Der Beginn der Probe liegt hier an der Stelle, an der der Sensor beginnt. Das Ende der Probe liegt also dort, wo die Last durch die Scharniere eingeleitet wird.



Am Anfang der Probe weist die Faser mit  $62,3 \mu\epsilon$  die geringste Dehnung auf. Im weiteren Verlauf verschwindet diese Dehnung und bis zu einer Länge von 130 mm weist die Faser keine nennenswerte Dehnung mehr auf. Danach nimmt die Dehnung leicht ab, bevor sie ab einer Probenlänge von circa 155 mm stetig ansteigt und innerhalb weniger Messpunkte ihren Maximalwert von  $2549,9 \mu\epsilon$  erreicht. Im weiteren Verlauf der Probe, bis zum Ende der Messfaser, nimmt die Dehnung wieder nahezu linear ab und endet bei etwa der Hälfte der maximalen Dehnung.

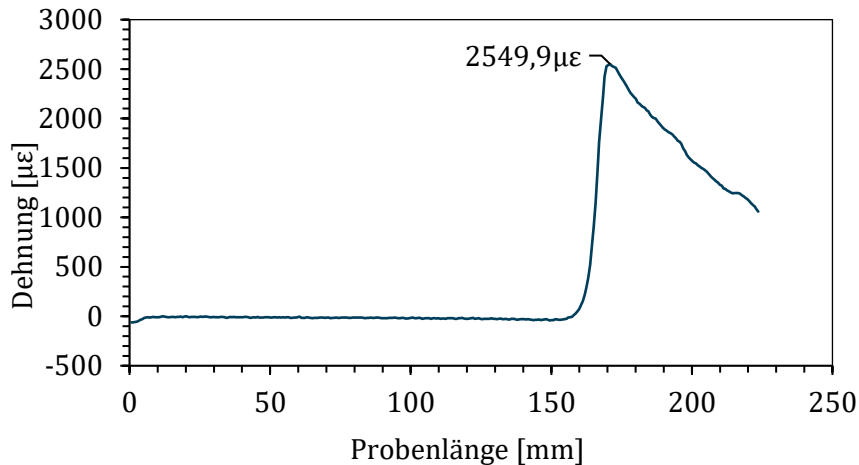


Abb. 38 Dehnung der FOSS Faser der Probe DCB\_FOSS\_LL\_3 bei 615,904 Sekunden nach Messbeginn über die Sensorlänge.

Die realen Dehnungswerte verlaufen, im Gegensatz zu dem Sprung der Werte in der analytischen Berechnung (vgl. 3.3), kontinuierlich. Kurz vor und nach dem Anstieg der Dehnung zeigen die Daten ebenfalls einen runden Übergang mit kontinuierlich steigender Steigung. Diese Beobachtung kann darauf zurückgeführt werden, dass die reale Probe ab dem Punkt des Risses, an dem sie nach Theorie eingespannt ist, nicht ideal steif ist, sondern sich bereits verformt. Weiterhin ist die Rundung der Dehnungsspitze ebenfalls auf Verformung der Probe zurückzuführen.

Abb. 39 zeigt die Verläufe der Dehnungsmessung der Probe DCB\_FOSS\_LL\_3 für mehrere Zeitpunkte. Es ist erkennbar, dass sich der Verlauf der Dehnung mit fortschreitender Prüfzeit über die Probenlänge zum Sensoranfang hin verschiebt.

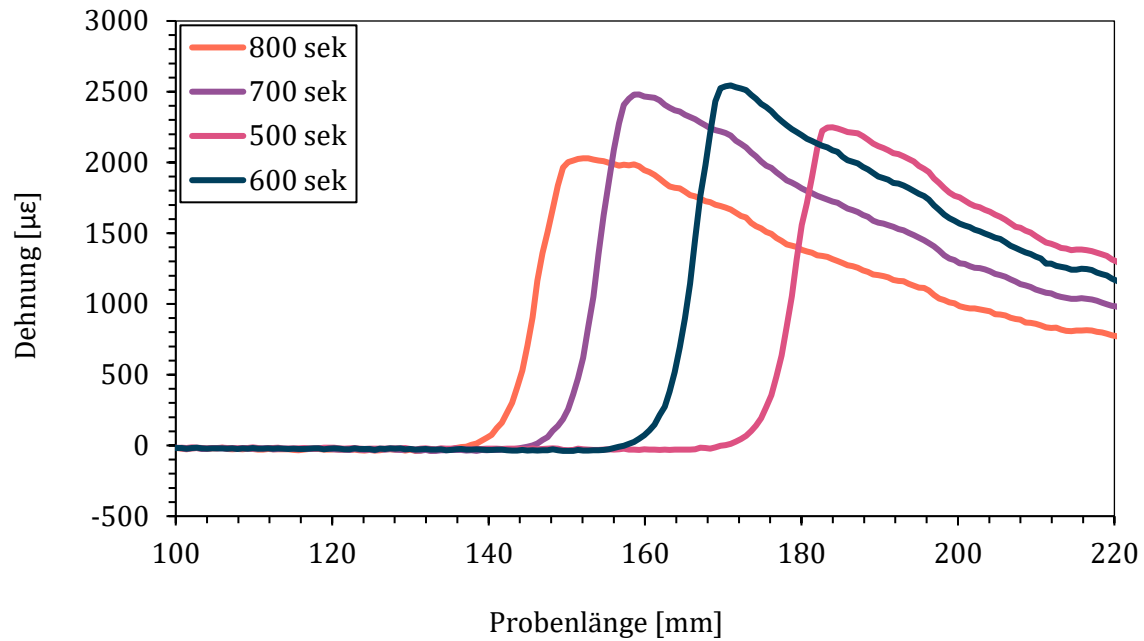


Abb. 39 Dehnungsverläufe entlang der Probe DCB\_FOSS\_LL\_3 für verschiedene Messzeitpunkte.

#### 4.3.3 Auswertung und Verarbeitung der Messwerte

Durch die Dehnung der Messfaser verschieben sich die Messpunkte, relativ zur Länge der unbelasteten Probe. In Abb. 40 ist die Verschiebung der Messpunkte des Sensors der Probe DCB\_FOSS\_LL\_3 am Zeitpunkt der maximalen Dehnung abgebildet.

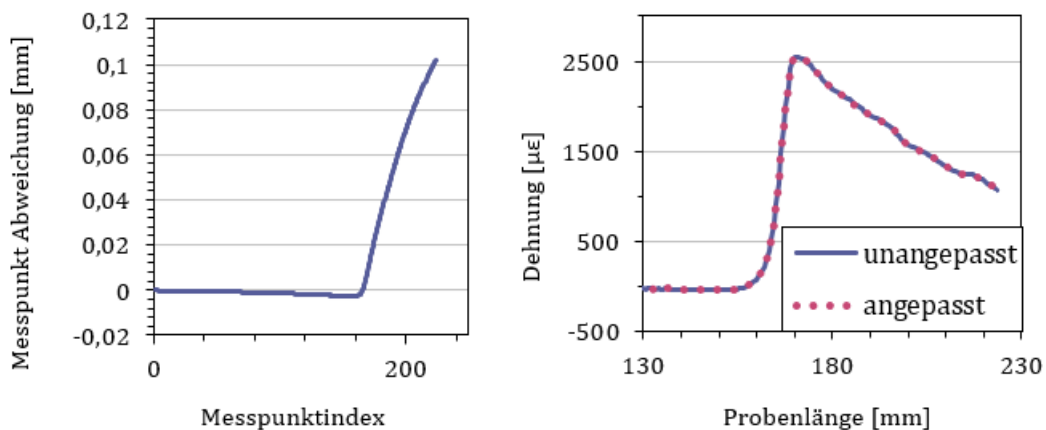


Abb. 40 Die Abweichung der Messpunktposition vom Unverformten Sensor nach Berücksichtigung der Sensorverformung (links) und der Verlauf der Dehnung des Sensors der Probe DCB\_FOSS\_LL\_3 mit und ohne Berücksichtigung der Sensorverformung(rechts).

Die maximale Verschiebung tritt am Ende der Probe auf und beträgt circa 0,1 mm. Da die Auflösung der FOSS-Sensoren mit 0,65 mm deutlich höher ist, wird die Verschiebung in den folgenden Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt, da sie keinen signifikanten

Einfluss auf die Messergebnisse hat. In Abb. 40 ist in der rechten Darstellung zu erkennen, dass die korrigierten Messpunkte kaum vom Verlauf der unkorrigierten Messungen abweichen.

Die Lage des Risses kann nun mit verschiedenen Methoden bestimmt werden, die im Folgenden verglichen werden. Nach 3.4 befindet sich der Riss an der Stelle der größten Dehnung. Diese ist im Dehnungsverlauf eindeutig erkennbar. Teilweise liegt das Maximum jedoch deutlich hinter dem Dehnungssprung, wie in Abb. 41 an der Probe FOSS\_UL\_3 bei einer Traversenlänge von 23,4 mm zu sehen ist.

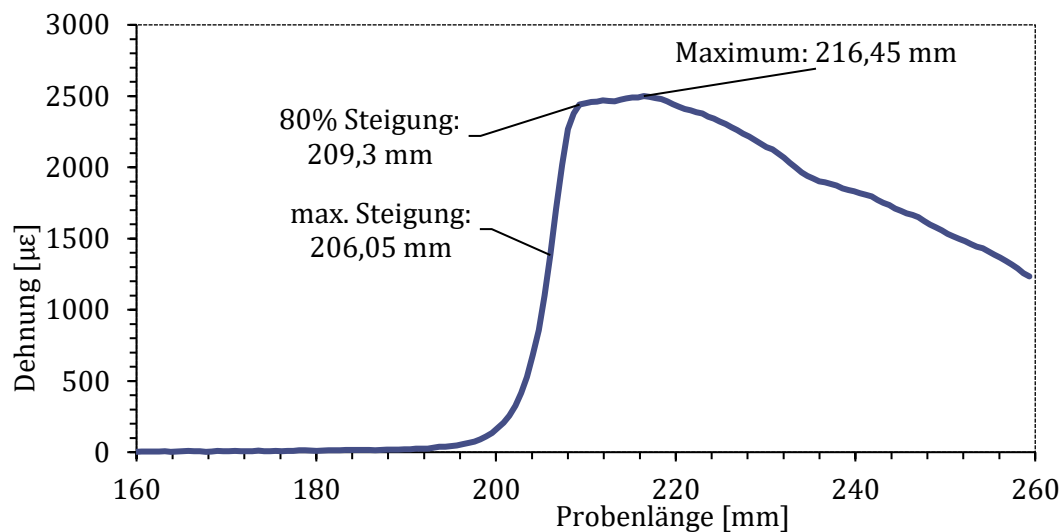


Abb. 41 Der Dehnungsverlauf des Sensors DCB\_FOSS\_UL\_3 bei einer Traverse von 23,4 mm mit Beschrifteten Punkten zur Bestimmung der Rissposition.

Daher wird zusätzlich der Punkt der maximalen Steigung der Dehnungskurve bestimmt. In Abb. 42 ist die so ermittelte Rissposition über den Traversenweg der Prüfmaschine aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die über die maximale Dehnung bestimmte Rissposition ab einem Traversenweg von 22 mm nicht weiter ansteigt, bis sie später auf einen höheren Wert springt. Die maximale Steigung zeigt dagegen einen kontinuierlichen Verlauf, der dem optisch bestimmten Risswachstum deutlich besser entspricht.

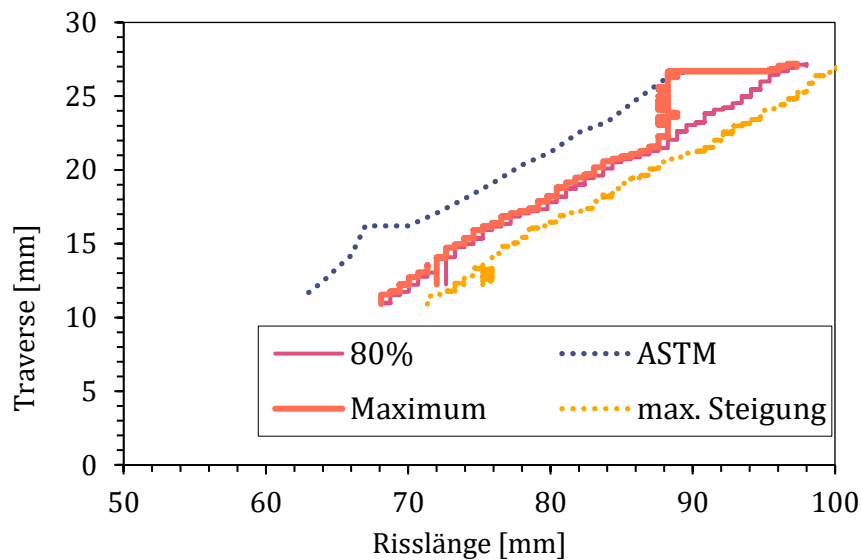


Abb. 42 Die bestimmte Rissposition der Probe DCB\_FOSS\_UL\_3 über die Traverse der Prüfmaschine mit vier verschiedenen Methoden.

Die maximale Steigung eilt der Position des Maximums deutlich voraus. Da der Punkt des Maximums nach 3.4 die genaue Position der Rissspitze abbildet, wird die Methode zur Risslokalisation erweitert. Anstelle des Punktes der globalen maximalen Dehnung wird der erste Punkt nach dem Punkt der maximalen Steigung verwendet, an dem die Steigung wieder um mindestens 80% abgenommen hat. In Abb. 37 ist zu erkennen, dass dieser Punkt nahe dem Punkt der maximalen Dehnung liegt, wenn dieser kontinuierlich über die Probenlänge fortschreitet. Außerdem folgt er weiterhin dem optisch ermittelten kontinuierlichen Risswachstum, wenn das Maximum auf einem Wert verbleibt. Für die weitere Auswertung wird daher die 80%-Methode verwendet.

Insgesamt ist in Abb. 42 jedoch zu erkennen, dass die mit FOSS ermittelte Rissposition bei gleichem Querprofil deutlich größer ist als die optisch nach Norm ermittelte. Diese Verschiebung kann darauf zurückgeführt werden, dass die Position des Sensors auf der Probe nicht korrekt bestimmt wurde. Es wird daher angenommen, dass der Anfangswert der Messung mit FOSS auf dem Wert der optisch nach Norm bestimmten Risslänge liegt. In Abb. 43 ist der so angepasste Messverlauf dargestellt.

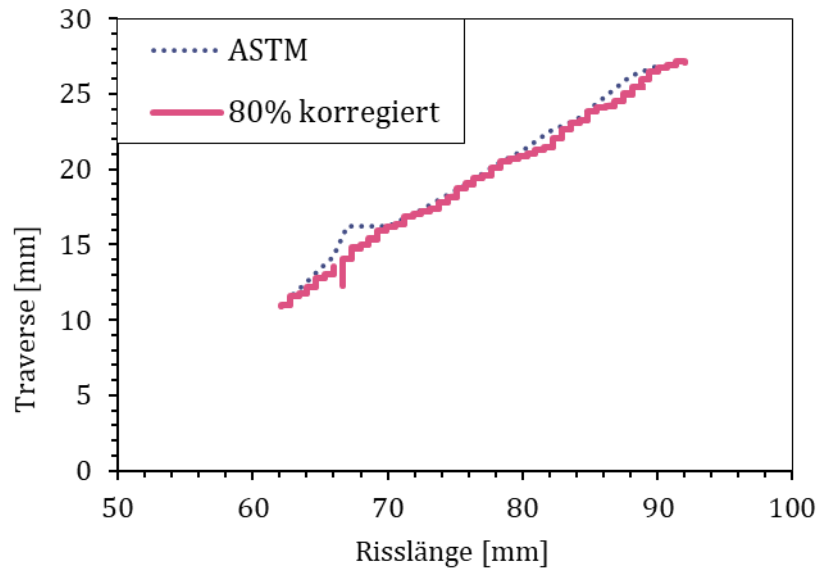


Abb. 43 Der Verlauf der Traverse über die Rissposition mit der Bestimmung über die 80% - Methode und dem Konventionellen Verfahren nach ASTM-Norm.

Der Verlauf folgt der optischen Rissbestimmung und steigt mit zunehmender Traversenlänge kontinuierlich linear an. An einigen Stellen weichen die Verläufe jedoch voneinander ab. Die Korrelation der Kurven der 80%-Methode, zur per ASTM bestimmten Messverlauf ist in Abb. 44 abgebildet, und zeigt eine starke Übereinstimmung.

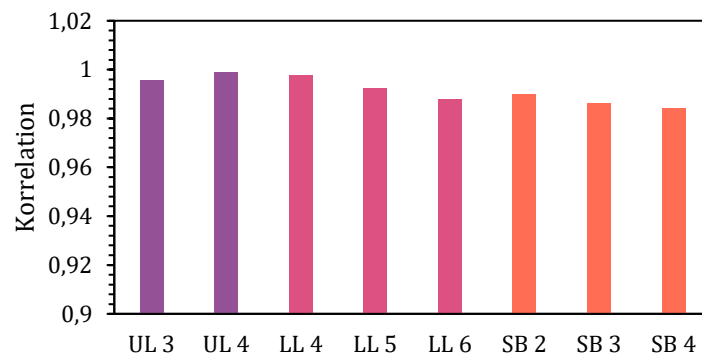


Abb. 44 Die Korrelation des Risspositionsverlaufes der 80%-Methode mit der per ASTM Norm bestimmten Rissposition.

Mit der in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Methode werden nun die  $G_{IC}$ -Werte der einzelnen Proben bestimmt. In Abb. 45 sind die  $G_{IC}$ -Verläufe der Proben DCB\_FOSS\_UL\_3 und UL\_4 dargestellt. Verglichen werden die Verläufe des Kennwerts über die Bestimmung der Risslänge jeweils mit FOSS und optisch nach Norm. Der Verlauf der Messwerte folgt generell den Punkten der optischen Rissbestimmung bis auf vereinzelte Stellen, die aus dem allgemeinen Verlauf herausfallen.

