DLR-IB-FA-BS-2021-78

Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Umweltbedingungen auf zähmodifizierte Klebverbindungen bei Faserverbundwerkstoffen

Bachelorarbeit

Kimberley Niehage Martin Schollerer



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt



DLR-IB-FA-BS-2021-78

Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Umweltbedingungen auf zähmodifizierte Klebverbindungen bei Faserverbundwerkstoffen

Zugänglichkeit:

Stufe 1 Allgemein zugänglich

Braunschweig, 12. April, 2021

Abteilungsleiter:

Prof. Dr.-Ing. C. Hühne _____

Der Bericht umfasst: 78 Seiten

Autoren:

Kimberley Niehage

Martin Schollerer, M.Sc.

M. Golollar



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

MH-FA-56-FB03_v1.3

Abstract

In dieser Arbeit wird das Konzept der zähmodifizierten Klebverbindung bei Überlappungsklebungen für die Luftfahrt untersucht. Der Kerninhalt besteht in dem Erstellen von Überlappungsklebungen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Zur Zähmodifizierung werden Kunststoffstreifen in die Klebverbindung eingebracht. Als zähmodifizierender Werkstoff soll neben dem bisher untersuchten PVDF¹ auch PEEK² betrachtet werden. Die zähmodifizierten Klebverbindungen werden durch einen Zugscherversuch geprüft und mittels Bildkorrelation ausgewertet. Ein Erhöhen der Steifigkeit des zähmodifizierenden Werkstoffs sowie der Einfluss von Feuchtigkeit bewirkt eine Festigkeitsminderung der Klebverbindung. Lediglich bei der Verwendung des steiferen PEEKs führt eine erhöhte Feuchtigkeit zu einer Festigkeitssteigerung und einer homogenen Klebverbindung. Eine zähmodifizierte Klebverbindung mit PVDF und einem kaltaushärtenden Klebstoff erzielt eine Festigkeitssteigerung von 120%. Durch den niedrigtemperierten Klebprozess wird eine festigkeitsmindernde Eigenspannung im zähmodifizierten Material vermieden.

¹ Polyvenylidenfluorid

² Polyetheretherkethon

Inhaltsverzeichnis

S	perr	rvermerk	.1		
A	AufgabenstellungIII				
E	Eidesstattliche VersicherungV				
A	bstra	actV	/		
A	bbilo	dungsverzeichnislž	X		
Т	abel	llenverzeichnisXI			
A	bkür	rzungsverzeichnisX	V		
1	E	Einleitung	1		
	1.1	Problemstellung	1		
	1.2	Zielsetzung	2		
	1.3	Aufbau der Arbeit	2		
2	S	Stand der Wissenschaft und Technik	4		
	2.1	Klebverbindungen	4		
	2.2	Oberflächenvorbehandlung bei Kunststoffen und Kunststoffverbunden	6		
	2.3	Mehrschichtverbunde1	0		
	2.4	Versagensarten von Überlappungsklebungen1	0		
	2.5	Prüfverfahren1	2		
	2.6	Spannungsverteilung in einer Klebschicht1	3		
	2.7	Festigkeitssteigerung durch Spannungsreduktion1	6		
	2.8	Temperatur- und Feuchtebeständigkeit von Thermoplasten2	2		
3	٧	/ersuchsvorbereitung2	5		
	3.1	Methodik2	5		
	3.2	Materialdaten	0		
	3.3	Fertigungsprozess	2		
	3.4	Prüfkörperpräparation3	5		
4	٧	/ersuchsdurchführung3	9		
5	٧	/ersuchsauswertung4	1		
	5.1	Voruntersuchung der Klebgeometrie4	1		
	5.2	Dickenvergleich4	2		
	5.3	Steifigkeitseinfluss4	7		

;	5.4	Feuchtigkeitseinfluss	54
	5.5	Einfluss von thermischen Eigenspannungen im PVDF	61
6	Disł	kussion	69
7	Zusammenfassung und Ausblick72		72
8	Quellenverzeichnis74		74
Ar	Anhangsverzeichnis		78

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Aufbau der Arbeit	3
Abb. 2.1 Begriffe einer einfachen Überlappungsklebung [vgl. Hab16, S. 5]	4
Abb. 2.2 Adhäsions- und Kohäsionskräfte in einer Klebung [vgl. Hab16, S. 76]	5
Abb. 2.3: Benetzungsarten von Flüssigkeiten auf Oberflächen [Hab16, S.73]	6
Abb. 2.4 Unterteilung der Oberflächenbehandlungen [vgl. Hab16, S. 78]	6
Abb. 2.5: Atmosphärendruck-Plasmaerzeuger [vgl. Hab06, S. 664]	8
Abb. 2.6: Aufbau einer VUV - Excimer - Lampe [Oni21, Rie20]	9
Abb. 2.7: Versagensarten von Klebverbindungen [vgl. Hab06, S. 373]	.11
Abb. 2.8: Fügeteilversagen bei Faserverbundwerkstoffen [vgl. Ast99]	.11
Abb. 2.9: Zwischenfaserbruch mit Delaminationsentstehung [vgl. Sür07, S. 386]	.12
Abb. 2.10: Spannungen einer belasteten Überlappungsklebung [vgl. Hab16, S. 154]	14
Abb. 2.11: Dehnungsveränderung bei belasteter Klebverbindung [vgl. Sür07, S. 571]	14
Abb. 2.12: Schubspannungsverläufe bei einer belasteten Überlappungsklebung [vgl. Wie07, S. 785]	.15
Abb. 2.13: Schubspannungsverlauf bei belasteter Überlappungsklebung [vgl. Sür07, S. 587]	16
Abb. 2.14: Druckaufbringung bei der Härtung von Klebstoffen [vgl. Hab16, S. 94]	.16
Abb. 2.15: Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke [vgl. Hab06, S. 444]	17
Abb. 2.16: Aufbau einer Gradientenklebung [vgl. Sür07, S. 600]	.18
Abb. 2.17: Klebgeometrien zur Spannungsspitzensenkung [vgl. Sür07, S. 601]	.18
Abb. 2.18: Aufbau und Spannungsverlauf einer Surface Toughening Klebung [vgl. Sol18]	19
Abb. 2.19: Detailaufnahme Surface – Toughening	.20
Abb. 2.20: Temperaturauswikung auf den PVDF-Streifen im Laminat mit und ohne Klebstoff	20
Abb. 2.21: Klebgeometrien im Vergleich	.21
Abb. 2.22: Festigkeitssteigerungen von Klebverbindungen im Vergleich [vgl. Lei18]	21
Abb. 2.23: erstes Konzept der hybriden Klebschicht als Rissstoppkonzept mit Spannungsverlauf [vgl. Löl16]	22
Abb. 2.24: Rissstoppkonzept mit Rissfortbildung [vgl. Sol18]	.22
Abb. 3.1: Probengeometrie	.26
Abb. 3.2: Schubspannung in einer belasteten Überlappungsklebung	.28
Abb. 3.3: Autoklav-Zyklus Hexply 8552 IM7 (s.Anhang A.2)	.30

Abb. 3.4: Dimensionierung des Laminats und Platzierung der ST Streifen	.32
Abb. 3.5: Zuschneiden des Laminats zu den Fügeteilen zweier Klebungen	.32
Abb. 3.6: Verkleben der Fügeteile mit identischer Ausrichtung der Faserlagen	.33
Abb. 3.7: Varianten des durchgeführten Surface Toughenings	.33
Abb. 3.8: Prüfkörperbezeichnung	.34
Abb. 3.9: Aufbau der DLR internen VUV-Anlage	.35
Abb. 3.10: Vakuumaufbau	.36
Abb. 3.11: Vakuumaufbau nach Evakuation der Luft	.36
Abb. 3.12: Autoklavgang	.36
Abb. 3.13: Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile durch Atmosphärendruckplasma	.37
Abb. 3.14: Platzierung der Passstifte	.38
Abb. 3.15: Vakuumsackaufbau für Aushärteprozess des Klebstoffs	.38
Abb. 4.1: Aufbau der Zugscherprüfung	.40
Abb. 4.2: stochastisches Muster auf Überlappungsklebung	.40
Abb. 5.1: Randbereich eine ST_10_PEEK Probe	.41
Abb. 5.2: Übergangsbereich des ST-Streifens mit Epoxidharztasche	.42
Abb. 5.3: Vergleich des Dickeneinflusses des ST- Materials auf die Klebfestigkeit	.43
Abb. 5.4: Festigkeitssteigerung durch Surface Toughening mit 0,125mm PVDF- Streifen	.44
Abb. 5.5: Festigkeitssteigerung durch Surface Toughening mit 0,1 mm PVDF- Streifen	.44
Abb. 5.6: ARAMIS-Auswertung der Referenz Probe 3 aus 2018 kurz vor dem Bruch nach von Mises [vgl. Lei18]	.45
Abb. 5.7: ARAMIS-Auswertung der Referenz Probe 3 kurz vor dem Bruch nach von Mises	.45
Abb. 5.8: ARAMIS-Auswertung der ST_10_PVDF Probe 3 mit einer ST-Dicke von 0,125 mm kurz vor dem Bruch nach von Mises, 2018 [vgl. Lei18]	.46
Abb. 5.9: ARAMIS-Auswertung der ST_10_PVDF Probe 4 mit einer ST-Dicke von 0,1 mm kurz vor dem Bruch nach von Mises	.46
Abb. 5.10: Steifigkeitsvergleich des ST-Materials auf die Klebfestigkeit	.47
Abb. 5.11:Dehnungsmessung der Referenzprobe 3 kurz vor dem Bruch	.48
Abb. 5.12: Dehnungsmessung der ST_5_PEEK Probe 3 kurz vor dem Bruch	.48
Abb. 5.13: Dehnungsmessung der ST_10_PEEK Probe 3 kurz vor dem Bruch	.48
Abb. 5.14: Dehnungsmessung der ST_30_PEEK Probe 3 kurz vor Bruch	.49
Abb. 5.15: Dehnungsmessung der ST_10_PVDF Probe 4 kurz vor Bruch	.49
Abb. 5.16: Bruchbild der Referenzprobe 3	.49
Abb. 5.17: Bruchbild der ST_5_PEEK Probe 3	.50

Abb. 5.18: Bruchbild der ST_10_PEEK Probe 3 (Probe zur zugehörigen ARAMIS Auswertung)	51
Abb. 5.19: Bruchbild der ST_30_PEEK Probe 3 (Probe zur zugehörigen ARAMIS Auswertung)	51
Abb. 5.20: Bruchbild zur ST_10_PVDF Probe 3 (Probe zur zugehörigen ARAMIS Auswertung)	52
Abb. 5.21:Steifigkeitseinfluss auf das Surface Toughening mit einem ST-Streifen von 5mm Breite	54
Abb. 5.22: Zugscherfestigkeitsveränderung durch Auslagerung bei Feuchtigkeit	55
Abb. 5.23: Klebschichtdicke vor der Auslagerung einzelner, für die Auslagerung relevanten, Probenreihen	55
Abb. 5.24: Dehnungsmessung der trockenen Referenz Probe 3	56
Abb. 5.25: Dehnungsmessung der ausgelagerten Referenz Probe 3	56
Abb. 5.26: Bruchbild zur trockenen Referenz Probe 3	57
Abb. 5.27: Bruchbild zur ausgelagerten Referenz Probe 3	57
Abb. 5.28: Dehnungsmessung zur trockenen ST_10_PEEK Probe 3	58
Abb. 5.29: Dehnungsmessung zur ausgelagerten ST_10_PEEK Probe 3	58
Abb. 5.30: Bruchbild der trockenen ST_10_PEEK Probe 3	58
Abb. 5.31: Bruchbild der ausgelagerten ST_10_PEEK Probe 3	59
Abb. 5.32: Dehnungsmessung zur trockenen ST_10_PVDF Probe 4	60
Abb. 5.33: Dehnungsmessung zur ausgelagerten ST_10_PVDF Probe 3	60
Abb. 5.34: Bruchbild der trockenen ST_10_PVDF Probe 4	60
Abb. 5.35: Bruchbild der ausgelagerten ST_10_PVDF Probe 3	61
Abb. 5.36: Klebschichtdicke der verwendeten Klebstoffe	62
Abb. 5.37: Untersuchungen von temperaturbedingten Eigenspannungen auf das Prinzip des Surface Toughenings	62
Abb. 5.38: Festigkeitssteigerung des Surface Toughenings mit dem Klebstoff EA9394	63
Abb. 5.39: ARMAIS-Auswertung der Referenz Probe 3 mit dem warmverklebten EA9695 Klebstoff kurz vor dem Bruch nach von Mises	64
Abb. 5.40: ARAMIS-Auswertung der Referenz Probe 3 mit dem kaltverklebten EA9394 Klebstoff kurz vor dem Bruch nach von Mises	64
Abb. 5.41: Bruchbild der Referenz 3 mit dem warmverklebten Klebstoff EA9695	64
Abb. 5.42: Bruchbild der Referenz 3 mit dem kaltverklebten Klebstoff EA9394	65
Abb. 5.43: ARAMIS-Auswertung der ST_10_PVDF Probe 4 mit dem EA9695 Klebstoff kurz vor dem Bruch nach von Mises	66
Abb. 5.44: ARAMIS-Auswertung der ST_10_PVDF Probe 3 mit dem EA9394 Klebstoff kurz vor dem Bruch nach von Mises	66
Abb. 5.45 Bruchbild der ST_10_PVDF Probe 4 mit dem Klebstoff EA9695:	67

