Forschungsbericht 2024-05

Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation

Martin J. Schollerer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Systemleichtbau Braunschweig



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2024-05

Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation

Martin J. Schollerer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Systemleichtbau Braunschweig

- 248 Seiten
- 182 Bilder
 - 41 Tabellen
- 172 Literaturstellen





Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Wissenschaftliche Information Linder Höhe D-51147 Köln

ISSN 1434-8454 ISRN DLR-FB-2024-5 Erscheinungsjahr 2024

DOI: <u>10.57676/5fb5-dr68</u>

Erklärung des Herausgebers

Als Manuskript gedruckt. Abdruck oder sonstige Verwendung nur nach Absprache mit dem DLR gestattet. Strukturelle Klebverbindungen, Oberflächenzähmodifikation, Festigkeitssteigerung, Ermüdungsfestigkeit, Faserverbundwerkstoffe, Flugzeugstrukturen, Materialversuche

Martin J. SCHOLLERER DLR, Institut für Systemleichtbau, Braunschweig

Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation

Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Moderne Verkehrsflugzeuge bestehen aus Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen und werden durch Klebeverfahren verbunden, das für FKV besonders geeignet ist. Klebverbindungen bieten Vorteile wie eine ausgezeichnete Lastverteilung und Schadensvermeidung, jedoch werden sie aus Sicherheitsgründen zusätzlich verbolzt, was dem Leichtbaugedanken widerspricht. Die Forschungsfrage Möalichkeit. dieser Arbeit untersucht die durch lokale Oberflächenzähmodifikation die Verbindungsfestigkeit und Ermüdungsfestigkeit von geklebten Faserverbundstrukturen zu erhöhen, ohne das Substrat oder die Klebschicht zu beeinträchtigen. Diese Technologie namens "Surface Toughening" zielt darauf ab, das volle Leichtbaupotenzial von strukturellen Klebverbindungen zu realisieren, die Fertigungszeit zu verkürzen und somit die Produktionskosten zu senken. Das Konzept wird in dieser Arbeit durch ein experimentelles Probenprogramm unter statischer und dynamischer Belastung untersucht, inklusive hochratenfähiger Fertigung und Oberflächenvorbehandlung. Das Ergebnis ist eine bolzenfreie, spannungsreduzierende Technologie, die in der Luftfahrt rissstoppend und verbindungsfestigkeitssteigernd wirkt.

Structural bonded joints, surface toughness modification, strength increase, fatigue strength, fiber composites, aircraft structures, material tests (published in German)

Martin J. SCHOLLERER

DLR, Institut of Lightweight Systems, Braunschweig

Enhancing the robustness of structural bonding in aviation by using local surface toughening modification

Doctoral Thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Modern commercial aircraft are made from high-performance fiber composite materials and are joined using adhesive bonding, which is particularly suitable for composites. While adhesive bonds provide advantages such as excellent load distribution and damage prevention, they are often additionally bolted for safety reasons, contradicting the lightweight construction concept. The research question of this study explores the possibility of enhancing the bond strength and fatigue resistance of bonded fiber composite structures through local surface toughening modification, without negatively impacting the substrate or the adhesive layer. This technology, named "Surface Toughening," aims to unlock the full lightweight potential of structural adhesive bonds, reduce manufacturing time, and consequently lower production costs. The concept is investigated in this study through an experimental specimen program under static and dynamic loading, including high-rate manufacturing and surface pretreatment. The result is a bolt-free, stress-reducing technology that acts as a crack-stopper and increases bond strength in aviation applications.

TU Braunschweig – Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Forschungsbericht 2024-04

Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation

Martin J. Schollerer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Systemleichtbau Braunschweig

Diese Veröffentlichung wird gleichzeitig in der Berichtsreihe "NFL - Forschungsberichte" geführt.

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig als von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation.

Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation

Von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

> zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

> > genehmigte Dissertation

von:	Martin Johannes Schollerer
geboren in:	Rinteln
eingereicht am:	16.03.2023
mündliche Prüfung am:	14.09.2023
Vorsitz:	Prof. DrIng. Georg Garnweitner
Gutachter:	Prof. DrIng. Christian Hühne Prof. Clemens Dransfeld

Kurzfassung

Das globale Ziel der Luftfahrt ist deutlich Kohlendioxid einzusparen, um die Klimaziele zu erreichen. Dies gelingt nur durch einen reduzierten Verbrauch von Kerosin. Mittels einer besseren Aerodynamik, aber besonders durch das Einsparen von Strukturgewicht kann dieses Ziel realisiert werden.

Moderne Verkehrsflugzeuge werden daher aus Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen gefertigt und per Klebeverfahren gefügt. Kleben als Verbindungstechnik besitzt eine sehr hohe Leichtbaugüte und ist besonders für Faserverbundstrukturen bestens geeignet.

Klebverbindungen besitzen viele Vorteile wie z.B. die hervorragende Lastverteilung im Bauteil, das Toleranzmanagement über die Klebschichtdicke oder allgemein, dass das Bauteil gerade bei Faserverbundstrukturen nicht durch Bohrlöcher wie beim Bolzen oder Nieten beschädigt wird. Da die Herstellung von strukturellen Klebverbindungen jedoch sehr komplex ist, werden diese aus Sicherheitsgründen zusätzlich verbolzt, um Spannungskonzentrationen durch bspw. Defekte vermeiden zu können bzw. schon entstandene Risse in der Klebschicht zu stoppen. Eine verbolzte Klebschicht entspricht jedoch nicht dem Leichtbaugedanken und somit gehen die meisten Vorteile der Klebung wieder verloren.

Die Forschungsfrage dieser Arbeit lautet daher: Ist es möglich, durch eine lokale, reproduzierbare und hochratenfähige Oberflächenzähmodifikation die Verbindungsfestigkeit und Ermüdungsfestigkeit von geklebten Faserverbundstrukturen zu steigern, ohne dabei das Substrat negativ zu beeinflussen oder die Klebschicht zu verändern?

Eine solche Technologie würde das volle Leichtbaupotential einer strukturellen Klebverbindung realisieren, Zeit in der Fertigung sparen und somit direkt die Produktionskosten reduzieren. Um diese Frage zu beantworten, wird in dieser Arbeit ein Konzept zur lokalen Oberflächenzähmodifikation ausgearbeitet und erprobt. Die Technologie wird mittels experimentellen Probenprogramm unter statischer und dynamischer Belastung untersucht. Neben dem Einsatzbereich und den Einsatzgrenzen wird auch die hochratenfähige Fertigung mit samt deren Oberflächenvorbehandlung erarbeitet.

Es resultiert eine bolzenfreie, spannungsreduzierende Technologie *Surface Toughening*, welche in strukturellen Klebverbindungen der Luftfahrt in hohem Maße rissstoppend und verbindungsfestigkeitssteigernd wirkt.

Abstract

The global goal of aviation is to significantly reduce CO₂ emissions in order to meet climate targets. This can only be achieved by reducing kerosene consumption. This goal can be achieved by improving aerodynamics and, in particular, by reducing structural weight.

Modern commercial aircraft are therefore made of high-performance fiber composites and joined by adhesive bonding. Adhesive bonding as a joining technique has a very high lightweight quality and is particularly suitable for fiber composite structures.

Adhesive bonds have many advantages, such as excellent load distribution in the component, tolerance management via the adhesive layer thickness or, in general, the fact that the component is not damaged by drilled holes as in the case of bolts or rivets, especially in the case of fiber composite structures. However, since the production of structural bonded joints is very complex, they are additionally bolted for safety reasons in order to avoid stress concentrations due to defects, for example, or to stop cracks that have already developed in the adhesive layer. However, a bolted adhesive layer does not correspond to the lightweight construction concept and thus most of the advantages of adhesive bonding are lost.

Therefore, the research question of this work is: Would it be possible to increase the bond strength and fatigue resistance of bonded fiber composite structures by a local, reproducible and high-rate surface toughening modification without negatively affecting the substrate or changing the adhesive layer? Such a technology would realize the full lightweight potential of a structural bonded joint, save time in manufacturing, and thus directly reduce production costs.

To answer this question, a concept for local surface toughening modification is elaborated and tested in this work. The technology is investigated by means of an experimental specimen program under static and dynamic loading. In addition to the range and limits of application, the high-rate manufacturing together with its surface pretreatment is also worked out.

The result is a bolt-free, stress-reducing technology named Surface Toughening that has a high crack-stopping and bond-strength-increasing effect in structural bonded joints in the aerospace application.

Kleiner Streifen,

große Wirkung!

Danksagung

Promovieren ist wie Motorfliegen. Passen alle Bedingungen, startet man in Richtung Gegenwind und rechnet dann jederzeit mit einem Motorausfall, bis man wieder sicher gelandet ist. Mein Motor ist nicht ausgefallen und ich bin sicher gelandet. Daran sind viele Personen beteiligt gewesen, bei denen ich mich an dieser Stelle persönlich bedanken möchte.

Die Arbeit ist während meiner Zeit im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Braunschweig entstanden.

Als Erstes möchte ich mich daher bei meinem Betreuer und Abteilungsleiter Prof. Dr.- Ing. Christian Hühne bedanken, der mir in der Abteilung Funktionsleichtbau alle Möglichkeiten zur Verfügung gestellt hat, mich zu entwickeln und diese Arbeit zu schreiben. Trotz größter Termindichte haben wir stets auch kurzfristig Zeitfenster für einen Austausch gefunden. Weiter bedanke ich mich für die Mitbetreuung von Herrn Prof. Clemens Dransfeld und die Übernahme der Prüfungskommission von Herrn Prof. Dr.- Ing. Georg Garnweitner.

Mein besonderer Dank geht an meinen Team- und Klebfachgruppenleiter Dirk Holzhüter, der mich nicht nur großartig administrativ und span(n)end unterstützt hat, sondern auch Initiator dieser Arbeit war und temporär auch mein Sprachrohr darstellte. Nicht wegzudenken ist dabei Jens Kosmann, ohne ihn der große Umfang der Testkampagnen kaum vorstellbar gewesen wäre. Deine Unterstützung beim Testen und der DIC-Untersuchungen war einfach riesig. Sie bilden das Fundament dieser Arbeit. Gleichwertig gilt mein Dank auch Prof. Dr.- Ing. Oliver Völkerink. Durch die vielen Diskussionen im Bereich der nicht linearen Numerik konnte ich die Auswirkungen und den Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation abstecken, sodass gezielt Versuche abgeleitet werden konnten.

Julian Steinmetz und Chresten von der Heide gilt mein persönlicher Dank für die Koordination etlicher Fertigungstermine an der TU Braunschweig und die großartige Zusammenarbeit im Bereich der sensierten Klebung und der damit verbundenen Ermüdungsuntersuchungen.

Weiter danke ich Jörg Nickel für die Unterstützung meiner populärwissenschaftlichen Beiträge sowie unserem technischen Personal, namentlich Niklas Drews, Mareike Stegmeier, Cordelia Koch und Christine König für die zumeist sehr spontane Umsetzung meiner Ideen! Monika von Monkiewitsch gehört mein Dank für zahlreichen thermomechanischen Untersuchungen.

Nicht zu unterschätzen ist die Hilfe meiner vielen wirklich fleißigen und engagierten Studierenden, die mich während meiner Zeit teils langjährig begleitet haben. Dazu gehören: Kimberley Niehage, Marius Mantei, Franziska Klimmeck, Robert Berrios, Marco Krause, Benjamin Leichen, Steffen Sowka, Sonja Prinz und Jean Volkmer. Ohne euch wären die vielen Teilaufgaben nicht zu stemmen gewesen.

Für den tollen Austausch außerhalb des Labors danke ich meinen Bürokollegen Tobias Bach, Dr. Alexander Pototzky und Jens Kosmann für viele Momente des Lachens, aber auch der ernsten Gespräche! Ebenfalls geht der Dank auch an die vielen hilfsbereiten ungenannten Kollegen in der Abteilung und dem Institut. Ein Großteil meines Danks geht an meine Eltern und an meine Schwester, welche mich stets auf meinem Lebensweg unterstützt haben, mir alle Möglichkeiten gegeben haben, damit ich schließlich meine Leidenschaft -die Fliegerei- entdecken und verwirklichen konnte und nun beruflich wie privat leben kann!

Doch der größte Dank geht von Herzen an meine wunderbare Freundin Britta! Du bist überhaupt nur der Grund, weshalb diese Arbeit hier zu lesen ist. Ohne deine unermüdliche Unterstützung, das Verständnis und die Rückendeckung wäre dies nicht möglich gewesen! Ich danke dir, dass du für mich da bist und vor allem wie du bist.

Mit dir als Copilotin fliege ich gerne weiter!

Inhaltsverzeichnis

A	bkür	zungsverzeichnis	xvii
١.	M	tivation und Aufbau der Arbeit	
	1.1	Motivation	1
	1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit	2
2.	St	ukturelles Kleben in der Luftfahrt	5
	2.1	Geschichte der Klebverbindung – Lernen aus Fehlern	5
	2.2	Zulassungsbestimmung an eine strukturelle Klebung	7
	2.3	Konstruktionsphilosophien	10
	2.4	Fail Safe Design vs. Maximum Disbond Design	12
	2.5	Strukturelle Klebverbindungen	12
		2.5.1 Adhäsion und Kohäsion	13
		2.5.2 Oberflächenrauheit und chemische Anbindung	14
		2.5.3 Klebschichtdicke und deren Einfluss	15
		2.5.4 Defekte einer Klebschicht	16
		2.5.5 Geometrien der Klebverbindung	16
		2.5.6 Klebverbindungen vs. Nietverbindungen	17
		2.5.7 Belastungsmoden	
		2.5.8 Versagen einer überlappenden Klebverbindung	19
	2.6	Berechnung einer Klebverbindung	20
	2.7	Spannungsanalyse einer strukturellen Verklebung	24
	2.8	Gestaltungsrichtlinien für Klebverbindungen	30
		2.8.1 Statische Auslegung der Klebverbindung	
		2.8.2 Dynamische Auslegung der Klebverbindung	
	2.9	Eigenschaften von Strukturklebstoffen	32
	2.10	Anforderung an eine moderne Klebverbindung in der zivilen Luftfahrt	
3.	Se	nkung von Spannungskonzentrationen in Klebungen	
	3.1	Modifikation des Fügeteils	35
	3.2	Modifikation des Klebstoffauslaufs	36
	3.3	Klebstoffgradierung	37
	3.4	Klebstoffmodifikation	
	3.5	Klebschicht mit Verbolzung	
	3.6	Die Hybrid Bondline	40
	3.7	Bewertung der Konzepte	41
		3.7.1 Anwendung als industrielle Lösung	42
		3.7.2 Bewertung zur Risstoppfähigkeit der Konzepte	43
	3.8	Anforderungen an ein modernes Rissstoppkonzept	43
4.	Di	e lokale Oberflächenzähmodifikation	45
	4.1	Das Konzept	45
	4.2	Die Forschungshypothesen	50

		4.2.1	Hypothese I: Die Oberflächenzähmodifikation senkt Spannungskonzentr	ationen 50
		422	Hypothese II: Die Oberflächenzähmodifikation steigert die Verbindungs	festigkeit
		1.2.2	The point of the open mental man of the point and the termination of the point of the termination of the point of the poin	
		4.2.3	Hypothese III: Die Oberflächenzähmodifikation stoppt Risse	
	4.3	Mecl	nanische Anforderungen	51
	4.4	Phys	ikalische und chemische Anforderungen	51
	4.5	Die /	Arbeitshypothesen	
	4.6	Zusa	mmenfassung der lokalen Oberflächenzähmodifikation	52
	4.7	Abgi	renzung zur Hybrid Bondline	
5.	M	aterial	auswahl und Charakterisierung	55
	5.1	Das '	Vorgehen, die Probekörper und deren Normen	
	5.2	Füge	teilauswahl	
		5.2.1	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	
		5.2.2	Aluminium	59
		5.2.3	Stahl	59
	5.3	Kleb	stoffauswahl	60
		5.3.1	Filmklebstoff Henkel Hysol EA9695 050NW Aero	60
		5.3.2	Pastöses Klebstoffsystem Henkel Hysol EA9394 Aero	61
	5.4	Zähr	nodifizierendes Material	61
		5.4.1	PVDF	62
		5.4.2	PEEK	64
	5.5	Kapi	telzusammenfassung	64
6.	Н	ochrat	enfähige Fertigung zähmodifizierter Bauteile	67
	6.1	Ober	flächenvorbehandlung	67
		6.1.1	Vorbehandlung von Metallen	68
		6.1.2	Vorbehandlung von Kunststoffen	71
		6.1.3	Vergleich der Verfahren	72
	6.2	Prep	reg Fertigungsverfahren	83
		6.2.1	Interface Faserausrichtung	85
	6.3	Harz	infusionsverfahren (RTM-Verfahren)	86
	6.4	App	likation auf Metallen	86
	6.5	Seco	ndary Bonding	
	6.6	Kapi	telzusammenfassung	
7.	U	ntersu	chungen der lokalen Oberflächenzähmodifikation	
	7.1	Einfl	uss der lokalen Oberflächenzähmodifikation auf das Laminat	
	7.2	Span	nungsreduktion bei DCB - Proben (Mode I)	92
		7.2.1	Modellbildung zur DCB-Probe	
		7.2.2	Versuchsdurchführung der DCB-Proben	
		7.2.3	Ergebnisse, Beobachtungen und Interpretation der DCB-Proben	94
	7.3	Span	nungsreduktion bei ENF - Proben (Mode II)	97
		7.3.1	Modellbildung zur ENF-Probe	98

ildu	ingsv	erzeichnis	199
rati	urver	zeichnis	185
1.2	Ausl	olick	180
1.1	Zusa	nmmenfassung	177
Zus	amm	nenfassung und Ausblick	177
J .4	карі		170
).3] /	Kan	telzusammenfassung	173 176
ע. ער ער	Falls	tudie III. Robuste Verklebung einer Landeklappe	100 172
).I))	Falls	tudie I. CrN/II-VEINEDUIg dit einer TILFC-LE	109
ind ጉ 1	Ealla Ealla	tudia I: CEK/Ti Varklahung an ainar HI EC I E	159
	, .		
3	Ferti	gungsempfehlung	156
2	Desi	gnempfehlung	154
.1	Nacl	nweisführung der Oberflächenzähmodifikation	153
Des	sign u	nd Fertigung der lokalen Oberflächenzähmodifikation	153
.2	Kapi	telzusammenfassung	152
1	Anfo	orderungen an einen luftfahrtfähigen ST-Werkstoff	150
2	Tem	peratureinfluss auf die zähmodifizierte Klebverbindung	146
.1	Feuc	htigkeitseinfluss auf die zähmodifizierte Klebverbindung	145
Ein	fluss '	von Umweltbedingungen auf eine zähmodifizierte Klebverbindung	145
.0	rup		174
.8	Kani	telzusammenfassung	
7	Nun	nerische Simulationsstudie der Spannungsreduktion am Beispiel SI S-Probe	136
1	.0.1	Restfestigkeitsuntersuchung	134
7	7.6.1	versuensaurenrunrung	134
.6 -	Kest	testigkeitsanalyse ULS	133
6	D'	Delastung	130
7	/.5.1	Ergebnisse, Beobachtungen und Interpretation der CLS-Proben - dynamisch	120
7	7.5.1	Versuchsdurchführung.	128
.5	Riss	stoppfähigkeit bei CLS	128
7	7.4.9	Anwendung von ST im Klebstoff	126
7	7.4.8	Verwendung von metallischen Substraten	123
7	7.4.7	Einfluss der Überlappungslänge auf den zähelastischen Effekt	119
7	7.4.6	Einfluss von Eigenspannungen auf den zähelastischen Effekt	117
7	7.4.5	Nachweis des Federmodells für den zähelastischen Effekt	112
,		Vergleich zum Stand der Technik	108
5	7 <u>4</u> .5	Verbindungsfestigkeitssteigerung von lokaler Oberflächenzähmodifikation	105 im
-	7.4.Z	Positioniorung der lokalen Zähmedifikation	105
, -	7.4.1 7.4.2	Modellbildung zur SLS-Probe	102
.4	Nacl	nweis der Festigkeitssteigerung bei SLS	101
7	7.3.3	Ergebnisse, Beobachtungen und Interpretation der ENF-Proben	99
	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	7.3.3 4 Nach 7.4.1 7.4.2 7.4.3 7.4.3 7.4.4 7.4.5 7.4.6 7.4.7 7.4.8 7.4.9 5 Risse 7.5.1 7.5.1 6 Rest: 7.6.1 7.6.1 7 Num 8 Kapi 1 Feuc 2 Tem 1 Anfo 2 Tem 1 Anfo 2 Tem 1 Anfo 2 Tem 1 Anfo 2 Tem 1 Sec 1 Feuc 2 Tem 1 Anfo 2 Tem 1 Anfo 2 Tem 1 Sec 1 Feuc 2 Tem 1 Anfo 2 Tem 1 Sec 1 Feuc 2 Tem 1 Anfo 2 Tem 1 Sec 1 Sec	 7.3.3 Ergebnisse, Beobachtungen und Interpretation der ENF-Proben

Tabellenverzeichnis	
Anhang	I
A. Abbildungen	I
B. Berichte und Protokolle	
C. Experimente	XII
C 1 Anhaftungsversuch PVDF	XII
C 2 Dehnungsverteilung von Referenz und ST_10	XII
C 3 Modifiziertes Federmodell – Nachweis	XIV
C 4 Elastizitätsmodul von ENAW 7075 und 8552/IM7	XVIII
Eigene Publikationen	XIX

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

a	adhäsiv
Abb	Abbildung
AFP	Automated Fiber Placement
AMC	Acceptable Means of Compliance
CLS	Cracked Lap Shear
CNT	Carbon Nano Tubes
CS	Certification Specification
CZM	Cohesive Zone Model
DCB	Double Cantilever Beam
DIC	Digital Image Correlation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DMA	Dynamisch-Mechanische Analyse
DMS	Dehnmessstreifen
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DSF	Disbond Stopping Feature
DT	Damage Tolerance, Schadenstoleranz
EASA	European Union Aviation Safety Agency
ENF	End-Notched Flexure
FA	Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
FEM	Finite Elemente Methode
FOS	Fiberoptical Sensor
FPF	First Ply Failure
FS	Fail Safe, Versagenssicher
Gl	Gleichung
HAP	Hochfliegende Autonome Plattform
HLFC	Hybrid Laminar Flow Control
HTTP	Horizontal Tail Plane

ist	Istwert
k	kohäsiv
LE	Leading Edge
LL	Limit Load, Betriebslast
LSM	Laserscanning Mikroskop
NTSB	National Transportation Safety Board
opt	optimal
RM	Raumtemperatur
RM	Referenzmodel
S	Sicherheit
SL	Safe Life
SLS	Single-Lap Shear
soll	Sollwert
SR	Steifigkeitsreduktion
ST	Surface Toughening
TAST	Thick Adherend Shear Test
UL	Ultimate Load
VCCT	Virtual Crack-Closure Technique
VUV	Vakuumultraviolettstrahlung
WSLS	Wide Single Lap Shear
zul	zulässig

Indizes

AV	Mittelwert
В	Bruch
Br	Bruch
С	Crack
d	Druck
dyn	dynamisch
Ι	Schälrichtung
II	Schubrichtung

III	Scherrichtung
ist	Istwert
К	Klebstoff
К	Klebstoff
L	Laminat
max	maximal
opt	optimal
opt	optimal
soll	Sollwert
stat	statisch
x	x-Richtung
у	y-Richtung
Z	z-Richtung
zul	zulässig
11	in Faserrichtung
22	parallel zur Faserrichtung (in Ebene)
33	senkrecht zur Faserrichtung (normal zur Ebenenrichtung)
II	parallel
T	senkrecht

Formelzeichen Latein

h	[mm]	Höhe
R	[µm]	Oberflächenrauheit
S	[-]	Sicherheitsfaktor
G	[MPa]	Schubmodul
1	[mm]	Länge
b	[mm]	Breite
А	[mm ²]	Fläche
t	[mm]	Dicke
f	[-]	Sicherheitsfaktor

F	[N]	Kraft
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
t,b	[mm]	Fügeteildicke oben, unten
с	[mm]	halbe Überlappungslänge
Κ	[MPa·m ^{0,5}]	Spannungsintensitätsfaktor
G	[J/m ²]	Energiefreisetzung
а	[mm]	Risslänge
Ν	[-]	Lastzyklenzahl
D	$[N \cdot m^{-1}]$	Federsteifigkeit
D'	$[N \cdot m^{-1}]$	Gesamtfedersteifigkeit
1	[mm]	Auslenkung
Re	[MPa]	Streckgrenze
Rm	[MPa]	Zugfestigkeit

Formelzeichen Griechisch

γ	[%]	Gleitung
Δ	[-]	Abweichung
ε	[%]	Dehnung
ν	[-]	Querkontraktion
σ	[MPa]	Spannung
τ	[MPa]	Schubspannung
Υ	[°]	Scherwinkel

I. Motivation und Aufbau der Arbeit

Warum soll ich diese Arbeit lesen?

I.I Motivation

Kleben als Verbindungstechnik spielt heutzutage eine Schlüsselrolle im Leichtbau. Besonders bei der Nutzung des Leichtbaupotentials von Faserverbundwerkstoffen kann diese Technik durch die homogene Lastübertagung, die guten Dichtungseffekte und den großen automatisierbaren Einsatzbereich die Bolzenverbindungen im Wettbewerb abhängen. Wird das strukturelle Kleben von hochbelasteten Verbindungen betrachtet, ergeben sich vom derzeitigen Stand der Technik aus Schwierigkeiten bei der optimalen Auslegung der Klebverbindung und deren Ermüdungsproblematik. Hier wird auf eine über 80 Jahre alte Technologie im Flugzeugbau gesetzt - den Angstniet - und eine fast ebenso alte Konstruktionsphilosophie - das Fail-Safe Design. Zusammen ergibt dies eine kostenintensive, aufwändige und massebezogen schwere Lösung, die keinesfalls klebgerecht und leichtbauspezifisch ist.



Abbildung 1-1: Ziel: Vom genieteten zum geklebten Flugzeug

Bisherige Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) auf dem Gebiet zeigen einen ersten Lösungsweg - die *hybrid bondline* - für die Ermüdungsproblematik auf, welcher eine rissstoppende Fähigkeit im Labormaßstab besitzt. Da Risse unter anderem durch lokale Spannungsüberhöhungen entstehen, müssen diese direkt vermieden werden. Gerade bei einfachen Überlappungsverklebungen, wie beispielsweise bei Verklebungen von Stringern an die Haut oder einzelnen Rumpfsegmenten miteinander, entstehen erhöhte Spannungskonzentrationen an den überlappenden Rändern, an denen ein Versagen im Betrieb beginnen kann.

Von dem Konzept der *hybrid bondline* abgeleitet ist die lokale Oberflächenzähmodifikation (engl. *local Surface Toughening*, kurz ST), die in dieser Arbeit ausgearbeitet wird. Der Lastpfad bei Überlappungsverklebungen wird durch das ST so beeinflusst, dass sich ein deutlich homogenerer Spannungszustand über die gesamte Klebschicht einstellt. Ein Riss entsteht dadurch erst bei deutlich höheren Lasten. Im Umkehrschluss wird somit auch die Verbindungsfestigkeit gesteigert, da es keine versagensinitiierenden Spannungskonzentrationen gibt bzw. diese deutlich reduziert werden. Ein weiterer großer Vorteil der Technologie ist die einfache und kostengünstige Applikation in das Faserverbundmaterial, welche somit wegweisend für eine Hochratenproduktion im Flugzeugbau ist. Zusammen mit dem Fasermaterial wird das ST-Material im Herstellungsprozess des Faserverbundes verklebt und ist somit Bestandteil des eigentlichen Fügeteils. Eine zusätzliche Positionierung oder weitere Arbeitsschritte sind nicht erforderlich. Die Verklebung selbst wird dabei nicht beeinflusst.

I.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist, das Potential und die Grenzen des *local Surface Toughening* zu identifizieren, um reine strukturelle Klebungen in Zukunft in der Luftfahrt zu ermöglichen. Das Konzept ST basiert auf der Oberflächenzähmodifikation von duromeren Faserverbundwerkstoffen mit Hilfe des lokalen Einbringens eines duktilen Thermoplastes. Dieser wird in das Substrat des lasttragenden Fügepartners am Auslauf der Überlappungsklebung eingebracht. Die Klebschicht selbst wird dabei nicht angetastet.

Die Arbeit beantwortet folgende Fragestellung:

Ist es möglich, durch eine lokale, reproduzierbare und hochratenfähige Oberflächenzähmodifikation die Verbindungsfestigkeit und Ermüdungsfestigkeit von geklebten Faserverbundstrukturen zu steigern, ohne dabei das Substrat negativ zu beeinflussen oder die Klebschicht zu verändern?

Kapitel 2: Warum und wie werden Luftfahrtstrukturen geklebt und was sind die gesetzlichen Anforderungen an diese und wo liegen dabei die technischen Schwierigkeiten?

Kapitel 2 gibt Aufschluss über den geschichtlichen und technischen Hintergrund der Klebtechnologie in der Luftfahrt und erörtert die entscheidenden Vor- und Nachteile dieser. Weiter leiten sich daraus die entscheidenden Anforderungen an eine Klebverbindung ab.

Kapitel 3: Welche technischen Lösungen gibt es, um Spannungskonzentrationen in Klebverbindungen zu senken und somit die Verbindungsfestigkeit und Ermüdungsfestigkeit zu steigern? Wie sähe eine ideale Lösung aus?

Kapitel 3 befasst sich mit den zur Verfügung stehenden Lösungskonzepten zur Spannungsreduktion an Überlappungsklebungen aus der Literatur, transformiert diese auf die Problematik dieser Arbeit und bewertet sie anschließend. Schlussfolgernd wird die Anforderung an eine ideale Lösung definiert.

Kapitel 4: Wie sieht diese ideale Lösung aus? Was ist eine lokale Oberflächenzähmodifikation und wie wirkt diese auf eine Klebverbindung?

In Kapitel 4 wird die lokale Oberflächenzähmodifikation als ideale Lösung zur Senkung von Spannungskonzentrationen vorgestellt und ein Modell abgeleitet.

Kapitel 5: Welche Materialien kommen für die lokale Oberflächenzähmodifikation in Frage? Kapitel 5 umfasst die Auswahl an möglichen Materialien und deren Eigenschaften, die in dieser Arbeit auch verwendet werden.

Kapitel 6: Wie wird die lokale Oberflächenzähmodifikation in der Praxis umgesetzt? Wie sieht das Fertigungsverfahren aus? Ist die Fertigung hochratenfähig?

Verschiedene Vorbehandlungs- und Fertigungsverfahren für die lokale Oberflächenzähmodifikation werden in Kapitel 6 ausgearbeitet und bewertet.

Kapitel 7: Kann ein Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation nachgewiesen werden? Wie funktioniert der Effekt? Welche Einflüsse auf die Verbindungsfestigkeit hat die lokale Oberflächenzähmodifikation?

In Kapitel 7 wird durch ein experimentelles Probenprogramm der Nachweis der Spannungsreduktion und die Steigerung der Verbindungsfestigkeit sowie die Möglichkeiten eines Rissstopps erbracht. Abgeleitet aus diesen Versuchen werden verschiedene Effekte untersucht und die Funktion der lokalen Oberflächenzähmodifikation beschrieben.

Kapitel 8: Wie robust ist die Oberflächenzähmodifikation auf Umwelteinflüsse?

Entscheidend für die Anwendung der Technologie ist die Robustheit gegen Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse. Diese werden in Kapitel 8 abgeschätzt.

Kapitel 9: Wie ist die Oberflächenzähmodifikation in der Industrie anzuwenden?

Kapitel 9 gibt eine Empfehlung zur Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation sowie deren Materialauswahl.

Kapitel 10: Kann die lokale Oberflächenzähmodifikation industrielle Probleme lösen?

Kapitel 10 beinhaltet ein Fallbeispiel, bei dem die Oberflächenzähmodifikation die Festigkeit einer Materialhybridverklebung einer Leitwerksvorderkante sicherstellt.

In Abbildung 1-2 ist die Gliederung der Arbeit in graphischer Form dargestellt.



Abbildung 1-2: Grafische Gliederung der Arbeit

2. Strukturelles Kleben in der Luftfahrt

Was muss ich zum Verständnis der Arbeit über Klebverbindungen wissen?

2.1 Geschichte der Klebverbindung – Lernen aus Fehlern

Strukturelles Kleben in der Luftfahrt ist ein modernes Thema, mag man meinen. Dennoch beschrieb der römische Dichter Ovid (vermutlich 43 v. bis 17 n. Chr.) in den Metamorphosen (Buch VIII, Vers 183–235) [1] den wohl ersten und bekanntesten Fall eines strukturellen Klebversagens. Die tragische Geschichte handelt von Ikarus, der erst lange über dem Meer und schlussendlich zu dicht an die Sonne flog, wodurch das Wachs seiner Flügel schmolz und diese somit zerbrachen. [2]

Ein unerfahrener Klebtechnologe würde an dieser Stelle vorschnell sagen: "Hot-wet Problematik, klassisches Festigkeitsproblem."

Doch bei genauerer Betrachtung des geschilderten Falles ist weder die Feuchtigkeit schuld, welche zwar über längere Einwirkung die Grenzfläche zwischen Klebstoff und Baumaterial angreift, noch die Hitze selbst, welche die Steifigkeit unseres teilkristallinen Materials [3] deutlich herabsetzt. Denn Ikarus war nach Erzählung ein gewöhnlicher Mensch und somit nur in der Lage, in max. 3,6 bis 4 km Flughöhe fliegen zu können, da er sonst schlichtweg erstickt wäre. In dieser Höhe herrschen nach ISA Normatmosphäre [4] Temperaturen von -8,8 bis -11 °C. Vielmehr ist dieser Temperaturbereich deutlich unter dem Einsatzbereich des Wachses, wodurch dieses materialbedingt stark versprödet und es ist vielmehr zu einem Ermüdungsversagen durch unkontrollierten Risswachstum gekommen ist, wie in Fachkreisen diskutiert wird.

Diese sehr alte und natürlich spaßig interpretierte Geschichte verdeutlicht in wenigen Worten die Schwierigkeit für strukturelle Verklebungen in der heutigen Luftfahrt. Doch die hier geschilderte Ermüdungsproblematik ist kein reines Problem der Antike und entstammt natürlich auch nicht der Saga Ovids. Ein moderneres Beispiel aus der zivilen Luftfahrt für das Versagen der Klebtechnologie ist der Vorfall des Aloha Airlines Flug 243.

Während des Kurzstreckenfluges von Hilo nach Honolulu am 28. April 1988 brach ein Teil des oberen Rumpfsegmentes einer verhältnismäßig alten Boeing 737-200 mit 35.000 Flugstunden und fast 90.000 Starts heraus. Die Maschine konnte nach dem Vorfall sicher auf Kahului notlanden.
[5] Die amerikanische Verkehrsbehörde zur Untersuchung von Flugunfällen National Transportation Safety Board (NTSB) kam zu folgendem Ergebnis:

Ein entstandener Riss entlang einer Nietreihe in der Außenhaut führte zu dem Verlust des oberen Rumpftonnensegmentes. Der Ursprung lag aber nicht im metallischen Materialversagen.



Abbildung 2-1: Links: Stark beschädigte Aloha Boeing 737 nach der Landung in Kahului 1988, Rechts: Detailaufnahme der abgerissenen Haut [6]

Die einzelnen Rumpftonnensegmente waren in Längsrichtung einfach überlappend verklebt und zur Sicherheit mit drei Nietreihen ausgestattet. Baureihenspezifisch sollten die Kabinendrucklasten der Flugzeugzelle, hauptsächlich über die Klebschicht übertragen werden und nicht über die Niete. Zur Fertigung dieser Klebverbindungen wurden vorimpregnierte raumtemperaturaushärtende Filmklebstoffe genutzt, welche zur Aufbewahrung tiefgefroren wurden. Bei der unsachgemäßen Fertigung kondensierte Wasser an dem noch gefrorenen Klebstoff aus und somit haftete dieser nicht richtig bzw. gar nicht nach der Aushärtung an den Aluminiumsegmenten. Durch den dadurch entstehenden Spalt konnte weiter Feuchtigkeit im Betrieb eindringen und führte zur Korrosion des Metalls und weiterer Ablösung des Klebstoffes. Die Lastübertragung erfolgte dadurch ungeplant über große Bereiche der Nietreihen. Die Überbelastung, die durch Spannungskonzentrationen an den Nietbohrungen entstand, führte zu einem stetigen Mikrorisswachstum der Flugzeughaut bis hin zum Versagen der Struktur.



Abbildung 2-2: Links: Einreihige kaltverklebte Verbindungsstelle, Versagen durch schlechte Klebstoffanhaftung und anschließender Mikrorisswachstum, daneben: Verbesserung der Verbindung durch heißaushärtenden Klebstoff und Versteifung der Verbindung, wodurch die Last homogener auf die Nietreihen übertragen wird. Rechts: Mikrorisswachstum bis zum Versagen der Haut

Abhilfe wurde geschaffen, indem der Fertigungsprozess durch einen heißaushärtenden Klebstoff verbessert und das Design der Trennstelle überarbeitet wurde, sodass im Versagensfall der Klebverbindung die Niete die komplette Last ebenfalls übertragen können. [7] [8]

Dennoch zeigt diese weitere Geschichte, wie kompliziert die Klebtechnologie ist und dass eine zusätzliche Verbolzung der Verklebung, ein sogenanntes *Fail-Safe* Konzept, nicht immer schützen kann. An dieser Stelle hätten Strukturtests zeigen können, dass die Bolzenreihen der ersten Konfiguration dem Lastpfad beim Versagen der Klebverbindung nicht standhalten können.

Es gab zwischenzeitlich viele Inspektionen, welche das Risswachstum im Klebstoff identifizieren sollten. Es wurden fälschlich jedoch keine gefunden. Hier hätten Sensoren in der Klebschicht ein Ablösen aufzeigen können.

Abhilfe hätte also ein konstruktives Rissstoppkonzept für die Klebverbindung geschafft, welches einen Schaden detektiert und den Riss sicher gestoppt hätte. An dieser Stelle hätte lokal inspiziert werden könnte.

So eine Technik war zu der damaligen Zeit nicht bekannt.

2.2 Zulassungsbestimmung an eine strukturelle Klebung

Ausdrücklich soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass sich der Inhalt dieser Arbeit auf strukturelle Verklebungen in der Luftfahrt bezieht, welche an Flugzeugen der Zulassungsspezifikation "Large Aeroplanes", also von Verkehrsflugzeugen nach der Spezifikation CS-25 der *European Union Aviation Safety Agency*, kurz EASA, durchgeführt werden.



Abbildung 2-3: Aufteilung der Bauvorschriften in CS 23 [9] und CS 25 [10]

Übergeordnet steht im *Subpart D – Design and Construction* die CS 25.601 [10], welche gefährliche oder unzuverlässige Konstruktionsmerkmale am Flugzeug ausschließt. Die Eignung muss durch **Tests sichergestellt** werden. Eine neuartige Technik muss daher ausgiebig experimentell untersucht werden, bevor diese angewendet werden darf.

The aeroplane may not have design features or details that experience has shown to be hazardous or unreliable. The suitability of each questionable design detail and part must be established by tests.

Unter AMC 25.571 (a), (b) and (e) Damage Tolerance and Fatigue Evaluation of Structure fordert die Zulassungsrichtline unter 1.1.2 eine **schadenstolerante Konstruktion**. Sollte es nicht möglich sein, an der Struktur die auftretenden Schäden zu ermitteln, muss die Konstruktion – Safelife – also lebenslang Schadensfrei bleiben und dementsprechend sicher konstruiert werden. Dies trifft auf Fahrwerke, Triebwerke und deren Anbauteile zu.

1.1.2 Damage-tolerance design is required, unless it entails such complications that an effective damagetolerant structure cannot be achieved within the limitations of geometry, inspectability, or good design practice. Under these circumstances, a design that complies with the fatigue evaluation (safelife) requirements is used. Typical examples of structure that might not be conducive to damagetolerance design are landing gear, engine mounts, and their attachments.

Weiter wird unter 2.1.1 der AMC 25.571 vorgegeben, dass solche schadenstolerante Konstruktionsmöglichkeiten z.B. **mehrfache Lastpfade oder Rissstoppelemente** sein können. Risse müssen dabei kontrollierbar verlangsamt werden. Bei Strukturen, die nur einen Lastpfad aufweisen, muss experimentell nachgewiesen werden, dass Risse sicher gestoppt und inspiziert werden können. Dies muss geschehen, bevor die Festigkeit unter ein kritisches Level fällt.

2.1.1 Design features which should be considered in attaining a damage-tolerant structure include the following:

a. Multiple load path construction and the use of crack stoppers to control the rate of crack growth, and to provide adequate residual static strength;

b. Materials and stress levels that, after initiation of cracks, provide a controlled slow rate of crack propagation combined with high residual strength. For single load path discrete items, such as control surface hinges, wing spar joints or stabiliser pivot fittings the failure of which could be catastrophic, it should be clearly demonstrated that cracks starting from material flaws, manufacturing errors or accidental damage (including corrosion) have been properly accounted for in the crack propagation estimate and inspection method;

Wird an dieser Stelle nun Bezug zur reinen Klebverbindung genommen, so steht in der AMC 20-29 [11] näheres zur Nachweispflicht fertigungstechnischer Imperfektionen, wie sie beispielsweise in Kapitel 2.1 zum Aloha-Unglück führte.

Genauer ist die AMC 20-29 eine Anweisung für die baulichen Notwendigkeiten zur Lufttüchtigkeitszertifizierung von Faserverbund Strukturen. Dort wird unter Punkt 6. C. Structural Bonding (3)(a) die Anforderung an die Verklebung definiert.

Unter (i) wird vorgeschrieben, dass eine Klebverbindung bei lokalem Versagen immer noch die notwendigen Belastungen ertragen muss (vgl. *Fail Safe* Konzept), dies muss durch Analysen und Tests abgesichert sein. Darüber hinaus gehende Ablösungen in der Klebschicht müssen durch Designelemente verhindert werden. Das sind heutzutage sogenannte "Chickenrivets" bzw. auf Deutsch "Angstniete", da es rein klebtechnisch noch keine geeigneten Möglichkeiten zur Umsetzung dieser Rissstoppelemente gibt. Diese Niete sind aufwendig und teuer bei der Fertigung und führen zu einer ungewollten Steigerung des Strukturgewichtes und wirken somit gegen die Vorteile der Klebverbindung.

Unter Punkt (ii) wird als Alternative zu (i) eine Nachweisprüfung für jede kritische Klebverbindung vorgeschrieben. Dieser Aufwand ist jedoch so groß und teuer, dass dieser Punkt schlichtweg für den Hersteller nicht umsetzbar ist.

Final gibt Punkt (iii) die Möglichkeit, auf Designelemente zum Rissstopp (i) und das Testen jeder Klebverbindung (ii) zu verzichten, sofern ein zerstörungsfreies Prüfverfahren angewendet wird und damit die Festigkeit jeder Klebverbindung sicherstellt. Von der Theorie her ist dieser Weg der charmanteste, kann aber nicht umgesetzt werden, da es zurzeit kein sicheres Verfahren dafür gibt.

"For any bonded joint, the failure of which would result in catastrophic loss of the aeroplane, the limit load capacity must be substantiated by one of the following methods:

(*i*) The maximum disbonds of each bonded joint consistent with the capability to withstand the loads in paragraph (*a*)(3) of this section must be determined by analysis, tests, or both. Disbonds of each bonded joint greater than this must be prevented by design features; or

(*ii*) Proof testing must be conducted on each production article that will apply the critical limit design load to each critical bonded joint; or

(iii) Repeatable and reliable non-destructive inspection techniques must be established that ensure the strength of each joint."

Das Problem an dieser Stelle ist schnell benannt; zwei Möglichkeiten sind nicht umsetzbar und die Dritte, also die nachträgliche Vernietung, ist aus Ingenieurssicht ein schlechter Kompromiss zum Erreichen der Zulassungsanforderung, der seit etwa 1950 so aber umgesetzt wird. Grafisch sind die Möglichkeiten in Abbildung 2-4 dargestellt.

An dieser Stelle wird also eine Technologie als Lösung gesucht, die in der Fertigung robust ist, die in reinen Klebverbindungen Risse stoppt und optional Auskunft über den Zustand der Klebschicht geben kann.

Ein Lösungsansatz dazu wird in dieser Arbeit vorgestellt. Dennoch muss sich auch die Design-Philosophie einer Klebverbindung weg vom konservativen *Fail-Safe* Konzept bewegen, um neuartige Lösungen zu ermöglichen.



Abbildung 2-4: Verschiedene Möglichkeiten zum Nachweis der Festigkeit einer hergestellten Klebverbindung für die Zulassung an Flugzeugen nach CS 25

2.3 Konstruktionsphilosophien

Wie einleitend genannt, gibt es verschiedene Konstruktionsphilosophien in der Luftfahrt. Diese werden im Folgenden genauer beschrieben:

Safe Life (SL)

Die *Safe Life* Methode sieht vor, dass ein Bauteil bzw. ein System Lebensdauerbegrenzt ist und in dieser Zeit keiner Ermüdung unterliegt. Nach Ablauf dieser Zeit wird die Komponente getauscht, egal welchen Zustand diese besitzt. Hierzu zählen Fahrwerke und Triebwerke am Flugzeug.

Fail Safe (FS)

Fail Safe beschreibt eine ausfallssichere Methode, bei der davon ausgegangen wird, dass ein Bauteil bzw. ein System durch ständig wechselnde Lasten im Laufe der Zeit ausfällt und daher eine ausfallssichere Konstruktion umgesetzt werden muss. Im Bereich der strukturellen Verbindung sind dies die schon bekannten Angstniete bei der Verklebung.

Damage Tolerance (DT)

Die zu Deutsch Schadenstoleranz-Methode geht ebenfalls von einer Beschädigung eines Bauteils bzw. eines Systems aus, welche im Laufe der Zeit immer weiterwächst. Um den Ausfall zu verhindern, muss das Intervall der Inspektion so angepasst werden, dass es niemals zu einem kritischen Wachstum des Schadens kommt. Dies erfordert eine genaue Kenntnis des Risswachstums im Material.

Grafisch ist der Vergleich dieser drei Konstruktionsphilosophien bezogen auf einen Riss an einer Klebverbindung in Abbildung 2-5 dargestellt. Dabei stellt *Limit Load* (LL) die Belastung ohne bleibende Beschädigung dar. *Ultimate Load* (UL) hingegen ist die Last, bei der die Struktur drei

Sekunden ohne Versagen aushält und in CS 25.305 geregelt ist. Nach CS 25.303 ist dies *Limit Load* mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 multipliziert [10].

Wird der Graph ohne Risswachstum betrachtet, handelt es sich also um eine *Safe Life* Auslegung. Ein möglicher Schaden darf nur so klein sein, dass die Verbindung noch alle Betriebslasten (LL) sicher aushält. Die Konstruktion mit Rissstoppern in der Klebung (bspw. Abbildung 2-6 links) erlaubt den stückweisen Risswachstum. Die Festigkeit wird sicher durch den zweiten Lastpfad (Angstniete) immer über der sicheren Betriebslast gehalten. Der Riss stoppt, da die Klebschicht keine Belastung mehr erfährt. Zuletzt wird nach der *Damage Tolerance* Auslegung ein Riss solange in der Klebschicht toleriert, bis dieser eine kritische Größe erreicht und eine Reparatur notwendig ist. Da es zulassungstechnisch kein lokales (teilweises) Versagen der Klebschicht gibt, sondern immer nur ein globales (komplettes) und Risse in Klebschichten nicht toleriert werden [12], ist der Stand der Technik heute die zusätzlich vernietete Klebverbindung.





Werden die drei Konzepte verglichen, stellt sich heraus, dass die *Safe Life* und *Fail Safe* Konzepte recht konservativ sind und mit hohen Strukturmassen einhergehen, da sie überdimensioniert sein müssen. Hingegen setzt die *Damage Tolerance* Variante ein komplexes Wissen über den Risswachstum im Material und die Belastung im Betrieb voraus. Dieses Wissen ist sehr teuer und zeitaufwändig in der Beschaffung durch Experimente und risikoreich, falls unerwartet im Betrieb ein anderes Verhalten Auftritt als im Versuch idealisiert angenommen wird.
2.4 Fail Safe Design vs. Maximum Disbond Design

Um das volle Potential von Klebverbindungen und vor allem Klebverbindungen in Verbindung mit Faserverbundfügepartnern in Zukunft nutzen zu können, muss die konstruktive Lösung des *Fail Safe* Designs überarbeitet werden. Das *Fail Safe* Design geht bei strukturellen Verklebungen immer von einem zweiten Lastpfad aus, der bspw. durch lokale Fehlstellen und Imperfektionen im Klebstoff (vgl. Kapitel 2.5.4) die komplette Belastung erfährt. Aus Auslegungssicht ist die Verbindung somit sehr konservativ und dadurch zu schwer und zu teuer. Abhilfe schafft hier die Überlegung eines Designs, welches Ablösungen bzw. Risse definiert stoppt. Der Lastpfad würde nach einer Beschädigung weiter durch die Klebverbindung laufen, jedoch die beschädigten abgelösten Bereiche umgehen. Solch ein Lösung ist das *Maximum Disbond Design*.



Abbildung 2-6: Unterschied zwischen Fail Safe und Maximum Disbond Design. Links: Bei geschädigtem Fail Safe Design muss zweiter Lastpfad die Last übernehmen. Rechts: Bei Maximum Disbond Design stoppen Rissstopper den Riss definiert in der Klebschicht und die ungeschädigte Klebverbindung überträgt weiter die Lasten

In Abbildung 2-6 fällt schnell auf, dass durch die konstruktive Anwendung des Maximum Disbond Designs, also eine maximale Ablösung im Klebstoff, deutlich weniger Rissstoppelemente benötigt werden, also zuvor Niete. Das Design ist Faserverbundgerecht, da es keine Fasern durchtrennt und würde bei Verwendung eine bolzenfreie strukturelle Klebschicht ermöglichen und auch Punkt (i) aus der AMC 20-29 erfüllen, da Risse durch eine konstruktive Lösung sicher aufgehalten werden. Die Klebverbindung muss demnach nur mit genügend Reserve ausgelegt sein um eine gewisse Anzahl an Ablösungen zuzulassen, die in der nächsten Inspektion dann entdeckt und behoben werden können.

2.5 Strukturelle Klebverbindungen

Im Weiteren wird auf die einfach überlappende Klebverbindung eingegangen, welche in Abbildung 2-7 dargestellt ist und symbolisch für die meisten Verklebungen in der Luftfahrt genutzt wird. Durch die stoffschlüssige, flächige Kraftübertragung ist sie hervorragend für die im Flugzeugbau verwendeten dünnwandigen Profile geeignet und entfaltet so ihr Leichtbaupotential als Verbindungstechnik. [14] Als einfachste Designvariable wird hierbei die Überlappungsfläche mit maßgeblicher Überlappungslänge zur konstruktiven Auslegung der Verbindung herangezogen. Da Klebstoffe deutlich geringere Festigkeiten im Vergleich zu den Fügepartnern besitzen, sind Überlappungslängen vergleichsweise sehr groß im Verhältnis zur Fügeteilmaterialstärke.



Abbildung 2-7: Bezeichnungen an einer Klebverbindung

2.5.1 Adhäsion und Kohäsion

Ein Klebstoff ist ein nach DIN EN 923 [15] beschriebener "*nichtmetallischer Stoff, der Fügeteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann"* [16]. Abbildung 2-8 zeigt ein Schaubild einer Klebverbindung mit Adhäsions- und Kohäsionskräften.



Abbildung 2-8: Adhäsions- und Kohäsionskräfte in einer Klebschicht nach [16, 17]

Die **Kohäsion** ist dabei die innere Festigkeit des Klebstoffes und verhindert dessen auseinanderreißen. Je höher die Kohäsionskraft eines Stoffes ist, desto fester ist dieser. Beeinflusst wird dieser materialspezifische Wert beim Klebstoff durch den Auftrag, die Aushärtetemperatur und dessen Aushärtezeit. [17]

Die **Adhäsion** hingegen ist für die Anhaftung des Klebstoffes an den Fügepartner verantwortlich. Dies geschieht durch atomare und zwischenmolekulare Wechselwirkungen in der Grenzschicht. Damit sich die Grenzschicht bilden kann, muss der Klebstoff die Oberfläche des Fügteils benetzen. Dafür muss der Abstand zwischen Klebstoff und Oberfläche des Fügeteils weniger als einen Nanometer betragen. Beeinflusst wird das Benetzungsverhalten von der Oberflächenspannung des Fügeteils und der Viskosität des Klebstoffes. [16–18] Mehr dazu in Kapitel 6.1.

2.5.2 Oberflächenrauheit und chemische Anbindung

Damit eine Adhäsion überhaupt stattfinden kann, muss neben einer mechanischen Verankerung in der Oberfläche, welche nur einen minimalen Anteil an der eigentlichen Adhäsion besitzt, die chemische Anbindung der einzelnen Atome zwischen Klebstoff und Substrat ermöglicht werden. Um den Atomen dabei eine möglichst große Fläche zur Verfügung zu stellen, wird die rein geometrisch zur Verfügung stehende Oberfläche aufgeraut. So vergrößert sich die wahre Oberfläche um Faktor 1,2 bis 1,6 [14]. Um den Klebstoff in die aufgeraute Oberfläche leichter fließen zu lassen, wird beim Verkleben ein Anpressdruck hinzugenommen, durch welchen der Klebstoff eine wirksame Oberfläche benetzt. Dieser Druck gleicht weiter auch den chemisch bedingten Schwund des Klebstoffes beim Aushärten aus. Die optimalen Rauheitswerte sind Abbildung 2-9 zu entnehmen.



Abbildung 2-9: Verlauf der Klebfestigkeit über die Oberflächenrauheit für eine strukturelle Klebschichtdicke um 0,05 mm nach [14, 16]

Wird die Rauheit zu groß, so berühren sich Rauheitsspitzen und senken die Klebfestigkeit deutlich.

Ob eine chemische Anbindung wiederum möglich ist, kann durch einen Benetzungstest sichergestellt werden. Dabei werden definierte Flüssigkeiten, sogenannte Prüftinten, auf die Oberfläche aufgetragen und deren Zerlaufen beobachtet. Bildet sich kein Tropfen, sondern ein flacher Film, so ist die Oberfläche gut vorbehandelt. Verantwortlich für das Verhalten ist dabei die Oberflächenenergie. Quantifiziert werden kann die Oberflächenenergie dabei mittels Kontaktwinkelmessung.



Abbildung 2-10: Benetzung der Oberfläche nach [16]

Dabei wird der Winkel eines Tropfens einer definierten Flüssigkeit zum Substrat hin optisch vermessen und ausgewertet. Gleichzeitig kann hierdurch eine direkte Bewertung der Oberfläche in der Praxis durchgeführt werden. Da die Oberflächenspannung von bspw. Wasser größer ist, als die von üblichen Klebstoffsystemen im flüssigen Zustand, kann ein Benetzungstest mit Wasser recht schnell Auskunft über den Zustand der Oberfläche und der benötigten Vorbehandlungsmaßnahmen geben. Verläuft das Wasser und bildet keine Tropfen, so wird der Klebstoff haften. Dieser Test wird auch *Water Break Test* genannt.

2.5.3 Klebschichtdicke und deren Einfluss

Die Klebschichtdicke spielt bei der Festigkeitsbetrachtung einer Verklebung eine entscheidende Rolle, wie dies Abbildung 2-11 zeigt.



Abbildung 2-11: Verlauf der Klebfestigkeit über die Klebschichtdicke nach [14]

Je dicker eine Klebschicht ist, desto geringer fallen die Schubspannungskonzentrationen am Auslauf einer Verklebung aus. Grund dafür ist eine erhöhte Schubnachgiebigkeit, die dementsprechend größere Schubverformungen zulässt. Dies ist jedoch kein Garant für eine Festigkeitssteigerung. Durch die steigende Klebschichtdicke steigt vielmehr die Wahrscheinlichkeit für Defekte in der Klebschicht, die diese degradieren. Dazu zählen Lufteinschlüsse, Mikrorisse oder eine inhomogene Aushärtung. Zusätzlich entstehen noch thermische Eigenspannungen beim Abkühlen des Aushärtevorgangs im Autoklaven [14]. Viel mehr wirkt sich gerade eine dünne Klebschicht als festigkeitssteigernd aus, indem die dünne Klebefuge die Querkontraktion behindert und ein geringeres Risiko für Defekte aufweist. Die optimale Dicke liegt nach Schürmann zwischen 0,05 mm und 0,2 mm. Zu beachten ist dabei, dass die gewählte Klebschichtdicke möglichst konstant sein muss [14].

2.5.4 Defekte einer Klebschicht

Bevor es zum Versagen einer Klebverbindung kommt, treten sehr lokal schon Defekte in der Klebschicht bzw. deren Grenzschicht zum Fügepartner auf. Diese können teils durch Fehler in der Fertigung auftreten wie z.B. eine schlechte Aushärtung, Fehlstellen, Lufteinschlüsse oder eine schlechte Anhaftung durch mangelnde Oberflächenvorbereitung sein. Weiter können Defekte im Betrieb durch äußere Einschläge, dynamische Lasten oder Feuchtigkeit auftreten, die Mikrorisse im Klebstoff bzw. Ablösungen zum Fügepartner erzeugen [19, 20]. Eine grafische Darstellung ist in Abbildung 2-12 zu sehen.



Abbildung 2-12: Defekte in einer Klebschicht durch Fertigung, Alterung oder Überbeanspruchung nach [21]

2.5.5 Geometrien der Klebverbindung

Klebverbindungen können verschiedene Geometrien aufweisen, wie Abbildung 2-13 zeigt. Dennoch basieren alle Arten auf dem Prinzip einer Überlappung. So ist die klassische Klebverbindung eine einschnittige Überlappungsklebung. Soll der Kraftfluss seine Lastebene nicht verlassen, werden zweischnittige Überlappungsklebungen verwendet, um den Kraftfluss symmetrisch zu halten.



einschnittige Überlappung zweischnittige Überlappung gestufte Überlappung Schäftung

Abbildung 2-13: Verschiedene Klebverbindungen

In Abbildung 2-14 sind die unmittelbaren Auswirkungen dieses asymmetrischen Kraftangriffspunktes für die in Abbildung 2-13 gezeigten Klebverbindungen dargestellt. Eine ungewollte Sekundärbiegung der Probe wird erzeugt, welche negative Einflüsse auf die Verbindungsfestigkeit aufweist. Da die zweischnittige Überlappung jedoch aufwändiger in der Fertigung ist und vergleichsweise deutlich mehr Strukturmasse mitbringt, gibt es die Möglichkeit über mehrere gestufte Überlappungen den Kraftfluss Richtung Mittelebene zu führen. Dieser Lösungsansatz besitzt jedoch einen noch deutlich erhöhten Fertigungsaufwand und der Lastangriff findet immer noch nicht symmetrisch statt. Abhilfe schafft die Verkleinerung der Stufen hin zu einer Schäftung. Eine Schäftung besitzt fertigungstechnisch die höchsten Anforderungen, bringt aber einen erheblichen Vorteil in der aerodynamischen Güte an die Oberfläche mit sich. Weiter besitzt diese Verbindung eine vergleichsweise geringe Masse. Häufig werden daher Schäftungen als Reparaturverfahren von Faserkunststoffverbunden in der Luftfahrt eingesetzt. Die Auswahl der Geometrie hängt dabei von der notwendigen Performance der Überlappung ab.



Einschnittige Überlappung zweischnittige Überlappung gestufte Überlappung Schäftung

Abbildung 2-14: Klebverbindungen und ihre Verformung unter Last

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird immer die einschnittige Überlappungsklebung betrachtet.

2.5.6 Klebverbindungen vs. Nietverbindungen

Wichtig für das Thema der lokalen Oberflächenzähmodifikation ist das Verständnis über den Unterschied von Bolzen- zu Klebverbindungen. Die Vor- und Nachteile kombiniert aus Schürmann [14] und Baker [22] sind dazu einzeln betrachtet in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Vorteile	Nachteile		
Nietverbindungen			
Demontierbar	Hohe Spannungskonzentrationen		
Keine Dickenlimitierung	Rissbildung		
Einfache Nietkonfiguration	Nietfeld schädigt FKV		
Einfacher Herstellungsprozess	Anfällig für Korrosion		
Einfache Qualitätssicherung	Toleranzeinhaltung der Bohrungen		
Nicht umweltbeeinflusst	Massenzuwachs		
Klebverbindungen			
Vaum Channungsonitzon	Dickenlimitierung bei der		
Kaum Spannungssphzen	Verbindung		
Steife Verbindung	Schwierige Qualitätssicherung		
Gute Ermüdungseigenschaften	Aufwändige und teure Fertigung		
Schutz gegen Korrosion	Umweltbeeinflusst		
Geringes Gewicht	Nicht demontierbar		
Gute Schadenstoleranz			

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile von Bolzen- und Klebverbindungen, in Fett sind die Vor- undNachteile einer Kombination von beiden Verbindungen dargestellt, wie sie derzeit eingesetzt
wird. Mehr Nachteile als Vorteile.

Nietverbindungen haben deutliche Stärken in der Fertigung, büßen diese jedoch bei der Festigkeit und Beständigkeit durch z.B. Korrosion und Rissbildung wieder ein. Nach Niu [23] kann die beste gebolzte Verbindung nicht einmal die Hälfte der eigentlichen Laminatfestigkeit erreichen. Klebverbindungen hingegen erzeugen einen höheren Aufwand durch die Qualitätssicherung und den Aufwand in der Fertigung, besitzen aber hervorragende mechanische und vor allem Ermüdungseigenschaften. Dies ist ein hauptsächlicher Grund für das Streben nach der Verwendung von Klebverbindungen, besonders bei Faserverbundanwendungen.

Weiter darf nicht vergessen werden, dass heutige strukturelle Verbindungen eine Kombination dem *Fail-Safe* Sicherheitsaspekt geschuldet - aus Kleb- und Bolzenverbindung sind, wie in Kapitel 2.1 einführend beschrieben wurde.

Somit resultieren die Eigenschaften einer Klebverbindung mit den zusätzlichen Nachteilen der Bolzenverbindungen. Ein Kompromiss, bei dem die Nachteile dominieren.

2.5.7 Belastungsmoden

Eine aus der Bruchmechanik stammende Kategorisierung von mechanischen Belastungen ist die Einteilung dieser in die sogenannten Lastmoden. Hierbei wird die Belastungsrichtung eines Werkstoffs in Bezug auf seine Rissmittelebene beschrieben. Verdeutlicht in Abbildung 2-15 bezeichnet Mode I (Öffnungsmodus, engl. Opening Mode) dabei die Belastung in beidseitige Richtung normal zur Ebene. Diese Lastrichtung würde einen Riss namensgleich öffnen. An der Rissspitze entsteht eine Schälbelastung. Der Mode II (in-Ebenen-Schubmodus oder engl. *in-plane shear Mode*) beschreibt eine asymmetrische Belastung in Ebenenrichtung. An der Rissspitze entsteht eine Schubbelastung. Der letzte Modus ist der Mode III (aus-Ebenen-heraus 19

Schubmodus bzw. engl. *out-of-plane shear Mode*), der eine Querbelastung zur Ebene beschreibt. Vergleichbar ist dieser Modus mit dem Zerreißen eines Blatt Papieres.