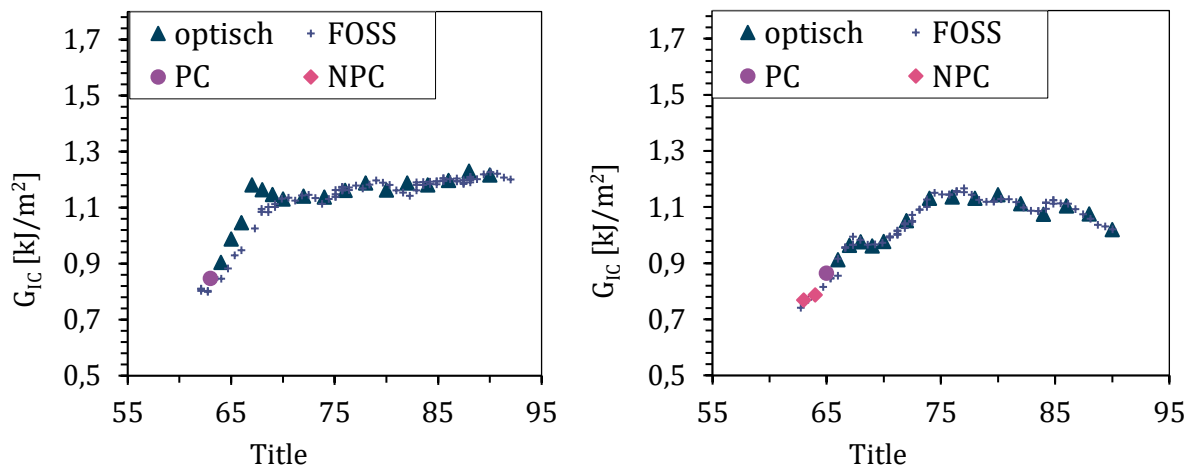


Abb. 45 Die  $G_{IC}$  Verläufe der Proben UL\_3 (links) und UL\_4 (rechts), für die Messungen nach Norm sind die verschiedenen Phasen der Rissbestimmung dargestellt.

Die  $G_{IC}$ -Verläufe der gesamten Probenreihe kann dem Anhang 8.1 entnommen werden. Insgesamt konnten die in Abb. 46 dargestellten maximalen  $G_{IC}$ -Werte erreicht werden. Der Mittelwert dieser Werte beträgt 1,1225 kJ/m<sup>2</sup>.

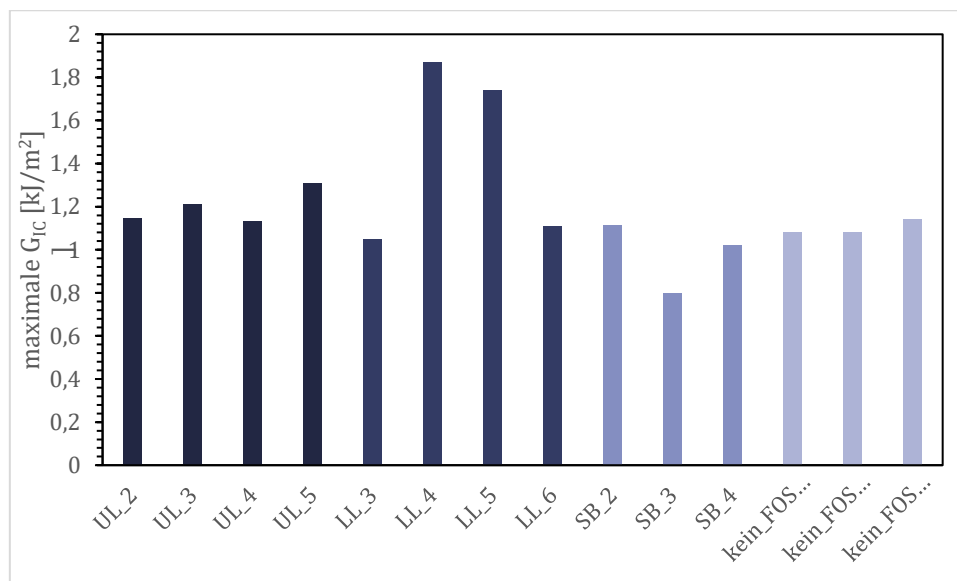


Abb. 46 Die maximalen  $G_{IC}$ -Werte der Proben der Vorversuche.

#### 4.3.4 Geeignete Sensorintegration

Um die geeignete Sensorposition für die weiteren Untersuchungen zu bestimmen, werden im Folgenden die Risswachstumsverläufe der untersuchten Proben verglichen. Abb. 47 zeigt die mittlere Abweichung der mit der 80%-Methode ermittelten Risspositionen im Vergleich zur optischen Messung. Die Verwendung der Abweichung als Maß für die Sensorqualität ist keine besonders elegante Lösung, da die optische Bestimmung nach Norm ebenfalls fehlerbehaftet ist (vgl. 3.1). Dennoch wird dieser Faktor hier zur Auswahl der

Sensorposition verwendet, da keine andere Messtechnik zur Verfügung steht und durch die zerstörende Prüfung im Nachhinein kein Rückschluss auf den Rissverlauf getroffen werden kann. Zusätzlich wird die Korrelation der Messverläufe der verschiedenen FOSS-Sensoren mit den per ASTM-Norm bestimmten Daten verglichen. Abb. 47 zeigt, dass es zwar große Unterschiede in den mittleren Abweichungen von der Risslänge der Norm zwischen den verschiedenen Probenserien gibt, jedoch ist, aufgrund der großen Standardabweichung, kein klarer Trend erkennbar.

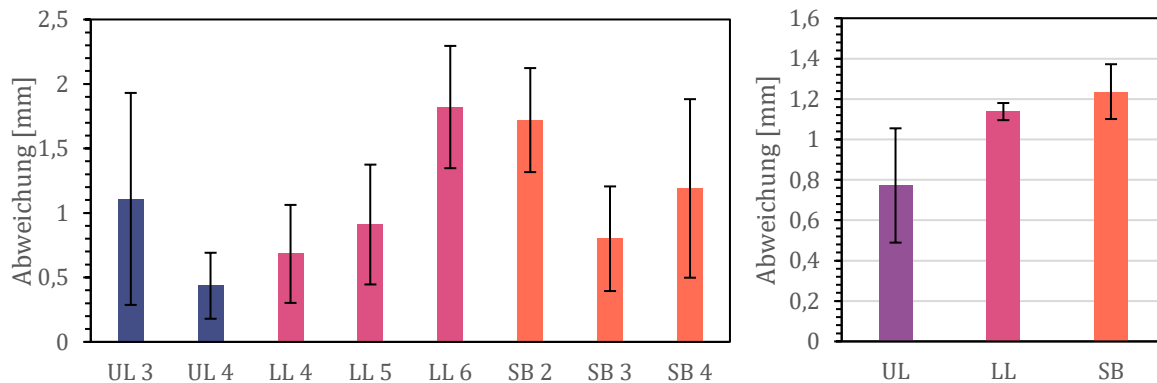


Abb. 47 Die absolute Abweichung der mit FOSS bestimmten Rissposition zu der nach Norm bestimmten Rissposition.

Bei Betrachtung der mittleren Korrelation der verschiedenen Proben mit der Norm, kann aus Abb. 48 ebenfalls kein klarer Unterschied zwischen den Integrationsmethoden erkannt werden.

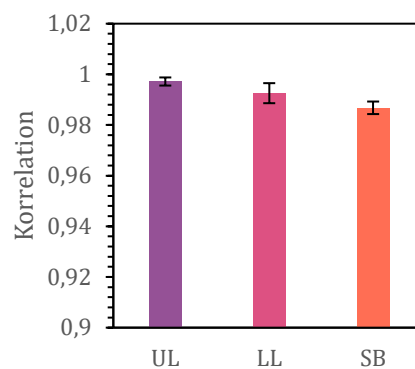


Abb. 48 Die Korrelation der FOSS Rissposition mit der per ASTM Norm bestimmten Rissposition.

#### 4.3.5 Einfluss der FOSS-Faser auf die Probe

Der Einfluss der FOSS-Faser auf die Probe wird durch den Vergleich der Probeneigenschaften zwischen Proben mit integriertem oder appliziertem FOSS- und Proben ohne

FOSS-Sensor untersucht. Zunächst wird exemplarisch der Verlauf der  $G_{IC}$ -Werte der Proben ohne Sensor mit dem Verlauf der Probe FOSS\_LL\_6 verglichen. Dieser ist repräsentativ für die Verläufe der anderen Proben mit Sensoren.

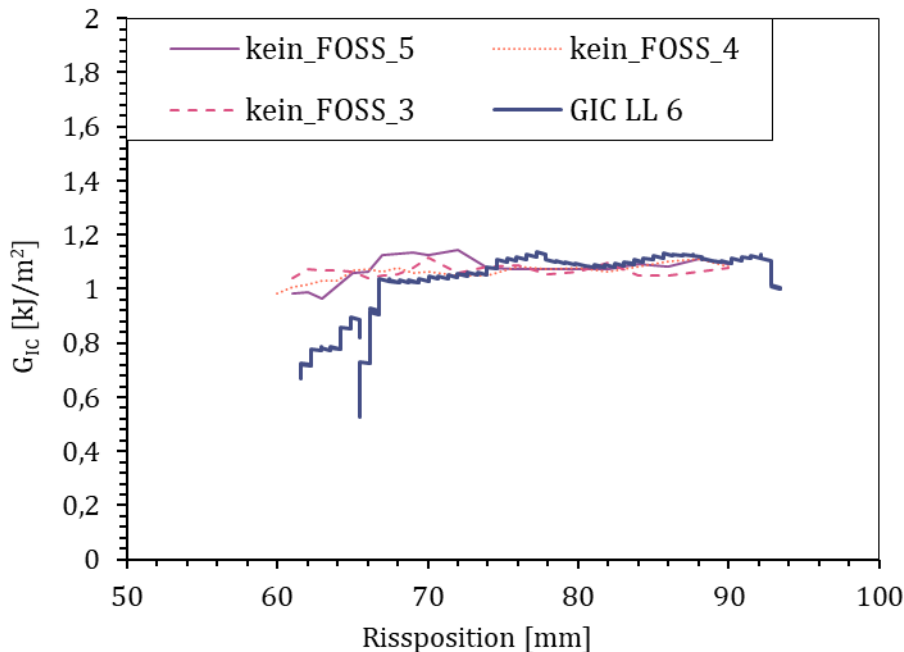


Abb. 49 Die  $G_{IC}$ -Werte der Proben ohne FOSS-Sensor und der Probe FOSS\_LL\_6, bestimmt mit der 80%-Methode.

Der Verlauf der Prüfkraft der Proben mit und ohne FOSS über die zurückgelegte Traverse ist ebenfalls in Abb. 50 betrachtet. Der Verlauf der Kurven zeigt qualitativ ein ähnliches Verhalten. Zunächst steigt die Kraft linear mit dem Traversenweg an, bis die maximale Kraft erreicht wird. Hier bewegt sich die Probe auseinander, ohne dass der Klebstoff reißt. Es findet also nur eine elastische Beanspruchung der beiden Probenhälften statt. Nach der Kraftspitze zu Beginn des Risses verläuft die Kraft nichtlinear unregelmäßig auf einem konstanten oder leicht abnehmenden Niveau. Danach folgen zwei weitere lineare Kraftverläufe bis zum Ursprung der beiden Achsen. Diese entsprechen der Entlastung der Probe nach Erreichen des Vorbruchs und der erneuten Belastung. Nach der erneuten Belastung der Probe fällt die Kraft langsam über eine kontinuierliche Traverse ab. Der Kraftverlauf ist ungleichförmig und instationär. Die Kraft nimmt ab, weil durch den fortschreitenden Riss der Hebelarm von der Einspannung bis zur Rissspitze immer größer wird. Somit ist eine immer geringere Kraft erforderlich, um das notwendige Moment zum Aufreißen der Klebschicht aufzubringen. Der in Abb. 50 dargestellte Verlauf der Probe kein\_FOSS\_5 zeigt bei einer Traverse von circa 18 mm einen Sprung auf. Hier ist der Riss



schlagartig gebrochen, was zu einer plötzlichen Entlastung der Probe führt. Am Ende der Traverse wird die Probe entlastet, wodurch die Kurve linear zum Koordinatenursprung zurückkehrt. Somit kann die Vermutung bestätigt werden, dass die Sensoren keinen signifikanten Einfluss auf das Probenverhalten haben.

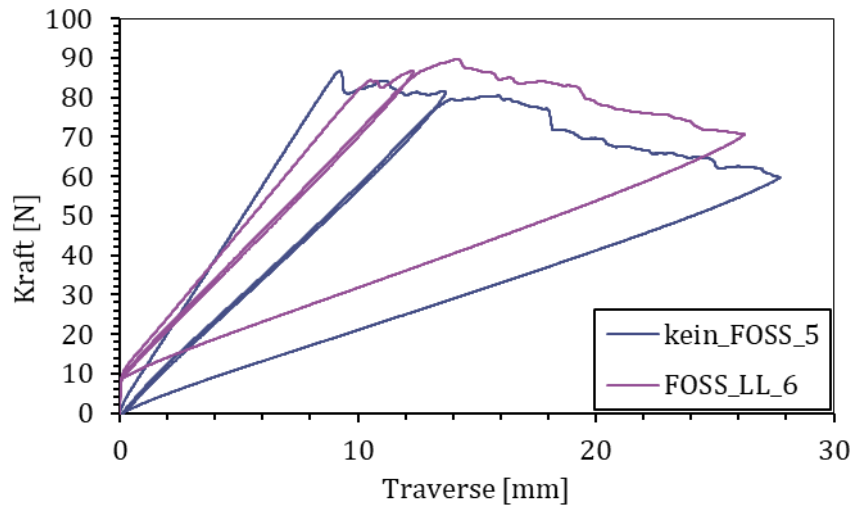


Abb. 50 Vergleich der Kraftverläufe zweier Proben jeweils mit und ohne FOSS.

## 5 Analyse der Oberflächenzähmodifikation

### 5.1 Materialauswahl für die Oberflächenzähmodifikation

Für die Oberflächenzähmodifikation wurden die Materialien TPU und Polyphenylsulfon (PPSU) ausgewählt. Die Wahl von TPU basiert auf den in Kapitel 2.3 behandelten Untersuchungen. Zusätzlich werden Proben mit PPSU als Oberflächenzähmodifikation betrachtet, da dieses in einem weiteren Projekt „Herwingt“ in Klebverbindungen zum Verschweißen größerer PPSU-Strukturen eingesetzt wird und vor diesem Hintergrund überprüft werden soll, ob sich das Material negativ auf das Risswachstum in der Klebschicht auswirkt. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung von PPSU als Oberflächenzähmodifikation mit deutlich geringerer Elastizität als TPU einen direkten Vergleich zwischen einem sehr elastischen und einem eher steifen Material. PPSU kann somit als Gegenbeispiel zu TPU dienen und wichtige Erkenntnisse darüber liefern, wie unterschiedliche Materialsteifigkeiten das Risswachstum in strukturellen Klebverbindungen beeinflussen.

Die Materialdaten der Oberflächenzähmodifikations- Werkstoffe und des Klebstoffes sind in Tab. 6 aufgezeigt. Aufgrund der deutlich höheren Steifigkeit von PPSU ist zu erwarten, dass dieses eine deutlich schlechtere oder keine rissstoppende Wirkung zeigen wird, da der Effekt des Risstoppes primär auf der Elastizität des Werkstoffs basiert (vgl. 2.3).

Tab. 6 Die Materialeigenschaften der Oberflächenzähmodifikationen und des Klebstoffes [37–39].

Werkstoff	E-Modul	Reißdehnung	Festigkeit
TPU	900 MPa	240%	46 MPa
PPSU	2340 MPa	60-120%	69,6 MPa
LOCTITE EA 9695 AERO	2576,8	3,44%	59,17 MPa

### 5.2 Prüfkörperaufbau

Aus den Erkenntnissen in Kapitel 4.3 wird der Entwurf der Proben der Hauptuntersuchungen abgeleitet. Der FOSS-Sensor wird einerseits durch Verklebung aufgebracht und in die unterste Lage der Probe integriert. Diese Konfiguration wurde gewählt, um die zwei Sensorpositionen an derselben Probe miteinander vergleichen zu können. Es werden zwei Probenreihen, mit jeweils sieben Proben, hergestellt. Dabei wird jeweils ein Streifen

TPU oder ein Streifen PPSU mit einer Dicke von 0,05 mm in die Klebschicht der Probe integriert. Die Probenbezeichnung kann Tab. 7 entnommen werden.

Tab. 7 Das Probenprogramm der Hauptversuche.

Probenbezeichnung	Sensor Position	Probenanzahl
DCB_FOSS_TPU	Sensor an oberster Laminatschicht und Probenoberfläche	7
DCB_FOSS_PPSU	Sensor an oberster Laminatschicht und Probenoberfläche	7

Der ST-Streifen wird, wie in Abb. 51 verdeutlicht, in die Probe eingebracht. Der restliche Aufbau der Proben gleicht dem in Kapitel 4 beschriebenen Aufbau.

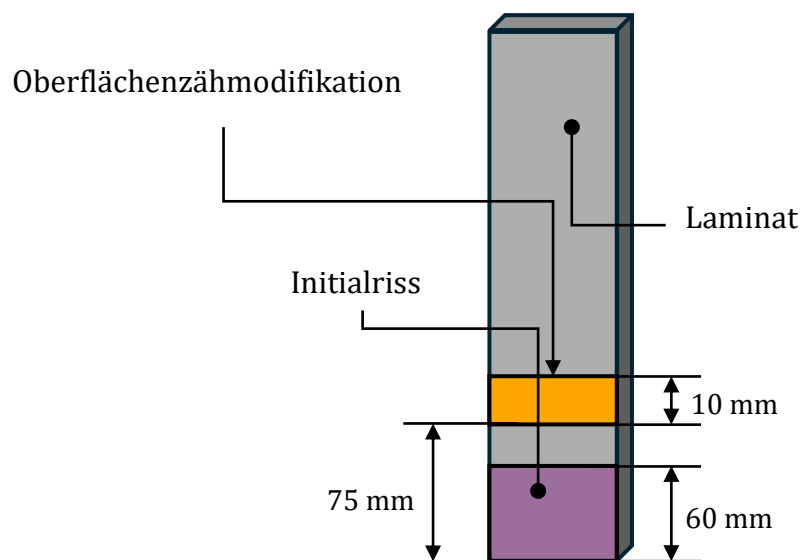


Abb. 51 Schematische Darstellung der Position des ST Streifens auf einer Probe.

### 5.3 Probenherstellung

Die Probekörper wurden wie die Probekörper der Vorversuche in Kapitel 4.1.2 gefertigt. Abweichend wurden jedoch Deckbleche mit den gleichen Abmessungen wie die des Laminats verwendet. Die ST-Streifen werden, mit der Corona Lab System vorbehandelt. Dies geschieht, um die Benetzung des Harzes der Matrix des Prepregs durch eine größere Oberflächenenergie zu verbessern. Hierfür werden 40 Fahrten mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m/s mit 85 W und 28 kV durchgeführt. Diese Vorbehandlung wurde aus früheren Untersuchungen zur Haftung von TPU auf CFK-Laminaten abgeleitet. Vor der Aushärtung

im Autoklaven werden die Streifen, wie in Abb. 52 gezeigt, auf die Unterseite der später zu verklebenden Platte aufgelegt und angedrückt.

Die Seite, auf der die Platten verklebt werden sollen, wird immer auf die Seite des Werkzeugs gelegt, um eine möglichst ebene Oberfläche zu gewährleisten, die die Verklebung erleichtert.