Abb. 5.46: Bruchbild der ST_10_PVDF Probe 3 mit dem Klebstoff EA939467
Abb. 5.47: Bruchbild der ST_10_PVDF Probe 6 mit dem EA9394 Klebstoff68
Abbildung C.1: Klebstoffdicke der warmverklebten Probenreihen mit EA9695 C-1
Abbildung C.2: Klebstoffdicke der kaltverklebten Probenreihen mit EA9394C-1
Abbildung C.3: Festigkeitsverteilung über die gesamte Fügeteilbreite aller trocken geprüften ProbenreihenC-2
Abbildung C.4: Festigkeitsverteilung über die gesamte Fügeteilbreite aller ausgelagerten ProbenreihenC-2
Abbildung C.5: Festigkeitsverteilung über die gesamte Fügeteilbreite aller kaltverklebten ProbenreihenC-3
Abbildung D.1:ARAMIS – Auswertung nach Mises der Referenz Probe 3 kurz vor BruchD-1
Abbildung D.2: ARAMIS – Auswertung nach Mises der ST_5_PEEK Probe 3 kurz vor BruchD-1
Abbildung D.3: Dehnungsmessung nach Mises der ST_5_EA9695 Probe 3 kurz vor BruchD-1
Abbildung D.4: Dehnungsmessung nach Mises der ST_5_PVDF Probe 3 aus 2018 kurz vor BruchD-1
Abbildung E.1: Übersicht der Bruchbilder der Referenz Probe 1 bis 6 von oben nach unten E-2
Abbildung E.2: Übersicht der Bruchbilder der ST_5_EA9695 Probe 1 bis 6 von oben nach unten E-2
Abbildung E.3: Übersicht der Bruchbilder der ST_5_PEEK Probe 1 bis 6 von oben nach unten E-3
Abbildung E.4: Übersicht der Bruchbilder der ST_10_PEEK Probe 1 bis 6 von oben nach unten E-3
Abbildung E.5: Bruchbilder der ST_10_PVDF Proben 1 bis 6 von oben nach unten
Abbildung E.6: Bruchbilder der ST_30_PEEK Proben 1 bis 6 von oben nach unten
Abbildung E.7: Bruchbilder der Ref_wet Probe 1 bis 6 von oben nach unten E-5
Abbildung E.8: Bruchbilder der ST_10_PEEK_wet Probe 1 bis 6 von oben nach unten
Abbildung E.9: Bruchbild der ST_10_PVDF_wet Probe 1 bis 6 bon oben nach unten E-6
Abbildung E.10: Bruchbild der Ref_kalt Probe 1 bis 6 von oben nach unten E-6
Abbildung E.11: Bruchbild der ST_10_PVDF_kalt Probe 1 bis 6 von oben nach unten

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Materialkennwerte der untersuchten PVDF-Folie Kynar® 740 (s. Anhang A.3)	19
Tabelle 2.2: Eigenschaften im Vergleich: PVDF und PEEK [Dom08, S. 620 ff., S. 984 ff., Belage 1]	25
Tabelle 3.1: Parametervariation der Prüfreihen	27
Tabelle 3.2: Materialkennwerte der verwendeten PVDF-Folie, NOWOFLON, der Firma NOWOFOL (s. Anhang A.4)	31
Tabelle 3.3: Materialkennwerte der verwendeten PEEK Folie, LITE TK, der Firma LITE GmbH (s. Anhang A.5)	31
Tabelle 3.4: Übersicht aller Probenbeschriftungen	34
Tabelle 4.1: Daten der genutzten Prüfanlage, Zwick 1476	39
Tab. B.1: Messwerte Referenz	B-1
Tab. B.2: Messwerte ST_5_EA9695	B-1
Tab. B.3: Messwerte ST_5_PEEK	B-1
Tab. B.4:Messwerte ST_10_PEEK	B-2
Tab. B.5: Messwerte ST_10_PVDF	B-2
Tab. B.6: Messwerte ST_30_PEEK	B-2
Tab. B.7: Messwerte Ref_wet	B-3
Tab. B.8: Messwerte ST_10_PEEK_wet	B-3
Tab. B.9: Messwerte ST_10_PVDF	B-3
Tab. B.10: Messwerte Ref_kalt	B-4
Tab. B.11: Messwerte ST_10_PVDF_kalt	B-4
Tab. B.12:Schubspannungsberechnung Referenz	B-4
Tab. B.13: Schubspannungsberechnung ST_5_EA9695	B-5
Tab. B.14: Schubspannungsberechnung ST_5_PEEK	B-5
Tab. B.15: Schubspannungsberechnung ST_10_PEEK	B-5
Tab. B.16: Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF	B-6
Tab. B.17: Schubspannungsberechnung ST_30_PEEK	B-6
Tab. B.18: Schubspannungsberechnung Ref_wet	B-6
Tab. B.19: Schubspannungsberechnung ST_10_PEEK_wet	B-7
Tab. B.20: Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF_wet	B-7
Tab. B.21: Schubspannungsberechnung Ref_kalt	B-7
Tab. B.22: Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF_kalt	B-8
Tab. B.23: Messwerttabelle inkl. x und s des Dickenvergleichs	B-8
Tab. B.24: Messwerttabelle aus 2018 inkl. x und s des Dickenvergleich	B-9

Tab. B.25: Messwerttabelle inkl. x und s des Steifigkeitseinflusses 1 B-	-9
Tab. B.26: Messwerttabelle inkl. x und s des Steifigkeitseinflusses 2B-1	10
Tab. B.27: Messwerttabelle inkl. x und s des Steifigkeitsvergleichs der ST_5ProbenreihenB-1	10
Tab. B.28: Messwerttabelle inkl. x und s des Feuchtigkeitseinflusses 1 B-1	11
Tab. B.29: Messwerttabelle inkl. x und s des Feuchtigkeitseinflusses 2 B-1	11
Tab. B.30: Messwerttabelle inkl. x und s des Temperatur Einflusses beim KlebprozessB-1	12
Tab. B.31: Berechnung der Klebstoffdicke der warmverklebten Probenreihen mit EA9695 1B-1	12
Tab. B.32: Berechnung der Klebstoffdicke der warmverklebten Probenreihen mit EA9695 2B-1	13
Tab. B.33: Berechnung der Klebstoffdicke der warmverklebten Probenreihen mit EA9695 3B-1	13
Tab. B.34: Berechnung der Klebstoffdicke der kaltverklebten Probenreihen mit EA9394B-1	13

Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	belastete Fläche	mm ²
F	Kraft	N
Fm	maximale Kraft	N
G _{hK}	Schubmodul des hartelastischen Klebstoffs	N/mm²
G _{zK}	Schubmodul des zähelastischen Klebstoffs	N/mm²
	Überlappungslänge	mm
Mb	Biegemoment	N/mm ²
n	Anzahl Prüfkörper	
S	Standardabweichung	
Tg	Glasübergangstemperatur	°C
Tm	Schmelztemperatur	°C
w	Fügeteilbreite	mm

Griechische Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\sigma_{von Mises}$	Vergleichsspannung nach von Mieses	N/mm ²
σ_{χ}	Spannungskomponente in x – Richtung	N/mm ²
σ_y	Spannungskomponente in y – Richtung	N/mm ²
σ_z	Normalkraft	N
τ	Schubspannung	N/mm ²
$ au_b$	Klebfestigkeit	N/mm ²
$ au_{arepsilon}$	Schubspannung durch Fügeteildehnung	N/mm ²
τ_{ν}	Schubspannung durch Fügeteilverschiebung	N/mm ²

τ_{xy}	Schubspannungskomponente	N/mm²
\overline{x}	arithmetischer Mittelwert	
x _i	Messwerte	

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
2K	Zwei Komponenten
3D	Dreidimensional
ADP	Atmosphärendruckplasma
CF	Kohlefaser
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DCB	Double-Cantilever Beam
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
ECHO	Evaluation of a Certified HLFC Elevator Operation
E-Modul	Elastizitätsmodul
eV	Elektronenvolt
Fb	Faserbruch
FBL	Flugzeugbau-Laminat
FKV	Faserkunststoffverbund
НАР	High Altitude Platform
HAPS	High Altitude Pseudo Satellite
HLFC	Hybrid Laminar Flow Control
m	Meter
MSV	Mehrschichtverbund
nm	Nanometer
PEEK	Polyetheretherkethon
РЕКК	Polyetherkethonkethon
PVDF	Polyvenylidenfluorid

QI	Quasiisotrop
SLS	Single Lap Shear
ST	Surface Toughening
TEN	Tension
Ti	Titan
UD	Unidirektional
VUV	Vakuum-Ultraviolett
Xe	Xenon
Zfb	Zwischenfaserbruch

1 Einleitung

Damit Kommunikationsnetze ausgebaut und Erdbeobachtungen präziser, sowie kurzfristige Einsätze möglich werden, sollen High Altitude Platforms¹ (HAP) in Zukunft vermehrt zum Einsatz kommen. Diese in der Stratosphäre fliegenden Ballons oder Flugzeuge agieren autonom. Sie sollen zur Unterstützung der Satelliten dienen und ihre laufenden Kosten durch einen Solarbetrieb selber tragen. Durch die Möglichkeit des Landens, können HAPs umgerüstet und ausgebessert werden und versprechen eine lange Lebensdauer. [vgl. Wid06, Moh11]

Ein ausschließlicher Solarbetrieb wird dann ermöglicht, wenn das Gewicht und der Luftwiderstand minimiert und die Effizienz des Antriebs maximiert werden. [vgl. Sra13] Das von der EU geförderte Projekt *"ECHO"* (Evaluation of a Certified HLFC Elevator Operation) untersucht die Minimierung des Treibstoffverbrauchs, durch eine Reduzierung des Reibungswiderstands am Höhenleitwerk von Flugzeugen. [vgl. Esc18] Um eine glatte Außenhülle mit minimalem Luftwiderstand und kleinem Gewicht zu fertigen, erlangen Klebverbindungen mit der Zeit eine größere Priorität.

1.1 Problemstellung

Der Bedarf an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) in der Luft- und Raumfahrtindustrie steigt jährlich. [vgl. Sau19] Neben dem geringen Gewicht können CFK - Strukturen extremen Umweltbedingungen standhalten. [vgl. Sür07] Um die herausragenden Eigenschaften des CFKs zu erhalten, wird darüber hinaus ein geeignetes Fügeverfahren benötigt. Klebverbindungen sind ein vielversprechendes Verfahren solche Hochleistungsverbindungen herzustellen. In den Randzonen von genutzten Überlappungsklebungen entstehen jedoch hohe Spannungsspitzen, die zum Versagen führen können. Aus diesem Grund wird nach Methoden geforscht, die es erlauben CFK Bauteile mit geringen Spannungsspitzen bei erhöhter Festigkeit zu verkleben. Diese Arbeit befasst sich mit zähmodifizierten Klebverbindungen², die es erlauben CFK Fügeteile mit geringeren Spannungsspitzen aber erhöhter Festigkeit zu verkleben. Durch dieses Klebprinzip konnte bisher eine Festigkeitssteigerung von 85 % erzielt werden. [vgl. Sol18]

¹ Je nach Entwickler werden diese Höhenflugzeuge auch High Altitude Pseudo Satellite (HAPS) genannt.

² Engl. Surface Toughening (ST)

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist ein besseres Verständnis der zähmodifizierten Klebverbindung zu erlangen und die Einsatzmöglichkeit bei bestimmten Umweltbedingungen nachzuweisen. Aus diesem Grund werden Materialeigenschaften und Umweltbedingungen variiert. In einer vorrausgegangenen Studie von Schollerer wurde bislang die PVDF-Folie Kynar[®] 740 untersucht [vgl. Sol18]. Als nächster Schritt soll nun eine dünnere PVDF-Folie des Herstellers NOWOFOL validiert werden. Darüber hinaus werden neue Erkenntnisse über den Einfluss der Steifigkeit des zähmodifizierenden Werkstoffs auf die Klebverbindung erlangt, indem Klebverbindungen mit PEEK geprüft werden. Um einen Aufschluss über den Einfluss der Feuchtigkeit zu erlangen wird zudem eine hydrothermische Auslagerung angewandt. Das Funktionsprinzip des zähmodifizierenden Werkstoffs wird mithilfe eines kaltaushärtenden Klebstoffs und eines niedrig temperierten Klebprozess überprüft und soll die Wirkung von thermischen Eigenspannungen auf die Klebverbindung einschätzbar gestalten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um einen Überblick über den Aufbau der Arbeit zu erlangen, wird in Abb. 1.1 die Vorgehensweise grafisch abgebildet. In der Einleitung wird Bezug auf die Motivation der Arbeit genommen und die Zielsetzung geschildert. Eine Literaturrecherche spiegelt den aktuellen Stand der Forschung wieder und nimmt Bezug auf alle zum Verständnis notwendigen Schritte und Begriffe. In der Methodik wird vorab ein geeignetes Prüfverfahren ausgewählt, die Probengeometrie festgelegt und ein Prüfplan erstellt. Darüber hinaus werden wichtige Kennwerte der verwendeten Materialien und Maschinen genannt und die Prüfkörperpräparation beschrieben. Die Auswertung der Ergebnisse nimmt Bezug auf Prüfmesswerte, Bruchbilder und die über ein Bildkorrelationsprogramm erfasste Dehnung. Anschließend wird die Erkenntnis der Auswertung in aufgestellten Thesen zusammengefasst und in der Diskussion nochmals in Bezug zu anderen Forschungen überprüft. Abschließend wird der Inhalt der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen gegeben.