Abbildung 2-15: Belastungsmoden und ihre Bezeichnung, Mode 1 als Öffnungsmodus, Mode II als in-Ebenen-Schubmodus und Mode III beschreibt das Zerreißen aus der Ebene

2.5.8 Versagen einer überlappenden Klebverbindung

Abbildung 2-15 suggeriert einen idealen Riss in der Mittelebene der Klebschicht. Dieses Verhalten tritt bei Faserverbundwerkstoffen als Fügepartner in der Realität nur sehr selten auf. Vielmehr treten häufig Kombinationen von einzelnen Bruchbildern auf, die es zu interpretieren gilt. Diese sind schematisch in Abbildung 2-16 dargestellt.



Abbildung 2-16: Beispiele der Versagensarten von Klebschicht und Fügepartner nach [16] und DIN EN ISO 10365 [24]

Diese besitzen nach Habenicht [16] folgende Ursachen:

Der Adhäsionsbruch beschreibt den Bruch unmittelbar an der Fügefläche zwischen Fügepartner und Klebstoff. Hierbei lassen sich stets geringe Reste am Fügepartner nachweisen. Häufig entsteht das adhäsive Versagen an einer anderen Stelle, als es erscheint, dabei verläuft der Adhäsionsbruch meist im Grenzschichtbereich der eigentlichen Adhäsion. [18] Beim Kohäsionsbruch entsteht das Versagen in der Klebschicht. Hierbei spielt der entsprechende Spannungszustand eine große Rolle. So tritt bei einfach überlappenden Klebverbindungen durch die Schälbelastungen an den Klebschichträndern je nach Klebschichtdicke ein randnaher Kohäsionsbruch auf. Ist die Klebverbindung überdimensioniert, tritt zuletzt der **Fügeteilbruch** auf.

Da in dieser Arbeit Faserverbundwerkstoffe als Fügepartner verwendet werden, müssen auch dessen Besonderheiten der **Delamination** berücksichtigt werden. Diese ist abhängig von der intralaminaren Festigkeit im Laminat. Je nach Laminataufbau ist dies häufig das **Versagen der ersten Lage** und bekannter als *First-ply-failure* (FPF). Weiter gibt es noch verschiedene Arten von Mischbrüchen mit adhäsivem Anteil. Diese werden nicht behandelt, da ein adhäsiver Bruchanteil immer auf eine schlechte Vorbehandlung hinweist und somit weiter keine Aussage über die eigentliche Klebverbindung getroffen werden kann.

2.6 Berechnung einer Klebverbindung

Vereinfachend wird nur die statische Festigkeitsberechnung betrachtet. An dieser Stelle wird die statische sowie dynamische Langzeitbeanspruchung, die schlagartige Beanspruchung und die hochdynamische Crash-Beanspruchung nicht berücksichtigt.

Bei einschnittigen Überlappungsverklebungen ist die Zugscherbelastung die am häufigsten auftretende Beanspruchungsart und wird daher für die Auslegung der Verbindung herangezogen. Zu berücksichtigt sind dabei auch Sicherheits- und Abminderungsfaktoren, die zuvor durch Materialtests ermittelt werden müssen.



Abbildung 2-17: Vereinfachte Darstellung der Schubspannungsverteilung an einer einschnittigen Überlappungsklebung nach [16]

Durch die Berechnung der Klebschicht kann eine valide Voraussage der Klebverbindung getroffen werden. Dies kann zum einen über analytische Rechnungen und zum anderen über numerische Simulationen erfolgen. Somit kann der folgende kostenintensive empirische Versuchsaufwand gering und erfolgreich gehalten werden. Die Qualität der Ergebnisse hängt dabei stark von den getroffenen Annahmen und der Qualität der Materialwerte ab und ist daher Fokus derzeitiger Forschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Projekten wie BOPACS (*Boltless assembling Of Primary Aerospace Composite Structures (2012-2016)*) [25, 26], FACTOR (*Future Advanced Composite Bonding and Bonded Repair (2016-2020)*) [27] und derzeit JoinDT (*Joining with predictable Damage Tolerance (2020-2023)*) [28].

Ziel der Auslegung ist die richtige Dimensionierung, um ein Versagen der Verbindung zu verhindern und eine Überdimensionierung zu Lasten von Gewicht und Kosten zu vermeiden. Die Auslegung erfolgt dabei immer auf Basis der zulässigen Zugscherbelastung, welche immer größer als die anliegende Belastung sein muss:

$$\frac{F_{ist}}{A_K} = \tau_{ist} < \tau_{zul} \tag{2-1}$$

Dabei ist F_{ist} die Fügeteilbelastung und A_K die aus Abbildung 2-7 bekannte überlappende Klebfläche.

Die einfachste und ungenauste Auslegungsmethode besteht in der **empirischen Rechnung** und der einfachen Mittelung der Belastung auf die gesamte Überlappungsfläche, auf die nachträglich ein Sicherheitsfaktor aufgeschlagen wird. Es gilt dann Gleichung (2-1). Im Bruchversuch wird nach DIN EN 1465 [29] und der DIN EN ISO 11339 [30] analog die maximale Bruchlast auf die Klebfläche bezogen und somit wird die mittlere Zugscherfestigkeit angegeben, die dann der zulässigen Scherspannung aus Gleichung (2-1) entspricht.

Da der Schubspannungsverlauf in Klebverbindungen aber nicht homogen ist, wie Abbildung 2-17 zeigt, müssen für genauere Abschätzungen gerade auch bei dynamischen Belastungen der komplette Verlauf berücksichtigt werden. Die Klebschicht versagt immer an den Spannungskonzentrationen.

Entwickler	Jahr	Besonderheit
Volkersen [31]	1938	Als klassische "Badewannenkurve" aus Abbildung 2-17 bekannteste Schubspannungsverteilung. Keine Beachtung des Biegemomentes. (mehr in Kapitel 2.7)
Goland und Reissner [32]	1944	Um das Biegemoment erweiterte Volkersengleichung und daher leicht höhere Schubspannungswerte, die den experimentellen Untersuchungen näherkommen. Zusätzliche Ergänzung um die Schälspannungsverteilung in der Verbindung. (mehr in Kapitel 2.7)
Frey [33]	1953	Verfahren, welches auf dem Prinzip des Gestaltfaktors beruht [34]. Dies ist eine geometrische Beziehung zwischen Fügeteildicke und der Über- lappungslänge. Weiter folgt die Einführung der optimalen Überlap- pungslänge sowie eines Sicherheitsfaktors gegen Bruch der Klebverbindung.
Winter und Meckelburg [35–37]	1960	Mit Hilfe von experimentell zu bestimmenden Faktoren des Gestaltfaktors erweiterte Volkersengleichung. Werte müssen aus Diagrammen abgelesen werden.

Zu den analytischen Auslegungsverfahren zählen:

Strukturelles Kleben in der Luftfahrt

Eichhorn und Braig [44, 45]	1960	Diese Methode betrachtet die maximale Fügeteilspannung am Überlappungsrand der Verklebung unter Beachtung von linear elastischer Verformung, daher nur eingeschränkt nutzbar.			
Müller [38]	1961	Erweiterung von der von Frey entwickelten Methode um einen Faktor, der von der Streckgrenze des Fügeteils abhängt. Identifikation, dass der experimentelle Aufwand über den Ansatz des Gestaltfaktors viel zu aufwändig ist, da benötigte Faktoren für jede Klebstoffkonfiguration neu ermittelt werden müssen.			
Cornelius und Stier [39]	1963	Das Verfahren basiert auf den maximal auftretenden Spannungen am Überlappungsrand. Diese können aus Diagrammen abgelesen werden und müssen vorab in allen Kombinationen experimentell bestimmt werden, was sehr viel Aufwand bedeutet.			
Schlegel [40]	1966	Die Methode gibt eine optimale Überlappungslänge aus, welche a Nomogrammen abgelesen wird, welche vorab experimentell bestim werden.			
Hart-Smith [41–44]	1970	Erweitertes Modell von Goland und Reisner mit Einbeziehung anisotrope Fügepartner durch Korrekturfaktoren und einen plastischen Bereich in Klebstoff.			
Tombach [45]	1975	Tombach nutzt Volkersens und Goland und Reissners Formeln und integriert empirische Faktoren. Sehr hoher Rechenaufwand und ebenso hoher experimenteller Aufwand.			

Tabelle 2-2: Analytische Auslegungsverfahren chronologisch geordnet

Die analytischen Verfahren sind entweder sehr ungenau oder erzeugen vorab einen sehr hohen Aufwand durch die Ermittlung von Kennwerten und Faktoren. Somit eignen sich diese Verfahren nicht wirklich für eine genaue Auslegung einer Klebverbindung.

Die genauste und aber auch aufwändigste Methode zur Auslegung ist die Finite Elemente Methode (FEM). Mit Hilfe dieser **numerischen Simulationen** können komplexe Geometrien und Belastungen gerechnet werden, was analytisch nicht möglich wäre. Die Ergebnisse können anschließend visualisiert werden und helfen dem Betrachter bei der Validierung durch Versuche. Ein Beispiel ist in Abbildung 2-18 dargestellt.



Abbildung 2-18: Vergleich von Versuch und numerischer Simulation einer gebrochenen Überlappungsklebung mit Schadensbereich (rot)

Der Vorteil der numerischen Simulationen liegt dabei in der Möglichkeit, die Festigkeit von Klebverbindungen mit variierenden Fügepartnern, anisotropem Material oder sich ändernden Umweltbedingungen und komplexeren Geometrien nachzubilden. Dennoch muss auch berücksichtigt werden, dass dafür benötigte Materialdaten zuvor sehr aufwändig durch Versuche ertestet und interpretiert werden müssen. Dies geschieht z.B. durch Tubular Butt Joints [46, 47], Thick Adherend Shear Test (TAST) - Proben [48] oder sogenannten ARCAN-Proben [49] und ist einer der Schwerpunkte der Klebfachgruppe der Abteilung Funktionsleichtbau des Institutes für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) im DLR.

Ein großer Vorteil der Numerik ist die Möglichkeit auch nicht lineare Zusammenhänge von Material und Geometrie zu berücksichtigen, wodurch auch Plastizität im Material und eintretende Schädigung wie z.B. das Risswachstum gerechnet werden können. Der Nachteil dieser Simulationen ist die große benötigte Rechenleistung und die daraus resultierenden langen Rechenzeiten, welche schnelle Abschätzungen bei hochsteifen anisotropen Klebverbindungen mit spröden sehr dünnen Klebschichten meist nicht zulassen. Dieser Forschungsbedarf wird ebenfalls vom Institut FA behandelt und mit Industriepartnern zusammen entwickelt.

Ein Exkurs in die Bahnindustrie zeigt, wie diese hochkomplexe Problematik vereinfacht wird, wenn bspw. mittelfeste Fügepartner und dicke, elastische Klebverbindungen verwendet werden und der Schwerpunkt nicht auf dem extremen Leichtbau liegt. Nach der technischen Regel DVS 1618:2002-01 "Elastisches Dickschichtkleben im Schienenfahrzeugbau" des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. [50] wird die benötigte Klebfläche mittels Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren ermittelt.

$$A_K = (b_K \cdot l_K) = \frac{S}{\tau_b \cdot f_T} \cdot \left(\frac{F_{stat.}}{f_t} + \frac{F_{dyn.}}{f_Z}\right)$$
(2-2)

Dabei ist τ_b die Bruchzugscherfestigkeit, *S* ein Sicherheitsfaktor, f_T f_t f_z die Abminderungsfaktoren für Temperatur, die statische wie dynamische Langzeitbeanspruchung $F_{stat.}$ und $F_{dyn.}$ die statische und dynamische Belastung. Diese Anwendung ist nur zulässig im Schienenfahrzeugbau, da genau solche genannten Klebschichtkonfigurationen nicht die hohen Spannungskonzentrationen aufweisen, die in Verklebungen in der Luftfahrt stets präsent sind.

2.7 Spannungsanalyse einer strukturellen Verklebung

Die teils über 80 Jahre alten analytischen Gleichungen zur Berechnung der Spannungsverläufe einer Überlappungsklebung aus Kapitel 2.6 eignen sich gut für die Darstellung und das Verständnis der Belastung einer Klebverbindung mit unterschiedlichen Geometrien.

Verwendet werden dafür die bekanntesten Gleichungen von Volkersen und Goland und Reissner aus der Sammlung von Rodriguez [51]. Bei Volkersen wird idealisiert die Last durch reinen Schub im Klebstoff übertragen:

Volkersen



Abbildung 2-19: Modell nach Volkersen

$$\tau(x) = \frac{F\omega}{2b} \cdot \frac{\cosh(\omega x)}{\sinh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} + \left(\frac{t_t - t_b}{t_t + t_b}\right) \cdot \left(\frac{\omega l}{2}\right) \cdot \frac{\sinh(\omega x)}{\cosh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} < \tau_{zul}$$
(2-3)

mit

$$\omega = \sqrt{\frac{G_k}{Et_t t_k} \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)} \tag{2-4}$$

Dabei entspricht $\tau(x)$ der Schubspannungsverteilung, ω beschreibt, wie schnell die Lastübertragung in der Klebverbindung stattfindet, t_t die obere Fügeteildicke, t_b die untere Fügeteildicke, t_k die Klebschichtdicke, b die Verklebungsbreite, l die Verklebungslänge, E das Elastizitätsmodul des Fügeteils, G_k das Klebstoffschubmodul und F die angreifende Kraft. Die Koordinate x beschreibt die Mittelline der Klebverbindung und hat ihren Ursprung in der Mitte der Überlappungslänge.

Goland und Reissner

Wie schon erwähnt erweitern die Autoren Goland und Reissner das Modell durch ein Biegemoment und erhalten somit eine Aufspaltung der Last in Schub- und Schälkomponente, was der realen Beanspruchung näherkommt.



Abbildung 2-20: Modell nach Goland und Reissner

Die **Schubkomponente** setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$\tau(x) = -\frac{1}{8} \frac{F}{c} \left\{ \frac{\beta c}{t} \left(1 + 3k\right) \frac{\cosh\left(\frac{\beta c}{t} \frac{x}{c}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right\}$$
(2-5)

Mit F als Zuglast, c als halber Überlappungslänge, t als Fügeteildicke und k als Biegemomentfaktor:

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2}\sinh(u_2 c)}$$
(2-6)

Weiter:

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{F}{tE}} \qquad \text{und} \qquad \beta = \sqrt{8\frac{G_k}{E}\frac{t}{t_k}}$$
(2-7)

Und ν als Querkontraktionszahl des Klebstoffes.

Die Schälkomponente lautet dabei:

und

$$\sigma(x) = \frac{1}{\Delta} \frac{Ft}{c^2} \left\{ \left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda \hat{k} \cosh(\lambda) \cos(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) + \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda \hat{k} \sinh(\lambda) \sin(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \right\}$$
(2-8)

Mit \hat{k} als Querkraftfaktor.

$$\hat{k} = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1-\nu^2)\frac{F}{tE}} \quad , \qquad \lambda = \gamma \frac{c}{t} \qquad \text{mit} \qquad \gamma = \sqrt[4]{6\frac{E_k}{E}\frac{t}{t_k}}$$
(2-9)

$$\Delta = \frac{1}{2}(\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \tag{2-10}$$

Und den Faktoren:

$$R_1 = \cosh(\lambda)\sin(\lambda) + \sinh(\lambda)\cos(\lambda)$$
(2-11)

$$R_2 = -\cosh(\lambda)\sin(\lambda) + \sinh(\lambda)\cos(\lambda)$$
(2-12)

Beide Gleichungen sind im folgenden Diagramm in Abbildung 2-21 dargestellt. Gut zu sehen, ist der Unterschied der maximalen Randschubwerte beider Modelle zueinander, welcher durch die Berücksichtigung des Biegemomentes von Goland und Reissner beruht.



Abbildung 2-21: Vergleich von Volkersen und Gorland und Reissner Spannungsverläufen in einer Überlappungsklebung

Alle genannten weiteren Berechnungswege aus Kapitel 2.6 werden nicht weiter berücksichtigt, da die Ergebnisse denen von Goland und Reissner sehr ähnlich kommen und keinen weiteren

Vorteil gegenüber der Betrachtung mittels später verwendeten FEM bringen. Mehr dazu in Kapitel 7.7.

Aus der Literatur [16, 52] ist bekannt, dass Klebverbindungen durch die randnahen Spannungskonzentrationen versagen. Dafür verantwortlich sind vor allem die Schälbelastungen. Werden unterschiedliche Überlappungslängen betrachtet, so kann festgestellt werden, dass die Spannungskonzentrationen ab einer gewissen Überlappungslänge nahezu konstant bleiben, wie dies in Abbildung 2-22 dargestellt ist.



Abbildung 2-22: Darstellung von Spannungsverläufen einer Überlappungsklebung mit variierender Überlappungslänge.

Im folgenden Beispiel von Kweon et al. [53] ist eine experimentelle Studie zur Verbindungsfestigkeit mit zunehmender Überlappungslänge aufgeführt.



Abbildung 2-23: Ergebnisse einer experimentellen Studie von Kweon et al. [53] zur Festigkeit einer CFK/Aluminiumüberlappungsverklebung mit variierender Überlappungslänge.

Während die Überlappungslänge von 15 mm auf 40 mm und damit das Strukturgewicht um 270 % gesteigert wird, kann die Verbindung nur 54 % mehr Last übertragen. Da die Kurve asymptotisch verläuft, würde eine weitere Überlappungsvergrößerung zu keiner weiteren Laststeigerung führen. Grund dafür ist der sich einstellende Steifigkeitssprung an den freien Enden in der Verbindung, der zu den hohen Spannungskonzentrationen führt. (Vgl. Abbildung 2-22)

Abhilfe hierbei schafft eine Aufdickung des Fügepartners, was die Sekundärbiegung reduziert. Resultierend fallen die Spannungskonzentrationen geringer aus und die Verbindung kann einer höheren Belastung standhalten. Der Verlauf von Schubspannungs- und Schälspannungsverläufen ist in den folgenden Diagrammen Abbildung 2-24 und Abbildung 2-25 aufgeführt.



Abbildung 2-24: Schubspannungsverläufe von Verbindungen mit verschiedenen Fügeteildicken

Zur besseren Auflösung sind in den Abbildung 2-24 und Abbildung 2-25 nur die halbe Überlappungslänge aufgetragen, da die Verläufe spiegelsymmetrisch um die Mitte der Verbindung verlaufen.

Soll eine Verbindung also höheren Belastungen standhalten, so müssen die Spannungskonzentrationen am freien Ende der Klebverbindung reduziert werden. Dies kann durch das Aufdicken der Fügepartner [43] oder durch weitere spannungsreduzierende Maßnahmen geschehen, welche in Kapitel 3 eingeführt werden. Denn ein Aufdicken führt zur überproportionalen Erhöhung des Strukturgewichtes und senkt damit das Leichtbaupotential der Verbindungstechnik erheblich.



Abbildung 2-25: Schälspannungsverläufe von Verbindungen mit verschiedenen Fügeteildicken

Die von Volkersen und Goland und Reissner entwickelten Verläufe basieren dabei auf der Annahme von ideal elastischem Materialverhalten der Klebstoffe, die es in der Realität nicht gibt. Klebstoffe beginnen ab einer materialspezifischen Festigkeitsgrenze, sich plastisch irreversibel zu verformen. Diese Festigkeitsgrenze wird als Fließgrenze bezeichnet und ist von duktilen metallischen Werkstoffen bekannt. Der Klebstoff überträgt dann keine weitere Last in diesem Bereich des Fließens. Somit sehen die real auftretenden Spannungsverläufe dementsprechend auch anders aus. Abbildung 2-26 stellt die Spannungsverläufe vom ideal linear elastischen Ansatz hin zum real elastisch-plastischen Verlauf dar.



Abbildung 2-26: Schubspannungsverläufe einer Überlappungsklebverbindung nach [54]

2.8 Gestaltungsrichtlinien für Klebverbindungen

Unterschieden wird hierbei in der Auslegung für **statische** und **dynamische Belastungen** auf die Klebverbindung. Beiden Belastungen muss die Klebverbindung in der Anwendung standhalten und vorab daher ausgelegt werden.

2.8.1 Statische Auslegung der Klebverbindung

Das Ziel bei der statischen Auslegung einer Klebverbindung ist, dass die Klebverbindung stets höheren Belastungen standhält als die Fügeteile selbst. Somit bleibt als Dimensionierungsgröße bei gegebenem Klebstoff und Fügeteilwerkstoff die Dicke des Fügeteils übrig. Abbildung 2-27 zeigt den Verlauf der Einzelfestigkeiten einer Klebverbindung über die variierende Dicke des Fügeteils.



Abbildung 2-27: Darstellung des optimalen Designraums für die Dickenauslegung der Fügeteile in Anlehnung an [55].

Grundlegend müssen bei der Auswahl die Festigkeiten von Klebstoff und Fügeteil die maximale Betriebslast übersteigen. Während dabei die Festigkeit des Fügeteils linear mit der Materialdicke ansteigt, steigt die Schubfestigkeit des Klebstoffes mit der Quadratwurzel und die Schälfestigkeit mit der vierten Wurzel zur Fügeteildicke an. [43, 56, 57] Es entsteht ein optimaler Bereich für die Dimensionierung der Materialstärke. Wird die Fügeteildicke überdies hinaus vergrößert und überschreitet den Grenzwert, so versagt die Klebverbindung. Dies ist wiederum nicht erwünscht.

Die Klebverbindung muss auslegungstechnisch stets eine größere Belastung ertragen können, als die Fügepartner. Eine detaillierte Auslegung erfolgt heutzutage nach grober Abschätzung durch Gleichung 2.1 mittels numerischer Simulation und wird durch Versuche in verschiedenem Detailgrad verifiziert.

2.8.2 Dynamische Auslegung der Klebverbindung

Das Berechnen des Risswachstums ist Kernaufgabe der Schadensmechanik. In diesem Fachgebiet versagen Klebverbindungen nicht durch eine statische Überlast, sondern durch ein immer wieder auftretendes Lastniveau, welches ein Materialermüden in Form eines Risswachstums mit sich bringt. Nach Sih, Paris und Irwin ist dafür eine Spannungsüberhöhung an der Rissspitze verantwortlich. [58] Berechnen lässt sich das Risswachstum über die *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT) oder das *Cohesive Zone Modelling* (CZM).

Bei der VCCT wird davon ausgegangen, dass dieselbe Energie, die beim Risswachstum frei wird, auch zum Schließen des Risses notwendig ist. [59] Diese vergleichsweise einfach anwendbare Technik hat allerdings einen großen Nachteil, dass ein Schaden von Beginn an vorgegeben sein muss. Somit können nur Fälle gerechnet werden, bei denen das Schadensbild bereits bekannt ist.

Die CZM hingegen benötigt diese Information nicht, da bei dieser Technik von einer direkten Materialtrennung an der Rissspitze ausgegangenen wird. An dieser Stelle wird eine kohäsive Prozesszone gebildet, bei der die Brucheigenschaften über ein *traction-separation-law* also eine Zug-Trennungs-Beziehung zwischen beiden Materialseiten definiert werden. [60, 61]

Zur Anwendung beider Techniken muss die materialabhängige kritische Bruchenergie Gc bekannt sein. Diese wird mittels verschiedener Versuche für die jeweiligen Belastungsmoden aus Kapitel 2.5.7 bestimmt. Bei Rissen in Klebstoffen wird häufig auch die kritische Risszähigkeit Kc genutzt, welche durch die Umrechnung bspw. für den Öffnungs-Mode I folgendermaßen mit der Energiefreisetzungsrate G zusammenhängt:

$$K_{Ic}^{2} = \frac{E \cdot G_{Ic}}{1 - \nu^{2}}$$
(2-13)

Dabei steht E für das Elastizitätsmodul des Klebstoffes und ν für die Querkontraktionszahl.

Mit Hilfe des *Paris law* kann die Rate des Risswachstums berechnet werden. Die Gleichung dazu lautet [62]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad mit \quad \Delta K = K_{max} - K_{min}$$
(2-14)

Dabei ist a die Rissgröße, N die Lastzyklenanzahl und C und m Materialkonstanten, welche experimentell ermittelt werden [63]. ΔK ist die Differenz von maximalem und minimalem Spanungsintensitätsfaktor und bildet somit die Größe des Belastungsniveaus ab.

Werden die experimentell ermittelten Ergebnisse der Risswachstumsänderung über unterschiedliche Belastungsniveaus in ein Diagramm übertragen, so ergibt sich eine Kurve, welche in drei Bereiche eingeteilt werden kann. Abbildung 2-28 stellt diese dar. Mit Bereich A als Rissinitiierung, Bereich B mit stabilem Risswachstum, in dem das *Paris law* Gl. (2-14) zur Berechnung des Risswachstums gilt und einem Bereich C, der das instabile Risswachstum abbildet.



Abbildung 2-28: Drei Bereiche des Risswachstums, Darstellung mit Paris law [64]

2.9 Eigenschaften von Strukturklebstoffen

Klebstoffe werden im Allgemeinen in Strukturklebstoffe, elastische Klebstoffe und Dichtstoffe eingeteilt [14]. In Tabelle 2-3 sind die Unterschiede aufgeführt. Während elastische Klebstoffe und Dichtstoffe geringe Anforderungen an den Klebspalt und die Fügeteilvorbehandlung haben, besitzen diese auch eine sehr geringe Festigkeit. Strukturklebstoffe hingegen benötigen sehr hohe Anforderungen an die Oberflächenvorbehandlung und die Klebspaltmaße, um die optimale Festigkeit in der Verbindung zu erreichen.

Anwendungstyp	Festigkeit	Schubmodul	Bruchdehnung	Anforderung an die
-	-	G_k [MPa]	$arepsilon_k$ [%]	Oberfläche/Klebspalt
Strukturklebstoff	hoch	>10	bis 70	hoch
Elastischer Klebstoff	mittel	1-10	70-300	mittel
Dichtstoff	gering	0,1 - 1	300 - 700	gering

Tabelle 2-3: Einteilung der Klebstoffe in verschiedene Anwendungsbereiche nach [14]

Da im Bereich der strukturellen Klebungen auch nur Strukturklebstoffe verwendet werden, wird an dieser Stelle nicht weiter auf elastische Klebstoffe und Dichtstoffe eingegangen.

Strukturklebstoffe werden meist auf Basis von Polyaddition bei z.B. Epoxidharzen oder Polykondensation bei z.B. Phenolharzen gebildet [65], welche auch die bekanntesten Gruppen der Strukturklebstoffe stellen.

Davon stehen Epoxide an der Spitze mit den Leistungsmerkmalen:

- max. Dauereinsatztemperaturen bis +220° C
- Zugscherfestigkeiten 40-50 MPa (bei RT)
- Bruchdehnung <5 % (bei RT)
- Hohe Feuchtigkeits- und Medienbeständigkeit

Die Klebstoffe werden je nach Anwendungsfall als pastöse Zweikomponentensysteme (2K-Systeme) in selbstmischenden Kartuschen oder in größeren Gebinden in Eimern oder als vorgemischte tiefgefrorene Filmklebstoffe vertrieben.



Abbildung 2-29: Typische Gebindeform von Klebstoffen in a) pastöser Form und b) als eingefrorener Film. Produktdarstellung von Henkel Loctite EA9394 [66] und EA9695 [67].

2.10 Anforderung an eine moderne Klebverbindung in der zivilen Luftfahrt

Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle sagen, dass Klebverbindungen in der zivilen Luftfahrt heutzutage langzeitbeständig, robust gegen Imperfektionen, hochratenfähig herstellbar und kontrollierbar sein müssen, um die Anforderungen der Zulassungsbestimmungen zu erfüllen und dabei wirtschaftlich zu bleiben.

Auf die technische Ebene übertragen bedeutet dies, eine bolzenfreie Klebverbindung zu entwickeln, die dennoch Designelemente gegen das Risswachstum aufweist.

Auf Zulassungsebene müsste das Fail-Safe-Design zu einem Maximum-Disbond-Design weiterentwickelt werden, bei dem die Kernüberlegung bestehen bleibt. Im Falle eines Versagens (nicht Totalversagen) wird der ursprüngliche Lastpfad über einen anderen Bereich der Klebschicht übertragen. Ein Totalversagen muss an dieser Stelle ausgeschlossen werden. Moderne Verfahren in der Oberflächenvorbehandlung sowie Prozessüberwachung bei der Herstellung könnten dies gewährleisten.

Auf Konzeptebene bedeutet dies, die rissinitiierenden Spannungskonzentrationen, die zum Versagen der Klebverbindung führen so zu reduzieren, dass im Idealfall kein Anriss entsteht, oder bei Beschädigung der Klebschicht ein stabiles Risswachstum in den nächsten Rissstopper läuft.

Die technische und konzeptionelle Ebene wird in dieser Arbeit adressiert.

Der Stand der Technik dazu wird im folgenden Kapitel 3 aufgezeigt.

3.Senkung von Spannungskonzentrationen in Klebungen

Welche Techniken zur Spannungsreduktion und daraus resultierenden Steigerung der Verbindungsfestigkeit bzw. zum Rissstopp gibt es und wie funktionieren diese?

Dieses Kapitel beschreibt die bisherigen Untersuchungen auf dem Gebiet der Senkung von Spannungskonzentrationen und der Steigerung der Verbindungsfestigkeit sowie dem Stoppen von Rissen. Recht ausführliche Sammlungen sind von Shang et al. [68] und Kupski und de Freitas [69] vorhanden. Es gibt eine sehr große Zahl an Modifikationen, daher werden im Folgenden nur Konzepte zur Anwendung an strukturellen Klebungen für die Luftfahrt vorgestellt. Teile dieses Kapitels sind dabei bereits in [70] veröffentlicht.



Abbildung 3-1: Im Kapitel behandelte Modifikationen zur Spannungsreduktion von Klebverbindungen

3.1 Modifikation des Fügeteils

Neben den globalen Geometrieanpassungen der Klebverbindung, die schon in Kapitel 2.5.5 beschrieben sind, gibt es die Möglichkeit der Steifigkeitsanpassung der Verbindung durch eine lokale Geometrieanpassung des Fügepartners. Dabei gibt es nach außen und innen abgesetzte Fasen bzw. Verrundungen, die u.a. da Silva und Adams untersucht haben [71].



Abbildung 3-2: Verschiedene lokale Fügeteilmodifikationen [68]

Angefaster Fügepartner

Haghani et al. [72] zeigen in einer numerischen Studie, dass das Anfasen von Fügepartnern deutlich vom Steifigkeitsverhältnis zwischen Fügepartner und Klebstoff abhängt. So ist diese Methode bei steifen Klebstoffen mit weicheren Faserverbundfügepartnern effektiver. Moya-Sanz [73] hat mit einer numerischen Studie den Winkel der Fase untersucht. Ein 45° Winkel zeigt die größte Reduktion von Schälspannungen im Klebstoff auf ca. 60 % im Verhältnis zur Referenz.

Abgerundeter Fügepartner

Mit Hilfe einer numerischen und experimentellen Studie zeigen Adams und Harris [74], dass auch eine nach innen gerichtete Abrundung am Fügeteil einen deutlichen positiven Effekt aufweisen. Zhao et al. [75, 76] ergänzt die Untersuchung und betrachtet die Variation des Radius der Rundung. Er weist eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit um 40 % im Vergleich zur Referenz nach.

3.2 Modifikation des Klebstoffauslaufs

Eine weitere Möglichkeit für die Spannungsreduzierung besteht darin, einen gezielten Klebstoffauslauf aus der Überlappung zu erzielen. Dadurch entstehen keine Singularitäten in der Steifigkeitsverteilung unmittelbar am Klebstoffbeginn.

Dabei haben Lang und Mallick [77] verschiedene Geometrien identifiziert, die in Abbildung 3-3 dargestellt sind. Die Reduktion für die Schubspannungsspitze der Konzepte liegt zwischen 29 % für die halbe Abrundung und 60 % für einen Bogen. Die Schälspannungskonzentrationen werden um 33 % für die halbe Abrundung und 87 % für den Bogen gesenkt. Crocombe und Adams [78] sowie Wang et al. [79] bestätigen diese Untersuchung.



Abbildung 3-3: Verschiedene Klebstoffausläufe [77]

3.3 Klebstoffgradierung

Bei dieser Technik wird eine Steifigkeitsanpassung durch die Variation des Klebstoffes durchgeführt. Durch zwei oder mehrere unterschiedlich steifen Klebstoffe wird eine Gradierung des Klebstoffes erzeugt. Dabei befindet sich der steifste Klebstoff in der Mitte der Klebverbindung und der duktilste Klebstoff am Rand.

Da Silva und Lopes [80] wiesen einen fast einheitlichen Spannungsverlauf der Verbindung durch die Verwendung von drei unterschiedlich steifen Klebstoffsystemen am Rand der Klebverbindung auf, was zu erhöhten Verbindungsfestigkeiten führte. Öz und Özer [81] reduzieren die Anzahl von Klebstoffsystemen auf zwei und erzielten Festigkeitssteigerungen um 40 %. Beide Autoren haben in der numerischen Arbeit dazu [82] gezeigt, dass der mittlere steifere Klebstoff für die Schubübertragung in der Verbindung verantwortlich ist.



Klebstoffgradierung

Abbildung 3-4: Gradierte Klebschicht nach Coleman [83], der Klebstoff wird mit aufsteigender Zahl steifer

3.4 Klebstoffmodifikation

Um den Effekt der gradierten Steifigkeit der Verbindung auch, ohne verschiedene Klebstoffsysteme zu erzielen, ist die Idee hierbei, durch Zugabe von Partikel den Klebstoff lokal duktiler zu gestalten bzw. die Bruchzähigkeit zu steigern.

Gummipartikel

Sancaktar und Kumar [84] haben beispielsweise lokal Gummipartikel dem Klebstoff hinzugefügt, welche einen Riss stoppen sollen, wenn dieser durch den Klebstoff läuft. Nachweislich ließ sich die Risswachstumsgeschwindigkeit senken und die Verbindungsfestigkeit leicht steigern. Bagheri und Pearson [85] identifizierten eine optimale Partikelgröße, bei der der klebstoffzähmodifizierende Effekt am größten ist. Bei zu kleiner Partikelgröße ist der Effekt vernachlässigbar.

Glaspuder und Glasfasern

Khalili et al. [86] zeigt durch eine experimentelle Studie, dass sich die Verbindungsfestigkeit durch das Einbringen von 30 % Gewichtsanteil Glaspuder um 71 % steigern lässt, während das Einlegen von in Zugrichtung ausgerichteten Glasfasern die Verbindungsfestigkeit um 54 % steigert.

Nano Kohlenstofffasern (CNF)

Ladani et al. [87] zeigt in seiner Arbeit, dass sich die Risszähigkeit des Klebstoffes durch die Hinzugabe der CNFs bis zu einem Gewichtsprozent mit zufälliger Anordnung steigern lässt. Mit Hilfe eines äußeren elektrischen Feldes können die Fasern bei der Klebstoffaushärtung zudem senkrecht zur Rissebene ausgerichtet werden, was eine zusätzliche Steigerung der Bruchzähigkeit erzielt.

3.5 Klebschicht mit Verbolzung

Eine zusätzliche Verbolzung einer Klebverbindung, wie aus Kapitel 2 schon bekannt, kann zum einen als sekundärer Lastpfad dienen, sollte der Klebstoff versagen, oder zum anderen lediglich lokal Lasten übernehmen. Primär sind dies die transversalen Schälbelastungen, die zum Risswachstum führen.



Gebolzte Klebung

Kelly [88] beschreibt, dass der Kraftfluss über einen Bolzen im Verhältnis zur Klebschicht mit größer werdender Fügepartner- bzw. Klebschichtdicke steigt. Der Kraftfluss sinkt jedoch bei steigender Überlappungslänge, bei größeren Bolzenabständen oder steigender Klebstoffsteifigkeit. Gesamt weist eine zusätzlich gebolzte Klebverbindung deutlich bessere Ermüdungseigenschaften auf. Chan und Vedhagiri [89] haben mit einer 3D numerischen Simulationsstudie und anschließender experimentellen Validierung gezeigt, dass die Bolzen erst am Kraftfluss in der Klebverbindung aktiv beteiligt sind, wenn erstes Versagen im Klebstoff zu identifizieren ist. Die Lastübernahme erfolgt nicht parallel, da immer minimales Spiel zwischen Bolzen und Loch besteht und dieses erst durch Materialdehnung des Klebstoffes überwunden werden muss. Die dafür benötigte Dehnung befindet sich dann teils im plastischen Bereich des Klebstoffes und damit schon im geschädigten Bereich. Die Bolzen unterstützen die Verbindung also daher hauptsächlich im geschädigten Fall. Dennoch werden durch die Kompression der Fügepartner durch den Bolzen auch schadensinitiierende Spannungskonzentrationen abgebaut, wodurch der Bolzen als Rissstopper eingesetzt werden kann.

Genietete Klebung

Der eigentliche Unterschied von lösbarer zu unlösbarer Verbindung zwischen Bolzen und Niet geht durch die Klebverbindung verloren, vielmehr wird der Niet in das vorher gebohrte Loch gepresst und besitzt ein deutlich geringeres Spiel zum Loch als der Bolzen. Nicht nur eine axiale, sondern auch radiale Vorspannung stellt sich beim Festziehen ein. Pirondi und Maroni [90] untersuchten das Versagensverhalten und identifizierten bei experimentellen Studien, dass die Steifigkeit der Verbindung steigt und die Klebschicht höheren Lasten standhält im Vergleich zu einer reinen Nietverbindung. Der Effekt steigt deutlich mit dicker werdenden Fügepartnern [91].

Z-Pinning

Die Idee hinter dem Z-Pinning besteht darin, die Größe des eigentlichen Bolzens zu reduzieren und die Last auf viele kleinere Elemente zu verteilen. Selbst eine geringe Anzahl dieser Pins, mit 2 % bezogen auf das Strukturgewicht, steigert die Verbindungsfestigkeit bereits deutlich um 41 % [92, 93]. Ebenfalls steigt der Effekt wieder deutlich mit dicker werdenden Fügepartnern. [94] Da Z-Pins nicht mechanisch bearbeitet werden, sondern hauptsächlich vor der Verklebung der Fügepartner eingesteckt werden, können auch nichtumformbare Materialien genutzt werden. So hat Ravindran et al. als bestes Material in seinen Versuchen CFK Pins identifiziert [95].

Klammern

Das Klammern bildet die geringste Störung für den eigentlichen Verbundpartner. Kühn [96] und Löbel [97] zeigen eine Festigkeitssteigerung von 28 % bei der nachträglichen vollständigen Klammerung von zweischnittigen Überlappungsverklebungen im Gegensatz zur gebolzten Klebverbindung. Werden nur die Randbereiche geklammert, steigt die Verbindungsfestigkeit um 23 %.

3.6 Die Hybrid Bondline

Die *Hybrid Bondline*, also eine hybride Klebschicht, bestehend aus steifem Klebstoff und duktilem Thermoplast, welche zusammen die Lasten in der Klebschicht übertragen. Das Konzept beruht dabei auf der These, dass ein Riss im Klebstoff gegen eine definierte Materialgrenze läuft und somit gestoppt wird. Um diese Materialgrenze zu erzielen, wird zuerst ein duktiler Thermoplast in das Substrat bei dessen Aushärtung mit verklebt. An dieser Stelle wird im weiteren Verklebeprozess ein Streifen von selbigem Thermoplast mit eingelegt, welcher beim Verkleben unter erhöhter Temperatur mit dem im Substrat eingebrachten Streifen verschweißt.



Abbildung 3-6: Fertigung der Hybrid Bondline

Löbel hat bei seinen Arbeiten allerdings keinen Schwerpunkt auf die Spannungsreduktion und Festigkeitssteigerung bei Überlappungsklebungen gelegt, sondern konzentrierte seine Untersuchungen auf den Rissstopp bei dynamisch schwellender Zugbelastung von CLS-Proben. Als Ergebnis seiner Untersuchungen konnte ein sicherer Rissstopp bis 4000 mm/m Dehnung erzielt werden. [98] Allerdings ist Löbel mit dem Verfahren auf Werkstoffe angewiesen, die im gleichen Temperaturbereich aufschmelzen bzw. Klebstoffe wie auch Substrate aushärten. Fertigungsbedingt konnte keine hybride Klebschicht mit reproduzierbarer Qualität größer als eine Laborprobe hergestellt werden, da der Aufbau zum Herstellen sehr komplex ist. Als Werkstoff zur Hybridisierung hat Löbel dabei Polyvinylidenfluorid (PVDF) als duktilen Thermoplasten und neben dem luftfahrttypischen Faserverbundmaterial Hexcel 8552-IM7 einen Strukturklebstoff EA9695 von Henkel verwendet.

3.7 Bewertung der Konzepte

An dieser Stelle kann lediglich eine qualitative Abschätzung zur Bewertung der Konzepte folgen. Da die Konzepte mit unterschiedlicher Zielstellung entwickelt wurden und teils nur numerisch untersucht sind und experimentell mit unterschiedlichsten Materialien gefertigt wurden, findet die Bewertung mit Schwerpunkt der industriellen Umsetzbarkeit statt.

Kap.	Konzept	Fertigungsprozess	Aufwand	Spannungen	Rissstopp		
				senken	möglich		
3.1	Fase außen		hoch	mittel	nein		
	Fase innen	Mech. Bearbeitung	sehr hoch	gut	nein		
	Rundung außen	des Fügepartners	sehr hoch	mittel	nein		
	Rundung innen		sehr hoch	gut	nein		
2.2	Viereck	Anpassung des	sehr hoch	mittel	nein		
	Dreieck		hoch	mittel	nein		
	Halbes Dreieck	ronnwerkzeugs	sehr hoch	mittel	nein		
5.2	Abrundung	definierten	hoch	mittel	nein		
	Halbe Abrundung	Klebstoffauslaufs	sehr hoch	mittel	nein		
	Bogen	Ricostonausiauis	mittel	gut	nein		
22	Zwei Klebstoffe	Mehrere Klebstoffe	hoch	gut	nein		
5.5	Drei Klebstoffe	einbringen	sehr hoch	sehr gut	nein		
2.4	Gummipartikel	Deutilial in Vlahataff	hoch	gut	ja		
	Glaspuder	oinstrouon bau	hoch	gut	nein		
5.4	Nano	einmischen	sehr hoch	gut	ja		
	Kohlenstofffasern	enninsenen					
3.5	Gebolzte Klebung	Bohren und verschrauben	hoch	sehr gut	ja		
	Genietete Klebung	Bohren und Vernieten	sehr hoch	sehr gut	ja		
	Z-Pinning	Bohren und stiften	sehr hoch	sehr gut	ja		
	1/1	Bohren und	1 1 1	1	•		
	Klammern	klammern	sehr hoch	sehr gut	ја		
3.6	Hybrid Bondline	Duktiles Material					
		einbringen,					
		nachträglich	sehr hoch	sehr gut	ja		
		schweißen und					
		kleben					
Tab	Tabelle 3-1. Verdeich der snannungsreduzierenden Konzente und Rewertung der						

Die einzelnen Konzepte sind in Kurzform in Tabelle 3-1 bewertet.

 Tabelle 3-1: Vergleich der spannungsreduzierenden Konzepte und Bewertung der

 Rissstoppfähigkeit

Die Bewertung zur Senkung von Spannungskonzentrationen bezieht sich dabei auf den Randbereich von einfachen Überlappungsklebungen. Die Bewertung des Rissstopps bezieht sich auf die Implementierung der Technik in eine Klebschicht.

3.7.1 Anwendung als industrielle Lösung

Dass die Konzepte zur Spannungsreduktionen an Überlappungsklebungen führen können und damit zumeist die Verbindungsfestigkeit deutlich steigern ist nachgewiesen, jedoch muss der Aufwand zur Herstellung und den möglichen Komplikationen durch falsche Anwendung dem positiven Effekt in der industriellen Anwendung gegenüberstehen.

Im Bereich der Fügeteilmodifikation fallen daher aus Fertigungsgründen alle nach innen gerichteten Bearbeitungen weg und auch Rundungen sind fertigungstechnisch besonders an gekrümmten Strukturen technisch nicht einfach umsetzbar. Lediglich die **äußere Fase** wäre umsetzbar.

Im Bereich der Modifikation des Klebstoffauslaufs können Geometrien nur durch Deckbleche mit vorgefertigter Kontur hergestellt werden, auch hier ist ein Toleranzmanagement für größere Strukturen undenkbar. Einen großen Vorteil besitzt aber der **Bogen** als Geometrie, da sich dieser automatisch einstellt, sobald mittels Vakuumsack (siehe Kapitel 6.5) eine Verklebung hergestellt wird. Der Nachteil dabei ist, dass der Radius nicht einzustellen ist und sich teils undefinierte Luftansammlungen bilden.

Die Konzepte zur Klebstoffgradierung haben den großen Nachteil, dass eine Positioniergenauigkeit, sowie nachträgliche Qualitätssicherung nicht stattfinden kann. Noch entscheidender ist, dass eine Verwechslung des Klebstoffes von steif nach duktil den Effekt umkehrt und die Verbindung deutlich schwächt.

Klebstoffmodifikationen sind in erster Linie Herstelleraufgaben. Das Mischen von Partikel wie CNTs ist dazu sehr gefährlich, da diese sehr kleinen Faserteilchen ähnlich wie Asbeststaub lungengängig und zellverändernd sind und somit Krebs verursachen können [99]. Das Bestreuen von Fügeteilen wäre somit aus Arbeitsschutzgründen nicht möglich.

Zusätzlich verbolzte Klebschichten haben im Allgemeinen den Vorteil, dass der mechanische Sekundärlastpfad, ob Bolzen, Niet oder Klammer, optisch qualitätsgesichert werden kann. Die Industrie nutzt hierbei schon lange Automatisierungstechnik zum Setzen der **Bolzen** und **Niete** in eine Verbindungsstelle. [100–102] Der Nachteil der Bolzen, welche zumeist aus Titan bestehen, ist neben der herausfordernden Oberflächenvorbehandlung für die Lackierung auch der Preis, der zwischen 50 \$ und 100 \$ pro Bolzen liegt und das unnötige Strukturgewicht sowie die Beschädigung der lasttragenden Fasern im Laminat.

Die Hybrid Bondline hingegen ist in der Fertigung sehr aufwändig. Auf eine größere gekrümmte Oberfläche ist die Umsetzung aufgrund der genauen Lagetoleranz von Thermoplaststreifen und Klebstoff passend zum gegenüberliegenden Fügepartner problematisch. Ebenfalls benötigt dieses Konzept abgestimmte Temperaturen für Aushärtung und Aufschmelzung und begrenzt dadurch stark die Möglichkeiten der Werkstoffauswahl für das Klebstoffsystem.

3.7.2 Bewertung zur Risstoppfähigkeit der Konzepte

Ein Riss entsteht nicht nur am Rand einer Klebverbindung. Durch Impact oder fertigungsbedingte Defekte kann ein Riss auch vom Inneren einer Klebschicht zum Rand dieser wachsen. Werden die aus Kapitel 3.7.1 herausgearbeiteten industrialisierbaren Konzepte von Fase, Bogen, Bolzen und Niet auf die Applikation in einer Klebschicht bewertet, so fallen die ersten beiden Ansätze heraus, da diese nicht in einer Verklebung angewendet werden können. Lediglich das Konzept vom Setzen von **Bolzen** bzw. dem **Niet** erfüllt die Aufgabe und wird daher für diese Aufgabe seit über 60 Jahren verwendet.

3.8 Anforderungen an ein modernes Rissstoppkonzept

Da Bolzen wie in Kapitel 3.7.1 jedoch große Nachteile bei der Anwendung vor allem an Faserverbundstrukturen besitzen, muss für diesen Werkstoff ein neuartiges Konzept entwickelt werden, welches **bolzenfrei** sein muss. Die wichtigsten Anforderungen an dieses neuartige Konzept zum Rissstopp sind im Folgenden aufgelistet:

- 1. Eine rissstoppende Modifikation darf keinen nennenswerten Mehraufwand in der Anwendung, im Vergleich zum bisherigen Nietsetzen, erzeugen.
- 2. Das Rissstoppkonzept muss robust in der Handhabung sein und darf keinen negativen Effekt, im Falle einer Falschanwendung, auf die Verbindungsfestigkeit besitzen.
- 3. Das Rissstoppkonzept soll an allen Überlappungsklebungen eingesetzt werden können, obgleich die Verbindung im *Secondary Bonding* (nachträgliche Verklebung ausgehärteter Verbundfügepartner), dem *Co-bonding* (nachträgliche Verklebung, bei der nur ein Fügepartner ausgehärtet ist und ein weiterer unausgehärteter Fügepartner mit zusätzlichem Klebstoff ausgehärtet wird) oder dem *Co-curing* (Verbindung entsteht durch unausgehärtete Verbundfügepartner im Aushärteprozess) hergestellt wird.
- 4. Das Konzept muss sowohl am Rand (Anrissvermeidung und damit Festigkeitssteigerung) wie auch in der Klebschicht (Rissstopper) anzuwenden sein.
- 5. Eine hochratenfähige industrielle Herstellung ohne Nacharbeit muss gewährleistet sein.

4. Die lokale Oberflächenzähmodifikation

Was ist die lokale Oberflächenzähmodifikation?

Wie bereits Kapitel 2 verdeutlicht hat, sind Klebverbindungen keinesfalls einfach in der Berechnung, Herstellung und Überwachung zu handhaben. Wahrscheinlich hat schon jeder Leser bzw. jede Leserin dieser Arbeit einmal irgendetwas an die Wand geklebt und ebenso wahrscheinlich ist ihm oder ihr irgendwas dann wieder abgefallen. Kapitel 3 verdeutlicht das Streben nach einer sicheren Kleblösung, jedoch mit teils so viel Mehraufwand, dass kaum noch vom reinen Kleben gesprochen werden kann. Mit dem Fokus auf einer industrienahen Lösung des Problems zur Senkung von Spannungskonzentrationen in reinen strukturellen Klebverbindungen wird in diesem Kapitel ein Ansatz erläutert und der damit verbundenen Fähigkeit zum Rissstopp bzw. der Steigerung der Verbindungsfestigkeit aufgezeigt.

4.1 Das Konzept

Die lokale Oberflächenzähmodifikation engl. *local Surface Toughening* (kurz. ST) beruht auf dem Grundkonzept der randnahen Steifigkeitsgradierung von Überlappungsklebungen. Das Besondere im Gegensatz zu den in Kapitel 3 eingeführten Konzepten liegt in der Implementierung eines duktilen Bereichs zwischen Substrat und Klebstoff – die sogenannte Oberflächenzähmodifikation. Dargestellt ist das Konzept in Abbildung 4-1 an einer einfachen Überlappungsklebung.



Abbildung 4-1: Konzept der lokalen Oberflächmodifikation an einer einschnittigen Überlappungsklebung

Es entsteht somit ein randnaher duktiler Bereich, in dem Spannungskonzentrationen in Schälund Schubrichtung im Klebstoff reduziert werden und ein steifer mittlerer Bereich, der die Last in Form von reinen Schubspannungen überträgt. Ähnlich eines hochergonomischen Lattenrostes entgegnet die Verbindung den auftretenden Belastungen mit angepasster Steifigkeit bzw. daraus resultierenden Verformung.

Beim Einsetzen der lokalen Oberflächenzähmodifikation mittig in eine Klebverbindung (vgl. Abbildung 4-5) wird ein Riss in der Klebschicht gestoppt. Abbildung 4-2 stellt dabei die Steifigkeitsverhältnisse anhand von verschieden starken Federn in der Klebverbindung unter einer äußeren Mode I Belastung dar. Das weiche, zähmodifizierende Material entlastet dabei den Klebstoff. Die gesamte Verbindung wird etwas nachgiebiger.



Abbildung 4-2: Konzept der lokalen Oberflächenzähmodifikation als Rissstopp mit Federn als Einzelsteifigkeit

Wird das Steifigkeitsmodell aus Abbildung 4-2 linearisiert dargestellt und mit geometrischen Größen versehen, so ergibt sich Abbildung 4-3. Mithilfe dieser Abbildung lässt sich die innere Belastung der Klebschicht zeigen bzw. in Bezug auf einen Riss auch die Entlastung im Bereich vor diesem, bei Verwendung der lokalen Zähmodifikation.

Entscheidend dafür ist das Steifigkeitsverhältnis zwischen Klebstoff und zähmodifizierendem Material, welches sich auch linear über die Federsteifigkeit D darstellen lässt, sofern gleich große Bereiche verglichen werden. Für ein einfaches Rechenbeispiel wird das Federsteifigkeitsverhältnis von Klebstoff und der Zähmodifikation gebildet. Herangezogen wird dabei die Formel zur Berechnung der Federsteifigkeit eines Stabes.

$$D = \frac{\mathbf{E} \cdot A}{t} \tag{4-1}$$

Dabei steht E für das Elastizitätsmodul, A für die Querschnittsfläche und t für die Länge.



Abbildung 4-3: Federmodell der lokalen Oberflächenzähmodifikation, stark idealisiert

Da die Bereiche innerer Belastung in unserem Model alle gleich groß sind, wird kein Zahlenwert eingesetzt. Ebenso wird idealisiert, dass der eingebrachte Bereich der lokalen Zähmodifikation die gleiche Größenordnung in der Dicke hat wie der Klebstoff. Da das Modell aber nur von der Mittellinie bis zum Fügeteil aufgebaut ist, ist also die Klebschicht nur halb so dick wie die Zähmodifikation für diese Betrachtung. Die Elastizitätsmoduln werden mit Zahlenwerten der in dieser Arbeit später verwendeten Materialien aus Kapitel 5 versehen. Es ergibt sich daher für die Federsteifigkeiten von Klebstoff und Zähmodifikation folgender Zusammenhang:

$$D_{Klebstoff} = D = \frac{2500 \text{ MPa} \cdot A}{0.5 \cdot \text{t}} = \frac{5000 \text{ MPa} \cdot A}{\text{t}}$$
(4-2)

$$D_{ST} = \frac{1700 \text{ MPa} \cdot A}{\text{t}} \tag{4-3}$$

Werden schließlich beide Steifigkeiten durcheinander geteilt, erhalten wir das Verhältnis:

$$\frac{D_{Klebstoff}}{D_{ST}} = \frac{\frac{5000 \text{ MPa} \cdot A}{t}}{\frac{1700 \text{ MPa} \cdot A}{t}} = \frac{5000}{1700} = 2,94$$
(4-4)

Das Verhältnis der Federsteifigkeiten ist also ungefähr 3. Oder formuliert für die Zähmodifikation:

$$D_{ST} = \frac{1}{3} \cdot \mathbf{D} \tag{4-5}$$

Damit kann nun die Gesamtfedersteifigkeit D' der Reihenschaltung beider Federn bestimmt werden.

$$\frac{1}{D'} = \frac{1}{D_{Klebstoff}} + \frac{1}{\frac{1}{3} \cdot D_{Klebstoff}}$$
(4-6)
Formel (4-6) umgestellt zu D' ergibt:

$$D' = \frac{1}{\frac{1}{D_{Klebstoff}} + \frac{1}{\frac{1}{3} \cdot D_{Klebstoff}}} = 0,25 D_{Klebstoff}$$
(4-7)

Die Gesamtfedersteifigkeit zwischen den Fügepartnern an der eigentlichen Rissspitze ist somit vier Mal weicher als die des eigentlichen Klebstoffes.

Werden schließlich die Einzelkräfte an den Federn ermittelt, welche idealisiert die innere Schälbelastung auf den Klebstoff darstellen, kann der direkte Vergleich von Belastung mit und ohne Oberflächenzähmodifikation vorgenommen werden. An den Positionen x1 und x2 ist in beiden Modellen keine Modifikation vorhanden, lediglich an Position x3 unterscheiden sich die Modelle. Der übersichtshalber wird D_{Klebstoff} wieder als D geschrieben.

Mit

$$F_{(x)} = D \cdot \Delta l \tag{4-8}$$

und

$$\Delta l = \tan(\alpha) \cdot x \tag{4-9}$$

ergibt sich für die linke Seite aus Abbildung 4-3:

$$F_{(x_1)} = D \cdot \tan(\alpha) \cdot x_1$$

$$F_{(x_2)} = D \cdot \tan(\alpha) \cdot x_2$$

$$F_{(x_3)} = D \cdot \tan(\alpha) \cdot x_3$$
(4-10)

Für die rechte Seite aus Abbildung 4-3 ergibt sich:

$$F_{(x_1)} = D \cdot \tan(\alpha) \cdot x_1 \tag{4-11}$$

$$F_{(x_2)} = D \cdot \tan(\alpha) \cdot x_2$$

$$F'_{(x_3)} = D' \cdot \tan(\alpha) \cdot x_3 = 0.25 \cdot D \cdot \tan(\alpha) \cdot x_3$$

Wird das Verhältnis der Kräfte $F'(x_3)$ und $F(x_3)$ gebildet, so ist die Belastung mit Zähmodifikation viermal kleiner im Bereich der Rissspitze, als mit reinem Klebstoff.

$$F'_{(x_3)} = \frac{0.25 \cdot D \cdot \tan(\alpha) \cdot x_3}{D \cdot \tan(\alpha) \cdot x_3} F_{(x_3)} = 0.25 \cdot F_{(x_3)}$$
(4-12)

Im Umkehrschluss muss also in unserem einfachen linearen Modell die Rissspitze viermal weiter aufgezogen werden, sodass dieselbe Belastung an der Rissspitze anliegt, als im Modell mit reinem Klebstoff. Weiter würden dann aber die Kräfte $F(x_1)$ und $F(x_2)$ ansteigen, da der gesamte Fügepartner weiter geöffnet werden würde und sich somit auch diese Federn weiter längen würden, was zu deren Kraftanstieg führen würde. Final müsste die gesamte äußere Kraft F aus Abbildung 4-3 ansteigen, was dann wiederum eine **Steigerung der Verbindungsfestigkeit** bedeutet. Wird das äußere Kraftniveau aber nicht erhöht bei z.B. zyklischer äußerer Belastung, führt dieser beschriebene Effekt dazu, dass ein Riss nicht weiterwachsen würde und ein **Rissstopp** würde sich einstellen.

Der Anstieg der äußeren Kraft lässt sich mit diesem Modell nicht mehr einfach analytisch darstellen, sondern benötigt die FEM zur Berechnung und wird in Kapitel 7.7 behandelt.

Für den Schubspannungsverlauf ergibt sich qualitativ betrachtet folgende Änderung:



Abbildung 4-4: Qualitative Änderung der Schubspannung durch die lokale Oberflächenzähmodifikation

Sind die Bereiche und Steifigkeiten zueinander richtig gewählt, wird somit die Verbindungsfestigkeit erhöht, da diese unmittelbar von den randnahen Spannungskonzentrationen abhängt.

Ein thermoplastisches Material bietet durch seine hohe Dehnfähigkeit und den ausgeprägten plastischen Bereich und eine materialbedingte Verfestigung eine "sich selbst anpassende Zähmodifikation" mit sich, sofern Anfangs- und Endsteifigkeit korrekt ausgewählt werden.

Das Konzept ist primär für hochsteife Strukturklebstoffe mit sehr geringen Klebschichtdicken bei der Verklebung von Faserverbundstrukturen entwickelt. Es soll den Bauteilherstellungs- und Verklebungsprozess nicht negativ beeinflussen.

4.2 Die Forschungshypothesen

Die Innovation dieses Konzeptes im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen basiert auf der Implementierung eines lokalen duktilen Bereichs in die Oberfläche der Verbindung. Eine weitere Veränderung an der Verbindung bzw. des Klebstoffes wird nicht vorgenommen. Die genaue Größe bzw. Position dieses Bereichs und die daraus resultierende Steigerung von Verbindungsund Ermüdungsfestigkeit sind Kern dieser Arbeit. Die Hauptforschungsthesen sind folgend aufgeführt und erklärt:

4.2.1 Hypothese I: Die Oberflächenzähmodifikation senkt Spannungskonzentrationen in Überlappungsklebverbindungen

Eine lokale Oberflächenzähmodifikation in einer Überlappungsklebung senkt die Spannungskonzentrationen im Klebstoff in reiner Belastungsrichtung von Mode I und Mode II sowie deren Kombination.

Eine lokale Zähmodifikation einer Oberfläche des Fügepartners führt zur lokalen Senkung der Belastungen in der Klebschicht. Die Schälspannungskonzentrationen sowie Schubspannungskonzentrationen werden an diesen Stellen verringert bzw. in einen Bereich geringerer Belastung umgelagert, welcher außerhalb des zähmodifizierten Bereichs liegt. Dies findet sowohl in reiner Mode I und Mode II Belastungsrichtung statt sowie deren Kombination.

4.2.2 Hypothese II: Die Oberflächenzähmodifikation steigert die Verbindungsfestigkeit

Durch gezielte Anordnung der lokalen Oberflächenmodifikation in der Klebung wird die Lastverteilung verbessert und somit die Verbindungsfestigkeit gesteigert.

Werden Spannungskonzentrationen randnah gesenkt, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass die Verbindungsfestigkeit gesteigert werden kann. Anhand von geeigneten Versuchen wird diese These überprüft und mithilfe von numerischen Methoden abgesichert. Ziel ist die Einsparung von Überlappungslänge und damit Strukturgewicht, was sich im Flugzeug positiv auf den Treibstoffverbrauch und damit auf die Betriebskosten und die CO₂-Bilanz auswirkt.

4.2.3 Hypothese III: Die Oberflächenzähmodifikation stoppt Risse

Risswachstum Ein in der Klebverbindung wird mittels einer lokalen Oberflächenzähmodifikation der dadurch auftretenden Reduktion und von Spannungskonzentrationen gestoppt.

Gemeint ist, dass ein Riss vollständig unter realistischer Belastung in einer reinen Klebverbindung ohne weitere mechanische Hilfsmittel gestoppt werden kann. Ebenfalls sollen der Klebstoff bzw. der Klebprozess und auch die Fügeteile nach der Aushärtung nicht modifiziert werden.

4.3 Mechanische Anforderungen

Das Material zur Oberflächenzähmodifikation (ST-Material) muss folgende Anforderungen erfüllen:

- 1. Die Steifigkeit des ST-Materials muss geringer als die des Klebstoffes sein, es wird ein optimales Steifigkeitsverhältnis von Fügepartner und ST-Material geben.
- 2. Das ST-Material muss über eine höhere Bruchzähigkeit als der Klebstoff verfügen.
- 3. Das ST-Material muss über eine leicht geringere Schub- und Zugfestigkeit als der Klebstoff verfügen.
- 4. Es muss eine plastische Verfestigung im ST-Material geben.