Abb. 52 Eingebrauchte Oberflächenzähmodifikation in Lagenaufbau.

Da zum Zeitpunkt der Probenherstellung die Plattenkreissäge, die in den Vorversuchen verwendet wurde, nicht zur Verfügung stand, wurden die Proben mit der DATRON CNC-Fräse zugeschnitten. Dabei wurden zwei Proben der PPSU-Reihe beschädigt und konnten nicht weiterverwendet werden. Um den Einfluss des Klebstoffes auf die Messung zu minimieren, wurde bei der Applikation der geklebten Sensoren deutlich weniger Klebstoff verwendet. Mehrere Sensoren wurden beim Aufbringen oder während des Transports beschädigt. In Tab. 8 sind die getesteten Proben mit den jeweils verwendbaren Sensoren aufgelistet.

Tab. 8 Die Getesteten Proben der Hauptversuchsreihe mit jeweils verwendeten Sensoren.

Probenbezeichnung	getesteter Sensor
DCB_FOSS_TPU 1	SB, LL
DCB_FOSS_TPU 3	LL
DCB_FOSS_TPU 4	SB, LL
DCB_FOSS_TPU 5	SB
DCB_FOSS_TPU 6	SB
DCB_FOSS_PPSU 1	SB
DCB_FOSS_PPSU 2	SB, LL
DCB_FOSS_PPSU5	SB

#### 5.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgt analog zu Kapitel 4.2. Für die Messung der FOSS-Sensoren wurden beide Sensoren gleichzeitig an das Messgerät angeschlossen. Dies führt aufgrund technischer Einschränkungen des Messgerätes zu einer reduzierten Messrate von 15,25 Hz, die jedoch für die hier durchgeführten Versuche als ausreichend erachtet wird.

Die Bestimmung der Position der faseroptischen Sensoren auf der Probe wird in dieser Versuchsreihe anders durchgeführt als in den Vorversuchen. Ein Papiertuch wird mit Kältespray befeuchtet und 30 mm vom Probenende entfernt auf der gegenüberliegenden Seite der Scharniere auf den Sensor gedrückt. Dadurch entsteht eine Spitze in der Messung, die zur Lokalisierung verwendet werden kann.

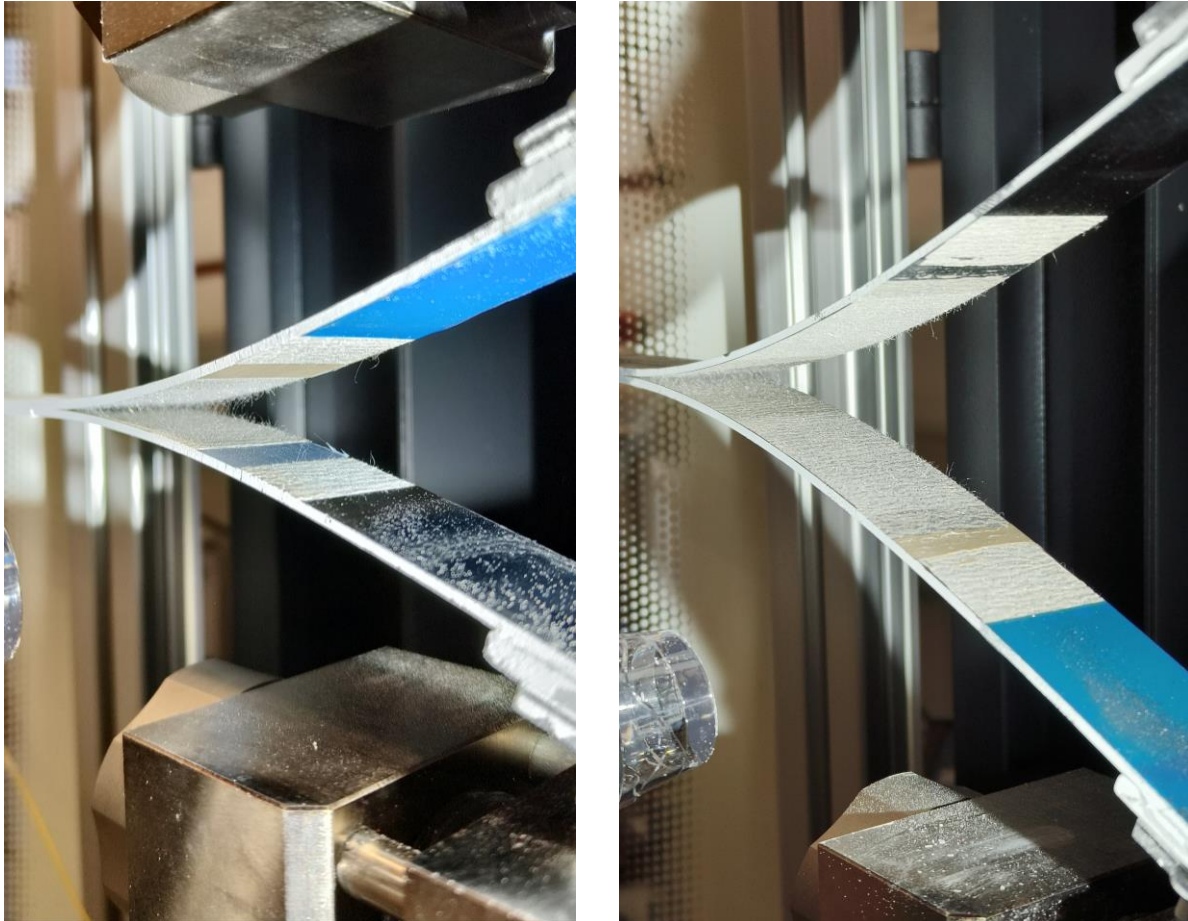


Abb. 53 Aufgerissene DCB-Proben nach Versuch links mit TPU und rechts mit PPSU-Oberflächenzähmodifikation.

## 5.5 Ergebnisse

### 5.5.1 Risswachstumsmessung mittels FOSS

Für die Auswertung der Risswachstumsmessung wird zunächst das Risswachstum über die Traverse der Prüfmaschine betrachtet. Der Verlauf der mit faseroptischen Sensoren ermittelten Messungen folgt dem Verlauf der nach Norm ermittelten Risslängenwerte.

Die Messdaten zeigen teilweise starkes Rauschen und Messfehler. Insbesondere die auf die Proben aufgeklebten Sensoren zeigen ein sehr unsauberes Verhalten im Bereich der Endpunkte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Faser durch die reduzierte Klebstoff-

menge weniger vor Beschädigungen durch den Transport und den Versuchsaufbau geschützt ist. So kommt es zu Störungen an der besonders empfindlichen Stelle, am Übergang zur kernlosen Faser.

Die Kurve des in der untersten Laminatschicht integrierten Sensors weicht im Verlauf nur geringfügig von der optischen Kurve ab [Abb. 54].

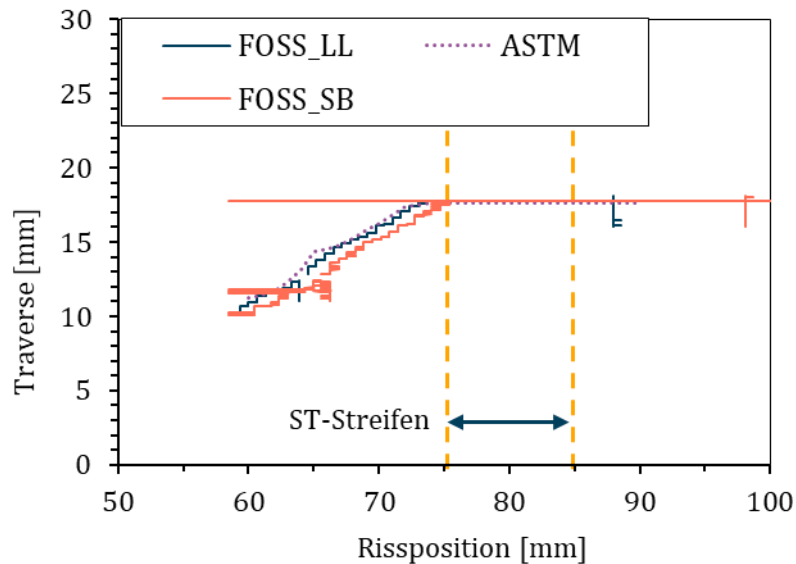


Abb. 54 Der Rissverlauf der Probe PPSU\_2\_SB mit eingezeichneter Position der Oberflächenzähmodifikation (ST).

Die mittlere Abweichung aller FOSS-Sensoren ist ebenfalls deutlich geringer als die der Vorversuche [Abb. 55]. Die Abweichungen sind jedoch von Probe zu Probe unterschiedlich, wobei die geklebten Proben im Allgemeinen größere Abweichungen aufweisen als die integrierten Proben. Daraus kann geschlossen werden, dass die in den Hauptversuchen verwendete Methode zur Bestimmung der Sensorposition der in den Vorversuchen verwendeten Methode überlegen ist.

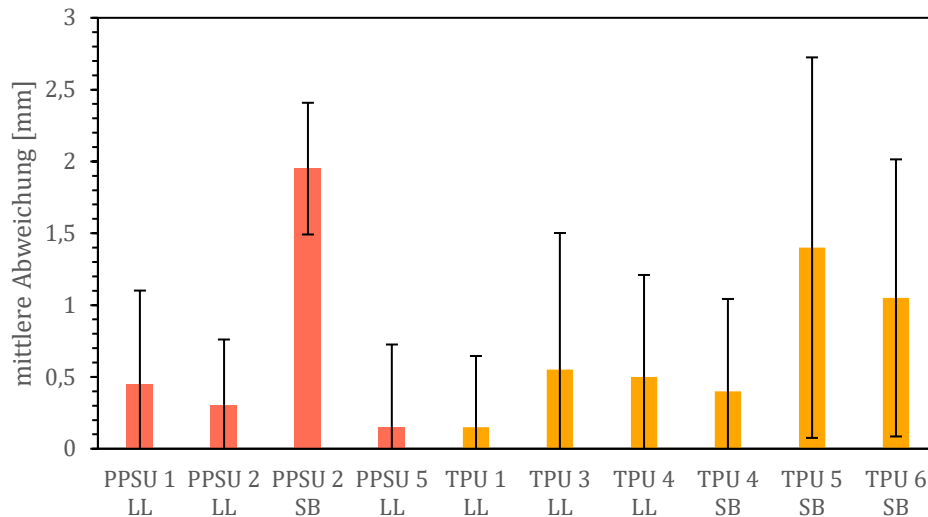


Abb. 55 Die mittlere Abweichung der mittels FOSS bestimmten Rissposition von der per ASTM bestimmten Rissposition.

Der Grund für die konsistente Abweichung der aufgeklebten Proben zu den im Laminat eingebetteten Proben kann nicht genau festgestellt werden. Es könnten mehrere Ursachen für die Messwertverschiebung verantwortlich sein: das reale Materialverhalten von Faser, Laminat oder dem Klebstoff, der zur Applizierung der Faser verwendet wurde, könnten die Dehnung der Faser beeinflussen.

In Bezug auf die eingangs gestellte Frage kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die faseroptischen Sensoren für die Messung der Risslänge geeignet sind. Insbesondere die nahe der Klebschicht integrierten Sensoren bilden den Rissverlauf gut ab. Ebenso kann eine deutlich höhere Auflösung im Vergleich zum konventionellen Verfahren nach Norm realisiert werden. Der Dehnungssensor löst über die gesamte Probe mit einem Abstand der Messpunkte von 0,65 mm auf, während das optische Verfahren nur in Abständen von 1 mm bzw. 2 mm misst. Infrage zu stellen sind die Abweichungen der Dehnungsmessung von der per Norm bestimmten Rissposition. Hier kann nicht genau festgestellt werden, welche der beiden Methoden die Rissposition korrekter bestimmt. Das optische Bestimmungsverfahren zeigt, wie in 3.1 beschrieben, Ungenauigkeiten und Anfälligkeiten für menschliche Fehlerquellen. Diese Messungen können somit zur qualitativen Validierung der hier vorgeschlagenen Methode genutzt werden, eignen sich jedoch keinesfalls zur quantitativen Bestätigung.

### 5.5.2 Rissstoppende Eigenschaften

Im Folgenden werden die beiden Probenreihen jeweils hinsichtlich der rissstoppenden Wirkung der Oberflächenzähmodifikationen bewertet.

#### PPSU

Zunächst werden die Proben mit PPSU-Streifen betrachtet. Alle Proben dieser Serie zeigen bei Betrachtung des Kraft-Weg-Verlaufs zunächst einen typischen Verlauf für das Aufreißen der Klebverbindung. Danach reißen sie ausnahmslos bis über die Messstrecke von 30 mm nach der Anfangsrislänge. In Abb. 56 ist zu erkennen, dass ab der Position der PPSU-Folie die Kraft durch den instationär wachsenden Riss schlagartig abfällt.

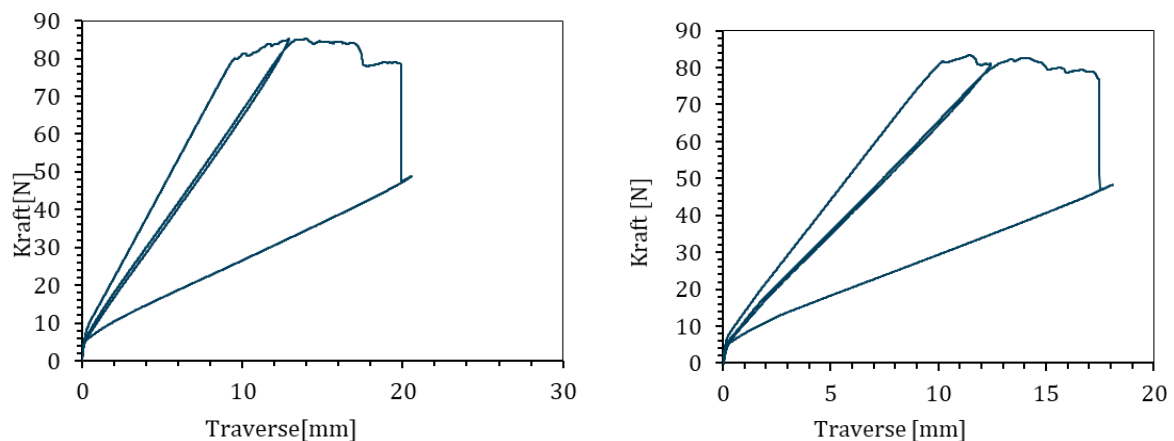


Abb. 56 Die Kraft über die Traverse der Proben PPSU\_1 (links) und PPSU\_2 (rechts).

Bei der Betrachtung des Traversenweges über den Rissverlauf ist ebenfalls ersichtlich, dass die Proben an der Stelle reißen, an der die Oberflächenzähmodifikation beginnt (Abb. 57). Zur besseren Lesbarkeit werden die Traversenwege der Be- und Entlastungsfahrten ohne Risswachstum aus den Werten ausgeschlossen.



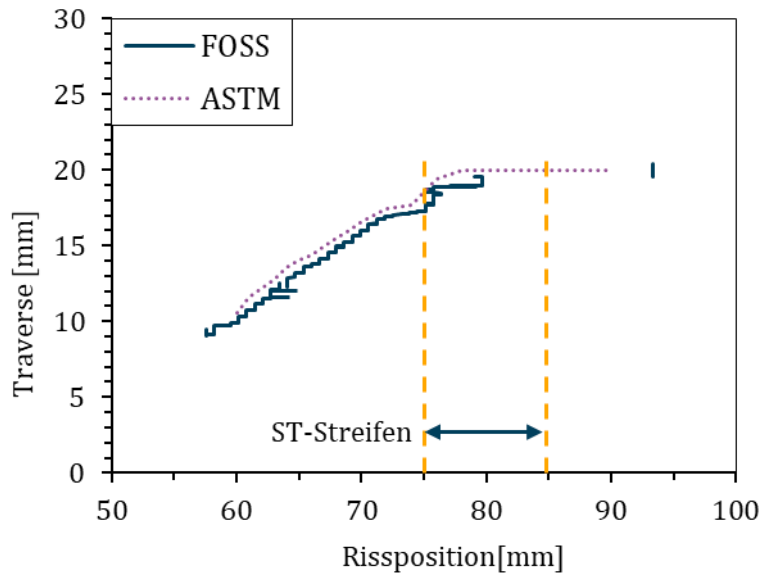


Abb. 57 Die Traverse über Risswachstum der Probe PPSU\_1\_LL.

Die Betrachtung der  $G_{IC}$ -Werte zeigt keine Auffälligkeiten im Verlauf der Messkurve. Die Werte verlaufen bis zur Position, an der der Riss instationär springt wie bei den Proben ohne Oberflächenzähmodifikation (Abb. 58). Bei den Proben 1 und 2 steigt der  $G_{IC}$ -Wert vor dem Rissprung leicht an, jedoch zu gering, um als signifikant angesehen zu werden (Abb. 58, Abb. 59).

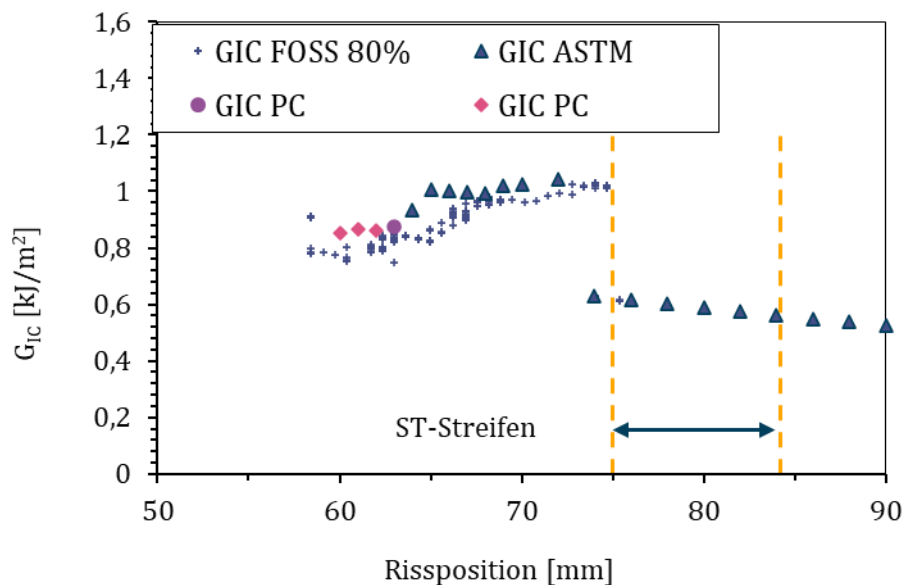


Abb. 58 Der Verlauf der  $G_{IC}$ -Werte der Proben PPSU\_2\_SB.