Abb. 1.1: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Nach einer kurzen Einführung in die Thematik der Arbeit wird nun mithilfe einer Literaturrecherche Bezug auf den aktuellen Stand der Forschung genommen. Wie in Kapitel 1.1 erläutert werden für den Anwendungsbereich der Luftfahrt entsprechende Verbindungsmethoden benötigt.

Im Allgemeinen gibt es drei unterschiedliche Arten Bauteile miteinander zu verbinden, durch Formschluss (z. B. Verzahnen), durch Kraftschluss (z. B. Verschrauben) und durch Stoffschluss (z. B. Verschweißen). Dabei wird bei stoffschlüssigen Verbindungen die Zugabe eines gesonderten Werkstoffs benötigt. [vgl. Hab16]

Zur Art der stoffschlüssigen Verbindung gehört auch die Klebverbindung. Durch das Verkleben können unterschiedliche Werkstoffe und Geometrien stoffschlüssig verbunden werden. [vgl. Doo18, S. 9] Ein Vorteil ist, dass dieser Prozess im Vergleich zum Nieten oder Schweißen ohne Wärmebeeinflussung der Fügeteile ablaufen kann. Der Klebstoff schützt die Klebflächen außerdem vor Spalt- und Kontaktkorrosion und erzielt gute dynamische Festigkeiten sowie Dämpfungseigenschaften der Verbindung. [vgl. Bro05, S. 2] Eine Klebverbindung ermöglicht im Leichtbau mit Faserverbundstrukturen zusätzlich einen kompletten Erhalt der Struktur. Hingegen müssen für Bolzen-, Niet- und Schraubenverbindungen Löcher in die Bauteile gebohrt werden, die vor allem bei CFK-Strukturen ein erhebliches Problem darstellen. Das Durchtrennen der Fasern stört den Kraftfluss des CFKs und mindert die Belastungsfähigkeit. [vgl. Hin13, S. 184]

Nachteilig bei Klebverbindungen sind die begrenzte Warmfestigkeit und die mögliche Veränderung der Klebeigenschaften nach Langzeiteinsätzen. Es wird zusätzlich ein präzises Einhalten der Fertigungsschritte gefordert, da zerstörungsfreie Prüfverfahren nur bedingt möglich sind. [vgl. Bro05, S. 2]

2.1 Klebverbindungen



Abb. 2.1 Begriffe einer einfachen Überlappungsklebung [vgl. Hab16, S. 5]

Die Klebverbindung ist die Verbindung von Fügeteilen durch Klebstoff und wird auch Klebung genannt. In einer einfachen Überlappungsklebung werden zwei Fügeteile, wie in Abb. 1.1 dargestellt, verklebt, indem Klebstoff auf die Klebfläche aufgetragen wird. Das Volumen zwischen den Klebflächen wird Klebfuge genannt und ergibt sich aus dem Produkt der Klebfläche und der Klebschicht. [vgl. Hab16, S. 4]

Als Klebstoff bezeichnet, wird nach der DIN EN 923 ein "nichtmetallischer Stoff, der Fügeteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann" [vgl. Hal21].

Dabei ist Kohäsion, die innere Festigkeit des Klebstoffs, dafür verantwortlich, dass der Klebstoff nicht auseinanderreißt (Abb. 2.2.). Jeder flüssige und feste Stoff hat Kohäsionskräfte. Je stärker diese innere Festigkeit ist, desto formbeständiger ist der Stoff [vgl. Hab16, S. 76]. Die Kohäsionskraft ist somit klebstoffspezifisch und kann lediglich durch den Klebstoffauftrag, die Aushärtetemperatur und -zeit beeinflusst werden. [vgl. Hal21]

Die Adhäsion ist der Grund, weshalb ein Klebstoff auf der Oberfläche des Fügeteils haften kann. In der Grenzschicht (Abb. 2.2) kommt es zu atomaren und zwischenmolekularen Wechselwirkungen. Damit dieser Vorgang ablaufen kann, muss der Klebstoff in die Oberfläche einfließen. [vgl. Doo18, S. 10] Die sogenannte Benetzung ist die Fähigkeit einer Flüssigkeit mit Festkörpern Grenzschichten zu bilden. Um diese Grenzschicht auszubilden, muss der Klebstoff einen geringen Abstand von maximal einem Nanometer zur Fügeteiloberfläche haben. Das Benetzungsverhalten geht zudem mit der Oberflächenspannung des Fügeteils, sowie der Viskosität des Klebstoffes einher. [vgl. Hal21, Bro05, S. 11 f.]



Abb. 2.2 Adhäsions- und Kohäsionskräfte in einer Klebung [vgl. Hab16, S. 76]

Somit wird eine perfekte Klebung durch das optimale Ausnutzen von Adhäsions- und Kohäsionskräften erzielt. [vgl. Hal21]

2.2 Oberflächenvorbehandlung bei Kunststoffen und Kunststoffverbunden

Eine gut benetzbare Oberfläche (s. Abb. 2.3) ist in der Regel nicht von vorneherein gegeben, sondern muss durch eine adäquate Oberflächenbehandlung geschaffen werden.



Abb. 2.3: Benetzungsarten von Flüssigkeiten auf Oberflächen [Hab16, S.73]

Dazu werden drei Arten der Oberflächenvorbehandlung angewandt, die mechanische, physikalische und chemische Oberflächenbehandlung (s. Abb. 2.4).

Die wichtigsten mechanischen Oberflächenvorbehandlungen sind das Schleifen, Vor Bürsten, Schmirgeln und Strahlen. und nach der mechanischen Oberflächenvorbehandlung muss die Oberfläche zudem gut gereinigt und entfettet werden, damit sich keine Rückstände auf der Oberfläche verteilen. Diese Art der Vorbehandlung dient räumlichen Annäherung Fügeteilpartner. zur der [vgl. Hab16, S. 81, Hal21]



Abb. 2.4 Unterteilung der Oberflächenbehandlungen [vgl. Hab16, S. 78]

Die physikalische und chemische Vorbehandlung der Oberfläche gilt hingegen der Oberflächenmodifizierung [vgl. Doo18, S. 51]. Mit dieser Methode ist es erst möglich schwer klebbare Werkstoffe wie Kunststoffe klebbar zu gestalten und die Adhäsionskräfte für hochbeanspruchte Klebungen zu verstärken. [vgl. Hab16, S. 83] Als letzter Schritt kann eine Oberflächennachbehandlung erfolgen. Durch die Nachbehandlung soll die in den Vorbehandlungsschritten erzielte Haftvermittlung zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche über längere Zeit erhalten oder nochmal verbessert werden. Des Weiteren sorgt eine Oberflächennachbehandlung dafür, dass sich die Oberfläche sich nach dem Verkleben nicht mehr verändert und ein effektiver Schutz gegenüber Umweltbedingungen wie Unterwanderungskorrosion geboten wird. [vgl. Hab16, S. 85 ff.]

Allgemein sind Oberflächenbehandlungen im Klebprozess ausschlaggebend dafür, dass der Prozess eine gute Reproduzierbarkeit erlangt und langzeitbeständiger wird. [vgl. Hal21]

Das Oberflächenvorbehandlungsverfahren richtet sich im Allgemeinen nach dem Fügeteilwerkstoff, dem Klebstoff und den erwarteten Beanspruchungen im Gebrauch sowie dem aktuellen Zustand der Fügeteiloberflächen und den Richtlinien für Arbeitsund Umweltschutz. Nach der Vorbehandlung sollte sofort verklebt werden, um mögliche neue Verunreinigungen sowie das Schwinden der Oberflächenenergie zu vermeiden. [vgl. Hal21]

Kunststoffe und Faserkunststoffverbunde (FKV) werden nasschemisch mit organischen Lösungsmitteln oder durch eine wässrige Lösung von Fetten und polaren sowie unpolaren Verunreinigungen befreit. Wichtig dabei ist, dass das Lösungsmittel dem Kunststoff durch mögliches Aufquellen oder Auslösen von Spannungsrissen nicht schadet. [vgl. Doo18, S. 46]

Auch bei Kunststoffen kann eine mechanische Vorbehandlung ausgeführt werden. Dieser Prozessschritt ist vor allem dann von Vorteil, wenn durch den Herstellungsprozess ungewollte Störungen auf der Oberfläche vorliegen. Eine ungewollte Spritzhaut bei Spritzgussteilen, eine Häufung von Formtrennmitteln oder Oberflächenanreicherungen stören die innere Festigkeit des Kunststoffes und können nach dem Klebprozess zu Sollbruchstellen führen, bei dem der Kunststoff Belastungen nicht standhält. Die mechanische Behandlung eignet sich nicht der Verbesserung der funktionellen Oberfläche und ist nur für Duromere und bedingt für Elastomere geeignet. Für Thermoplaste führt das Verfahren zu einer vergrößerten Neigung zur Riss- und Spannungsrissbildung und ist somit ungeeignet. [vgl. Doo18, S. 48]

Aufgrund des molekularen, thermodynamischen, bzw. morphologischen Zustands der Kunststoffoberfläche befinden sich auf der dieser wenig funktionelle Gruppen, welche sich auch in der schlecht verklebbaren Oberfläche wiederspiegeln. Durch eine chemische und physikalische Vorbehandlung wird die Kunststoffoberfläche "aktiviert", das heißt es werden polare Gruppen gebildet, die für eine gute Benetzung des Klebstoffs notwendig sind. Nur mit den reaktiven, polaren Gruppen an der Kunststoffoberfläche kann eine Wechselwirkung mit den Klebstoffmolekülen stattfinden. [vgl. Doo18, S. 10]

Physikalische Vorbehandlungsmethoden sind vorrangig für Kunststoffe geeignet [vgl. Bro05, S. 111]. Es gibt verschiedene physikalische Vorbehandlungsmethoden, die sich durch unterschiedliche Wirkprinzipien auszeichnen. Aufgrund der Dimension an Wirkprinzipien wird in der vorliegenden Arbeit nur auf die wichtigsten Vorbehandlungsmethoden eingegangen.



Abb. 2.5: Atmosphärendruck-Plasmaerzeuger [vgl. Hab06, S. 664]

Eine Behandlung durch Plasma bewirkt eine Aktivierung der Oberfläche aufgrund des Aufbrechens chemischer Bindungen. So wird die Reaktivität des Kunststoffs, durch Erzeugen von reaktiven Gruppen an der Oberfläche, verbessert und eine gute Benetzbarkeit erzielt. [vgl. Hab16, S. 132] Wird einem neutralen Gas Energie von außen zugeführt, spalten sich Elektronen von den Gasmolekülen ab und es entsteht Plasma. Dieses Plasma enthält positive Ionen, die von freien Elektronen und zum Teil neutralen Atomen und Molekülen umgeben sind. [vgl. Bar10, S. 1] Bei der Methode des Atmosphärendruckplasmas (ADP) wird über einen Plasmajet ein fokussierter Plasmastrahl auf die Substratoberfläche gelenkt. Ein Grundlagenschema des ADPs wird in Abb. 2.5 dargestellt. Nachteilig bei dieser Methode ist die hohe thermische Belastung zwischen 150 °C und 300 °C auf der Oberfläche, die bei diesem Prozess entstehen kann. [vgl. Met17, S. 42]