4.4 Physikalische und chemische Anforderungen

Weiter muss das ST-Material folgende physikalische und chemische Eigenschaften aufweisen:

- 1. Die unter Kapitel 4.3 genannten Punkte müssen über einen weiten Temperaturbereich bzw. im Verhältnis zum Substrat selbst bestehen bleiben.
- 2. Es muss eine gute Adhäsion zwischen ST-Material und Substrat geben, es muss ein geeignetes Oberflächenvorbehandlungsverfahren dafür geben.
- 3. Das ST-Material muss mindestens die gleichen chemischen Eigenschaften bzw. Resistenzen aufweisen wie das Substrat. Die Verbindung darf dadurch nicht eingeschränkt werden.

4.5 Die Arbeitshypothesen

Die Arbeitshypothesen dieser Arbeit sind in folgenden sechs Punkten aufgeführt:

- 1. Thermoplaststreifen können verwendet werden, um die Oberfläche zäh zu modifizieren.
- 2. Vakuum-UV Licht eignet sich zur Oberflächenvorbehandlung der dünnen Thermoplaststreifen.
- 3. Die Wirkung der Oberflächenzähmodifikation lässt sich experimentell nachweisen.
- 4. Die Oberflächenzähmodifikation hat keinen negativen Effekt auf die intralaminare Festigkeit des Substrates.
- 5. Die verbesserte Lastverteilung lässt sich experimentell wie numerisch beweisen.
- 6. Die Anwendung der Oberflächenzähmodifikation ist unabhängig von Fertigungsweise und Klebstoffapplikation und somit hochratenfähig für die Industrie einsetzbar.

4.6 Zusammenfassung der lokalen Oberflächenzähmodifikation

Die lokale Oberflächenzähmodifikation ist eine spannungsreduzierende Maßnahme für reine Klebverbindungen und wirkt dadurch rissstoppend. Ebenfalls verbessert die Technologie die Verbindungsfestigkeit. Durch die einfache Implementierung eines lokalen, duktilen Bereichs in die Fügeteiloberfläche primär eines Faserverbundwerkstoffs ist die Technologie gut zu automatisieren und somit hochratenfähig in der Industrie einsetzbar. Die Vorteile von Faserverbundwerkstoffen können somit mit den Vorteilen der Klebtechnologie verknüpft werden und zu einer höchst leichtbauspezifischen strukturellen Klebverbindung gekoppelt werden.

Dafür notwendig ist die Ausarbeitung der richtigen Materialauswahl (Kapitel 5), der hochratenfähigen Applikation (Kapitel 6), der Nachweiserbringung des Effektes (Kapitel 7), dem Nachweis der Resistenz gegen Umwelteinflüsse (Kapitel 8) sowie der schlussendlich abgeleiteten Designmethodik (Kapitel 9) für die industrielle Anwendung (Kapitel 10).

4.7 Abgrenzung zur Hybrid Bondline

Auf den ersten Blick scheinen sich die Konzepte der *hybrid Bondline* und der lokalen Oberflächenzähmodifikation sehr ähnlich zu sein. Abbildung 4-5 zeigt beide Konzepte zur Rissstoppanwendung anhand einer CLS-Probe.



lokale Oberflächenzähmodifikation

Abbildung 4-5: Grafische Darstellung der Konzepte von lokaler Oberflächenmodifikation (oben) und hybrid Bondline (unten)

Dies täuscht jedoch, da das Grundprinzip hinter beiden Konzepten komplett verschieden ist. Während die Oberflächenzähmodifikation auf eine Reduktion von Spannungskonzentrationen im Klebstoff abzielt, wodurch Risse am weiteren Wachstum gehindert werden, basiert das Konzept der hybrid Bondline, wie in Kapitel 3.6 genannt, auf einem diskreten Materialwechsel, dem *Disbond Stopping Feature* (DSF), der als Barriere für einen Riss wirkt.

Dennoch beruht die Idee zur Oberflächenzähmodifikation auf einer Beobachtung zu getesteten CLS-Proben, bei denen der Riss nicht direkt am DSF gestoppt hat, sondern schon am Beginn des fertigungsbedingt etwas größer eingebrachten Thermoplaststreifens, bei dem ein kleinerer Bereich nur verschweißt war. Dies zeigt Abbildung 4-6.



Abbildung 4-6: Gestoppter Riss unmittelbar am Beginn der Thermoplaststreifen im Klebstoff einer dynamisch belasteten CLS Probe mit DSF der Hybrid Bondline, angepasst aus [98]

Der aus Abbildung 4-5 zu entnehmende wichtigste Unterschied der lokalen Oberflächenzähmodifikation zur *hybrid Bondline* ist die Unabhängigkeit der Fügepartner bei der Verklebung. Während die hybrid Bondline verklebt und verschweißt werden muss und somit unmittelbar auf einen aufschmelzbaren Thermoplasten als DSF angewiesen ist, welcher im gleichen Temperaurbereich wie die Aushärtung des Klebstoffes geschehen muss, stehen der lokalen Oberflächenzähmodifikation deutlich mehr Freiheiten in der Umsetzung und Anwendung sowie Automatisierung zur Verfügung. Weiter konnte das Konzept der hybrid Bondline bisher nur auf Couponprobengröße umgesetzt werden.

Somit ermöglicht die lokale Oberflächenzähmodifikation eine industrialisierbare und hochratenfähige Lösung für ein Rissstoppkonzept in der Luftfahrt.

.

5. Materialauswahl und Charakterisierung

Gibt es ein Material, welches den Anforderungen zur lokalen Oberflächenzähmodifikation genügt?

5.1 Das Vorgehen, die Probekörper und deren Normen

Die Untersuchungen in dieser Arbeit werden überwiegend experimentell durchgeführt. Daher werden an dieser Stelle zum besseren Verständnis die verwendeten Probekörper und deren abzuleitenden Erkenntnisse erklärt und in die Nachweispyramide zur Strukturzulassung in der Luftfahrt in Abbildung 5-1 eingeordnet [13].

In diesem Kapitel 5 startet die Materialidentifikation mit Couponproben, welche das erste Level der Nachweispyramide darstellen und die Grundlage für alle weiteren Betrachtungen bilden. Mithilfe der gewonnenen Materialkenntnisse wird dann aus dem meist einachsigen Belastungszustand in die Elementebene aufgestiegen, in der mehrere Materialien einen Verbund darstellen und Effekte unter teils mehrachsigen Belastungen untersucht werden können. Mit Schwerpunkt Fertigung geschieht dies in Kapitel 6. Die Identifikation des Effektes von ST ist in Kapitel 7 aufgeführt und unter Beachtung von Umwelteinflüssen zusätzlich in Kapitel 8. Abschließend wird in Kapitel 10 die Technologie an verschiedenen Fallstudien auf Detailebene vorgestellt. Zusammenfassend ist die Einordnung in Abbildung 5-1 dargestellt.



Abbildung 5-1: Nachweispyramide zur Strukturzulassung in der Luftfahrt [13], die schwarze Umrandung zeigt die vorkommenden Proben bzw. Strukturen dieser Arbeit

Alle in dieser Arbeit verwendeten Probekörper sind in Tabelle 5-1, chronologisch in Arbeit auftretend, aufgeführt. Die Proben werden nur in Anlehnung an die genannten Normen gefertigt und getestet und im Detail an verwendeter Stelle erklärt.

Probe	Erklärung und Erkenntnis	Norm	Geometrie und Belastung
DSC	Differential Scanning Calorimetry, Identifikation von Schmelz- und Glasübergangstemperaturen	DIN EN ISO 11357-1	******
DMA	Dynamic Mechanical Analysis, Identifikation des Elastizitätsmoduls	ASTM D 7028	
TAST	Thick Adherend Shear Test, Identifikation von Schubmodul, Gleitung und Schubfestigkeit des Klebstoffes	ASTM D 5656	
DCB	Double Cantilever Beam Probe Bestimmung des Klebstoff-GIC Wertes	ISO 25217	
ENF	End-Notched Flexure Probe, Bestimmung des Klebstoff-Guc Wertes	DIN EN 6034	
Zug- Probe	Identifikation von Elastizitätzmodul, Bruchdehnung und Festigkeit	EN ISO 527-4 [103]	
SLS	Single Lap Shear Probe, Identifikation der Verbindungsfestigkeit unter kombinierter Mode I und Mode II Belastung	ASTM D 5868	
CLS	Cracked Lap Shear Probe, Identifikation der Verbindungs- festigkeit unter primär Mode II	-	

Tabelle 5-1: In dieser Arbeit verwendete Probekörper mit Belastung

Genannt werden im Weiteren nur die Materialien, welche auch für die Versuche verwendet werden.

5.2 Fügeteilauswahl

Der Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation ist, wie anfangs schon erwähnt, hauptsächlich für die Anwendung in Faserverbundstrukturen konzipiert. Dennoch wird parallel der Effekt auch bei metallischen Materialien als Fügepartner mituntersucht. Hintergrund ist dabei auch die Vereinfachung des bruchmechanischen Verhaltens von Metallen durch ihren isotropen Aufbau, der bei dem Verständnis in späteren Versuchen nützlich ist.

5.2.1 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Als Faserverbundmaterial wird das von Hexel vertriebene Prepreg HexPly[®] 8552/IM7 verwendet, welches ausgehärtet als schadensresistentes, zähmodifiziertes Kohlenstofffaserverstärktes Kunststoff (CFK)-Laminat mit hoher Festigkeit gilt [104] und zu den duromeren Kunststoffen gehört. Die Materialdaten der unidirektionalen (UD)-Lage sind in Tabelle 5-2 aufgeführt und entstammen dem Datenblatt aus [104].

E11	E22	G21	V 21
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
172322	9291	5450	0,32

Tabelle 5-2: Materialkennwerte der UD-Lage

Die Festigkeiten sind in folgender Tabelle 5-3 aufgeführt.

σ ,BZ	σ ,BD	σ _L ,bz	$\sigma_{\rm LBD}$	τ #,Β
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
2491	1226	65	258	94

Tabelle 5-3: Festigkeitswerte der UD-Lage

Entwickelt wurde das Material für den Einsatz in Primärstrukturen der Luftfahrt. Ausgehärtet wird das Material bei 180 °C im Autoklavprozess bei einem Differenzdruck von 8bar und einer Prozesszykluszeit von 4,5 Stunden.



Abbildung 5-2: Aushärtezyklus des Prepregs HexPly[®] 8552/IM7 von Hexcel in dieser Arbeit angelehnt an [104]

Die Probekörper haben im weiteren Verlauf der Arbeit eine Dicke von 2 mm. Mit einer Einzellagenstärke von 0,125 mm werden somit Laminate, bestehend aus 16 Einzellagen hergestellt. Da in der Luftfahrt quasiisotrope Laminate aufgrund von schadenstoleranten Hintergründen verwendet werden [105], werden auch in dieser Arbeit solche Laminataufbauten verwendet. Der Aufbau sieht wie folgt aus.

Lagenanzahl	Aufbau	Laminatdicke
16	[0, -45, 90, 45, 0, -45, 90, 45]s	2 mm

Tabelle 5-4: Laminataufbau dieser Arbeit

Im Normalfall ist in der Luftfahrt die Interfacelage, also die äußerste Lage, nicht in reine Lastrichtung gerichtet, da diese leicht beschädigt werden könnte, da sie nicht von anderen Lagen geschützt wird. Aus Voruntersuchungen [106] ist allerdings bekannt, dass bei Probenbreiten von üblichen 25,4 mm (1 Inch) besonders schnell die 90°Lagen auf Zwischenfaserbruch versagen, bzw. die ±45° Lagen schnell delaminieren (vgl. Abbildung 2-18), da sie kaum Anbindung an das restliche Laminat in Breitenrichtung besitzen. Versuche mit diesem Aufbau besitzen somit keine Aussagekraft über die eigentliche Klebstoffanbindung bzw. Verbindungsfestigkeit und es wird daher auf den üblichen Lagenaufbau der Luftfahrt verzichtet und die Interfacelage bewusst in Lastrichtung orientiert.

Mithilfe von durchgeführten Zugversuchen nach der Norm EN ISO 527-4 [103] werden die Materialkennwerte aus Tabelle 5-5 ermittelt.



Abbildung 5-3: Laminatzugprobe mit Lagenaufbau aus Tabelle 5-4

FL,max	EL,Br	σ L,Br	EL
[kN]	[%]	[MPa]	[MPa]
37,03	1,46	895,04	60579

Tabelle 5-5: Festigkeitswerte für das verwendete Laminat aus Tabelle 5-4

5.2.2 Aluminium

Als Leichtbauwerkstoff wird auch Aluminium im Flugzeugbau eingesetzt. Als bekannteste Vertreter dieser Werkstoffgruppe sind dabei die Legierungen ENAW 2024 und ENAW 7075 zu nennen [107]. Aluminium der Legierung ENAW 2024 mit Hauptlegierungszusatz Kupfer wird dabei vor allem mit Hinblick der guten Ermüdungsfestigkeit verwendet. Als Anwendungsbeispiel sind Schubfelder und Rippen im Flugzeug zu nennen. Die Legierung ENAW 7075 mit Hauptlegierungszusatz Zink und Magnesium besitzt eine höhere Materialfestigkeit, wodurch diese Legierung bei hochbelasteten, oberen Hautfeldern am Rumpf zum Einsatz kommt, welche auch durch hohe Kompressionslasten belastet werden [108].

Um bei Versuchen den Unterschied zwischen einer spröderen und hochfesten und einer duktilen weniger festen Aluminiumlegierung zu identifizieren, wird anstatt der ENAW 2024 Legierung auf die 5000er-Reihe mit ENAW 5754 und ENAW 5083 ausgewichen, welche noch deutlich weicher sind. Alle Aluminiumlegierungen sind in Tabelle 5-6 aufgeführt:

Legierung	R _m (min)	R _{p0,2} (min)	EBr	Е
ENAW	MPa	MPa	[%]	[GPa]
2024 T351	435	290	14	73
5083 H111	270	115	15	71
5754 H22	220	130	11	70,5
7075 T651	540	470	7	72

Tabelle 5-6: Materialwerte der verwendeten Aluminiumlegierungen aus der Literatur nach[109] und [110]

5.2.3 Stahl

Stahl wird im Flugzugbau aufgrund seiner fast dreimal höheren Dichte als Aluminium bei nur leicht höherer Festigkeit nicht verwendet. In dieser Arbeit eignet sich Stahl aber als hochsteifes Gegenstück zum relativ weichen Aluminium und soll bei der Identifikation des Effektes der lokalen Oberflächenzähmodifikation dienen. Daher wird auch der Werkstoff Edelstahl, auch als V2A bzw. 1.4301 bekannt, in dieser Arbeit verwendet.

Stahl	R _m (min)	R _{p0,2} (min)	EBr	E
-	MPa	MPa	[%]	[GPa]
1.4301	500	190	45	200



5.3 Klebstoffauswahl

Als Klebstoffsystem werden gezielt ein Filmklebstoff mit erhöhter Aushärtetemperatur und ein pastöses Klebstoffsystem ausgewählt, welches bereits bei Raumtemperatur aushärtet. Somit stehen der Fertigung in Kapitel 6 die üblichen, in der Industrie verwendeten, Klebstoffsysteme zur Verfügung.

5.3.1 Filmklebstoff Henkel Hysol EA9695 050NW Aero

Als Filmklebstoff wird der auf Epoxidbasis bestehende EA9695 050 NW Aero verwendetet, welcher mit einem Trägerflies ausgestattet ist. Dadurch soll eine nominale Klebschichtdicke von 0,1 mm erreicht werden. Der Klebstoff besitzt eine hervorragende Resistenz gegen Umwelteinflüsse und härtet schon bei 121 °C aus. Der Klebstoff wird daher vermehrt als Reparaturklebstoff eingesetzt [67]. In dieser Arbeit wird der Klebstoff nach folgendem Ablauf aus Abbildung 5-4 ausgehärtet.



Abbildung 5-4: Aushärtezyklus des Filmklebstoffes Hysol EA9695 050NW Aero

Die Materialwerte werden in Anlehnung an die ASTM D 5656 ertestet. In Zugscherversuchen mittels TAST-Probekörpern [48, 113] sind die Werte ermittelt und in folgender Tabelle 5-8 aufgeführt.

O K,Br(1)	EK(1)	Gк	E K,Br(2)	$\gamma_{\mathrm{K,Br}}$	τĸ,Br	νκ
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[-]
59,17	2576,8	640	3,44	0,33	51,4	0,43

Tabelle 5-8: Materialwerte des verwendeten Filmklebstoffes ertestet bzw. aus der Literatur (1)nach [98] und (2) nach [114] bei Raumtemperatur

Da in dieser Arbeit auch andere Temperaturbereiche untersucht werden und dabei die Steifigkeiten des Klebstoffes entscheidend sind, werden zusätzlich Dynamische Mechanische Analysen (DMA) mit dem Klebstoff bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Untersucht werden dabei die Temperaturen von -55 °C, welche für die Temperatur in Reiseflughöhe steht, -22 °C als Zwischenschritt bis zur Raumtemperatur von 21 °C und der erhöhten Temperatur von

80 °C, welche als maximale Oberflächentemperatur der Struktur von Flügel, Rumpf und Leitwerk von am Boden stehenden Flugzeugen gewählt ist. Die ermittelten Elastizitäten weichen dabei von Knochenproben etwas ab. Dies liegt an der Verwendung von dünnsten Folien von 0,1 mm als Probematerial in der DMA, bei der kleinste Abweichungen im Material bzw. bei der Vermessung schon große Einflüsse haben. Die Werte sind in Tabelle 5-9 aufgelistet:

Т	Ек
[°C]	[MPa]
-55	4745
-22	3637
21	2888
80	2100

 Tabelle 5-9: Elastizitätsmodul des Klebstoffes EA9695 mittels DMA bei verschiedenen

 Temperaturen

5.3.2 Pastöses Klebstoffsystem Henkel Hysol EA9394 Aero

Das pastöse Klebstoffsystem EA 9394 Aero wird aus 50ml Kartuschen bezogen. Es wird ausgewählt, da es auch zur Primärstrukturverklebung in Kapitel 10.2 verwendet wird [115, 116]. Das Klebstoffsystem kann bei 25 °C und 7 Tagen aushärten sowie beschleunigt unter 66 °C und 1h. Ebenfalls wird dieser Klebstoff mittels TAST-Proben charakterisiert. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle aufgeführt:

O K,Br(1)	EK(1)	Gк	EK,Br(1)	$\gamma_{\text{K,Br}}$	τĸ,Br	V K(1)
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[-]
46	4237	975,9	1,66	0,24	39,8	0,45

Tabelle 5-10: Materialwerte des verwendeten pastösen Klebstoffsystems ertestet bzw. aus der Literatur (1) nach [66] bei Raumtemperatur

5.4 Zähmodifizierendes Material

Als zähmodifizierendes Material wird ein Kunststoff gesucht, der die aus Kapitel 4.3 genannten Anforderungen erfüllt. Wichtig dabei ist eine gute Anbindung an das Substrat. Dies basiert in dieser Arbeit auf einem duromeren Epoxidsystem und wird weiter in Kapitel 6 beschrieben. Im Gegensatz zu Löbels Arbeit muss an dieser Stelle nicht auf eine Temperaturobergrenze zwecks der Schweißbarkeit geachtet werden. Vielmehr wird der Schwerpunkt auf die Materialsteifigkeit und die Bruchdehnung gelegt.

Aus der Literatur sind dabei folgende Thermoplaste identifiziert worden, die sowohl gut anhaftend sind, als auch im Bereich der gewünschten Steifigkeiten leicht unterhalb der des Klebstoffes liegen. Die gute Anhaftung von PVDF an ein Substrat auf Epoxidbasis hat Löbel in [98] ausführlich gezeigt, bei PEI, PES und PA6 hat Kyriatzis dies in [117] und [118] untersucht

Material	$R_{\rm e}$	R_m	Е	EBr	ν
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]
PVDF	50,7(1)	51,5(1)	1716,1(1)	35(2)	0,46(1)
PEI	90(3)	100(3)	2400(3)	100(3)	-
PES	70(3)	75(3)	2400(3)	100(3)	-
PA6	80(4)	95(4)	3200(4)	150(5)	-
PEEK	90(3)	130(3)	3200(3)	170(3)	-

und für PEEK hat Arikan in [119] ausführliche Studien durchgeführt. In Tabelle 5-11 sind die Thermoplaste nach steigender Steifigkeit aufgeführt:

Tabelle 5-11: Materialwerte von möglichen Thermoplasten bei Raumtemperatur aus der
Literatur (1) nach [98], (2) nach [120] (3) nach [121], (4) nach [122], (5) nach [123]

Kyriatzis beschreibt in seiner Arbeit jedoch auch ein gutes Lösungsverhalten von PEI und PES in der Epoxidmatrix während des Aushärtevorgangs. Da dieses Verhalten aber nicht gewünscht ist, wird vorerst auf die Nutzung dieser möglichen Materialien zur Zähmodifikation verzichtet. Da PA6 und PEEK die gleiche Materialsteifigkeit besitzt, jedoch PEEK höhere Festigkeiten und Bruchdehnungen aufweist, wird auf PA6 als zähmodifizierendes Material verzichtet.

Weiter betrachtet werden daher PVDF und PEEK.

5.4.1 PVDF

PVDF, bzw. in Langform als Polyvinylidenfluorid bezeichnet, gehört zur Gruppe der teilkristallinen thermoplastischen Fluorkunststoffe. Auf technischer Ebene wird PVDF in den Bereich der technischen Thermoplaste eingeteilt und besitzt die sich wiederholende Strukturformel aus Abbildung 5-5.



Abbildung 5-5: Strukturformel von PVDF nach [124]

PVDF kann dabei fünf verschiedene polykristalline Anordnungen aufweisen, welche unterschiedliche Eigenschaften haben [125, 126]. Dies sind die α-, β-, γ-, δ- und ε-Phase, bei der die α-Phase die bekannteste und technisch genutzte Form ist, welche durch langsames Abkühlen der Schmelze unterhalb von 168 °C entsteht und nicht polar ist [127].

Durch Anlegen eines sehr starken elektrischen Feldes kann jedoch die Anordnung der Moleküle im harten Zustand so verändert werden, dass die γ -Phase entsteht und eine leichter piezoelektrischer Effekt erzeugt wird [128]. Die β -Phase ist dabei die bekannte polare Phase mit Zickzack-Anordnung von CH₂ auf einer Seite und CF₂ auf der anderen. Diese Phase hat dadurch eine gute piezoelektrische Eigenschaft. Dies kann durch Zugabe von Nanopartikeln wie Titandioxid im flüssigen Zustand erreicht werden. Neben der γ -Phase haben auch die δ - und ϵ -Phase nur geringe piezoelektrische Effekte und sind daher nicht relevant.

In dieser Arbeit ist PVDF als zähmodifizierendes Material ausgewählt, da es neben der Steifigkeit auch hervorragende Resistenzen gegen Umwelteinflüsse wie Feuchte, Säuren und Basen und Strahlung sowie Schmierstoffe besitzt. Der piezoelektrische Effekt wird nicht weiter berücksichtigt und wirkt wegen der Möglichkeit zur Polarität eher negativ auf die hier untersuchten Effekte.

Ebenfalls ist PVDF ein in der Industrie viel gefragtes Material, wodurch die Beschaffung und der Preis stark beeinflusst werden. Das von Löbel in [98] verwendete PVDF ist Kynar[®] 740 mit Materialstärke 0,125mm. Das Material ist hergestellt von der Firma Arkema und bezogen und verarbeitet von der Firma CS Hyde. Zur Zeit dieser Arbeit wird das Material nicht vertrieben bzw. produziert. Alternativ kann Kynar[®] 720 mit selber Materialstärke bezogen werden. Laut Hersteller handelt es sich um ein Monopolymer. Weitere Informationen über die Mischung bzw. den Aufbau des Materials sind nicht zu bekommen. Daher wird ein alternatives PVDF-Monopolymer und Copolymer Nowoflon der Firma Nowofol[®] mit einer Materialstärke von 0,1mm beschafft. Ein Adhäsionsversuch Abbildung C-1 zeigt dabei aber, dass weder das Homopolymer Kynar[®] 720 noch das Homopolymer von Nowofol[®] an einer Epoxidmatrix haften. Daher wird in dieser Arbeit das Copolymer Copo FL2608 von Nowofol[®] verwendet. Zur Sicherheit werden mittels DSC und DMA die Materialeigenschaften zu Kynar[®] 740 abgeglichen um vergleichbare Aussagen zu Löbel treffen zu können. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 5-12 aufgeführt:

Material	t	Tg	Ts	E-55°C	E-22°C	E21°C	E80°C	Kosten
[-]	[mm]	[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[€/m²]
Kynar 740	0,125	-41,76	167,9	5348	2560	1830	547	64 (2013)
Copo Fl2608	0,1	-40,16	159,7	4459	1670	1398	319	9 (2018)

Neben dem Preis des Materials ist der Unterschied in der Materialsteifigkeit zu erkennen. Bei Raumtemperatur ist das Kynar[®] 740 etwa 23% steifer als das Copolymer von Nowofol[®]. Mögliche Unterschiede stellen sich bei den Versuchen heraus.

5.4.2 PEEK

PEEK bzw. in ausgeschriebener Version Polyetheretherketon gehört zu den Hochleistungsthermoplasten und bildet nahezu die Spitze der bekannten technisch genutzten Thermoplaste, was Tabelle 5-11 bekräftigt. Neben den sehr guten mechanischen Eigenschaften besitzt PEEK eine sehr gute Wärmebeständigkeit, was auf der hohen Schmelztemperatur von 343 °C beruht. PEEK besitzt weiter eine sehr gute Chemikalienbeständigkeit und ist resistent gegen radioaktive Strahlung. [129] PEEK weist die folgende Strukturformel auf:



Abbildung 5-6: Strukturformel von PEEK nach [130]

Verwendet wird die teilkristalline Ausführung des PEEKs, da nach Herstellerangabe die amorphe Ausführung nur bei sehr schnellem Abkühlen bestehen bleibt. Ein Abkühlen bereits von 180 °C auf Raumtemperatur führt schon zur kristallinen Form des Materials.

Material	t	Tg	T_s	E-55 ℃	E -22 ℃	E23°C	E80°C	Kosten
[-]	[mm]	[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[€/m²]
Lite TK PEEK	0,125	155,6	343	3812	3601	3362	3050	50 (2018)

Tabelle 5-13: Materialwerte aus DSC und DMA sowie die Kosten

5.5 Kapitelzusammenfassung

In Kapitel 5 werden als Fügepartnerwerkstoff neben dem hauptsächlich betrachteten CFK-Laminat aus Hexcel 8552/IM7 Material, unterschiedlich feste Aluminiumlegierungen und auch ein Edelstahl ausgewählt. Die Technologie wird hauptsächlich für Faserverbunde entwickelt, jedoch ist die Bruchmechanik im Verhältnis zu Metallen deutlich komplexer und es werden sich daher bei der Versuchsdurchführung mit Metallen Vereinfachungen bei der Interpretation in Kapitel 7 erhofft. Die Steifigkeiten der Materialien aller verwendeten Fügepartner sind in folgender Abbildung 5-7 zu sehen:



Abbildung 5-7: Idealisierter, qualitativer Vergleich der Steifigkeiten der verwendeten Fügepartner bis 2 % Dehnung. Verläufe angepasst aus [131] für ENAW 2024, [132] für ENAW 5083, [133] für ENAW 5754, [134] für ENAW 7075 und [135] für 1.4301

Die Auswahl des Klebstoffes basiert auf der Annahme, dass Filmklebstoffe sowie pastöse Klebstoffsysteme verwendet werden können. Es werden daher bekannte branchenübliche Strukturklebstoffsysteme EA9695 als Filmklebstoff und EA9394 als pastöses System des Herstellers Henkel verwendet.

Das Material zur Oberflächenzähmodifikation wird nach den zwei folgenden Ansätzen ausgewählt:

$$E_{F\ddot{u}gepartner} \gg E_{Klebstoff} \ge E_{Oberfl\ddot{a}chenz\ddot{a}hmodifikation}$$
 (5-1)

Die Steifigkeit der Fügepartner muss deutlich größer sein, als die des Klebstoffes und des Materials zur Oberflächenzähmodifikation, sodass eine Lastumlagerung an den hochbelasteten Randbereichen stattfinden kann. Weiter muss die Bruchdehnung des Zähmodifizierenden Materials wiederum deutlich größer sein, als die des Klebstoffes und der Fügepartner, sodass kein vorzeitiges Versagen in diesen Bereichen stattfindet.

$$\varepsilon_{Bruch \ Oberflächenzähmodifikation} \gg \varepsilon_{Bruch \ Klebstoff} > \varepsilon_{Bruch \ Fügepartner}$$
(5-2)

Als zähmodifizierendes Material wird daher PVDF und PEEK ausgewählt. Die Steifigkeiten der Klebstoffe und der zähmodifizierenden Materialien sind in Abbildung 5-8 aufgeführt.



Abbildung 5-8: Idealisierter, qualitativer Vergleich der Steifigkeiten der verwendeten Klebstoffe und Materialien zur Oberflächenzähmodifikation bis 4 % Dehnung. Verläufe angepasst aus [136] für PVDF und [137] für PEEK

PEEK besitzt zwar ein etwas höheres Elastizitätsmodul als der Filmklebstoff EA9695 und erfüllt damit nicht ganz Gleichung (5-1), jedoch wird das Material bewusst verwendet, um den Einfluss der Materialsteifigkeit auf den zähmodifizierenden Effekt zu untersuchen.

6.Hochratenfähige Fertigung zähmodifizierter Bauteile

Ist eine reproduzierbare Fertigung von Surface Toughening möglich und erfüllt diese die Ansprüche der industriellen Einsetzbarkeit?

Der Einsatz von Faserverbundleichtbauwerkstoffen in der zivilen Luftfahrt ist die letzten Jahre rasant gestiegen. Der aktuell gebaute A350 XWB besteht zu etwa 54 % aus diesem Werkstoff [138]. Dazu zählen bspw. der komplette Rumpf, die Flügel sowie das Leitwerk. Da durch die Globalisierung ebenfalls die Passagierzahlen um etwa 6 % jährlich steigen [139], müssen die Flugzeughersteller demnach ihre Produktion diesem Wachstum anpassen. Unter dem Begriff hochratenfähige Produktion wird bspw. für den A350 eine Fertigungsrate von 72 Stück pro Jahr angestrebt¹. Berücksichtigt werden muss dabei der hohe Grad der Automatisierung gerade im Bereich des Faserverbundbaus, welcher im Bereich der privaten Luftfahrt, der Windenergie und Schifffahrt als ein sehr kostenintensiver Faktor mittels Handarbeit umgesetzt wird.

Unter dem Aspekt **Hochratenfähigkeit** wird in dieser Arbeit stets die Möglichkeit der vollen Automatisierung berücksichtigt. Gefertigt wird zwar alles in Handarbeit, dies liegt aber lediglich an der geringen Stückzahl von Proben und Demonstratoren. Alle getätigten Fertigungsschritte können auch durch Roboter bzw. das im Faserverbundbau entwickelte *Automated Fiber Placement* (AFP) [141] also die automatisierte Faserablage mittels Roboter zur Laminatherstellung durchgeführt werden. Ein Roboterkopf positioniert dabei schmale Endlosfaserstreifen (*Slit Tapes*) auf einer Ablageform und bildet somit das Laminat, welches anschließend ausgehärtet wird.

In diesem Kapitel der Fokus auf die **Bauteilfertigung** gelegt und gliedert sich wiederum in die Herstellung des Laminates samt Oberflächenzähmodifikation sowie die Oberflächenvorbehandlung und den abschließenden Klebprozess.

6.1 Oberflächenvorbehandlung

Die Oberflächenvorbehandlung ist entscheidend für die Adhäsion zwischen den zu verklebenden Stoffen. Tritt hierbei ein Fehler auf bzw. ist die Behandlung, welche aus Reinigung und Aktivierung der Oberfläche besteht, ungenügend durchgeführt, so entstehen schlechte Anhaftungen (*weak bonds*), welche dann unter Belastung adhäsiv versagen. Eine Aussage über die eigentliche Klebverbindung kann dann nicht getroffen werden.

Da in dieser Arbeit verschiedene Materialien verwendet werden, müssen auch entsprechende Vorbehandlungsverfahren angewendet werden. Das Ziel dabei ist, eine reproduzierbare Qualität

¹ 6 Stück pro Monat bezogen auf die Situation vor dem Ukrainekrieg 2022 aber mit Berücksichtigung von Covid 19 [140].

ermöglichen. und eine automatisierbare Anwendung zu Einen Leitfaden zur Oberflächenvorbehandlung liefert dabei die Norm DIN EN 13887:2003 "Leitlinien für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben" [142]. Im Weiteren werden die in dieser Arbeit untersuchten und schließlich nur verwendeten Oberflächenvorbehandlungsverfahren beschrieben. Unterteilt sind diese in mechanische Verfahren wie Schleifen und Sandstrahlen und physikalische Verfahren wie Plasma- und die VUV-Vorbehandlung.

6.1.1 Vorbehandlung von Metallen

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen zur Verklebung von Metallen in der Arbeit eingegangen. Es wird kurz erklärt, warum welches Verfahren angewendet wird. Abschließend folgt ein Vergleich der Verfahren, da die metallische Vorbehandlung erst zur Zeit dieser Arbeit im Institut eingeführt wurde.

Schleifen

Schleifen gehört zu den wohl bekanntesten Oberflächenvorbehandlungen und gleich auch zu den herausforderndsten. Da der Schleifprozess nicht automatisierbar stattfinden kann, wird diese Vorbehandlung nur von hochqualifizierten Technikern mit viel Erfahrung angewendet, da durch Wahl des Schleifmittels, Anpressdruck und Abnutzungsgrad des Schleifmittels ein ständiges kontrollieren und bewerten der Oberfläche notwendig ist. Werden Metalle geschliffen, oxidieren die Oberflächen zudem unterschiedlich schnell wieder, weswegen es zu vorgegebenen Zeitintervallen von Schleifpapierwechsel in der Industrie kommt. Werden zudem Faserverbundstrukturen nass geschliffen, ist ein hohes Maß an Erfahrung notwendig, um bspw. überschüssiges Harz wegzuschleifen, während die darunterliegende erste Faserlage nicht angeschliffen und damit beschädigt werden darf. Schleifen wird daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht angewendet, aber als Vergleichsgrundlage in Voruntersuchungen herangezogen.



Abbildung 6-1: Links: Unbehandelte Aluminiumoberfläche, rechts: geschliffene Oberfläche mit P350 Schleifpapier jeweils mit Wassertropfen zur Kontaktwinkelbestimmung

Sandstrahlen

Sandstrahlen ist ein gutes, schnelles, aber unpräzises Oberflächenvorbehandlungsverfahren für Metalle. In dieser Arbeit werden die Aluminiumsubstrate zur Herstellung der TAST Proben aus Kapitel 5.3 damit vorbehandelt. Das dabei verwendete Strahlgut ist ein Aluminiumoxid Al₂O₃ (Edelkorund) mit einer Korngröße von 50 μ m bis 70 μ m. Mit einem Winkel von 45° und einem

Abstand von 20 cm wird die Oberfläche leicht kreisend bearbeitet. Der Vorteil besteht dabei in der Geschwindigkeit der vorzubehandelnden Fläche. Sandstrahlen ist ein sehr schnelles Verfahren, hat jedoch einen deutlichen Nachteil, dass das Strahlmittel nachträglich nicht komplett von der behandelten Oberfläche entfernt werden kann, da es teils splitterartig in der Substratoberfläche hängen bleibt und somit die Kleboberfläche negativ beeinträchtigt.



Abbildung 6-2: Gestrahlte Aluminiumoberfläche mit F220 Strahlmittel mit Wassertropfen zur Kontaktwinkelbestimmung

Je nach Oberflächenbeschaffenheit im Metall entstehen lokale Störungen bspw. durch Verfestigungen oder Oberflächenbeschädigungen. Die Defekte sind in Abbildung 6-3 dargestellt.



Abbildung 6-3: Detailaufnahme aus Abbildung 6-2, a) helle Punkte sind Strahlmittelrückstände, welche nicht abgespült werden können, b) besonders im Windschatten von lokalen Verfestigungen im Metall sammeln sich die Partikel, kein gleichmäßiger Abtrag

Laservorbehandlung

Die Laservorbehandlung ist hingegen ein sehr präzises und reproduzierbares Oberflächenvorbehandlungsverfahren für Metalle. Verwendet wird das Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung der Aluminiumsubstrate in Kapitel 6.1.3, da die Stufen zur Einbringung des PVDF mit dieser Vorbehandlung präzise erhalten bleiben. Da die Technologie für die Arbeit neu angeschafft wurde, müssen vorab Voruntersuchungen durchgeführt werden. Genutzt wird dabei die Anlage CC1170 der Firma cleanLaser mit einem 1064 nm Laser. Ausgestattet ist die Anlage mit einem 254 mm Objektiv und besitzt damit einen Arbeitsbereich von 180x180mm.

Parameter	
Leistung	50W
Wellenlänge	1064 nm
Objektiv	254 mm
Abstand zu Objektiv	362 mm
Überlappung	30 %

Die Parameter der Anlage sind in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Tabelle 6-1: Parameter der verwendeten Laserreinigungsanlage CC1170

Hergestellt werden Vergleichsproben mit folgenden Einstellungsparametern:

Bezeichnung	Frequenz	Geschwindigkeit
L1	200kHz	10600 mm/s
L2	150kHz	7950 mm/s
L3	100kHz	5300 mm/s
L4	50kHz	2650 mm/s

Tabelle 6-2: Verwendete Vorbehandlungsparameter des Lasers aus Abbildung 6-4

Orientiert wird sich dabei an der Hilfestellung des Herstellers und der Literatur aus [143]. Mittels des Lasers kann die Oberfläche gezielt aufgeschmolzen und strukturiert werden. Zudem erzeugt der Laser eine gezielte Oxidschicht, an der der Klebstoff später gut anhaftet. Weiter passiviert die Oxidschicht das Material, wodurch die Oberflächenvorbehandlung auch langzeitstabil ist.



Abbildung 6-4: Vergleich der vorbehandelten Oberflächen mittels Laserreinigungsanlage mit Tropfen zur Kontaktwinkelbestimmung

6.1.2 Vorbehandlung von Kunststoffen

Plasma

Die Oberflächenvorbehandlung Plasma gehört den physikalischen mit zu Vorbehandlungsverfahren. Genauer gesagt handelt es sich in dieser Arbeit um die von Löbel [98] angewendete Atmosphärendruck Plasmatechnologie, welche in dieser Arbeit vereinfacht als Plasmavorbehandlung bezeichnet wird. Beim Atmosphärendruckplasma wird durch ein elektrisches Feld und ein Prozessgas in der Düse ein Plasmazustand erzeugt. Das aus Ionen bestehende Gasgemisch trifft auf die Oberfläche des Substrates und entfernt dabei Fremdkörper durch Oxidation bzw. polarisiert die Oberfläche durch das geladene Plasma [144]. Dieser aktivierte Zustand ist temporär und erlischt in Löbels Untersuchungen nach etwa zwei Wochen. Der Vorteil ist die gute Reproduzierbarkeit des Verfahrens. Der Nachteil der Behandlung ist die entstehende Wärmeentwicklung des Plasmastrahls von bis zu 300 °C [145], der Kunststoffe auch beschädigen kann. Ebenfalls ist eine plasmabehandelte Oberfläche mit bloßem Auge nicht von einer unbehandelten Oberfläche zu unterscheiden, weshalb bei der Fertigung sehr genau auf die Position des behandelten Werkstücks geachtet werden muss. Konserviert werden kann ein vorbehandeltes Werkstück, eingeschlagen in Aluminiumfolie.

Die von Löbel identifizierten Parameter zur Vorbehandlung sind dabei in Tabelle 6-3 aufgeführt:

Parameter	
Frequenz	23kHz
Spannung	280V
Düsen Geschwindigkeit	100 mm/s
Durchflussmenge	2670l/h
Düsenkopf	PTF 2645-2
Zeilenabstand	3 mm

Tabelle 6-3: Parameter zur Vorbehandlung mittels Lasertreat Atmosphärendruckplasma Anlage

Aufgrund der hohen Wärmeeinwirkung kann nur ein ausgehärtetes Laminat vorbehandelt werden, dünne Folien verbrennen.

VUV

Vakuum Ultraviolettes Licht oder kurz VUV -Licht ist im Lichtspektrum unterhalb von UV-Licht und oberhalb der Röntgenstrahlung einzuordnen. Diese hochenergetische Strahlung mit einer Wellenlänge von 172 nm ist in der Lage, Verbindungen im Kunststoff aufzubrechen und funktionelle Gruppen zu erzeugen [119], wodurch die Benetzbarkeit steigt. Ist das umgebende Medium Sauerstoff, wie beispielsweise bei der Luft, entsteht zusätzlich noch Ozon, welches hochreaktiv zusätzlich organische Gruppen oxidiert [146, 147]. VUV ist ein relativ neuartiges Vorbehandlungsverfahren und besitzt neben der günstigen Anwendung in der Industrie den Vorteil, dass es zu keiner thermischen Einwirkung auf das zu behandelnde Substrat kommt [148], wodurch sich auch dünne Folien vorbehandeln lassen [149]. Eigens wird daher für die Nutzung eine Anlage entwickelt und gebaut. Verwendet wird dabei die Lampe ExciJet 55-130 der Firma Ushio.

Vorbehandelt wird mit folgenden Parametern aus Arikanes Untersuchungen [119] und mit Hilfe des Herstellers [150] und Voruntersuchungen:

Parameter	
Lampe	ExciJet 55-130
Leistungsabgabe der Lampe	20mJ/cm ²
Spannung	24V
Bestrahlungsenergie	540mJ/cm ²
Abstand zur Lampe	0,5 mm

Tabelle 6-4: Parameter zur Vorbehandlung mittels VUV-Anlage

6.1.3 Vergleich der Verfahren

Metallvorbehandlung

Um die einzelnen Oberflächenvorbehandlungsverfahren untereinander vergleichen zu können, werden die unter Kapitel 6.1.1 und Kapitel 6.1.2 vorbehandelten Probekörper mittels Kontaktwinkelmessung mit Wasser und einer Rauheitsmessung unterzogen. Bei der Rauheitsmessung wird die gemittelte Oberflächenrauheit unter grober (10x) und feiner (50x) Auflösung gemessen. Weichen die Rauheitsmessungen voneinander ab, kann daraus der Schluss gezogen werden, dass das Vorbehandlungsverfahren nicht gleichmäßig ist, sondern lokal stärkere oder geringere Eingriffe in die Oberfläche vornimmt bzw. Störungen nicht entfernen kann.

Unter dem Aspekt der hochratenfähigen Fertigung ist natürlich auch die Bearbeitungszeit ein wichtiger Aspekt. In Tabelle 6-5 sind daher die Zeiten für die Vorbehandlung einer 25x25mm Probe aufgeführt.

	A 1-1 (Day
Vorbenandlung	Ablauf	Prozesszeit für 25x25mm
		Fläche in Sekunden
Referenz	Entfetten	<1
L 1	Entfetten, Lasern, Spülen	7
L2	Entfetten, Lasern, Spülen	10,5
L3	Entfetten, Lasern, Spülen	14
L4	Entfetten, Lasern, Spülen	28
Schleifen	Entfetten, Schleifen, Abwischen	35
Plasma	Entfetten, Plasmabehandlung	12,5
Sandstrahlen	Entfetten, Abkleben, Strahlen, Spülen	4

Tabelle 6-5: Ablauf der Vorbehandlungsverfahren mit Prozesszeit (ohne Vor- und Nacharbeit)

Die Ergebnisse der Untersuchung für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

Die Referenz bezeichnet dabei das entfettete, blanke Aluminiumblech, welches vom Werk her plangefräst und mit einer Schutzfolie versehen, geliefert wird. Die entfettete Oberfläche zeigt dabei eine sehr schlechte Benetzbarkeit bei gleichzeitig geringer Oberflächenrauheit unter hoher Auflösung. Unter grober Auflösung ist die Rauheit deutlich größer, was auf Riefen hindeutet, welche auch in Abbildung 6-6 erkannt werden können.



Kontaktwinkel- und Rauhigkeitsmessung

Abbildung 6-5: Vergleich der Oberflächenvorbehandlungen von Metallen

Bei allen Laservorbehandelten Oberflächen (L1 bis L4) fällt sofort auf, dass die Rauheit sehr gleichmäßig ist, dies liegt an dem Effekt, dass der Laser die Oberfläche aufschmilzt, einen Teil verdampfen lässt und die Schmelze ein gezieltes Oxid hinterlässt. Somit werden alle oberflächennahen Unebenheiten entfernt. Die einzelnen Bahnen des Lasers lassen sich in den Höhenkontrastbildern in Abbildung 6-6 für L2 und L3 gut erkennen. Die dabei abgetragene mittlere Höhe liegt bei 2,5 µm für L1, 7,8 µm für L2, 19,8 µm für L3 und 42,7 µm für L4. Das verdampfte Material liegt als weißer Staub auf der Oberfläche und wird mittels Isopropanol berührungslos abgespült. Die Kontaktwinkelmessung zeigt eine deutliche Verbesserung an. Die Probe L3 im Vergleich zu den anderen Laserbehandlungen reduziert den Kontaktwinkel auf 25° und trifft somit den theoretisch guten Bereich für eine Verklebung. Trotz identischer Nachbehandlung ist der Ausreißer jedoch nicht genau zu erklären, da selbst unter dem Mikroskop die Oberflächen von L1 bis L4 sehr ähnlich aussehen.

Das Schleifen und nachträgliche abwischen der Aluminiumoberfläche führt zu groben Riefen in der Oberfläche, was sich in der großen Abweichung bei der Rauheitsmessung zwischen grober und feiner Messung auch widerspiegelt. Die Kontaktwinkelmessung zeigt im Vergleich zur Referenz kaum eine große Verbesserung, was auch aus der Literatur zu entnehmen ist und von Gonzalez-Canche [151] in gleichem Maße bestätigt wird.

Weiter ist auch eine Plasmavorbehandlung durchgeführt worden, welche von der Rauheit her der Referenz entspricht. Daran kann entnommen werden, dass die Vorbehandlung an der Oberfläche makroskopisch nichts ändert. Deutlich ist aber zu erkennen, dass der Kontaktwinkel halbiert und damit stark verbessert wird. Zu erwähnen ist dabei, dass mit den Parametern der Kunststoffvorbehandlung gearbeitet wurden. Der Literatur ist aus [152] zu entnehmen, dass mit ähnlichen Einstellungen die Verfahrgeschwindigkeit aber ca. 120x langsamer ist, was zu deutlichem Wärmeeintrag in das Substrat führt und somit das Metall oxidieren lässt und damit die Oberfläche stark verändert. Weiter wäre das Vorbehandlungsverfahren somit nicht wettbewerbsfähig mit den anderen Verfahren in Bezug auf die Prozesszeit nach Tabelle 6-5.

Als letztes Verfahren wird Sandstrahlen angewendet, welches im direkten Vergleich als zügiges und technisch einfaches Verfahren bezeichnet werden kann. Es erzielt eine gute Rauheit, allerdings mit den schon genannten Nachteilen, dass lokal mehr oder weniger abgetragen wird, wodurch ein Unterschied zwischen grober und feiner Auflösung entsteht. Qualitativ ist das Ergebnis im Höhenkontrastbild aus Abbildung 6-6 mit denen der Laserbehandelten L2-L4 Proben zu vergleichen. Ebenfalls fällt die Kontaktwinkelmessung mit knapp über 30° gut aus.

Erwähnt werden muss dabei, dass bis auf die Laservorbehandelten Proben die Oberflächen nur zur Verklebung der Oberflächen für einen sehr kurzen Zeitraum angedacht sind. Gerade Aluminium passiviert sich, also bildet nachträglich eine Oxidschicht und löst sich somit vom Klebstoff wieder ab. Für eine langfristige Verklebung müssen die Oberflächen nach der physischen Vorbehandlung noch chemisch behandelt werden. In der Luftfahrt sind hierfür früher sehr umweltfreundliche und giftige Verfahren wie das Anodisieren mit Phosphorsäure [153] oder dem Natriumdichromat/Schwefelsäure-Ätzverfahren [154] verwendet worden. Heutzutage wird bspw. das umweltfreundlichere wasserbasierte Sol-Gel (*Solution Gelation*) [155] Verfahren zur Langzeitbeständigkeit für Klebverbindungen an Aluminium angewendet.

	Vergrößerung 10x	Vergrößerung 50x	Höhenkontrast
Referenz			
Laser 1			
Laser 2		i P	
Laser 3			
Laser 4			
Schleifen			
Plasma	· ·		
Sandstrahlen			

Abbildung 6-6: Mikroskopaufnahme der vorbehandelten Aluminiumoberflächen

Um die Verfahren untereinander auch in Bezug auf die Adhäsionsfähigkeit zwischen Klebstoff und Substrat quantifizieren zu können, werden DCB-Proben aus je 8 mm ENAW 5083 Aluminiumsubstrat hergestellt und getestet. Abbildung 6-7 zeigt dabei die Probe bei der Prüfung. Die Probenbreite beträgt 25 mm. Nach einem 60 mm künstlichen Anriss folgt ein 30 mm Untersuchungsbereich mit den zuvor genannten Verfahren und einem folgenden Referenzbereich, welcher gesandstrahlt wurde, um auf die Vergleichbarkeit der einzelnen Aluminiumprobeplatten schließen zu können. Weiter werden die Proben bei schlechter Anhaftung so nicht schon durch die mechanische Bearbeitung bei der Herstellung zerstört.



Abbildung 6-7: DCB Prüfung von Aluminiumsubstrat (Referenz)

Wichtig für die Untersuchung ist die Kraft beim Anriss der Klebschicht und das entstehende Bruchbild für die Bewertung der Anhaftung.

Die unvorbehandelte, nur entfettete Referenz versagt dabei rein adhäsiv mit spiegelglatter Oberfläche, welche in Abbildung 6-7 im Musterbild eingespannt ist. Dieser Kraftwert wird als 100 % Wert genommen.

Alle vom Laser behandelten Proben erzielen durchweg die besten Ergebnisse und halten etwa das Doppelte zur Referenz. Die deutlich erkennbaren Laserbahnen von L2 und L3 wirken dabei anscheinend negativ auf die Festigkeit, da das eher stochastische Muster von L1 und L4 sowohl die höchsten Festigkeiten, als auch die geringste Standardabweichung aufweisen.

Die Plasmabehandlung weist eine deutlich geringere Festigkeit mit 81 % auf. Trotz identischer Rauheiten und doch deutlich besserer Benetzungsfähigkeit zur Referenz ist das Bruchverhalten allerdings abweichend. Die Probe versagt ebenfalls adhäsiv, jedoch stochastisch verteilt, übergangsweise auch mit sehr geringem randnahem Kohäsionsbruch.

Das Schleifverfahren weißt mit 88 % der Anrisskraft zur Referenz ebenfalls eine geringere Festigkeit auf. Trotz größerer makroskopischer Rauheit ist die Oberfläche mikroskopisch immer noch sehr glatt und bietet durch die aufragenden Kanten der Schleiffurchen wahrscheinlich eine Art Sollbruchstelle. In der Industrie wird daher mit vibrierenden Exzenterschleifern geschliffen, während diese Probe im Kreuzschliff hergestellt wurde. Das Versagen war ähnlich der Plasmaprobe hauptsächlich adhäsiv und teils randnah sehr leicht kohäsiv.

Das schon etablierte Sandstrahlverfahren zeigt erfahrungsgemäß eine gute Festigkeit mit 180 % zur Referenzkraft. Hier ist wieder die sehr stochastische Oberflächenrauheit zu bemerken.



Kraft für Anriss mit Versagensart - Metall

Abbildung 6-8: Ergebnisse der DCB Versuche zur Metallvorbehandlung mit Versagensart nach Abbildung 2-16

Zusammengefasst lässt sich für die Metallvorbehandlung sagen, dass alle Laserbehandlungen durchweg hervorragend sind und auch das Sandstrahlen in selbiger Größenordnung besteht. Im Betracht auf die Hochratenfähigkeit und Automatisierbarkeit sticht aber die L1 Konfiguration deutlich hervor, da sowohl die Festigkeit, als auch die Prozesszeit mit Vor- und Nacharbeit am besten abschneiden. Diese wird für die weitere Vorbehandlung der Metallproben verwendet.

CFK-Vorbehandlung

Analog zu den Metallproben werden auch die Vorbehandlungsverfahren auf die duromeren CFK-Faserverbundsubstrate angewendet und als DCB-Proben getestet. Das Laserverfahren wird hierbei aber ausgeschlossen, da es zu gefährlicher lungengängiger Feinstaubbildung ähnlich dem Asbeststaub kommt und ein geeignetes Absaugverfahren zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht zur Verfügung stand. Stattdessen wird für Kunststoffe üblich, dass VUV-Vorbehandlungsverfahren ergänzt. Duromere lassen sich aufgrund ihrer stark verwirrten Polymerketten und der daraus entstehenden spröden Materialeigenschaft physikalisch und mechanisch vorbehandeln. Die Ketten werden durch mechanische Einwirkung genauso wie durch die Zuführung von physikalischer Energie in Form von Plasma oder VUV-Licht. Die Proben bestehen aus je 16 Lagen (2 mm) 8552 IM7 Laminat unidirektional gelegt und mit dem EA9695 Filmklebstoff verklebt. Die Oberflächenrauheiten sowie die Kontaktwinkelmessung sind in Abbildung 6-10 dargestellt.

Optisch sind die Vorbehandlungsverfahren in folgender Abbildung 6-9 aufgeführt. Physikalische Vorbehandlungen sind dabei optisch nicht zu erkennen, haben aber einen großen Einfluss auf die Oberflächenenergie und führen zur Aktivierung der Oberfläche für die Verklebung.



Abbildung 6-9: Vergleich der Oberflächenvorbehandlungen von Kunststoffen; nur der Benetzungstest zeigt Unterschiede

Die Referenz beschreibt dabei die Oberfläche nach dem Aushärten des Laminates. Dabei wird die Trennfolie entfernt und die Oberfläche mit Isopropanol vor dem Verkleben noch einmal gereinigt. Bei der Betrachtung von grober und feiner Rauheitsmessung ist zu erkennen, dass das Laminat globale Störungen aufweist. Dies können Faserschnipsel, Haare und andere unerwünschte Staubeinschlüsse sein. Lokal betrachtet ist die Oberfläche sehr glatt. Die Kontaktwinkelmessung fällt mit über 95° sehr schlecht aus.

Mithilfe des Nassschleifverfahrens kann der Kontaktwinkel auf 82° verbessert werden, was verhältnismäßig noch kein guter Wert ist, jedoch in der Praxis den *Waterbreaktest* besteht, bei dem das Wasser an der Oberfläche haften bleibt und nicht im Lotoseffekt abperlt, wie es bei der Referenzoberfläche der Fall ist. Der Nassschleifprozess wird bei CFK-Faserverbunden so vorsichtig durchgeführt, dass nur bis zum Anschwärzen des Wassers, was das Erreichen der Fasern der ersten Lage bedeutet, geschliffen wird. Dadurch werden die lokalen Unebenheiten entfernt und die Werte von grober und feiner Messung nähern sich an.

Die Plasmabehandlung erzielt erwartet gute Werte in Bezug auf die Kontaktwinkelmessung mit 22°. Die Verringerung der Oberflächenrauheit wird unter der groben Auflösung eher an einer besseren Probengüte liegen. Bei feiner Messung ist dieselbe Größenordnung zur Referenz zu

erkennen, weswegen dem Verfahren keinen Einfluss auf die Oberflächenrauheit zugesagt werden kann.

Ähnlich verhält sich die VUV-Vorbehandlung, nur dass die Benetzung mit knapp 30° an der Grenze zum theoretisch guten Bereich liegt.



Kontaktwinkel- und Rauhigkeitsmessung

Abbildung 6-10: Vergleich der Oberflächenvorbehandlungen an Faserverbund

Die so vorbehandelten Proben sind wieder 25 mm breit und als Auswahlkriterium wird wieder die Kraft zum Anriss verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-11 dargestellt.

Deutlich ist zu erkennen, dass die vorbehandelte, nur gereinigte Oberfläche mit 9 N und adhäsivem Versagen keine geeignete Oberfläche für eine strukturelle Verklebung ergibt.

Das Schleifverfahren weist eine 11 Mal höhere Anrisskraft auf. Aufgrund der abgetragenen Oberfläche werden die noch von der Trennfolie vorhandenen Fluoratome entfernt, welche auf der Referenzoberfläche noch mittels Laserspektroskopie nachgewiesen werden können. Gut ist durch die Versuche die Problematik des Schleifverfahrens zu erkennen, und zwar ist die Standardabweichung sehr hoch, weswegen das Verfahren kritisch zu bewerten ist, wenn es um eine hochratenfähige Fertigung geht, welche reproduzierbare Ergebnisse liefern soll.

Die schon etablierte Plasmavorbehandlung erzielt auch bei den Ergebnissen die besten Werte mit einer 12,5-fachen Festigkeitssteigerung des Anrisses zur Referenz. Besonders die geringe Standartabweichung bei gleichzeitiger Fähigkeit zur Automatisierung lässt dieses Verfahren hervorragend abschneiden.

Das VUV-Verfahren steigert zwar die Anrisskraft um den Faktor 3,7, jedoch ist dieser Wert im Vergleich zur Plasmavorbehandlung viermal kleiner. Die zur Verfügung stehende VUV-Lampe ist von ihrer Intensität nicht für solche Anwendungsfälle ausgelegt. Um ein Laminat ausreichend vorzubehandeln. wird eine deutlich höhere Energie benötigt. Der Nachteil der VUV-Vorbehandlung allerdings ist, dass die Lampe maximal 2 mm entfernt vom Bauteil entfernt sein darf, da ansonsten die Energie den Luftsauerstoff zu Ozon aufbricht, jedoch nicht mehr zum Substrat selbst hinkommt. Bei konkaven Geometrien können so schnell Schwierigkeiten entstehen, da die Lampe diese Anforderung nicht mehr erfüllen kann.



Abbildung 6-11: Ergebnisse der DCB Versuche zur Faserverbundvorbehandlung mit Versagensart nach Abbildung 2-16

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das **Plasmaverfahren** für die Substratvorbehandlung im Weiteren verwendet wird.

Vorbehandlung des zähmodifizierenden Materials

Abschließend werden die Vorbehandlungen des zähmodifizierenden Substrates untersucht. Vorbehandelt werden dabei 25x25mm Proben, mit einem quasiisotropen 2,5 mm dicken Laminat, auf das die Folien *Co-cured* wird. Diese werden zuvor VUV vorbehandelt. Die Folien werden schließlich mit den unten genannten Verfahren vorbehandelt und mit EA9695 wird ein Prüfstempel aufgeklebt. Getestet wird anschließend Kraft zum Abriss des Prüfstempels in einer Prüfzentrifuge. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Plasma- und VUV-Vorbehandlung. Mechanische Verfahren wie Sandstrahlen oder Schleifen eignen sich bei Thermoplasten nicht. Die Atomanordnung wird durch einfache mechanische Einwirkung nicht aufgebrochen und die Substratoberfläche bleibt somit unreaktiv. Für PEEK hat dies Li et al. [156] mit Sandstrahlen nachgewiesen. Aus Demonstrationsgründen wird das Schleifen bei der Oberflächenanalyse noch bei PVDF mitbetrachtet, fällt bei den Versuchsreihen schließlich raus. Alle Oberflächen werden zuerst mit Isopropanol gereinigt.



Kontaktwinkel- und Rauhigkeitsmessung

Abbildung 6-12: Vergleich der Oberflächenvorbehandlungen von PVDF und PEEK

Die Referenz der PVDF-Oberfläche wird nicht weiter behandelt und weist mit 79° einen ausreichenden Wert auf, um den *Waterbreaktest* zu bestehen.

Wird das PVDF jedoch angeschliffen, so steigt zwar die Rauheit der Oberfläche, jedoch steigt auch der Kontaktwinkel auf 126° und es findet keine Benetzungsfähigkeit mehr statt. Dies kann in Abbildung 6-9 sehr gut erkannt werden. Die Substratoberfläche ist somit für eine Verklebung absolut ungeeignet.

Mittels Plasmas lässt sich auch die Oberfläche des PVDF hervorragend vorbehandeln. Dies wird durch die Senkung des Kontaktwinkels auf 36° deutlich. Wie bei der CFK-Vorbehandlung ändern die physikalischen Vorbehandlungsverfahren nichts an der Rauheit. Die leichten Abweichungen sind wieder Messungenauigkeiten in sehr kleiner Messgrößenordnung.

Ebenfalls erzielt auch das VUV-Verfahren eine deutliche Verbesserung der Oberflächenaktivität und senkt den Kontaktwinkel auf 47°.

PEEK nur gereinigt, besitzt mit 89° einen zu großen Kontaktwinkel, um den *Waterbreaktest* zu bestehen. Es findet keine Benetzung der Oberfläche statt.

Wird PEEK mit Plasma behandelt, sinkt der Kontaktwinkel auf 31° und eine Benetzung ist wieder möglich.

Auch durch die VUV-Vorbehandlung wird PEEK aktiviert und der Kontaktwinkel sinkt auf 40°. An der Rauheit ändert sich erneut nichts.



Kraft für Abriss des Prüfstempels

Abbildung 6-13: Ergebnisse der Kopfzugprobenversuche mittels Prüfzentrifuge mit Versagensart nach Abbildung 2-16

Die ausgehärteten Proben werden anschließend in einer Prüfzentrifuge getestet. Dabei wird durch die steigende Rotationsgeschwindigkeit die Kraft auf den Prüfstempel kontinuierlich erhöht, bis sich dieser von der Oberfläche löst. Der Stempel ist aus Aluminium und wird vorher sandgestrahlt. Als Ergebnis wird die Kraft bei Ablösung sowie das Bruchbild bewertet und ist in Abbildung 6-13 aufgeführt. Verglichen werden kann dabei jedoch nur die Serie PVDF mit sich und die Serie PEEK mit sich, da durch die unterschiedlichen Steifigkeiten auch die Belastungen auf die Probe anders wirken.

Die PVDF-Referenz versagt dabei kohäsiv im Klebstoff, wodurch es so scheint, als bräuchte dieses Material keine Vorbehandlung, da der gewünschte Kohäsionsbruch bereits eingetroffen ist. Allerdings zeigt die höhere Standardabweichung, dass ohne Vorbehandlung die Ergebnisse stark variieren.

Durch die Plasmavorbehandlung kann dieser Effekt deutlich reduziert werden und steigert die Festigkeit bei kohäsiven Bruchbild auf 116 %.

Eine minimale Verbesserung bringt die VUV-Vorbehandlung auf 102 % zur Referenzfestigkeit von PVDF. Deutlich wird auch die Standardabweichung verbessert.