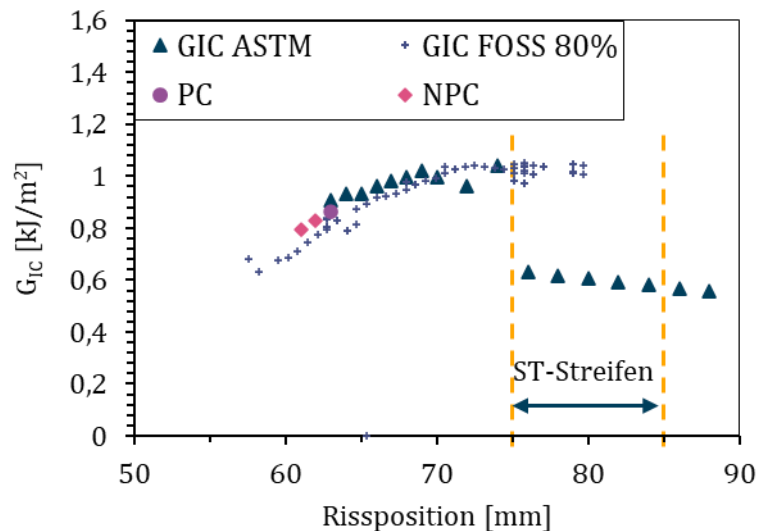


Abb. 59 Der Verlauf der  $G_{IC}$  Werte der Probe PPSU\_1\_SB.

Die  $G_{IC}$ -Verläufe der gesamten Probenreihe kann dem Anhang 8.18.6 entnommen werden. In Abb. 60 ist die Stelle der Oberflächenzähmodifikation an der, während des Tests geöffneten Probe dargestellt.

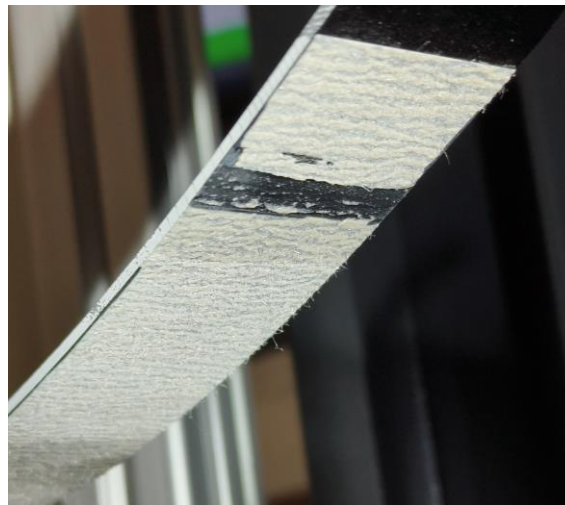


Abb. 60 Das Rissbild der der geöffneten DCB-Probe mit sichtbarer PPSU Folie während der Prüfung.

Zusätzlich wurden mit dem optischen Mikroskop VHX-X1 der Firma Keyence Rissbilder des Risses in der PPSU-Folie aufgenommen. Die Abbildungen Abb. 61 und Abb. 62 zeigen, dass der Riss über den Bereich der Oberflächenzähmodifikation unregelmäßig verläuft. Insgesamt reißt der Klebstoff vor dem PPSU gleichmäßig kohäsiv. Dann jedoch scheint ein Mischbruch aufzutreten. Wie in Abb. 61 am oberen linken Rand des PPSU-Bereichs zu erkennen reißt teilweise sogar die PPSU-Folie vom Laminat ab. Insgesamt versagt vor allem die Bindung zwischen Klebstoff und Oberflächenzähmodifikation.

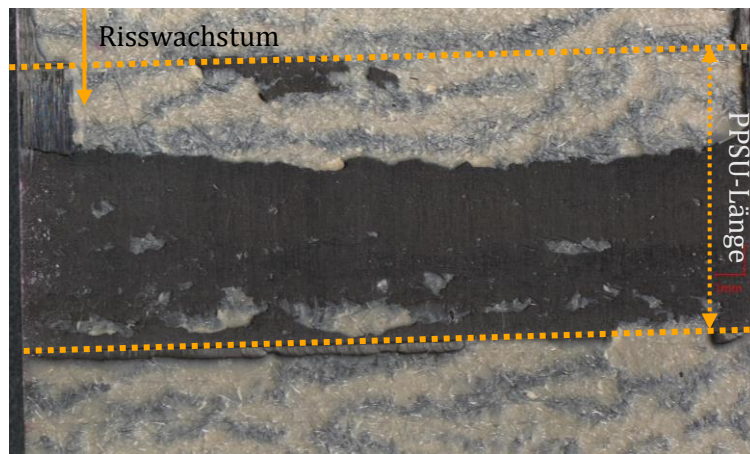


Abb. 61 Das Rissbild der Oberflächenzähmodifizierten Seite der Probe PPSU\_1 mit 20-facher Vergrößerung.

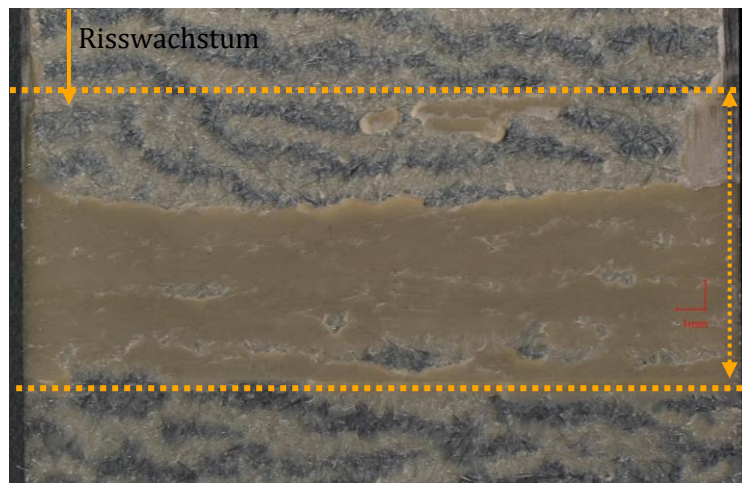


Abb. 62 Das Rissbild der Seite ohne Oberflächenzähmodifizierung der Probe PPSU\_1 mit 20-facher Vergrößerung.

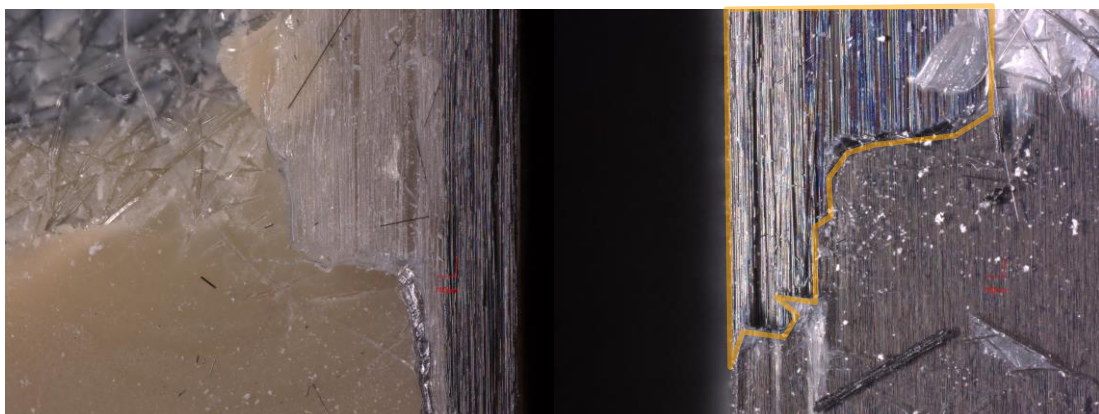


Abb. 63 Mikroskopische Darstellung der Ablösung der PPSU-Folie vom Laminat (100-fache Vergrößerung)  
Rechts die Seite mit aufgebrachtter Oberflächenzähmodifikation. Die Ablösestelle ist farblich markiert.

PPSU besitzt somit als Oberflächenzähmodifikations-Material keine rissstoppende Eigenschaften. Vielmehr konnte beobachtet werden, dass durch das Einbringen von PPSU der Riss an dieser Stelle instationär springt, die Klebverbindung also geschwächt wird. Weitere Mikroskopische Untersuchungen der Rissbilder können dem Anhang 8.9 entnommen werden.

### TPU

Als nächstes werden die Proben der Serie mit TPU-Oberflächenzähmodifikation betrachtet. Im Kraft-Weg-Verlauf in Abb. 64 ist zu erkennen, dass die Kraft an der Stelle, an der der Riss die Folie erreicht, abweichend vom typischen Verlauf einer Probe ohne Oberflächenzähmodifikation ansteigt, bis der Riss etwa bis zur Hälfte der Folie fortgeschritten ist. Danach nimmt sie in gleichem Maße wieder ab. Kurz vor dem instationären Rissprung ist wieder ein leichter Kraftanstieg zu erkennen. Nach dem Rissprung bleibt die Kraft etwa auf dem gleichen Niveau wie bei einer Probe ohne Oberflächenzähmodifikation.

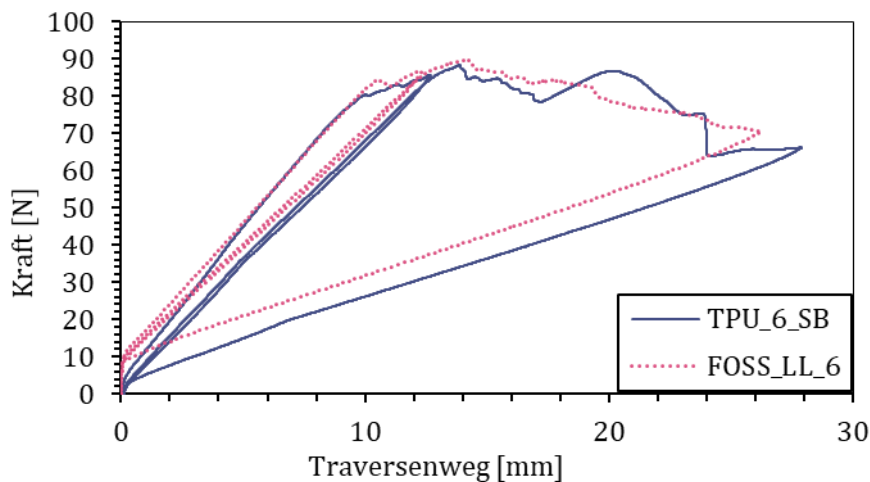


Abb. 64 Der Kraftverlauf über den Traversenweg der Proben TPU\_6\_SB und FOSS\_LL\_3.

Das Risswachstum der TPU-Proben zeigt bis zur TPU-Folie ein ähnliches kontinuierliches Verhalten. In Abb. 65 ist dieser exemplarisch an der Probe TPU\_1\_LL abgebildet. Bei den meisten Proben flacht das Risswachstum zu Beginn und am Ende der TPU-Folie ab und verweilt dort bei fortschreitender Traverse auf einer Position. Im Bereich der Folie wächst der Riss darauf kontinuierlich mit konstanter Steigung weiter.

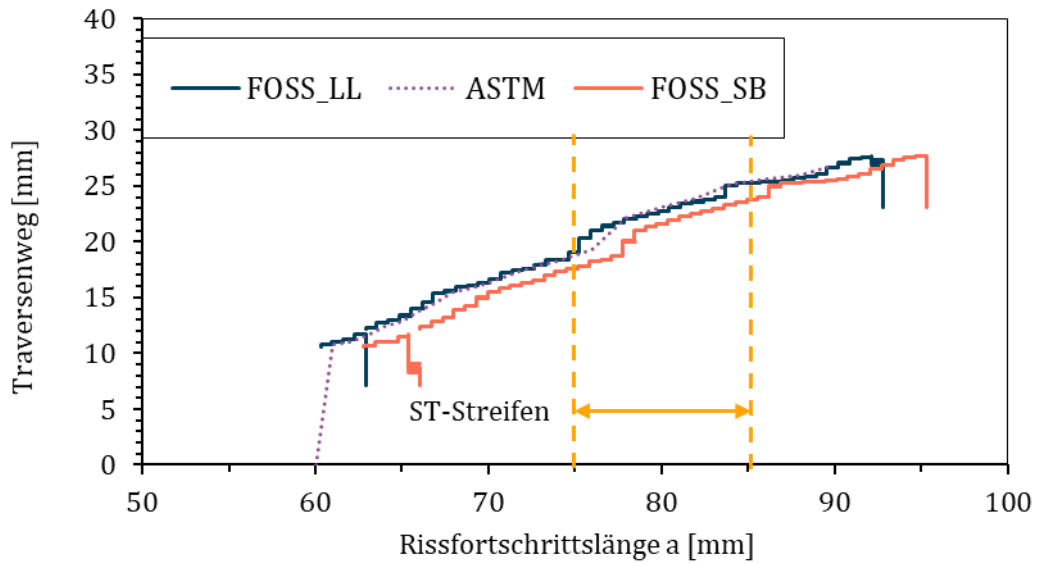


Abb. 65 Der Rissverlauf über Traverse der Proben TPU 1 LL und TPU 1 SB.

Abb. 66 ist erkennbar, dass der  $G_{IC}$ -Wert über den Verlauf der TPU-Folie nicht linear verläuft. Der Verlauf folgt zunächst dem der Proben ohne Oberflächenzähmodifikation. Sobald jedoch der Riss die Folie erreicht, steigt der Wert stark an, erreicht seinen maximalen Wert meist in der Mitte der Folienbreite und fällt dann entlang der Folie wieder ab. Am Ende der Folie ist wieder ein leichter Anstieg im Messwertverlauf zu erkennen.

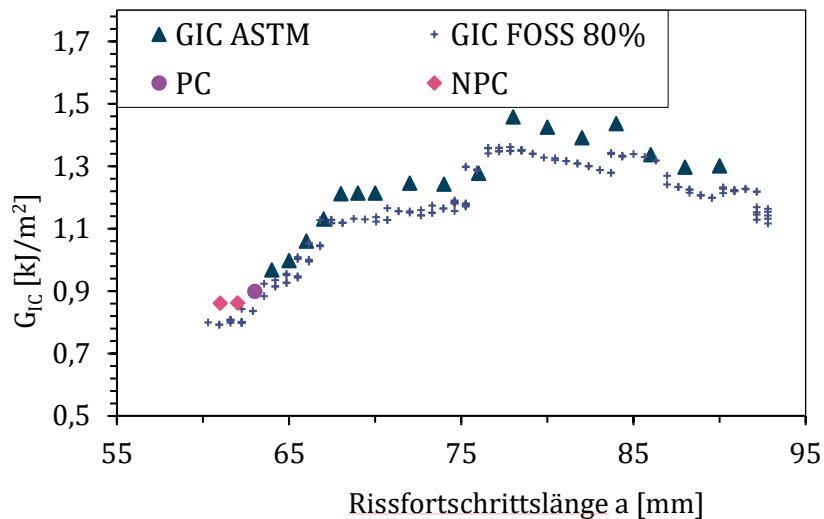


Abb. 66 Die  $G_{IC}$  Werte der Probe TPU\_4\_LL über die Rissfortschrittslänge.

Ebenfalls ist in Abb. 67 ersichtlich, dass der  $G_{IC}$ -Wert nicht für alle Proben deutlich springt, sondern teilweise asymptotisch bis zu einem höherem Wert ansteigt und dann bei etwa der Mitte der Oberflächenzähmodifikation abflacht und wieder abfällt.





Am Ende der Oberflächenzähmodifikation fällt die elastische Komponente des TPUs wieder weg, so dass die Prüfkraft an dieser Stelle bereits deutlich höher ist als zum Aufreißen des Klebstoffs erforderlich. Daher springt der Riss bis zu der Stelle, bis zu der eine Probe ohne Oberflächenzähmodifikation bei diesem Weg äquivalent gerissen wäre.

In Abb. 69 und Abb. 70 sind die Rissbilder der Proben, an der Stelle der Oberflächenzähmodifikation abgebildet. Sie zeigen ein gleichmäßiges Rissbild über den Oberflächenzähmodifikationsstreifen. Der Riss schreitet vor der Folie kohäsiv durch den Klebstoff fort. Entlang des TPUs sind helle Streifen in Rissrichtung erkennbar. Es zeichnen sich weiße Bereiche, an denen sich das TPU offensichtlich abschält, am Anfang der hellen streifen entgegen der Rissrichtung ab. Abb. 71 zeigt, dass das TPU auch bereits am Rand der Folie einreißt. Auf dem Klebstoff sind in Abb. 70 bläuliche Streifen zu erkennen, welche im gleichen Muster verteilt sind, wie die Streifen in Abb. 69. Somit kann vermutet werden, dass der Riss aus einer Mischung eines Adhäsionsbruch zwischen TPU und Klebstoff, sowie eines lokalen Kohäsionsbruch an der TPU-Oberfläche besteht. Das Versagen des TPUs kann auf die geringere Festigkeit des Materials im Vergleich zum verwendeten Klebstoff zurückgeführt werden.

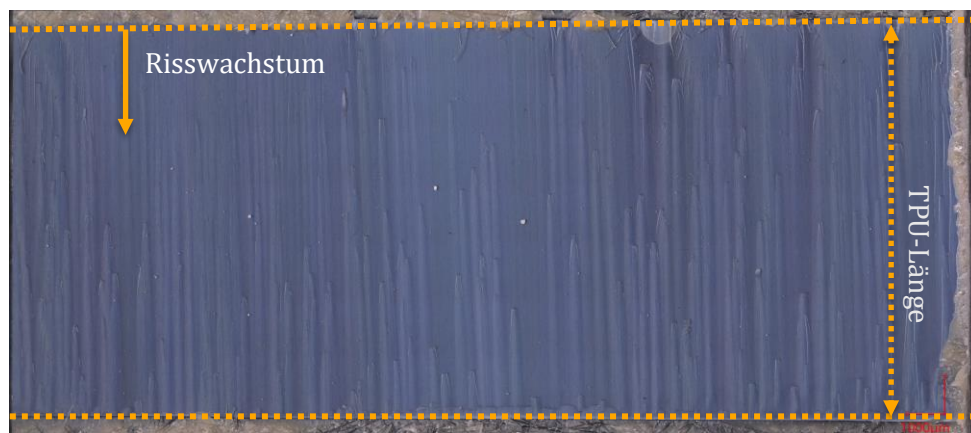


Abb. 69 Mikroskopische Darstellung der Oberflächenzähmodifikation nach testen der Probe mit 100-facher Vergrößerung.