Eine im Gegensatz zum ADP flächendeckende Vorbehandlungsmethode mit geringer thermischer Belastung wird durch eine Vorbehandlung mit Vakuum-Ultravioletter-Strahlung (VUV - Strahlung) erzielt. VUV - Strahlung wird durch das Nutzen einer Excimer - Lampe bereitgestellt und der Aufbau in Abb. 2.6 wiedergegeben. Excimer steht dabei für "excited Dimer", also angeregte Dimere und Moleküle. Durch eine hochfrequente Spannungsquelle werden die in der Lampe befindlichen Edelgasmoleküle in einen metastabilen Zustand gehoben. [vgl. Leu21] Diese Dimere hochenergetischen Plasmaentladungen, führen zu welche innerhalb von Nanosekunden wieder in ihren Grundzustand dissoziieren. In diesem Prozess wird die VUV - Strahlung emittiert. Durch eine Variation des Edelgases kann die emittierte Wellenlänge und die damit entstehende Photonenenergie variiert werden. [vgl. Oni21]. In der Regel wird Xenon verwendet. Die von Xenon emittierte Wellenlänge liegt bei 172 nm mit einer Photonenenergie von 7,2 eV. Diese energetische Strahlung kann organische Moleküle auf der Oberfläche aufbrechen und zum Teil Oxidschichten lösen, wodurch Schichten mit deutlich besseren Bindungseigenschaften freigelegt werden. Durch die Strahlung werden zudem die auf der Oberfläche befindlichen Moleküle verändert und es entsteht eine Oberfläche mit höherer Elektronegativität. Diese Elektronegativität führt zu einer Aktivierung, welche in einem steigenden Benetzungsgrad resultiert (s. Abb. 2.3). Die Vorteile dieser Vorbehandlungsmethode liegen bei einem niedrigen Temperaturunterschied während der Behandlung und einer einfachen Integration in die Produktionskette. Da die hochenergetische Photonenstrahlung bei Kontakt mit der Atmosphäre für die Zersetzung von Sauerstoff verbraucht wird, beträgt der effektive Bestrahlungsabstand nur wenige Millimeter. [vgl. Oni21, Kaw20, S. 3]



Abb. 2.6: Aufbau einer VUV - Excimer - Lampe [Oni21, Rie20]

2.3 Mehrschichtverbunde

Die Fügeteile für den Klebprozess werden in dieser Arbeit aus einem Faserkunststoffverbund (FKV) gefertigt. Ein FKV besteht aus Faserlagen und einer bettenden Kunststoff - Matrix. Die Faserlagen bestehen aus einer unidirektional (UD) ausgerichteten Schicht bei der alle Fasern idealerweise gerade und parallel, also gleichmäßig und ohne Unterbrechung verlaufen. Zusätzlich werden die idealisierten Annahmen getroffen, dass mehrere UD-Schichten optimal aufeinander haften und keine Verschiebungen der einzelnen Schichten an den Grenzflächen auftreten. Das Aufschichten mehrerer UD - Faserlagen wird Mehrschichtverbund (MSV) bzw. Laminat genannt. [Sür07, S. 14]

Das typische Flugzeugbau - Laminat (FBL) wird genutzt, um einen überwiegend ebenen Spannungszustand im Leichtbau entgegenzuwirken. Es wird mit dem Laminattyp (0 / ±45 / 90) gearbeitet. Bei dem FBL werden die + 45° und – 45° Schichten immer gleich dick gewählt, damit keine Dehnungs-Schiebungs-Kopplung vorliegt und sich das Laminat als Scheibe orthotrop verhält. Damit ebenfalls die Scheiben-Platten-Kopplung entfällt, wird zusätzlich eine mittensymmetrische Schichtung erzeugt. Eine optimale Festigkeit wird mit diesem Laminataufbau durch eine Schichtdickenänderung zu den verschiedenen Faserausrichtungen erreicht, demzufolge müssen drei Schichtdicken optimiert werden. Werden alle Schichtdicken des FBL gleich gewählt, führt dies zu einem Sonderfall, bei dem sich das Laminat unter Scheibenbelastung isotrop verhält. Diese Art des MSV wird auch als Quasiisotropes-Laminat (QI-Laminat) bezeichnet. [vgl. Sür07, S. 243 f.]

2.4 Versagensarten von Überlappungsklebungen

Ob die Vorbehandlungsmethode eine ausreichende Adhäsionsfestigkeit erzielen konnte, lässt sich im Bruchbild der Klebung erkennen.

Es gibt verschiedene Versagensarten von Klebverbindungen, welche in Abb. 2.7 abgebildet werden. [vgl. Hab06, S. 372]. Die Unterteilung der Bezeichnungen richten sich nach der Bruchursache der Klebverbindung und ist unabhängig vom Klebstoff und den Fügeteilen. So zeigt ein Adhäsionsbruch das Versagen der Adhäsionskräfte, bei dem die Klebschicht komplett von der Fügeteiloberfläche gelöst ist. Bei dem Adhäsionsbruch kann die Klebschicht ganz bleiben oder sich stückweise brechen und von beiden Fügeteilen gelöst sein. Ein Kohäsionsbruch zeigt das Versagen der Klebschicht, die Klebschicht bricht, aber die Verbindung zu den Fügeteilen ist auch nach dem Bruch noch gegeben. Eine Kombination aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch weist Stellen eines Grenzschicht- und Klebschichtversagens auf. Als letzte Versagensart kann das Bauteil unter Belastung brechen.



Abb. 2.7: Versagensarten von Klebverbindungen [vgl. Hab06, S. 373]

Da in dieser Arbeit mit FKV-Fügeteilen gearbeitet wird, sind zusätzliche Unterteilungen des Fügeteilversagens zu erläutern. Bei Faserverbundfügeteilen kann es neben einem klassischen Fügeteilbruch zum Versagen der Faserschichten kommen. Die sogenannte Delamination oder im Fall des Versagens der ersten Faserlage das Fist Ply Failure wird in Abb. 2.8 veranschaulicht. [vgl. Ast99].



Abb. 2.8: Fügeteilversagen bei Faserverbundwerkstoffen [vgl. Ast99]

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Kohäsionsbruch angestrebt, also das Versagen der Klebschicht. Ein Adhäsionsbruch hingegen ist ein Indiz für eine nicht ausreichend behandelte Oberfläche der Fügeteilpartner. Bei einem Fügeteilbruch gibt es aufgrund des verwendeten CFK-Laminats mehrere Versagensmöglichkeiten. Bei einer Überbelastung der Fasern in Faserrichtung wird die Kohäsivfestigkeit der Fasern überschritten und die Fasern zerrissen. Der Faserbruch (Fb) äußert sich im Versagen von einzelnen Fasern über Faserbündeln bis hin zum Bruch des gesamten Laminats. In der Regel versagt jedoch zuerst die Matrix des Faserverbunds, welches sich meist in Zwischenfaserbrüchen (Zfb) äußert. In diesem Fall erstreckt sich der Riss entlang der Faserrichtung. [vgl. Sür07, S. 346]. Es kann auch zu einer Delamination, also einer Schichtentrennung der einzelnen CFK - Lagen im Laminat kommen. Da diese

Versagensart flächig auftritt und nicht in Faserlängsrichtung verläuft, wird die Delamination gesondert zum Zfb betrachtet. [vgl. Sür07, S. 385] Delaminationen sind unerwünscht, weil sie gravierenden Einfluss auf das Laminat haben. Der Entstehungsgrund ist häufig ein auftretender Zfb (s. Abb 2.9).



Abb. 2.9: Zwischenfaserbruch mit Delaminationsentstehung [vgl. Sür07, S. 386]

Da innerhalb dieser Arbeit ebenfalls das Kunststoffversagen von Bedeutung ist, wird zusätzlich noch auf den Weißbruch eingegangen. Der Weißbruch ist eine Vorstufe des endgültigen Bruchs und entsteht bei einer lokalen Überdehnung des Kunststoffs in den plastischen Bereich. Dabei werden die Kunststoffmoleküle ausgerichtet und in Kraftrichtung gedehnt. Die Festigkeit des Materials wird bei diesem Vorgang gesteigert, die Verformung selbst ist dabei irreversibel. [vgl. Wei18, S. 519]

2.5 Prüfverfahren

Verschiedene Prüfverfahren geben Aufschluss auf unterschiedliche Kennwerte einer Klebverbindungen. Eine Prüfung unter betriebsnahen Bedingungen bietet die beste Bewertungsgrundlage, jedoch ist diese Vorgehensweise kostenintensiv und bietet in der Regel keine Übertragung auf weitere Anwendungsfälle. Aus diesem Grund werden standardisierte Prüfverfahren an vereinfachten, bauteilähnlichen und im kleineren Maßstab angefertigten Proben durchgeführt. Wenn Prüfkörper über ihre Belastungsgrenze hinaus beansprucht werden sollte neben den gemessenen Festigkeitsparametern ebenfalls das Bruchbild dokumentiert werden. [vgl. Bro05, S. 125]

Die Prüfverfahren werden im Allgemeinen in zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren unterteilt. Dabei können zerstörende Prüfverfahren statische, dynamische oder hochdynamische Belastungen simulieren. [vgl. Hab06, S. 782] Die Prüfung der Klebfestigkeit ist ein statisches Prüfverfahren und bestimmt die Zugscherfestigkeit (single lap shear (SLS)) hochfester Überlappungsklebungen, bei der eine einfach überlappende Klebverbindung geprüft wird. [vgl. Hab16, S.152, f., Hab06, S. 782, f.] Die Norm DIN EN 1465 definiert die Klebfestigkeit τ_b als den Quotienten der Höchstkraft F_m und der Klebfläche A, s. Formel [1] in Kapitel 3.1. Dabei ergibt sich die Klebfläche A aus dem Produkt der Fügeteilbreite w und der Überlappungslänge l, s. Formel [2] in Kapitel 3.1.

Weiterhin kann über reine Schubversuche die charakteristische Festigkeit der Klebschicht ermittelt und über reine Zugversuche eine Beurteilung der Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften von Klebstoffen getroffen werden. Zusätzlich gibt es noch Prüfungen zu Schälwiderstanden, Druckbelastungen und Torsionsbelastungen sowie Spalt- und Biegebelastungen. Die zuletzt aufgezählten Prüfverfahren sind für diese Arbeit jedoch nicht von Relevanz. [vgl. Hab06, S. 785, ff., Bro05, S. 128, ff.]

Dynamische Prüfverfahren simulieren eine zyklische Belastung und geben unter anderem Aufschluss auf die Zugschwellbeanspruchung [vgl. Hab06, S. 793, f.]. Dynamische Prüfverfahren werden im Folgenden jedoch nicht betrachtet.

Um Langzeitbeanspruchungen zu simulieren werden Kurzzeitprüfungen durchgeführt. Auf Originalbedingungen kann aufgrund kurzer Entwicklungs- und Produktionszyklen nicht zurückgegriffen werden. Die Kurzzeitprüfungen bieten eine Möglichkeit unter geringem Zeitaufwand dem Verhalten der Praxis nahe zu kommen.

Eine Prüfung zum Langzeitverhalten soll Feuchtigkeitsvorgänge in der Klebverbindung darstellen. Es kann zur Feuchtigkeitsdiffusion in der Klebschicht und auch in den Faserverbund-Fügeteilen kommen. Es resultieren Quellvorgänge der Polymermatrix. "Diese Beanspruchung wird durch gleichzeitig einwirkende Wärme verstärkt, sodass in der Praxis die "Feucht - Wärme" - Beanspruchung mit jeweils definierter Feuchtigkeitskonzentration (Wasserlagerung bzw. relative Luftfeuchtigkeit) und definierter Temperatur eingesetzt wird." [Hab06, S.796, f.] Weitere Kurzzeitprüfungen Beanspruchung durch korrosive Medien eine testen eine und Temperaturwechselbeanspruchung.

2.6 Spannungsverteilung in einer Klebschicht

Neben zu geringen Adhäsions- und Kohäsionskräften kann ein ungünstiger Spannungsverlauf ebenfalls zu einem frühzeitigen Versagen der Klebverbindung oder zu Rissbildungen in der Klebschicht führen.



Abb. 2.10: Spannungen einer belasteten Überlappungsklebung [vgl. Hab16, S. 154]

Die in einer zugscherbelasteten Überlappungsklebung auftretenden Spannungen sind in Abb. 2.10 dargeboten. Durch eine der Überlappung zuzuschreibenden exzentrisch angreifenden Kraft F entsteht ein Biegemoment M_b. Jenes erzeugt durch die wachsende Normalkraft σ_z eine vergrößerte Zugbelastung auf die Klebschicht. Zusätzlich verschieben sich die Fügeteile und werden auseinandergezogen. Diese Fügeteilverschiebung erzeugt homogene Schubspannungen τ_v , die parallel zur Klebfläche wirken. Durch die exzentrisch angreifende Kraft F entsteht darüber hinaus eine Verformung der Fügeteile an den Überlappungsenden (s. Abb. 2.11). Diese elastische Längsdehnung in dem Bereich der Überlappung führt zu Zug- und Schubspannungen τ_{ε} parallel zur Klebfläche, welche sich hauptsächlich auf die Randzone der Klebschicht auswirken. [vgl. Hab16, S. 153]



Abb. 2.11: Dehnungsveränderung bei belasteter Klebverbindung [vgl. Sür07, S. 571]

Bei einer zugscherbelasteten Überlappungsklebung dehnt sich vor allem der duktilere Klebverbindung. Die Überlagerung der angreifenden

Spannungsursachen führt zu den in Abb. 2.12 gezeigten Spannungsspitzen an den Randzonen der Klebschicht. Dementsprechend erfahren die Klebschichtränder die höchsten Belastungen, welche eine Rissbildung mit sich führen. Die Beanspruchung der Klebschicht ist somit über die Überlappungslänge inhomogen. Bei einer Vergrößerung der Überlappungslänge kann die Klebverbindung somit keine linear zur Vergrößerung wachsende Kraft aushalten. [vgl. Wie07, S. 785, Sür07, S. 587]



Abb. 2.12: Schubspannungsverläufe bei einer belasteten Überlappungsklebung [vgl. Wie07, S. 785]

Ab einer bestimmten Kraft setzt auch das plastische Fließverhalten des Klebstoffs ein. Würde ein Klebstoff unendlich elastisch sein, so würden auch die Spannungsspitzen an den Randzonen in das Unendliche wachsen (s. Abb. 2.12). In der Theorie fängt der Klebstoff jedoch ab einem bestimmten Punkt an ideal plastisch zu fließen und eine Schubspannungsverlagerung zu bewirken. Ab dieser Kraft stagnieren die Spannungsspitzen. In der Praxis ist die Klebverbindung jedoch nicht homogen und es stellt sich der Abb. 2.13 dargestellte Spannungsverlauf Die in ein. Schubspannungsverteilung ist abhängig von den Klebstoffeigenschaften. Je höher die Bruchfestigkeit, die Bruchverformung sowie die Eigenschaft des plastischen Fließens und ie niedriger das Schubmodul, desto besser ist das Schubspannungs - Gleitungs - Verhalten Klebschicht. [vgl. Wie07, S. 785: der Sür07, S. 587] Durch eine längere Überlappung und somit auch einer größeren Klebfläche lassen sich Normalspannungen reduzieren [vgl. Hab06, S. 447]. Die im mittleren Bereich auftretenden Schubspannungen sinken. Die versagensinitiierenden Spannungsspitzen an den Überlappungsenden bleiben jedoch bei allen Überlappungslängen identisch. [vgl. Sür07, S. 581].