Die PEEK-Referenzreihe versagt rein adhäsiv, was durch die schlechte Kontaktwinkelmessung schon zu erwarten war. Eine Probe versagt bereits durch die Einspannkräfte, bevor die Messung startet. Unvorbehandeltes PEEK wirkt quasi als Trennfolie.

Das ändert sich aber deutlich durch die Aktivierung mittels Plasmas. Die Festigkeit steigt um das Siebenfache und es wird ein kohäsives Bruchbild erzielt. Nebenbei wird teils die erste Lage des CFK-Substrates herausgerissen. Dies ist ein gutes Ergebnis für die Anbindung zum PEEK.

Mit einer 6,7-fachen Festigkeitssteigerung zur Referenz versagt auch die VUV vorbehandelte Probe im Klebstoff. Ebenfalls wird teilweise die erste Lage des Substrates mit herausgetrennt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Proben mit Thermoplastfolie zur Verklebung weiter immer mit **Plasma** vorbehandelt werden. Da das Plasma allerdings durch die hohe Temperatureinwirkung die Folien verbrennt, werden diese zum Einbringen ins CFK-Substrat beim *Co-curing* vorab mit **VUV-Licht** behandelt.

6.2 Prepreg Fertigungsverfahren

Als Prepregverfahren wird die Verwendung von vorimpregnierten Faserlagen mit Harz bezeichnet, dem Prepreg (*preimpregnated fiber*), bei dem der Aushärteprozess durch eine Tiefkühlung bei -18 °C pausiert wird. Ist das Material aus der Tiefkühlung entnommen und aufgetaut, hat dies üblicherweise eine Verarbeitungszeit von ca. 30-90 Tagen. Aufgetaut ist das Prepreg klebrig. Diese Eigenschaft wird als *tack* bezeichnet und ist bei der Positionierung von Einzellagen auf einer Form zu einem Laminat hilfreich.

Die Fertigung der lokalen Zähmodifikation gestaltet sich als äußerst einfach. Ein Laminat wird entsprechend der Vorgabe aus Einzellagen gelegt und anschließend wird ein Streifen des zähmodifizierenden Materials, welches vorab mit Isopropanol entfettet und anschließend über die VUV-Vorbehandlung aktiviert wurde, aufgelegt. Der tack in Verbindung mit der aktivierten Oberfläche lässt den zähmodifizierten Streifen gut anhaften, sodass dieser seine Position behält, jedoch auch bei Fehlpositionierung abgezogen und erneut positioniert werden kann. Unter dem Aspekt der hochratenfähigen Fertigung kann ein zähmodifizierender Streifen daher als Endloshalbzeug per AFP-Verfahren mittels Roboter auch auf großen Formen abgelegt werden. Abbildung 6-14 zeigt den schematischen Ablauf der Fertigung.



Abbildung 6-14: Fertigungsschritte der lokalen Oberflächenzähmodifikation im Prepregverfahren

In **Schritt 1** wird der Streifen zähmodifizierendes Material mit dem Laminat *Co-cured*. Der Streifen wird dabei gut in das Harz eingebettet und nicht überspült. Gefertigt wird dabei mittels Vakuumaufbau im Autoklaven nach Abbildung 6-15.

Abbildung 6-16 zeigt dabei auf der linken Seite zwei applizierte Streifen PVDF (**Schritt 1**) und auf der rechten Seite zwei anhaftende Streifen PVDF (**Schritt 2**) bei demselben Aufbau vor und nach dem Aushärten


Abbildung 6-15: Vakuumaufbau zum Aushärten des Prepreglaminates

Der Übergang zwischen Epoxidharz und Thermoplaststreifen ist bei der Nutzung von PVDF nach der Aushärtung leicht zu spüren. Der Grund dafür ist, dass das PVDF bereits bei 168 °C aufschmilzt, während das Prepreg bei 180 °C aushärtet und fest wird. Beim Abkühlen zieht sich das PVDF langsam zusammen und beim Übergang zum Feststoff reißt das PVDF vom Epoxidharz schließlich sogar in Dickenrichtung ab und bildet eine regelrechte Bruchkante, die mittels Laserscannigmikroskopie (LSM) visualisiert werden kann. Abbildung 6-17 zeigt den Übergang von Faserverbundoberfläche zu PVDF. Das Material zieht sich nicht nur in Längsrichtung zusammen (parallel zur Oberfläche), sondern auch normal zu dieser. Diese Geometrieänderung ist deutlich kleiner und beträgt etwa 0,03 mm zur Oberfläche des Faserverbundlaminates, während die maximale Distanz von Abbruchkante Laminat zu PVDF etwa 0,05-0,08 mm beträgt.



Abbildung 6-16: Links: Aufgelegte PVDF Streifen als zähmodifizierendes Material, rechts: ausgehärtetes Laminat mit fest verbundenen PVDF Streifen

Bei Verwendung von PEEK wiederum zeigt sich diese Beobachtung nicht, da das PEEK-Material zum einen eine halb so großen Wärmeausdehnungskoeffizienten wie PVDF besitzt und zum anderen bei der Aushärtetemperatur des Faserverbundmaterials erst bei ca. 40 % der Schmelztemperatur liegt und somit deutlich steifer ist. Dadurch wird eine scharfe Trennung zwischen CFK und PEEK erreicht.



Abbildung 6-17: Mikroskopieaufnahme des Übergangs zwischen Faserverbund und PVDF, 50x mit LSM, Wärmeausdehnung führt nach dem Abkühlen zu einer deutlichen Lücke

6.2.1 Interface Faserausrichtung

Während sich bei der Oberflächenbetrachtung auf keinen Unterschied bei der Lagenausrichtung der Interfacelage schließen lässt, wird dieser erst bei Betrachtung des Querschnittes im Schliffbild deutlich. Wird der zähmodifizierende Thermoplaststreifen quer zur Interfacefaserrichtung eingelegt, wie es die linke Seite von Abbildung 6-18 zeigt, so werden die Fasern um die Materialstärke des Streifens weggedrückt. Diese als Ondulation bezeichnete ungewollte Welle führt zu einer Ansammlung von Harz, die als Harznest bezeichnet wird. Harznester im Allgemeinen sind ebenfalls nicht erwünscht, da diese aufgrund der fehlenden Fasern eine deutlich geringere Festigkeit aufweisen und somit eine Schwachstelle im Faserverbund darstellen können. Der Einfluss der Ondulation reicht in Dickenrichtung bis zur siebten Lage.



Abbildung 6-18: Schliffbildaufnahme des Übergangs von Laminat zu PVDF, links: 0°-Interfacelage und rechts: 90°-Interfacelage

Wird der Thermoplaststreifen parallel zur Interfacelage eingebracht, wie es die rechte Seite aus Abbildung 6-18 zeigt, so bettet sich dieser sehr gut in die Lage ein. Ebenfalls positionieren sich die Fasern homogen um den Übergang des Streifens, was zu einer deutlich geringeren Ondulation für die Lage und das restliche Laminat führt. So neutralisiert sich die Ondulation nach der fünften Lage im Laminat. Trotz des stärkeren Einflusses auf die Ondulation und die Harznestbildung bei der 0°-Interfacelage wird aufgrund der schmalen Probengeometrie diese Ausrichtung weiter verwendet. Vielmehr zeigt die Untersuchung, dass ein Streifen, der lokal im Laminat eingebracht wird, ohne negative geometrische Auswirkungen seitlich enden kann.

6.3 Harzinfusionsverfahren (RTM-Verfahren)

Die erfolgreiche Applikation der Oberflächenzähmodifikation von PVDF im Harzinfusionsverfahren wird in Kapitel 10.1 im Detail beschrieben. Nachgewiesen wurde die Anwendbarkeit mit RTM 6 Harz und G0926 Kohlenstofffasergewebe.

6.4 Applikation auf Metallen

Bei der Anwendung der lokalen Zähmodifikation mit Metallen muss zum Haften des Thermoplaststreifens zusätzlich Klebstoff aufgebracht werden. Damit später jedoch garantiert werden kann, dass die Klebschicht überall gleichmäßig dick ist, wird vorab eine Nut mit nominaler Dicke von Klebstoff und Thermoplaststreifen in das Metall gefräst. Dies ist **Schritt 1** bei der Metallapplikation. Schritt 2 der Metallapplikation ähnelt dann wieder dem ersten Schritt der Prepregapplikation, nur dass im Falle von der Metallapplikation der Klebstoff aushärtet, anstatt das ganze Laminat und somit den Thermoplaststreifen fest anbindet.



Abbildung 6-19: Fertigungsschritte der lokalen Oberflächenzähmodifikation im Prepregverfahren

Während der PVDF-Streifen wieder entfettet und mittels VUV-Anlage vorbehandelt wird, wird das Metallsubstrat mittels Laserreinigungsanlage vorbehandelt. Schritt 1 und Schritt 2 in Anwendung mit einem Aluminiumsubstrat und PVDF sind in Abbildung 6-20 dargestellt.



Abbildung 6-20: Applikation des Thermoplaststreifens auf Aluminium, links: gefräste Nut, rechts: aufgeklebte PVDF Streifen mit Laservorbehandlung

Im Vergleich zur Faserverbundfertigung mittels Prepreg wird ein Schritt hinzugefügt. Diese zuvor spanende Bearbeitung reduziert das Potenzial dieser Technologie deutlich in Betracht der hochratenfähigen Fertigung. Umgesetzt wird diese Anwendung nur, um einen Vergleich von Metallischer- und Faserverbundanwendung zu erzielen. Der eigentliche Verklebungsprozess der Bauteile, also die letzten drei Schritte, sind bei beiden Anwendungen identisch.

6.5 Secondary Bonding

Das *Secondary Bonding*, also das nachträgliche Verkleben der Fügepartner, weicht durch die Applikation mit der lokalen Oberflächenzähmodifikation vom Ursprungsprozess nicht ab. Es macht daher keinen Unterschied, ob zähmodifizierte Strukturen oder nicht verklebt werden. Hauptsächlich wird in dieser Arbeit der Filmklebstoff EA9695 verwendet, welcher sich sehr ähnlich zum Prepregmaterial verarbeiten lässt. Der Aufbau für das Herstellen bspw. einer einfachen Überlappungsklebung, wie der SLS-Probe, welche in Kapitel 7.4 verwendet wird, ist in Abbildung 6-21 dargestellt:





6.6 Kapitelzusammenfassung

Kapitel 6 wird die Möglichkeit zur hochratenfähigen Fertigung der lokalen In Oberflächenzähmodifikation für die Industrie aufgezeigt. Beginnend mit der Auswahl des geeigneten Oberflächenvorbehandlungsverfahrens, dem Einbringen des zähmodifizierenden Materials in die jeweiligen Substrate und der anschließenden Verklebung, eignet sich die Technologie ohne einen nennenswerten Mehraufwand, mit der Möglichkeit der Vollautomatisierung für die Industrie. Hierbei werden beide in der Industrie als Standard Verfahren von Prepregbau und Infusionsverfahren demonstriert. angesehene Das zähmodifizierende Material wird dabei mittels VUV-Lichts aktiviert und kann entweder auf das unausgehärtete Prepreg appliziert oder mittels weiterem Filmklebstoff in eine zuvor gefräste Nut eines Metallsubstrates verklebt werden. Die Metalloberfläche wird dafür mittels Laser schonend vorbehandelt. Zur anschließenden Verklebung eignet sich für alle Substrate das Plasmaverfahren.

Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass eine Vorbehandlung zwingend notwendig ist. PVDF als Oberfläche lässt sich unvorbehandelt schon gut verkleben, erzielt aber deutlich geringere Festigkeiten in der Verklebung als mit Vorbehandlung. Hingegen lässt sich PEEK gar nicht verkleben, sofern es nicht aktiviert wurde. PEEK wirkt unvorbehandelt als Trennfolie. Weiter zeigen die Untersuchungen, dass die für Kunststoffe üblichen physikalischen Verfahren optisch nicht zu erkennen sind, weshalb an dieser Stelle ein großer Fokus auf die Dokumentation gelegt werden muss.

Die Arbeitshypothese ist erfolgreich überprüft und damit bewiesen.

7. Untersuchungen der lokalen Oberflächenzähmodifikation

Erfüllt die lokale Oberflächenzähmodifikation die Forschungshypothesen und kann der dazu führende Effekt identifiziert und genutzt werden?

In diesem Kapitel wird die **Technologie** der **lokalen Oberflächenzähmodifikation** untersucht. Das Ziel ist, die **Funktionsweise** und den **Effekt** der **Senkung von Spannungskonzentration** zu identifizieren und zu verstehen. In **Anwendungsfällen** wird anschließend die Technologie genutzt, um eine **Verbindungsfestigkeitssteigerung** an SLS-Proben zu erzielen und ein **Rissstoppkonzept** an CLS-Proben zu demonstrieren.



Abbildung 7-1: Überblick auf die in Kapitel 7 getesteten Proben samt Hintergrund

7.1 Einfluss der lokalen Oberflächenzähmodifikation auf das Laminat

Der erste und wichtigste Punkt, welcher belegt werden muss, ist, dass das Einbringen des zähmodifizierenden Materials in die Oberfläche keine Kerbwirkung im Laminat erzeugt und dadurch das eigentliche Substrat schwächt.

Dafür werden zwei weitere Probenreihen mit Zugversuchen nach der Norm DIN EN ISO 527-4 durchgeführt. Verglichen werden diese mit den Referenzproben vom reinen Laminat aus Kapitel 5 mit demselben Laminataufbau. Die Proben sind aus einer großen Platte herausgetrennt und gehören zur identischen Charge. Die Probe mit freiliegendem Spalt wird mithilfe eines unvorbehandelten PEEK-Streifens gefertigt, welcher nach dem Aushärten des Laminates einfach abgezogen werden kann und somit dieselbe geometrische Auswirkung auf das Laminat hat wie PVDF, nur dass der Bereich frei bleibt. Das Ziel dabei ist, eine mögliche Kerbwirkung durch das Einbringen des sehr weichen Thermoplaststreifens auf das sehr steife Laminat zu identifizieren. Abbildung 7-2 zeigt die zu vergleichenden Probengeometrien und die Position der Messtechnik mittels Dehnmessstreifens (DMS).



Abbildung 7-2: Probenkonfiguration zur Untersuchung des Einflusses von lokaler Oberflächenzähmodifikation auf das Laminat

Die Referenzproben sowie die ST-Proben brechen im Zugversuch alle im Einspannungsbereich auf Höhe der Aufdopplung für die Spannzangen der Prüfmaschine. Dies liegt an einer dort anliegenden Spannungsüberhöhung aufgrund des Steifigkeitssprunges der Probe. Dies war zu erwarten und ist in Abbildung 7-3 im Bruchbild zu erkennen.



Abbildung 7-3: Bruchverhalten der getesteten Laminatproben, Probennummer 1 steht stellvertretend für die jeweilige Serie

Die Bruchkraft ist bei beiden Serien nahezu identisch. Dies zeigt, dass der eingebrachte PVDF-Streifen keinen negativen Einfluss auf das Laminat erzielt. Wird jedoch der PVDF-Streifen weggelassen und es entsteht ein Spalt, bricht die Probe immer im Bereich des Spaltes bei deutlich geringerer Last.



Abbildung 7-4: Bruchkraft der Laminatzugproben

Die bei den Versuchen ermittelten Mittelwerte sind in nachfolgender Tabelle 7-1 aufgeführt:

						Bezogen auf den		Bezogen auf die	
						Spalt-/ ST-Dicke		Laminatdicke	
Serie	t	b	А	F_{Br}	$\epsilon_{\rm Br}$	О Вг	E(E=1 %»Br)	O Br_2,05	E(E=1 %»Br)_2,05
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Referenz	2,05	20,2	41,41	37027,1	1,46	895,04	59709	895,04	59709
ST	1,95	20,2	39,39	37051,1	1,38	941,56	62787	895,45	59436
Spalt	1,95	20,2	39,39	34552,5	1,32	877,04	62447	830,87	59115

Tabelle 7-1: Versuchsergebnisse der Laminatzugproben, Mittelwertdarstellung

Bezogen auf den Probenquerschnitt des reinen Laminates an der DMS-Position stellt sich dabei heraus, dass die ST Probe im Vergleich zur Referenz mit 941,56 MPa eine 5,2 % Zugspannungssteigerung erzielt, wohingegen die Spaltprobe mit 877,04 MPa eine 2 % Zugspannungssenkung erfährt. Da die ST-Probe allerdings im Laminat bricht, wird die Bruchkraft auf die nominale Laminatdicke bezogen und es ergibt sich die nahezu identische Zugbruchspannung. Die Bruchdehnungen hingegen sind deutlich geringer, da die Proben mit ST und Spalt einen asymmetrischen Aufbau besitzen und sich die Probe in der Prüfmaschine verbiegt, wodurch die ungestörte Seite eine leichte Druckspannung erfährt und die DMS einen geminderten Wert messen. Der Effekt fällt allerdings bei der ST-Probe etwas geringer aus, wodurch wieder ein positiver Einfluss durch das Einbringen des PVDF Streifens identifiziert werden kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die lokale Oberflächenzähmodifikation mit PVDF hat keinen negativen Einfluss auf das Laminat unter Zugbelastung.
- Ein reiner Spalt von 0,1 mm führt jedoch zur Senkung der Zugfestigkeit des Laminates und wirkt als Sollbruchstelle.
- Das Laminat bricht nicht im zähmodifizierten Bereich.

7.2 Spannungsreduktion bei DCB - Proben (Mode I)

Der Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation wird wie in der mathematischen Modellbildung aus Kapitel 4.1 als Erstes an einer DCB-Probe unter einachsiger Mode I Schälbelastung untersucht.

7.2.1 Modellbildung zur DCB-Probe

In Abbildung 7-5 wird das Modell samt Verhalten unter Schällast dargestellt. Mit zunehmender Schällast F1 stellt sich im Klebstoff eine randnahe Spannungskonzentration ein. Da der spröde Klebstoff über eine zu geringe Nachgiebigkeit mittels Formänderung verfügt, versagt dieser bei Überschreitung der Klebstofffestigkeit und ein Riss fängt an zu wachsen. Dieser Riss läuft geometriebedingt bei gleicher anliegender Last kontinuierlich durch den Klebstoff weiter.

Wird allerdings eine lokale Oberflächenzähmodifikation eingebracht, wie es die rechte Seite aus Abbildung 7-5 darstellt, wächst der Riss nur bis zum Erreichen des zähmodifizierten Bereichs. Es entsteht eine Reihenschaltung von Materialien verschiedener Steifigkeiten und dadurch verschiedener Nachgiebigkeit.

Physikalisch gesetzmäßig ist in dieser Reihenschaltung die Kraft auf beide Materialien gleich groß. Jedoch sorgt der zähmodifizierte Bereich dafür, dass an Stellen höchster Belastung, wie unmittelbar an der Rissspitze selbst, die Zähmodifikation deutlich mehr nachgibt und somit lokal die Beanspruchung auf den Klebstoff mindert. Dies zeigt Abbildung 7-5 unter der Kraft F₂. Hingegen wird durch die Nachgiebigkeit auch die Möglichkeit geschaffen, den sonst eher unbelasteten Bereich hinter der Zähmodifikation ebenfalls mitzubelasten, da die Verbindung im Ganzen etwas nachgiebiger wird und die Fügepartner sich weiter verformen können. Somit findet eine Lastumlagerung von der hochbelasteten Rissspitze zum weniger belasteten Bereich der Klebverbindung statt. Dieser Effekt reduziert die Spannungskonzentration, wirkt als Rissstopper und steigert somit auch die Verbindungsfestigkeit der Klebverbindung.



Abbildung 7-5: Modellverhalten von DCB Proben mit und ohne ST

7.2.2 Versuchsdurchführung der DCB-Proben

Um den Effekt nachzuweisen, werden je 7 DCB-Proben pro Serie mit und ohne künstlichen Anriss gefertigt und geprüft. Der detaillierte Ablauf der Fertigung und Prüfung ist in [157] und [158] veröffentlicht. Die DCB-Proben entsprechen den Geometrien aus Abbildung 7-6 und bestehen aus zwei zusammengeklebten 1,5 mm starken (12 Einzellagen) unidirektional in Lastrichtung gelegten Laminaten aus 8552 IM7 Prepreg. In die Proben mit Zähmodifikation wird auf die Ober- und Unterseite ein 10 mm breiter 0,1 mm dicker PVDF-Streifen in das Laminat eingebracht und anschließend verklebt. Die anvisierte Klebschichtdicke beträgt 0,1 mm. Es wird weiter eine Trennfolie 60 mm vom Rand eingelegt und dient als künstlicher Anriss. Die Proben werden einer 5 kN Zwick Zugprüfmaschine mit 20 mm/min an

Traversenverfahrgeschwindigkeit belastet. Ermittelt wird dabei der Verfahrweg in mm und die sich einstellende Kraft in N. Die Risslänge a wird anhand von Bildern nach dem Versuch ausgewertet.



Abbildung 7-6: Geometrie der getesteten DCB Probe, gefertigt mit und ohne PVDF Streifen

7.2.3 Ergebnisse, Beobachtungen und Interpretation der DCB-Proben

Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Traversenweg die Belastung auf die Klebschicht linear steigt, bis sich bei ca. 110 N, Punkt A bzw. A' in Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8, ein stationäres Risswachstum bei beiden Konfigurationen einstellt. Das Bruchbild ist in diesem Bereich sehr gleichmäßig. Ohne lokale Zähmodifikation läuft der Riss bis zum Versagen der Probe durch diese. Mit Zähmodifikation stoppt der Riss am PVDF-Streifen und die Probe erträgt eine weitere Erhöhung der Belastung, was ab Punkt B zu erkennen ist. Wird das Lastniveau von Punkt C erreicht, schießt schlagartig ein Riss durch die Probe und fängt sich an Punkt D. Das Lastniveau baut sich anschließend wieder auf, bis es auf demselben Niveau der Probe ohne Zähmodifikation ist und ein stationäres Risswachstum verläuft weiter. Dieser Bereich ist aber für die Untersuchungen weiter nicht relevant.



Abbildung 7-7: Verlauf von Kraft und Traversenweg zweier DCB-Proben mit und ohne Zähmodifikation, A, A': Beginn stationärer Risswachstum, B: Riss stoppt an Zähmodifikation, C: Riss schießt instationär durch zähmodifizierten Bereich, D: Ende des instationären Risswachstums

Mit Bezug auf das Bruchbild in Abbildung 7-8 ist zu bemerken, dass der Riss teilweise auch einige Millimeter in den Rissstopp hineinläuft und dann erst verweilt. Bei Erreichen von Punkt C schießt der Riss schlagartig durch die Probe. Vom Bruchbild her reißt der PVDF-Streifen teilweise adhäsiv heraus. Da die Adhäsion aber durch Kopfzugproben in Kapitel 6.1.3 Abbildung 6-13 sichergestellt ist, muss es bedeuten, dass der Riss nach dem Start des instationären Risswachstums zwischen Laminat und PVDF schießt. Positiv ist, dass der Riss danach aber zurück in den Klebstoff läuft und nicht zu Delaminationen im Laminat führt.

Es wurden keine Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gemacht, weshalb der Ablauf jedoch nicht genau nachgewiesen werden kann. Da das Risswachstum mit bloßem Auge ermittelt wird, wird die Probe seitlich weiß lackiert, was wiederum die Anwendung eines optischen Messsystems parallel dazu verhindert.

Die Erwartungen, die sich vom Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation auf den Stopp eines Risswachstums versprochen wurden, sind erfüllt. Um den Effekt zu quantifizieren, wird die Energiefreisetzungsrate alle 5 mm bestimmt und ergibt die sogenannte R-Kurve, die zur Vorhersage der Bruchmechanik herangezogen werden kann. Der GIC-Wert wird dabei über die MBT- (*Modified Beam Theory*) Methode errechnet, da diese am konservativsten ist und von der Norm empfohlen wird.



Abbildung 7-8: Bruchbilder der DCB-Proben mit und ohne Zähmodifikation, A, A': Beginn stationärer Risswachstum, B: Riss stoppt an Zähmodifikation, C: Riss schießt instationär durch zähmodifizierten Bereich, D: Ende des instationären Risswachstums

In Abbildung 7-9 sind die Werte der Energiefreisetzungsrate über die Risslänge unter Mode I Belastung aufgetragen. Gut ist zu erkennen, dass der Wert für die Energiefreisetzungsrate am Rissstopp schlagartig von 0,93kJ/m² auf 1,35kJ/m² ansteigt. Werden jetzt die Werte mit Rissstopp und ohne Rissstopp bei 55 mm Risslänge verglichen, so steigert die lokale Oberflächenzähmodifikation den Wert der Energiefreisetzungsrate von 1,08kJ/m² auf 1,35kJ/m² und damit um 25,1 %. Es muss also etwa ein Viertel mehr Energie aufgebracht werden, um den Riss weiterlaufen zu lassen.

Der Anfang bei ca. 40 mm Risslänge und das Ende ab 100 mm Risslänge sind gute Beispiele für die Vergleichbarkeit beider Kurven, welche quasi identisch dort sind.

Da ein Rissstopp das Ergebnis der Reduktion von Spannungen bzw. Spannungskonzentrationen in der Rissspitze darstellt, ist somit nachgewiesen, dass die lokale Oberflächenzähmodifikation mit PVDF, Spannungskonzentrationen unter Mode I reduziert.



Abbildung 7-9: Verlauf der Energiefreisetzungsrate über die Risslänge der DCB-Probe mit und ohne ST-Streifen

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die lokale Oberflächenzähmodifikation reduziert Spannungskonzentrationen unter Mode I Belastung in reinen Klebverbindungen.
- Kurz vor der Zähmodifikation sinkt die Energiefreisetzungsrate leicht.
- Die Zähmodifikation steigert lokal die Energiefreisetzungsrate im Mittel um 25,1 % des Klebstoffes.
- Die Zähmodifikation wirkt als Rissstopper.

7.3 Spannungsreduktion bei ENF - Proben (Mode II)

Die Mode I Belastung auf eine Klebschicht ist die kritischste Belastungsrichtung, unter der ein sehr schnelles Risswachstum auftritt. Daher muss aus Sicht des Konstrukteurs die Verbindung stets so ausgelegt werden, dass anstelle von Schälbelastung eine Schubbelastung im Klebstoff entsteht und somit die Mode II Belastung auftritt. Mithilfe der ENF-Probe wird im Drei-Punkt-Biegeversuch eine Schubbelastung im Probekörper auf die Klebschicht erzeugt.

7.3.1 Modellbildung zur ENF-Probe

In Abbildung 7-10 wird das Modell samt Verhalten unter Schublast dargestellt. Mit zunehmender äußerer Belastung F1 stellt sich im Klebstoff eine randnahe Schubspannungskonzentration ein. Überschreitet diese die Schubfestigkeitsgrenze des Klebstoffes wächst ein Riss stationär, wie es die linke Seite von Abbildung 7-10 zeigt. Auf der rechten Seite von Abbildung 7-10 trifft dieser Riss auf die Oberflächenzähmodifikation, welche erneut durch das duktile Material die hohen Verformungen (Scherungen) lokal ausgleicht und somit die Rissspitze entlastet und den Riss stoppt. Es entsteht wieder eine Reihenschaltung, jedoch in diesem Falle in horizontaler Richtung.



Abbildung 7-10: Modellverhalten von ENF-Proben mit und ohne ST

Dadurch findet eine Lastumlagerung in den Bereich hinter der Zähmodifikation, vergleichbar zur DCB-Probe, statt und somit wird die Verbindungsfestigkeit gesteigert, bei gleichzeitiger Fähigkeit einen Riss zu stoppen.

7.3.2 Versuchsdurchführung der ENF-Proben

Es werden je 7 Einzelproben mit und ohne Zähmodifikation mit Geometrie aus Abbildung 7-11 gefertigt. Die Fertigung ist bis auf die Geometrieabweichungen identisch zur DCB Fertigung aus Kapitel 7.2.2 und kann im Detail wieder aus [157] und [158] entnommen werden.



Abbildung 7-11: Geometrie der getesteten ENF Probe, gefertigt mit und ohne PVDF Streifen

Bewusst wird hinter der Trennfolie, die den künstlichen Anriss darstellt, ein 5 mm Klebschichtbereich ohne Zähmodifikation übergelassen, um die beiden Probereihen miteinander vergleichen zu können. Geprüft wird auch hier an der Zwick 5 kN Prüfmaschine mit 1 mm/min Traversengeschwindigkeit, dieses Mal unter Dreipunktbiegung, um eine Schubbelastung im Klebstoff zu erwirken. Die Verfahrgeschwindigkeit ist deutlich geringer als bei DCB-Proben, da die Rissinitiierung deutlich instationärer auftritt. Ermittelt wird dabei wieder der Verfahrweg in mm und die sich einstellende Kraft in N. Die Risslänge a wird anhand von Bildern nach dem Versuch ausgewertet.

7.3.3 Ergebnisse, Beobachtungen und Interpretation der ENF-Proben

Im Versuch gut zu beobachten und in Abbildung 7-12 dargestellt, steigt die Kraft über den Traversenweg erst konstant an, bis sich ein Riss im Klebstoff bildet A' und durch die Probe läuft, bis er die mittlere Krafteinleitungsposition B' erreicht. Erst dann zeigt die Probe eine weitere Kraftzunahme, welche darauf beruht, dass jetzt die Probe wie eine Blattfeder belastet wird, bis die Probe in der Mitte durchbricht. Dieser Bereich ist normalerweise uninteressant für die Auswertung des GIIC Wertes, hilft in diesem Fall aber weiter, die beiden Proben zu unterscheiden und den Effekt der Zähmodifikation zu erklären. In der klassischen ENF-Auswertung wird nur die Kraft A bzw. A' bei Rissinitiierung zur Auswertung genutzt. Zu erkennen ist allerdings, dass die Anrisskraft bei den Proben mit Zähmodifikation bei A sogar geringer ist, als bei der Serie ohne. Dies liegt daran, dass der schmale 5 mm Klebschichtbereich im Vergleich zur dann kommende Zähmodifikation sehr steif ist und somit noch deutlich höher belastet wird als ohne Zähmodifikation.



ENF Probe: Kraft über Traversenweg

Abbildung 7-12: Verlauf von Kraft und Traversenweg zweier ENF-Proben mit und ohne Zähmodifikation, A, A': Beginn stationärer Risswachstum, B: Riss stoppt an Zähmodifikation, B': Riss ist bis zur Mitte der Probe durchgelaufen

Deutlich ist in Abbildung 7-13 zu sehen, dass kein weiteres Risswachstum stattfindet, sobald der Riss an die Zähmodifikation läuft. Im Diagramm in Abbildung 7-12 ist das daran zu erkennen, dass die Strecke zwischen A und B sehr kurz ist und nur das Risswachstum des 5 mm Streifens vor der Zähmodifikation zeigt. Es findet auch kein Kraftabfall, sondern nur eine Verringerung der Steigung der Kraftkurve statt. Dadurch, dass die beiden CFK Fügepartner noch zusammenhaften, ist die Federsteifigkeit der Probe deutlich höher, was in Abbildung 7-12 als steilerer Kurvenverlauf des Kraftverlaufs über den Traversenweg erkannt werden kann. Da jedoch kein weiteres Risswachstum stattfindet, kann kein Kraftwert zugeordnet werden, weshalb keine GIIC Auswertung für den Bereich der Zähmodifikation stattfinden kann. Als Ergebnis des Versuchs kann daher mitgenommen werden, dass Risse unter Mode II Belastung ausgezeichnet gestoppt werden können, was darauf schließen lässt, dass auch die Spannungskonzentrationen deutlich reduziert werden.



Abbildung 7-13: Seitlicher Blick auf die belasteten ENF Proben, a) Probe mit lokaler Zähmodifikation zeigt den Rissstopp b) Probe ohne Zähmodifikation zeigt ein Risswachstum durch die ganze Klebschicht

Da kein erneuter Riss wächst, muss dieser Effekt sehr stark sein.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die lokale Oberflächenzähmodifikation reduziert Spannungskonzentrationen unter Mode II Belastung in reinen Klebverbindungen.
- Kurz vor dem Rissstopper beschleunigt sich der Risswachstum unter Mode II.
- Die Zähmodifikation steigert die Energiefreisetzungsrate in so hohem Grad, dass kein weiter Riss im Versuch entsteht.
- Die Zähmodifikation wirkt als Rissstopper.

7.4 Nachweis der Festigkeitssteigerung bei SLS

Die Untersuchungen unter reiner Mode I und Mode II Belastung auf die Klebschicht zeigen gute Ergebnisse in Bezug auf die erwartete Senkung der Spannungskonzentrationen durch die lokale Oberflächenzähmodifikation. Jedoch zeigen die beiden Untersuchungen an DCB und ENF-Proben auch die Schwierigkeiten der Quantifizierung des zähmodifizierenden Effektes auf. Der Hintergrund dafür ist neben dem Probendesign auch die Auswahl des Auswerteverfahren der beiden Proben.

Für die Quantifizierung des zähmodifizierenden Effektes wird daher die SLS-Probe herangezogen. Hintergrund ist, dass in Kapitel 7.2 und Kapitel 7.3 gezeigt wurde, dass die Zähmodifikation einen hohen festigkeitssteigernden Effekt unter Schälbelastung und einen noch stärkeren Effekt unter Schubbelastung besitzt, der durch die ENF-Probe zwar identifiziert, jedoch nicht quantifiziert werden konnte. Beide Belastungen treten randnah an der SLS-Probe auf (vgl. Abbildung 2-24 und Abbildung 2-25), bei der die Schälbelastung jedoch für die versagensinitiierende Belastung verantwortlich ist. Mithilfe der SLS-Probe lässt sich eine Vielzahl von Geometrie- wie Substrat- und Klebstoffanpassungen vornehmen, um den Effekt und die Ursache genau identifizieren zu können. Als Auswerteverfahren wird an dieser Stelle zusätzlich zur Kraft und Dehnungsmessung ein hochauflösendes Bildverarbeitungssystem, kurz DIC *Digital Image Correlation* verwendet. Mithilfe des selbstentwickelten *High-Res DIC* [159][48] können Dehnungen im Klebstoff und Laminat sichtbar gemacht werden.

Folgende Untersuchungen aus Tabelle 7-2 werden daher in diesem Kapitel 7.4 durchgeführt:

Ziel der Untersuchung:	Was wird untersucht?	Kapitel
Ideale Position der lokalen Zähmodifikation identifizieren	Vergleich verschiedener Bereiche der Zähmodifikation in der Verbindung	7.4.3
Auswirkung von ST im Vergleich zum SdT identifizieren	Vergleich verschiedener Fügeteil- bzw. Klebstoffausläufe mit der Zähmodifikation	7.4.4
Federmodell bestätigen	Anwendung verschiedener Zähmodifikationsmaterialien	7.4.5
Einfluss von Eigenspannungen identifizieren	Vergleich von kalt- und warmaushärtenden Klebstoffsystemen	7.4.6
Potenzial von ST auf Verbindungsfestigkeit aufzeigen	Vergleich verschiedener Überlappungslängen	7.4.7
Anwendung bei Metallen aufzeigen	Vergleich verschiedener steifer Metalle als Fügepartner	7.4.8
Anwendung von ST im Klebstoff	Vergleich von Metall- und ausgehärtetem Faserverbundsubstrat als Fügepartner	7.4.9

Tabelle 7-2: Überblick des Probenprogramms der SLS-Versuche

7.4.1 Modellbildung zur SLS-Probe

In Analogie zu DCB und ENF-Proben wird anhand von Abbildung 7-14 der Dehnungsverlauf im Klebstoff dargestellt. Aufgrund der Probengeometrie entsteht, wie in Kapitel 2.5.5 beschrieben, eine Kombination aus Schub und Schälbelastung aufgrund des Biegemomentes auf die Klebverbindung. Wird die Last auf die Verbindung erhöht, entstehen wieder randnahe Spannungskonzentrationen, welche bei Überlastung der Klebstofffestigkeit zuerst zum Anriss führen und bei spröden Klebstoffen auch zum schlagartigen Versagen der ganzen Verbindung, da durch den Anriss die Klebfläche verkleinert wird, wodurch die Belastung wiederum steigt und der Riss ad hoc weiterläuft.

Durch lokale Zähmodifikation der belasteten Bereiche wird diese Überbeanspruchung des Klebstoffes vermieden. Die Spannungskonzentrationen, welche randnah aufgrund großer

Dehnungen im Klebstoff auftreten, werden durch die Dehnung des deutlich duktileren ST-Materials übernommen. Während in Abbildung 7-14 die Kraft F₂ bei der Referenzprobe zum Anriss führt, bleibt die Probe mit lokaler Zähmodifikation unbeschadet.



Abbildung 7-14: Modellverhalten von SLS-Proben mit und ohne ST

Als abgeleitetes Fazit muss eine Verbindung mit lokaler Zähmodifikation daher eine höhere Verbindungsfestigkeit aufweisen.

7.4.2 Versuchsdurchführung der SLS-Proben

Die *Single Lap Shear* Probe, zu Deutsch einfach überlappende Schubprobe ist in der Norm ASTM 5868 als Standard Testmethode für einfache Überlappungsklebverbindungen von Faserverbundwerkstoffen definiert. Bewusst wird diese Norm herangezogen, da diese über eine Überlappungslänge von 25,4 mm, im Gegensatz zu 12,5 mm bei der DIN EN 1465 verfügt, womit eine größere geometrische Vielfalt in den Versuchen stattfinden kann.

Die Geometrie wird leicht verändert aus der ASTM 5868 übernommen und dient als Grundgeometrie für alle SLS-Versuche. Die Bemaßungen sind in Abbildung 7-15 aufgeführt. Diese geometrischen Änderungen der untersuchten Probeserien zur Grundgeometrie werden in jedem folgenden Unterkapitel weiter beschrieben. Die Fügepartner bestehen aus dem 2 mm quasiisotropen Laminat, beschrieben in Kapitel 5.2.1 und getestet in Kapitel 7.1. Die freie Weglänge zwischen den Spannfuttern der Prüfanlage beträgt 175 mm. Getestet wird dabei mit einer 250 kN Zwick 1476 Universalprüfmaschine und hydraulischem Spannfutter mit 150bar Anpressdruck, sofern Proben bei Raumtemperatur geprüft werden und der 100 kN Zwick 1484 bei Temperaturprüfungen mit Keilzugklemmen als Spannfutter. Die Variation wird durch die Verwendung der Klimakammer bedingt.



Abbildung 7-15: Geometrie der SLS-Probe in Anlehnung an ASTM 5868

Parallel zur Dehnungs- und Kraftmessung werden Fotos mittels 42 Megapixel Sony α 7 RIII Kamera aufgenommen. Die untersuchten Bereiche der Proben müssen dafür zuvor mittels Airbrush System besprüht werden. Um einen hohen Kontrast bei der späteren Dehnungsauswertung zu erreichen, eignet sich eine schwarz-weiße Kombination, bei der zuerst die Oberfläche mit Titandioxid in Isopropanol als Trägerflüssigkeit besprüht wird (weiß) und anschließend sehr fein Eisen(II)-Oxid aufgetragen wird (schwarz). Alle Ergebnisse in tabellarischer Form sind im Anhang B aufgeführt.



Abbildung 7-16: Versuchsaufbau der SLS-Prüfungen

7.4.3 Positionierung der lokalen Zähmodifikation

Die Spannungskonzentrationen treten am Rand der Überlappungsverbindung auf. Dennoch ist aus dem real elastisch-plastischen Verlauf vgl. Abbildung 2-26 bekannt, dass sich durch das einsetzende Fließverhalten flächige Bereiche hoher Belastung ergeben. Ziel ist, diese durch das duktile Material in den inneren Bereich der Klebverbindung abzuleiten und dadurch einen deutlich homogeneren Spannungsverlauf und unmittelbar daraus folgend eine höhere Verbindungsfestigkeit zu erreichen.

Neben der Grundgeometrie aus Abbildung 7-15, welche für die Referenzprobe ohne Zähmodifikation genommen wird, werden die mit PVDF zähmodifizierten Bereiche der Klebverbindung nach Abbildung 7-17 positioniert.



Abbildung 7-17: Variation der lokalen Oberflächenzähmodifikation in der SLS-Probe

Die Ergebnisse der Zugscherprüfungen sind im Detail in Tabelle 7-3 und grafisch in Abbildung 7-18 aufgeführt. Gut zu erkennen ist dabei, dass alle Varianten zur Positionierung der lokalen Oberflächenzähmodifikation einen positiven Einfluss auf die Verbindungsfestigkeitssteigerung besitzen.

Deutlich ist dabei ein glockenkurvenförmiger Verlauf der Verbindungsfestigkeitssteigerung von -nicht zähmodifiziert- bis hin zu -komplett zähmodifiziert- zu erkennen. In Relation zur Referenz besitzt dabei die Variante mit einem 10 mm PVDF-Streifen, bei der je 5 mm vor und 5 mm in der Verbindung liegen, mit 84 % höherer Verbindungsfestigkeit, die größte Auswirkung.

Bei Betrachtung der Bruchbilder in Abbildung 7-19 kann ein kohäsives Versagen in der Klebschicht identifiziert werden. Die Probenreihen ST_5 und ST_30 weisen dabei zusätzlich noch kleine Bereiche von Faserausrissen der ersten Lage im Laminat auf. In beiden Fällen reißt dabei die PVDF-Folie aus dem Substrat mit heraus, an der wiederum Fasern hängen bleiben. Da das Bruchbild aber gerade auch bei der ST_30 Probe sehr inhomogen ist und weder akustisch ein Knistern bzw. Knacken, noch visuell Schäden in DIC-Aufnahmen während der Belastung der Probe identifiziert werden können, wird es an der hohen Energiefreisetzung des Risswachstums bei dem Versagen der Probe liegen. Diese sprengt förmlich die Verbindung auseinander. Es kann

daher von einer guten Anbindung der PVDF-Folie, sowie einer guten Oberflächenvorbehandlung des Substrates ausgegangen werden.



Abbildung 7-18: Verbindungsfestigkeit der Überlappungsklebungen mit Variation der lokalen Oberflächenzähmodifikation

In den Bruchbildern der Probenserien ST_10 und ST_17,5 kann weiter im vorderen Bereich der Überlappung eine weißliche Verfärbung des PVDF-Streifens erkannt werden, was auf gleichnamigen Weißbruch schließt. Da auf dem Material jedoch noch Klebstoffreste anhaften, bedeutet dies, dass sich das PVDF-Material selbst weit in den plastischen Bereich verformt hat und dies somit auf sehr hohe Dehnungen schließen lässt, da der Riss außerhalb des Materials im Klebstoff verlaufen ist.

Serie	tк	F _{Br,AV}	$ au_{Br,AV}$	$\epsilon_{\rm Br}$
	[mm]	[N]	[MPa]	[%]
Referenz (2018)	0,15	12957	20,9	0,43
ST_5	0,15	16798	26,8	0,64
ST_10	0,15	24159	38,4	0,82
ST_17,5	0,14	17134	27,3	0,62
ST 30	0,11	13892	22,0	0,40

Tabelle 7-3: Versuchsergebnisse der Überlappungsverklebungen mit Variation der lokalen

 Oberflächenzähmodifikation

Werden die Aufnahmen unmittelbar vor Bruch der Proben mittels DIC-Auswertung aus Abbildung 7-19 betrachtet, kann bei der Referenz das schon in der Literatur erwähnte Versagen vom Rand der Verbindung aus gut erkannt werden. Die Auswirkungen der Spannungen bestehend aus Schub- und Schälanteil, werden in diesen Aufnahmen als Dehnungen von Mieses dargestellt und dienen lediglich der Sichtbarmachung von belasteten Bereichen in der Probe. Bei der Referenz sieht man daher, dass lediglich der Bereich vor dem Anriss hoch belastet ist. Bei den zähmodifizierten Proben kann dadurch jeweils gut die Lage des PVDF-Streifens erkannt werden, da dieser in allen Aufnahmen höher belastet ist. Bei Probenserie ST_17,5 lässt sich dadurch auch erkennen, dass der PVDF-Streifen (rot) deutlich stärker gedehnt wird als die Klebschicht selbst und dass in der Mitte der Probe die Dehnungen von der einen PVDF-Lage unmittelbar in die der anderen Substratseite springt. Der Klebstoff wird dabei nur mäßig gedehnt (türkise eingefärbt). Bei der ST_30 Probe mit komplett beidseitig durchgehenden PVDF-Streifen in der Substratoberfläche kann erkannt werden, dass lediglich diese Dehnungen erfahren und der Klebstoff dazwischen fast unbelastet erscheint.



Abbildung 7-19: Qualitative Dehnungsauswertung nach von Mieses in DIC Aufnahme unmittelbar vor Bruch der Verbindung und entsprechendes Bruchbild der Probe – Surface Toughening

Ganz anders sieht es bei der ST_10 Variante aus, bei der der PVDF-Streifen hochgedehnt (rot) von Beginn des Überlappungsbereiches bis zum Ende des Streifens ist. Die hohe Dehnung geht

dann weiter in den Klebstoff über. Deutlich ist zu erkennen, dass die Klebschicht am Überlappungsrand dabei entlastet wird (türkisfarbene Färbung).

Ebenfalls lässt sich in den Probenserien ST_10 und ST17,5 schon eintretender Zwischenfaserbruch in Form von Delaminationen im jeweils linken Bildrand von Abbildung 7-19 erkennen. Bei diesen beiden Probereihen konnte auch ein Knistern vor dem Versagen gehört werden.

Eine direkte Gegenüberstellung des Scherwinkelvergleiches ist im Anhang Abbildung C-4aufgeführt.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die lokale Oberflächenzähmodifikation reduziert Spannungskonzentrationen unter Mixed-Mode Belastung in einfach überlappten Klebverbindungen.
- Die Verbindungsfestigkeit wird dadurch deutlich gesteigert.
- Den größten Effekt von 84 % Verbindungsfestigkeitssteigerung weist die Variante mit 10 mm PVDF-Streifen auf.
- Die geringste Festigkeitssteigerung von 5,6 % wird durch eine vollflächige Zähmodifikation erzielt.
- Ein negativer Einfluss durch das Zähmodifizieren konnte bei keiner Variante identifiziert werden.

7.4.4 Verbindungsfestigkeitssteigerung von lokaler Oberflächenzähmodifikation im Vergleich zum Stand der Technik

Um den festigkeitssteigernden Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation mittels PVDF aus Kapitel 7.4.3 einordnen zu können, wird dieses mit den festigkeitssteigernden Konzepten vom Stand der Technik (SdT) aus Kapitel 3 verglichen.



Abbildung 7-20: Verschiedene Geometrieanpassungen aus dem Stand der Technik

Ausgewählt werden dabei die am ehesten industriell umzusetzenden Geometrien mit dem größten Einfluss auf die Randspannungssenkungen und damit die Steigerung der 108

Verbindungsfestigkeit. Ausgewählt werden Modifikationen des Klebstoffauslaufs durch ein halbes Dreieck mit 45° Winkel und ein Bogen mit 2 mm Radius. Weiter wird noch eine 45°-Fase als Fügeteilmodifikation ausgewählt. Die Geometrien sind in Abbildung 7-20 dargestellt. Während die Fase vor dem Verkleben ins Fügeteil gefräst wird, werden die Klebstoffausläufe gezielt über bearbeitete Bleche, welche in Trennfolie eingeschlagen sind, hergestellt. Diese werden beim Klebstoffaushärten an die Überlappung gepresst. Das Ergebnis der gefertigten Proben im Schliffbild ist in Abbildung 7-21 zu sehen.



Abbildung 7-21: Detailaufnahme der verschiedenen gefertigten Überlappungsränder

Während die Geometrien von Referenz und Bogen gut getroffen sind, weist der Klebstoffauslauf zum halben Dreieck schon Abweichungen zur Sollgeometrie auf, was durch eine nicht optimal an den Deckblechen sitzende Trennfolie liegen kann. Ebenfalls ist bei der Variante mit Fase der Klebstoff ungewollt ausgelaufen. Beide Fälle zeigen, dass es selbst im Labormaßstab schwierig ist, eine gewünschte Geometrie für den Klebstoffauslauf zu erreichen. Die genaue Fertigung ist in [160] aufgeführt. Die Referenzprobe sowie die ST_10 Probe entsprechen schon der in Kapitel 7.4.3 behandelten Proben.

Die Verbindungsfestigkeiten der Zugscherprüfungen dieser Serien sind in Abbildung 7-20 aufgeführt und fallen für die Varianten aus dem Stand der Technik unerwartet niedrig aus.



Abbildung 7-22: Verbindungsfestigkeit der Überlappungsklebungen mit verschiedenen Konzepten der Literatur zur Festigkeitssteigerung

Trotz kohäsivem Bruchbild, wie aus Abbildung 7-23 zu entnehmen, liegen die Verbindungsfestigkeiten der beiden Klebstoffausläufe mit halbem Dreieck und Bogen sowie das der Referenz auf gleichem Niveau. Lediglich die Fügeteilmodifikation der Fase führt zu einer Steigerung der Verbindungsfestigkeit von 8,6 %. Werden dazu die Klebschichtdicken aus Tabelle 7-4 betrachtet, ist die Klebschichtdicke bei den Modifikationen etwa halb so dick wie die der Referenz. Unter Berücksichtigung des Klebschichtdickendiagramms Abbildung 2-11 sind die erzielten Klebschichtdicken von 0,08 mm und 0,15 mm aber nahezu auf ähnlichem Niveau, weshalb dies auch keine Erklärung für die geringen erreichten Festigkeiten ist.

Serie	tк	$F_{\mathrm{Br,AV}}$	$ au_{ ext{Br,AV}}$	$\epsilon_{\rm Br}$
	[mm]	[N]	[MPa]	[%]
Referenz (2018)	0,15	12957	20,9	0,43
halbes Dreieck	0,07	13347	21,6	0,41
Bogen	0,07	12736	20,7	0,39
Fase	0,08	14286	22,7	0,44
ST_10	0,15	24159	38,4	0,82

Tabelle 7-4: Versuchsergebnisse der Überlappungsklebungen mit verschiedenen Konzepten der Literatur zur Festigkeitssteigerung

Werden die DIC-Aufnahmen in Abbildung 7-23 betrachtet, fällt schnell auf, dass bei beiden Proben mit Klebstoffauslauf der Klebstoff sich kurz vor Versagen von dem jeweils oberen Fügepartner schon abgelöst hat. Es entsteht somit dieselbe Geometrie wie die der Referenzprobe, was auch die nahezu selben Festigkeitswerte erklärt. Zu sehen ist dann wieder die punktuell auftretende hohe Dehnung nach von Mieses und keinerlei homogene Belastung im restlichen Klebstoff.



Abbildung 7-23: Qualitative Dehnungsauswertung nach von Mieses in DIC-Aufnahme unmittelbar vor Bruch der Verbindung und entsprechendes Bruchbild der Probe – Stand der Technik

Die Fase hingegen zeigt bis kurz vor Versagen der Klebverbindung einen etwas homogeneren Bereich nahe des Überlappungsrandes. Läuft dann der Riss los, bricht diese aber ebenfalls wie die Referenzprobe.

Trotz der guten Bewertung aus der Literatur eignen sich diese Konzepte bei dieser Materialkombination nicht für eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit bzw. zum Rissstopp.

Der Strukturklebstoff scheint für Klebstoffmodifikationen zu spröde zu sein und das Laminat zu steif, um mit einer 45° Fase einen positiven Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit zu erwirken.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die Konzepte zur Steigerung der Verbindungsfestigkeit aus der Literatur zeigen für den • Klebstoffauslauf keinerlei Wirkung für die hier verwendeten Materialien und die Verbindungsgeometrie.
- Die Fügeteilmodifikation zur Fase hat einen minimalen festigkeitssteigernden Einfluss von 9 %.
- Mittels DIC-Auswertung kann für keine Modifikation aus dem Stand der Technik eine Lastumlagerung identifiziert werden.
- Es ist sehr schwierig, selbst im Labormaßstab die Sollgeometrien zu erreichen, weshalb eine industrielle Anwendung als nicht machbar bewertet wird. (Vgl. Kapitel 10.2)

7.4.5 Nachweis des Federmodells für den zähelastischen Effekt

experimentell nachgewiesen wurde, die Idee lokale Nachdem dass der Oberflächenzähmodifikation allgemein funktioniert und eine deutliche Festigkeitssteigerung bewirkt, wird in diesem Unterkapitel das Prinzip untersucht.



Abbildung 7-24: Variation des zähmodifizierenden Materials der SLS-Probe

Dafür wird die Idee des Federmodells aufgegriffen, bei der aus Klebstoff und zähmodifizierendem Material eine Reihenschaltung entsteht. Wird die Federkonstante im zähmodifizierenden Randbereich kleiner als die des reinen Klebstoffes, wird der Randbereich entlastet.

Für eine Klebschichtdicke von 0,15 mm, also einer halben Klebschichtdicke von 0,075 mm, sind die errechneten Werte der Gesamtfedersteifigkeiten in Tabelle 7-5 aufgeführt. Die Werte sind auf 1 mm² Klebfläche normiert. Die Referenz ohne Zähmodifikation besitzt dabei die höchste Federsteifigkeit, was einer schwer zu verformenden Feder gleicht. Bei Verwendung von PVDF reduziert sich die Gesamtfedersteifigkeit deutlich - die Feder lässt sich also leichter verformen. Ausgerechnet werden diese je für die Materialien von Kynar® und Nowofol®. Trotz unterschiedlichem Elastizitätsmodul ergeben sich aufgrund der leicht unterschiedlichen Dicken die fast identische Federsteifigkeit mit einem Verhältnis von je 0,3 zur Referenz. Die Anwendung von PEEK erzielt eine deutlich höhere Gesamtfedersteifigkeit und damit ein Verhältnis von nur

0,5. Da nach diesem Federmodell nur das Elastizitätsmodul und die Dicke eine Rolle spielt, müsste also auch eine Aufdickung des Klebstoffes allein einen Einfluss erzielen. Somit wird bei einer Serie ein unvorbehandelter PEEK-Streifen eingelegt, welcher nach dem Aushärten des Laminates einfach wieder herausgenommen werden kann, da er nicht anhaftet. Der entstandene Spalt wird im weiteren Verlauf vorbehandelt und mit Klebstoff gefüllt. Es entsteht auf diese Weise eine Klebstoffaufdickung, welche nach der Literatur einen positiven Einfluss auf die Klebverbindung haben müsste. Somit würde das Federmodell auch dieses Phänomen abbilden. Das dadurch erzielte Verhältnis zur Referenz beträgt 0,4 und müsste somit eine höhere Entlastung des Randbereichs erzielen als die Version mit PEEK. Es wird dabei nur die Schälkomponente durch das Modell betrachtet.

Serie	tк	tsт	E-Modul	Gesamtfeder- steifigkeit	Steifigkeits- verhältnis
	[mm]	[mm]	[MPa]	[N/mm]	zur Referenz
Referenz	0,15	-	2576	34347	1
ST_10 PVDF Kynar	0,15	0,125	1716	9808	0,3
ST_10 PVDF Nowofol	0,15	0,1	1398	9936	0,3
ST_10 PVDF PEEK	0,18	0,1	3362	15460	0,5
ST_10 PVDF EA9695	0,15	0,1	2576	14720	0,4

 Tabelle 7-5:
 Federmodell - Gesamtfedersteifigkeiten bezogen auf die Klebschichtmittellinie im Bereich der Zähmodifikation

Werden die Gesamtfedersteifigkeiten wie in Abbildung 7-25 über die Klebschichtdicke aufgetragen, so kann deutlich abgeleitet werden, dass gerade der zähmodifizierende Effekt bei sehr dünnen Klebschichten einen hohen Einfluss haben muss. Dort ist die Federsteifigkeit des reinen Klebstoffes sehr hoch.



Abbildung 7-25: Federmodell - Verläufe der Gesamtfedersteifigkeiten am Überlappungsrand über die halbe Klebschichtdicke

Da die Proben mit einer neuen Charge vom Klebstoff EA9695 verklebt sind, wird auch eine neue Referenzprobenserie gefertigt und getestet. Die Ergebnisse der Prüfung sind in Abbildung 7-26 dargestellt. Die Referenzproben aus 2021 erreichen zu 2018 eine kleine Steigerung von 6 % und sind damit auf ähnlichem Niveau wie zuvor. Auch die beiden Zähmodifikationen mit PVDF erzielen den schon bekannten hohen Wert der Verbindungsfestigkeit. Dabei stammt das Ergebnis von PVDF Kynar[®] noch aus der 2018 Prüfung. Interessant ist dabei, dass die Verbindungs-Festigkeitssteigerung 2018 von der Referenz zur ST_10 Serie bei +84 % Steigerung lag und in der jetzigen Prüfung 2021 bei +86 % ist. Somit ist die Verbindungsfestigkeitssteigerung nahezu gleich hoch, aber abhängig vom verwendeten Klebstoff bzw. dessen Klebstofffestigkeit.



Abbildung 7-26: Verbindungsfestigkeit der Überlappungsklebungen mit verschiedenen zähmodifizierenden Materialien

Die Variante mit PEEK als Zähmodifikation verschlechtert die Verbindungsfestigkeit um fast -20 % zur Referenz. Die Verwendung von Klebstoff als Zähmodifikation erzielt eine sehr leichte Verschlechterung von -2,5 % zur Referenz. Diese Abweichung ist jedoch noch kleiner als die Streuung zwischen den beiden Serien der Referenz von 2018 und 2021 und kann daher evtl. sogar vernachlässigt werden. Die Werte der Prüfung sind in Tabelle 7-6 aufgeführt.

Serie	tк	$F_{\mathrm{Br,AV}}$	$ au_{\mathrm{Br,AV}}$
	[mm]	[N]	[MPa]
Referenz (2021)	0,13	13943	22,3
ST_10 PVDF Kynar (2018)	0,15	24159	38,4
ST_10 PVDF Nowofol	0,15	25730	41,4
ST_10 PEEK	0,18	11156	17,8
ST_10 EA9695	0,11	13413	21,5

Tabelle 7-6: Versuchsergebnisse der Überlappungsklebungen mit verschiedenen zähmodifizierenden Materialien

Als Ergebnis muss daher angenommen werden, dass das **Federmodell** so nicht funktioniert. Grund dafür könnte sein, dass im Modell der Fügepartner als unendlich steif angenommen wird. In der Anwendung ist aber bekannt, dass sich dieser deutlich mit dehnt. Somit müsste auch der Fügepartner eine Steifigkeit bekommen. Aus den Versuchen ist ersichtlich, dass die Steifigkeit ungefähr die des Klebstoffes haben muss, da eine Klebstoffaufdickung wie ST_10 EA9695 gezeigt hat, zur Referenz keine signifikante Veränderung zeigt. Da dieses Verhalten bei Proben mit bspw. 45° Interface bei Versagen meist die erste Lage des Laminates herausreißt, wird der Dehnungseffekt auch nur auf die unmittelbare nächste Schicht zum Klebstoff bezogen. Der Dehnungseffekt wird daher nur auf die Referenz und nicht auf die ST_10 Proben aufgeschlagen.

Ein Diagramm mit Modifiziertem Federmodell ist in Abbildung 7-27 aufgeführt.



Abbildung 7-27: Modifiziertes Federmodell - Verläufe der Gesamtfedersteifigkeiten am Überlappungsrand über die halbe Klebschichtdicke mit Anpassung der Fügeteilsteifigkeit

Die Kurven von Referenz und ST_10 EA9695 verlaufen nun identisch. Weiter liegt jetzt die Kurve mit ST_10 PEEK deutlich über dem Verlauf der Referenz, was bedeutet, dass die Gesamtfedersteifigkeit bei Verwendung von PEEK als Zähmodifikation zu einer Vergrößerung der Belastung im Randbereich führt, was wiederum zu einem schnelleren Versagen führt und auch in den Ergebnissen zu erkennen ist.

Alle Gesamtfedersteifigkeiten sind für die getesteten Proben in Tabelle 7-7 eingetragen.

Vereinfacht kann daraus für gleichgroße Folienstärken von bspw. 0,1 mm geschlossen werden, dass sobald das Elastizitätsmodul des zähmodifizierenden Werkstoffs größer ist, als das des Klebstoffes, der Effekt einer Überlappungsrandentlastung einer Klebverbindung nicht funktioniert. Demnach wird auch keine Verbindungsfestigkeit gesteigert.

Serie	tк	tsт	E-Modul	Gesamtfeder- steifigkeit	Steifigkeits- verhältnis
	[mm]	[mm]	[MPa]	[N/mm]	zur Referenz
Referenz	0,15	-	2576	14720	1
ST_10 PVDF Kynar	0,15	0,125	1716	9808	0,7
ST_10 PVDF Nowofol	0,15	0,1	1398	9936	0,7
ST_10 PVDF PEEK	0,18	0,1	3362	15460	1,1
ST_10 PVDF EA9695	0,15	0,1	2576	14720	1

Tabelle 7-7: Modifiziertes Federmodell - Gesamtfedersteifigkeiten bezogen auf die

 Klebschichtmittellinie im Bereich der Zähmodifikation mit Anpassung der Fügeteilsteifigkeit

Im Anhang C ist das modifizierte Federmodell noch für zwei weitere thermoplastische Werkstoffe PEI und K72 aufgezeigt, bei denen das Modell ebenfalls funktioniert.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Ein modifiziertes Federmodell, bei dem auch die Fügeteildehnung berücksichtigt wird, kann zur groben Abschätzung der lokalen Oberflächenzähmodifikation herangezogen werden.
- Steigt die Gesamtfedersteifigkeit, abhängig von Elastizitätsmodul und Dicke des Zähmodifizierenden Materials und des Klebstoffes, nur leicht über den Wert der reinen Verklebung, so findet keine Verbindungsfestigkeitssteigerung statt, stattdessen sinkt diese überproportional stark.
- Sinkt der Wert der Gesamtsteifigkeit unter den Wert der reinen Klebverbindung, steigt die Verbindungsfestigkeit. Der Effekt ist allerdings sensitiver und der Wert muss deutlich darunter liegen.

Da die Bruchbilder der ST_10 PVDF-Proben jedoch Weißbruch im PVDF gezeigt haben, muss an dieser Stelle ganz klar erwähnt werden, dass der Einfluss der Verbindungsfestigkeitssteigerung sich im Bereich der Plastizität des Thermoplasten abspielt, in welchem ein hochgradig nicht lineares Materialverhalten herrscht, welches nicht mit analytischen Ansetzen abzubilden ist. Die Abschätzung der Verbindungsfestigkeitssteigerung ist daher Teil hochkomplexer FEM und wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

7.4.6 Einfluss von Eigenspannungen auf den zähelastischen Effekt

Um zu überprüfen, ob der Zähmodifizierende Effekt evtl. von möglichen Eigenspannungen abhängig ist, wird eine weitere Versuchsreihe mit kaltaushärtendem pastösem EA9394 durchgeführt und mit der Variante von warm aushärtendem EA9695 verglichen.