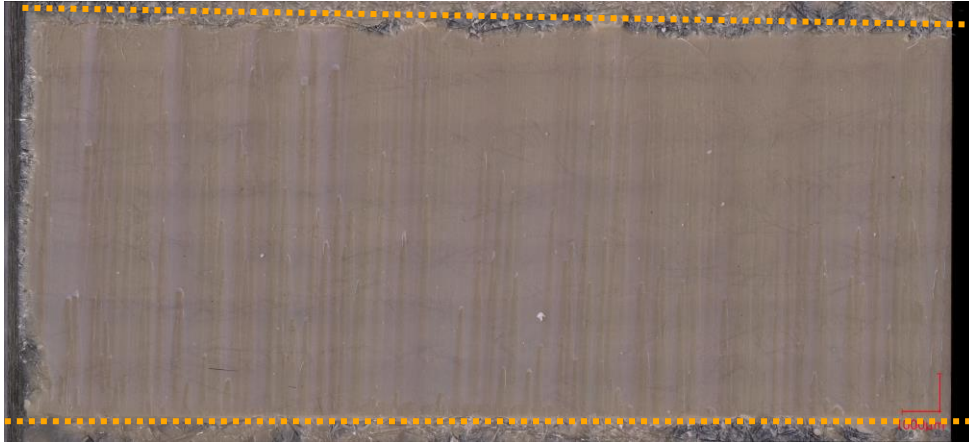


Abb. 70 Mikroskopische Darstellung der der Oberflächenzähmodifikation gegenüberliegenden Klebschicht nach testen der Probe mit 100-facher Vergrößerung.



Abb. 71 Detailaufnahme zweier Risse innerhalb des TPUs am Anfang der Folie.

Somit kann festgestellt werden, dass das Rissverhalten der Klebverbindung über den Bereich der Oberflächenzähmodifikation kontinuierlich und mit hoher Auflösung verfolgt werden kann. Ebenso zeigt das TPU als Oberflächenzähmodifikationselement deutliche rissstoppende Eigenschaften. Über das genaue Rissverhalten im Verlauf durch die Folie kann jedoch noch keine eindeutige Aussage getroffen werden.



## 6 Diskussion und Fazit

Im Rahmen der Untersuchung wurde die Implementierung der Risswachstumsmessung mittels faseroptischer Dehnungssensoren in strukturellen Klebverbindungen analysiert. Dabei wurden verschiedene Methoden der Sensorintegration an DCB-Proben verglichen. Weiterhin wurde das Rissverhalten von Klebverbindungen mit Oberflächenzähmodifikation durch TPU und PPSU auf rissstoppende Eigenschaften überprüft.

Zunächst wurde die Hypothese aufgestellt, dass mit faseroptischen Dehnungsmessungen die Risslänge bis zu einer Genauigkeit von mindestens 1 mm bestimmt werden kann. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene und untersuchte Methode ist in der Lage eine theoretisch maximale Auflösung von 0,65 mm zu erreichen. Dies entspricht dem minimalen Sensorabstand des FOSS-Sensors. Dabei konnte eine mittlere Abweichung von unter 0,5 mm zur konventionellen Bestimmung per Norm erreicht werden.

Weiterhin wurde vermutet, dass TPU als Oberflächenzähmodifikations-Material eine rissstoppende Wirkung in einer Klebschicht erzeugt, während PPSU diese Eigenschaft nicht aufweist.

Beide Thesen konnten bestätigt werden. PPSU wirkt als Störelement in der Klebschicht und löst instabiles Risswachstum ab der Oberflächenzähmodifikation aus. PPSU hingegen stoppt den Riss am Anfang und am Ende der Oberflächenzähmodifikation. Es weist jedoch über diesen Bereich nichtlineares Verhalten auf.

Im Vergleich mit vorangegangenen Untersuchungen mit PVDF als Oberflächenzähmodifikations-Material, kann festgestellt werden, dass eine Oberflächenzähmodifikation mit TPU eine deutlich geringere Steigerung des  $G_{IC}$ -Wertes zu Verbindungen ohne Oberflächenzähmodifikation erwirkt. Während gezeigt werden konnte, dass PVDF eine Steigerung von 25,1% erwirken konnte, wurde mit TPU lediglich eine Steigerung von 6,497% erzielt. [10]

Jedoch kann die, in dieser Arbeit vorgeschlagene, Methode den  $G_{IC}$ -Wert über den Bereich der Oberflächenzähmodifikation mit einer Auflösung von 0,65 mm abbilden. Dies ermöglicht eine genauere Analyse des Rissverhaltens an der Oberflächenzähmodifikation (Abb. 72). Dadurch kann festgestellt werden, dass der Riss in diesem Bereich aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens des TPUs instabil und ungleichmäßig wächst. Dies ist eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den Messmethoden der vorangegangenen Untersuchungen.

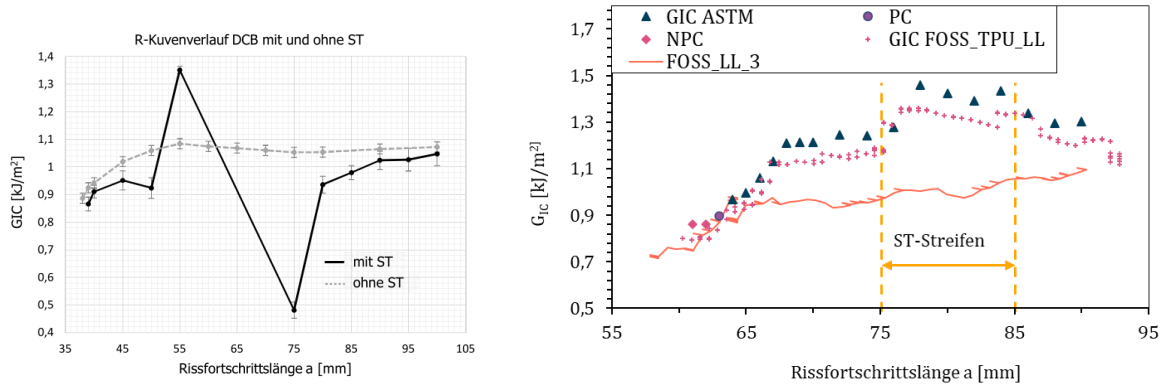


Abb. 72 Verlauf der Energiefreisetzungsrates über die Risslänge der DCB-Probe mit und ohne ST-Streifen der Voruntersuchungen in [10] (links) und der Ergebnisse dieser Arbeit an Probe TPU\_4 und FOSS\_LL\_3 (rechts),

Ebenfalls zu beachten, ist das deutlich andere Rissverhalten von TPU im Vergleich zu PVDF. Auffällig ist hier der deutlich unterschiedliche Kraftverlauf. Außerdem reißt der Riss im Bereich des PVDF instationär, während das TPU zwar kein lineares, aber ein stationäres Risswachstum aufweist.

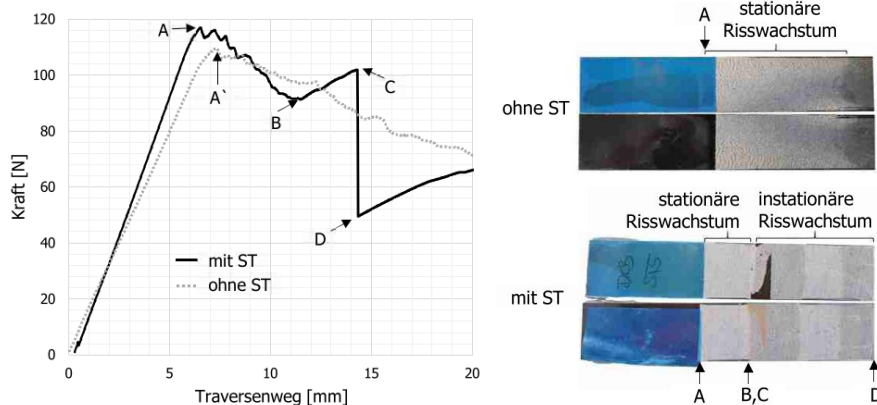


Abb. 73 Rissverhalten von PPSU aus Vorangegangenen Untersuchungen aus [10] Kraft- Traversenweg-Verlauf (links) und Rissbild mit und ohne Oberflächenzähmodifikation (rechts).

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass der Riss sich an der Oberfläche des TPUs zum Klebstoff ausbreitet. Das TPU versagt somit vor dem Klebstoff. Um eine genauere Aussage über das Rissverhalten im TPU tätigen zu können sind weitere Untersuchungen notwendig.

## **7        Ausblick**

### **7.1    Risswachstumsmessung mittels faseroptischer Sensoren**

Der Einsatz von faseroptischen Sensoren als Risserkennung zeigt großes Potential. Mit der hier vorgestellten Methode kann der Rissverlauf qualitativ mit großer Genauigkeit verfolgt werden. Bei der genauen Implementierung des Sensors gibt es noch großen Raum für weitere Untersuchungen.

Zum einen sollte eine verbesserte und genauere Methode untersucht werden, die Sensorposition auf der Probe zu lokalisieren. In den oben vorgestellten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass ein sauberes und genaues Vorgehen hier von großer Bedeutung ist.

Weiterhin sollte die Applikation der FOSS-Faser auf die Probenoberfläche und die Auswirkung auf die Dehnungsmessung genauer untersucht werden. Die sekundäre Applizierung nach Fertigung würde vor allem bei großen und komplexen Bauteilen viel Aufwand ersparen und den Einsatzbereich der Rissmessung durch FOSS deutlich erweitern. Vor allem, da so auch weitere Materialien neben faserverstärkten Kunststoffen untersucht werden könnten.

Die Applikation mehrerer FOSS-Sensoren nebeneinander könnte außerdem ermöglichen ein zweidimensionales Rissbild zu erstellen. Die Größe der Fasern ermöglicht es zehn oder mehr Sensoren auf eine DCB-Probe mit einer Breite von 25 mm zu applizieren. So könnte in hoher Auflösung in Probenlänge und Breite die Rissposition gemessen werden. Dies eröffnet die Möglichkeit unregelmäßiges Risswachstum über die Probenbreite zu erkennen und zu untersuchen.

### **7.2    TPU als Rissstoppelement**

Der Einsatz von TPU als Rissstoppelement ist rein mechanisch betrachtet dem von PVDF unterlegen. Die Einsatzmöglichkeit in niedrigen Temperaturbereichen ist für die Verwendung in der Luftfahrt jedoch essenziell. Daher sollte das genaue Rissverhalten des Materials als Oberflächenzähmodifikation weiter untersucht werden. Ebenfalls sollte untersucht werden, ob der in dieser Arbeit durchgeführte Fertigungsprozess zu dem Versagen des TPUs vor dem Klebstoff trotz höherer Festigkeit geführt hat.

## 8 Anhang

### Anhangsverzeichnis

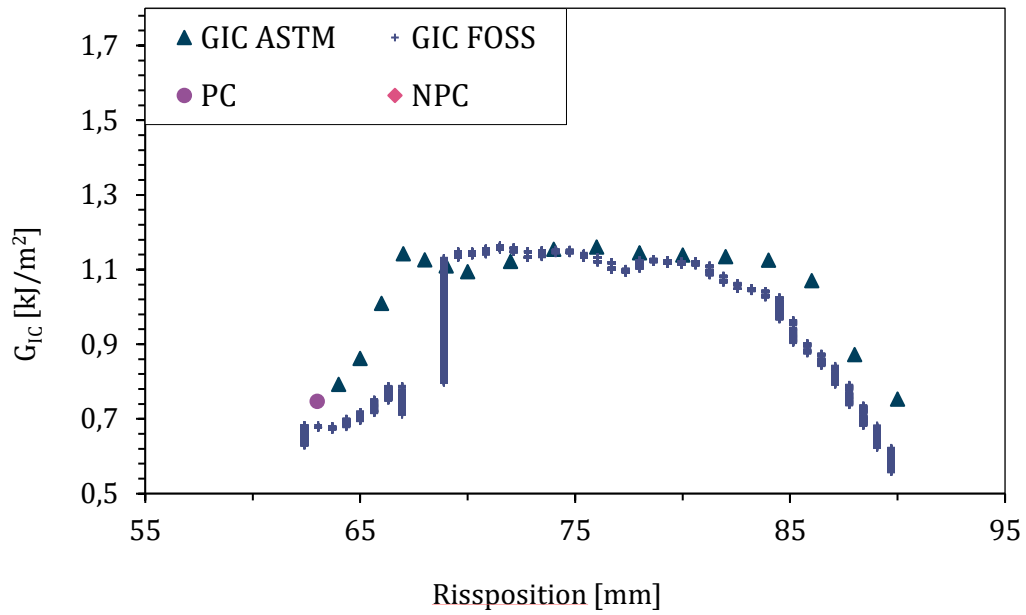
A 1 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_UL_2.....	67
A 2 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_UL_3.....	67
A 3 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_UL_4.....	68
A 4 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_UL_5.....	68
A 5 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_LL_3.....	69
A 6 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_LL_4.....	69
A 7 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_LL_5l.....	70
A 8 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_LL_6l.....	70
A 9 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_SB_2l.....	71
A 10 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_SB_3l.....	71
A 11 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe FOSS_SB_4.....	72
A 12 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe kein_FOSS_3.....	72
A 13 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe kein_FOSS_4.....	73
A 14 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe kein_FOSS_5.....	73
A 15 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe PPSU_1_SB.....	74
A 16 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe PPSU_2_LL.....	74
A 17 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe PPSU_2_SB.....	75
A 18 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe PPSU_5_SB.....	75
A 19 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe TPU_1_LL.....	76
A 20 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe TPU_3_LL.....	76
A 21 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe TPU_4_LL.....	77
A 22 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe TPU_4_SB.....	77
A 23 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe TPU_5_SB.....	78
A 24 G <sub>IC</sub> -Verlauf der Probe TPU_6_SB.....	78
A 25 Mikroskopische Abbildung des Rissbilds der Probe TPU_5 über das TPU im Bereich der Oberflächenzähmodifikation.....	79
A 26 Mikroskopische Abbildung des Rissbilds der Probe TPU_5 über den Klebstoff im Bereich der Oberflächenzähmodifikation.....	79
A 27 Mikroskopische Abbildung des Rissbilds der Probe TPU_6 über das TPU im Bereich der Oberflächenzähmodifikation.....	80

---

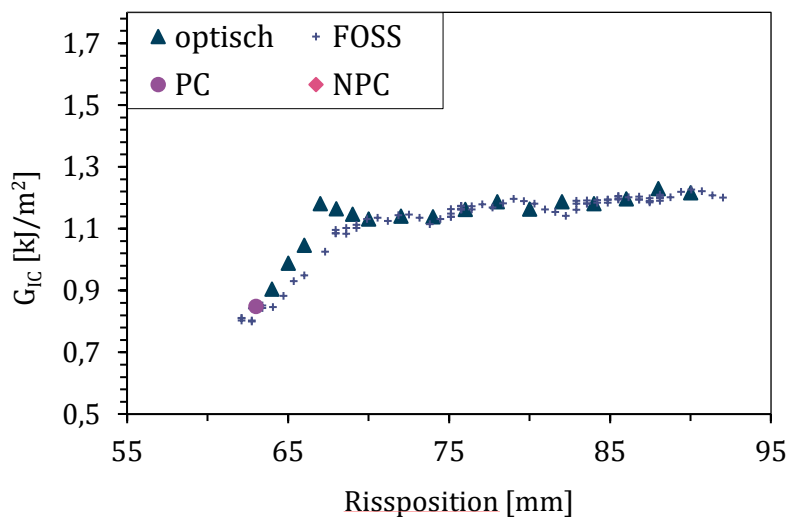
A 28 Mikroskopische Abbildung des Rissbilds der Probe TPU_6 über den Klebstoff im Bereich der Oberflächenzähmodifikation.....	80
---	----

## 8.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

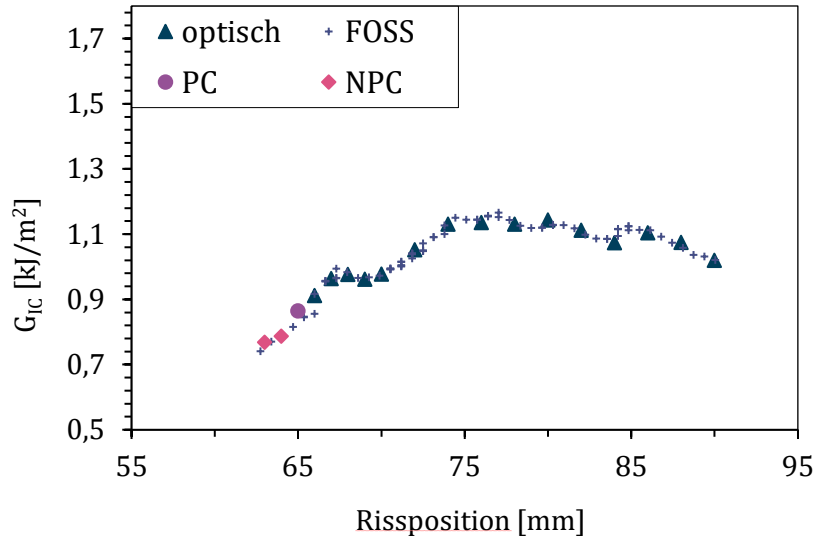
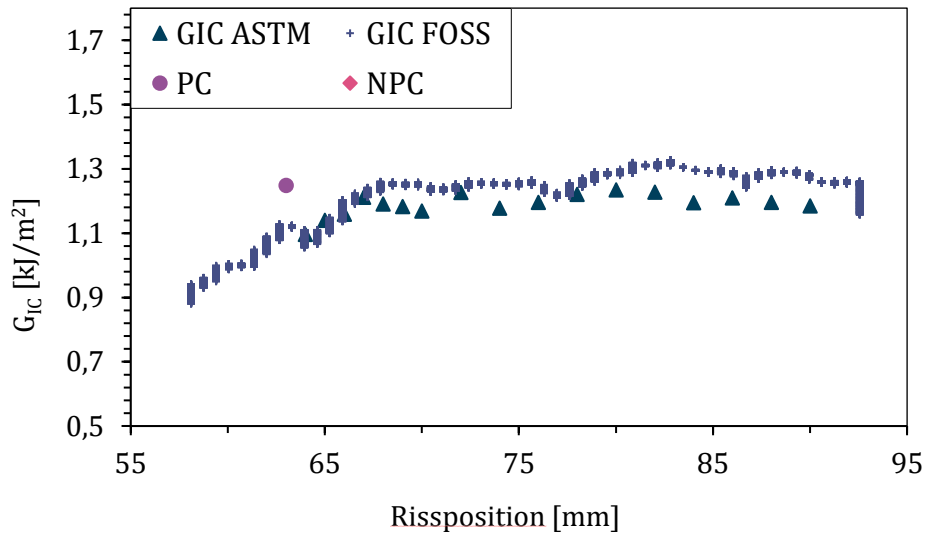
### 8.2 Obere Laminatschicht



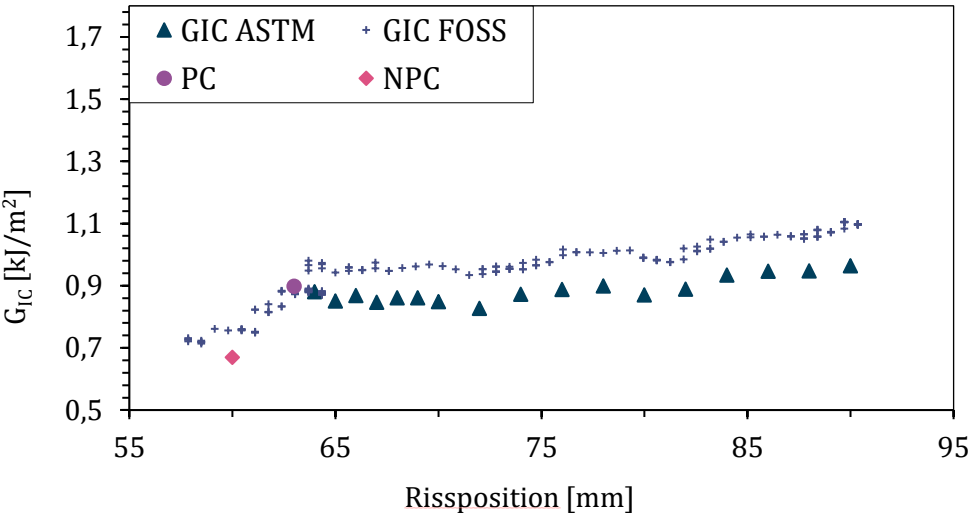
A 1 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe FOSS\_UL\_2.