Abb. 2.13: Schubspannungsverlauf bei belasteter Überlappungsklebung [vgl. Sür07, S. 587]

2.7 Festigkeitssteigerung durch Spannungsreduktion

Kleine Variablen in Betracht auf die Spannungsverteilung sind die Klebschichtdicke und die Überlappungslänge einer Überlappungsklebung. Dabei wird durch die Optimierung beider Komponenten keine signifikante Festigkeitssteigerung erreicht, vielmehr werden ungünstige Spannungsverteilungen und einhergehende Festigkeitsreduzierungen vermieden.

Die Klebschicht sollte immer ein homogenes Mischverhältnis haben. Bei pastösen zwei - Komponenten - Klebstoffen (2K - Klebstoffe) ist demnach auf ein vom Hersteller angegebenes Mischungsverhältnis zu achten. Bei Filmklebstoffen kann dieser Punkt vernachlässigt werden, da das richtige Mischverhältnis vom Hersteller eingestellt wird. Damit eine gleichmäßige Klebschichtdicke entsteht, müssen beide Fügeteile vor dem Aushärteprozess fixiert werden, sodass eine in Abb. 2.14 visualisierte, gleichmäße Druckverteilung auf die Klebschicht wirkt.



Abb. 2.14: Druckaufbringung bei der Härtung von Klebstoffen [vgl. Hab16, S. 94]

Durch die Klebschichtdicke können zudem ungewollte Spannungen vergrößert werden. Je dicker die Klebschichtdicke gewählt ist, desto größer wird die Exzentrizität der Kraft F und somit auch das angreifende Biegemoment M_b. Es kommt bei Belastung vermehrt zu interlaminarem Versagen. [vgl. Doo18, S. 133] Je dünner die Klebschicht gewählt wird, desto eher besteht die Gefahr der Fügeteilberührungen und der daraus resultierenden Kerbspannungen in der Klebschicht. Zusätzlich wird bei einer zu geringen Klebschichtdicke die Querkontraktion behindert. Diese wiederum ist wichtig für die Festigkeit der Klebschicht und nimmt mit zunehmender Klebschichtdicke ab. Demzufolge muss eine optimale Klebschichtdicke gefunden werden, bei der die Klebfestigkeit am größten ist. Die Abb. 2.15 zeigt die Kurve zwischen Klebstoffdicke und Klebfestigkeit, aus der eine optimale Klebschichtdicke zwischen 0,05mm und 0,2mm gefolgert werden kann. [vgl. Hab06, S. 443 f.]



Abb. 2.15: Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke [vgl. Hab06, S. 444]

Damit eine Klebverbindung eine größere Last aufnehmen kann, müssen entsprechend nach Kapitel 2.6 die Spannungsspitzen an den Überlappungsenden reduziert werden. Um diesen Ansatz umzusetzen, gibt es unter anderem die Möglichkeit der Gradientenklebung. Mit diesem Verfahren kommen zwei unterschiedliche Klebstoffe zum Einsatz. An den Überlappungsenden soll die hohe Spannungskonzentration durch einen Klebstoff mit niedrigerem Schubmodul gesenkt werden. Im Mittenbereich der Klebung hingegen soll ein hartelastischer Klebstoff mit hohem Schubmodul eingebracht werden, um die Lastaufnahme der Klebverbindung nicht zu verringern. Diese Art der Verklebung führt zu einer gezielten Spannungsumlagerung in der Klebschicht. Der neue Schubspannungsverlauf ist in Abb. 2.16 visualisiert.

Eine weitere Möglichkeit der Spannungsspitzensenkung erfolgt durch eine Veränderung der Klebgeometrie. Mit einer keilförmige Klebfuge (s. Abb. 2.17) kann eine größere Klebstoffanhäufung an den Randzonen bei ansonsten stetiger Klebschichtdicke erreicht werden. Die Klebstoffanhäufung an den Überlappungsenden

führt lokal zu einer größeren Schubnachgiebigkeit und bietet ebenfalls eine Spannungsspitzensenkung. [vgl. Sür07, S. 601]



Schubmodul G_{zK} < Schubmodul G_{hK}



Wird bei dem Klebprozess der Klebstoff herausgedrückt, so entsteht an den Fügeteilenden, wie in Abb. 2.17 veranschaulicht, eine Kehle aus Klebstoff. Diese Kehle bewirkt wie auch die keilförmige Klebfuge eine Spannungsspitzensenkung. Damit bei der Kleberkehle jedoch keine Kerbwirkung mit einhergehender induzierter Kerbspannung auftritt, die wiederum zu früherem Versagen führt, sollten die Fügteilenden stark verrundet werden. [vgl. Sür07, S. 601]



Abb. 2.17: Klebgeometrien zur Spannungsspitzensenkung [vgl. Sür07, S. 601]

Eine neue Möglichkeit der Festigkeitssteigerung über die Spannungsspitzenreduzierung bietet das Einbringen eines zähmodifizierenden Werkstoffs in die Fügeteile an den Überlappungsenden (s. Abb. 2.18). Die Oberflächenzähmodifikation festigt die Klebverbindung lokal an den eingebrachten Stellen des zähmodifizierenden Werkstoffs. Eine nicht benötigte mechanische Bearbeitung des Fügeteils und ein Aushärtvorgang ohne weitere äußere Einwirkungen stellen Vorteile dieses Prozesses dar. [vgl. Sol18] Als zähmodifizierendes, duktiles Material wurde bislang in Voruntersuchungen am DLR eine 0,125 mm dicke PVDF-Folie genutzt. Der Hochleistungsthermoplast PVDF zeichnet sich durch einen sehr niedrigen E-Modul und eine große Bruchdehnung aus [vgl. Löl16, S. 51]. Weitere wichtige Kennwerte sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Tabelle 2.1: Materialkennwerte der untersuchten PVDF-Folie Kynar® 740 (s. Anhang A.	.3))
---	-----	---

Parameter	Wert	Einheit
E-Modul	1700	N/mm²
Reißdehnung	≥ 50	%
Festigkeit	50	N/mm²
Glasübergangstemperatur Tg	- 40	°C
Schmelztemperatur T _m	168	°C

Diese Eigenschaften sind ausschlaggebend für die Spannungsreduzierung an den Überlappungsenden der Klebverbindung und wird auch Surface Toughening (ST) genannt.



Abb. 2.18: Aufbau und Spannungsverlauf einer Surface Toughening Klebung [vgl. Sol18]

Die bisher in der Forschung angewandten Fügeteile waren aus einem FKV, mit CFK - Fasern und einer Epoxidharzmatrix. Aus diesem Grund können die Thermoplaststreifen vor dem Aushärteprozess auf das Laminat aufgelegt werden. So werden die ST-Streifen durch den Aushärtevorgang unter Vakuum in das Material gedrückt und fest mit der Oberfläche verbunden. Dabei entstehen Epoxidharztaschen an den Rändern des ST - Streifens, sodass das Laminat, inklusive dem eingearbeiteten ST - Streifen, eine glatte Oberfläche bildet (s. Abb. 2.19).



Abb. 2.19: Detailaufnahme Surface - Toughening

Durch den zweiten Temperaturzyklus beim Verkleben durchläuft das PVDF die Phasen des Ausdehnens und Zusammenziehens. Die Temperatur beläuft sich dabei unterhalb des Schmelzpunkts des PVDFs. Bei der höchsten Temperatur erfährt das PVDF die größte Ausdehnung und verbindet sich mit dem Klebstoff. Nach dem Aushärteprozess wird die Temperatur auf Raumtemperatur abgekühlt und das PVDF zieht sich zusammen (s. Abb. 2.20). Es bilden sich thermisch bedingte Eigenspannungen im Material.



Abb. 2.20: Temperaturauswikung auf den PVDF-Streifen im Laminat mit und ohne Klebstoff
Weitere Untersuchungen, zu der Breite des ST-Streifens (s. Abb. 3.7), haben ergeben, dass Klebungen mit einer PVDF-Streifenbreite von 10 mm, die größte Festigkeitssteigerung erzielen. [vgl. Lei18, S. 48]

Zur Übersicht zeigt Abb. 2.22 die erzielten Festigkeitswerte unterschiedlicher Klebverbindungen. In dem Diagramm werden verschiedene Klebgeometrien betrachtet, die aufgrund gleichbleibender Prüfkörpergeometrie und Materialien sowie Prozessparameter und Klebstoff verglichen werden können. Eine Veranschaulichung der Klebgeometrien ist in Abb. 2.21 gegeben, zusätzlich wird die in Abb. 2.18 gezeigte Klebmethode mit einer ST-Streifenbreite von 10mm unter dem Namen "Surface Toughening PVDF 10mm" hinzugezogen. Die geprüften Klebgeometrien wurden in einem Zugscherversuch angelehnt an die ASTM - D5868 Norm getestet. [vgl. Lei18]





Die Ergebnisse zeigen, dass das Surface Toughening mit einer Festigkeitssteigerung von ungefähr 85% zur Referenz die größte Festigkeitssteigerung der geprüften Klebgeometrien erzielt.



Abb. 2.22: Festigkeitssteigerungen von Klebverbindungen im Vergleich [vgl. Lei18]

Das duktile Material hat die Fähigkeit Spannungen lokal zu reduzieren. Es kann gezielt dort angebracht werden, wo Spannungsspitzen gesenkt werden sollen, weswegen dieses Prinzip auch als das in Abb. 2.24 gezeigte Rissstoppkonzept eingesetzt werden kann. Somit bietet dieses Verfahren eine maximale Begrenzung der auftretenden Schädigung. [vgl. Löl16]



Abb. 2.23: erstes Konzept der hybriden Klebschicht als Rissstoppkonzept mit Spannungsverlauf [vgl. Löl16]



Abb. 2.24: Rissstoppkonzept mit Rissfortbildung [vgl. Sol18]

Dafür wurde in ersten Versuchen zusätzlich zu den Lagen in den Fügeteilen zwei weitere Lagen PVDF mittig der Überlappung platziert (s. Abb. 2.23). Diese Kunststoffstreifen verschweißen während des Aushärteprozesses des Klebstoffs bei 180 °C aufgrund des niedrigen Schmelzpunkts des PVDFs von 167 °C. [vgl. Löl16] Weitere Prüfungen haben ergeben, dass der Riss bereits bei den PVDF-Streifen in den Fügeteilen gestoppt wird, was wiederum durch den Schubspannungsverlauf in Abb. 2.23 sichtbar. [vgl. Sol18, S. 4]

2.8 Temperatur- und Feuchtebeständigkeit von Thermoplasten

Für das Surface Toughening werden bisher ausschließlich Hochleistungsthermoplaststreifen genutzt. Damit der Einfluss von Umweltbedingungen auf das Surface Toughening besser untersucht und verstanden werden kann, wird im Folgenden auf Temperatur- und Feuchtebeständigkeit bestimmter Thermoplaste eingegangen.