Abbildung 7-28: Variation des Klebstoffes zur Eigenspannungsreduktion, Filmklebstoff EA9695 härtet bei 130 °C aus, pastöser Klebstoff EA9394 härtet bei Raumtemperatur aus

Die Idee dahinter ist, dass sich bei der Variante mit warmaushärtendem Klebstoff, nach dessen Aushärtung bei 130 °C, das PVDF stärker beim Abkühlen zusammenzieht, als das Fasermaterial darum. Das PVDF müsste sich bis zur Raumtemperatur von 23 °C durch den hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten um ein Δt von ca. 0,001 mm stärker zusammenziehen. Da das PVDF aber auf der anderen Seite am Klebstoff anhaftet, kann dieses nicht schrumpfen, sondern es entstehen Eigenspannungen im PVDF. Diese könnten einen Effekt auf die lokale Zähmodifikation haben.



Dieser Effekt würde bei einem kaltaushärtenden Klebstoff ausbleiben.

Abbildung 7-29: Verbindungsfestigkeit von warm- und kaltaushärtenden Klebstoffsystemen mit und ohne ST

Parallel zu der schon bekannten lokalen Oberflächenzähmodifikation mit dem Filmklebstoff zeigt sich für die Ergebnisse aus Abbildung 7-29 zu dem kaltaushärtenden pastösen Klebstoff eine ebenfalls sehr hohe Festigkeitssteigerung der Verbindung um 120 %. Dass der Effekt noch einmal deutlich stärker ist, liegt an dem niedrigeren Verbindungsfestigkeitswert der Referenz mit EA9394 Klebstoff, der wiederum auf den deutlich geringeren Klebstoffschubfestigkeiten beruht.

Werden jedoch die Werte der Prüfung aus Tabelle 7-8 miteinander verglichen, so sind die Festigkeitswerte beider Zähmodifikationen nahezu identisch.

Serie	tк	$F_{\mathrm{Br,AV}}$	$ au_{ ext{Br,AV}}$
	[mm]	[N]	[MPa]
Referenz EA9695	0,13	13943	22,3
ST_10 EA9695 heiß	0,15	25730	41,4
Referenz EA9394	0,35	11679	18,8
ST_10 EA9394 kalt	0,47	25955	41,4

Tabelle 7-8: Versuchsergebnisse von warm- und kaltaushärtenden Klebstoffsystemen mit und ohne ST

Der Hintergrund liegt dabei in dem eintretenden Versagen der ersten Lage durch Delamination, was in Abbildung 7-19 schon in der DIC-Auswertung identifiziert wurde. Während bei der ST_10 EA9695 heiß Probe zu dem Zeitpunkt der Klebstoff kohäsiv bricht, wirkt die etwa dreimal so dicke Klebschicht bei der ST_10 EA9394 kalt Variante mit einem deutlich höheren Biegemoment auf die Verbindung und reißt somit die Einzellage heraus. Der Unterschied im Bruchbild beider Serien ist in folgender Abbildung 7-31 gezeigt.



ST_10 EA9695 heiß

Abbildung 7-30: ST_10 mit warm- und kalt aushärtendem Klebstoff unmittelbar vor und nach Bruch bei ca. 25700 N

Da die Zähmodifikation für die Verbindungsfestigkeit für beide Klebstoffsysteme eine deutliche Steigerung erzielt, ist ein möglicher Effekt durch Eigenspannungen vernachlässigbar.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die lokale Oberflächenzähmodifikation funktioniert auch bei pastösen, kalt aushärtenden Klebstoffsystemen.
- Es kann kein Einfluss durch Eigenspannungen im zähmodifizierenden Material identifiziert werden.
- Da das Substrat der ST_10 Probe in beiden Fällen geschädigt wird, kann davon ausgegangen werden, dass die ST_10 Probe in dieser Konfiguration keine höhere Kraft übertragen kann als 25,9 kN. Die lokale Oberflächenzähmodifikation schöpft daher die höchstmögliche Festigkeit der Verbindung aus.

7.4.7 Einfluss der Überlappungslänge auf den zähelastischen Effekt

Mit der Erkenntnis aus Kapitel 7.4.6, dass die lokale Oberflächenzähmodifikation mit PVDF die höchste Festigkeit der Verbindung erreicht und das Fügeteil statt der Klebverbindung versagt, werden in diesem Unterkapitel verschiedene Überlappungslängen betrachtet.

Es wird dabei erwartet, dass die Verbindungsfestigkeit durch die Zähmodifikation auf einem konstant hohen Level gehalten wird, während die der Referenz, wie aus der Literatur, abnimmt und kaum mehr Kraft überträgt. Das Ziel ist dabei zu zeigen, welche Masseneinsparung durch Verwendung der lokalen Zähmodifikation erzielt werden kann.



Abbildung 7-31: Variation der Überlappungslänge

Für die Untersuchungen werden drei verschiedene Überlappungslängen untersucht.

Die Auswahl der Längen bezieht sich dabei auf die Idee, die Steifigkeit des zähmodifizierenden Materials auf null zu setzen, was bedeutet, dass die Feder keine Kraft übertragen könnte. Somit wäre die effektive Überlappungslänge nur noch 15 mm und entspräche der Referenz von ST_10 15 mm. Daraus lässt sich zusammen mit den Ergebnissen aus Kapitel 7.4.6 ein Diagramm der Festigkeitssteigerung über das verwendete Elastizitätsmodul erstellen.
Die Proben werden wieder identisch zu den bisherigen Versuchsreihen angefertigt und getestet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-32 aufgeführt.



Abbildung 7-32: Verbindungsfestigkeit und Bruchkraft verschiedener Überlappungslängen mit und ohne ST

Die Ergebnisse der Referenzproben zeigen selbigen Verlauf, der schon im Grundlagenteil vorgestellten Ergebnisse aus Abbildung 2-23. Die Verbindungsfestigkeit nimmt mit zunehmender Überlappungslänge ab und bildet eine Asymptote. Lediglich die Bruchkraft steigt linear an. Das könnte bedeuten, dass bei weiterer Vergrößerung der Überlappungslänge auch die Bruchkraft weiter steigen könnte und sich die Asymptote der Bruchkraft erst später einstellt. Da nur drei Stützpunkte zur Verfügung stehen, müssten noch weitere Versuche mit größerer Überlappungslänge durchgeführt werden, um dies zu beweisen.

Die Proben der lokalen Oberflächenzähmodifikation weisen bei Vergrößerung der Überlappungslänge sogar noch einen Anstieg der Verbindungsfestigkeit auf. Zwischen 25 mm und 35 mm bleibt diese konstant, was daran liegt, dass bei dieser Überlappung bereits das Laminat bricht. Über den Querschnitt des Fügepartners gemittelt, liegen mit 749,44 MPa etwa 84 % der Bruchspannung bereits an. Durch das zusätzliche Biegemoment tritt ein Fügeteilversagen über den gesamten Überlappungsbereich auf. Bei Verwendung des Laminat-Berechnungsprogramms ESAComp 4.7 befindet sich der Zwischenfaserbruch der 45°-Lagen bei 785 MPa und damit nur 4,6 % entfernt von der gemessenen Prüfkraft. Diese Lagen sind deutlich im Bruchbild in Abbildung 7-33 zu erkennen. Alle anderen Proben versagen kohäsiv im Klebstoff. Um dieses Phänomen zu unterdrücken, müsste das Laminat aufgedickt werden, wäre aber dann nicht mehr vergleichbar mit anderen Proben und wird daher nicht weiter behandelt.



Abbildung 7-33: Bruchbilder der Referenz und ST_10 Proben mit Überlappungslängen von 15 mm, 25 mm und 35 mm, Probennummer 4 jeder Serie

Die Ergebnisse der Prüfung sind in Tabelle 7-9 aufgeführt.

Serie	lк	lк tк		$ au_{ ext{Br,AV}}$
	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]
	15	0,11	10292	27,0
Referenz	25	0,13	13943	22,3
	35	0,13	18664	21,1
	15	0,14	13957	36,1
ST_10	25	0,15	25730	41,4
	35	0,21	37472	42,1

Tabelle 7-9: Versuchsergebnisse verschiedener Überlappungslängen mit und ohne ST

Neben der steigenden Verbindungsfestigkeit kann zusätzlich ein großer Anstieg der Bruchkraft beobachtet werden. In Abbildung 7-32 sind alle Werte auf die 25 mm Referenzprobe bezogen.

Deutlich ist dabei zu erkennen, dass die Bruchkraft der 25 mm Referenz identisch mit der 15 mm ST_10 Probe ist. Es kann also bei gleicher Kraftübertragung durch die lokale Oberflächenzähmodifikation 40 % Überlappungslänge und damit 40 % der Strukturmasse der Verbindung eingespart werden.

Werden die Werte von Bruchkraft und dazugehöriger Überlappungslänge beider Serien in einem Abbildung 7-34. Werden Diagramm aufgetragen, entsteht die nicht geprüften Überlappungslängen quadratischer Regression extrapoliert, kann per eine Gewichteinsparungskurve erstellt werden.



Abbildung 7-34: Gewichtseinsparung der lokalen Oberflächenzähmodifikation Regressionskurven mit quadratischem Ansatz

Somit steigt die Gewichtseinsparung mit steigender Überlappungslänge deutlich an und erzielt eine maximale Gewichtseinsparung von 65 % für eine angestrebte Bruchkraft von 37 kN. Limitierend für diesen Effekt ist die Substratfestigkeit an dieser Stelle.

Mithilfe der 15 mm Referenz kann schließlich auch ein Raum abgesteckt werden, in dem die lokale Oberflächenzähmodifikation anwendbar sein müsste. Weitere Stützpunkte werden zur genauen Aussage dennoch benötigt und sind nicht Teil dieser Arbeit. Die Ergebnisse sind in Abbildung C-7 aufgeführt.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die Oberflächenzähmodifikation spart experimentell belegt 40 % Strukturgewicht der Verbindung bei identischer Bruchkraft von 13,9 kN ein.
- Rechnerisch könnte die Gewichtseinsparung bis 65 % steigen, sofern die Referenzprobe bis zum Substratbruch bei 37,4 kN belastet wird und die Überlappungslänge daher für die Referenzprobe auf 97 mm verlängert werden müsste.

7.4.8 Verwendung von metallischen Substraten

In diesem Kapitel wird der Transfer vom Faserverbundsubstrat hin zum Metallischen untersucht. Dabei bleibt die Idee des Einbettens eines PVDF-Streifens in den Fügepartner erhalten. Nach Fertigungsablauf aus Kapitel 6.4 werden Proben aus einem duktilen Aluminium ENAW 5754, einem hochfesten Aluminium ENAW 7075 und Edelstahl V2A hergestellt. Die Ausführung ist in Abbildung 7-35 aufgeführt.



Abbildung 7-35: Variation des Fügepartnermaterials auf Metalle, ENAW 5754 ist ein duktiles Aluminium, ENAW 7075 ist ein hochfestes Aluminium, V2A ist Edelstahl

Beide Aluminiumsubstrate werden dabei mit der in Kapitel 6.1.3 untersuchten Laservorbehandlung vorbehandelt. Hingegen wird das Edelstahlsubstrat klassisch sandgestrahlt, da Edelstahl keinerlei strukturelle Verwendung in der Luftfahrt besitzt und entsprechend keine hochratenfähige Vorbehandlungsverfahren für diesen Werkstoff untersucht wurden.

In einem ersten Fertigungsschritt wird der PVDF-Streifen in die vorgefräste Nut verklebt. Anschließend wird der zu verklebende Bereich entfettet und mit Plasma vorbehandelt. Zuletzt werden beide Probehälften verklebt und ergeben die Probenplatte, welche in je 5 Einzelproben gefräst wird.

Abbildung 7-36 zeigt dabei die Ergebnisse der Prüfkampagne. Deutlich ist zu erkennen, dass zwischen der Referenz und der jeweils dazugehörenden Probe mit Oberflächenzähmodifikation, im Vergleich zu den Faserverbundproben, kaum ein Unterschied in der Verbindungsfestigkeit zu sehen ist.

Bei der ENAW 5754 Serie und bei der V2A Serie ist eine sehr hohe Sekundärbiegung der Probe zu beobachten und eine starke plastische Verformung der Proben nach der Prüfung. Abbildung A- zeigt die drei verschiedenen Probenmaterialen. Diese Beobachtung kann bei dem hochfesten ENAW 7075 Aluminium nicht gemacht werden.



Abbildung 7-36: Verbindungsfestigkeit der Überlappungsklebungen mit verschiedenen metallischen Substraten



Abbildung 7-37: Traversenweg über Kraft der Prüfmaschine aller Metallproben

Diese Beobachtungen sind auch in dem Traversenweg-Kraftdiagramm der Prüfmaschine zu erkennen. Hier wird auch der Unterschied zwischen hochfestem und duktilem Aluminium gut sichtbar. Ebenfalls ist bei den ST_10 Proben von beiden duktilen Metallen zu erkennen, dass die Kraft nach einem ersten Abfall noch zwei weitere Male wieder ansteigt. Dieses Phänomen ist damit zu erklären, dass sich die duktilen Metalle kontinuierlich von der Klebverbindung abgeschält haben. Dies passierte aber nicht symmetrisch. Vielmehr wird erst der Bereich vom ersten PVDF-Streifen abgeschält, dann die gegenüberliegende Seite vom PVDF und am Ende vom Bereich mit reinem Klebstoff.

Weiter ist auch zu erkennen, dass bei der V2A und ENAW 7075 Referenz der limitierende Faktor für die Verbindungsfestigkeit die Klebfestigkeit des Filmklebstoffes sein muss, da die Festigkeitswerte nahe beieinander liegen und mit den Werten der Laminatreferenz aus Kapitel 7.4.3 ebenfalls übereinstimmen. Die Versuchsergebnisse zur Prüfserie sind dazu in Tabelle 7-10 aufgeführt.

Material	Serie	tк	$F_{\mathrm{Br,AV}}$	$ au_{ ext{Br,AV}}$	$\epsilon_{\rm Br}$
		[mm]	[N]	[MPa]	[%]
ENAW 5754	Referenz	0,12	7788	11,8	2,1
	ST_10	0,15	7632	12,0	1,8
ENAW 7075	Referenz	0,11	11724	18,8	0,32
	ST_10	0,11	10445	16,7	0,17
V2A	Referenz	0,11	13310	21,3	0,17
	ST_10	0,11	14328	22,9	0,27

Tabelle 7-10: Versuchsergebnisse der Überlappungsverklebungen mit verschiedenen metallischen Substraten

Die Festigkeit der ENAW 5754 Referenz ist deutlich niedriger, was daran liegt, dass diese Aluminiumlegierung bereits ab 130 MPa in Walzrichtung zu fließen beginnt. Die Proben sind absichtlich senkrecht dazu gefertigt, um ein möglichst duktiles Metallverhalten zu erzielen. Rechnerisch würde somit das Material ab 6,5 kN zu fließen beginnen. In dem getesteten Fall müsste das Fließen bereits ab 6 kN mit deutlich zu erkennenden Plateaus eintreten, welche dann nach und nach steigen. Dies weist auf eine Kaltverfestigung durch das Strecken des Metalls hin. Durch diese sehr hohe Dehnung im Substrat von 1,8-2,1 % wird der hochspröde Klebstoff mit Bruchdehnung von nur 3,4 % überbelastet und versagt.

Derselbe Effekt kann auch dem V2A zugeschrieben werden. Bei 14 kN herrschen bereits im Fügepartner eine Zugspannung von 280 MPa. Rechnerisch müsste bei 190 MPa das Fließverhalten beginnen, was etwa 9,5 kN entspricht. In Abbildung 7-37 kann auch bei der Kraft eine Abweichung vom linearen Verlauf erkannt werden. Dieser ist zwar nicht so eindeutig wie beim duktilen ENAW 5754, dennoch wird das auch der Grund für den kaum höheren Wert der Verbindungsfestigkeit durch die lokale Oberflächenzähmodifikation von 8 % sein.

Bei der Serie mit hochsteifem ENAW 7075 fällt die sehr große Streuung der Ergebnisse in Abbildung 7-36 auf. Die Zähmodifikation zeigt hier sogar eine Verschlechterung von 10 %. Trotz

kohäsivem Bruchbild bricht der Klebstoff der ST_10 teils zwischen dem Aluminium und dem PVDF-Streifen heraus. Da der Klebstoff, der das PVDF am Substrat hält, mit 0,05 mm sehr dünn ist, kann davon ausgegangen werden, dass das Fräsen einer Nut in das Metallsubstrat nicht der richtige Ansatz für die Nutzung der Oberflächenzähmodifikation bei Metallen ist.

Da das ENAW 7075 Substrat das einzige Metall ist, bei dem der zähmodifizierende Effekt überhaupt wirken kann, bevor das Substrat das Fließen anfängt, wird eine Verbesserung der Anwendung von lokaler Oberflächenzähmodifikation bei Metallen angestrebt und in Kapitel 7.4.9 untersucht.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Das Konzept der lokalen Oberflächenzähmodifikation funktioniert nicht bei Applikation des zähmodifizierten Streifens in eine vorgefräste Nut bei metallischen Substraten, obgleich diese duktil oder hochfest sind.
- Mit dem Einsetzen des Fließens im Substrat versagt die Klebverbindung.
- Das Potenzial der Festigkeitssteigerung ist dadurch bei Metallen begrenzt.

7.4.9 Anwendung von ST im Klebstoff

Da der Werkstoff ENAW 7075 aber erst bei, 470 MPa das Fließen beginnt, könnte somit in der Klebverbindung eine maximale Verbindungsfestigkeit von 37,6 MPa erreicht werden. Da die Referenz aus Kapitel 7.4.8 lediglich 18,8 MPa erreicht, ist theoretisch eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit von bis zu 100 % möglich. Es wird daher ein anderes Konzept der Applikation für Metalle ausgearbeitet und erprobt.

Dafür wird ein je 5 mm breiter PVDF-Streifen randnah zwischen zwei Klebschichtlagen eingebettet und verklebt. Die verbesserte Geometrie ist in Abbildung 7-38 aufgeführt und ist somit werkstoffunabhängig.



Abbildung 7-38: Verbesserte Geometrie der ENAW 7075 Probe mit Oberflächenzähmodifikation

Getestet werden daher das Aluminiumsubstrat ENAW 7075 und als Vergleich dazu das Laminat aus 8552/IM7 Prepreg. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 7-11 aufgeführt.

Material	Serie	tк	F _{Br,AV}	$ au_{ ext{Br,AV}}$	$E_{(6kN-8 kN)}$	$\epsilon_{\rm Br}$
		[mm]	[N]	[MPa]	[MPa]	[%]
ENAW 7075	Referenz	0,28	11991	19,0	80135	0,34
	ST_10	0,36	15380	24,3	77730	0,41
8552/IM7	Referenz	0,26	15284	24,2	63463	0,44
	ST_10	0,35	19519	31,2	62552	0,58

Tabelle 7-11: Versuchsergebnisse der Überlappungsverklebungen mit ST in der Klebschicht

Die Ergebnisse in grafischer Aufarbeitung sind in Abbildung 7-39 aufgeführt. Deutlich ist dabei zu erkennen, dass die lokale Oberflächenzähmodifikation sowohl bei der Aluminiumlegierung, als auch beim Faserverbundsubstrat die Verbindungsfestigkeit um 28 % steigert.

Interessant ist dabei, dass die Proben deutliche Unterschiede in den Festigkeitswerten der Verbindung aufweisen. Bei genauer Betrachtung und Auswertung ist zu erkennen, dass die Elastizitätsmoduln beider Werkstoffe am Beispiel der Referenzproben vom ENAW 7075 mit 80,1 GPa und dem Laminat mit 63,4 GPa um 26 % abweichen. Das Laminat ist also um ein Viertel als die Aluminiumlegierung. Nach Volkersen elastischer steigen dadurch die Spannungskonzentrationen für die Schubkomponente um 10 % und für die Schälkomponente um 9 % für das Laminat. Das würde erklären, warum die Verbindungsfestigkeit der ST_10 8552/IM7 deutlich höher ausfällt, als die Aluminiumsubstrates, höhere des da Spannungskonzentrationen auch abgebaut bzw. umgelagert werden können.



Abbildung 7-39: Verbindungsfestigkeit von ST in der Klebschicht

Weiter ist das Aluminiumsubstrat isotrop aufgebaut und weist in alle Raumrichtungen dasselbe Elastizitätsmodul auf. Somit besitzt dieses auch knapp 80 GPa normal zur Belastungsrichtung, auf die die Schälkomponente in der Verbindung wirkt. Das Substrat verformt sich somit wenig. Die Probe versagt möglicherweise früher, da der Klebstoff bzw. der zähmodifizierende PVDF- Streifen die höheren Dehnungen aufbringen muss. Dies müsste mit einer detaillierten nicht linearen FEM-Analyse weiter untersucht werden.

Das Laminat hingegen ist orthotrop aufgebaut und besitzt in transversaler Richtung lediglich ein Elastizitätsmodul von 9,2 GPa (siehe Tabelle 5-2), was gerade einmal 11 % des Aluminiumwertes entspricht. Somit gibt das Substrat unter Belastung deutlich mehr nach und die Schälspannungen in der Klebschicht fallen dadurch geringer aus. Dies führt wahrscheinlich zu einer Steigerung der Festigkeit der Verbindung.

Das Phänomen kann gut in der DIC-Aufnahme Abbildung C-3 mit Dehnungsauflösung quer zur Lastrichtung \mathcal{E}_y erkannt werden. Die Schäldehnungen im Klebstoff befinden sich dabei in gleicher Größenordnung wie die im Laminat.

Dass der Effekt der Verbindungsfestigkeitssteigerung allgemein deutlich geringer ausfällt, als bei der Einbettung des Streifens in das Laminat, kann dadurch begründet werden, dass die Schichtdicke des PVDF-Streifens halbiert wird bei gedanklicher Bildung der Mittelebene. Das Steifigkeitsverhältnis steigt von 0,7 auf 0,8 zwischen ST_10 und Referenz. Dadurch sinkt der Effekt der Zähmodifikation, wie es die Ergebnisse aus Kapitel 7.4.5 gezeigt haben.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Das Konzept der lokalen Oberflächenzähmodifikation, eingebettet im Klebstoff, funktioniert sowohl bei Aluminiumsubstrat ENAW 7075 als auch beim 8552/IM7 CFK.
- Es ergibt sich in beiden Fällen eine Verbindungsfestigkeitssteigerung von 28-29 %.
- Diese Applikation hat eine deutlich geringere Festigkeitssteigerung als die Einbettung in das Faserverbundsubstrat, macht aber eine nachträgliche Applikation von bereits ausgehärteten Laminaten möglich.
- Ein dickerer PVDF-Streifen müsste die Festigkeitssteigerung positiv beeinflussen.

7.5 Rissstoppfähigkeit bei CLS

Nachdem der spannungsreduzierende Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation ausgiebig durch quasistatische Versuche und die deutliche Steigerung der Verbindungsfestigkeit nachgewiesen ist, wird nun der Effekt unter dynamisch schwellender Last untersucht.

Das Ziel dabei ist, einen entstehenden Riss sicher zu stoppen.

7.5.1 Versuchsdurchführung

Getestet wird dafür eine *Cracked Lap Shear* Probe mit den Abmessungen aus Abbildung 7-40. Es handelt sich dabei um die Probe, die ebenfalls von Löbel zur Charakterisierung der *Hybrid Bondline* verwendet wurde.

Die Probe ist angelehnt an eine Rumpfsegmentverklebung, welche durch den Druckunterschied zwischen Innen- und Außendruck von Rumpf und Atmosphäre in Reiseflughöhe belastet wird.

Diese zieht an den Rumpfsegmenten und es wird dadurch eine dominierende Schubbelastung übertragen. Es werden zur Sicherheit zwei Rissstoppbereiche eingebracht, um zu untersuchen, ob ein Riss sicher gestoppt wird bzw. verlangsamt werden kann.



Abbildung 7-40: Geometrie der getesteten CLS-Probe

Es werden dabei je drei Proben pro Serie getestet. Der Hintergrund in der geringen Stückzahl liegt in dem sehr großen Zeitaufwand einer dynamisch getesteten Probe. Die Proben werden mit 8Hz schwellend belastet, bis diese eine Zyklenzahl von 10⁶ erreicht haben. Bei 8Hz ist noch keine Probenerwärmung identifiziert worden und auch die Prüfmaschine schwingt dort im Sollwertebereich. Eine Probe benötigt somit 34,7h für die Prüfung. Außerdem wird hinsichtlich eines Unterschieds der Proben zueinander geprüft.

Die aufgebrachten Prüflasten sind in Tabelle 7-12 aufgeführt. Die Belastung von 3000 μ m m⁻¹ entspricht dabei der Laminatdehnung von 0,3 % und wird allgemein als *Limit Load*, also die maximal auftretende Betriebslast für CFK-Laminate betrachtet.

Insgesamt entstehen somit 3 Prüfserien, je mit und ohne Oberflächenzähmodifikation. Die 10⁶ Lastwechsel entsprechen bei einer Rumpfsegmentklebung drei Lebenszyklen und sind daher sehr konservativ zu betrachten.

						┣	1 Z	yklus	S →			
Dehnung	F_{min}	F _{max}	Fmittel	Amplitude	Ζ					\bigwedge	\mathbf{i}	
[µm m ⁻¹]	[N]	[N]	[N]	[N]	т Т	/ Vax			/	Ampli	tude	
3000	928	9280	5104	4176	Las	<u> </u>	mittel	×				
3500	1086	10860	5973	4887	-		ш_	Щ			_	
4000	1243	12430	6837	5594					0,1	1 25 s	Zeit	[s]

Tabelle 7-12: Kraftniveau der dynamischen Prüfungen

Durchgeführt und ausgewertet werden die Versuche in Kooperation mit dem Institut für Mechanik und Adaptronik der TU Braunschweig (IMA). Der Rissfortschritt wird dabei über ein von Julian Steinmetz vom IMA entwickeltes Rissfortschrittsdetektionsprogramm, basierend auf neuronalen Netzwerken, ermittelt und anschließend eigenständig aufbereitet und ausgewertet. Der Hintergrund dieser Auswertung liegt dabei in der sehr aufwendigen, händischen Rissfortschrittsmessung, welche zu einer Vervielfachung der Prüfzeit führt, da jede Stunde eine Person messen muss, was zu keiner kontinuierlichen Messung führt. Zudem kann dies nur während der Arbeitszeit geschehen und eine Probe würde in der Prüfung somit eine Arbeitswoche für die Rissfortschrittsermittlung benötigen.

Weiter hat sich aus eigener Erfahrung gezeigt, dass das Ermitteln der Rissspitze nicht einfach ist, da die Rissfront im Prüfkörper voreilt, dies aber nicht kontinuierlich geschieht und somit beim Ablesen zu Messfehlern führt. Dies kann ungewollt bis zur menschlich verursachten Schönung der Werte hin zum Wunschergebnis führen, da der Interpretationsspielraum der Position der Rissspitze sehr groß ist. Ein Beispiel für die Aufnahmen zur Rissdetektion ist in Abbildung 7-41 dargestellt.



Abbildung 7-41: Rissfortschrittsmessung der Probe ST_01 3000 μ m m⁻¹ bei 1M Zyklen

7.5.1 Ergebnisse, Beobachtungen und Interpretation der CLS-Proben - dynamische Belastung

Die folgenden Abbildungen zeigen die Risslänge über die Zyklenzahl. Die Risslänge beginnt bei 5 mm, da vorher der künstliche Anriss eingebracht ist. Zu betonen ist noch einmal, dass die Rissspitze am Rand der Probe, der inneren Rissfront nacheilt, weshalb gerade bei den Rissstopppositionen der Riss nicht unbedingt am Risstopper anhält, sondern etwas davor. Weiter wird die gemessene Position angegeben und die Position, des nach Sollgeometrie theoretisch dort positionierten PVDF-Streifens. Die genaue Position kann durch Positionierungsungenauigkeiten abweichen.

Der erste Rissstopper in der Probe beginnt bei 25 mm und endet bei 35 mm, der Zweite beginnt bei 45 und endet bei 55 mm. Bei 60 mm endet die Rissfortschrittsdetektion.

In Abbildung 7-42 sind die Ergebnisse der 3000 μ m m⁻¹ Prüfserie aufgeführt. Deutlich zu erkennen, dass alle Referenzproben ohne Rissstoppelement nach bereits 200k Zyklen durch die Probe gelaufen sind und diese somit zerstört ist.

Anders sieht es für die Proben mit Rissstoppelement aus. Bei allen Proben wird der Riss sicher am ersten Rissstoppelement aufgehalten. Es findet kein weiteres Risswachstum statt. Bei den Proben ST_02 und ST_03 wächst der Riss am Rand nicht einmal bis zum ersten PVDF-Streifen. Das kann natürlich auch auf vorher beschriebenen, nacheilenden Effekt zurückzuführen sein.



Abbildung 7-42: Risslänge über Lastzyklenzahl bei 3000 µm m-1

Abbildung 7-41 zeigt die Probe ST_01 der Serie 3000 μm m⁻¹ bei 1M Zyklen. Der Riss wächst in der Klebschicht und springt nicht in das Laminat.

Genauso sieht es auch für die Verläufe der Proben mit 3500 µm m⁻¹ Belastung in Abbildung 7-43 aus. Die Anfangssteigungen, also die Risswachstumsgeschwindigkeit der Kurven, sind deutlich höher als bei den Proben zuvor. Demnach versagen die Referenzproben schon nach 110k Zyklen.

Deutlich ist aber zu erkennen, dass der Riss bei den ST-Proben auch am Rand bis zum ersten PVDF-Streifen bei 25 mm heranwachsen. Ob der Riss im Inneren der Probe weiterläuft, kann mit diesem Messverfahren nicht ermittelt werden.



Abbildung 7-43: Risslänge über Lastzyklenzahl bei 3500 $\mu m \ m^{-1}$

Der Riss bleibt ebenfalls in der Klebschicht und wächst nicht in das Laminat.

Abbildung 7-44 zeigt die Ergebnisse für die Last von 4000 μ m m⁻¹. Die Referenzproben versagen bei diesem Lastniveau bereits nach 35k Zyklen. Gut stellt sich dadurch der nicht lineare Zusammenhang zwischen Last und Risswachstum dar. Während die Last um je 500 μ m m⁻¹ und damit je 16,7 % gesteigert wird, verdoppelt sich beinahe die Risswachstumsgeschwindigkeit zu jedem Mal.

Die ST-Proben stoppen den Riss bis 200k Zyklen sicher vor dem ersten PVDF-Streifen. Der Riss der Proben ST_01 und ST_02 wächst aber kontinuierlich weiter.

Während der Riss der ST_02 Probe noch bis 1M Zyklen im ersten PVDF-Streifen verweilt und somit gestoppt werden kann, wächst der Riss der ST_01 Probe durch den ersten PVDF Streifen. Der Riss beschleunigt dann auf Anfangsrisswachstumsgeschwindigkeit und wird im zweiten PVDF-Streifen ab 830k Zyklen wieder abgebremst, wächst aber dennoch deutlich verlangsamt weiter.

An dieser Stelle darf nicht von Rissstopp, sondern von einer Rissbarriere mit deutlicher Verlangsamung gesprochen werden. Weiter ist zu bedenken, dass die 4000 μ m m⁻¹ 33 % über der maximalen Betriebsast des Laminates liegen.



Abbildung 7-44: Risslänge über Lastzyklenzahl bei 4000 µm m⁻¹

Eine nachträgliche Untersuchung zu den CLS-Proben zeigte bei 3000 µm m⁻¹, dass die Applikation eines PVDF-Streifens im belasteten *Strap* schon alleine ausreicht, um den rissstoppenden Effekt zu erzielen. Diese Applikation vereinfacht die Positionierung erheblich. Abbildung A-2 zeigt den Aufbau.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die lokale Oberflächenzähmodifikation stoppt sicher Risse bis zu einer Belastung von 3500 μm m⁻¹.
- Bei einer Belastung von 4000 µm m⁻¹ und damit 33 % höheren Belastung als die maximale Betriebslast des Laminates verlangsamt die lokale Oberflächenzähmodifikation das Risswachstum erheblich, sodass die getesteten Proben 1M Zyklen überstehen, was drei Flugzeugleben entsprechen würde.

7.6 Restfestigkeitsanalyse CLS

Im Weiteren wird die Restfestigkeit der dynamisch getesteten CLS-Proben untersucht. Das Ziel ist zu zeigen, dass selbst nach gestopptem Riss, die Festigkeit der Verbindung, die der Referenz übertrifft und somit die Verbindung in der Robustheit deutlich stärkt.

7.6.1 Versuchsdurchführung

Vergleichbar zu den SLS-Proben werden die CLS-Proben der 3000 μ m m⁻¹ Reihe dazu statisch bis zum Bruch belastet. Da die Referenzproben ohne Rissstoppelement schon versagt sind, werden diese Proben nachgefertigt und mit künstlichem Anriss auf Höhe des PVDF Rissstoppers ausgestattet. Die Geometrie ist der Abbildung 7-45 zu entnehmen.

Ein Versuch den Riss gezielt auf natürliche Weise bis zu dieser Position wachsen zu lassen, funktionierte nicht, was auf die Streuung von 115000 bis 144000 Lastzyklen für 10 mm Risswachstum bei der Referenz zurückzuführen ist.



Abbildung 7-45: Geometrie der getesteten CLS-Probe zur Restfestigkeitsuntersuchung

7.6.1 Ergebnisse, Beobachtungen und Interpretation der CLS-Proben - Restfestigkeitsuntersuchung

Die Verläufe beider Prüfserien von Referenz und ST sehen dabei deutlich unterschiedlich aus. Aus Abbildung 7-46 kann entnommen werden, dass die Kraft der Referenzprobe an Punkt A bei 33,3 kN spontan absinkt. Grund dafür ist, dass bei diesem Wert der Klebstoff versagt und sich der *Lap* vom *Strap* ablöst. Die Kraft baut sich dann bis zum Bruch des Laminates bei 44,6 kN wieder auf. Dieser Bereich zwischen Punkt A und B würde im realen Anwendungsfall nicht existieren, da die Klebverbindung schon zerstört ist und keine weitere Kraft übertragen werden könnte. Dies ist nur durch das Prüfsetup so möglich und dient zum Vergleich der Laminatfestigkeiten.

Hingegen weist die ST-Probe einen durchgängigen Verlauf bis zum Bruch des Laminates bei Punkt B auf. Es ist kein Versagen in der Klebschicht zu beobachten. Beide Serien versagen kurz hinter der Einspannung am *Strap*.



Abbildung 7-46: Verlauf von Bruchkraft über den Traversenweg der Restfestigkeitsuntersuchung von Probennummer 1

Die Bruchkräfte beider Serien sind in Abbildung 7-47 aufgeführt. Somit steigert die lokale Oberflächenzähmodifikation die Festigkeit der Verbindung um 26,3 % und ändert das Bruchbild.



Abbildung 7-47: Bruchkraft der getesteten CLS-Probe zur Restfestigkeitsuntersuchung

Von einem kohäsiven Klebstoffversagen rückt das Versagen der ST-Proben nun in den Fügepartner. Dies bedeutet, dass die Zähmodifikation wieder die höchste Verbindungsfestigkeit dieser Verklebung erzielt.

Serie	tк	FBr,Kleb,AV	FBr,Lam,AV	♂ Lam,Br
	[mm]	[N]	[N]	[MPa]
Referenz	0,14	33390	44601	892,02
ST	0,15	-	42188	843,76

Die Versuchsergebnisse der Restfestigkeitsprüfung sind in folgender Tabelle 7-13 aufgeführt:

Tabelle 7-13: Versuchsergebnisse zur CLS-Restfestigkeit

Bezogen auf die Laminatfestigkeit von 895MP aus Kapitel 7.1 bricht das Laminat hier bei 843,76 MPa und damit 5,8 % unterhalb des Wertes der Laminatzugprobe unter reinem Zug. Das leicht verfrühte Versagen lässt sich durch die intakte Klebverbindung und das dadurch zusätzlich wirkende Biegemoment erklären.

Wird der Laminatbruchwert von 44,6 kN der Referenzprobe mit versagtem Klebstoff herangezogen, entspricht dies einer Laminatspannung von 892 MPa und damit mit 0,4 % Abweichung quasi exakt der Bruchspannung der reinen Laminatzugproben aus Kapitel 7.1.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Eine CLS-Probe mit lokaler Oberflächenzähmodifikation bricht nach natürlichem Rissstopp von 3000 μm m⁻¹ unter dynamischer Belastung im Laminat.
- Die dafür notwendige Kraft ist 26,3 % höher als die der Referenzprobe, welche kohäsiv im Klebstoff versagt.

7.7 Numerische Simulationsstudie der Spannungsreduktion am Beispiel SLS-Probe

Parallel zu den in Kapitel 7.4 durchgeführten Versuchen zur SLS-Probe sind lineare Finite Elemente Methoden (FEM) Untersuchungen durchgeführt worden. Ziel der Untersuchung ist, das Verständnis für die Auswirkung der lokalen Oberflächenzähmodifikation auf die Spannungsverläufe in der Klebschicht zu erlangen und die Reduktion der Spannungskonzentrationen zu bestätigen. Teile dieses Kapitels sind bereits in [70] veröffentlicht.

Wird das erweiterte Federmodell, welches bereits zur Erklärung des Effektes herangezogen wurde, deutlich feiner aufgelöst, entsteht daraus ein Finite Elemente Modell mit geschlossener Lösung. Gezielt wird in dieser Arbeit lediglich lineare FEM zur Abschätzung der Spannungsverteilungen angewendet und auf Festigkeitsvorhersagen bzw. Ermüdungsberechnungen verzichtet, da diese auf hochkomplexen Materialmodellen und zeitaufwendiger nicht linearer Rechnung basieren. Diese gehören derzeit selbst zum aktuellen Forschungsstand und werden z.B. in Völkerinks Arbeit [161] behandelt. Die Verfolgung eines analytischen Ansatzes wird nach den Erkenntnissen aus Kapitel 2.6 nicht weiterverfolgt.

In Analogie zum qualitativen Schubspannungsverlauf aus Abbildung 4-4 werden mithilfe der Werte aus Tabelle 7-14 die Spannungsverläufe von Schub- und Schälkomponente, für die in Kapitel 7.4 getesteten Varianten, der lokalen Oberflächenzähmodifikation erstellt. 136

Material	E-Modul	Poissonzahl
	[MPa]	[-]
Fügeteil	65020	0,31
Klebstoff 1	3000	0,33
Klebstoff 2	1500	0,33
ST-Material	1000	0,46

Tabelle 7-14: Materialwerte für die lineare FEM

Genutzt wird dafür ein parametrisiertes linear elastisches FE-Modell. Das Modell wird über ein Python Skript erstellt und mittels Nastran 2019 gelöst. Ausgegeben werden die Schub- und Schälspannungsverlaufe der Mittelknoten der Klebschicht. Belastet wird das Modell unter einer Zuglast von F von 10 kN.

Die Geometrie a), die Randbedingungen b) sowie der Vernetzungsansatz c) sind in Abbildung 7-48: a) Geometrie der FEM dargestellt. Alle nicht dargestellten Maße können Abbildung 7-15 entnommen werden. Das Modell ist als Schalenmodell aufgebaut und besteht aus Quad4 Elementen. Mittels Eingabe einer Probenbreite werden diese zu Hex8 Elementen transformiert. Im Bereich der Klebschicht, sowie des belasteten, randnahen Bereichs c.1) und c.2) wird das Modell deutlich detaillierter vernetzt. Gerechnet wird in diesem Bereich mit einer Kantenlänge von 0,1 mm in x-Richtung und 0,01 mm in y-Richtung. Somit wird die Klebschicht, welche 0,1 mm dick ist, mit 10 Elementen aufgelöst.



Abbildung 7-48: a) Geometrie der FEM-Studie, b) Randbedingungen der FEM-Studie, c) Vernetzung der FEM-Studie

In einer Netzfeinheitsstudie hat sich gezeigt, dass 250 Elemente über die Klebschichtlänge ausreichend sind.



In Abbildung 7-49 und Abbildung 7-50 sind die Spannungsverläufe dargestellt.

Abbildung 7-49: Schubspannungsverläufe der Mittelknoten der Klebschicht aus der FEM

Deutlich ist zu erkennen, wie der Schubspannungsverlauf durch die Applikation des Bereichs mit Zähmodifikation beeinträchtigt wird. Während die Spannungskonzentrationen am Überlappungsrand bei allen Zähmodifikationen deutlich reduziert werden, fällt der Spannungsverlauf dann nicht mehr wie bei der Referenzprobe in der Weise steil ab. Die Werte der randnahen Spannungskonzentrationen sind in Tabelle 7-15 aufgeführt:

	Spannungskonzentration						
Serie	Schubsp	pannung	Schälspannun				
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]			
Referenz	96,5	100	117,0	100			
ST_5	63,2	65,5	90,5	77,4			
ST_10	68,9	71,4	91,5	78,2			
ST_17,5	70,0	72,5	91,4	78,1			
ST_30	58,6	60,7	93,6	80,0			

Tabelle 7-15: Spannungskonzentrationen am Rand von ST und Referenz

Zum Ende der Zähmodifikation (innerer Bereich) entsteht eine zweite Spannungskonzentration, die jedoch deutlich geringer ausfällt als die am Rand. Diese entsteht aufgrund der Spannungsüberhöhung durch den wieder auftretenden Steifigkeitssprung.

Deutlich ist jedoch der Effekt der Umlagerung von Spannungen in den sonst eher unbelasteten, mittleren Bereich der Überlappung zu erkennen. Da bei der linear elastischen Rechnung das Integral unter der Kurve den 10 kN entsprechen muss, ist das auch schnell zu erklären. Je geringer die Spannungskonzentration am Rand ausfällt, desto höher wird dadurch der mittlere Bereich belastet. Da die ST_30 Probe gar keine Spannungskonzentration, außer der randnahen aufweist, ist hier der mittlere Bereich am höchsten belastet.

Bezogen auf die versagensinitiierenden Spannungskonzentrationen müsste diese Version die höchste Verbindungsfestigkeit besitzen. Die Versuche zeigten jedoch, dass der spröde Klebstoff einfach zwischen den duktilen PVDF-Schichten zerbrochen ist und dies der Versagensgrund ist.



Abbildung 7-50: Schälspannungsverläufe der Mittelknoten der Klebschicht aus der FEM

Der Einfluss auf die Schälspannungen ist sehr ähnlich zu den Schubspannungsverläufen. Während die randnahen Schälspannungskonzentrationen im Vergleich zur Referenz um ca. 38 % reduziert werden, treten Druckspannungskonzentrationen am Übergang vom zähmodifizierten Bereich zur reinen Klebschicht auf. Während diese Druckspannungskonzentrationen bei der ST_5 Probe am ausgeprägtesten sind, sieht der Verlauf der ST_30 Probe der Referenz sehr ähnlich.

Die Spannungsverläufe unterstützen also die Theorie der Spannungsumlagerung. Dennoch lässt sich daraus nicht direkt ableiten, welche Positionierung am besten geeignet ist. Die ST_5 und

ST_30 Variante besitzt zwar die geringsten Schubspannungskonzentrationen, zeigen jedoch im Versuch den geringsten festigkeitssteigernden Effekt. Dennoch werden zur Abschätzung des Einflusses auf die Verbindungsfestigkeit zusätzlich die spannungsreduzierenden Maßnahmen ebenfalls betrachtet. Das Ziel ist dabei, den Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation abzuschätzen und die Ergebnisse aus Kapitel 7.4 einzuordnen.



Abbildung 7-51: Schubspannungsverläufe der Mittelknoten der Klebschicht aus der FEM von verschiedenen Spannungsreduzierungstechniken aus Kapitel 3

Betrachtet werden dabei neben den in Kapitel 7.4.4 getesteten Fase und dem Klebstoffauslauf auch die hybride Klebschicht mit unterschiedlich steifem Klebstoff. Während der Effekt dabei auf die Randspannungskonzentrationen nahezu identisch groß ist, ist die zweite Spannungskonzentration beim Übergang deutlich differenziert. Während diese bei der ST_10 Konfiguration ausgeprägt ist, steigt die Spannung bei der hybriden Klebschicht nur sehr leicht an für die Schub- und die Druckkomponente.

Alle weiteren Verläufe von Klebstoffauslauf und Fase verlaufen ähnlich der Referenz. In Abbildung 7-53 sind die Spannungssenkungen im Vergleich zur Referenz aufgeführt. Dabei besitzt die lokale Oberflächenzähmodifikation nahezu gleichen Effekt wie die hybride Klebschicht und der Klebstoffauslauf.

In der Schälspannungssenkung ist der Effekt des Klebstoffauslaufs sogar doppelt so hoch. Da die Versuche aber gezeigt haben, dass der Klebstoffauslauf und die Fase kaum einen Einfluss bei verwendeter Proben- und Materialkonfiguration auf die Verbindungsfestigkeitssteigerung hat, wird der festigkeitssteigernde Effekt nicht - oder nicht nur - auf die Höhe der Spannungskonzentration am Rand zurückzuführen sein.



Abbildung 7-52: Schälspannungsverläufe der Mittelknoten der Klebschicht aus der FEM von verschiedenen Spannungsreduzierungstechniken aus Kapitel 3





Um diese Tatsache weiter zu untersuchen wird eine nicht lineare Betrachtungsweise in Geometrie- sowie Materialverhalten benötigt, welche jedoch nicht Teil dieser Arbeit ist.

Weiter zeigt Abbildung 7-53, dass die Spannungsverläufe von Volkersen und Goland und Reissner die Spannungskonzentrationen im Vergleich zur FEM deutlich unterschätzen.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Mittels linear elastischer FEM lässt sich die Spannungsumlagerung vom Randbereich in die weniger belastete Mitte der Klebverbindung nachweisen.
- Lineare FEM eignet sich nicht für die Einordnung der Festigkeitssteigerung im Versuch anhand von Spannungskonzentrationen.
- Ableitend lässt sich sagen, dass somit bei der lokalen Oberflächenzähmodifikation das nicht lineare Materialverhalten des zähmodifizierenden Materials entscheidend ist.

7.8 Kapitelzusammenfassung

Dieses Kapitel befasst sich mit den Forschungs- und Arbeitshypothesen und beantwortet alle offenen Fragen. Experimentell wird nachgewiesen, dass die lokale Oberflächenzähmodifikation auf das Laminat unter Zugbelastung keine negativen Einflüsse besitzt.

Weiter wird mittels DCB und ENF-Proben der spannungsreduzierende Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation unter Mode I und Mode II Belastung aufgezeigt.

Der spannungssenkende Effekt wird an SLS-Proben anschließend zur Festigkeitssteigerung angewendet. Demonstriert wird dabei der Einfluss der Positionierung des zähmodifizierenden Materials auf die Verbindungsfestigkeit so wie die Bewertung des festigkeitssteigernden Effektes zu den Konzepten aus dem Stand der Technik. Die lokale Oberflächenzähmodifikation in der Variante ST_10 steigert die Festigkeit einer einfachen Überlappungsklebung um 84 %. Die Konzepte aus dem Stand der Technik sind bei dieser Probenkonfiguration nahezu wirkungslos bis auf die Fase mit 8 % Verbindungsfestigkeitssteigerung im Vergleich zur Referenz ohne Modifikation. Im Weiteren wird durch Variation des zähmodifizierenden Materials ein modifiziertes Federmodell erarbeitet, mit dem grob eine Auswirkung des verwendeten Materials zur Zähmodifikation abgeschätzt werden kann. Das am besten funktionierende Material ist dabei PVDF. Durch Verwendung eines kaltaushärtenden, pastösen Klebstoffes wird gezeigt, dass der Effekt unabhängig von der Aushärtetemperatur und möglichen Eigenspannungen im Material durch die Verklebung ist. Dabei wird festgestellt, dass die Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation die größtmögliche Festigkeit der Verbindung erreicht, da der Fügepartner als erstes versagt. Somit erfolgt eine Studie mit unterschiedlicher Überlappungslänge in der gezeigt wird, dass die Zähmodifikation bei gleicher Verbindungsfestigkeit 65 % Strukturmasse der Verbindung einspart. Weiter wird gezeigt, dass die Applikation bei Metallen in eine vorgefräste Nut nicht funktioniert. Stattdessen kann der PVDF-Streifen randnah zwischen zwei Klebschichten gebettet werden und steigert die Verbindungsfestigkeit um fast 30 %. Die Anwendung ist somit unabhängig vom Substrat.

Mittels CLS-Proben wird im Anschluss die Fähigkeit des Rissstopps untersucht und bestätigt. Dabei wird ein sicherer Rissstopp bis 116 % der maximalen Betriebslast erreicht. Bei 133 % der zulässigen Betriebslast wird ein Riss bis 1M Lastzyklen aufgehalten, wächst jedoch kontinuierlich, aber deutlich verlangsamt, durch den Rissstopp durch. Die unter reiner Betriebslast belasteten Proben werden weiter noch auf Restfestigkeit hin untersucht und ergeben eine 26 % höhere Festigkeit als die Proben ohne Rissstopper. Wieder erreichen die Proben mit Zähmodifikation dabei die höchst mögliche Verbindungsfestigkeit und der Fügepartner bricht, während die Referenzproben ohne Zähmodifikation in der Klebschicht versagen.

Wächst ein Riss durch die Klebschicht und wird durch die Zähmodifikation gestoppt, wirkt zusätzlich ein verbindungsfestigkeitssteigernder Effekt. Es wird eine ganzheitliche, robuste Klebverbindung erzeugt.

Abschließend wird mittels linearer FEM der spannungsumlagernde Effekt der lokalen Oberflächenzähmodifikation aufgezeigt. Deutlich wird dabei, dass die Verbindungsfestigkeitssteigerung dabei nicht auf die Senkung der Randspannungskonzentrationen allein zurückzuführen ist, sondern auf einen nicht linearen Effekt im Material zurückzuführen sein muss, welcher bei dieser Studie bewusst aufgrund des Modells der FEM nicht abgebildet werden kann.

8. Einfluss von Umweltbedingungen auf eine zähmodifizierte Klebverbindung

Ist die lokale Oberflächenzähmodifikation auch robust gegen Umwelteinflüsse?

Nachdem der Effekt und die Funktionsweise der lokalen Oberflächenzähmodifikation in Kapitel 7 erarbeitet sind, wird in diesem Kapitel der Schwerpunkt auf die Robustheit der Oberflächenzähmodifikation gelegt. Untersucht wird dabei der Umwelteinfluss durch **Feuchtigkeit** und **Temperatur** auf die Verbindungsfestigkeit.

8.1 Feuchtigkeitseinfluss auf die zähmodifizierte Klebverbindung

Es ist bekannt, dass Feuchtigkeit eine negative Auswirkung auf die Verbindungsfestigkeit von Verklebungen hat. Zum einen, da der Klebstoff die Feuchtigkeit aufnimmt und degradiert. Im Material wird somit die Festigkeit des Klebstoffes schlichtweg reduziert. Zum anderen kann die Feuchtigkeit auch die Oberfläche des Substrates angreifen und die Adhäsion stark beeinflussen. Weiter sind gerade Thermoplaste dafür bekannt, einen hohen Prozentsatz an Feuchte aufnehmen zu können.

Um einzuschätzen, wie sich die Feuchtigkeit auf die lokale Oberflächenzähmodifikation auswirkt, werden weitere vier SLS-Messreihen mit PVDF und PEEK in Anlehnung an DIN EN 2823 [162] durchgeführt. Nach je 14 Tagen (336h) bzw. 42 Tagen (1000h) Auslagerung im Klimaschrank bei 75 °C und 85 % r.h. werden die Proben bei Raumtemperatur getestet.



Abbildung 8-1: Verbindungsfestigkeiten der ausgelagerten Proben

In Abbildung 8-1 sind die Verbindungsfestigkeiten der ausgelagerten Probenserien aufgeführt. Die 1000h ST_10_PEEK-Serie ist aufgrund eines Systemabsturzes nicht aufgezeichnet worden.

Die Referenzproben zeigen den zu erwartenden Verlauf. Mit zunehmender Auslagerungszeit degradiert die Klebverbindung und die Verbindungsfestigkeit sinkt um 19,8 %.

Das nahezu identische Bild zeigen auch die ST_10_PVDF-Proben. Dennoch zeigt sich bis zur Auslagerung von 1000h eine Verbindungsfestigkeitssteigerung zur unausgelagerten Referenz um 55 %. Die Degradation nach 1000h ist im Vergleich zur Referenz in selber Größenordnung mit ca. 17-18 % einzuordnen.

Für die ST_10_PEEK-Proben zeigt sich ein unerwarteter Effekt. Die Verbindungsfestigkeit steigt mit der Auslagerung von 336h und erzielt erstmals eine leichte Steigerung um 3,5 %.

Der Hintergrund wird sehr wahrscheinlich sein, dass PEEK mit 0,4 % [163] verhältnismäßig viel Wasser aufnimmt und dadurch die Steifigkeit des Materials deutlich sinkt. Der somit entstehende zähmodifizierende Effekt überwiegt die Degradation des Klebstoffes.

PVDF hingegen nimmt mit 0,04 % [164] zehnmal weniger Wasser auf und hat kaum einen Einfluss auf die Steifigkeit des Materials. Hier überwiegt der Effekt der Klebstoffdegradation.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Eine Auslagerung von 1000h bei 75 °C und 85 % r.h. degradiert die zähmodifizierte Klebung in gleicher Weise wie die Referenz um 17-18 %.
- Die lokale Zähmodifikation mit PVDF besitzt nach 1000h Auslagerung immer noch eine 55,8 % Festigkeitssteigerung zur Referenz.

8.2 Temperatureinfluss auf die zähmodifizierte Klebverbindung

Ein weiterer kritischer Punkt für Klebverbindungen ist das unterschiedliche Verhalten des Klebstoffes unter verschiedenen Temperaturen. Während der reine Klebstoff bei niedrigeren Temperaturen deutlich höhere Bruchfestigkeiten aufweist, sinkt die Bruchdehnung hingegen deutlich. Mit steigender Temperatur verhält sich der Effekt umgekehrt und die Bruchfestigkeit sinkt erheblich bei deutlicher Steigerung der Bruchdehnung.

Wird allerdings eine komplette Verbindung aus Fügepartnern und Klebstoff betrachtet, so verhält sich der komplette Effekt reziprok. Grund dafür ist z.B. bei sinkender Temperatur die sinkende Bruchdehnung des Klebstoffes. Zusätzlich steigt das Elastizitätsmodul. In der bildlichen Sprache des modifizierten Federmodells bedeutet dies, dass nicht nur die Feder des Klebstoffes steifer wird, sondern zusätzlich ein, von der Temperatur abhängiger, Federwegbegrenzer eingesetzt wird. Das führt dazu, dass die randnahen Spannungskonzentrationen deutlich steigen und die Verbindung früher versagt.

Im Versuch wäre es daher interessant diesen Effekt mittels DIC aufzuzeigen, jedoch ist aufgrund der Probenanordnung in der Klimakammer an der Prüfmaschine sowohl das Fotografieren als auch gerade die optische Auflösung der Probe bei Tiefsttemperaturen durch Vereisung ein 146 großes Problem und kann derzeit nicht durchgeführt werden. Eine Aufnahme des Prüfaufbaus ist in Abbildung 8-2 gezeigt.



Abbildung 8-2: Vereisung einer SLS-Probe bei -55 °C in der Klimakammer

Es ist daher nur möglich, die Bruchkraft und Probendehnung bei der Prüfung aufzuzeichnen. Die ausgewerteten Verbindungsfestigkeiten sind in Abbildung 8-3 zusammengefasst.





Der zuvor beschriebene Effekt, dass mit sinkender Temperatur die Verbindungsfestigkeit bei reinen Verklebungen ebenfalls sinkt, ist gut anhand der Probenserien der Referenz zu erkennen. So sinkt bei -55 °C die Verbindungsfestigkeit auf nur noch 65,3 %, im Vergleich zur Raumtemperatur. Hingegen steigt die Festigkeit auf 127,2 % bei 80 °C. Es ist eine nahezu lineare Abhängigkeit der Verbindungsfestigkeit von der Temperatur zu entnehmen.

Für die lokale Oberflächenzähmodifikation ist dieser nahezu lineare Zusammenhang zwischen -55 °C und RT ebenfalls zu beobachten. Jedoch ist der Abfall der Festigkeit über die Temperatur deutlich höher, sodass bei -55 °C die Verbindungsfestigkeit der Oberflächenzähmodifikation mit 57,8 % sogar unter der reinen Klebverbindung mit 65,3 % zur Referenz bei RT liegt.

Bei 80 °C ist die Verbindungsfestigkeit deutlich geringer als die der RT-Proben, aber immer noch über der reinen Verklebung.

Zur Begründung der Phänomene muss das Elastizitätsmodul des Klebstoffes und des PVDF über die Temperatur betrachtet werden. Dafür wird eine dynamische, mechanische Analyse DMA unter Temperaturänderung durchgeführt.



Abbildung 8-4: DMA von PVDF und EA9695

Bei 80 °C ist das Elastizitätsmodul vom EA9695 um 33 % geringer als bei Raumtemperatur. Nach Volkersen werden die Spannungskonzentrationen deutlich gesenkt, je weicher der Klebstoff ist. Dazu kommt, dass das Elastizitätsmodul des PVDF mit 319 MPa sehr gering ist und kaum Last überträgt. Die Kombination führt dazu, dass ohne große Spannungskonzentrationen auch keine reduziert werden können und somit der Effekt sehr gering ausfällt.

Bei Raumtemperatur ist der zähmodifizierende Effekt mit 86 % am höchsten.

Bei -22 °C ist das Elastizitätsmodul des Klebstoffes schon 26 % höher als bei RT und demnach steigen auch die Spannungskonzentrationen an. Unter Berücksichtigung, dass die Bruchdehnung des PVDFs sinkt und dieses ebenfalls steifer wird, sinkt der zähelastische Effekt und die Verbindungsfestigkeitssteigerung findet nur noch um 36,4 % statt.

Bei -55 °C steigt das Elastizitätsmodul des Klebstoffes noch weiter an. Dies erhöht die Spannungskonzentrationen ebenfalls bei gleichzeitiger Senkung der Bruchdehnung. Das PVDF durchläuft bei etwa -40 °C den Glasübergangsbereich und versprödet stark, was auch in dem schnellen Anstieg des Elastizitätsmoduls ersichtlich ist. Neben dem fast genauso hohen Elastizitätsmodul des PVDFs wie zum Klebstoff ist die Bruchdehnung deutlich reduziert und es findet kein festigkeitssteigernder Effekt mehr statt. Die Verbindungsfestigkeit wird sogar um 12,8 % schlechter zur Referenz bei -55 °C.

Mithilfe des modifizierten Federmodells lassen sich diese Überlegungen ebenfalls bestätigen. Werden bei theoretischer Annahme selber Klebstoff- und Folienstärke die Elastizitätsmoduln bei -22 °C und -55 °C in die Federmodellgleichung eingesetzt, so kommen folgende neue Verhältnisse heraus:

Temperatur	Serie	tк	t st	E-Modul	Gesamtfeder- steifigkeit	Steifigkeits- verhältnis
[°C]		[mm]	[mm]	[MPa]	[N/mm]	zur Referenz
22.00	Referenz	0,15	-	2576	14720	1
23 °C	ST_10 PVDF Nowofol	0,15	0,125	1398	9808	0,7
າາ∘⊂	Referenz	0,15	-	3637	20783	1
-22 C	ST_10 PVDF Nowofol	0,15	0,125	1670	9808	0,6
55 °C	Referenz	0,15	-	4745	27114	1
-55 C	ST_10 PVDF Nowofol	0,15	0,125	4459	26156	0,96

Tabelle 8-1: Steifigkeitsverhältnis der Proben nach dem modifizierten Federmodell

Während bei -22 °C das Steifigkeitsverhältnis von ST zur Referenz mit 0,6 deutlich kleiner ist und auch im Versuch einen festigkeitssteigernden Effekt aufweist, steigt das Verhältnis bei -55 °C mit 0,96 auf nahezu den Referenzwert. Es findet keine Festigkeitssteigerung mehr statt, sondern eine Senkung.

Da die Höhe der Festigkeitssenkung jedoch deutlich höher ist als bei den verwendeten Materialien PEI und K72 aus Anhang C 3 muss noch eine weitere Größe den Effekt beeinflussen.

Mitunter werden die Fließgrenze und die Bruchdehnung einen großen Einfluss haben, da das Überschreiten der Fließgrenze, der gedachten Feder im Modell, eine deutliche Vergrößerung des Federweges bei nahezu gleichbleibender Belastung erlaubt. Die Bruchdehnung hingegen wirkt wie ein Federwegbegrenzer. Besitzt der Werkstoff eine sehr geringe Bruchdehnung, dann kann dieser sich kaum dehnen und Lasten umlagern.

Dies geschieht sehr wahrscheinlich beim PVDF. Bei -22 °C ist das Verhältnis der Gesamtfedersteifigkeiten sogar noch geringer als bei Raumtemperatur und müsste sich daher sehr positiv auswirken. Die Bruchdehnung wird dort jedoch schon sehr reduziert sein.

Hintergrund ist die Nähe zur Glasübergangstemperatur, bei der das Material bei geringster Dehnung sofort versagt.

Da keine Reinmaterialversuche des Klebstoffes und des PVDF bei diesen Temperaturen vorliegen, kann dieser Effekt derzeit nicht quantifiziert werden.

Abgeleitet werden kann an dieser Stelle, dass PVDF nicht das geeignete Material für die Zähmodifikation einer strukturellen Klebung für Anwendungen unter -30 °C ist. Temperaturen oberhalb von 80 °C hingegen stellen sehr wahrscheinlich keine Probleme dar, da bereits der Klebstoff so duktil ist, dass nur minimale Spannungskonzentrationen auftreten. Dies kann aber erst nach passender Untersuchung belegt werden und ist an dieser Stelle nur eine These. Als Werkstoff sollte daher ein Material identifiziert werden, dass keine Glasübergangstemperatur im Anwendungsbereich besitzt und somit die Materialeigenschaften stark verändert.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die lokale Oberflächenzähmodifikation steigert die Verbindungsfestigkeit von 80 °C bis -22 °C.
- Unterhalb der Glasübergangstemperatur des PVDF wirkt, durch die Versprödung des Materials, kein zähmodifizierender Effekt mehr und die Verbindungsfestigkeit sinkt unterhalb die der reinen Verklebung.
- Eine DIC-Messung ist aufgrund der Vereisung der Proben nicht möglich. Ein alternatives Messsystem muss identifiziert und angewendet werden.
- Zur Zähmodifikation eignet sich nur ein Material, welches im thermischen Anwendungsbereich keine Glasübergangstemperatur besitzt und sich dadurch die Materialeigenschaften stark verändern.
- Ein ausgeprägter plastischer Bereich ermöglicht dem zähmodifizierenden Material, sich ab der Fließgrenze deutlich zu längen.
- Die Bruchdehnung des Materials muss groß sein, damit der Werkstoff auch eine hohe Dehnfähigkeit aufweisen kann. Ein kleiner Wert wirkt wie ein Federwegbegrenzer.