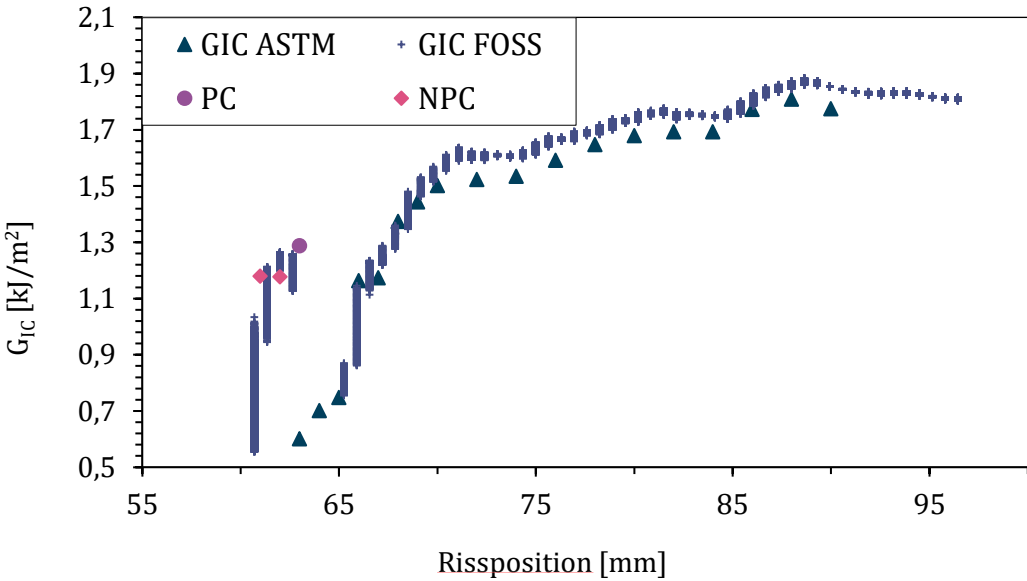
A 2 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe FOSS\_UL\_3.

A 3 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe FOSS\_UL\_4.A 4 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe FOSS\_UL\_5.

### 8.3 Untere Laminatschicht

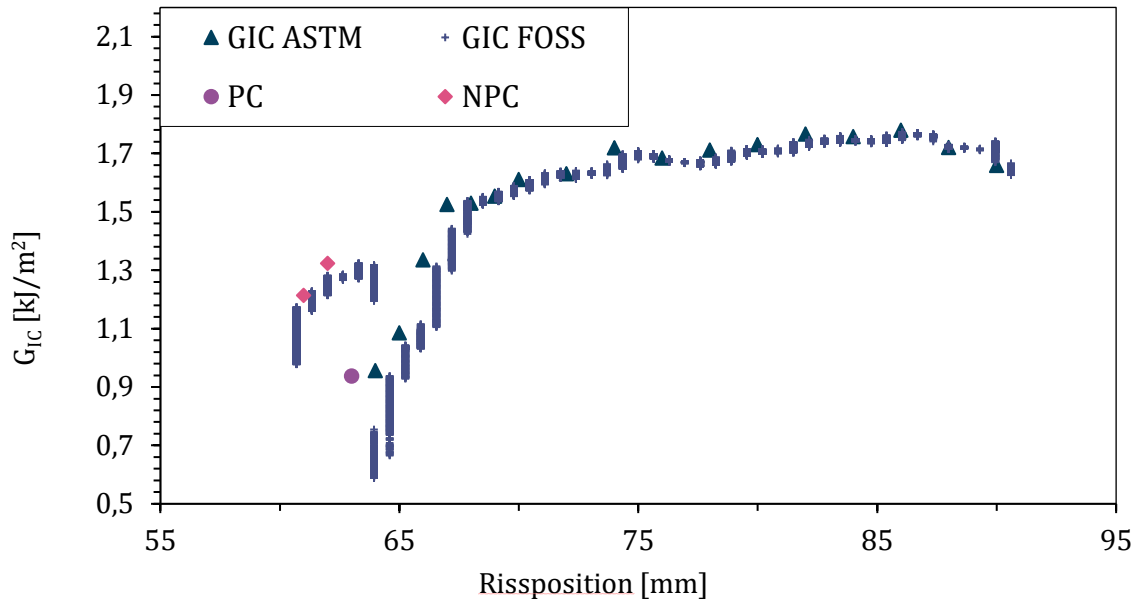
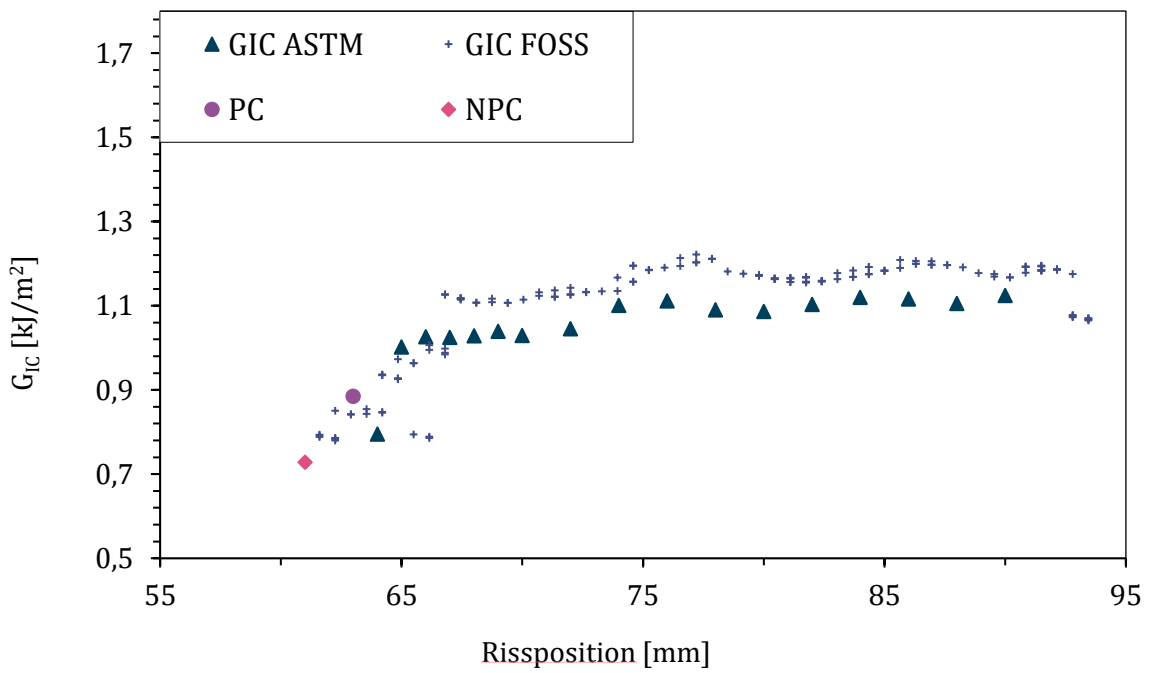


A 5 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe FOSS\_LL\_3.

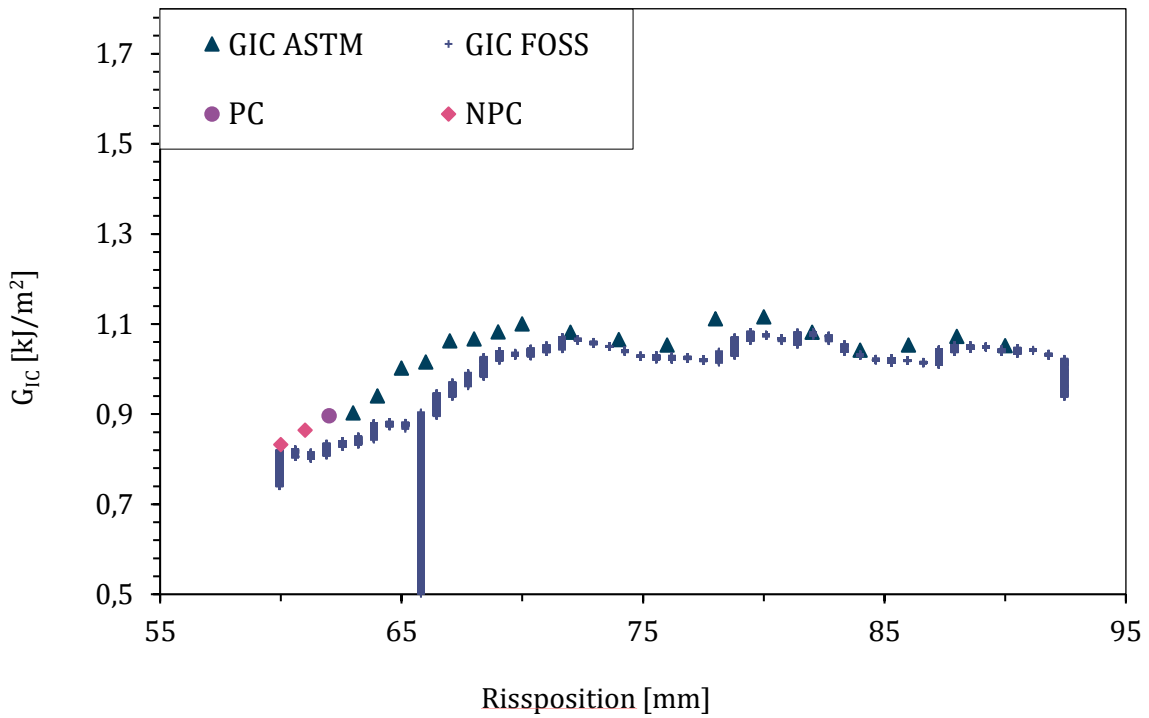


A 6 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe FOSS\_LL\_4.

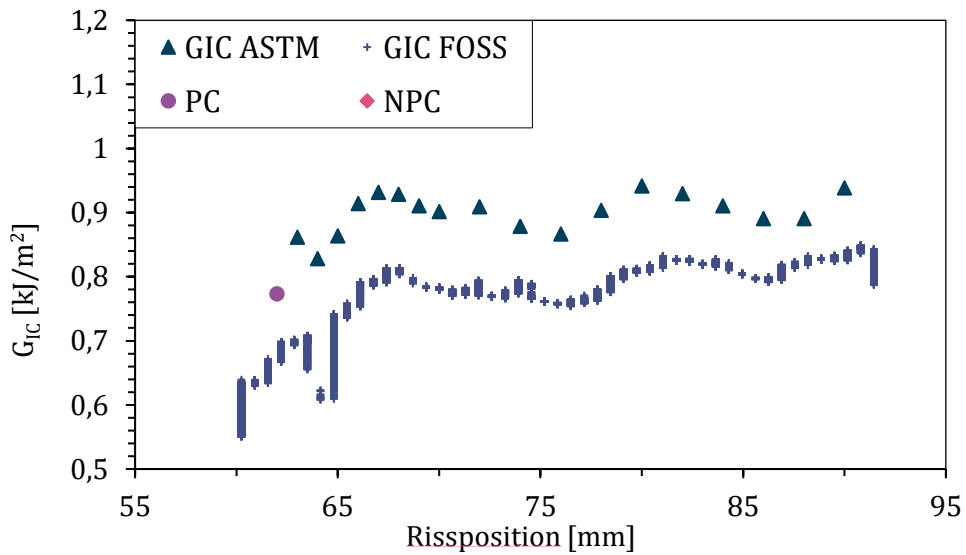


A 7  $G_{IC}$ -Verlauf der Probe FOSS\_LL\_51A 8  $G_{IC}$ -Verlauf der Probe FOSS\_LL\_61

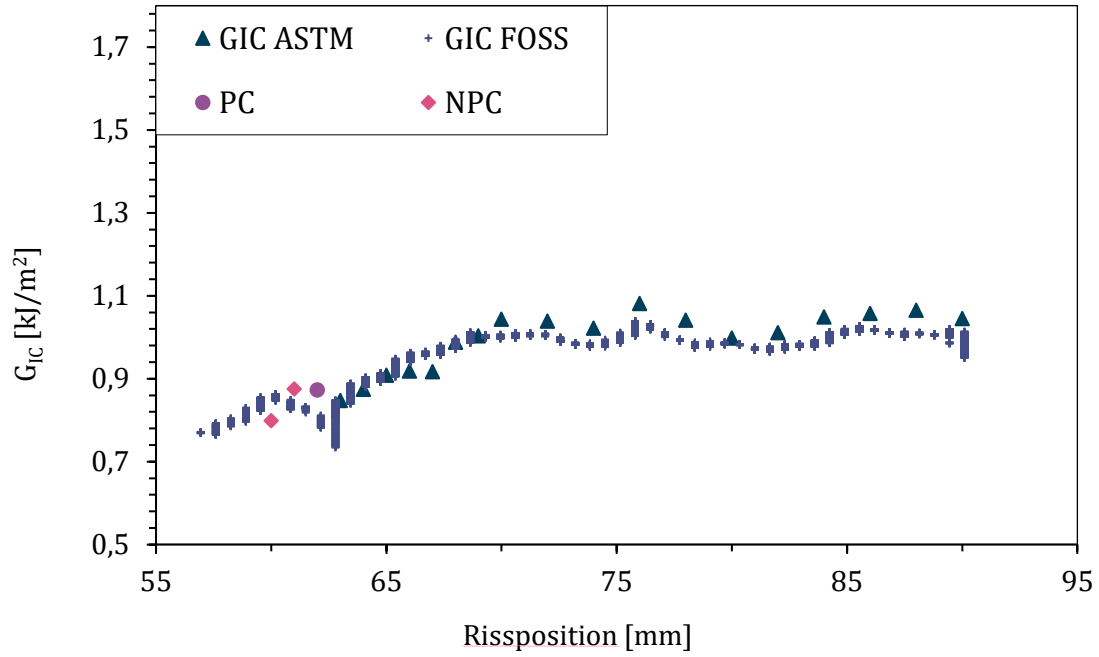
8.4 Aufgeklebte Sensoren



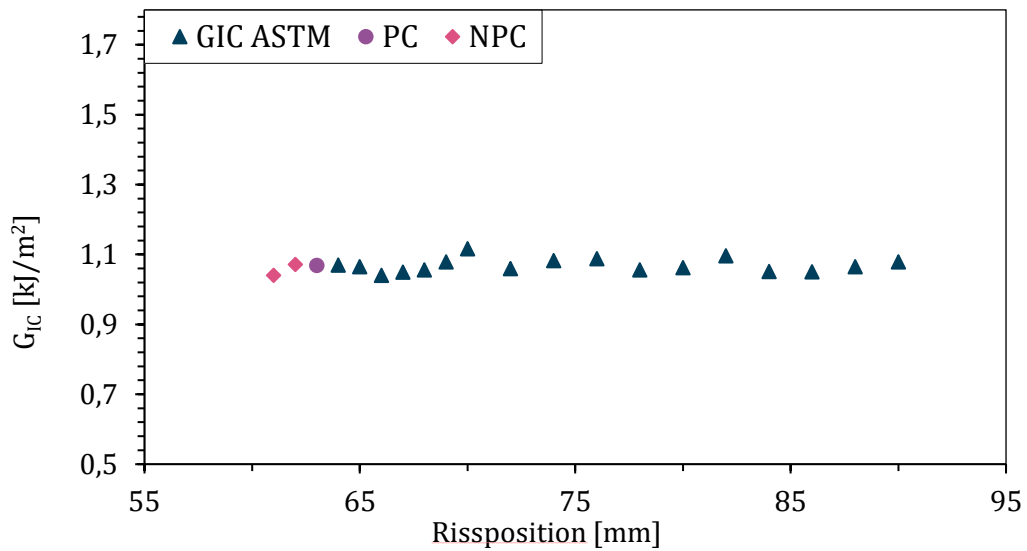
A 9  $G_{IC}$ -Verlauf der Probe FOSS\_SB\_21

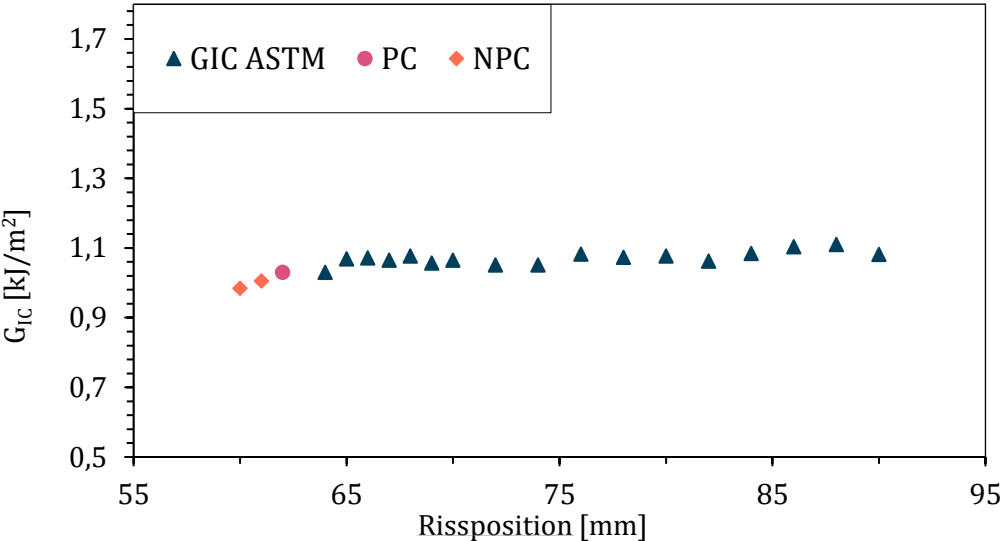


A 10  $G_{IC}$ -Verlauf der Probe FOSS\_SB\_31

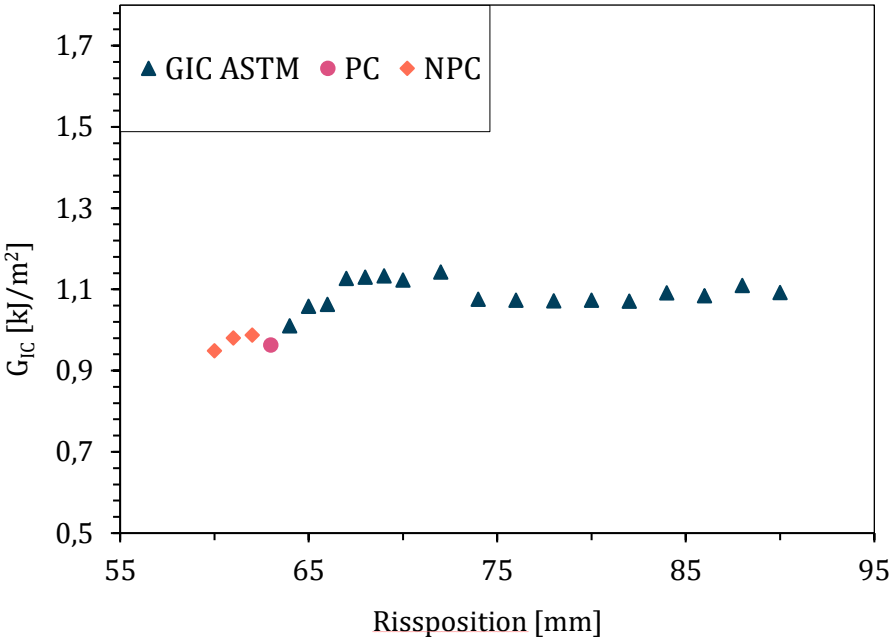
A 11 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe FOSS\_SB\_4

## 8.5 keine Sensoren

A 12 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe kein\_FOSS\_3.