"Thermoplaste bestehen aus langen, fadenförmigen, wenig verzweigten, unvernetzten Polymermolekülen. [...] Unterhalb der Glasübergangstemperatur, auch als Erweichungstemperatur bezeichnet, verhalten sich Thermoplaste aufgrund der Vander-Waals-Wechselwirkungen und evtl. Wasserstoffbrückenbindungen hart, spröde

und brüchig (glasartiger Zustand)." [Fel17, S. 560 f.] Ein Erwärmen oberhalb der Schmelztemperatur T_m bringt Thermoplaste in den plastischen Bereich und lässt sie schmelzen. Bei einigen Thermoplasten bilden sich im Abkühlvorgang kristalline, also geordnete, Bereiche. Diese Thermoplaste werden teilkristalline Thermoplaste genannt. Eine weitere Unterordnung sind die amorphen Thermoplaste mit ungeordneten Molekülen. Die amorphen Thermoplaste können nur bis zur Glastemperatur eingesetzt werden, wohingegen die teilkristallinen Thermoplaste bis in Bereich Schmelztemperatur T_m den der eingesetzt werden können. [vgl. Wei18, S. 369] Durch ein viskoelastisches Verhalten ist der E-Modul der Polymere keine Materialkonstante. Der E-Modul ist stark abhängig von der Temperatur und der Dehngeschwindigkeit. [vgl. Wei18, S. 22] Des Weiteren sind einige Polymere der Lage geringe Mengen an Luftfeuchtigkeit aufzunehmen. Die in Feuchtigkeitsaufnahme lässt die Polymere aufguellen und führt zu einer Vergrößerung des Volumens. [vgl. Wei18, S.374] Durch die Feuchtigkeitsaufnahme wird außerdem das plastische Verhalten mancher Kunststoffe beeinflusst. [vgl. Wei18, S. 513]

Hochleistungsthermoplaste können für härtere Bedingungen eingesetzt werden. Fluorkunststoffe, wie PVDF und Teflon, zeigen eine herausragende Chemikalienbeständigkeit. Hingegen können aromatische Ketone, wie PEEK und PEKK einer hohen Dauergebrauchstemperatur standhalten. [vgl. Ret17, S. 1]

Ein Feuchtigkeitseinfluss auf ein geklebtes Polymer, bzw. das Eindringen von Wasser in die Grenzfläche eines verklebten Polymers, wirkt sich allgemein negativ aus und führt eine Schwächung der Klebung herbei. Der Grund sind die sehr kleinen Wassermoleküle, die aufgrund ihres starken Dipolcharakters mit den polaren Gruppen des Polymers in Konkurrenz treten. Die Wassermoleküle brechen durch ihren starken Dipol die Bindungen der Grenzschicht auf und lösen das Polymer vom Fügepartner. Dieses Phänomen spiegelt sich in einer verringerten Adhäsionskraft wider. [vgl. Löb19, S. 25]

Das bisher für die zähmodifizierte Klebverbindung genutzte PVDF zeichnet sich zusätzlich zur herausragenden Chemikalienbeständigkeit durch eine hohe mechanische Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit, auch bei tiefen Temperaturen, sowie einer guten Temperaturbeständigkeit aus. Die Steifigkeit hängt dabei stark von dem thermischen Verlauf und der Fertigung ab. Wird das PVDF nach einem Temperaturzyklus langsam abgekühlt oder bei 135 °C wärmebehandelt, so erlangt das Material einen hohen kristallinen Gehalt mit einer resultierenden größeren Steifigkeit. Der Temperaturanwendungsbereich liegt zwischen - 60 °C und + 150 °C. Übersteigt die Einsatztemperatur die 150 °C, so schwindet die Einsatzzeit rapide. Bei einer Temperatur bis zu 260 °C ist PVDF noch 12 h beständig, bei einer Temperatur bis zu

340 °C beträgt die Beständigkeitsdauer nur noch 6h. Ab einer Temperatur von 480 °C erfolgt eine Zersetzung des Materials in wenigen Sekunden. [vgl. Dom08, S. 620 ff.] Die allgemeine Feuchtigkeitsaufnahme von PVDF beträgt in einer Umgebung mit Raumtemperatur binnen 24 h nur einen Massenprozentanteil von 0,04 %-Massengehalt [vgl. Dom08, S. 623]. Swozil berichtet allerdings von einer großen Schrumpfspannung, die das PVDF durch Abkühlen nach einem hohen Temperaturzyklus erfährt. Durch die resultierende Abspannkraft, die dickenabhängig Wasserdampfgemisch hat sich laut ist. und einem Swozil die PVDF - Folienbeschichtung eines Einspritzkondensators nach 11 Monaten bei 80 °C, ohne Druckbelastung, vollkommen gelöst. [vgl. Swo80]

Der teilkristalline Thermoplast PEEK ist mit einer Glasübergangstemperatur Tg von 143 °C Schmelztemperatur Tm von 334 °C nicht und einer nur sehr temperaturbeständig, PEEK zeichnet sich außerdem durch eine gute Schlagzähigkeit, Biege- und Zugfestigkeit, sowie eine gute Wechselfestigkeit aus und hat eine gute Chemikalien- und Strahlenbeständigkeit. Eine Hydrolysebeständigkeit von PEEK ist auch bei 280 °C warmen Wasser und 18 bar noch gegeben. Innerhalb von 24 h bei Raumtemperatur weißt PEEK eine Wasseraufnahme von 0,5 %-Massengehalt auf. [vgl. Dom08, S. 983 f.] Zur Auslagerung von verklebten Titan und PEEK, beschreibt Schulze eine deutlich verbesserte Langzeitstabilität der Adhäsion in feuchtwarmer Umgebung. Für diese Erkenntnis wurde eine 0,1 mm dicke PEEK-Folie in das Ti-CF / PEEK-Laminat eingelassen. Zur Ausbildung ausreichender Adhäsionskräfte wurde das Titanblech vorbehandelt. Um eine hydrothermische Alterung zu simulieren, wurde ein Teil der Proben für 28 Tage in 80 °C warmen deionisiertem Wasser Prüfungen nach Mixed-Mode-Bending Versuchen ausgelagert. zeigen eine Verschlechterung der Energiefreisetzungsrate nach der Auslagerung um ca. 21 %. Durch eine zusätzliche Untersuchung der Oberfläche ist festgestellt worden, dass nach der Auslagerung der Anteil der makromechanischen Adhäsion reduziert wurde und die mikromechanische Adhäsion überwiegt. Jene ist verantwortlich für die verbesserte Langzeitstabilität von adhäsiven Verbindungen in feuchtwarmer Umgebung. [vgl. Sul14]

Um eine bessere Übersicht über die Eigenschaften der beiden Hochleistungsthermoplaste PVDF und PEEK zu erlangen werden diese in der Tabelle 2.2 zusammengefasst.

	Einheit	PVDF	PEEK
Zugfestigkeit	N/mm²	46	92
Reißdehnung	%	100 bis 400	50
Zug-E-Modul	N/mm²	840	3650
Schmelztemperatur	°C	171	334
Glasübergangstemperatur	°C	-40	143
Gebrauchstemperatur			
maximal kurzfristig	°C	180	300
maximal dauernd	°C	150	250
minimal dauernd	°C	-60	-100
Linearer Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	85	47
Wasseraufnahme (23°C, 24h)	%- Massengehalt	0,04	0,5
Chemikalienbeständigkeit	-	ausgezeichnet	sehr gut
Strahlenbeständigkeit	-	sehr gut	ausgezeichnet
Brennbar	-	selbsterlöschend	schwer enflammbar

Tabelle 2.2: Eigenschaften im Vergleich: PVDF und PEEK [Dom08, S. 620 ff., S. 984 ff., Belage 1]

3 Versuchsvorbereitung

In diesem Kapitel werden die verwendeten Materialien für die Probenfertigung aufgezählt und die Probenpräparation erläutert. Zusätzlich werden alle im Fertigungsprozess benötigten Anlagen und zur Prüfung relevanten Prüfmaschinen sowie Auswertungsprogramme beschrieben.

3.1 Methodik

Ein geeignetes Prüfverfahren, um die Klebfestigkeit τ_b der zähmodifizierten Klebverbindung zu ermitteln, bietet laut der Literaturrecherche in 2.4 der Zugscherversuch. Für diesen statischen Prüfversuch werden zwei Fügeteile überlappend verklebt. Dazu wird in der Literatur häufig die DIN EN 1465 mit Fügeteilbreite von w = 25mm und Überlappungslänge von I = 12,5mm empfohlen. Diese Norm ist jedoch für Fügeteil-Werkstoffe mit einem dem Aluminium ähnlichen E-Modul ausgelegt. [vgl. Doo18, S. 293] Da diese Arbeit primär, die in der Luftfahrtfahrt relevanten Rahmenbedingungen des Leichtbaus thematisiert, werden CFK-Fügeteile geprüft. Für FKV – Fügeteile legt die ASTM D5868 eine Fügeteilbreite von w = 25mm und eine Fügeteillänge von I = 25mm nahe [vgl. Ast14].

Dementsprechend werden Prüfkörper in Anlehnung an die ASTM – D5868 erstellt und geprüft. Die Prüfkörperbreite w und die Fügeteillänge I werden beide entsprechend der Norm 25mm lang gewählt. Die Gesamtlänge der Klebverbindung sollte sich in einem Bereich zwischen 300 mm und 400 mm befinden, damit eine freie Einspannlänge der Prüfmaschine von 170 mm gewährleistet ist.



Abb. 3.1: Probengeometrie

Für eine Fügeteildicke von 2 mm wird ein FBL (s. Kapitel 2.3) mit 16 Faserlagen gelegt, wobei eine ausgehärtete Faserlage eine Dicke von 0,125 mm ergibt (s. Anhang A.2). Eine konstante Lagendicke des FBLs führt zu dem Sonderfall des QI-Laminats, welches sich isotrop verhält.

Des Weiteren wird der Laminataufbau in dieser Arbeit nicht mit der 45° - Außenlage gestartet, wie es sonst in der Luftfahrt üblich ist. Aus früheren Versuchen von *Leichen* hat sich ergeben, dass bei der gewählten Probengeometrie die 45° - Fasern zu kurz sind, um die notwendige Prüflast aufnehmen zu können [vgl. Lei18]. Es folgt eine Delamination der ersten Faserlage (First Ply Failure). Deswegen wird die in Belastungsrichtung zeigende 0° Faserlage als Außenlage gewählt. [vgl. Sow18] Der Laminataufbau sieht wie folgt aus:

[0°/+45°/90°/-45°/0°/+45°/90°/-45°] s

Für die Versuchsdurchführung wird vorab ein Prüfplan erstellt.

Eine Probenreihe besteht aus jeweils sechs Prüfkörpern, damit eine Aussage über die Klebfestigkeit und die Homogenität der Klebfläche mittels Betrachtung der Standardabweichung getätigt werden kann. Die sechs Prüfkörper werden aus einer großen Klebverbindung zugeschnitten, weil dieser Prozess Material- und Anlagenkosten spart und einen kleineren Zeitaufwand umfasst. Eine große Klebverbindung für alle Prüfkörper bedingt jedoch, dass keine Aussage zur Widerholgenauigkeit getroffen werden kann.

Als Referenz dient eine Probenreihe ohne zähmodifizierenden Werkstoff verklebt.

Das in früheren Versuchen genutzte PVDF, Kynar[®] 740, hat mit einer Foliendicke von 0,125 mm und einer Folienbreite von 10mm eine maximale Festigkeitssteigerung von ungefähr 85 % erzielen können [vgl. Lei18]. Im Umfang dieser Arbeit soll eine weitere PVDF-Folie mit geringerer Dicke validiert werden, um die Wirkung der Surface Toughening Dicke auf die Klebfestigkeit herauszustellen. Andererseits dient dieser Schritt dem Aufschluss der Widerholgenauigkeit der zähmodifizierten Klebverbindung und soll zeigen, ob eine Möglichkeit der Materialreduktion des zähmodifizierenden Werkstoffs besteht. Dazu wird eine Foliendicke von 0,1 mm gewählt, was einer Dickenreduzierung von 20 % entspricht. Eine Probenreihe mit einer PVDF-Foliendicke von 0,1 mm und einer PVDF-Folienbreite von 10 mm wird zu diesem Zweck erstellt.

Neben dem PVDF soll in dieser Versuchsreihe auch PEEK als Surface Toughening Anwendung finden. PEEK ist aufgrund der guten Festigkeitseigenschaften mit einhergehender guter Duktilität und Warmfestigkeit ein ansprechender Werkstoff für die Luftfahrt. Im Vergleich zum PVDF hat PEEK einen höheren E-Modul und größere Festigkeit und Warmfestigkeit.

Die Umweltbedingungen einer feuchten Umgebung auf die zähmodifizierte Klebverbindung soll durch eine hydrothermale Auslagerung für 14 Tage in einem Klimaschrank bei 70° C und 85 % Luftfeuchtigkeit nachgestellt werden. Für diese Prüfreihe wird zusätzlich eine Referenzreihe ohne zähmodifizierenden Werkstoff ausgelagert.