8.1 Anforderungen an einen luftfahrtfähigen ST-Werkstoff

Gesucht wird ein zähelastischer Werkstoff, der die Glasübergangstemperatur unterhalb von -55 °C besitzt. Weiter muss das Elastizitätsmodul unterhalb dem des Klebstoffes liegen und die Bruchdehnung deutlich oberhalb des Wertes vom Klebstoff. Die Anforderungen müssen über das ganze Temperaturfeld der Anwendung gelten.

In einem DMA-Diagramm über die Temperatur muss der zähmodifizierende Werkstoff also immer deutlich unterhalb der Klebstoffkurve liegen. In Abbildung 8-5 ist eine gesuchte Materialkurve beispielhaft auf Basis der Steifigkeit des PVDF eingetragen. Das Ziel muss sein, einen Werkstoff zu identifizieren, der einen nahezu linearen Steifigkeitsverlauf über den gesuchten Temperaturbereich besitzt. Da in dieser Arbeit kein Material mit solcher Steifigkeit charakterisiert werden konnte, ist vertretend dafür der Werkstoff Ethylentetrafluorethylen (ETFE) dargestellt, welcher aus mechanischer Betrachtung passen würde. Abbildung 8-5 zeigt diese DMA-Kurven:



Abbildung 8-5: DMA von PVDF, ETFE und EA9695. In Grün die gesuchte Materialkurve eines möglichen ST-Werkstoffs für Luftfahrtanwendungen.

Da ETFE jedoch als Trennfolie bekannt ist und selbst durch die Coronavorbehandlung in ersten Anhaftungsversuchen keine ausreichende Langzeitbeständigkeit in der Verklebung zeigte, wird von diesem Material vorerst Abstand gehalten.

Deutlich vielversprechender erscheinen hingegen die Materialien aus der Werkstoffgruppe der thermoplastischen Polyurethane (TPU). Bei TPU können je nach Zusammensetzung das Elastizitätsmodul, die Bruchdehnung und auch die Glasübergangstemperatur eingestellt werden. TPU können bedruckt und verklebt werden und eignen sich somit generell für die Anwendung zur Oberflächenzähmodifikation.

In die engere Auswahl bei den TPU kommen die beiden Werkstoffe TPU R1000 und TPU 1165D13U von BASF. Beide Materialien kommen den Eigenschaften von PVDF bis auf die Glasübergangstemperatur sehr nahe.

Material	T_{g}	$T_{\rm s}$	Ert	Rm	$\epsilon_{\rm Br}$
[-]	[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]
Copo Fl2608	-40,16	159,7	1398	44	17
TPU R1000	-30	~225	1000	50	40
TPU 1165D13U	-70	~225	900	46	240

Tabelle 8-2: Materialeigenschaften von TPU im Vergleich zu PVDF laut Hersteller

Da diese vielversprechenden Materialien erst zum Ende dieser Arbeit identifiziert wurden, lässt sich noch keine Aussage über die weitere Einsatzfähigkeit tätigen. Während das Material R1000 für Dichtungen von Treibstoffleitungen bei Ölraffinerien in Sibirien genutzt wird, wird das Material 1165D13U als Lauffläche von Hochleistungsskiern verwendet.

8.2 Kapitelzusammenfassung

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Einfluss von Umweltbedingungen auf die zähmodifizierte Klebung. Untersucht wird der Feuchtigkeits- und Temperatureinfluss. Der Feuchtigkeitseinfluss hat einen leicht negativen Festigkeitseinfluss auf die reine Klebverbindung. In gleicher Größenordnung betrifft dies auch die Oberflächenzähmodifikation mit PVDF. Über die Oberflächenzähmodifikation mit PEEK lässt sich nur bedingt eine Aussage treffen, da die Messwerte der 1000h Auslagerung durch einen Systemausfall verloren sind. Die Erweichung des PEEK-Materials infolge der Wasseraufnahme nach 336h verbessert die Verbindungsfestigkeit, was das Federmodell weiter bekräftigt. Der Temperatureinfluss wirkt jedoch entscheidender auf die Zähmodifikation. Unterschreitet das PVDF die Glasübergangstemperatur, versprödet dieses so sehr, dass keine Spannungskonzentrationen reduziert werden können und damit keine Verbindungsfestigkeitssteigerung stattfindet. PVDF eignet sich daher nicht für den Einsatz als zähmodifizierender Werkstoff für die Anwendung bei strukturellen Verklebungen in der allgemeinen Luftfahrt, da der Temperaturbereich von -55 °C das hauptsächliche Einsatzgebiet beim Reiseflug darstellt. Zur Zähmodifikation eignet sich daher nur ein Material, welches im thermischen Anwendungsbereich keine Glasübergangstemperatur besitzt und sich dadurch die Materialeigenschaften stark verändern. Vielversprechend sind dabei die Werkstoffe R1000 und 1165D13U. Diese werden von BASF vertrieben und gehören zur Gruppe der Thermoplastischen Polyurethane. Besonders das 1165D13U ist von Interesse, da es gute adhäsive Eigenschaften aufweisen soll und derzeit als bedruckbares Folienhalbzeug für Laufflächen bei Skiern Verwendung findet. Die Glasübergangstemperatur beträgt -70 °C. Weiter ist die Besonderheit, dass dieser Werkstoff laut Hersteller eine konstante Steifigkeit über den Temperaturbereich von -50 °C bis 30 °C besitzen soll. Weiter gib es die Auskunft, dass sich TPU-Materialien so anpassen lassen, dass sich ein gewünschtes Elastizitätsmodul mit Bruchdehnung und Zugfestigkeit nahezu temperaturunabhängig einstellen lässt. Hier sollte der Ansatz verfolgt werden, dass bereits verwendete PVDF von Nowofol® nachzubilden und unterhalb von -20 °C den Verlauf linear zu extrapolieren.

9. Design und Fertigung der lokalen Oberflächenzähmodifikation

Wie wende ich die Oberflächenzähmodifikation in einer strukturellen Verklebung an?

9.1 Nachweisführung der Oberflächenzähmodifikation

Damit eine neue Technologie überhaupt in der Luftfahrt angewendet werden darf, müssen eine Vielzahl von Nachweisen erbracht werden, um die Zuverlässigkeit der Technologie zu gewährleisten.

Wie Kapitel 2.2 eingeleitet hat, beschreibt dies *Subpart D – Design and Construction* in der CS 25.601 [10].

"Gefährliche oder unzuverlässige Konstruktionsmerkmale am Flugzeug sind ausgeschlossen. Die Eignung muss durch **Tests sichergestellt** werden. Eine neuartige Technik muss daher ausgiebig experimentell untersucht werden, bevor diese angewendet werden darf."

Dieser Anforderung wurde nachgegangen und die offenen Punkte zur Nachweisführung einer Leichtbaustruktur nach Klein [165] sind in dieser Arbeit behandelt worden. Die grafische Darstellung zeigt Abbildung 9-1:



Abbildung 9-1: Nachweisarten einer Leichtbaustruktur nach Klein [165]

Die Erbringung der Nachweise bezieht sich in diesem Fall auf die lokale Oberflächenzähmodifikation als Konzept für eine Leichtbaustruktur. Die Erkenntnisse, die in dieser Arbeit gewonnen werden, werden im Folgenden in eine Design- und Anwendungsempfehlung kondensiert.

9.2 Designempfehlung

Die Lokale Oberflächenzähmodifikation reduziert Spannungskonzentrationen bei strukturellen Verklebungen in hohem Maße. Die Technologie eignet sich daher vor allem, um **die Verbindungsfestigkeit zu steigern** oder als **Rissstopper zu wirken**. Im Idealfall werden beide Funktionen vereint. Die Zähmodifikation muss dazu in den Bereich der Spannungskonzentrationen appliziert werden.

Für einfache Klebgeometrien hat sich folgende Geometrie bewährt:



Abbildung 9-2: Positionierung der lokalen Oberflächenzähmodifikation in einer einfachen Überlappungsklebung

Der Bereich lässt sich bei einfachen Verklebungen durch Analytik nach Volkersen oder Goland und Reissner abschätzen und bei komplizierten Geometrien durch FEM abbilden. Die Oberflächenzähmodifikation funktioniert nur bei spröden, hochfesten Werkstoffen.

Die Anwendung bei Faserverbunden mit Epoxidmatrix wird daher empfohlen.

Weiter muss die Materialkombination folgende drei Anforderungen erfüllen:

Steifigkeitsbedingung:

$$E_{F\ddot{u}gepartner} \gg E_{Klebstoff} > E_{Oberfl\ddot{a}chenz\ddot{a}hmodifikation}$$
 (9-1)

Dehnungsbedingung:

 $\varepsilon_{Bruch \ Oberflächenzähmodifikation} \gg \varepsilon_{Bruch \ Klebstoff} > \varepsilon_{Bruch_{Fügepartner}}$ (9-2)

Festigkeitsbedingung:

$$\sigma_{Bruch_{Fügepartner}} \gg \sigma_{Bruch_{Klebstoff}} > \sigma_{Fliess_{Oberflächenzähmodifikation}}$$
(9-3)

Grafisch sehen die Anforderungen für ein **gut funktionierendes Beispiel** folgendermaßen aus: Fügepartner: 8552/IM7, Klebstoff: EA9695, Oberflächenzähmodifikation: PVDF bei 23 °C.



Abbildung 9-3: Kombination Fügepartner 8552/IM7 mit Klebstoff EA9695 und Oberflächenzähmodifikation PVDF bei 23 °C

Deutlich zu erkennen ist der **konstante Abfall bzw. Anstieg der Balken** im Diagramm, an dem schnell zu sehen ist, ob eine Materialkombination funktioniert oder nicht.

Ein nicht funktionierendes Beispiel ist die folgende Kombination:

Fügepartner: 8552/IM7, Klebstoff: EA9695, Oberflächenzähmodifikation: PEEK bei 23 °C.



Abbildung 9-4: Kombination Fügepartner 8552/IM7 mit Klebstoff EA9695 und Oberflächenzähmodifikation PEEK bei 23 °C

Hier ist kein konstanter Abfall der Steifigkeits- und Festigkeitsbedingung zu erkennen. Lediglich die Dehnungsbedingung ist erfüllt. Trifft eine der Anforderungen jedoch nicht zu, funktioniert die Materialkombination nicht.
Denn die Steifigkeit der Fügepartner muss deutlich größer sein als die des Klebstoffes und des Materials zur Oberflächenzähmodifikation, sodass eine Lastumlagerung an den hochbelasteten Randbereichen stattfinden kann. Unter Berücksichtigung der Materialdicke kann über das modifizierte Federmodell ein Effekt abgeschätzt werden.

Weiter muss die Bruchdehnung des zähmodifizierenden Materials wiederum deutlich größer sein als die des Klebstoffes und der Fügepartner, damit kein vorzeitiges Versagen in diesen Bereichen stattfindet.

Zuletzt muss die Festigkeit des Fügepartners deutlich größer sein als die des Klebstoffes. Der Klebstoff muss wiederum eine höhere Bruchfestigkeit als die Fließspannung der Oberflächenzähmodifikation besitzen, sodass eine Längung des Materials überhaupt erst zugelassen wird.

Da es zum Zeitpunkt dieser Arbeit durch numerische Verfahren noch keine sichere verifizierte Berechnungsgrundlage der Festigkeitssteigerung durch die lokale Oberflächenzähmodifikation gibt, kann daher lediglich auf Basis der vielen Versuche ein **10 mm breiter** und **0,1 mm dicker Streifen** als ausrechende Geometrie vorgeschlagen werden.

9.3 Fertigungsempfehlung

Da die Technologie primär für die **Applikation an Faserverbundwerkstoffen** entwickelt ist, wird zur Anwendung das *Co-curing* Verfahren für die Applikation in das Laminat empfohlen, dem ein anschließendes *Secondary Bonding* des Klebstoffes zur eigentlichen Verbindung folgt. Nur für diesen Anwendungsfall unter Verwendung von Prepregmaterial sind die Untersuchungen durchgeführt worden.

Die Fertigungsempfehlung lautet:

- 1. Zähmodifizierendes Material nach den drei Anforderungen zur Designempfehlung auswählen (Kapitel 9.2)
- 2. Reinigung und Aktivierung der Oberfläche des zähmodifizierenden Materials mittels VUV-Licht (Kapitel 6.1.2)
- 3. Laminat anfertigen und zähmodifizierendes Material per Hand oder Roboter applizieren (Kapitel 6.2)
- 4. Reinigung und Aktivierung der Oberfläche des Fügeteils mittels Atmosphärenplasma (Kapitel 6.1.2)
- 5. Herstellen der Verklebung im Secondary Bonding (Kapitel 6.5)

Bis auf die Auswahl, die Aktivierung und die Applikation des zähmodifizierenden Materials gibt es keine Unterschiede zum klassischen Prepreg- bzw. strukturellen Verklebeprozess. Die Vorgehensweise ist folgend grafisch dargestellt:



1. Materialkombination auswählen



2. Zähmodifizierendes Material aktivieren



3. ST applizieren und Laminat herstellen



 Reinigen und Aktivieren der Oberfläche des Laminates zur Verklebung



5. Laminate verkleben

Abbildung 9-5: Grafischer Ablauf der Applikation von lokaler Oberflächenzähmodifikation in die Prepregfertigung. Fett gedruckt sind die Zusätze durch ST.

IO.Industrielle Anwendbarkeit

Löst Surface Toughening industrielle Probleme?

In den folgenden drei Unterkapiteln wird die Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation als Lösung sogenannter *"Showstopper"* aufgezeigt. Dies sind Probleme, die zum Stillstand der Technologie bzw. des entwickelten Produktes führen.

10.1 Fallstudie I: CFK/Ti-Verklebung an einer HLFC-LE

Teile dieses Kapitels sind bereits in [166] veröffentlicht.

Im EU Projekt *HLFC on HTP (Hybrid Laminar Flow Control on Horizontal Tail Plane)* wird eine HLFC fähige Höhenleitwerksvorderkante als Austauschkomponente für bestehende konventionelle Leitwerksvorderkante entwickelt und untersucht. Mittels Absaugung der Grenzschichtstörung soll eine laminare Grenzschicht sichergestellt werden und damit eine Widerstandseinsparung von 5 % erwirken. Das Design sieht eine CFK-Innenstruktur vor, welche für strukturelle Lasten sowie gegen Vogelschlag ausgelegt ist. Die Struktur ist mittels Omegastringer in Längsrichtung versteift, welche gleichzeitig ein aerodynamisch benötigtes Kammerdesign erzeugen. Jede Kammer besitzt einen anderen Unterdruck, um die umströmenden Grenzschichtstörungen abzusaugen. Eine äußere, perforierte Titanfolie mit 0,8 mm Materialstärke dient als Erosionsschutz und überträgt die aerodynamischen Lasten auf die CFK-Struktur.



Abbildung 10-1: Strukturaufbau der HLFC Leading Edge (LE) im Projekt HLFC on HTP

Die Herausforderung besteht dabei in der Verbindung der Titanhaut mit der CFK-Unterstruktur. Da die äußere Haut keine geometrischen Störungen wie Stufen, Spalte oder eine starke Welligkeit besitzen darf, um die Laminare Strömung nicht zu stören, bleibt somit nur eine strukturelle Verklebung für die Verbindung übrig. Die Auslegung und Umsetzung sind in diesem Kapitel beschrieben.

Bei der Belastungsanalyse sind als größte dauerhaft im Betrieb auftretende Lasten die thermische Wärmeausdehnungsverformung zwischen Titan und CFK am Kopf der Omegastringer identifiziert worden. Diese entsteht durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Materialien. Je höher also die auftretende Temperaturdifferenz ist, desto größer ist die unterschiedliche Wärmeausdehnung bzw. die Verformung der gesamten Struktur.

Zu Beginn des Projektes sollte die komplette Struktur in einem Durchgang "*One-shot"* gefertigt werden. Das bedeutet, während das Fasermaterial aushärtet, klebt das Harz auch das Titanblech an der CFK-Struktur fest. Dieses Vorgehen soll Prozesszeit einsparen und somit die Kosten bei der Fertigung reduzieren.

Durch das Aushärten des Harzes im Infusionsverfahren bei 180 °C und den späteren Betrieb im Reiseflug bei -55 °C entsteht ein Δ T von 235K. Dies ist die größte mögliche Temperaturdifferenz und führte zu so großen Eigenspannungen in der Struktur, sodass das Titanblech bereits direkt nach dem Entformen von der CFK-Struktur absprang.

Begleitend durch lineare FEM wurde identifiziert, dass ein *Secondary Bonding* bei 130 °C die Temperaturdifferenz im Fertigungsprozess deutlich senkt und dadurch die Eigenspannungen ebenfalls erheblich reduziert. Alle Temperaturdifferenzen, die zu den induzierten thermischen Spannungen führen sind in Abbildung 10-2 abgebildet.



Abbildung 10-2: Temperaturdifferenzen als Belastung der LE-Struktur

Die Auswahl fällt daher auf das *Secondary Bonding* bei 130 °C. Es werden weitere numerische und thermische Untersuchungen an Kleindemonstratoren durchgeführt, um den Effekt sicher abzubilden und die numerischen Ergebnisse zu verifizieren.



Abbildung 10-3: Verformungsuntersuchung eines flachen Kleindemonstrators zur Verifizierung der FEM, oben: 3D Messung mit GOM ATOS unten: Simulation der linearen FEM

Die unterschiedlich hohen Verformungen des Titans und der CFK-Unterstruktur werden allerdings bei der nachträglichen Verklebung durch den Klebstoff ausgeglichen und es entstehen daher sehr hohe Schubspannungen mit deutlichen Spannungskonzentrationen, die versagensinitiierend sind. Zur Verklebung wird ein vorgegebener Filmklebstoff FM[®] 94 K der Firma Solvay mit 0,15 mm Dicke. Die Festigkeit wird nach Datenblatt [167] mit 34,8 MPa angenommen. Weiter wird eine FE-Simulation der gesamten Leitwerksvorderkante durchgeführt und die Schubspannungen im Klebstoff analysiert.



Abbildung 10-4: Ansicht der Klebstoffschubspannungen belastet durch $\Delta T = 107K$

Deutlich sind bei Betrachtung der Detailaufnahme die wieder auftretenden randnahen Spannungskonzentrationen zu erkennen, welche bis zur Klebstoffbruchgrenze reichen. Ziel ist es, die höchstmöglich auftretenden Spannungen unterhalb der Betriebslast von *Limit Load* LL zu bringen. Bei einer ertragbaren *Ultimate Load* UL = $1,5 \cdot$ LL von 34,8 MPa ist LL = 23,2 MPa für den

Klebstoff. Betrachtet wird in dieser Studie das Abkühlen von 130 °C auf RT, da die Untersuchungen den Bau eines Fertigungsdemonstrators für den spanischen Industriepartner AERnnova unterstützen.



Abbildung 10-5: Applikation der lokalen Oberflächenzähmodifikation in den Randbereich

Nachdem die ersten Fertigungsversuche gezeigt haben, dass eine Applikation der lokalen Oberflächenzähmodifikation durch eine Ansammlung von Harz (Harznest) im Randbereich ermöglicht wird, wird ein Fertigungsdemonstrator mit lokaler Oberflächenzähmodifikation entwickelt. Zuerst wird daher die Materialkombination abgeschätzt:

Fügepartner: G0926 mit RTM6, Klebstoff: FM94K, Oberflächenzähmodifikation: PVDF bei 23 °C.





Die Materialwerte des Laminates und Klebstoffes stammen dabei aus [168] und [169].

Weiter folgt wieder eine numerische Untersuchung der Spannungsverteilung, um den spannungssenkenden Effekt der Zähmodifikation abschätzen zu können. Dafür wird ein ebenes Panel unter der Abkühlung simuliert.



mit Oberflächenzähmodifikation

Abbildung 10-7: Applikation der lokalen Oberflächenzähmodifikation in den Randbereich führt zur deutlichen Senkung der randnahen Spannungskonzentrationen

Während die Spannungskonzentrationen ohne lokale Oberflächenzähmodifikation deutlich an der Bruchgrenze des Klebstoffes liegen, reduziert die Oberflächenzähmodifikation diese deutlich unter die Betriebslast. Das Design und das Ergebnis der Simulation sind in Abbildung 10-7 aufgeführt.

Da der Industriepartner aus Kostengründen das Infusionsverfahren bevorzugt, welches aus einer Trockenfaserablage, einer Kompaktierung und anschließenden Harzinfusion und Aushärtung besteht, muss das Applikationsverfahren des PVDF-Streifens ebenfalls angepasst werden. Verwendet wird das G0926 CFK-Gewebe und ein RTM 6 Harz, der bei 180 °C aushärtet.

Das CFK-Gewebe wird nach Ablageplan in eine Aluminiumform abgelegt und mit den Hartschaumkernen aus Rohacell versehen. Anschließend wird dieses bei 110 °C unter Vakuum kompaktiert. Dabei schmilzt der Epoxidbinder im Gewebe auf und es entsteht eine zusammenhaftende Struktur aus Trockenfasern.

Mittels thermoplastischem Binderflies, welches bei 60 °C aufschmilzt, kann mittels Lötkolben der PVDF-Streifen mit der Trockenfaser fest verbunden werden. Anschließend wird die Struktur aus Trockenfaser wieder in die Form gelegt und ein Infusionsaufbau findet statt.

Die PVDF-Streifen sind je 3 mm breit. Damit die Applikation aber möglichst einfach und schnell stattfinden kann, werden die beiden Streifen über einen Steg alle 50 mm verbunden. Dies soll die

Verklebung zusätzlich in Längsrichtung robuster machen. Weiter erhalten die Streifen dadurch mehr Steifigkeit, was wiederum für die Handhabung gut ist.

Die Fertigungsabschnitte sind in folgender Abbildung 10-8 aufgeführt:



Abbildung 10-8: Fertigungsabschnitte im Infusionsverfahren der CFK-Struktur mit lokaler Oberflächenzähmodifikation

Das Ergebnis der Fertigung zeigt eine sehr saubere und reproduzierbare Applikation des PVDF-Streifens in die Oberfläche der Struktur. Die PVDF-Streifen liegen dabei genau in dem zuvor identifizierten Harznest. Die weitere Verklebung zum Demonstrator erfolgt wie gewohnt.

Das Ergebnis ist ein technischer Kleindemonstrator, welcher für weitere Untersuchungen von Wärmeausdehnung und Schadensdetektion in dem Projekt genutzt wurde und ein Designdemonstrator zur Veranschaulichung der Technologieapplikation. Beide sind in Abbildung 10-9 gezeigt.



Technischer Kleindemonstrator

Designdemonstrator



Die Erkenntnisse werden weiter auf den von AERnnova gebauten 2 m Demonstrator übertragen. Aus Zeitgründen werden allerdings nur einzelne Streifen appliziert. Durch den Zeitdruck leidet auch die Genauigkeit bei der Positionierung. Dennoch zeigt das Ergebnis, dass die Position der PVDF-Streifen nach dem Aushärten bestehen bleibt.



Abbildung 10-10: Applikationsbereiche für die Oberflächenzähmodifikation in Grün eingefärbt

Während in der eigenen Fertigung der Autoklavdruck bis zur Abkühlung auf 60 °C anlag, wurde hier mit Beginn des Abkühlprozesses belüftet, wodurch das noch flüssige PVDF nicht mehr gestützt wurde und eine nicht glatte Oberfläche erzielt. Die Applikation und das Ergebnis der Aushärtung sind in Abbildung 10-11 zu sehen.



Abbildung 10-11: Applikation und Aushärtungsergebnis am 2 m Demonstrator

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die Applikation von PVDF als zähmodifizierendes Material funktioniert auch im Infusionsverfahren.
- Der Streifen wird im Infusionsverfahren nicht durch die Harzfront weggeschwemmt.
- Der Druck auf das Werkstück muss mindestens bis zur Erhärtungsgrenze des PVDF gehalten werden, um eine formtreue Oberfläche des ST-Streifens zu erzielen.
- Die lokale Oberflächenzähmodifikation ermöglicht somit eine sichere, robuste HLFC-Struktur.

10.2 Fallstudie II: Robuste Schäftverbindung von Rohrholmsegmenten

Teile dieses Kapitels sind bereits in [115, 116] veröffentlicht.

Im DLR internen Querschnittsprojekt QSP-HAP wird eine hochfliegende, autonome Plattform (HAP) entwickelt. Entworfen und gebaut wird dabei ein stratosphärenfähiges Höhenflugzeug mit 28 m Spannweite und 135 kg Abflugmasse, welches mittels Solarzellen 90 Tage autark in der Stratosphäre fliegen kann. Dieses Höhenflugzeug soll eine kostengünstige Alternative für erdnahe Beobachtungssatelliten darstellen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, die Nutzlast wie Kameras oder Messsonden je nach Missionsanforderung zu tauschen. Eine Darstellung des Flugzeugs ist in Abbildung 10-12 zu sehen.



Abbildung 10-12: DLR HAP stratosphärentaugliches Höhenflugzeug

Ein Hauptfokus liegt dabei auf der Entwicklung eines leichtbauspezifischen Flügeldesigns, welches neben der Aufnahme der Batterien auch die Sonnenkollektoren fassen muss, bei gleichzeitiger Anforderung fertigbar zu sein. Die Auswahl des Flügeldesigns ist dabei auf eine Rippenbauweise mit Vorder- und Hinterkante und bespannter Außenhaut gefallen, wie es Abbildung 10-13 zeigt.



Abbildung 10-13: Flügelbauweise des DLR HAP

Das Herzstück des Flügels ist dabei der Rundrohrholm, welcher im Inneren die Batterien beinhaltet. Der Holm besteht dabei aus jeweils 3 m langen Einzelsegmenten, welche mittels Schäftung zusammengeklebt werden. Eine Schäftung ist ausgewählt, da diese die geringsten Spannungskonzentrationen aufweist und daher die beste Kraftübertragung bei geringster Verbindungsmasse bietet (vgl. Kapitel 2.5.5).

Die Fertigung der Rohrholme wird über ein Wickelverfahren von schmalen Prepregstreifen umgesetzt.

Am höchsten belastet wird der Rohrholm durch die Biegebelastung in Folge von Auftriebsänderungen bei Böen. Auf die Verbindungsstelle wirkt dabei ein Biegemoment (Abbildung 10-14 links). Wird die Zugseite der Verbindung im Schnitt (Abbildung 10-14 rechts) betrachtet, so entsteht eine Normalspannung, die über den Klebstoff übertragen werden muss.

Damit die Verbindungen nicht unter einem Stabilitätsproblem versagen, werden zusätzlich Versteifungshülsen eingesetzt. Diese sind in Umfangsrichtung gewickelt und übertragen keine Biegelast.



Abbildung 10-14: Belastung der geschäfteten Rohrholmtrennstelle aufgrund des Biegemomentes durch den Flügel. Spannungskonzentrationen auf Zugseite nach [116]

Da das Laminat aus teils nur 0,8 mm Materialstärke besteht, ist eine spanende Bearbeitung kaum möglich. Somit wird die äußere Schäftung direkt auf dem Wickelwerkzeug hergestellt. Als Nachteil ergibt sich dadurch ein geometrisch bedingter Steifigkeitssprung, der zu einer deutlichen Spannungsüberhöhung am Schäftauslauf führt und mit dem roten Kreis in Abbildung 10-14 rechts dargestellt ist.

Gesell et al. [116] untersuchte die versagensinitiierenden Spannungsüberhöhungen mittels numerischer Untersuchung und identifizierte konstruktive Lösungsansätze zur Verringerung dieser Spannungskonzentrationen an seinem Referenzmodell (RM).

Als Lösungsansatz steht zum einen die lokale Oberflächenzähmodifikation (ST) mittels randnah eingebrachten 10 mm PVDF-Streifen zur Auswahl. Zum anderen ist eine Steifigkeitsreduktion (SR) möglich, bei der das überschüssige Material weggeschliffen wird. Abschließend steht noch die Kombination aus beidem zur Auswahl (ST+SR). Alle Varianten sind in Abbildung 10-16 aufgeführt. Ebenfalls sind dort die Spannungssenkungen prozentual zum Referenzmodell aufgeführt. Zuerst wird daher die Materialkombination abgeschätzt:

Fügepartner: M21E IMA, Klebstoff: EA9394, Oberflächenzähmodifikation: PVDF bei 23 °C.



Abbildung 10-15: Kombination Fügepartner M21E mit Klebstoff EA9394 und Oberflächenzähmodifikation PVDF bei 23 °C

Die lokale Oberflächenzähmodifikation reduziert dabei die Spannungskonzentrationen auf 60 % der Schälspannungen und 56 % der Schubspannungen. Die Steifigkeitsreduktion zeigt einen deutlich höheren Einfluss und reduziert die Schälspannungen auf 25 % und die Schubspannungen auf 45 %. Den größten Einfluss zeigt allerdings die Kombination aus beidem. Diese kombinierte Anwendung von Zähmodifikation und Steifigkeitsreduktion verringert die Schälspannung auf 11 % und die Schubspannungen auf 21 % im Vergleich zum Referenzmodell.



Abbildung 10-16: Spannungsreduktion der Trennstelle, berechnet durch FEM nach [116]

Erwartungsgemäß der Simulationsergebnisse nach müsste die Variante mit Zähmodifikation eine deutliche Festigkeitssteigerung erzielen. Der Vorteil bei dieser Variante ist der geringe Fertigungsaufwand durch die Technologie. Noch höher müsste jedoch die Festigkeitssteigerung durch die Steifigkeitsreduktion ausfallen. Hier ist allerdings eine spanende Bearbeitung notwendig, welche sich als sehr aufwendig herausstellt und nur bei dickeren Laminatstärken erprobt ist. Die Kombination von beiden müsste die höchsten Festigkeiten erzielen, beinhaltet jedoch weiterhin die Schwierigkeit der mechanischen Bearbeitung.

Zu beachten ist, dass ein komplettes Holmsegment eines Teilflügels bis zu 10 m lang ist und nach der Verklebung gezielt nachbearbeitet werden muss. Diese Umsetzung wird als nahezu unmöglich bewertet.

Um die simulativen Ergebnisse zu bestätigen, wird neben den zur Nachweispflicht benötigten Holmverbindungstests auch ein Couponprobenprogramm durchgeführt. Der Hintergrund liegt darin, dass bei Versuchen auf Elementlevel viele Unbekannten das Ergebnis beeinflussen können, weswegen anschließend keine Aussage über die eigentliche Wirkungsweise getroffen werden kann.

Zur Sicherheit werden die Überlappungsränder der Versteifungshülsen ebenfalls zähmodifiziert, sodass ein mögliches Risswachstum aufgrund des Steifigkeitssprungs direkt unterdrückt wird, welcher bei Wachstum in die Schäftung laufen könnte. Die Applikation ist in Abbildung A-3 aufgeführt.

Die äußere Applikation des PVDF Streifens gestaltet sich als sehr einfach. Dieser wird mittels Messschieber an die richtige Position auf dem Prepreg gedrückt und hält durch den Tack wie bei den Couponproben aus Kapitel 7. Die innere Applikation ist in Abbildung 10-17 dargestellt.



Abbildung 10-17: Fertigung des Laminats mit Zähmodifikation auf der Wickelanlage

Der PVDF-Streifen wird mittels Klebebandes auf der Wickelform positioniert und dann von der Wickelanlage überwickelt. Hält der Streifen, so können die Klebebänder entfernt werden und der Wickelprozess läuft automatisch weiter. Eine reproduzierbare und schnelle Fertigung ist somit gewährleistet. Dieses Verfahren ist ebenfalls von der Firma INVENT GmbH durchgeführt worden, welche die konischen Außenrohrholme in Auftrag fertigte.

Das von Kreißig [170] durchgeführte Couponprobenprogramm beinhaltet die von Gesell untersuchten Spannungsreduzierungskonzepte und testete diese der Einfachheit halber als ebene Probenplatten. Die Varianten sind in Abbildung 10-18 dargestellt. Die Probenbreite entspricht dabei 25,4 mm und die Schäftlänge ist bei der 1:60 Schäftung 66 mm lang. Das Laminat besteht aus 1,1 mm dickem [+20°, -20° , 90°]_s M21E/IMA Prepreg. Als Klebstoff wird EA9394 verwendet und die Klebschichtdicke beträgt 0,2 mm.



Abbildung 10-18: Die in Kreißig [170] untersuchten Couponproben

Das Ergebnis der Versuche ist in Abbildung 10-19 dargestellt. Im Vergleich zur Referenz erzielt die Spannungsreduktion mittels Oberflächenzähmodifikation eine 72,2 % höhere Verbindungsfestigkeit. Eine deutlich höhere Verbindungsfestigkeit mit 142,5 % Steigerung erreicht die Steifigkeitsreduktion durch das Abfräsen. Die Kombination aus beidem besitzt eine Festigkeitssteigerung von 122 %, jedoch traten während der Fertigung deutliche Abweichungen in der Geometrie auf, weshalb diese Serie nicht repräsentativ ist.

Aus den Ergebnissen kann die Erkenntnis gezogen werden, dass die geometrische Steifigkeitsanpassung in diesem Anwendungsfall zwar einen höheren festigkeitssteigernden Effekt besitzt, jedoch durch die Schwierigkeiten bei der Herstellung eine sehr hohe Streuung besitzt, dass aus Konstrukteurssicht der geringste Wert angenommen werden muss. Bei den ST-Proben wäre dies eine Verbindungsfestigkeit von 6,94 MPa und bei der SR von 6,96 MPa. Mit nahezu identischen Werten und dem großen Unterschied, dass ein PVDF-Streifen sehr einfach appliziert werden kann, während die Steifigkeitsreduktion sehr aufwendig und nicht reproduzierbar herzustellen ist, ist das Fazit, dass die lokale Oberflächenzähmodifikation die Verbindungsfestigkeit am besten steigert und analog dazu noch als Rissstoppelement dient.



Abbildung 10-19: Ergebnisse der Couponprobenversuche zur lokalen Oberflächenzähmodifikation an Schäftverbindungen nach Kreißig [170]

Da die Proben der Elementversuche bis auf eine Probe ohne Zähmodifikation in der Einspannung gebrochen sind, lässt sich an dieser Stelle das Festigkeitsergebnis nicht eindeutig interpretieren.



Abbildung 10-20: Ergebnisse der Elementproben

Es ist zwar zu erkennen, dass die ST-Proben eine 5 % höhere Festigkeit bei gleicher Standardabweichung besitzen wie die RM-Proben. Da alle Proben identisch mit Inserts für die Prüfmaschine versehen sind, könnte daraus geschlossen werden, dass die Zähmodifikation den Einspannungsbereich der Prüfmaschine in einer positiven Weise entlastet, wodurch die Proben dort höhere Belastungen ertragen. Da die Verbindungen der Probekörper ohne Zähmodifikation allerdings schon die benötigten Bruchlasten zur Nachweisführung des Flugzeugs ertragen haben, werden keine weiteren Untersuchungen bezüglich einer verbesserten Einspannung in der Prüfmaschine unternommen.

Da die Böenbelastung nur im unteren, bodennahen Luftraum bei Start und Landung auftreten und der HAP anschließend in absolut ruhiger Luft in der Stratosphäre fliegt, ist PVDF als Material in diesem Anwendungsfall geeignet.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die Applikation von PVDF als zähmodifizierendes Material funktioniert auch im Wickelverfahren.
- Die lokale Oberflächenzähmodifikation steigert die Verbindungsfestigkeit nachweislich bei Schäftproben um 72 %.
- Die Applikation von PVDF-Streifen stellt sich als hochratenfähiges, reproduzierbares, zeit- und kosteneffizientes Verfahren im Vergleich zur spanenden Bearbeitung dar.
- Die lokale Oberflächenzähmodifikation ermöglicht somit eine sichere Verklebung der Primärstruktur des DLR HAP bei gleichzeitigem Schutz vor Ermüdungsrissen im Klebstoff.

10.3 Fallstudie III: Robuste Verklebung einer Landeklappe

In einem Arbeitspaket des Projektes Flink 4.0 wird die Möglichkeit erarbeitet, eine Landeklappe aus Faserverbundmaterial in Differenzial- anstatt Integralbauweise zu fertigen. Der Nachteil der Integralbauweise ist, dass bei fertigungsbedingten Abweichungen keine Nacharbeit im Toleranzmanagement mehr möglich ist. Bei der Integralbauweise ist zwar das Fasermaterial ungestört im Bauteil abgelegt und daher belastungstechnisch besser ausgelegt, jedoch ist das Werkzeug aber auch deutlich komplexer. Ein einzelner Fehler am Bauteil führt zum Ausschuss der kompletten Baugruppe. Das Risiko für Ausschuss steigt erheblich. Bei dieser Untersuchung geht es um das Toleranzmanagement der Aktuatoraufnahmen aus Abbildung 10-21.



Abbildung 10-21: Klappenkörper mit Aufnahmepunkten für Aktuatoren

Bei der Differenzialbauweise werden hingegen einzelne Komponenten erst gefertigt und anschließend miteinander verbunden. Verzug im Bauteil kann bspw. einfach durch die Variation

der Klebschichtdicke wieder ausgeglichen werden. Jedoch wirken hohe Belastungen auf die Klebschicht, weshalb eine Gefahr des Risswachstums besteht. Zuerst wird wieder die Materialkombination abgeschätzt:

Fügepartner: 8552/IM7, Klebstoff: EA9394, Oberflächenzähmodifikation: PVDF bei 23 °C.





Für die Untersuchung wird ein Landeklappendemonstrator mit 15 cm Breite gefertigt.





Während bei der Integralbauweise das fertige Bauteil nach dem Entformen zwar fertig, jedoch unveränderbar ist, kann der noch fehlende L-Winkel bei der Differenzialbauweise nach Maß angeklebt werden und die prozessbedingte Verformung wie z.B. den *Spring-in* ausgleichen.



Abbildung 10-23 zeigt beide Bauweisen und die daraus geformten Klappenkörper. Der L-Winkel wird bei der Differentialbauweise in einer eigenen Form hergestellt, die nicht mit aufgeführt ist.

Abbildung 10-24: Abweichung der Ist-Geometrie zur gewünschten Soll-Geometrie (CAD)

Da der angeklebte Winkel im Betrieb große Kräfte überträgt und die Belastungsrichtung hohe Schälspannungen im Klebstoff erzeugt, wird der Bereich, an dem die Verklebung beginnt, lokal zähmodifiziert. Dies geschieht wieder über das Einlegen eines PVDF-Streifens auf das abgelegte Prepreglaminat in der Form. Die Baugruppe wird anschließend verklebt. Die 3D-Vermessung mittels ATOS ist in Abbildung 10-24 aufgeführt.

Während der eigentliche Klappenkörper fertigungsbedingt um teils Millimeter von der gewünschten Soll-Geometrie abweicht, kann diese Abweichung durch den Klebstoff ausgeglichen werden. Die Aufnahmepunkte zu den Aktuatoren weisen lediglich einige zehntel Millimeter Toleranz auf.

Das Ergebnis ist eine robust verklebte Landeklappe in Differenzialbauweise.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation lässt sich die robuste Verklebung zur Umsetzung der Differentialbauweise des Klappenkörpers ermöglichen.
- Da die Einspannung zur Prüfmaschine als erstes versagt, kann der Effekt der Oberflächenzähmodifikation an der Holmtrennstelle nicht auf Elementbauteilebene demonstriert werden.

10.4 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wird der Transfer der lokalen Oberflächenzähmodifikation von Labor- hin zu Industrieanwendungen aufgezeigt. Beginnend mit der Applikation der lokalen Oberflächenzähmodifikation an einer HLFC-Leitwerksvorderkante ermöglicht die Technologie eine sichere Verklebung hybrider Materialien. Es wird somit eine robuste, kostengünstige Lösung umgesetzt, die den hohen Anforderungen an die umströmte Oberfläche gerecht wird. Eine Bolzenverbindung wäre hier nicht möglich. Das Konzept wird so auf einem 2 m Demonstrator durch den Industrieprojektpartner AERnnova umgesetzt. Weiter wird die lokale Oberflächenzähmodifikation zur Robustheitssteigerung der Primärstruktur des DLR-HAP eingesetzt. Dabei handelt es sich um die Verklebung von Rohrholmsegmenten, die mittels Schäftung die Holmstruktur des Flügels und auch den Rumpf darstellen. Aufgrund des extremen Leichtbaus dieses Höhenflugzeugs können schnell grenznahe Belastungen auftreten. Die lokale Oberflächenzähmodifikation steigert dabei nachweislich die Verbindungsfestigkeit und soll einem möglichen Risswachstum in der Klebverbindung aufhalten und somit den 90-tägigen Dauerbetrieb eines Einsatzes sicherstellen. Abschließend wird durch die Applikation der lokalen Oberflächenzähmodifikation in einem Klappendemonstrator die Umsetzbarkeit der Differenzialbauweise ermöglicht. Während des Industrietransfers zeigt sich, dass auch große Strukturen lokal zähmodifiziert werden können. Wichtig ist, dass der Autoklavdruck erst unterhalb der Schmelztemperatur des zähmodifizierenden Materials gesenkt werden darf, um die Geometrietreue zu erhalten.

II.Zusammenfassung und Ausblick

Was habe ich erfahren?

II.I Zusammenfassung

Strukturelles Kleben in der Luftfahrt ist eine Herausforderung, die schnell unterschätzt wird. Neben der teils sehr komplexen strukturellen Auslegung mittels notwendiger hochkomplexer nicht linearer FEM ist die Herstellung und die Überwachung einer strukturellen Verklebung ein aufwendiger und damit teurer Prozess für die Industrie. Um mögliche Unsicherheiten auszuschließen, wird in der Luftfahrt die Klebverbindung nachträglich verbolzt. Die Bolzen sollen zum einen das Risswachstum eingrenzen und bei Totalausfall der Klebverbindung die komplette Betriebslast der Verbindung übertragen. Diese Kombination aus Verbolzung und Verklebung führen aber etliche Nachteile mit sich. Neben der noch aufwendigeren und teureren Fertigung kommt der Massenzuwachs und die Schädigung des Faserkunststoffverbundes durch Bohrungen hinzu, was wiederum das Leichtbaupotential des Fasermaterials erheblich beeinträchtigt.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der Untersuchung und Entwicklung einer bolzenfreien, robusten Klebverbindung, die in der Luftfahrt eingesetzt werden kann. Mithilfe der lokalen Oberflächenzähmodifikation können Spannungskonzentrationen in der Verbindung reduziert werden. Folgende Forschungsthesen wurden daher untersucht.

Forschungshypothese 1:

Eine lokale Oberflächenzähmodifikation in einer Überlappungsklebung senkt die Spannungskonzentrationen im Klebstoff in reiner Belastungsrichtung von Mode I und Mode II sowie deren Kombination.

Eine lokale Zähmodifikation einer Oberfläche des Fügepartners führt zur lokalen Senkung der Belastungen in der Klebschicht. Die Schälspannungskonzentrationen sowie Schubspannungskonzentrationen werden an diesen Stellen verringert bzw. in einen Bereich geringerer Belastung umgelagert, welcher außerhalb des zähmodifizierten Bereichs liegt. Mittels DCB-Proben kann unmittelbar bestätigt und quantifiziert werden, dass die Aussage für die Mode I Belastung stimmt. Damit ein Riss, der das Ergebnis einer zu hohen Spannungskonzentration ist, durch die lokale Oberflächenzähmodifikation wachsen kann, werden 25,1 % mehr Energie benötigt als ohne Zähmodifikation. Unter Mode II Belastung wird gezeigt, dass bei den zähmodifizierten Proben erst gar kein Risswachstum im Vergleich zu den unmodifizierten Proben auftritt. Der Effekt ist also bei Schubbelastung deutlich höher.

Forschungshypothese 2:

Durch gezielte Anordnung der lokalen Oberflächenmodifikation in der Klebung wird die Lastverteilung verbessert und somit die Verbindungsfestigkeit gesteigert.

Um erst gar kein Risswachstum zu erhalten, macht es Sinn, direkt am Beginn einer Verklebung lokal zäh zu modifizieren. Werden die Spannungskonzentrationen randnah gesenkt, bedeutet dies im Umkehrschluss auch, dass die Verbindungsfestigkeit gesteigert wird. SLS-Versuche zeigen, dass die Oberflächenzähmodifikation mittels PVDF bei Raumtemperatur die maximale Effizienz der Verbindung erzielt und der Bruch im Fügepartner beginnt, während nichtmodifizierte Proben kohäsiv im Klebstoff versagen.

Oberflächenzähmodifikation steigert die Verbindungsfestigkeit Die lokale je nach Anwendungsfall von 84 % bis 120 %. Im Umkehrschluss kann bei gleicher Bruchkraft der der lokalen Oberflächenzähmodifikation Verbindung durch Anwendung die Überlappungslänge der Verbindung und dadurch die Strukturmasse deutlich reduziert werden. Experimentell ergab sich eine Einsparung von 40 % der Strukturmasse, wohingegen rechnerisch eine Einsparung bis 65 % möglich wären.

Mittels linearer FEM wird gezeigt, dass die Lastverteilung in der Verbindung dahin gehend verbessert wird, dass randnah Spannungskonzentrationen deutlich gesenkt werden und der mittlere, zumal kaum belastete Bereich etwas höher belastet wird. Diese Erkenntnisse können experimentell über DIC belegt werden. Durch hochauflösende Dehnungsmessung wird ersichtlich, dass lokal zähmodifizierte Klebschichten nahezu homogen belastet werden und unmodifizierte Klebverbindungen randnah ein deutliches Dehnungspeak aufweisen, an dem ein Riss losläuft.

Forschungshypothese 3:

Ein Risswachstum Klebverbindung in der wird mittels einer lokalen Oberflächenzähmodifikation der dadurch auftretenden Reduktion und von Spannungskonzentrationen gestoppt.

Da aber nicht nur randnahe Spannungskonzentrationen ein Risswachstum begünstigen, sondern auch Defekte im Inneren der Klebverbindung dies hervorrufen, ist es wichtig, diese sicher zu stoppen. Mittels CLS-Proben wird dies experimentell untersucht. Bis zu einer schwellenden Belastung von 3500 μ m m⁻¹ werden Risse sicher gestoppt. Bei 4000 μ m m⁻¹, was der 1,33-fachen zulässigen Betriebslast des Substrates entspricht, werden Risse deutlich gebremst und für eine Million Lastwechsel aufgehalten, was wiederum drei Flugzeugleben entspricht.

Eine anschließende Restfestigkeitsanalyse zeigt, dass eine zähmodifizierte Probe mit gestopptem Riss unter 26,3 % höherer Belastung im Substrat versagt und somit die lokale Oberflächenzähmodifikation wieder die höchste Effizienz der Verbindung erreicht. Gleichartige Proben ohne Zähmodifikation versagen in der Klebverbindung kohäsiv. Damit die lokale Oberflächenzähmodifikation funktioniert, sind folgende Arbeitshypothesen bearbeitet worden:

1. Thermoplaststreifen können verwendet werden, um die Oberfläche zäh zu modifizieren.

Die ausgiebigen Versuche haben gezeigt, dass PVDF als Copolymer sehr gut oberhalb der Glasübergangstemperatur geeignet ist. Unabhängig von Substrat oder Strukturklebstoff ist der Effekt zur Zähmodifikation sehr stark ausgeprägt. Alle anderen verwendeten Materialien wie PEEK, PEI, K72 erweisen sich als zu steif bzw. erfüllen nicht die Anforderungen aus Kapitel 9.2.

2. Vakuum-UV Licht eignet sich zur Oberflächenvorbehandlung der dünnen Thermoplaststreifen.

Während sich PVDF und PEI recht einfach verkleben lässt und eine Entfettung der Oberfläche mittels Isopropanol schon zur guten Anhaftung führt, sind Hochleistungthermoplaste wie PEEK oder das K72 nur nach richtiger Aktivierung in der Lage, sich mit dem Epoxidharz zu verbinden. Das kalte VUV-Licht eignet sich daher hervorragend, dünne Kunststofffolien zu aktivieren, ohne diese zu zerstören.

3. Die Wirkung der Oberflächenzähmodifikation lässt sich experimentell nachweisen.

In dieser Arbeit sind in Kapitel 5.1 die Proben zum Nachweis des Effektes der lokalen Oberflächenzähmodifikation ausgewählt. Der Unterschied zwischen Referenzprobe ohne Modifikation und der mit Zähmodifikation ist stets reproduzierbar und so groß, dass ein zufälliger Begleiteffekt ausgeschlossen werden kann. Die These ist somit erfüllt.

4. Die Oberflächenzähmodifikation hat keinen negativen Effekt auf die intralaminare Festigkeit des Substrates.

Mittels Zugprobe wird der Einfluss der Zähmodifikation auf das Reinlaminat untersucht. Unter Zugbelastung konnte keine negative Auswirkung auf das Laminat beobachtet werden. Wird hingegen das zähmodifizierte Material weggelassen und es entsteht eine Lücke, so führt diese zur Sollbruchstelle im Laminat.

5. Die verbesserte Lastverteilung lässt sich experimentell wie numerisch beweisen.

Mittels DIC kann die Dehnungsverteilung, welche repräsentativ für die Spannungsverteilung steht, sichtbar gemacht werden. Mit Zähmodifikation zeigt sich die homogene Verteilung in der gesamten Klebschicht. Ohne Zähmodifikation ist ein Dehnungspeak zu erkennen, von dem aus ein Riss loswächst. Mittels linearer FEM ist in Kapitel 7.7 nachgewiesen, wie die Spannungskonzentrationen am Rand durch die Zähmodifikation sinken und der weniger belastete Mittelteil der Verbindung stärker belastet wird.

6. Die Anwendung der Oberflächenzähmodifikation ist unabhängig von Fertigungsweise und Klebstoffapplikation und somit hochratenfähig für die Industrie einsetzbar.

In dieser Arbeit ist die Applikation im Prepregverfahren und im Infusionsverfahren untersucht und erfolgreich erprobt worden. Wird vor allem das Prepregverfahren als AFP-Verfahren mit Roboter berücksichtigt, ist eine hochratenfähige Fertigung durchaus möglich. Aufgrund der geringen Bauteilgröße sind in dieser Arbeit jedoch alle Applikationen per Hand geschehen.

II.2 Ausblick

Der Ausblick ist in zwei Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt umfasst die noch offenen Fragestellungen dieser Arbeit, die nicht beantwortet werden konnten:

- 1. Die Technologie der Zähmodifikation eignet sich hervorragend zur automatischen Ablage mittels AFP-Roboter. In dieser Arbeit konnte jedoch keine Demonstration durchgeführt werden. Daher wird empfohlen, einen Ablagekopf zu entwickeln und die Ablage zu demonstrieren.
- 2. In Kapitel 8 sind Versuche unter Temperatur und Feuchtigkeit durchgeführt worden. Wichtig für das Verständnis und die Bestätigung des modifizierten Federmodells ist die Kenntnis des Elastizitätsmoduls sowie der Bruchdehnung des zähmodifizierenden Materials zu jedem Temperaturpunkt. Es wird daher empfohlen, im Weiteren diese Materialkennwerte zu generieren. Eine Charakterisierung könnte mittels Knochenprobe und TAST-Probe durchgeführt werden. Erwartet wird, dass besonders das Elastizitätsmodul von PEEK unter Feuchtigkeit stark sinkt, wodurch die Gesamtfedersteifigkeit unter die des Klebstoffes fällt und somit die Festigkeitssteigerung zu begründen ist.
- 3. Damit die lokale Oberflächenzähmodifikation auch in der Luftfahrt angewendet werden kann, muss ein Werkstoff identifiziert werden, der auch den Temperaturbereich von -60 °C bis 80 °C abdeckt. TPU ist hier die erste Wahl und sollte untersucht werden, da der Werkstoff gut verklebbar sein soll und sehr gut mechanisch anzupassen ist. Weiter wäre auch ETFE möglich, da die mechanischen Kennwerte ebenfalls passen würden. Ein großer Nachteil dieses Werkstoffs ist die antiadhäsive Eigenschaft. ETFE wird gerade im Faserverbundbau als Trennfolie eingesetzt, an der das Epoxidharz nicht haften bleibt. Da ETFE jedoch durch DBD-Plasma- und die Coronavorbehandlung sehr gut aktiviert werden kann [171, 172], wird es derzeit schon als umweltresistente Schutzfolie auf Solarzellen verklebt. Weiter könnte auch PE infrage kommen, jedoch besteht hier ebenfalls die Problematik der schlechten Verklebung. PE kann jedoch wie PEEK gut mittels VUV-Licht aktiviert werden [173].
- 4. In dieser Arbeit sind nur Proben mit 25 mm Breite mechanisch getestet worden. Es sollten daher Versuche auf größerer Ebene stattfinden, um den Effekt der lokalen Zähmodifikation skalieren zu können. Dafür eignen würden sich breitere, sogenannte *Wide Single Lap Shear* Proben (WSLS). Bei diesen könnte dann auch eine Rissausbreitung bzw. dessen Stopp nach Impact in Probenbreite untersucht werden.
- 5. Da in den Versuchen durch Weißbruch im PVDF ein deutliches nicht lineares Materialverhalten identifiziert wurde, dieses jedoch weder durch das modifizierte Federmodell noch durch die lineare FEM abgebildet werden kann, ist eine nicht lineare FEM mit hochdetailliertem nicht linearen Materialverhalten notwendig. Dafür müssen zuerst alle notwendigen Materialkennwerte identifiziert werden. Ein erster Ansatz dafür ist eine TAST-Probenkampagne bei Raumtemperatur, um die Schubspannungs-Gleitungskurve des PVDF zu ermitteln.

Der zweite Abschnitt umfasst mögliche weitere Anwendungsszenarien der lokalen Oberflächenzähmodifikation:

1. Wenn ein Rissstopper vorhanden ist, muss natürlich sichergestellt sein, dass der Riss auch wirklich dort Risse stoppt. In Kooperation mit der TU Braunschweig ist daher eine sensierte Klebschicht untersucht worden, bei der ein Dehnungsmessungssensor direkt auf das PVDF appliziert und so in die Klebverbindung eingebracht wurde.



Abbildung 11-1: Applikation der sensierten Klebschicht auf CFK

Mit dieser Technoliogie ist der Landeklappendemonstrator aus Kapitel 10.3 ebenfalls ausgestattet. Mithilfe der Differenzmessung der Dehnungen lässt sich die Position der Rissfront abschätzen [174, 175].



Abbildung 11-2: Handdemonstrator zeigt Dehnungssignalunterschied im Sensor

Jedoch ist ein mechanischer Sensor aus Leiterbahnen anfällig auf mechanische Belastungen, weswegen dieser bei zyklischer Belastung schnell versagt. Vielversprechend ist daher der Einsatz von FOS-Sensoren, welche kontinuierlich ihres Lichtleiters entlang ein Dehnungssignal messen können. Dieser sollte in die Klebschicht appliziert werden und kann somit nicht nur den Effekt der Zähmodifikation sowie der Lastumlagerung nachweisen, sondern auch die Position eines möglichen Risses identifizieren.

2. Weiter sollte die Anwendung an Stringer versteiften Hautfeldern untersucht werden. Derzeit sind die Hautversteifungen neben der Verklebung noch zusätzlich verbolzt, da unter Beulbelastung des Hautfeldes hohe Schälbelastungen die Stringer sonst abschälen lassen. Moderne klebgerechte Konstruktionen sehen daher am Beginn der Stringer sogenannte Entenfüße vor, um die Schälbelastung flächig abzuleiten. Diese Konstruktion ist sehr aufwendig gestaltet und daher nicht hochratenfähig. Mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation könnte das Design deutlich vereinfacht werden.



Abbildung 11-3: "Entenfüße" als klebgerechtes Stringerdesign könnten durch lokale Oberflächenzähmodifikation deutlich vereinfacht werden

3. Abschließend sollte die Anwendung der Zähmodifikation bei Reparaturklebungen untersucht werden. Gerade bei CFK-Patchreparaturen von Metallrümpfen entstehen aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten randnahe Spannungskonzentrationen. Diese können mittels Oberflächenzähmodifikation reduziert werden. Die Ergebnisse zur Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation bei Metallen (Kapitel 7.4.9) haben weiter gezeigt, dass der Effekt auch besteht, wenn das zähmodifizierende Material zwischen zwei Klebschichten eingebettet wird. Somit können auch ausgehärtete Laminate nachträglich zähmodifiziert werden, was die Zähmodifikation von Reparaturstellen mittels schon ausgehärtetem Patch ermöglicht.



Abbildung 11-4: Design einer geklebten CFK-Patchreparatur

Literaturverzeichnis

- [1] P. Ovidus Naso, Ovid Verwandlungen: Eine Auswahl. Stuttgart: Reclam, 1965.
- [2] Gustav Schwab, *Sagen des klassischen Altertums*. München: Droemersche Verlagsanstalt, 2001.
- [3] O. Kratky, "Die Orientierung der Moleküle des Bienenwachses und die Festigkeit der Waben," *Naturwissenschaften*, vol. 25, no. 15, p. 239, 1937, doi: 10.1007/BF01492405.
- [4] National Advisory Committee for Aeronautics, "Manual of the ICAO Standard Atmosphere Calculations by the NACA: Technical Note 3182," 1954.
- [5] National Transport Safety Board, "Aircraft Accident Report Aloha Airlines Flight 243: Report Number NTSB/AAR-89/03," Washington D.C., 1989.
- [6] Star Adviser, Aloha Airlines Flight 243, April 28, 1988, 2018. Accessed: Aug. 30 2021.
 [Online]. Available: https://www.staradvertiser.com/2018/04/27/photo-galleries/alohaairlines-flight-243-april-28-1988/
- [7] Federal Aviation Administration, Lessons Learned From Civil Aviation Accidents Home: Boeing 737-200 Aloha Airlines Flight 243, N73711. Accessed: Aug. 30 2021. [Online]. Available: https://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=4&LLID=20&LLTypeID=2#null
- [8] Federal Aviation Administration, Aloha Airlines 737 Fuselage Skins Animation, 2021. Accessed: Aug. 30 2021. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v= TOuKjhML00A
- [9] European Aviation Safety Agency, "Certification Specifications for Normal-Category Aeroplanes CS-23: Amendment 5," 2017.
- [10] European Aviation Safety Agency, "Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25: Amendment 18," 2018.
- [11] European Aviation Safety Agency, "Annex II AMC 20-29 to ED Decision 2010/003/R," 2010.
- [12] 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.
- [13] Federal Aviation Administration, "AC 20-107B Composite Aircraft Structure with change 1," 2010.
- [14] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen,* 2nd ed. Berlin: Springer, 2007.

- [15] DIN EN 923:2016-03, Klebstoffe_- Benennungen und Definitionen; Deutsche Fassung EN_923:2015, Berlin.
- [16] G. Habenicht, Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen, 6th ed. Berlin: Springer, 2009.
 [Online]. Available: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3134918&prov=M& dok_var=1&dok_ext=htm
- [17] A. von Halteren, "Industrieverband Klebstoffe e.V.: Leitfaden Kleben aber richtig: Frauenhofer IFAM," [Online]. Available: https://leitfaden.klebstoffe.com/
- [18] W. Brockmann, P. L. Geiß, J. Klingenberg, and B. Schröder, *Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/3527605851
- [19] X. Yu, Z. Fan, M. Castaings, and C. Biateau, "Feature guided wave inspection of bond line defects between a stiffener and a composite plate," *NDT & E International*, vol. 89, pp. 44– 55, 2017, doi: 10.1016/j.ndteint.2017.03.008.
- [20] R. D. Adams, P. Cawley, and C. C. H. Guyott, "Non-destructive Inspection of Adhesivelybonded Joints," *The Journal of Adhesion*, vol. 21, 3-4, pp. 279–290, 1987, doi: 10.1080/00218468708074975.
- [21] R. D. Adams and B. W. Drinkwater, "Nondestructive testing of adhesively-bonded joints," *NDT & E International*, vol. 30, no. 2, pp. 93–98, 1997, doi: 10.1016/S0963-8695(96)00050-3.
- [22] A. A. Baker, S. Dutton, and D. W. Kelly, Eds., *Composite materials for aircraft structures*, 2nd ed. Reston, Va.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [23] M. C.-Y. Niu and M. C.-Y. Niu, *Composite airframe structures: Practical design information and data,* 3rd ed. Hong Kong: Conmilit Press Ltd, 2000.
- [24] DIN EN ISO 10365:1995-08, Klebstoffe_- Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder (ISO_10365:1992); Deutsche Fassung EN_ISO_10365:1995, Berlin.
- [25] J. Steinmetz *et al.,* "The Working Principles of a Multifunctional Bondline with Disbond Stopping and Health Monitoring Features for Composite Structures," *J. Compos. Sci.*, vol. 5, no. 2, p. 51, 2021, doi: 10.3390/jcs5020051.
- [26] T. Löbel, D. Holzhüter, M. Sinapius, and C. Hühne, "A hybrid bondline concept for bonded composite joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 68, pp. 229–238, 2016, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.03.025.
- [27] D. Holzhüter, "Future Advanced Composite Bonding and Bonded Repair Einblicke in den Forschungsverbund FACTOR," Fassberg Deutschland, Oct. 18 2017. Accessed: Sep. 11 2021. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/114819/
- [28] D. Holzhüter, "Kleben im Flugzeug? Aber sicher!: JonDT," Leichtbaublog FA, 2021. [Online]. Available: https://leichtbau.dlr.de/kleben-im-flugzeug-aber-sicher
- [29] DIN EN 1465:2009-07, Klebstoffe_- Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen; Deutsche Fassung EN_1465:2009, Berlin.