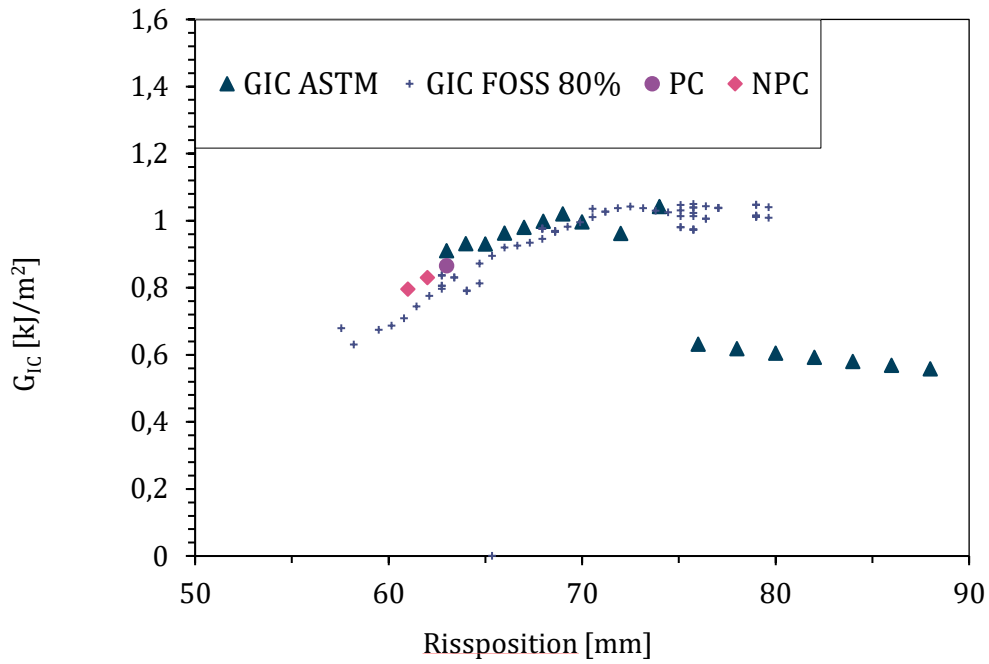
A 13 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe kein\_FOSS\_4



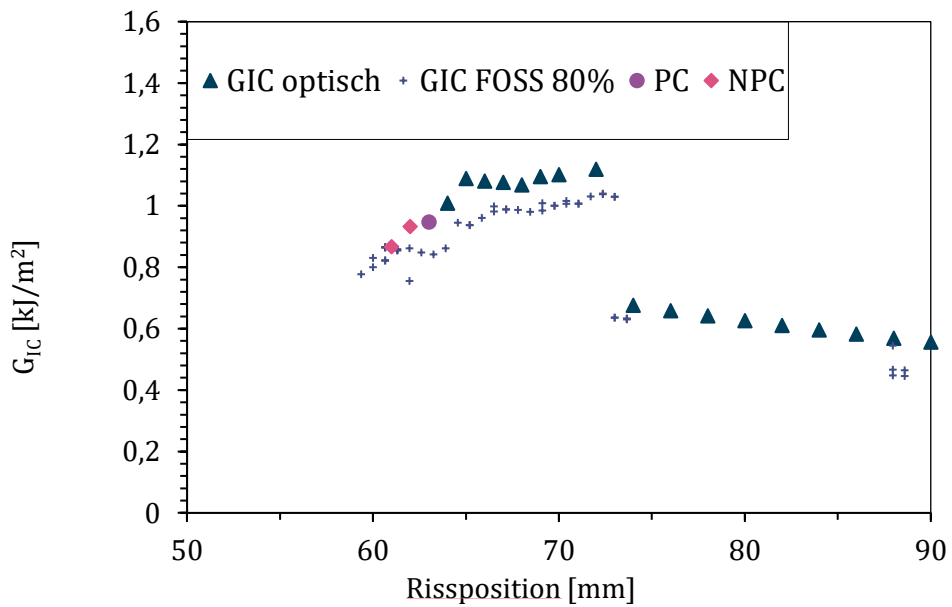
A 14 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe kein\_FOSS\_5

## 8.6 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen

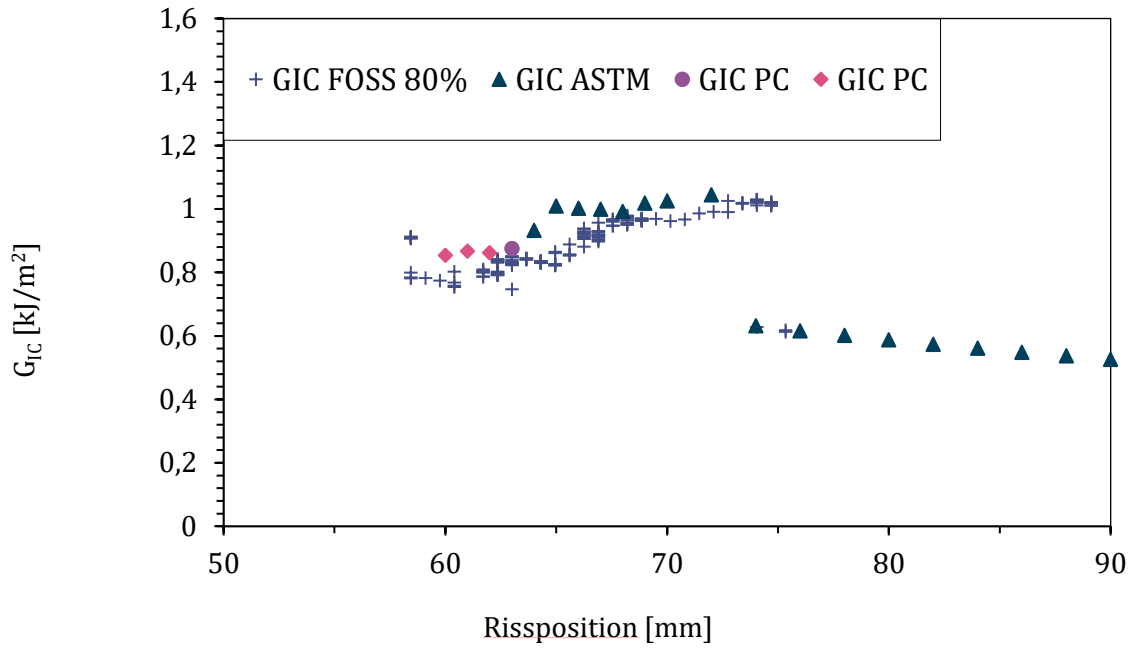
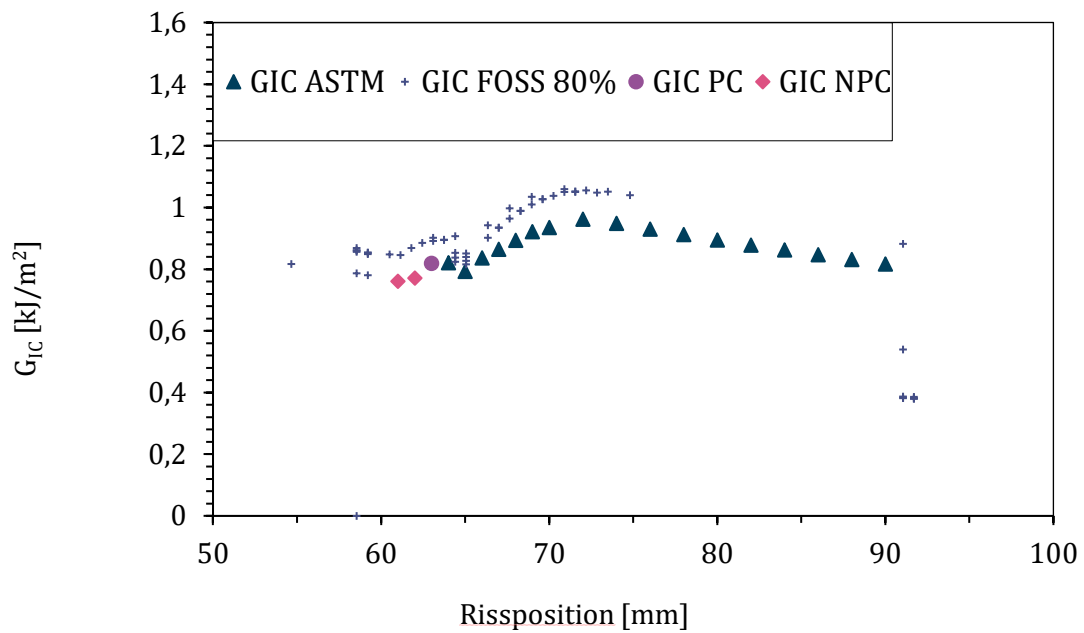
### 8.7 PPSU



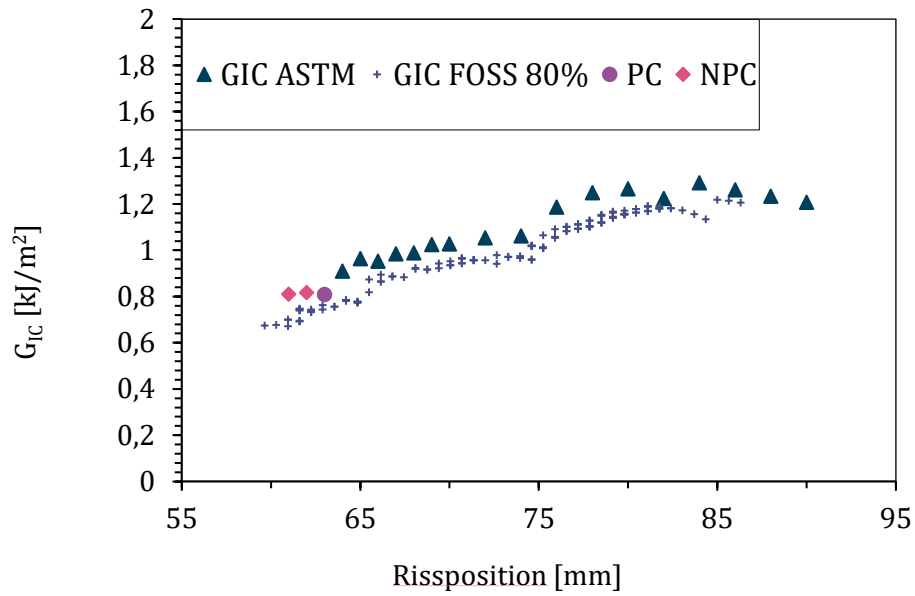
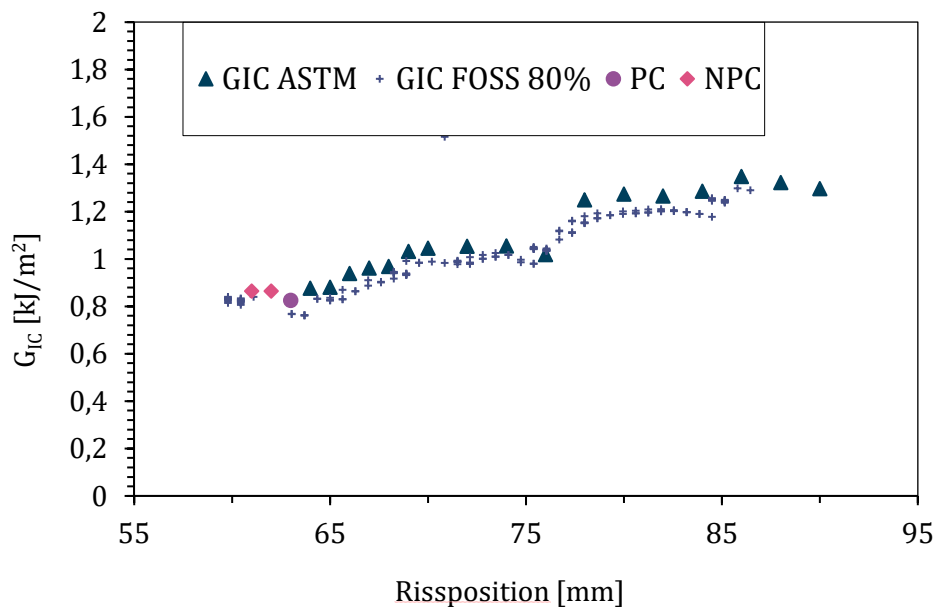
A 15 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe PPSU\_1\_SB.

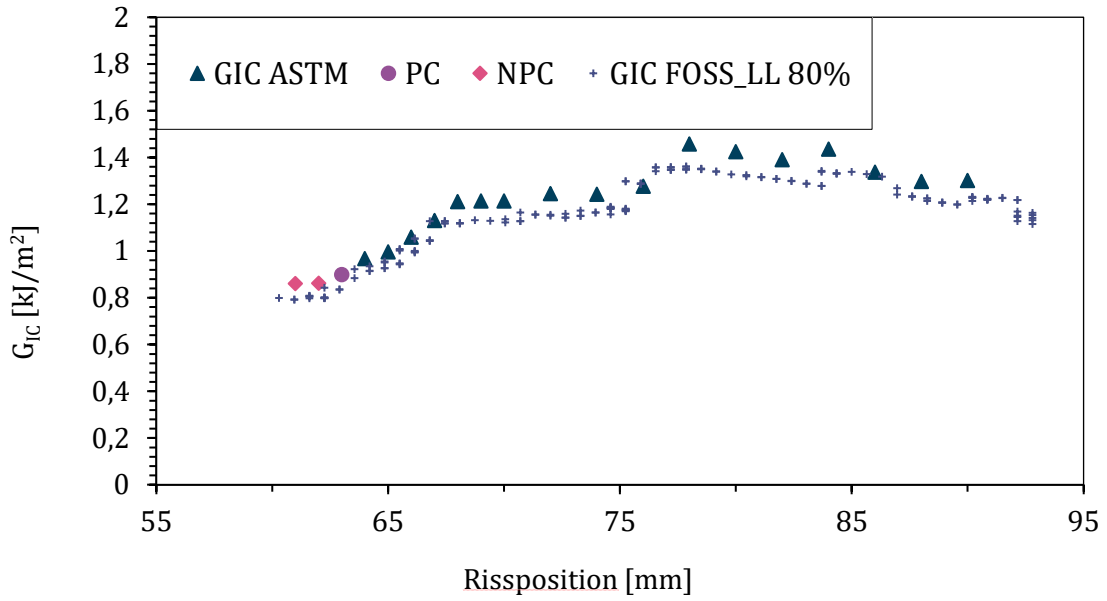


A 16 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe PPSU\_2\_LL.

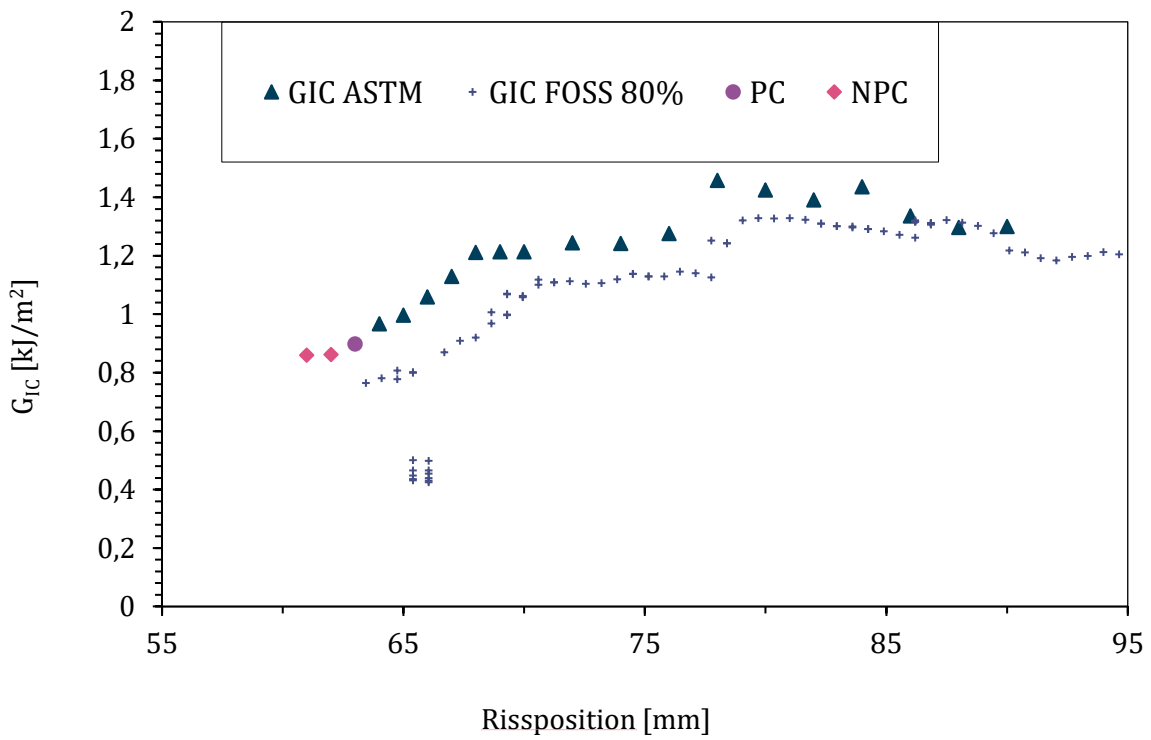
A 17  $G_{IC}$ -Verlauf der Probe PPSU\_2\_SB.A 18  $G_{IC}$ -Verlauf der Probe PPSU\_5\_SB.