Probenreihe	Parametervariation				
	ST	ST-Material	ST-Breite	Klebstoff	Auslagerung
1	nein	-	-	EA 9695	-
2	ja	EA 9695	5 mm	EA 9695	-
3	ja	PEEK	5 mm	EA 9695	-
4	ja	PEEK	10 mm	EA 9695	-
5	ja	PVDF	10 mm	EA 9695	-
6	ja	PEEK	30 mm	EA 9695	-
7	nein	-	-	EA 9695	14 Tage
8	ja	PEEK	10 mm	EA 9695	14 Tage
9	ja	PVDF	10 mm	EA 9695	14 Tage
10	nein	-	-	EA 9394	-
11	ja	PVDF	10 mm	EA 9394	-

Tabelle 3.1: Parametervariation der Prüfreihen

Eine Versuchsreihe mit einem kaltaushärtenden Klebstoff soll Aufschluss auf die Wirkung von wärmebedingten Eigenspannungen durch den Klebprozess liefern (s.

Abb. 2.20). Auch hier wird eine begleitende Referenzreihe unter geringer thermischer Belastung verklebt.

Die Tabelle 3.1 soll einen Überblick über die Parametervariation und Zuordnung der entsprechenden Probenreihe geben.

Damit eine aussagekräftige qualitative Auswertung der Prüfmesswerte erfolgen kann, muss die Klebfestigkeit τ_b berechnet werden. Die Schubspannung τ entsteht bei der Zugbelastung der Fügeteile, die eine Scherung der Klebschicht folgert (s. Abb. 3.2). Die Klebfestigkeiten der Probenreihen sollen in der Auswertung verglichen werden.

Die Schubspannung berechnet sich nach Kapitel 2.5 über den Quotienten der maximal angreifenden Kraft Fm und der Klebfläche [vgl. Sko14, S. 86]:

$$\tau_b = \frac{F_m}{A}$$
[1]

$$A = w \cdot l \tag{2}$$

mit

 F_m – maximal wirkende Kraft

A – belastete Fläche

w – Fügeteilbreite

l – Fügeteillänge



Abb. 3.2: Schubspannung in einer belasteten Überlappungsklebung

Das Zusammenfassen der Ergebnisse einer Probenreihe erfolgt über die Bildung des arithmetischen Mittels \bar{x} [vgl. Küt14, S. 30]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$
[3]

mit

n – Anzahl der Prüfkörper

 x_i – Messwerte

Eine erwartete Abweichung der Messwerte von dem Mittelwert lässt sich über die empirische Standardabweichung *s* berechnen. [vgl. Küt14, S. 51]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}, n \ge 2$$
[4]

mit n - Anzahl der Prüfkörper

 x_i – Messwerte

 \bar{x} – Mittelwert

Neben der Auswertung der Prüfmesswerte soll ebenfalls eine begleitende Aufnahme einer Probe aus jeder Probenreihe angefertigt werden. Die Aufnahme soll über ein Bildkorrelationsprogramm ausgewertet werden, welches die Vergleichsdehnung nach von Mises $\varepsilon_{von Mises}$ in der Klebverbindung betrachtet. Dazu werden alle mit dieser Methode geprüften Proben mit einem stochastischen Muster aus weißen und schwarzen Pigmenten besprüht. Die Vergleichsdehnung mit den Dehnungskomponenten von Mises wird analog zu der in [5] gegeben Vergleichsspannung von Mises berechnet [vgl. Bre18, S. 22, f.]:

$$\sigma_{von\,Mises} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \tau_{xy}^2}$$
[5]

mit $\sigma_{von Mises}$ – Vergleichsspannung nach von Mieses

 σ_x – Spannungskomponente in x – Richtung

 σ_v – Spannungskomponente in y – Richtung

 τ_{xy} – Schubspannungskomponente

Bei der Vergleichsmethode von Mises wird vom Auswertungsprogramm ein Änderungsvergleich der Pigmente mit den angrenzenden Pigmenten gezogen, eine große Veränderung des Pigments ist gleichzusetzten mit einer großen Dehnung. Durch den aufgenommenen Dehnungsverlauf kann im Teil der Auswertung auf die wirkende Spannung geschlossen werden. Des Weiteren werden, wie in Kapitel 2.5 empfohlen, die Bruchbilder dokumentiert und ausgewertet.

3.2 Materialdaten

In dieser Arbeit werden Materialien verwendet, die den Standards der Luftfahrtindustrie entsprechen. Das Grundmaterial der Fügeteile ist dabei immer das Hexply[®] 8552 IM7 Material der Firma Hexel. Das Material ist ein unidirektionales Kohlefaserprepreg, getränkt in einer Epoxidharzmatrix (s.Anhang A.2).

Der Aushärtezyklus des IM7 Prepregs im Autoklaven ist in Abb. 3.3 abgebildet. Dabei wird das Prepreg unter Vakuum bei einem Höchstdruck von 7 bar und einer maximalen Temperatur von 180 °C über sieben Stunden ausgehärtet.





Abb. 3.3: Autoklav-Zyklus Hexply 8552 IM7 (s.Anhang A.2)

Im Rahmen der Versuchsreihe werden zwei verschiedene Klebstoffe verwendet. Hauptsächlich wird der Strukturklebstoff Loctite EA 9695 Aero verwendet. Dieser Klebstoff ist ein warmaushärtender Filmklebstoff. Filmklebstoffe ermöglichen eine einfache Anwendung durch eine vorgegebene Klebschichtdicke und ein homogenes Mischverhältnis. Der Klebstoff wird in einem festen Zustand auf einem Fügeteil aufgetragen und verflüssigt sich bei einer bestimmten Temperatur, um sich mit den Fügeteilen zu verbinden. Der verwendete Filmklebstoff wird mit einer Dicke von 0,15 mm aufgetragen. Nach dem Aushärtezyklus im Vakuum unter 3 bar und einer Temperatur von 130 °C erzielt der Filmklebstoff eine Klebschichtdicke von 0,1 mm.

Zusätzlich wird Loctite EA 9394 Aero verwendet, ein pastöser, kaltaushärtender Zwei-Komponenten-Klebstoff (2K - Klebstoff). Dabei ist es wichtig darauf zu achten, dass ein homogenes Mischverhältnis aufgetragen wird und sich keine Lufteinschlüsse im Klebstoff bilden. Zusätzlich ist es von Bedeutung, dass die Klebschichtdicke richtig eingestellt wird, da diese nicht ,wie bei dem Filmklebstoff, vorgegeben ist. Der Klebstoff wird auf ein Fügeteil aufgetragen und nach dem Fügen bei einem bar Differenzdruck und 66 °C bei einer Stunde im Ofen ausgehärtet, um die Aushärtezeit von sieben Tagen bei Raumtemperatur auf eine Stunde zu verkürzen.

Um das Surface Toughening zu realisieren, wird auf das gelegte CFK - Laminat ein Kunststoffstreifen aufgelegt. Durch den Autoklav Zyklus wird der Kunststoffstreifen in das Laminat gedrückt und verbindet sich mit der Epoxidharzmatrix des MSVs. Deswegen ist eine Voraussetzung für den zähmodifizierenden Werkstoff das Ausbilden von Grenzschichten zum MSV und zum Klebstoff. Die relevanten Kennwerte der verwendeten ST-Folien aus PVDF und PEEK sind in den Tabellen 3.2 und 3.3 aufgeführt.

Parameter	Wert	Einheit
E-Modul [*]	1700	N/mm²
Reißdehnung	> 450	%
Festigkeit	> 35	N/mm²
Glasübergangstemperatur Tg*	-40	°C
Schmelztemperatur Tm	163	°C

Tabelle 3.2: Materialkennwerte der verwendeten PVDF-Folie, NOWOFLON, der Firma NOWOFOL (s. Anhang A.4)

			/ . . .
Tabelle 3.3: Materialkennwerte der verwendeten	PEEK Folie, LITE 1	K. der Firma LITE GmbH	(s. Anhang A.5)
	··· · · · · · · · · · · · · · · · ·	.,	()

Parameter	Wert	Einheit
E-Modul	3200	N/mm²
Reißdehnung	170	%
Festigkeit	130	N/mm²
Warmfestigkeit (150°C)	80	N/mm²
Glasübergangstemperatur Tg	143	°C
Schmelztemperatur T _m	343	°C

^{*} Werte wurden nicht vom Hersteller angegeben und wurden vom Kynar® 740 übernommen

3.3 Fertigungsprozess

Nach Kapitel 3.1 sollen Fügeteile erstellt werden, die ein Zuschneiden von sechs Prüfkörpern zulassen. Die Größe des Laminats variiert in den Abmaßen und ist in Abb. 3.4 visualisiert. Die Länge beträgt 390 mm, wohingegen die Breite variieren kann und entweder einen Wert von 418 mm oder 209 mm einnimmt. Aus einem 418 mm breiten Laminat werden entsprechend Abb. 3.5 vier Fügeteile für zwei Klebverbindungen zugeschnitten. Ein Materialzusatz ist in diese Abmaße bereits eingerechnet worden, damit nach dem mehrfachen besäumen und zuschneiden noch genug Material für das Zuschneiden der Prüfkörper vorhanden ist.



Abb. 3.4: Dimensionierung des Laminats und Platzierung der ST Streifen



Abb. 3.5: Zuschneiden des Laminats zu den Fügeteilen zweier Klebungen

Um eine gleiche Faserausrichtung beider Fügeteile zu erhalten, werden die Fügeteile aus einem Laminat gefertigt und wie in Abb. 3.6 gefügt. Bei den ST-Proben wird somit auf beiden Seiten auf verschiedenen Längen ein ST Streifen auf das Laminat aufgelegt.



Abb. 3.6: Verkleben der Fügeteile mit identischer Ausrichtung der Faserlagen

Je nach Surface Toughening Breite erfolgt eine spezifische Positionierung jener auf dem Laminat. Die verschiedenen Abmaße und Platzierungen auf den Fügeteilen sind in Abb. 3.7 dargestellt. Surface Toughening Streifen mit der Breite 5 mm und 10 mm werden symmetrisch zur Überlappung positioniert. Eine Surface Toughening Breite von 30mm hingegen erstreckt sich über die gesamte Klebfläche von 25 mm Länge und rangt zusätzlich 5mm über die Überlappungsklebung hinaus.



Abb. 3.7: Varianten des durchgeführten Surface Toughenings

Die Benennung der Proben erfolgt durch die in Abb. 3.8 dargestellte Nomenklatur. Dabei steht "DLR" als Abkürzung für das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und "JoinDT" für das zugehörige Projekt. Alle Proben sind Single Lap Shear "SLS"-Proben, die durch einen Zugscherversuch geprüft werden. Die darauffolgenden Buchstaben bezeichnen die Probenart. Differenziert wird zwischen "ST" für Surface -Toughening und "Ref" für Referenz. Falls es eine Surface Toughening Probe ist, bestimmt die nachstehende Zahl die Breite des ST-Streifens sowie die nachstehende Kunststoffbezeichnung das ST-Material. Das "kalt" in der Probenbeschriftung steht für den kaltaushärtenden pastösen Klebstoff. Wenn keine gesonderte Kennzeichnung zum Klebstoff vorhanden ist, wird die Probe mit dem warmaushärtenden Filmklebstoff verklebt. Bei einer hydrothermalen Auslagerung der Proben steht zusätzlich ein "wet" in der Probenbezeichnung. Die Zahl am Ende der Nomenklatur bezeichnet die laufende Probennummer und beläuft sich entsprechend der sechs Prüfkörper einer Probenreihe zwischen "1" und "6".



Abb. 3.8: Prüfkörperbezeichnung

Eine Übersicht aller Probenreihen ist in Tabelle 3.4 gegeben.

Probenreihe	Probenbezeichnung	Probenanzahl
1	DLR_JoinDT_SLS_TEN_Ref	6
2	DLR_JoinDT_SLS_TEN_ST_5_EA9695	6
3	DLR_JoinDT_SLS_TEN_ST_5_PEEK	6
4	DLR_JoinDT_SLS_TEN_ST_10_PEEK	6
5	DLR_JoinDT_SLS_TEN_ST_10_PVDF	6
6	DLR_JoinDT_SLS_TEN_ST_30_PEEK	6
7	DLR_JoinDT_SLS_TEN_Ref_wet	5
8	DLR_JoinDT_SLS_TEN_ST_10_PEEK_wet	6
9	DLR_JoinDT_SLS_TEN_ST_10_PVDF_wet	6
10	DLR_JoinDT_SLS_TEN_Ref_kalt	6
11	DLR_JoinDT_SLS_TEN_ST_10_PVDF_kalt	6

Tabelle 3.4: Übersicht aller Probenbeschriftungen

3.4 Prüfkörperpräparation

Für die Herstellung der Probekörper wird zunächst der Mehrschichtverbund aus Prepreg gelegt. Das Prepreg muss auf unterschiedliche Ausrichtungen und gleiche Größe zugeschnitten werden. Das Prepreg wird unter einer Temperatur von – 18 °C in einer luftdichten Verpackung gelagert, damit die Epoxidharzmatrix nicht frühzeitig aushärtet. Es ist wichtig, dass das Material rechtzeitig aus der Kühlung genommen wird, um mögliche Kondensationen in der Verpackung und somit Feuchtigkeit im Material zu vermeiden.