- [30] DIN EN ISO 11339:2010-06, Klebstoffe_- T-Schälprüfung für geklebte Verbindungen aus flexiblen Fügeteilen (ISO_11339:2010); Deutsche Fassung EN_ISO_11339:2010, Berlin.
- [31] O. Volkersen, "Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten," *Luftfahrtforschung*, pp. 41–47, 1938.
- [32] M. Goland and E. Reissner, "The Stresses in Cemented Joints," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 11, no. 1, A17-A27, 1944, doi: 10.1115/1.4009336.
- [33] K. Frey, "Beiträge zur Frage der Bruchfestigkeit kunstharzverklebter Metallverbindungen," Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, vol. 19, no. 2, pp. 33–39, 1953.
- [34] U. Draugelates and W. Brockmann, "Das Kleben von Buntmetall, Zink und brüniertem Stahl," *Adhäsion*, vol. 10, pp. 483–488, 1966.
- [35] H. Meckelburg, Zur Festigkeit von schubbeanspruchten einschnittig überlappten Leichtmetall-Klebverbindungen.
- [36] H. Winter and H. Meckelburg, *Festigkeitsverhalten und Dimensionierungsmöglichkeiten von Metallklebverbindungen*: DFL-FB.
- [37] H. Winter and H. Meckelburg, "Bericht über Metallklebforschungsarbeiten im Inst. F. Flugzeugbau der Dtsch. Forsch.-Anst. F. Luftfahrt, Braunschweig," Ind.-Anz, vol. 2, p. 3, 1961.
- [38] H. Müller, "Festigkeits-und Dimensionierungsvoraussagen von einfach überlappten Metallklebeverbindungen," *Fertigungstechnik und Betrieb*, vol. 11, no. 2, pp. 131–135, 1961.
- [39] E. A. Cornelius and G. Stier, "Die Spannungsverteilung in Klebverbindungen," *Aluminium*, vol. 39, no. 5, 305/313, 1963.
- [40] H. Schlegel, "Möglichkeiten zur Berechnung von Metallklebverbindungen. Z. Schweißtech.(J. Soudure)," Zürich, vol. 8, pp. 328–339, 1966.
- [41] L. J. Hart-Smith, "Bonded-bolted composite joints," *Journal of Aircraft*, vol. 22, no. 11, pp. 993–1000, 1985, doi: 10.2514/3.45237.
- [42] L. J. Hart-Smith, "The strength of adhesive-bonded single-lap joints," Santa Monica, Douglas Aircraft Company, IRAD Technical Report Number, vol. 1600, J0742, 1970.
- [43] L. J. Hart-Smith, "Adhesive-Bonded Single-Lap Joints.[analytical solutions for static load carrying capacity]," 1973.
- [44] L. J. HARTSMITH, "Designing adhesive bonds," Adhesives Age, vol. 21, no. 10, pp. 32–37, 1978.
- [45] H. Tombach, "Predicting Strength and Dimensions of Adhesive Joints," Mach. Des., vol. 4, pp. 113–120, 1975.
- [46] J. Kosmann *et al.*, "Measurement of epoxy film adhesive properties in torsion and tension using tubular butt joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 83, pp. 50–58, 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2018.02.020.

- [47] M. J. Schollerer, J. Kosmann, T. Löbel, D. Holzhüter, and C. Hühne, "A new joining-device for manufacturing tubular butt joints with higher curing temperatures of film adhesives," *Appl Adhes Sci*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s40563-017-0094-8.
- [48] J. Kosmann, O. Völkerink, M. J. Schollerer, D. Holzhüter, and C. Hühne, "Digital image correlation strain measurement of thick adherend shear test specimen joined with an epoxy film adhesive," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 90, pp. 32–37, 2019, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.01.024.
- [49] M. Arcan, Z. Hashin, and A. Voloshin, "A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials," *Experimental Mechanics*, vol. 18, no. 4, pp. 141–146, 1978, doi: 10.1007/BF02324146.
- [50] DVS, "DVS 1618:2002-0: Elastisches Dickschichtkleben im Schienenfahrzeugbau," p. 14, 2002.
- [51] R. Q. Rodriguez, W. P. Paiva, P. Sollero, E. L. Albuquerque, and M. B. Rodrigues,
 "Analytical and numerical tools for bonded joint analysis," *MecÃinica Computacional*, vol. 29, no. 76, pp. 7557–7569, 2010.
- [52] J. M. M. Dionísio, L. D. C. Ramalho, I. J. Sánchez-Arce, R. D. S. G. Campilho, and J. Belinha, "Fracture mechanics approach to stress singularity in adhesive joints," *Int J Fract*, vol. 232, no. 1, pp. 77–91, 2021, doi: 10.1007/s10704-021-00594-z.
- [53] T.-H. Kim, J.-H. Kweon, and J.-H. Choi, "An Experimental Study on the Effect of Overlap Length on the Failure of Composite-to-Aluminum Single-Lap Bonded Joints," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 27, no. 10, pp. 1071–1081, 2008, doi: 10.1177/0731684407087074.
- [54] J. Wiedemann, *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*, 3rd ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.
- [55] P. Dobrzański and W. Oleksiak, "Design and Analysis Methods for Composite Bonded Joints," *Transactions on Aerospace Research*, vol. 2021, no. 1, pp. 45–63, 2021, doi: 10.2478/tar-2021-0004.
- [56] B. Esp, Practical analysis of aircraft composites. Irving, TX: Grand Oak Publishing, 2017.
 [Online]. Available: http://web.archive.org/web/20180105155109/http://
 www.espcomposites.com/book/sample.html
- [57] L. J. Hart-Smith, "Adhesive-bonded double-lap joints," NASA contract report, 1973.
- [58] G. C. Sih, P. C. Paris, and G. R. Irwin, "On cracks in rectilinearly anisotropic bodies," *Int J Fract*, vol. 1, no. 3, pp. 189–203, 1965, doi: 10.1007/BF00186854.
- [59] E. F. Rybicki and M. F. Kanninen, "A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 9, no. 4, pp. 931–938, 1977, doi: 10.1016/0013-7944(77)90013-3.
- [60] D. S. Dugdale, "Yielding of steel sheets containing slits," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 8, no. 2, pp. 100–104, 1960, doi: 10.1016/0022-5096(60)90013-2.

- [61] G. I. Barenblatt, "The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture," in Advances in Applied Mechanics, Advances in Applied Mechanics Volume 7: Elsevier, 1962, pp. 55–129.
- [62] P. C. Paris and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Journal of Basic Engineering*, vol. 85, pp. 528–533, 1963.
- [63] S. Klysz, G. Gmurczyk, and J. Lisiecki, "Investigations of Some Properties of Material Samples Taken from the Aircraft Withdrawn from Service," *Fatigue of Aircraft Structures*, vol. 2010, no. 2, 2010, doi: 10.2478/v10164-010-0025-7.
- [64] A. Abou Jaoude, "Analytic and linear prognostic model for a vehicle suspension system subject to fatigue," Systems Science & Control Engineering, vol. 3, no. 1, pp. 81–98, 2015, doi: 10.1080/21642583.2014.987359.
- [65] IFAM Bremen, "KLEBSTOFFE EINLEITUNG: DVS®/EWF EUROPEAN ADHESIVE ENGINEER – EAE (KLEBFACHINGENIEUR)," 2014.
- [66] Henkel, "LOCTITE EA 9394," [Online]. Available: https://www.henkel-adhesives.com/us/ en/product/industrial-adhesives/loctite_ea_9394.html
- [67] Henkel, "LOCTITE EA 9695," [Online]. Available: https://www.henkel-adhesives.com/us/ en/product/industrial-adhesives/loctite_ea_9695.html
- [68] X. Shang, E. Marques, J. Machado, R. Carbas, D. Jiang, and L. Da Silva, "Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends," *Composites Part B: Engineering*, vol. 177, p. 107363, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107363.
- [69] J. Kupski and S. Teixeira de Freitas, "Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures," *Composite Structures*, vol. 268, p. 113923, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113923.
- [70] M. J. Schollerer, J. Kosmann, O. Völkerink, D. Holzhüter, and C. Hühne, "Surface toughening – a concept to decrease stress peaks in bonded joints," *The Journal of Adhesion*, vol. 95, 5-7, pp. 495–514, 2019, doi: 10.1080/00218464.2018.1555041.
- [71] L. Da F M Silva and R. D Adams, "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 27, no. 3, pp. 227–235, 2007, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2006.04.001.
- [72] R. Haghani, M. Al-Emrani, and R. Kliger, "Stress Distribution in Adhesive Joints with Tapered Laminates — Effect of Tapering Length and Material Properties," *Journal of Composite Materials*, vol. 44, no. 3, pp. 287–302, 2010, doi: 10.1177/0021998309345320.
- [73] E. M. Moya-Sanz, I. Ivañez, and S. K. Garcia-Castillo, "Effect of the geometry in the strength of single-lap adhesive joints of composite laminates under uniaxial tensile load," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 72, pp. 23–29, 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.10.009.

- [74] R. D. Adams and J. A. Harris, "The influence of local geometry on the strength of adhesive joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 7, no. 2, pp. 69–80, 1987.
- [75] X. Zhao, R. D. Adams, and L. F. Da Silva, "Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 25, no. 8, pp. 819–836, 2011.
- [76] X. Zhao, R. D. Adams, and L. F. Da Silva, "Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 25, no. 8, pp. 837–856, 2011.
- [77] T. P. Lang and P. K. Mallick, "Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 18, no. 3, pp. 167–177, 1998, doi: 10.1016/S0143-7496(97)00056-0.
- [78] A. D. Crocombe and R. D. Adams, "Influence of the Spew Fillet and other Parameters on the Stress Distribution in the Single Lap Joint," *The Journal of Adhesion*, vol. 13, no. 2, pp. 141–155, 1981, doi: 10.1080/00218468108073182.
- [79] Z. Y. Wang, L. Wang, W. Guo, H. Deng, J. W. Tong, and F. Aymerich, "An investigation on strain/stress distribution around the overlap end of laminated composite single-lap joints," *Composite Structures*, vol. 89, no. 4, pp. 589–595, 2009, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.11.002.
- [80] L. F. Da Silva and M. J. C. Lopes, "Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, no. 5, pp. 509–514, 2009, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2008.09.009.
- [81] Ö. Öz and H. Özer, "An experimental investigation on the failure loads of the mono and biadhesive joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 31, 19-20, pp. 2251–2270, 2017, doi: 10.1080/01694243.2016.1264661.
- [82] H. Özer and Ö. Öz, "The use of the exponential Drucker-Prager material model for defining the failure loads of the mono and bi-adhesive joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 76, pp. 17–29, 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.02.005.
- [83] Coleman R., Ed., Variable-adhesive bonded joints(Stresses in ordinary lap joint compared to variable adhesive joint), 1966.
- [84] E. Sancaktar and S. Kumar, "Selective use of rubber toughening to optimize lap-joint strength," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 14, no. 10, pp. 1265–1296, 2000, doi: 10.1163/156856100742195.
- [85] R. Bagheri and R. A. Pearson, "Role of particle cavitation in rubber-toughened epoxies: II. Inter-particle distance," *Polymer*, vol. 41, no. 1, pp. 269–276, 2000, doi: 10.1016/S0032-3861(99)00126-3.
- [86] S. Khalili, A. Shokuhfar, S. D. Hoseini, M. Bidkhori, S. Khalili, and R. K. Mittal, "Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap joints for composite structures subjected to mechanical loads," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 28, no. 8, pp. 436–444, 2008, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2008.04.009.

- [87] R. B. Ladani, S. Wu, A. J. Kinloch, K. Ghorbani, A. P. Mouritz, and C. H. Wang, "Enhancing fatigue resistance and damage characterisation in adhesively-bonded composite joints by carbon nanofibres," *Composites Science and Technology*, vol. 149, pp. 116–126, 2017, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.06.018.
- [88] G. Kelly, "Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints," *Composite Structures*, vol. 69, no. 1, pp. 35–43, 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.04.016.
- [89] W. S. Chan and S. Vedhagiri, "Analysis of Composite Bonded/Bolted Joints Used in Repairing," *Journal of Composite Materials*, vol. 35, no. 12, pp. 1045–1061, 2001, doi: 10.1177/002199801772662325.
- [90] A. Pirondi and F. Moroni, "Clinch-Bonded and Rivet-Bonded Hybrid Joints: Application of Damage Models for Simulation of Forming and Failure," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 23, pp. 1547–1574, 2009.
- [91] J. M. Liu and T. Sawa, "Stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints combined with rivets under external bending moments," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 15, pp. 43–61, 2001.
- [92] A. T. Nguyen, M. Brandt, S. Feih, and A. C. Orifici, "Pin pull-out behaviour for hybrid metal-composite joints with integrated reinforcements," *Composite Structures*, vol. 155, pp. 160–172, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.047.
- [93] A. T. Nguyen, C. K. Amarasinghe, M. Brandt, S. Feih, and A. C. Orifici, "Loading, support and geometry effects for pin-reinforced hybrid metal-composite joints," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 98, pp. 192–206, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.03.019.
- [94] M. Li, P. Chen, B. Kong, T. Peng, Z. Yao, and X. Qiu, "Influences of thickness ratios of flange and skin of composite T-joints on the reinforcement effect of Z-pin," *Composites Part B: Engineering*, vol. 97, pp. 216–225, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.05.007.
- [95] Ravindran A.R. et al., "Improvements to the structural properties of bonded composite joints using z-pins," 17th Australian International Aerospace Congress, 2017.
- [96] M. Kühn, "Experimental Investigations of Adhesivly Bonded Joints of Fiber-Rinforced Plastics with Crack-Constraining Design Features: Diplomarbit, Technische Universität Braunschweig," 2013.
- [97] T. Löbel, B. Kolesnikov, S. Scheffler, A. Stahl, and C. Hühne, "Enhanced tensile strength of composite joints by using staple-like pins: Working principles and experimental validation," *Composite Structures*, vol. 106, pp. 453–460, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.06.020.
- [98] T. Löbel, "The Hybrid bondline: a novel disbond-stopping design for adhesively bonded composite joints," Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, 2016.
- [99] Lulea University of Technology, *Researcher warns of health risks with carbon nanotubes*.
 [Online]. Available: www.sciencedaily.com/releases/2011/01/110118092134.htm (accessed: Jan. 25 2022).
- [100] S. Y. Nof, Ed., *Springer Handbook of Automation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [101] H. O'Folan and P. B. Zieve, "Magnetic Safety Base for Automated Riveting and Bolting," in *SAE Technical Paper Series*, 2016.
- [102] B. Sarh, J. Buttrick, C. Munk, and R. Bossi, "Aircraft Manufacturing and Assembly," in *Springer Handbook of Automation*, S. Y. Nof, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 893–910.
- [103] E. N. ISO, "527-4. Plastics-Determination of tensile properties-Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites," *International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland*, 1997.
- [104] Hexcel, *HexPly® 8552: Product Data Sheet*. Epoxy matrix (180°C/365°F curing matrix).
 [Online]. Available: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_8552_eu_DataSheet.pdf (accessed: Feb. 12 2022).
- [105] T. A. Sebaey, E. V. González, C. S. Lopes, N. Blanco, P. Maimí, and J. Costa, "Damage resistance and damage tolerance of dispersed CFRP laminates: Effect of the mismatch angle between plies," *Composite Structures*, vol. 101, pp. 255–264, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.01.026.
- [106] Steffen Helmut Sowka and Martin Schollerer, "Experimentelle Untersuchungen von festigkeitssteigernden Maßnahmen an Überlappungsklebungen mit Filmklebstoffen," Hochschule Hamm-Lippstadt, 2018. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/121764/
- [107] F. C. Campbell, Manufacturing technology for aerospace structural materials, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. [Online]. Available: https://search.ebscohost.com/login.aspx? direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=166937
- [108] J. Slota, A. Kubit, T. Trzepieciński, B. Krasowski, and J. Varga, "Ultimate Load-Carrying Ability of Rib-Stiffened 2024-T3 and 7075-T6 Aluminium Alloy Panels under Axial Compression," *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 14, no. 5, 2021, doi: 10.3390/ma14051176.
- [109] BIKAR-METALLE GmbH, "Datenblätter Aluminium: World of Metals," [Online]. Available: https://www.bikar.com/fileadmin/download/Datenblaetter-ALUMINIUM.pdf
- [110] AMCO, "Technisches Datenblatt EN AW-5754 (AlMg3)," [Online]. Available: https:// amco-metall.de/fileadmin/downloads/Datenblaetter/Datenblatt__AMCO_5754.pdf
- [111] Deutsche Edelstahlwerke, "Chromium-nickel austenitic stainless steel: Member of Swiss Steel Group," [Online]. Available: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dewstahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/Datenblatt_4301_ UK_.pdf

- [112] Nierolen, "Datenblatt Edelstahl V2A 1.4301," [Online]. Available: https:// www.nierolen.de/files/nierolen/downloads/wandschutz-edelstahl-datenblatt.pdf
- [113] O. Völkerink, J. Kosmann, M. J. Schollerer, D. Holzhüter, and C. Hühne, "Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with the eXtended Finite Element Method," *The Journal of Adhesion*, vol. 95, 5-7, pp. 474–494, 2019, doi: 10.1080/00218464.2018.1553120.
- [114] Martin Schollerer and Dirk Holzhüter, "Experimentelle Untersuchung der Spannungsverteilung in geklebten lagenvariablen Schäftverbindungen," 2016. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/106339/
- [115] Martin Schollerer, Steffen Niemann, Thomas Gesell, Sarah Froese, and Michael Hanke, "Surface Toughening – Ein kleiner Streifen mit großem Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit von geklebten Primärstrukturen im Projekt HAP," 2021.
- [116] Steffen Niemann, Thomas Gesell, Martin Schollerer, Sarah Froese, Dirk Röstermundt, and Michael Hanke, *ADHESIVELY BONDED JOINTS OF THE PRIMARY STRUCTURE WITHIN THE HAP PROJECT*: Zenodo, 2021.
- [117] A. Kyriazis, K. Asali, M. Sinapius, K. Rager, and A. Dietzel, "Adhesion of Multifunctional Substrates for Integrated Cure Monitoring Film Sensors to Carbon Fiber Reinforced Polymers," J. Compos. Sci., vol. 4, no. 3, p. 138, 2020, doi: 10.3390/jcs4030138.
- [118] A. Kyriazis, J. Feder, K. Rager, C. von der Heide, A. Dietzel, and M. Sinapius, "Reducing the Weakening Effect in Fibre-Reinforced Polymers Caused by Integrated Film Sensors," J. *Compos. Sci.*, vol. 5, no. 10, p. 256, 2021, doi: 10.3390/jcs5100256.
- [119] E. Arikan, J. Holtmannspötter, T. Hofmann, and H.-J. Gudladt, "Vacuum-UV of polyetheretherketone (PEEK) as a surface pre-treatment for structural adhesive bonding," *The Journal of Adhesion*, vol. 96, no. 10, pp. 917–944, 2020, doi: 10.1080/00218464.2018.1545646.
- [120] Ensinger, KYNAR® 740 PVDF natural: Polyvinylidene fluoride (PVDF). [Online]. Available: https://www.ensingerplastics.com/en-us/shapes/products/kynar-740-pvdf-natural (accessed: Mar. 3 2022).
- [121] LITE GmbH, *Produkteigenschaften*. [Online]. Available: https://www.litefilms.com/ produkteigenschaften (accessed: Mar. 3 2022).
- [122] Amsler & Frey AG, *PA6 Technisches Datenblatt*. [Online]. Available: https://www.amsler-frey.ch/resources/td_pa6.pdf (accessed: Mar. 3 2022).
- [123] 3D Plastic, *Technische Information Palyamid (PA)*. [Online]. Available: http://www.3d-plastic.eu/shop_3d-plastic/images/PA_standard.pdf (accessed: Mar. 3 2022).
- [124] M. H. Alaaeddin, S. M. Sapuan, M. Zuhri, E. Zainudin, and F. M. AL-Oqla, "Polyvinyl fluoride (PVF); Its Properties, Applications, and Manufacturing Prospects," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 538, no. 1, p. 12010, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/538/1/012010.

- [125] M. Benz and W. B. Euler, "Determination of the crystalline phases of poly(vinylidene fluoride) under different preparation conditions using differential scanning calorimetry and infrared spectroscopy," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 89, no. 4, pp. 1093–1100, 2003, doi: 10.1002/app.12267.
- [126] A. J. Lovinger, "Annealing of poly(vinylidene fluoride) and formation of a fifth phase," *Macromolecules*, vol. 15, no. 1, pp. 40–44, 1982, doi: 10.1021/MA00229A008.
- [127] K. Sakaoku and A. Peterlin, "Poly(vinylidene fluoride) single crystals," *Journal of Macromolecular Science, Part B*, vol. 1, no. 2, pp. 401–406, 1967, doi: 10.1080/00222346708212784.
- [128] J.-F. Huang *et al.*, "Enhancement of polar phases in PVDF by forming PVDF/SiC nanowire composite," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 6, pp. 3612–3619, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.006120.
- [129] LITE GmbH, *LITE TK (PEEK): teilkristaline, thermoplastische Folie, hohe Kristalinität.* [Online]. Available: https://www.litefilms.com/lite-tk (accessed: Mar. 11 2022).
- [130] Ilona kallage, "Bewertung des Belastungs- und Verformungsverhaltens ausgewählter PEEK-Compounds für zahnärztliche Anwendungen: zur Erlangung des akademischen Grades Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)," https://refubium.fu-berlin.de/ bitstream/handle/fub188/11348/Diss_Ilona_Kallage.pdf?sequence=1 (accessed: 11.93.2022).
- [131] J. Szusta and A. Seweryn, "Experimental study of the low-cycle fatigue life under multiaxial loading of aluminum alloy EN AW-2024-T3 at elevated temperatures," *International Journal of Fatigue*, vol. 96, pp. 28–42, 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.11.009.
- [132] D. Zuk, G. Hajdukiewicz, and N. Abramczyk, "SIMULATION TESTS OF STATIC TENSILE TESTING OF THE AW 5083 ALLOY," INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IJMET), vol. 12, no. 4, 2021, doi: 10.34218/IJMET.12.4.2021.003.
- [133] P. SOLFRONK, J. SOBOTKA, P. DOUBEK, and L. ZUZÁNEK, "THE COMPUTATIONAL MODEL INFLUENCE ON THE NUMERICAL SIMULATION ACCURACY FOR FORMING ALLOY EN AW 5754,"
- [134] S. V. Sajadifar, P. Krooß, H. Fröck, B. Milkereit, O. Kessler, and T. Niendorf, "Effects of Aging under Stress on Mechanical Properties and Microstructure of EN AW 7075 Alloy," *Metals*, vol. 11, no. 7, p. 1142, 2021, doi: 10.3390/met11071142.
- [135] X.-Q. Wang, Z. Tao, T.-Y. Song, and L.-H. Han, "Stress–strain model of austenitic stainless steel after exposure to elevated temperatures," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 99, pp. 129–139, 2014, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.04.020.
- [136] L. Laiarinandrasana, J. Besson, M. Lafarge, and G. Hochstetter, "Temperature dependent mechanical behaviour of PVDF: Experiments and numerical modelling," *International Journal of Plasticity*, vol. 25, no. 7, pp. 1301–1324, 2009, doi: 10.1016/j.ijplas.2008.09.008.

- [137] J. R. Sarasua, P. M. Remiro, and J. Pouyet, "The mechanical behaviour of PEEK short fibre composites," *Journal of Materials Science*, vol. 30, no. 13, pp. 3501–3508, 1995, doi: 10.1007/BF00349901.
- [138] Airbus, A350: Less Weight. Less Fuel. More Sustainable. [Online]. Available: https:// aircraft.airbus.com/en/aircraft/a350/a350-less-weight-less-fuel-more-sustainable (accessed: Mar. 23 2022).
- [139] Michael Bräuninger, Sebastian Döll, André Nolte, Eckhardt Wohlers, Zukunftsperspektiven der Luftfahrtindustrie - Chancen und Risiken für das Zukunftsperspektiven der Luftfahrtindustrie - Chancen und Risiken für das Luftfahrtcluster in der Metropolregion Hamburg. [Online]. Available: https://www.hwwi.org/fileadmin/hwwi/Leistungen/ Gutachten/Studie-zur-Luftfahrtindustrie-in-Hamburg.pdf
- [140] Charlotte Ryan, Airbus Weighs Further Delay in A350 Ramp-Up on Russia War, Qatar Legal Fight. [Online]. Available: https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-04-04/airbusweighs-further-delay-in-a350-ramp-up-due-to-russia-qatar (accessed: Apr. 5 2022).
- [141] C. Krombholz, F. Kruse, and M. Wiedemann, "GroFi: Large-scale fiber placement research facility," *JLSRF*, vol. 2, 2016, doi: 10.17815/jlsrf-2-93.
- [142] DIN EN 13887:2003-11, Strukturklebstoffe_- Leitlinien für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben; Deutsche Fassung EN_13887:2003, Berlin.
- [143] Y. Wu *et al.,* "Effect of laser ablation surface treatment on performance of adhesivebonded aluminum alloys," *Surface and Coatings Technology*, vol. 304, pp. 340–347, 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.051.
- [144] N. Encinas *et al.*, "Surface modification of aircraft used composites for adhesive bonding," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 50, pp. 157–163, 2014, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.01.004.
- [145] A. Schutze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, J. Park, G. S. Selwyn, and R. F. Hicks, "The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 26, no. 6, pp. 1685–1694, 1998, doi: 10.1109/27.747887.
- [146] M. J. Walzak *et al.*, "UV and ozone treatment of polypropylene and poly(ethylene terephthalate)," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 9, no. 9, pp. 1229–1248, 1995, doi: 10.1163/156856195X01012.
- [147] H. Shi, J. Sinke, and R. Benedictus, "Surface modification of PEEK by UV irradiation for direct co-curing with carbon fibre reinforced epoxy prepregs," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 73, pp. 51–57, 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.07.017.
- [148] USHIO, Excimer Irradiation Solutions: For Laboratory & Industrial Applications. [Online]. Available: https://www.ushio.com/files/specifications/excijet-excimer-irradiationsolutions.pdf (accessed: Apr. 19 2022).

- [149] K. M. Niehage and M. Schollerer, "Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Umweltbedingungen auf zähmodifizierte Klebverbindungen bei Faserverbundwerkstoffen," 2021. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/142655/
- [150] Esmat Jawad, "172nm Excimer-Strahlung: zur Reinigung und Aktivierung von Kunststoffen, Glas und Metallen," Oct. 2019.
- [151] N. G. Gonzalez-Canche, E. A. Flores-Johnson, P. Cortes, and J. G. Carrillo, "Evaluation of surface treatments on 5052-H32 aluminum alloy for enhancing the interfacial adhesion of thermoplastic-based fiber metal laminates," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 82, pp. 90–99, 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2018.01.003.
- [152] R. Rechner, I. Jansen, and E. Beyer, "Influence on the strength and aging resistance of aluminium joints by laser pre-treatment and surface modification," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 30, no. 7, pp. 595–601, 2010, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2010.05.009.
- S. Y. Park, W. J. Choi, H. S. Choi, H. Kwon, and S. H. Kim, "Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995– 2008)," *The Journal of Adhesion*, vol. 86, no. 2, pp. 192–221, 2010, doi: 10.1080/00218460903418345.
- [154] L. G. Stringer, "Effect of a room temperature sodium dichromate/sulphuric acid etching pretreatment on the durability of aluminium alloy bonded joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 1, no. 5, pp. 228–232, 1981, doi: 10.1016/0143-7496(81)90070-1.
- [155] Z. Feng, Y. Liu, G. E. Thompson, and P. Skeldon, "Sol–gel coatings for corrosion protection of 1050 aluminium alloy," *Electrochimica Acta*, vol. 55, no. 10, pp. 3518–3527, 2010, doi: 10.1016/j.electacta.2010.01.074.
- [156] W. Li, L. Sang, X. Jian, and J. Wang, "Influence of sanding and plasma treatment on shear bond strength of 3D-printed PEI, PEEK and PEEK/CF," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 100, p. 102614, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102614.
- [157] F. Klimmeck and O. Völkerink, "Charakterisierung der kritischen Energiefreisetzungsraten eines Filmklebstoffs für Luftfahrtanwendungen unter Mode-I, Mode-II sowie Mixed-Mode Belastung," Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2021. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/143805/
- [158] F. Klimmeck and M. Schollerer, "Untersuchungen von Surface Toughening auf die Verbindungsfestigkeit geklebter Proben unter reiner Mode-I und Mode-II Belastung," 2022. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/188111/
- [159] M. Schollerer and D. Holzhüter, "Experimentelle Untersuchung der Spannungsverteilung in geklebten lagenvariablen Schäftverbindungen," 2016. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/106339/
- [160] B. Leichen and M. Schollerer, "Experimentelle Untersuchung von festigkeitsteigernden Maßnahmen aus der Literatur an Überlappungsklebungen mit Filmklebstoffen," 2019. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/128347/

- [161] O. Völkerink, "Simulation-driven design of bonded joints in fibre composite aircraft structures using progressive damage analyses," Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2022.
- [162] DIN EN 2823:2017-07, Luft- und Raumfahrt_- Faserverstärkte Kunststoffe_- Ermittlung des Einflusses der Auslagerung in feuchtem Klima auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften; Deutsche und Englische Fassung EN_2823:2017, Berlin.
- [163] König GmbH Kunststoffprodukte, "Technisches Datenblatt PEEK -Polyetheretherketon," 2016.
- [164] König GmbH Kunststoffprodukte, "Technisches Datenblatt PVDF -Polyvinyldienfluorid," 2015.
- [165] B. Klein, Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung ; mit Tabellen sowie umfangreichen Übungsaufgaben zu allen Kapiteln des Lehrbuchs, 8th ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [166] M. J. Schollerer, J. Kosmann, D. Holzhüter, C. Bello-Larroche, and C. Hühne, "Surface toughening – An industrial approach to increase the robustness of pure adhesive joints with film adhesives," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 234, no. 13, pp. 1980–1987, 2020, doi: 10.1177/0954410020950071.
- [167] Solvay, "TECHNICAL DATA SHEET FM® 94: FILM ADHESIVE," [Online]. Available: https://www.solvay.com/en/downloadDocument?fileId=T5Ys1QUt0LzpF9jjLy&fileName= FM%2094_CM_EN&base=FAST
- [168] Hexcel, "HexFlow® RTM 6: 180°C mono-component epoxy system for Resin Transfer Moulding and Infusion technologies Product Data," Publication ITA 065g (January 2016), 2016.
- [169] H. Quan and R. Alderliesten, "On the effect of plastic model on simulation of adhesive bonded joints with FM94," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 110, p. 102916, 2021, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102916.
- [170] F. Kreißig and S. Niemann, "Untersuchung des Einflusses von Surface Toughening auf die Verbindungsfestigkeit einer Holm-Holm-Verklebung," TU Braunschweig, 2022. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/188350/
- [171] A. L. Johanning-Solís and B. A. Stradi-Granados, "Comparison of sodium naphthenate and air-ionization corona discharge as surface treatments for the ethylenetetrafluoroethylene polymer (ETFE) to improve adhesion between ETFE and acrylonitrilebutadiene-styrene polymer (ABS) in the presence of a cyanoacrylate adhesive (CAA)," *Mater. Res. Express*, vol. 1, no. 3, p. 35036, 2014, doi: 10.1088/2053-1591/1/3/035036.
- [172] Z. Ji, Y. Zhao, M. Zhang, X. Li, and H. Li, "Surface Modification of ETFE Membrane and PTFE Membrane by Atmospheric DBD Plasma," *Membranes*, vol. 12, no. 5, 2022, doi: 10.3390/membranes12050510.

- [173] I. Mathieson and R. H. Bradley, "Improved adhesion to polymers by UV/ozone surface oxidation," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 16, no. 1, pp. 29–31, 1996, doi: 10.1016/0143-7496(96)88482-X.
- [174] C. von der Heide, J. Steinmetz, M. J. Schollerer, C. Hühne, M. Sinapius, and A. Dietzel, "Smart Inlays for Simultaneous Crack Sensing and Arrest in Multifunctional Bondlines of Composites," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 21, no. 11, 2021, doi: 10.3390/s21113852.
- [175] C. von der Heide *et al.,* "Polyetherimide-Reinforced Smart Inlays for Bondline Surveillance in Composites," *Polymers,* vol. 14, no. 18, 2022, doi: 10.3390/polym14183816.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Ziel: Vom genieteten zum geklebten Flugzeug......1 Abbildung 1-2: Grafische Gliederung der Arbeit......4 Abbildung 2-1: Links: Stark beschädigte Aloha Boeing 737 nach der Landung in Kahului 1988, Rechts: Detailaufnahme der abgerissenen Haut [6]......6 Abbildung 2-2: Links: Einreihige kaltverklebte Verbindungsstelle, Versagen durch schlechte Klebstoffanhaftung und anschließender Mikrorisswachstum, daneben: Verbesserung der Verbindung durch heißaushärtenden Klebstoff und Versteifung der Verbindung, wodurch die Last homogener auf die Nietreihen übertragen wird. Rechts: Mikrorisswachstum bis zum Abbildung 2-3: Aufteilung der Bauvorschriften in CS 23 [9] und CS 25 [10].....7 Abbildung 2-4: Verschiedene Möglichkeiten zum Nachweis der Festigkeit einer hergestellten Klebverbindung für die Zulassung an Flugzeugen nach CS 25......10 Abbildung 2-5: Darstellung von Schadensgröße und Festigkeit der Klebverbindung unter verschiedenen Konstruktionsphilosophien von Safe Live (SL), Fail Save (FS) und Damage Tolerance (DT) in Anlehnung an [13] adaptiert auf eine Klebverbindung11 Abbildung 2-6: Unterschied zwischen Fail Safe und Maximum Disbond Design. Links: Bei geschädigtem Fail Safe Design muss zweiter Lastpfad die Last übernehmen. Rechts: Bei Maximum Disbond Design stoppen Rissstopper den Riss definiert in der Klebschicht und die ungeschädigte Klebverbindung überträgt weiter die Lasten......12 Abbildung 2-8: Adhäsions- und Kohäsionskräfte in einer Klebschicht nach [16, 17]......13 Abbildung 2-9: Verlauf der Klebfestigkeit über die Oberflächenrauheit für eine strukturelle Klebschichtdicke um 0,05 mm nach [14, 16]......14 Abbildung 2-10: Benetzung der Oberfläche nach [16]15 Abbildung 2-11: Verlauf der Klebfestigkeit über die Klebschichtdicke nach [14]15 Abbildung 2-12: Defekte in einer Klebschicht durch Fertigung, Alterung oder Überbeanspruchung nach [21].....16 Abbildung 2-15: Belastungsmoden und ihre Bezeichnung, Mode 1 als Öffnungsmodus, Mode II als in-Ebenen-Schubmodus und Mode III beschreibt das Zerreißen aus der Ebene19 Abbildung 2-16: Beispiele der Versagensarten von Klebschicht und Fügepartner nach [16] und Abbildung 2-17: Vereinfachte Darstellung der Schubspannungsverteilung an einer einschnittigen Überlappungsklebung nach [16].....20 Abbildung 2-18: Vergleich von Versuch und numerischer Simulation einer gebrochenen Abbildung 2-21: Vergleich von Volkersen und Gorland und Reissner Spannungsverläufen in

Abbildung 2-22: Darstellung von Spannungsverläufen einer Überlappungsklebung mit variierender Überlappungslänge
Abbildung 2-23: Ergebnisse einer experimentellen Studie von Kweon et al. [53] zur Festigkeit
einer CFK/Aluminiumüberlappungsverklebung mit variierender Überlappungslänge27
Abbildung 2-24: Schubspannungsverläufe von Verbindungen mit verschiedenen
Fügeteildicken
Abbildung 2-25: Schälspannungsverläufe von Verbindungen mit verschiedenen Fügeteildicken
Abbildung 2-26: Schubspannungsverläufe einer Überlappungsklebverbindung nach [54]29
Abbildung 2-27: Darstellung des optimalen Designraums für die Dickenauslegung der
Abbildung 2 28 Drei Bareiche des Bissuschetung Derstellung mit Baris laur [64]
Abbildung 2-26: Diel Bereiche des Kisswachstunns, Darsteilung nitt Fans law [64]
aingefrerener Film Produktdarstellung von Henkel Lectite FA9394 [66] und FA9695 [67]
Abbildung 3-1. Im Kapital behandelte Modifikationen zur Spannungsreduktion von
Klebverbindungen
Abbildung 3-2. Verschiedene lokale Fügeteilmodifikationen [68] 36
Abbildung 3-3: Verschiedene Klebstoffausläufe [77] 37
Abbildung 3-4: Gradierte Klebschicht nach Coleman [83], der Klebstoff wird mit aufsteigender
Zahl steifer
Abbildung 3-5: Verschiedene Verbolzungskonzepte [71]
Abbildung 3-6: Fertigung der Hybrid Bondline
Abbildung 4-1: Konzept der lokalen Oberflächmodifikation an einer einschnittigen
Überlappungsklebung
Abbildung 4-2: Konzept der lokalen Oberflächenzähmodifikation als Rissstopp mit Federn als
Einzelsteifigkeit
Abbildung 4-3: Federmodell der lokalen Oberflächenzähmodifikation, stark idealisiert
Abbildung 4-4: Qualitative Änderung der Schubspannung durch die lokale
Oberflächenzähmodifikation
Abbildung 4-5: Grafische Darstellung der Konzepte von lokaler Oberflächenmodifikation
(oben) und hybrid Bondline (unten)
Abbildung 4-6: Gestoppter Kiss unmittelbar am Beginn der Thermoplaststreifen im Klebstoff
einer dynamisch belasteten CLS Probe mit DSF der Hybrid Bondline, angepasst aus [98]
Abbildung 5-1: Nachweispyramide zur Strukturzulassung in der Luftrahrt [13], die schwarze
Abbildung 5.2: Aushärtezuklus des Propress HeyPly® 8552/IM7 von Heycel in dieser Arbeit
angelehpt an [104]
Abbildung 5-3 • Laminatzugprobe mit Lagenaufbau aus Tabelle 5-4 58
Abbildung 5-4: Aushärtezyklus des Filmklehstoffes Hysol FA9695 050NW Aero
Abbildung 5-5: Strukturformel von PVDF nach [124]
Abbildung 5-6: Strukturformel von PEEK nach [130]
Abbildung 5-7: Idealisierter, qualitativer Vergleich der Steifigkeiten der verwendeten
Fügepartner bis 2 % Dehnung. Verläufe angepasst aus [131] für ENAW 2024, [132] für ENAW
5083, [133] für ENAW 5754, [134] für ENAW 7075 und [135] für 1.4301
Abbildung 5-8: Idealisierter, qualitativer Vergleich der Steifigkeiten der verwendeten
Klebstoffe und Materialien zur Oberflächenzähmodifikation bis 4 % Dehnung. Verläufe
angepasst aus [136] für PVDF und [137] für PEEK
200

Abbildung 6-1: Links: Unbehandelte Aluminiumoberfläche, rechts: geschliffene Oberfläche mit
P350 Schleifpapier jeweils mit wassertropfen zur Kontaktwinkelbestimmung
Abbildung 6-2: Gestrahlte Aluminiumoberflache mit F220 Strahlmittel mit Wassertropfen zur
Kontaktwinkelbestimmung
Abbildung 6-3: Detailaufnahme aus Abbildung 6-2, a) helle Punkte sind
Strahlmittelrückstände, welche nicht abgespült werden können, b) besonders im Windschatten
von lokalen Vertestigungen im Metall sammeln sich die Partikel, kein gleichmäßiger Abtrag69
Abbildung 6-4: Vergleich der vorbehandelten Obertlächen mittels Laserreinigungsanlage mit
Tropten zur Kontaktwinkelbestimmung
Abbildung 6-5: Vergleich der Oberflächenvorbehandlungen von Metallen
Abbildung 6-6: Mikroskopaufnahme der vorbehandelten Aluminiumoberflächen
Abbildung 6-7: DCB Prüfung von Aluminiumsubstrat (Referenz)
Abbildung 6-8: Ergebnisse der DCB Versuche zur Metallvorbehandlung mit Versagensart nach
Abbildung 2-16
Abbildung 6-9: Vergleich der Oberflächenvorbehandlungen von Kunststoffen; nur der
Benetzungstest zeigt Unterschiede
Abbildung 6-10: Vergleich der Oberflächenvorbehandlungen an Faserverbund
Abbildung 6-11: Ergebnisse der DCB Versuche zur Faserverbundvorbehandlung mit
Versagensart nach Abbildung 2-16
Abbildung 6-12: Vergleich der Oberflächenvorbehandlungen von PVDF und PEEK
Abbildung 6-13: Ergebnisse der Kopfzugprobenversuche mittels Prüfzentrifuge mit
Versagensart nach Abbildung 2-16
Abbildung 6-14: Fertigungsschritte der lokalen Oberflächenzähmodifikation im
Prepregverfahren
Abbildung 6-15: Vakuumaufbau zum Aushärten des Prepreglaminates
Abbildung 6-16: Links: Aufgelegte PVDF Streifen als zähmodifizierendes Material, rechts:
ausgehärtetes Laminat mit fest verbundenen PVDF Streifen
Abbildung 6-17: Mikroskopieaufnahme des Ubergangs zwischen Faserverbund und PVDF, 50x
mit LSM, Wärmeausdehnung führt nach dem Abkühlen zu einer deutlichen Lücke
Abbildung 6-18: Schliffbildaufnahme des Übergangs von Laminat zu PVDF, links: 0°-
Interfacelage und rechts: 90°-Interfacelage
Abbildung 6-19: Fertigungsschritte der lokalen Oberflächenzähmodifikation im
Prepregverfahren
Abbildung 6-20: Applikation des Thermoplaststreifens auf Aluminium, links: gefräste Nut,
rechts: aufgeklebte PVDF Streifen mit Laservorbehandlung
Abbildung 6-21: Vakuumaufbau zum Aushärten des Klebstoffes einer SLS-Probe
Abbildung 7-1: Überblick auf die in Kapitel 7 getesteten Proben samt Hintergrund
Abbildung 7-2: Probenkonfiguration zur Untersuchung des Einflusses von lokaler
Oberflächenzähmodifikation auf das Laminat
Abbildung 7-3: Bruchverhalten der getesteten Laminatproben, Probennummer 1 steht
stellvertretend für die jeweilige Serie90
Abbildung 7-4: Bruchkraft der Laminatzugproben
Abbildung 7-5: Modellverhalten von DCB Proben mit und ohne ST
Abbildung 7-6: Geometrie der getesteten DCB Probe, gefertigt mit und ohne PVDF Streifen94
Abbildung 7-7: Verlauf von Kraft und Traversenweg zweier DCB-Proben mit und ohne
Zähmodifikation, A, A': Beginn stationärer Risswachstum, B: Riss stoppt an Zähmodifikation,

C: Riss schießt instationär durch zähmodifizierten Bereich, D: Ende des instationären
Risswachstums
Abbildung 7-8: Bruchbilder der DCB-Proben mit und ohne Zähmodifikation, A, A': Beginn
stationärer Risswachstum, B: Riss stoppt an Zähmodifikation, C: Riss schießt instationär durch
zähmodifizierten Bereich, D: Ende des instationären Risswachstums
Abbildung 7-9: Verlauf der Energiefreisetzungsrate über die Risslänge der DCB-Probe mit und
ohne ST-Streifen
Abbildung 7-10: Modellverhalten von ENF-Proben mit und ohne ST
Abbildung 7-11: Geometrie der getesteten ENF Probe, gefertigt mit und ohne PVDF Streifen99
Abbildung 7-12: Verlauf von Kraft und Traversenweg zweier ENF-Proben mit und ohne
Zähmodifikation, A, A': Beginn stationärer Risswachstum, B: Riss stoppt an Zähmodifikation,
B': Riss ist bis zur Mitte der Probe durchgelaufen
Abbildung 7-13: Seitlicher Blick auf die belasteten ENF Proben, a) Probe mit lokaler
Zähmodifikation zeigt den Rissstopp b) Probe ohne Zähmodifikation zeigt ein Risswachstum
durch die ganze Klebschicht101
Abbildung 7-14: Modellverhalten von SLS-Proben mit und ohne ST103
Abbildung 7-15: Geometrie der SLS-Probe in Anlehnung an ASTM 5868104
Abbildung 7-16: Versuchsaufbau der SLS-Prüfungen
Abbildung 7-17: Variation der lokalen Oberflächenzähmodifikation in der SLS-Probe105
Abbildung 7-18: Verbindungsfestigkeit der Überlappungsklebungen mit Variation der lokalen
Oberflächenzähmodifikation
Abbildung 7-19: Qualitative Dehnungsauswertung nach von Mieses in DIC Aufnahme
unmittelbar vor Bruch der Verbindung und entsprechendes Bruchbild der Probe – Surface
Toughening
Abbildung 7-20: Verschiedene Geometrieanpassungen aus dem Stand der Technik108
Abbildung 7-21: Detailaufnahme der verschiedenen gefertigten Überlappungsränder109
Abbildung 7-22: Verbindungsfestigkeit der Überlappungsklebungen mit verschiedenen
Konzepten der Literatur zur Festigkeitssteigerung110
Abbildung 7-23: Qualitative Dehnungsauswertung nach von Mieses in DIC-Aufnahme
unmittelbar vor Bruch der Verbindung und entsprechendes Bruchbild der Probe – Stand der
Technik
Abbildung 7-24: Variation des zähmodifizierenden Materials der SLS-Probe
Abbildung 7-25: Federmodell - Verläufe der Gesamtfedersteifigkeiten am Überlappungsrand
über die halbe Klebschichtdicke
Abbildung 7-26: Verbindungsfestigkeit der Überlappungsklebungen mit verschiedenen
zähmodifizierenden Materialien114
Abbildung 7-27: Modifiziertes Federmodell - Verläufe der Gesamtfedersteifigkeiten am
Überlappungsrand über die halbe Klebschichtdicke mit Anpassung der Fügeteilsteifigkeit 115
Abbildung 7-28: Variation des Klebstoffes zur Eigenspannungsreduktion, Filmklebstoff EA9695
härtet bei 130 °C aus, pastöser Klebstoff EA9394 härtet bei Raumtemperatur aus117
Abbildung 7-29: Verbindungsfestigkeit von warm- und kaltaushärtenden Klebstoffsystemen
mit und ohne ST117
Abbildung 7-30: ST_10 mit warm- und kalt aushärtendem Klebstoff unmittelbar vor und nach
Bruch bei ca. 25700 N
Abbildung 7-31: Variation der Überlappungslänge119
Abbildung 7-32: Verbindungsfestigkeit und Bruchkraft verschiedener Überlappungslängen mit
und ohne ST

Abbildung 7-33: Bruchbilder der Referenz und ST_10 Proben mit Überlappungslängen von	
15 mm, 25 mm und 35 mm, Probennummer 4 jeder Serie	121
Abbildung 7-34: Gewichtseinsparung der lokalen Oberflächenzähmodifikation	
Regressionskurven mit quadratischem Ansatz	122
Abbildung 7-35: Variation des Fügepartnermaterials auf Metalle, ENAW 5754 ist ein duktile	es
Aluminium, ENAW 7075 ist ein hochfestes Aluminium, V2A ist Edelstahl	123
Abbildung 7-36: Verbindungsfestigkeit der Überlappungsklebungen mit verschiedenen	
metallischen Substraten	124
Abbildung 7-37: Traversenweg über Kraft der Prüfmaschine aller Metallproben	124
Abbildung 7-38: Verbesserte Geometrie der ENAW 7075 Probe mit	
Oberflächenzähmodifikation	126
Abbildung 7-39: Verbindungsfestigkeit von ST in der Klebschicht	127
Abbildung 7-40: Geometrie der getesteten CLS-Probe	129
Abbildung 7-41: Rissfortschrittsmessung der Probe ST_01 3000 µm m ⁻¹ bei 1M Zyklen	130
Abbildung 7-42: Risslänge über Lastzyklenzahl bei 3000 µm m ⁻¹	131
Abbildung 7-43: Risslänge über Lastzyklenzahl bei 3500 µm m ⁻¹	132
Abbildung 7-44: Risslänge über Lastzyklenzahl bei 4000 µm m ⁻¹	133
Abbildung 7-45: Geometrie der getesteten CLS-Probe zur Restfestigkeitsuntersuchung	134
Abbildung 7-46: Verlauf von Bruchkraft über den Traversenweg der	
Restfestigkeitsuntersuchung von Probennummer 1	135
Abbildung 7-47: Bruchkraft der getesteten CLS-Probe zur Restfestigkeitsuntersuchung	135
Abbildung 7-48: a) Geometrie der FEM-Studie, b) Randbedingungen der FEM-Studie, c)	
Vernetzung der FEM-Studie	137
Abbildung 7-49: Schubspannungsverläufe der Mittelknoten der Klebschicht aus der FEM	138
Abbildung 7-50: Schälspannungsverläufe der Mittelknoten der Klebschicht aus der FEM	139
Abbildung 7-51: Schubspannungsverläufe der Mittelknoten der Klebschicht aus der FEM vo	on
verschiedenen Spannungsreduzierungstechniken aus Kapitel 3	140
Abbildung 7-52: Schälspannungsverläufe der Mittelknoten der Klebschicht aus der FEM vo	'n
verschiedenen Spannungsreduzierungstechniken aus Kapitel 3	141
Abbildung 7-53: Abweichung der Randspannungskonzentrationen zur Referenz	141
Abbildung 8-1: Verbindungsfestigkeiten der ausgelagerten Proben	145
Abbildung 8-2: Vereisung einer SLS-Probe bei -55 °C in der Klimakammer	147
Abbildung 8-3: Verbindungsfestigkeiten der Proben unter verschiedener Prüftemperatur	147
Abbildung 8-4: DMA von PVDF und EA9695	148
Abbildung 8-5: DMA von PVDF, ETFE und EA9695. In Grün die gesuchte Materialkurve ein	nes
möglichen ST-Werkstoffs für Luftfahrtanwendungen.	151
Abbildung 9-1: Nachweisarten einer Leichtbaustruktur nach Klein [165]	153
Abbildung 9-2: Positionierung der lokalen Oberflächenzähmodifikation in einer einfachen	
Überlappungsklebung	154
Abbildung 9-3: Kombination Fügepartner 8552/IM7 mit Klebstoff EA9695 und	
Oberflächenzähmodifikation PVDF bei 23 °C	155
Abbildung 9-4: Kombination Fügepartner 8552/IM7 mit Klebstoff EA9695 und	
Oberflächenzähmodifikation PEEK bei 23 °C	155
Abbildung 9-5: Grafischer Ablauf der Applikation von lokaler Oberflächen-zähmodifikation	n in
die Prepregfertigung. Fett gedruckt sind die Zusätze durch ST	157
Abbildung 10-1: Strukturaufbau der HLFC Leading Edge (LE) im Projekt HLFC on HTP	159
Abbildung 10-2: Temperaturdifferenzen als Belastung der LE-Struktur	160

Abbildung 10-3: Verformungsuntersuchung eines flachen Kleindemonstrators zur	
Verifizierung der FEM, oben: 3D Messung mit GOM ATOS unten: Simulation der linearen Fl	ΕM
	161
Abbildung 10-4 : Ansicht der Klebstoffschubspannungen belastet durch $\Delta T = 107K$.161
Abbildung 10-5: Applikation der lokalen Oberflächenzähmodifikation in den Randbereich	.162
Abbildung 10-6: Fügepartner G0926 mit RTM 6 und Klebstoff FM94K und	
Oberflächenzähmodifikation PVDF bei 23 °C	162
Abbildung 10-7: Applikation der lokalen Oberflächenzähmodifikation in den Randbereich	
führt zur deutlichen Senkung der randnahen Spannungskonzentrationen	.163
Abbildung 10-8: Fertigungsabschnitte im Infusionsverfahren der CFK-Struktur mit lokaler	
Oberflächenzähmodifikation	.164
Abbildung 10-9: Technischer Kleindemonstrator und Designdemonstrator aus der	
Untersuchungsstudie nach Verklebung mit Titanblech	164
Abbildung 10-10: Applikationsbereiche für die Oberflächenzähmodifikation in Grün eingefä	irbt
	.165
Abbildung 10-11: Applikation und Aushärtungsergebnis am 2 m Demonstrator	.165
Abbildung 10-12: DLR HAP stratosphärentaugliches Höhenflugzeug	.166
Abbildung 10-13: Flügelbauweise des DLR HAP	.166
Abbildung 10-14: Belastung der geschäfteten Rohrholmtrennstelle aufgrund des	
Biegemomentes durch den Flügel. Spannungskonzentrationen auf Zugseite nach [116]	167
Abbildung 10-15: Kombination Fügepartner M21E mit Klebstoff EA9394 und	
Oberflächenzähmodifikation PVDF bei 23 °C	168
Abbildung 10-16: Spannungsreduktion der Trennstelle, berechnet durch FEM nach [116]	.169
Abbildung 10-17: Fertigung des Laminats mit Zähmodifikation auf der Wickelanlage	170
Abbildung 10-18: Die in Kreißig [170] untersuchten Couponproben	.171
Abbildung 10-19: Ergebnisse der Couponprobenversuche zur lokalen	
Oberflächenzähmodifikation an Schäftverbindungen nach Kreißig [170]	.172
Abbildung 10-20: Ergebnisse der Elementproben	.172
Abbildung 10-21: Klappenkörper mit Aufnahmepunkten für Aktuatoren	.173
Abbildung 10-22: Kombination Fügepartner 8552/IM7 mit Klebstoff EA9394 und	
Oberflächenzähmodifikation PVDF bei 23 °C	.174
Abbildung 10-23: Formwerkzeug und Klappenkörper der beiden Fertigungsbauweisen	.174
Abbildung 10-24: Abweichung der Ist-Geometrie zur gewünschten Soll-Geometrie (CAD)	.175
Abbildung 11-1: Applikation der sensierten Klebschicht auf CFK	.181
Abbildung 11-2: Handdemonstrator zeigt Dehnungssignalunterschied im Sensor	.181
Abbildung 11-3: "Entenfüße" als klebgerechtes Stringerdesign könnten durch lokale	
Oberflächenzähmodifikation deutlich vereinfacht werden	.182
Abbildung 11-4: Design einer geklebten CFK-Patchreparatur	.183
Abbildung A-1: Verformung der Metallproben nach der Prüfung aus Kapitel 7.4.8	I
Abbildung A-2: CLS-Probe mit Rissstopper nur im belasteten Strap	I
Abbildung A-3: Position aller zähmodifizierten Bereiche der Rohrprobenverbindungen nach	1
Kreißig [170]	II
Abbildung B-1: Materialwerte SLS Versuche 1/9	III
Abbildung B-2: Materialwerte SLS Versuche 2/9	. IV
Abbildung B-3: Materialwerte SLS Versuche 3/9	V
Abbildung B-4: Materialwerte SLS Versuche 4/9	. VI
Abbildung B-5: Materialwerte SLS Versuche 5/9	VII

Abbildung B-6: Materialwerte SLS Versuche 6/9VIII
Abbildung B-7: Materialwerte SLS Versuche 7/9IX
Abbildung B-8: Materialwerte SLS Versuche 8/9X
Abbildung B-9: Materialwerte SLS Versuche 9/9XI
Abbildung C-1: Anhaftungsversuche zur Epoxidmatrix des Faserverbundwerkstoffes mit
verschiedenen PVDF MaterialienXII
Abbildung C-2: Quantitativer Dehnungsverlauf nach v. Mises von Referenz und ST_10 PVDF
(2018) Probe aus Kapitel 7.4.3
Abbildung C-3: Quantitativer Dehnungsverlauf von \mathcal{E}_y von ST_10 PVDF (2018) Probe XIII
Abbildung C-4: Vergleich von Referenz- und ST_10 Probe. Der Scherwinkel gibt Aufschluss
über die SchubverteilungXIV
Abbildung C-5: Modifiziertes Federmodell - Verläufe der Gesamtfedersteifigkeiten am
Überlappungsrand über die halbe Klebschichtdicke mit Anpassung der Fügeteilsteifigkeit und
Nachweis über PEI und K72XV
Abbildung C-6: Modifiziertes Federmodell - Verläufe der Gesamtfedersteifigkeiten am
Überlappungsrand über die halbe Klebschichtdicke mit Anpassung der Fügeteilsteifigkeit und
NachweisXVI
Abbildung C-7: Einfluss der Gesamtfedersteifigkeiten auf die
VerbindungsfestigkeitssteigerungXVII
Abbildung C-8: Kraft-Dehnungsdiagramm mit ermittelten Elastizitätsmodulen der ST_10
Proben mit Zähmodifikation zwischen zwei Klebschichten aus Kapitel 7.4.9XVIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile von Bolzen- und Klebverbindungen, in Fett sind die Vor- und
Nachteile einer Kombination von beiden Verbindungen dargestellt, wie sie derzeit eingesetzt
wird. Mehr Nachteile als Vorteile
Tabelle 2-2: Analytische Auslegungsverfahren chronologisch geordnet
Tabelle 2-3: Einteilung der Klebstoffe in verschiedene Anwendungsbereiche nach [14]32
Tabelle 3-1: Vergleich der spannungsreduzierenden Konzepte und Bewertung der
Rissstoppfähigkeit
Tabelle 5-1: In dieser Arbeit verwendete Probekörper mit Belastung
Tabelle 5-2: Materialkennwerte der UD-Lage
Tabelle 5-3: Festigkeitswerte der UD-Lage 57
Tabelle 5-4: Laminataufbau dieser Arbeit
Tabelle 5-5: Festigkeitswerte für das verwendete Laminat aus Tabelle 5-458
Tabelle 5-6: Materialwerte der verwendeten Aluminiumlegierungen aus der Literatur nach
[109] und [110]
Tabelle 5-7: Materialwerte des verwendeten Edelstahls aus der Literatur nach [111] und [112] 59
Tabelle 5-8: Materialwerte des verwendeten Filmklebstoffes ertestet bzw. aus der Literatur (1)
nach [98] und (2) nach [114] bei Raumtemperatur60
Tabelle 5-9: Elastizitätsmodul des Klebstoffes EA9695 mittels DMA bei verschiedenen
Temperaturen
Tabelle 5-10: Materialwerte des verwendeten pastösen Klebstoffsystems ertestet bzw. aus der
Literatur (1) nach [66] bei Raumtemperatur
Tabelle 5-11: Materialwerte von möglichen Thermoplasten bei Raumtemperatur aus der
Literatur (1) nach [98], (2) nach [120] (3) nach [121], (4) nach [122], (5) nach [123]62
Tabelle 5-12: Vergleich der beiden PVDF-Materialien aus DSC, DMA sowie deren Kosten63
Tabelle 5-13: Materialwerte aus DSC und DMA sowie die Kosten
Tabelle 6-1: Parameter der verwendeten Laserreinigungsanlage CC117070
Tabelle 6-2: Verwendete Vorbehandlungsparameter des Lasers aus Abbildung 6-470
Tabelle 6-3: Parameter zur Vorbehandlung mittels Lasertreat Atmosphärendruckplasma
Anlage
Tabelle 6-4: Parameter zur Vorbehandlung mittels VUV-Anlage
Tabelle 6-5: Ablauf der Vorbehandlungsverfahren mit Prozesszeit (ohne Vor- und Nacharbeit)72
Tabelle 7-1: Versuchsergebnisse der Laminatzugproben, Mittelwertdarstellung
Tabelle 7-2: Überblick des Probenprogramms der SLS-Versuche
Tabelle 7-3: Versuchsergebnisse der Überlappungsverklebungen mit Variation der lokalen
Oberflächenzähmodifikation
Tabelle 7-4: Versuchsergebnisse der Überlappungsklebungen mit verschiedenen Konzepten der
Literatur zur Festigkeitssteigerung
Tabelle 7-5: Federmodell - Gesamtfedersteifigkeiten bezogen auf die Klebschichtmittellinie im
Bereich der Zähmodifikation
Tabelle 7-6: Versuchsergebnisse der Überlappungsklebungen mit verschiedenen
zähmodifizierenden Materialien

Tabelle 7-7: Modifiziertes Federmodell - Gesamtfedersteifigkeiten bezogen auf die
Klebschichtmittellinie im Bereich der Zähmodifikation mit Anpassung der Fügeteilsteifigkeit
Tabelle 7-8: Versuchsergebnisse von warm- und kaltaushärtenden Klebstoffsystemen mit und
ohne ST
Tabelle 7-9: Versuchsergebnisse verschiedener Überlappungslängen mit und ohne ST
Tabelle 7-10: Versuchsergebnisse der Überlappungsverklebungen mit verschiedenen
metallischen Substraten125
Tabelle 7-11: Versuchsergebnisse der Überlappungsverklebungen mit ST in der Klebschicht.127
Tabelle 7-12: Kraftniveau der dynamischen Prüfungen
Tabelle 7-13: Versuchsergebnisse zur CLS-Restfestigkeit
Tabelle 7-14: Materialwerte für die lineare FEM 137
Tabelle 7-15: Spannungskonzentrationen am Rand von ST und Referenz
Tabelle 8-1: Steifigkeitsverhältnis der Proben nach dem modifizierten Federmodell149
Tabelle 8-2: Materialeigenschaften von TPU im Vergleich zu PVDF laut Hersteller 152
Tabelle C-1: Modifiziertes Federmodell - Gesamtfedersteifigkeiten bezogen auf die
Klebschichtmittellinie im Bereich der Zähmodifikation mit Anpassung der FügeteilsteifigkeitXV
Tabelle C-2: Versuchsergebnisse der Überlappungsklebungen mit verschiedenen
zähmodifizierenden Materialien zum Nachweis des modifizierten FedermodellsXVI

Anhang

A. Abbildungen



Abbildung A-1: Verformung der Metallproben nach der Prüfung aus Kapitel 7.4.8

Zu sehen ist der Unterschied in der Verformung des Fügepartners nach der Zugprüfung zwischen duktilen und sprödem Metallwerkstoff der SLS-Proben.



Abbildung A-2: CLS-Probe mit Rissstopper nur im belasteten Strap

Untersuchungen zum Rissstopp zeigen, dass die Rissstoppwirkung bereits bei der Applikation des PVDF Streifens in den belastet Strap der Probe besteht. Somit ist die Positioniergenauigkeit bei der Überlappung deutlich entschärft.



Abbildung A-3: Position aller zähmodifizierten Bereiche der Rohrprobenverbindungen nach Kreißig [170]

B. Berichte und Protokolle

Aufgeführt sind die Probenvermessungen und Werte der Materialprüfung aller SLS Proben.