## 8.8 PPSU

A 19 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe TPU\_1\_LL.A 20 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe TPU\_3\_LL.

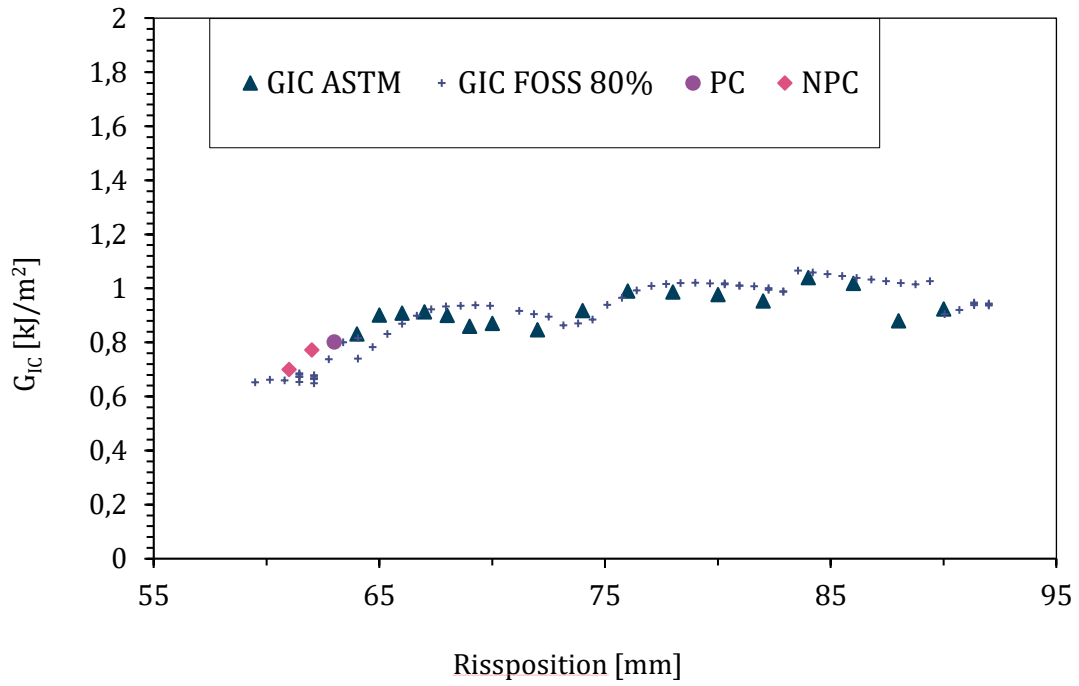
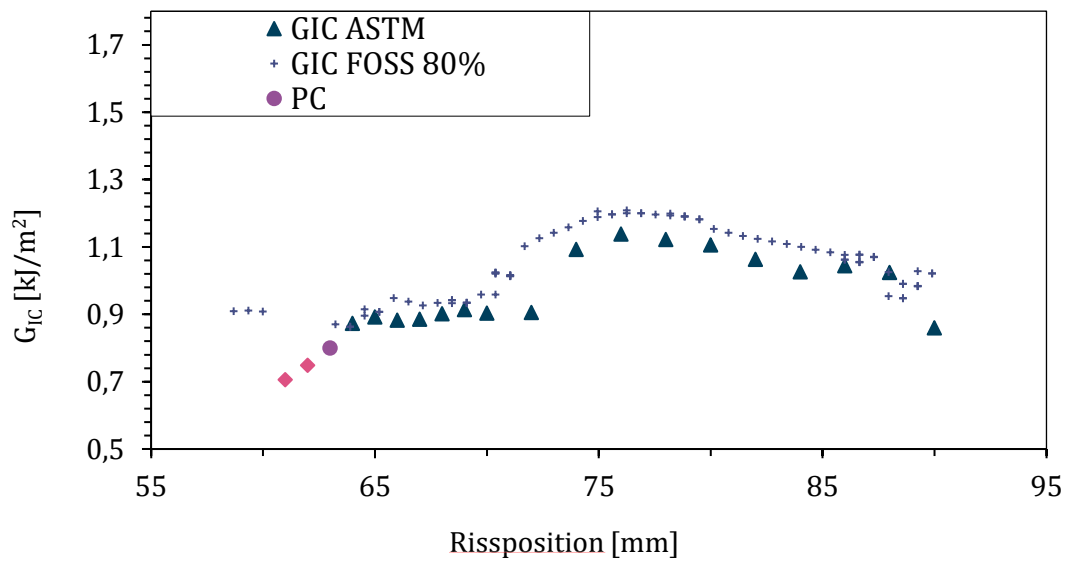


A 21 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe TPU\_4\_LL.

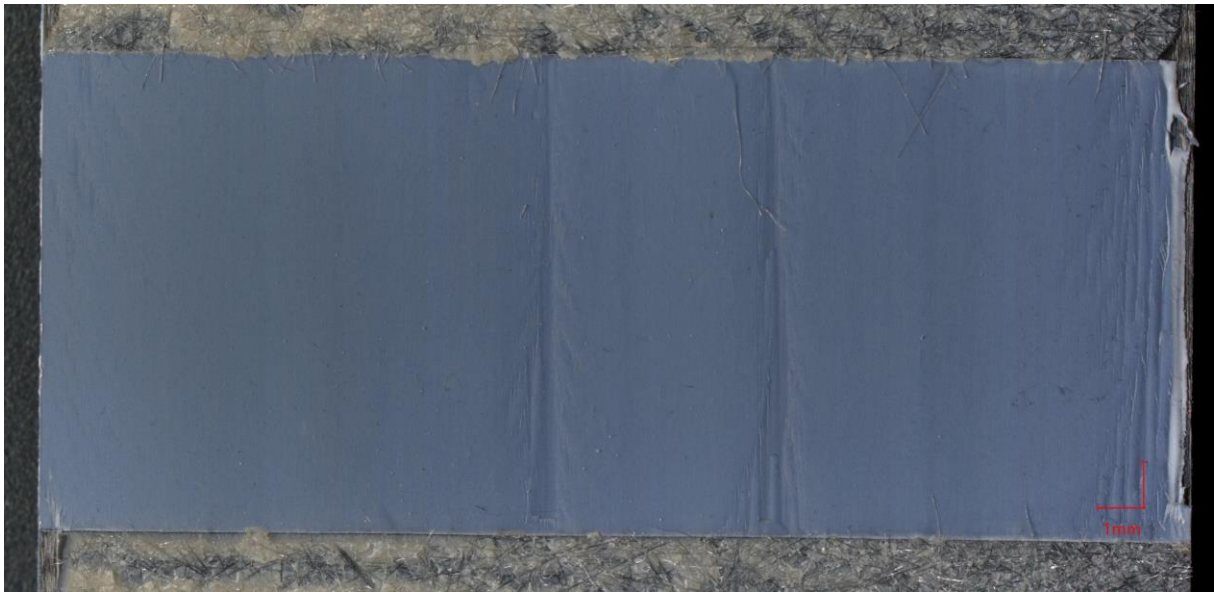


A 22 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe TPU\_4\_SB.



A 23 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe TPU\_5\_SB.A 24 G<sub>IC</sub>-Verlauf der Probe TPU\_6\_SB.

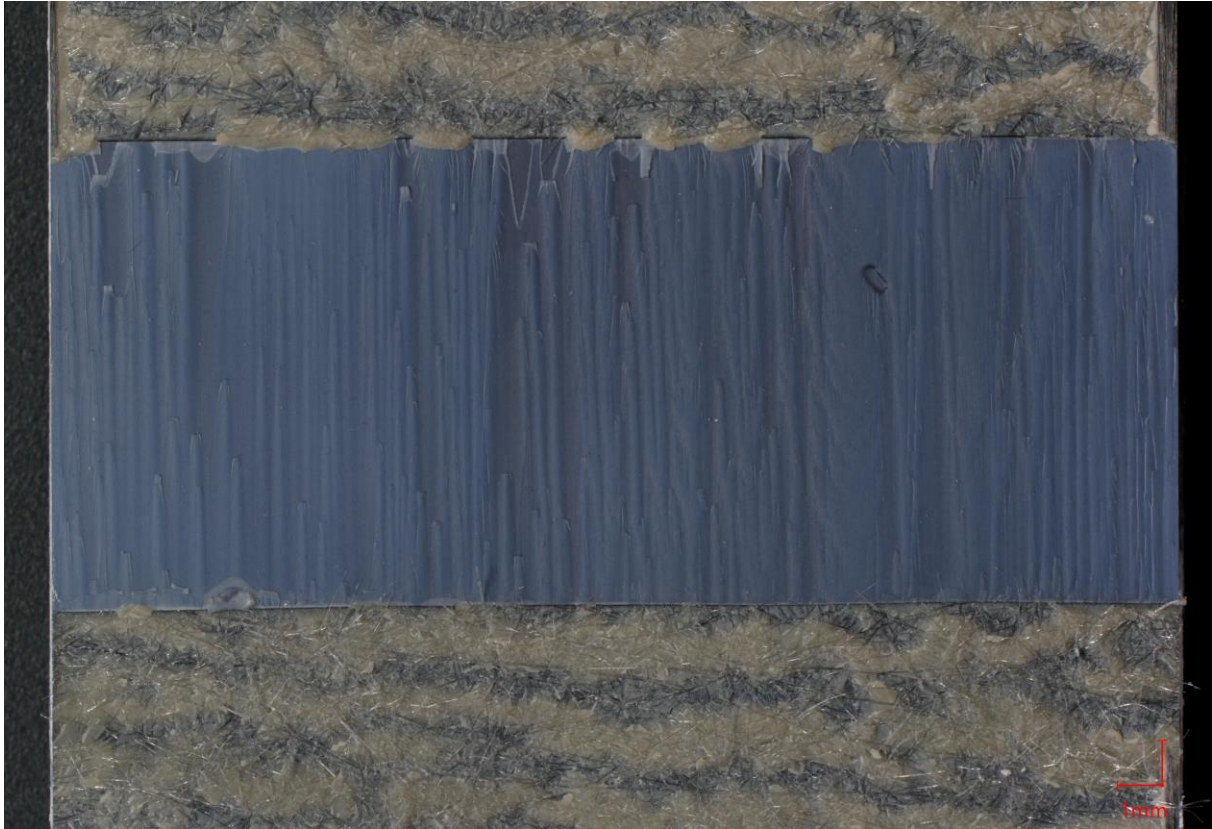
## 8.9 Mikroskopische Untersuchungen



A 25 Mikroskopische Abbildung des Rissbilds der Probe TPU\_5 über das TPU im Bereich der Oberflächenzähmodifikation.



A 26 Mikroskopische Abbildung des Rissbilds der Probe TPU\_5 über den Klebstoff im Bereich der Oberflächenzähmodifikation.



A 27 Mikroskopische Abbildung des Rissbilds der Probe TPU\_6 über das TPU im Bereich der Oberflächenzähmodifikation.



A 28 Mikroskopische Abbildung des Rissbilds der Probe TPU\_6 über den Klebstoff im Bereich der Oberflächenzähmodifikation.

## 9 References

- [1] Europäische Kommission, Ed., “Flightplan 2050: Europe's vision for aviation; maintaining global leadership and serving society's needs; report of the high-level group on aviation research,” Generaldirektion Forschung und Innovation, Generaldirektion Mobilität und Verkehr, Luxemburg.
- [2] S.-S. Yao, F.-L. Jin, K. Y. Rhee, D. Hui, and S.-J. Park, “Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 142, pp. 241–250, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.007.
- [3] M. Kaufmann, D. Zenkert, and P. Wennhage, “Integrated cost/weight optimization of aircraft structures,” *Struct Multidisc Optim*, vol. 41, no. 2, pp. 325–334, 2010, doi: 10.1007/s00158-009-0413-1.
- [4] Carolina Borges, “Designing of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites for a second-life in the aeronautic industry: strategies towards a more sustainable future,” *Front. Mater.*, vol. 10, 2023, doi: 10.3389/fmats.2023.1179270.
- [5] Airbus, *A350-900: The long range leader*. [Online]. Available: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a350/a350-900> (accessed: Jan. 29 2025).
- [6] M. D. Banea and L. F. M. Da Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009, doi: 10.1243/14644207JMDA219.
- [7] Walter Brockmann, *Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [8] T. A. Schmid Fuertes, T. Kruse, T. Körwien, and M. Geistbeck, “Bonding of CFRP primary aerospace structures – discussion of the certification boundary conditions and related technology fields addressing the needs for development,” *Composite Interfaces*, vol. 22, no. 8, pp. 795–808, 2015, doi: 10.1080/09276440.2015.1077048.
- [9] I. Sioutis, “A Literature Review on Crack Arrest Features for Composite Materials and Composite Joints with a Focus on Aerospace Applications,” *Aerospace*, no. 137, 2023, doi: 10.3390/aerospace10020137.
- [10] M. Schollerer, “Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation,” Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Mar. 2023.

- 
- [11] T. Löbel, "A hybrid bondline concept for bonded composite joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, no. 68, pp. 229–238, 2016, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.03.025.
- [12] G. Habenicht, *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei: Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie*, 6th ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [13] A. v. Halteren, *Leitfaden Kleben – aber richtig: Tipps und Hinweise zur fachgerechten Durchführung von Klebungen sowie zum Qualitätsmanagement und zur Qualitätssicherung*. [Online]. Available: <https://leitfaden.klebstoffe.com/> (accessed: Jan. 22 2025).
- [14] tantec Deutschland, *Oberflächenbehandlung von Kunststoffen*. [Online]. Available: <https://www.tantec-deutschland.de/wissen/oberflaechenbehandlung-kunststoff>
- [15] S. Budhe, M. D. Banea, S. de Barros, and L. Da Silva, "An updated review of adhesively bonded joints in composite materials," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 72, pp. 30–42, 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010.
- [16] ISO, "ISO 10365: Adhesives — Designation of main failure patterns," 2022.
- [17] EASA, "AMC 20-29: Composite Aircraft Structure," Jul. 2010.
- [18] M. Kadlec, "Concurrent use of Z-pins for crack arrest and structural health monitoring in adhesive-bonded composite lap joints," *Composites Science and Technology*, no. 188, 2020, doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107967.
- [19] Hexcel Composites Publication, Ed., "HexPly 8552 Product Data Sheet: mid-toughened, high strength, damage-resistant, structural epoxy matrix," 2020.
- [20] Hexcel Composites Publication, Ed., "Product Data HexPly® 8552," Feb. 2013.
- [21] Kimberley Niehage, "Experimentelle Untersuchungen zur Validierung zähmodifizierter Klebverbindungen bei der Anwendung von HAPs," Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig, Aug. 2022.
- [22] T. F. Victor Norrefeldt, *Ein Flugzeug im Kühlschranks*. [Online]. Available: [https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/forschung-im-fokus/flugzeug-kuhlschranks.html#:~:text=Mit%20Hilfe%20die-ser%20K%C3%A4lteanlage%20\(Air,Flugzeugrumpf%20zu%20Forschungszwecken%20zur%20Verf%C3%BCgung.&text=Das%20Cockpit%20ist%20f%C3%BCr%20eine%20Simulation%20mit%20Messungen%20vorbereitet](https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/forschung-im-fokus/flugzeug-kuhlschranks.html#:~:text=Mit%20Hilfe%20die-ser%20K%C3%A4lteanlage%20(Air,Flugzeugrumpf%20zu%20Forschungszwecken%20zur%20Verf%C3%BCgung.&text=Das%20Cockpit%20ist%20f%C3%BCr%20eine%20Simulation%20mit%20Messungen%20vorbereitet).

- 
- [23] P. Kaveh, "Low-Temperature Flexible Polyurethane/Graphene Oxide Nanocomposites: Effect of Polyols and Graphene Oxide on Physicomechanical Properties and Gas Permeability," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, no. 53, pp. 278–289, 2014, doi: 10.1080/03602559.2013.844241.
- [24] Zujie Fang, Ken K. Chin, Ronghui Qu, Haiwen Cai, *Fundamentals of Optical Fiber Sensors*: John Wiley & Sons, 2012.
- [25] X. Tan and Y. Bao, "Measuring crack width using a distributed fiber optic sensor based on optical frequency domain reflectometry," *Measurement*, vol. 172, p. 108945, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108945.
- [26] X. Bao, "Recent progress in distributed fiber optic sensors," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 12, no. 7, pp. 8601–8639, 2012, doi: 10.3390/s120708601.
- [27] ASTM international, "D5528 2021: DCB testing," 2021.
- [28] L. F. M. Da Silva, *Testing adhesive joints: Best practices*, 1st ed.: Wiley-VCH, 2012.
- [29] Quentin Sourisseau, "Use of high spatial resolution distributed optical fiber to monitor the crack propagation of an adhesively bonded joint during ENF and DCB tests.," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, no. 115, 2022.
- [30] scho\_m5, "ASTM D5528 2021 - DCB testing,"
- [31] M. Wiedemann, *Systemleichtbau für die Luftfahrt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.
- [32] Zwick Roell, "Product Information Materials Testing Machines ProLine Z005 to Z100,"
- [33] Zwick Roell, "Product Information Materials Testing Machines zwickiLine Z0.5 to Z5.0,"
- [34] Lennart Rosenbrock, "Experimentelle Untersuchungen von sensierten zähmodifizierten Klebverbindungen mittels faseroptischer Messtechnik (FOSS) bei Faserverbundwerkstoffen," Institut für Systemleichtbau, Jan. 2024.
- [35] Mr. K.Vijaya Kumar, "Analysis Of Vacuum Failures During Curing Of Cfrp Composites.," *International Journal of Scientific & Technology Research*, no. 5, 2013.
- [36] I. A. Hakim, "Porosity Effects on Interlaminar Fracture Behavior in Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites," *MSA*, no. 8, pp. 170–187, 2017, doi: 10.4236/msa.2017.82011.
- [37] Henkel Corporation Aerospace, "Technisches Datenblatt LOCTITE EA 9695 AERO Epoxy Film Adhesive,"



[38] BASF Polyurethanes GmbH, "Allgemeine Produktinformation Elastollan® 1165 D 13 U,"

[39] IEMAI, Ed., "PPSU Technical Data Sheet (TDS),"