_

		Besonderheit																									det.					def.				
	DMS	El,max	Ð			4309					4148				3897					4376					6366					8220					6236	
	Ŧ	ъ	[MPa]			1,78					0,91				1,63					0,78					6,19				:	6,44					3,83	
	schich	Br,AV	/Pa] [6'0					21,6				20.7					22,7					5,0				ļ	ບັ					27,3	
	Kleb	4	Pa] [N	70	78	92	72	25	36	82	49	12	62	81	49	23	33	68	47	77	53	94	10	27	04 707	7 0	75	8 8	5 1	ñ	8	86	13	62	72 2	97 94
bniss	\square	ч	[W]	11	22	8 21	21	20,	20,	22	3 22	21,	22	19	5 20	18	22	22,	21	22	22	53	, 20	22	4 8. 33			r :	14	7 14 1	37,	23	25,	31,	31,	21, 25,
serge		S	[MPa			19,8					10,2				21.8					9,15					74,5					/4/3					45,6	
ersuch	minat	σ _{Br,AV}	MPa]			257,6					267,3				259,9					279,4					304,5					131,4					327,4	
Š	La	a a	[ed	2,7	6'0	8,	5,8	8,0	3,4	0,5	2,2	6,6	9.2	80	1 4	8,0	1,0	0,0	4,4	5,0	8,9	с, С	5,4	0,1	L, 0	1		ņ	ຕ໌	۰ 6	6'6	5,3	7,4	5,1	1,2	0,2 2,3
		đ	ž	22	28(26	26	25(253	28(27	259	28.	245	25	228	28:	28(26	28(278	56	24(27(368	0	216	ł	49	20	44	29(30	376	38:	26(312
		ň	Ξ			1191					679				883					434					3873					4055					2420	
	chkraf	BrAV	Ξ			2957					3347				2736					4286					5679					2326					7134	
	Brug			18	29	25 1	81	33	50	62	61 1	21	46	77	63 1	64	32	51	60	51 1	47	51	35	85	27 1	ţ.		c	47	47 2	69	94	12	8	31 1	77 48
		L ^e	Z	111	143	137	135	120	122	141	139	131	133	122	127	113	139	143	135	143	142	149	126	139	207	071	112	HT 7	258	261	231	149	158	199	199	137 162
	Bung	tsav	[mm]			0,15					0,07				0.07					0,08					0,15					C,15					0,14	
	erlap	ٽ	[mu	,13	,15	,19	,13	,13	,10	90'	90(),06 Dafi	60	05	02	02	114	11	90'	,05	90(101	60'	,18	,19	Ą	960	ۍ ۲	,14	,19	,19	153	,12	,13	,22	,14 ,09
L.	rie Üb			,10	6,9	1,0	1,0	30	8, 0	9,6	7,0	4, 6		90	8	5	,8 0,	9	4,),3 0	с С	,2 0	9	,1 0	ς α		2 4	Ú,	9,0	ε Ω	с С	,3 0,	1,0	,3 0	с С	9 6 6 7 0 0
atione	omet	×		1 628	2 628	3 626	8 625	6 594	7 601	7 620	7 620	3 621 7 620	7 59	8 619	5 622	6 623	2 623	632	9 631	6 630	2 632	5 623	9 628	7 628	5 627	070	5 625	000 /	3 629	2 629	9 626	7 628	6 629	3 629	1 628	7 626 4 626
nform	ů	- K	m	25,0	25,0	24,9	24,8	24,8	24,9	24,7	24,8	24,8	24.8	24.8	24,8	24,8	24,8	25,1	25,0	25,0	25,1	24,7	24,9	24,9	24,9	7 t 0	24,8	D, U	25,0	25,0	24,8	24,9	25,0	25,0	25,0	24,9 24,9
usatzi	inat	Aum	[mm ²]	49,91	51,01	51,25	51,09	47,98	48,33	50,48	50,37	50,49 49 87	46.40	49.35	50.23	49,85	49,58	51,25	51,28	51,16	51,08	50,88	51,28	51,78	51,85	C7'TC	51,16	00'TC	52,40	52,10	51,50	50,60	51,44	52,91	52,28	52,95 52,02
Z	e Lam	= p _x	Ē	,12	,14	,12	,13	,91	,10	,05	,96	07	73	6	90	08	,13	,21	,17	,16	,17	,18	,15	,16	,15	, t	19	Ę	,16	,15	,16	,16	,10	,14	,12	11 11
	metri	hund	<u>د</u>	25	25	25	25	23	24	25	24	25	33	24	55	25	25	25	25	25	25	52	25	25	25	3	52	3	55	25	25	25	25	25	25	25
	Geo	tum	mm	1,99	2,03	2,04	2,03	2,01	2,01	2,01	2,02	2,02 1 99	1.96	1 98	2,00	1,99	1,97	2,03	2,04	2,03	2,03	2,02	2,04	2,06	2,06	2,04	2,03	DO(7	2,08	2,07	2,05	2,01	2,05	2,10	2,08	2,11 2,07
	q)اCf=fein, g=gro	3	сı	m	ρû	ρû	÷	ρû	μņ	ρŵ	ш ч	- u) 0	0 54	n pri	-	m	μņ	μņ	σø	+	ρŵ	σø	ρû	. 00	+ 1	.Q	ω	σø	μņ	+	ρŵ	ρŵ	ρû	ω +
ы		SMG-0	_			×		_			×		\perp		×					×		\downarrow			×		\perp			×					×	
ifun		Prüftemp.			-	гя		_		-	гя		\downarrow		ΤЯ				-	ΤЯ		\downarrow		1	.8		\perp		1	В.					гя	
Pri		Kond.			_	гя					гя				ТЯ					τя				J	в.				Т	в.					ΓЯ	
		mutebfür9		8	τοτ	.70	0.0.	t	8	τοΖ	.70).et	8	зтo	2.7	0.6	τ	8	τοΖ		'6T		81	SOS	٢٥.	5T		81	:0Z.	۷٥	.61	;	8	τοτ	.70	'6T
		Νι.		Ч	2	ო	4	S	Ч	2	ო	4 v	n –	6	i m	4	S	Ч	2	ო	4	Ś	4	2	ო	t	ω 4	4	5	m	4	S	4	2	ო	4 v
		ameN																																		
						Referenz_2018					halbes Dreieck				Bogen					Fase					ST_5										ST_17,5	

Abbildung B-1: Materialwerte SLS Versuche 1/9

		Besonderheit																																				
	DMS	ELmax	Ξ			3970																																
	ŧ	ъ	[MPa]			3,14					1 50						101	17'7					1 42	4					217						1 50	2		
	bschid	TBr.AV	[MPa]			22,0					5 5 5 5	0,11					2 4 6	24°0					000	1,01					17.8	2					17 4			
isse	Kle	r,	[MPa]	23,05	16,49	21,14	25,73	23,82	20,36	22,10	23,23	24,02	23,85	20,03	22,20	25,23	25,15	25,34	25,78	23,99	19,79	20,62	18,18	19,84	19,78	22,90	16,18	17,09	22,25	15,68	17,31	18,53	14,75	19,41	18,77	17,57	16,87	16,85
sergebr		S	[MPa]			36,47					10 51	10,01					1 0 0 1	14,0/					16 7 R	2.04					77 20						18 46	2		
/ersuch	aminat	σ _{Br,AV}	[MPa]			257,8					2112	0,414					0 2 0 0	0,122					045.0	1					161	4/244					2008	0,004		
1	Ľ	D Lam.Br	MPa]	273,6	192,2	246,6	295,9	280,5	248,1	268,4	283,3	293,0	291,0	244,3	266,9	304,9	304,3	305,7	310,4	290,0	240,7	250,3	222,1	241,2	239,0	7,775	196,3	207,0	269,2	191,3	210,1	222,8	177,4	234,8	226,4	213,4	204,0	202,9
		ů,	[N]			1968					 	200					20	200					846	2					267	Ì					032	2		-
	chkraft	FBLAN	[N]			13892					2042	0					6100	OFICI					2569						1156 1						2980			
	Bru	u, ⁱⁿ	[N]	14793	10392	13274	16116	4883	12807	13828	4527	15031	14934	12533	13692	15557	15535	5632	15946	14827	12260	12840	1427	12397	12276	4214	10131	10668	13662	9856	10907	1715	9225	12153	11716	0901	10600	10594
	Bur	trav	[mm]			0,11					, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	24,5					1	, T / T / D					1,1,1	1		-			1810						;;	1		-
	erlappu	Ť.] [mm	0,05	0,08	0,16 (0,12	0,12	0,05	0,11	0,20	0,22	0,16	0,05	0,12	0,18	0,23	0,24	0,18	0,08	0,12	0,17	0,12	0303	0,14	0,12	0,10	0,18	0,22	0,24	0,22	0,12	0,03	0,14	0,16	0,15	0,12	0,06
en	trie Übe	¥		541,9 (530,1 (527,8 (526,3 (524,9 (529,0 (525,6 (525,5 (525,9 (526,1 (525,7 (516,8 (516,7 (517,7 (516,8 (518,7 (518,0 (519,4 (522,8 (528,7 (524,9 (520,6 (520,6 (526,3 (524,2 (514,0 (528,4 (530,1 (532,3 (525,5 (526,0 (524,2 (520,3 (528,4 (528,7 (
ormation	Geome	7	[mm]	25,51 6	25,06 6	24,97	24,91 6	24,83 6	25,10 6	25,01 6	25,01 6	25,01 6	25,01 6	25,00 6	24,97 6	25,02 6	25,01 6	24,97 6	25,05 6	25,02 6	25,03 6	25,01 6	25,05 6	25,00 6	24,97 6	24,97 6	25,00 6	24,95 6	24,80 6	25,01 6	25,00 6	25,01 6	25,02 6	25,04 6	24,97 6	24,89 6	25,04 6	25,05 6
satzinfo	inat	Aum	[mm ²]	54,06	54,07	53,83	54,46	53,06	51,63	51,53	51,27	51,30	51,32	51,31	51,30	51,03	51,05	51,13	51,38	51,13	50,94	51,29	51,46	51,40	51,36	51,19	51,60	51,54	50,76	51,52	51,91	52,58	52,00	51,75	51,75	51,09	51,96	52,21
Zu	rie Lami	um = b _K	[mm]	25,16	25,14	25,14	25,14	25,17	25,06	25,01	25,01	25,03	25,04	25,03	24,70	24,65	24,70	24,70	24,70	24,70	24,75	24,90	25,10	25,00	24,85	24,85	25,05	25,02	24,76	25,13	25,20	25,28	25,00	25,00	25,00	24,92	25,10	25,10
	Geomet	Liam D	[mm]	2,15	2,15	2,14	2,17	2,11	5,06	5,06	2,05	2,05	2,05	2,05	2,08	2,07	2,07	2,07	2,08	2,07	5,06	5,06	2,05	5,06	2,07	00	5,06	5,06	2,05	2,05	5,06	08	2,08	2,07	2,07	2,05	2,07	08
_	q	اCf=fein, g=gro	a	EQ EQ	50	ью С	50		50	00	<u>ью</u>	50	-		-																	-						_
ы		SMG-°0				×						×																								×		
üfun		Prüftemp.			J	L۶					Т	Ы					T	Я					ΤĮ	A					ΤĮ	ł					Τ	ł		
4		Kond.			J	L۶					Т	Ы					T	Я					ΤĮ	ł					ΤĮ	ł					Τ	ł		
		mutebłün9		8	τοΖ	.70	0.61	:		12	0Z.9	20'9	sτ			τz	0Z.	Z 0.	sτ			720)Z.2	20.5	īτ			720)Z.S	20.3	sτ			121	02.20	:0.5	īτ	
		Nr.		ч	2	ო	4	ŝ	Ч	2	m	4	S	9	7	2	m	4	Ś	9	Ч	2	m	4	Ś	٥	Ч	2	m	4	S	٥	Ч	2	m	4	Ś	9
		ameN				ST_30					Referenz 2021						CT 5 FAG605						ST 5 PEEK						ST 10 PEEK						ST 30 PEEK			

Abbildung B-2: Materialwerte SLS Versuche 2/9

		Besonderheit																																			
	DMS	ε _{L,max}	Ξ																																		
	ŧ	ы	[MPa]			1,31					0,60					0.75	c/'n					3.13						062	20'0					0.73	2		
	ebschic	T _{Br,AV}	[MPa]			41,4					22,0					1 5 0	T'07					37.8						18.8	0'01					414	r, 4		
isse	Ř	τ _{ar}	[MPa]	39,68	41,84	42,23	41.14	39,97	21,94	22,92	22,24	21,52	21,20	22,17	22,70	24,17	23,53	23,54	22,19	30,91	39,16	38,98	39,48	39,98	38,34	18,61	19,21	19,74	17,94	18,18	19,09	40,90	41,92	40,80	40,69	41,49	42,73
sergebr		S	[MPa]			16,73					7,07					0.41	7,4 L					36.94						7 54	tn',					0 0 4			
/ersuch	aminat	σ _{Br,AV}	[MPa]			503,8					266,9					7070	1,512					459.1						2282	7'077					500.4	1.000		
ĺ	1	ס נומי, Br	[MPa]	483,5	508,1	515,4	499.2	485,4	267,6	278,2	269,6	261,8	257,5	269,3	274,3	295,3	285,2	284,3	269,8	377,2	477,2	473,9	478,0	482,2	465,9	227,3	233,3	239,9	217,5	220,6	230,8	492,1	505,1	492,9	492,7	499,8	520,0
	Π	ŝ	Z			797					361					196	001					1890			1			397	100					640	1		
	uchkraft	F _{Br,AV}	Z			25730					13827					11580	Noc+T					23531						11679	CINTT					75955			
	-E	u,	Z	24777	26074	26216	25503	24800	13881	14397	13967	13524	13368	14090	14422	15377	14799	14845	13950	19372	24457	24334	24490	24826	23705	11573	11938	12276	11131	11290	11865	25589	26266	25620	25485	26043	26729
	Bun	t _{KAV}	[mm]			0,15					0,12					a 1 0	01'0					0.16			1			35	r ? ?					0.47	È.		
	erlapp	ٽ ب	[mm]	0,10	0,19	0,21	0,12	60'0	0,08	0,12	0,15	0,15	0,11	60'0	0,15	0,23	0,24	0,20	0,07	60'0	0,15	0,23	0,24	0,20	0,07	0,34	0,32	0,38	0,38	0,32	0,35	0,38	0,45	0,53	0,54	0,50	0,40
en	trie Üb	¥	nm ²]	24,4	23,2	20,7	e'oz	20,4	32,6	28,0	28,0	28,3	30,7	35,4	35,3	36,1	29,0	30,6	28,7	26,8	24,6	24,3	20,3	20,9	18,3	21,8	21,5	21,9	20,5	20,9	21,4	25,6	26,5	27,9	26,4	27,6	25,5
rmation	Geomet	<u> </u>	[mm]	14,98 6	5,02 6	5,02 6	5.00 6	5,02 6	5,01 6	5,00 6	24,97 6	24,93 6	5,03 6	5,02 6	5,01 6	5,04 6	9 96 6	25,02 6	5,05 6	5,02 6	6,98 6	5,02 6	25,01 6	5,04 6	5,03 6	5,03 6	5,02 6	5,04 6	24,98 6	25,00 6	5,02 6	5,02 6	5,06 6	5,07 6	5,01 6	25,06 6	5,02 6
satzinfo	nat	Auam	mm ²	51,25 2	51,31 2	50,86	51.09	51,09	51,87 2	51,75 2	51,81	51,66 2	51,91 2	52,32 2	52,58 2	52,07	51,89 2	52,21 2	51,71 2	51,35 2	51,25 2	51,35	51,24 2	51,48	50,88 2	50,92 2	51,17	51,17	51,17 2	51,17	51,42 2	52,00 2	52,00 2	51,98 2	51,73 2	52,10 2	51,40 2
Zu	ie Lami	am = b _x	[mm]	5,00	4,91	4,81	4 80	4,80	5,30	5,12	5,15	5,20	5,20	5,40	5,40	5,40	5,20	5,20	5,10	5,05	5,00	4,95	4,80	4,80	4,70	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	5,00	5,00	5,05	5,05	5,05	5,00
	eometr	h h] [mi	05 2	06 2	05 2	06 2	06 2	05 2	06 2	06 2	05 2	06 2	06 2	07 2	05 2	06 2	07 2	06 2	05 2	05 2	06 2	07 2	08	06 2	05 2	06 2	06 2	06 2	06 2	07 2	08 2	08 2	08 2	07 2	08 2	06 2
	q	الCf=fein, g=gro	<u>۔</u> ۱	6	6	0,0	10	0	101	0	0	6	2	5	5	5	5	0	2	5	6	6	6	6	10	0	6	6	5	5	2	5	0	5	6	2	2
		SMG-0	-						\vdash														×		┥												_
fung		Prüftemp.				ΤЯ					ΤЯ					T	Я					Τf	I		1			ΤĮ	Я					Τį	H		
Prü		Kond.				ΤЯ			1	.ч. С°С	л%9 2/Ч	58 981	ε	%	58,	ч' 2°с/	יין 57/	498	3	%	58/	.ч. 2°s	л 2/Ч	98	ε			ΤĮ	Я					ΤĮ	H		
		mutebfür9			720	02.20)'ST		τ	202)'S1	;		72	0Z.9	Z0.	sτ			121	0Z.2	0'S	τ	1		720)Z'Z	20.8	sτ			121	0Z.20	20'9	sτ	
		Νr.		1	2	ŝ	t v	9	7	2	ŝ	4	5	1	2	ŝ	4	S	6	1	2	ŝ	4	S	٥	1	2	ω	4	S	9	7	2	ε	4	S	6
		ameN				ST_10_PVDF					Ref_wet336h					ST 10 DFFK Wet336h						ST 10 PVDF wet336h						Ref kalt						ST 10 PVDF kalt			

Abbildung B-3: Materialwerte SLS Versuche 3/9

		Besonderheit																																	
	DMS	ELmax	Ξ																																
	ţ	ň	[MPa]			2,68					1 68	2,4					1,68					141	1				2 6 R	20,4					0.75		
	bschich	T _{Br,AV}	[MPa]			18,1	,				34.7						34,7					18.9					75.0	0,04					14.5		
isse	Kle	ű.	[MPa]	18,01	18,61	16,39	16,22 23 50	15.63	36,26	37,26	35,09	32,74	33,89	32,86	36,26	37,26	35,09	33,89	32,86	18,50	21,72	18,03	18,13	17.53	23,84	23,29	23,33	26,90	30,67	27,20	13,34	15,00	14,64	14,88	13,79
ergebn		S	MPa]			33,48					0 80	12,22					20,82					7 11					80.03						8,96		
ersuchs	minat	0 _{Br,AV}	MPa] [222,2 3					17 6 3						127,6 2					34.1					0 0 0 2	, ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,					180.5		
ž	La	d Lam.Br	MPa] [221,2	228,6	201,3	200,0	0,101	147,6	159,4	131,6	t02,9	118,6	105,6	147,6	159,4	131,6 107 0	118.6	105,6	229,6	267,4	222,6	224,4	216.6	294,1	286,9	288,2	333,0 `	381,8	336,1	166,2	186,5	181,8	185,1	171,5
		vî.	[N]			1706				-	1011		-	1	-	-	1110		_			880					725	;					466		
	chkraft	F _{Br,AV}	Z			11406 1					1 080 1						21980					11875					16243 1	, DF 10 1					9138		
	Bru	ц, iii	N	11368	11778	10338	10237	9805	23080	23678	22115	20638	21510	20857	23080	23678	22115	01510	20857	11602	13606	11305	11354	11016	14937	14570	14624	16875	19336	17118	8395	9424	9197	9356	8678
	Bur	tkav	[mm]			0,13					010						0,10					0.15	<u></u>				10	2					0.16		
	erlappu	ř.	[mm]	0,08	0,10	0,12	0,15	0.14	0,07	0,08	0,11	0,10	0,14	0,10	0,07	0,08	0,11	014	0,10	0,07	0,15	0,18	0,18	0,14	60'0	0,15	0,18	0,18	0,21	0,13	0,06	0,16	0,19	0,19	0,19
en	trie Üb(¥	mm ²]	31,2	32,8	30,6	31,2	527.3	36,4	35,5	30,3	30,3	34,7	34,7	36,4	35,5	530,3 530,3	2,000	34,7	27,2	326,5	\$27,0	26,2	28.5	26,5	525,7	526,8	527,2	30,5	529,3	529,3	528,3	528,2	528,6	529,5 20,5
rmatior	Geome	_*] [mu	5,06	60'9	5,01	002	06't	5,23	5,21 6	5,11 6	5,11 6	5,19	5,19	5,23 6	5,21 6	5,11	101	5,19	96 (1,93 6	96't	06't		1,94	1,93 6	1,97 e	1,96 é	5,11 6	5,06 6	5,08	5,05	5,04	5,06 6	60'9
atzinfo	at	Ę	m ²] [n	.,39 25	,53 25	,37 25	17 2	34 24	,57 25	,54 25	,24 25	,22 2	.39 25	,43 25	,57 25	,54 25	,24 2	1 00	43 25	,52 24	,89 24	,78 24),59 24	87 2	,78 24	,78 24	,75 24	,68 24	,64 25	,93 25	,52 25	,54 25	,59 25),54 25	0,60 25
Zus	Lamin	=b _x A	m] [m	19 51	22 51	21 51	19 51 20 51	19 51	23 51	21 51	11 51	11 51	19 51	19 51	23 51	21 51	11 51	. c	19 51	13 50	13 50	12 50	15 50	14 50	12 50	10 50	10 50	13 50	11 50	11 50	09 50	08 50	03 50	08 50	60 20
	metrie	, meild	[m	25,	25,	22,	22	52°,	25,	25,	25,	25,	25,	25,	25,	25,	25,25	ι Γ	25,	25,	25,	25,	25,	25	25,	25,	25,	25,	25,	25,	25,	25,	25,(25,(25,0
	Geo	t t	[mm]	2,04	2,04	2,04	2,03	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	204	2,04	2,01	2,03	2,02	2,01	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,03	2,01	2,02	2,02	2,02	2,02
	q	Cf=fein, g=gro	DI			`	+-					4-					4																		
5		SMG-0																																	
üfur		Prüftemp.				ΤЯ					ΤĮ	ł					ΤЯ					2°C	Z-				2°C	Z-					2°C	S-	
P		Kond.		%5	8/3	. ۲۲. ۲۵۵۲	и /ЧО	00T	%9	8/	۲ [.] ،ی	.л 2/Ч	000	τ	%5	8/:	ر.ب. //عە	40	οτ			ΤĮ	I				ΤĮ	ł					Τ۶	1	
_		Prüfdatum			120	0.2.0	τ:sz	:	.	12	02.0	01.8	52	-		120	02.01	52		<u> </u>	72	02.0	τ.e	t 	<u> </u> .	121	02.0)T'6	5T			120	02.0	1.6	51
		ameN			(1	(1) ·	-1 U	. 0	F	(4	(1)	4	01	-		(1	a) 4		0	-	(4	(1)	4 1	. 0	17	64	(1)	4	un	0	-1	(4	(1)	4	un (
						Wet1000_Ref					Wet1000 ST10 PVDF						Wet1000_ST10_Peek					Ref -22°C	I				ST10 -22°C						Ref -55°C	ı	

Abbildung B-4: Materialwerte SLS Versuche 4/9

	L	Besonderheit																																					
	DMS	El,max	Ξ																																				
	Ħ	ъ́	[MPa]			1 29	~~~					3.43						1 00	0c'T					1 75	1					1 64	т,04					2.50			
	ebschic	TBr,AV	[MPa]			10 9	0,44					28.3						202	0,62					0 2 0	2 A					1 25	T'DC					21.1			
isse	KI	Ę	[MPa]	13,90	12,79	14,93	12,33	12,48	10,83	21,36	29,68	30,91	30,83	30,47	26,64	26,22	29,96	32,46	30,99	29,83	29,19	23,49	26,91	26,97	27,57	28,80	28,56	33,36	36,56	37,36	37,74	37,33	34,49	15,79	20,46	22,95	22,47	22,62	22,15
sergebr		S	[MPa]			16 51	+1,0+					42.08						77 87	70'77					13.75	1					17.60	00'71					40.99			
/ersuch	aminat	₫ _{Br,AV}	[MPa]			160 9	0,004					351.4						368.6	0,000					100 8	0					0 2 2 6	0'017					366.5			
[d Lam, Br	[MPa]	173,6	160,3	187,2	154,4	155,8	134,2	267,1	368,2	384,1	382,4	377,8	328,8	327,9	371,9	403,0	382,1	367,1	359,2	175,9	200,4	201,3	190,6	216,0	214,4	251,9	276,3	281,9	285,7	285,1	261,8	279,5	356,5	393,9	392,3	392,6	384,4
		ň	[N]			828	2					2129						1161	TOTT					697	5					123	TCD					2155			
	uchkraf	FBrAN	[N]			8179						17830						18775	C7/0T					10797						12057	/CECT					18664			
	Bri	F.	[N]	8845	8127	9517	7817	7920	6847	13544	18741	19501	19347	19123	16722	16616	18960	20419	19442	18625	18287	8883	10229	10237	10489	10968	10944	12847	14063	14371	14553	14511	13396	14081	18221	20353	19878	19940	CICVI
	Bu	t rav	[mm			11	44,					14	į					14	± 1					1	1					1	t t		_			0.13			-
	lappu	ٿر ل] [mu	01	,14	,15	,13	,13	,12	,07	,16	,19	,18	,18	8	,07	,13	,19	,14	,17	,14	,04	60'	,10	τį.	,16	,15	,05	,10	,22	,20	,17	,10	90(,12	,10	,18	,19	DI,
c.	rie Über	¥	nm²] [r	36,4 0	35,2 0	37,5 0	34,0 0	34,4 0	32,3 0	34,1 0	31,3 0	30,8 0	27,6 0	27,6 0	27,7 0	33,7 0	32,9 0	29,1 0	27,4 0	24,4 0	26,5 0	78,2 0	80,2 0	79,5 0	80,5 0	80,8	83,2 0	85,1 0	84,7 0	84,7 0	85,6 0	88,8 0	88,4 0	91,9 0	90,4 0	86,9 0	84,5 0	81,7 0	/ A, D U
ormatione	Geomet	<u>_×</u>	[mm] [r	25,33 6	25,27 6	25,37 6	25,25 6	25,25 6	25,15 6	25,2 6	25,08 6	25,06 6	24,95 6	24,94 6	24,93 6	25,18 6	25,14 6	25,00 6	24,95 6	24,80 6	24,90 6	15,05 3	15,12 3	15,1 3	15,15 3	15,15 3	15,25 3	0 15,34 385, 15,32 384, 7 15,32 384, 7 15,32 384, 15,32 384, 0 15,48 388, 15,45 388, 15,45 388,		15,45 3	35,50 8	35,45 8	35,30 8	35,20 8	35,10 8	5,UU a			
Isatzinfo	inat	Aum	[mm ²]	50,96	50,69	50,84	50,64	50,83	51,03	50,70	50,89	50,77	20,60	50,62	50,86	50,67	50,98	50,66	50,88	50,73	50,91	50,50	51,04	50,85	55,04	50,78	51,06	2,21 00,15,3 51,00 15,3 50,99 15,3 50,97 15,3 50,94 15,3 50,90 15,4 51 16,15,4		51,16	50,37	51,11	51,67	50,67	50,78	50'/DC			
Zr	trie Lam	am = b _k	[mm]	25,12	25,14	25,13	25,11	25,12	25,14	25,16	25,17	25,17	25,15	25,16	25,18	25,17	25,18	25,16	25,15	25,18	25,16	25,13	25,14	25,13	25,11	25,14	25,13	25,10	25,11	25,11	25,14	25,11	25,14	25,12	25,12	25,12	25,13	25,12 55,12	22,13
	Geome	t. P	[mm]	2,03	2,02	2,02	2,02	2,02	2,03	2,02	2,02	2,02	2,01	2,01	2,02	2,01	2,03	2,01	2,02	2,02	2,02	2,01	2,03	2,02	2,19	2,02	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,04	2,01	2,04	2,06	2,02	2,02	2,02
-	9	ا Cf=fein, g=gro	a						_												-						+										4-		-
ы		SMG-0																																					
rüfu		Prüftemp.				2°c	S-					0. _° C	8					Э°С	08					Т	4		\downarrow			Τ	A		_			Τ۶			
٩	⊢	Колд.	_		770	T5	H	E T	_		77	T5	1 T'0	17	_		77	T:	8 от:	07	_		77	T1	4 1	7	+		770	T).2.0	<u>В</u>	7	_		77	TF	 т.с	7	_
	\vdash	Nr.	_		121			51	\neg		10	02.0			+		10		01	02	-		10			IC.	+		101			30	_		10	52 0	1.2	ic.	_
				7	2	m	4	S	9	-	2	m	4	ŝ	9	7	2	m	4	S	9	-	2	ŝ	4	Ś	٥	5110 6			9	1	2	m	4	Ś	۵		
		əmeN				ST10 -55°C						Ref 80°C	1					ST10 80°C	222					15mm Ref	1		15mm_ST10						35mm Ref	1					

Abbildung B-5: Materialwerte SLS Versuche 5/9

		sonderheit	səg																																		
	DMS	ELmax	Ξ																																4417	!	
	Ħ	ഗ്	[MPa]			3,33						0,36						000	0,40					191	1					1,53					1,02		
	ebschic	T _{Br,AV}	[MPa]			42,1						11,8						0 0 0	0,21					141	-					19,9					24,2		
isse	Kle	ű,	[MPa]	34,72	43,26	43,79	44,29 42,46	43,85	11,08	11,73	12,03	11,69	12,20	12,14	11,66	12,29	11,74	11,85	12,02	12,21	12,19	20,45	22,71	25,36	25,18	25,55	20.21	22,30	20,39	20,37	18,18	17,73	22,40	25,73	24,29	24,41	24,82
sergebr		S	MPa			56,77						4,31						2 60	200,4					24.16	24		T			17,33					12,81		
ersuch	aminat	σ _{Br,AV}	MPal			733,3						158,0						1 5 5	n, n 1					2 99 5					1	247,7					300,4		
>	ŗ	σ _{Lam,Br}	[MPa]	608,7	752,4	764,8	739.0	760,1	149,2	158,0	160,6	157,1	162,8	162,4	156,3	159,1	151,3	153,5	155,2	157,0	157,1	253,7	280,7	315,1	313,9	317,2	751 2	275.6	253,1	254,2	228,9	223,4	277,1	320,2	301,1	302,9	305,1
		ŝ	Z			2986						209			1			1 1	r t					1217	ì		T			899					642		
	ıchkraft	F _{BrAV}	Ŋ			37472						7788						7627	700/					2005						12639					15284		
	Bru	u,	Ŋ	30894	38540	39025	39469 37829	39076	7347	7763	7891	7759	8008	8008	7742	7851	7446	7463	7544	7743	7743	12877	14307	15966	15882	16132	12775	14108	12939	12948	11660	11402	14136	16246	15325	15376	15643
	gun	t _{kav}	[mm			0,21						0,12			1			u 1	, t,					 67 0			Ť								0,26		
	erlapp	ř,	[mm]	64,0	0,14	0,20	0,18	0,17	0,08	0,10	0,14	0,17	0,13	11,0	6)	0,12	0,14	0,18	0,18	0,14	0,11	0,06	0,12	0,18	0,18	0,16		0.15	0,18	0,20	0,20	0,17	0,06	0,25	0,34	0.33	0,25
en	trie Übe	¥] [zmm	89,9	390,9	391,1	391,1 (391,0 (391,2	563,2 (562,0	555,8	563,6	556,5	0,920	563,8	539,0	534,5	530,0	527,4 (534,2 (535,4 (529,8 (530,0	529,7	530,8	531,4 (532.7	534,7	535,7	541,3 (542,9 (531,2	531,5 (530,9	530,0	530,3
ormation	Geomet	_*	[35,45	35,45 8	35,45 8	35,45 8 35,45 8	35,45 8	26,45 (26,4 (26,17	26,4	26,16 (26,29 (26,43 (25,51 (25,38 (25,52 (25,42 (25,35 (25,42 (25,02 (25,03 (25,04 (25,08 (25,1 (25.13 (25,20 (25,25 (25,50 (25,55 (25,1 (25,08 (25,06 (25,03	25,04 (
satzinfo	inat	A _{tam}	lzmm.	50,75	51,22	51,03	50,94 51,19	51,41	49,25	49,15	49,13	49,40	49,20	49,32	49,55	49,33	49,23	48,63	48,61	49,31	49,27	50,76	50,97	50,67	50,60	50,86	10,00	51.19	51,13	50,94	50,93	51,04	51,01	50,74	50,90	50,76	51,27
Zu	rie Lam	am = b _K	[uu	5,10	5,13	5,14	5,14	5,14	5,08	5,07	2,06	5,14	5,10	60,5	5,12	5,05	2,00	4,69	4,68	5,02	5,00	5,17	5,17	5,15	5,15	5,16		5 18	5,19	5,18	5,15	5,16	5,15	5,18	5,18	5,17	5,17
	Geomet	ې م		12	,04	03	0 0 0 0	02	,96	,96	96	76, 5	8 g	16	,97	,97	,97	,97	,97	,97	,97	,02	,03	,02	010	5 6	50	8	3	0	,03	,03	,03	,02	20,00	02	04
	q	=fein,g=gro	ے DICt=	- ~ ·	2	0	+	2	1	H	н . ,	+ +		-					+			2	2	2	4 7	~ ~	10	- 0	5	f 2	5	2	2	5	4	10	7
B		SMG-00	1					_																			t								>	:	
rüfu		rüftemp.	d			ТЯ					L	в.			4			Τ	4					TS	4		\downarrow		1	в.					ΤЯ		_
ā		Колд.	Ы	⊢	770	0.2C	т'с7		-	т.	L 707	<u>в.</u>	·c7		+	_	770	72.0 T1	<u>нт.</u> е	7	_		770	72.0 TF	<u>н.</u> с	7	+	T7	T	. <u>8</u> от	c7	_		T7(<u>тя</u>	'c7	
\square		Nr.	0		2	ი ო	4 M	9		2	m .	4 1	<u>, v</u>	۵	~	ч	201	<u>ო</u>	4	ι0 JC	9	-	2	<u>ო</u>	4	n u	╞	10	ო	4	5 C	9	-	2	<u>π</u> 4	- 10	9
		əmeN				35mm_ST10						ENAW5754_Ref						FNAW5754 ST10						Patch1 Ref	1					Patcn1_51					Patch2_Ref		

Abbildung B-6: Materialwerte SLS Versuche 6/9

		fi ach abrozað																																					
	DMS	E l _{i mia}	Ξ				5805																			3843						3196						1736	
		vī	[MPa]			1,23						1	3,28						4,60						14						3.32						0,33		
	schicht	N79	/Pa]			1,2						:	ç, ç						6,1						56						6.6						1,3		
	Kleb	4	Pa] [N	40	52	۳. ۳	នុះ	83	28	ទុះ	12	a i	1 2	ì	47	96	49	52	38	73	24	32	8	37	62	6	65	42	5	45	2	22	59	5	33	56	08	78	78
ebnisse	_	ч	a] [M	33	32,	2 2	£ 8	0 M	R I	ឡ ទ	18	र् <u>द</u> ः 	8 1 1 1	1	5 1 1	5	34	° 89	38	68	35	6	8 N	16	5 2	2	ក្តី	6 <u>1</u>	ដ	T,	6 2	5	2	5	11	Ъ,	ي لا	ក្ត	র র
chserge	ŧ	vî	[MP			14,8						-	40,1						51,1						22	Ì					41.1						4,7		
Versu	Lamina	G _{Br,AV}	[MPa			384,2							201,3						456,9						5775						203.0						267,9		
		Gum, Br	[MPa]	410,6	397,0	367,1	377,2	379,3	374,2	247,9	233,0	260,7	157,7	1/4,7	163,1	346.9	0 677	488.1	482.9	502.8	435.1	499.5	250,5	199,7	166,1	258,4	252,3	237,8	186,8	139,2	190,3	215,5	277,0	209,2	267,2	269,8	263,7	260,7	271,6 274,7
		ň	[N]			833			T			-	2119			t			2760				F		1731			1			2107						226		
	hkraft	NY'S	[N]			519						1	299						173						477						445						310		
	Bruch	u."		5	5	92 19	5	5	8	1	5	2	5 2	0	m e	s	ä	2 6	35 23	5			0	8	5	t t	6	ŧ	2	9	а 5	8	92	2	4	12	11 13	6	2 3
		u.	[N]	2100	2024	1859	1909	1922	1895	1255	1210	1341	797	050	834	170	2767	2487	2460	2546	2223	2535	1292	1029	855	1330	1300	1226	962	717	986	1109	1423	1073	1324	1340	1313	1295	1364
	bo bo	tew	[mm]			0,35						1	0°0						0,0						0 17	1					0.17						0,15		
	erlappur	¥۲	[mm]	0,17	0,35	0,42	0,39	0,38	0,36	0,0	0,0	oʻo	0,0	0,0	0,0		0.0	0.0	0,0	0,0	0.0	0.0	0,15	0,18	0,18	0,18	0,15	0,15	0,19	0,20	0,20	0,18	0,12	0,12	0,10	0,15	0,20	0,19	0,16 0,13
	trie Übe	¥	[_mm	628,7	628,2	625,7	625,0	623,7	620,0	657,1	661,0	664,1	668,9	000'/	668,8 677 A	657.1	657 A	544.4	541.2	641.0	630.8	628.8	627,1	628,9	628,0	634,3	631,8	631,6	627,3	627,0	630,9	631,5	630,3	630,0	621,0	621,9	622,8	623,7	625,1 626,4
tionen	Geomet		[u	95	63	83	ŝ	75	r.	15	m	4	œ.	ń	o k	5 5	ų,	1 2	3 9	5	9	8	5	9	02	33	54	53	03	02	17	21	17	16	80	80	87	88	8 8
informa		-	<u>_</u>	54	24	24	54	4 2	7	2ę	56	56	56	207	29 29	2 2 2 2 2	í v	3 K) K	í n	2) ا	3	55	52	52	۲Ĵ	2Ì	52	ม้	55	S,	ŝ	25	54	2	24	4	2 2
Zusatz	hat	N. A.	[_mm]	51,16	50,99	50,65	50,61	50,69	50,66	50,63	51,94	51,45	50,59	51,40	51,17	49.17	00 13	24,47	50.96	50.65	51.10	50.77	51,57	51,55	51,49	51,48	51,55	51,57	51,53	51,56	51,51	51,46	51,39	51,33	49,57	49,69	49,79	49,71	49,60 49,67
	e Lamir	= p [×]	[u	20	20	20	20	20	9	13	13	16	5	10	14	۲ ۲		4 :	14	14	5	15	8	96	05	8	03	03	96	96	07	05	8	ţ	8	80	5	07	05 05
	eometri	p.	<u>_</u>	25,	25	25	55	S,	23	5	5Ĵ	ญ์	5	IJ,	Ϋ́Υ	ป็ห	, r	j k	Ĵ Κ	Î X	55	Î N] S	55	25	25,	5	22	25	۲Ĵ	25	55	25	25	25,	52	25	S,	ม่ม่
	Ö	3	[mm]	2,03	2,02	2,01	2,01	2,01	2,02	2,02	2,07	2,05	2,01	2,04	2,04	1.95	200	5 6	2.03	2.02	2.03	2.02	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,05	2,05	2,05	2,05	1,98	1,98	1,99	1,98	1,98 1,98
	-	DIC f=fein, g=grop	1				4-						4-						4																				
50 LD		O DW2					×		+							╞										×		+				×		_				×	
Prüfu		, puox	_			18			+				в			╞			BT				-		<u>ц</u>			+			10			_			BT BT		
		Prüfdatum	_	-	ы	02.0	01.2	:	+		τ	zoz	.01.3	z		┢		R	05.0	1.2			⊢	ZZ		9 50.2	2	+		zz	02.6	, 50.5	z	-		zz	05.0	0'Z2	
		ли	_		14	m	4	ŝ	<u></u>	-1	14	m	4	n	1 0		-	4 10	1 4					14	m	4	ŝ	v	-	14	m	4	ŝ	9	-1	2	m	4	n v
		ameN							\uparrow							T												1			ц.								
	away		Patch2_ST	I						cocured_Ref						cocured ST10	I					Def FNAW7075 B1						ST10 ENAW7075 R	1					Ref_V2A_RT					

Abbildung B-7: Materialwerte SLS Versuche 7/9

		Besonderheit	1																																			
	DMS	۲۲ Struck	Ξ				2/44					4550						2739						3080		┤				2665						3243		
	t	ъ	[alm			0,44					0.64	100					1.31						190	4 1 1 2					86.0	2					1.42			
	schich	Br,AV	APa] [3,1					8	ý					1.4						44						5 5						7.1			
ĸ	Kleb	4	Pa] [N	16	25	5 03	50	66	46	12	75	56	32	89	11	34	65	8	95	44	19	39	79	52	35	20	31	93	42	88	57	80	90	14	87	92	17	65
gebnis		4	a] [M	22,	23,	7 23,	2,00	22	21	22	25	25	23,	21	10 1	σ	11, 11,	12	Ħ	17	15	13	15	13 13	14	14	14	Ę	12,	12	12	Ę	17	18	14	15	19	11
Ichser	at	°	[MP			7 5,4					8	2					15.7						110						124	Ì					17.1			
Versu	Lamin	σ _{Br,A} ,	[MPa			286,7					75	, ,					145.(177 6						155 1						212			
		d اam,Br	[MPa]	276,0	289,0	284,5	291,6	286,8	264,6	272,1	280,8	279,1	288,6	267,2	130,2	119,0	147,5	163,5	150,2	159,5	184,1	163,1	194,6	164,0	178,7	181,0	178,0	147,9	154,2	160,4	155,7	137,1	210,7	224,7	185,2	198,7	237,8	218,9
		ň	[N]			299					204	t D		1			812	1					572	i i					611						898			
	chkraft	F _{BrAV}	[N]			14328					14052						7401						9080						7948	2					10921			
	Bru	u, ^{äi}	[N]	3712	4411	4270	4589 4589	4377	3520	3954	4318	4186	4678	3656	5567	5098	7569	3333	669	3171	9423	3354	9931	3355	9140	9333	9064	7579	7865	3136	7997	7045	0814	1542	9501	0163	2234	1271
	bū	trav	[mm	<u>н</u>	<u> </u>	0,16				<u> </u>	1 a l 0	1					0.17	į		-			17	į	<u> </u>	-			17	į		1.			0.17	<u>, 1</u>		-
	undde	تر] [mt	10	15	19	1 0	14	01	20	22	21	22	14	10	16	21	22	21	13	16	13	21	22	19	10	60	15	21	22	22	12	60	18	21	22	20	11
	Überl	-	μ]	Ó	Ó	o` o	o` c) O	O)	Ó	Ó	°,	o`	Ó	0`	°	°	O`	Ó	Ő	Ó	°,	°	0`	°,	Ő	Ó	Ó	0`	Ó	°	Ő	Ó	Ó	0`	O`	O`	Ő
tionen	metrie	¥	[mm ²]	618,7	619,9	619,7	625,2 6197	625,3	630,0	631,0	629,3	628,8	629,4	629,8	649,3	652,8	649,4	647,1	641,6	641,5	620,5	624,0	629,0	631,8	636,8	643,5	633,3	635,3	633,2	631,5	636,0	635,6	633,9	636,2	638,8	638,6	638,1	638,5
informa	Geo	ž	[mm]	24,71	24,66	24,56	24,82 24.66	24,78	25,11	25,14	25,07	25,10	25,12	25,06	25,84	25,95	25,79	25,71	25,55	25,54	24,66	24,85	25,00	25,13	25,31	25,56	25,20	25,25	25,20	25,24	25,28	25,26	25,26	25,33	25,40	25,40	25,39	25,41
Zusatzi	nat	Auam	[zmm	9,68	9,86	0,16	0100	0,13	1,10	1,28	66'0	0,82	0,85	1,11	0,45	1,24	1,31	0,96	1,04	1,24	1,20	1,21	1,04	0,94	1,15	1,56	0,92	1,24	1,02	0,72	1,36	1,40	1,32	1,36	1,29	1,14	1,45	1,50
14	e Lami	ă "	-] [w	,04	,14 4	,23	73 V V 13 V	24 5	00, 2	,10 5	,10 5	,05 5	06 5	,13	,13 5	,15 5	,18 5	,17 5	,11 5	12 5	,16 5	,11 5	,16 5	,14 5	,16 5	,18 5	,13 5	,16 5	,13 5	,02	,16 5	,16 5	,09 5	,12 5	,15 5	,14 5	,13	,13 5
	metri	d	[25	25	25	2 2	25	1 25	t 25	25	25	25	52	. 25	1 25	1 25	55	25	1 25	25	1 25	25	55	25	25	25	t 25	25	25	t 25	1 25	25	25	t 25	22	22	25
	Geo	t tam	mm]	1,98	1,98	1,99	1 1 95 F	1,90,1	2,04	2,04	2,03	2,03	2,03	2,0	2,01	2,04	2,04	2,02	2,03	2,0	2,03	2,04	2,03	2,03	2,03	2,0	2,03	2,04	2,03	2,03	2,04	2,04	2,05	2,0	2,04	2,03	2,0	2,0
	q	Cf=fein,g=gro	DI											\downarrow																								_
Bur		SMG-90					×					×		\downarrow				×						×		$ \downarrow$				×						×		
Prüf		Prüftemp.				ΤЯ					Т	9		\downarrow			2°C	S-					5°C	Z-				:	2°C	S-					0°C	8		
		Kond.				RT	0.777		<u> </u>		T1	9		\downarrow			77 77	1					11	1		\dashv			3T						3T			\neg
-		Nr. Prüfdatum	_		220	<u>~</u>	+ 10			221	~	-0.0				220	02.6	-+	10		_	220	JZ 16	-+	10	-	_	220	02.6	0.7	10		_	220	<u> </u>	0.7	. C	
		ameN			. 4		4 0		<u> </u>	. 4	,	4		┦	-1	- 4	.,	ч.		-	-1	. 4		4		┦	-1	. 4		4		-		. 4		4.	31	-
						ST10_V2A_RT					ST10 K72 RT°C						ST10_K7255°C	1					ST10 PEEK -22°C	1					ST10 PEEK -55°C	1					ST10 PEEK 80°C	1		

Abbildung B-8: Materialwerte SLS Versuche 8/9

		Besonderheit																											
	DMS	E _{L,max}	-				3856						4245						3365							4142			
	tt	Sr	[MPa]			0 78	0,10					0 50	cc'0						0,50							1,49			
	ebschic	τ _{Βr,AV}	[MPa]			20.3	C'07					7 10	7,12						19,0							24,3			
sse	KI	τ _s ,	[MPa]	20,51	21,60	20,84	20,30	19,52	19,29	22,09	21,60	21,30	21,48	21,13	22,71	19,58	19,42	18,60	18,40	18,46	18,87	19,65	26,65	23,44	22,58	23,17	23,43	24,60	26,36
sergebni		Š	[MPa]			8 29	1710					2 01	10'n						8,17							20,72			
Versuch	Laminat	G _{Br,AV}	[MPa]			757 1	アパフトフ					0 696	0 ⁷ 07						232,7							297,2			
		g Lam, Br	[MPa]	250,7	266,2	257,9	252,1	243,6	241,8	269,5	261,8	259,3	260,2	254,6	271,3	237,5	236,4	227,4	224,8	223,6	230,3	248,5	321,5	285,8	274,4	280,8	285,3	298,9	334.0
		S _r	[N]			411	114					000	000						316							953			_
	uchkraft	F _{Br,AV}	[N]			17867	70071					12412	CT+CT						11991							15380			
	Bri	л. В	[N]	12813	13571	13115	12889	12438	12347	13711	13375	13254	13228	12999	13911	12335	12244	11764	11617	11629	11921	12427	16845	14857	14241	14617	14840	15561	16699
	gung	t _{k,av}	[mm]			0.18	0710					0.16	01'0						0,28							0,36			
	erlapp	τ ι	[mm]	0,10	0,19	0,21	0,21	0,21	0,16	0,07	0,14	0,22	0,24	0,20	0,12	0,16	0,29	0,36	0,32	0,35	0,32	0,19	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0.3
len	ietrie Üb	Å	[mm ²]	624,9	628,3	629,2	634,9	637,4	640,2	620,8	619,3	622,3	615,9	615,1	612,6	629,9	630,4	632,6	631,4	630,1	631,7	632,3	632,0	633,9	630,8	630,8	633,3	632,7	633.4
ormatior	Geor	<u>-</u> *	[mm]	24,90	25,08	25,07	25,26	25,40	25,47	24,70	24,62	24,74	24,51	24,49	24,37	25,12	25,13	25,21	25,16	25,1	25,17	25,18	25,22	25,29	25,17	25,17	25,26	25,23	25.26
Zusatzinf	inat	A _{Lam}	[mm ²]	51,11	50,98	50,85	51,13	51,06	51,06	50,88	51,09	51,11	50,85	51,06	51,27	51,93	51,80	51,74	51,67	52,01	51,75	50,00	52,40	51,98	51,90	52,05	52,02	52,06	50.00
	ietrie Lam	b _{Lam} = b _K	[mm]	25,10	25,05	25,10	25,14	25,09	25,14	25,13	25,15	25,16	25,13	25,12	25,14	25,08	25,08	25,09	25,10	25,10	25,10	25,11	25,06	25,06	25,06	25,06	25,07	25,08	25.08
	Geom	t _{Lam}	[mm]	2,04	2,03	2,03	2,03	2,04	2,03	2,02	2,03	2,03	2,02	2,03	2,04	2,07	2,07	2,06	2,06	2,07	2,06	2,06	2,09	2,07	2,07	2,08	2,08	2,08	2.08
	-	lCf=fein,g=grob	3																									_	_
ß		0°-DMS					×						×		_				×							×			
rüfur		Rond.				т	я Я					1	я Л		_				ТЯ							TЯ			
	-	Prüfdatum			77		a 50.2	7	_		77	107.	a 60.2	77	-		;	7707	1.21			_		;	770	7.21 Tg			
		Nr.			7		4	5	9		73		4	5	9	1	5	 	4	50	9	7	1	5		4	50	9	-
		əmsN				CT10 DEL RT°C			_			CT10 EAG605			_				7075_2xEA9695_RT			-				7075_2xEA9695_RT			
																			Ref							ST			

Abbildung B-9: Materialwerte SLS Versuche 9/9

C. Experimente

C I Anhaftungsversuch PVDF



Abbildung C-1: Anhaftungsversuche zur Epoxidmatrix des Faserverbundwerkstoffes mit verschiedenen PVDF Materialien

Deutlich zu erkennen, dass in Abbildung C-1 die beiden PVDF Sorten Kynar[®] 720 und das Homopolymer der Firma Nowofol[®] sich direkt nach dem Aushärten des Laminates ablösen. Die beiden Materialien sind daher nicht geeignet.

C 2 Dehnungsverteilung von Referenz und ST_10

In Abbildung C-2: Quantitativer Dehnungsverlauf nach v. Mises von Referenz und ST_10 PVDF (2018) Probe aus Kapitel 7.4.3Abbildung C-2 ist der quantitative Dehnungsverlauf der Klebschicht von Referenz und ST_10 mit PVDF (2018) zu erkennen. Deutlich ist die gleichmäßige Dehnung bei der zähmodifizierten Probe im Gegensatz zur Referenzprobe mit typischen randnahen Spannungskonzentrationen.



Abbildung C-2: Quantitativer Dehnungsverlauf nach v. Mises von Referenz und ST_10 PVDF (2018) Probe aus Kapitel 7.4.3



Abbildung C-3: Quantitativer Dehnungsverlauf von E_y von ST_10 PVDF (2018) Probe

Deutlich sind in Abbildung C-3 neben der Schäldehnungen im Klebstoff auch die Dehnungen E_y im Fügeteil zu erkennen. Beide sind in gleicher Größenordnung.



Abbildung C-4: Vergleich von Referenz- und ST_10 Probe. Der Scherwinkel gibt Aufschluss über die Schubverteilung.

Deutlich ist in Abbildung C-4 bei den Proben ST_10 mit lokaler Oberflächenzähmodifikation die Umlagerung der Last Richtung mittleren Bereich der Klebverbindung zu erkennen.

C 3 Modifiziertes Federmodell – Nachweis

Aus Abbildung C-5 ist zu entnehmen, dass die Gesamtfedersteifigkeit bei Verwendung von PEI etwas höher ist als die Referenz, aber niedriger als PEEK, somit wird eine Festigkeit geringer als die Referenz, aber höher als bei der ST_10 PEEK erwartet.



Abbildung C-5: Modifiziertes Federmodell - Verläufe der Gesamtfedersteifigkeiten am Überlappungsrand über die halbe Klebschichtdicke mit Anpassung der Fügeteilsteifigkeit und Nachweis über PEI und K72

Ebenfalls wird nun zusätzlich K72 verwendet, welches ein Forschungsthermoplast der Firma Nowofol[®] ist. Die Gesamtfedersteifigkeit liegt bei Verwendung dieses Stoffes knapp unterhalb der Referenzkurve, aber weit über der der PVDF Materialien. Es wird also eine leichte Verbesserung der Verbindungsfestigkeit erwartet, jedoch deutlich geringer als bei der Verwendung von PVDF.

Tabelle C-1 Führt die Gesamtfedersteifigkeiten für den getesteten Anwendungsfall auf.

Serie	tк	tsт	E-Modul	Gesamtfeder- steifigkeit	Steifigkeits- verhältnis
	[mm]	[mm]	[MPa]	[N/mm]	zur Referenz
Referenz	0,15	-	2576	14720	1
ST_10 PVDF Kynar	0,15	0,125	1716	9808	0,67
ST_10 PVDF Nowofol	0,15	0,1	1398	9936	0,67
ST_10 PVDF PEEK	0,18	0,1	3362	15460	1,05
ST_10 PVDF PEI	0,15	0,12	3285	15234	1,03
ST_10 PVDF K72	0,15	0,14	3141	13810	0,94
ST_10 PVDF EA9695	0,15	0,1	2576	14720	1

Tabelle C-1: Modifiziertes Federmodell - Gesamtfedersteifigkeiten bezogen auf die Klebschichtmittellinie im Bereich der Zähmodifikation mit Anpassung der Fügeteilsteifigkeit



In Abbildung C-6 sind die Festigkeiten der getesteten Serien grafisch aufgeführt.



Die Serie mit PEI zeigt mit -7,5 % die erwartete geringere Festigkeit zur Referenz, während K72 mit 1,1 % eine minimal erhöhte Festigkeit aufweist.

Zu erkennen ist aber, dass eine geringfügig höhere Gesamtfedersteifigkeit zur Referenz eine proportional deutlich schlechtere Verbindungsfestigkeit erwirkt, als eine leichte Verringerung der Gesamtfedersteifigkeit zu dieser. Diese erzielt auch nur eine minimale Steigerung der Verbindungsfestigkeit. Das Modifizierte Federmodell kann dennoch für eine erste Abschätzung herangezogen werden.

Tabelle C-2 beinhalten die Werte der Materialprüfung.

Serie	tк	F _{Br,AV}	$ au_{Br,AV}$
	[mm]	[N]	[MPa]
Referenz (2021)	0,13	13943	22,3
ST_10 PVDF Kynar (2018)	0,15	24159	38,4
ST_10 PVDF Nowofol	0,15	25730	41,4
ST_10 PEEK	0,18	11156	17,8
ST_10 PEI	0,15	12862	20,6
ST_10 K72	0,15	14052	22,5
ST_10 EA9695	0,11	13413	21,5

Tabelle C-2: Versuchsergebnisse der Überlappungsklebungen mit verschiedenen zähmodifizierenden Materialien zum Nachweis des modifizierten Federmodells



Abbildung C-7: Einfluss der Gesamtfedersteifigkeiten auf die Verbindungsfestigkeitssteigerung

Mithilfe der in Kapitel 7.4.7 getesteten 15 mm Referenz lässt sich zeigen, dass das Weglassen des Zähmodifizierten Randes die Verbindungsfestigkeit um 26 % verringert. Somit lassen sich die Grenzen abstecken und ein Bereich definieren, in dem es eine Verbindungsfestigkeitssteigerung geben müsste.



C 4 Elastizitätsmodul von ENAW 7075 und 8552/IM7

Abbildung C-8: Kraft-Dehnungsdiagramm mit ermittelten Elastizitätsmodulen der ST_10 Proben mit Zähmodifikation zwischen zwei Klebschichten aus Kapitel 7.4.9

Die Ermittlung der Elastizitätsmoduln als Sekantenmodul ist zwischen 6000 N und 8000 N durchgeführt. Berücksichtigt werden muss dabei, dass die Dehnungsmessung auf der Seite mit Verklebung und damit auf der Druckseite der SLS-Proben stattgefunden hat, weshalb die Dehnungen etwas zu klein sind und die Elastizitätzmoduln dadurch etwas höher ausfallen. Um die Größenordnung abzuschätzen ist das Elastizitätsmodul der Zugprobe vom Laminat ELam=59709 MPa aus Kapitel 7.1 aufgeführt.

Eigene Publikationen

Peer Reviewed

- von der Heide, Chresten und Steinmetz, Julian und Schollerer, Martin Johannes und Hühne, Christian und Sinapius, Johannes Michael und Dietzel, Andreas (2021) Smart Inlays for Simultaneous Crack Sensing and Arrest in Multifunctional Bondlines of Composites. Sensors, 21 (11), Seite 3852. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/s21113852. ISSN 1424-8220.
- Schollerer, Martin und Kosmann, Jens und Holzhüter, Dirk und Bello-Larroche, Carlos und Hühne, Christian (2020) Surface toughening – An industrial approach to increase the robustness of pure adhesive joints with film adhesives. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 234 (13), Seiten 1980-1987. Sage Publications. doi: 10.1177/0954410020950071. ISBN ISSN: 0954-4100. ISSN 0954-4100.
- 3. Kosmann, Jens und Völkerink, Oliver und **Schollerer, Martin** und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2019) Digital Image Correlation Strain Measurement of Thick Adherend Shear Test Specimen Joined with an Epoxy Film Adhesive. International Journal of Adhesion and Adhesives (90), Seiten 32-37. Elsevier. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.01.024. ISSN 0143-7496.
- 4. Völkerink, Oliver und Kosmann, Jens und **Schollerer, Martin** und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2019) Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with the eXtended Finite Element Method. Journal of Adhesion, 95 (5-7), Seiten 474-494. Taylor & Francis. doi: 10.1080/00218464.2018.1553120. ISSN 0021-8464.
- Schollerer, Martin und Kosmann, Jens und Völkerink, Oliver und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2018) Surface Toughening - A Concept to Decrease Stress Peaks in Bonded Joints. Journal of Adhesion, 94 (14), Seiten 1-20. Taylor & Francis. doi: 10.1080/00218464.2018.1555041. ISBN 0021-8464. ISSN 0021-8464.
- Kosmann, Jens und Klapp, Oliver und Holzhüter, Dirk und Schollerer, Martin und Fiedler, Arne und Nagel, Christoph und Hühne, Christian (2018) Measurement of Epoxy Film Adhesive Properties in Torsion and Tension Using Tubular Butt Joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, 83, Seiten 50-58. Elsevier. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2018.02.020. ISBN 0143-7496. ISSN 0143-7496.
Schollerer, Martin und Kosmann, Jens und Löbel, Thomas und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2017) A New Joining-Device for Manufacturing Tubular Butt Joints with Higher Curing Temperatures of Film Adhesives. Applied Adhesion Science, 5 (15). Springer. doi: 10.1186/s40563-017-0094-8. ISSN 2196-4351.

Patente

1. DE102017114538B4

Alignment core for coaxial alignment of pipe sections and use of such alignment core

2. DE102018121222A1

Method and device for determining mechanical material characteristic curves

3. DE102019106425A1

Messeinrichtung und Verfahren zur Feuchtigkeitsmessung

4. DE102019113120A1

Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln eines mechanischen Kennwertes

5. EP4056465A1

Aerodynamic profile body for aircraft

Konferenzbeiträge

- Schollerer, Martin und Kreissig, Florian und Gesell, Thomas und Niemann, Steffen und Hühne, Christian (2023) Steigerung der Robustheit von strukturellen Klebungen mittels Surface Toughening am Beispiel HAP. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023, 19.-21. Sep. 2023, Stuttgart, Deutschland.
- Niemann, Steffen und Schollerer, Martin und Gesell, Thomas und Nolte, Lukas und Mantei, Marius und Bärschneider, Andreas und Hanke, Michael (2023) DIMENSIONIERUNG UND DURCHFÜHRUNG EINES ULTIMATE-LOAD TESTS DER FLÜGELSTRUKTUR DES HAP-ALPHA. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023, 19. - 21. Sep. 2023, Stuttgart, Deutschland.
- 3. Schollerer, Martin und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2022) Robust Bonded Joints with Surface Toughening design feature. NATO AVT-361 Research Workshop on Certification of Bonded Repair on Composite Aircraft Structures, 18.10-20.10.2022, Royal Netherlands Aerospace Centre (NLR) Amsterdam, The Netherlands.

- Schollerer, Martin und Niemann, Steffen und Gesell, Thomas und Froese, Sarah und Hanke, Michael (2021) Surface Toughening - Ein kleiner Streifen mit großem Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit von geklebten Primärstrukturen im Projekt HAP. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2021, 31.08.-02.09.2021, Bremen und virtuell. doi: 10.5281/zenodo.5381279.
- 5. Schollerer, Martin und Ückert, Christian und Hühne, Christian (2021) Laminar Interface Concept for a HLFC Horizontal Tailplane Leading Edge, Design and Manufacturing Approach. Clean Sky 2 technology progress – contribution to the environmental performance of the next generation aircraft, 24.-25.03.2021, Madrid, Spanien (virtual). doi: 10.5281/zenodo.4655818.
- Schollerer, Martin und Kosmann, Jens und Holzhüter, Dirk und Bello-Larroche, Carlos und Hühne, Christian (2020) Surface Toughening – An industrial Approach to increase the Robustness of pure adhesive Joints with film adhesives. 1st International Conference on Industrial Applications of Adhesives 2020, 05.-06.03.2020, Madeira, Portugal. ISBN 978-989-9017-17-7.
- Schollerer, Martin und Kosmann, Jens und Völkerink, Oliver und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2018) Surface Toughening - A Concept to Decrease Stress Peaks in Bonded Joints. 12th EURADH/ 4thCLBA 2018, 05.-07.09.2018, Lissabon. ISBN 978-989-8927-24-8.
- Völkerink, Oliver und Kosmann, Jens und Schollerer, Martin und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2018) Strength Prediction of Adhesively Bonded Single Lap Joints with the eXtended Finite Element Method. Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.. 12th European Adhesion Conference and 4th Luso-Brazilian conference on Adhesion and Adhesives, 05. - 07. Sept. 2018, Lissabon, Portugal. ISBN 978-989-8927-24-8.
- Holzhüter, Dirk und Kosmann, Jens und Völkerink, Oliver und Schollerer, Martin und Hühne, Christian (2018) Comparison of Stepped and Straight Design of Bonded Scarf Joints. 12th European Adhesion Conference, 5.9.2018 - 7.9.2018, Lissabon.
- 10. Kosmann, Jens und Völkerink, Oliver und **Schollerer, Martin** und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2018) Digital Image Correlation Strain Measurement of Thick Adherend Shear Test Specimen Joined with an Epoxy Film Adhesive. EURADH/CLBA 2018, 05.-07.09.18, Lissabon, Portugal.

- 11. Schollerer, Martin und Kosmann, Jens und Löbel, Thomas und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2017) A New Joining-Device for Manufacturing Tubular Butt Joints with Higher Curing Temperatures of Film Adhesives. AB2017 4th International Conference on Structural Adhesive Bonding, 6.-7. July 2017, Porto, Portugal.
- 12. Kosmann, Jens und Klapp, Oliver und Holzhüter, Dirk und Schollerer, Martin und Fiedler, Arne und Nagel, Christoph und Hühne, Christian (2017) Measurement of Epoxy Film Adhesive Properties in Torsion and Tension Using Tubular Butt Joints. AB2017 – 4th International Conference on Structural Adhesive Bonding, 06.-07. Juli 2017, Porto, Portugal.
- Holzhüter, Dirk und Kosmann, Jens und Hühne, Christian und Sinapius, Michael und Schollerer, Martin (2016) SIZE REDUCED COMPOSITE REPAIRS BY PLY WISE SCARFING. ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials, 27.6.2016 -30.6.2016, München.
- Seehof, Carsten und Schollerer, Martin und Oppermann, Sven (2015) Untersuchung der Machbarkeit eines Verfolgerdisplays als Entscheidungshilfe in Segelflugwettbewerben.
 Symposium für Segelflugzeugentwicklung, 19.-20. Nov. 2015, Darmstadt.