Damit die ST-Streifen auf das noch nicht ausgehärtete Laminat aufgelegt werden können, müssen auch diese zuerst zugeschnitten werden. Vor dem Andrücken muss der ST-Streifen oberflächenvorbehandelt werden (s. Kapitel 2.2). Um die Kunststoffe keiner thermischen Belastung auszusetzten. werden diese mit einer Xenon – Excimer - Lampe erzeugten VUV-Strahlung vorbehandelt. Damit keine unbekannten Störgrößen entstehen durchlaufen alle ST-Streifen den gleichen standardisierten Prozess einer DLR internen VUV-Anlage (s. Abb. 3.9). Dafür werden die Kunststoffstreifen auf einen Lineartisch gelegt und unter der Xe - Excimer - Lampe hindurchgefahren. Die Vorbehandlung erzeugt eine Oberflächenaktivierung von 540 mJ/cm² (135 mJ/cm² pro Durchgang bei vier Druchgängen) [Oni21].



Abb. 3.9: Aufbau der DLR internen VUV-Anlage

Auf die genaue Positionierung der ST-Streifen auf dem Laminat ist zu achten. Für den Aushärteprozess des Laminats werden alle gelegten Fügeteile mit Glasfaser-Rovings ausgestattet, damit die gesamte Luft aus dem MSV entweichen kann. Zusätzlich wird das Laminat für eine bessere Oberfläche in Trennfolie eingepackt und ein Deckblech aufgelegt. Der für die Laminate angewandte Vakuumaufbau wird in Abb. 3.10 veranschaulicht. Alle Fügeteile werden auf eine eingetrennte Stahlplatte gelegt und mit Siegelkit umschlossen, um ein mögliches Reißen des späteren Vakuumsacks zu vermeiden. Damit die Luft gleichmäßig entzogen werden kann, wird Abreißgewebe über die ganze Stahlplatte und die Laminate gelegt. Zusätzlich zu dem Abreißgewebe wird ein in Abreißgewebe eingepacktes Glasnadelfließ platziert, auf dem ein Vakuumteller aufliegt. Auf jenen Vakuumteller wird der Vakuumstutzen geschraubt, über den anschließend eine Vakuumpumpe die Luft evakuiert. Nach außen wird der Vakuumsack durch weiteres Siegelkit abgedichtet, welches am nicht eingetrennten Rand der Stahlplatte platziert wird. Schließlich wird die Vakuumfolie aufgelegt und gegen Luft abgedichtet (s.Abb. 3.11).



Abb. 3.10: Vakuumaufbau

Um Lufteinschlüsse im MSV zu vermeiden, ist es sinnvoll die gelegten Laminate für ein paar Stunden unter Vakuum ziehen zu lassen. So wird die restliche Luft dem MSV evakuiert. Der Aushärtungsprozess der Fügeteile im Autoklaven (s. Abb. 3.12) wird bei dem in Abb. 3.3 geschilderten Autoklav Zyklus vorgenommen.



Abb. 3.11: Vakuumaufbau nach Evakuation der Luft

Abb. 3.12: Autoklavgang

Die ausgehärteten Fügeteile werden entformt und besäumt. Vor dem Klebstoffauftrag wird die Klebfläche mit Atmosphärendruckplasma vorbehandelt (s. Abb. 3.13). Mit der standardmäßigen institutsinternen Parametrisierung fährt ein Roboterarm die Probe ab. Dabei entsteht eine gemessene Bruchzähigkeit durch den Double-Cantilever-Beam (DCB) Versuch von 1089 $\frac{J}{m^2}$. [Löl16, S. 112, f.]



Abb. 3.13: Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile durch Atmosphärendruckplasma

Wenn die Proben mit dem Filmklebstoff verklebt werden, wird der zugeschnittene Klebstoff von der Schutzfolie befreit und auf das Fügeteil aufgetragen. Werden die Fügeteile 2K-Klebstoff verklebt, so wird direkt nach der ADP-Behandlung der 2K-Klebstoff aufgetragen und die Klebschichtdicke über Abstandhalter aus Aluminiumfolie definiert. Der 2K - Klebstoff wird durch einen statischen Mixer zu einer homogenen Mischung vorbereitet und auf eines der Fügeteile aufgetragen.

Zur Einstellung der passenden Überlappungslänge werden die ausgehärteten Laminate vor der Oberflächenvorbehandlung angebohrt und mit Stiften zentriert (s. Abb. 3.14). Damit eine definierte Klebgeometrie entsteht werden nach dem Klebstoffauftrag Deckbleche aufgelegt und ebenfalls durch zwei Stifte fixiert. Dabei wird eine Seite des Deckblechs mit einem Langloch versehen, um die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten auszugleichen und ein Verbiegen/ Beulen der Klebung zu vermeiden. Alle Passstifte werden eingetrennt und zwischen Deckblech und Fügeteil eine Trennfolie platziert, um ein leichtes Entformen zu garantieren. Damit durch die Zentrierbohrungen für die Passstifte keine Schädigungen im Laminat auftreten, werden die Randbereiche entsprechend besäumt.



Abb. 3.14: Platzierung der Passstifte

Beide Klebstoffe werden unter Vakuum ausgehärtet. Dazu wird der in Abb. 3.15 präsentierte Vakuumsackaufbau vorbereitet. Die Klebungen mit dem Filmklebstoff werden anschließend im Autoklaven für 3 h unter einer Temperatur von 120 °C und einem Druck von 3 bar ausgehärtet. Im Ofen werden die 2K – Klebstoffproben über eine Zeitspanne von 3 h bei 66 °C ausgehärtet.



Abb. 3.15: Vakuumsackaufbau für Aushärteprozess des Klebstoffs

Nach dem Aushärteprozess werden alle Klebverbindungen besäumt und in die in Kapitel 3.2 erläuterte Probengeometrie zugeschnitten. Dabei ergeben sich pro Klebung die in Kapitel 3.1 definierten sechs Prüfkörper.

4 Versuchsdurchführung

Im Kapitel der Versuchsdurchführung werden die präparierten Proben für die Prüfung vorbereitet sowie der Prüfablauf geschildert.

Vor der Prüfung müssen alle Prüfkörper vermessen werden. Die Vermessungsdaten werden in einem firmeninternen Vermessungsprotokoll festgehalten (s. Anhang A.8). Zusätzlich werden drei Probenreihen, wie in Kapitel 3.1 festgelegt, vor dem Prüfen in einem Klimaschrank für 14 Tage bei 75°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % ausgelagert.

Parameter	Wert	Einheit
Traversengeschwindigkeit	1	mm/min
Maximalkraft	250	kN
Anpressdruck	150	bar
Freie Länge	75	mm
Vorspannkraft	50	Ν

Tabelle 4.1: Daten der genutzten Prüfanlage, Zwick 1476

Eine Auflistung der relevanten Prüfmaschinenparametern ist in Tabelle 4.1 aufgeführt. Für den Versuch wird eine Zwick 1476 mit einer Maximalkraft von 250 kN genutzt. Um ein gerades Einspannen trotz exzentrischem Kraftangriffspunkt der Prüfkörper gewährleisten zu können, werden die Fügeteilenden in zwei versetzte hydraulische Spannbacken eingespannt. Damit die Prüfkörper gerade eingespannt werden können, wird ein kleiner Anschlag in die Spannbacken geklebt. Ein schiefes Einspannen der Proben wirkt sich in auftretenden Einspannmomenten auf die Überlappungsklebung aus und bewirkt ein frühzeitiges, nicht aussagekräftiges Versagen der Klebung. Zusätzlich wirkt eine Vorspannkraft von 50 N auf die Überlappungsklebung, um mögliche Setzprozesse zu Prüfbeginn zu umgehen.

Darüber hinaus wird die Dehnung einer Klebung pro Probenreihe erfasst, weshalb eine kleine Traversengeschwindigkeit von 1 mm/min angewandt wird. Ermöglicht wird die Prüfung durch eine kontaktlose Verformungsmessung per digitaler Bildkorrelation. Dazu wird jeweils die dritte Probe einer Probenreihe mit einem kontrastreichen, stochastischen Muster aus Titandioxidpartikeln (weiß) und Eisenoxidpigmenten (schwarz) besprüht und mit einer Kamera aufgenommen. Durch das optische Auswertungsprogramm ARAMIS der Firma GOM wird durch eine Änderung des Musters die Dehnung erfasst. Zu große eintönige Bereiche im Muster erschweren das Erkennen lokaler Veränderungen. Die Dehnung gibt Aufschluss auf die in der Klebverbindung herrschende Spannung.



Abb. 4.1: Aufbau der Zugscherprüfung

Betrachtet wir ein Randbereich jeder geprüften Überlappungsklebung. Die Prüfkörper werden bis zur Mitte der Überlappung und 2 mm nach der Überlappung abgeklebt und mittels Airbrush mit dem Muster besprüht (s. Abb. 4.2). Die unbesprühten Randbereiche helfen bei der Orientierung und Platzierung des Bildausschnitts der Prüfaufnahmen. Zusätzlich gibt der freigelassene Ausschnitt der Prüfkörper Aufschluss auf die Einzellagen des MSV. So können auftretende Schädigungen des Laminats besser nachvollzogen werden.



Abb. 4.2: stochastisches Muster auf Überlappungsklebung

Für die Aufnahmen zur optischen Auswertung durch ARAMIS wird ein Bild pro Sekunde über eine Spiegelreflexkamera (Sony α 7R-III) aufgenommen. Das aufgesetzt Objektiv Canon MP 65 ermöglicht Aufnahmen mit einer maximal fünffachen Vergrößerung. Für weitere Aufnahmen, die nicht zur Dehnungsauswertung genutzt werden sollen, wird das Makroobjektiv Sony FE 90 mm f/28 genutzt. Zur Vergrößerung der Bildweite dient zusätzlich ein Zwischenring.

5 Versuchsauswertung

In der Versuchsauswertung werden die erzielten Prüfmesswerte, Dehnungsmessungen und Bruchbilder ausgewertet.

Anzumerken ist, dass in der Probenreihe Ref_wet ist der sechste Prüfkörper schief zugeschnitten worden ist, weswegen in dieser Probenreihe nur fünf Prüfkörper geprüft werden. In allen anderen Probenreihen werden jeweils sechs Prüfkörper getestet.

5.1 Voruntersuchung der Klebgeometrie

Optische Untersuchungen der nicht geprüften Randstücke, mit einem 3D-Laserscanning Mikroskop der Modellreihe VK-X3000 der Firma Keyence, zeigt die gewählte Klebgeometrie am Rand der Überlappung im Maßstab 1:5. In Abb. 5.1 ist zusätzlich die Anordnung des Klebstoffs und des ST-Streifens identifizierbar sowie nur wenig ausgelaufener Klebstoff, der die Prüfergebnisse nicht beeinflussen sollte.



Abb. 5.1: Randbereich eine ST_10_PEEK Probe

Die Abb. 5.2 zeigt neben der Klebschicht auch die Einbettung des ST-Streifens in dem CFK-Laminat. Durch die Einbettung entstehen Epoxidharztaschen, die mit dem

Surface Toughening und dem Faserverbund eine ebene Fläche ermöglichen (s. Abb. 2.19).



Abb. 5.2: Übergangsbereich des ST-Streifens mit Epoxidharztasche

5.2 Dickenvergleich

Ein Vergleich der Messwerte aus der Probenreihe ST_10_PVDF (s. Tabelle 3.4) im Vergleich zu der Versuchsreihe von Leichen aus 2018 soll Aufschluss auf den Dickeneinfluss des ST-Materials liefern und die Wiederholbarkeit der zähmodifizierten Es Klebverbindung überprüfen. werden Überlappungsklebungen mit einer einheitlichen Surface Toughening Breite von 10mm verglichen. Beide Versuchsreihen untersuchen den zähmodifizierenden Werkstoff PVDF, lediglich die Dicke und der Materialhersteller der Folien werden variiert. Dabei betrug die Dicke der PVDF-Streifen von 2018 0,125 mm. Im Umfang dieser Versuchsreihe wird eine Dicke der PVDF-Streifen von 0,1 mm geprüft. In beiden Versuchsreihen wurden in der Probenfertigung die identischen Schritte durchlaufen. Beide Referenzproben wurden ohne Surface Toughening verklebt. Dabei wurde nach Kapitel 3.1 vorgegangen, so dass über alle Proben einer Probenreihe die Klebfestigkeiten τ_h berechnet und der arithmetische Mittelwert sowie die Standardabweichung bestimmt werden. Alle Messwerttabellen und berechneten Klebfestigkeiten können dem Anhang B entnommen werden.



Abb. 5.3: Vergleich des Dickeneinflusses des ST- Materials auf die Klebfestigkeit

Die Abb. 5.3 zeigt die graphische Auswertung der berechneten Klebfestigkeitswerte. Es ist zu erkennen, dass beide Surface Toughening Dicken in der Anwendung der zähmodifizierten Klebverbindung eine ausgezeichnete Festigkeitssteigerung zur Referenz erzielen. Angemerkt werden muss, dass die Probenreihen aus dieser Versuchsreihe eine höhere gemittelte Klebfestigkeit vorweisen und eine deutlich kleinere Standardabweichung erreicht wurde. Über Berechnungen kann feststellt werden, dass die Klebfestigkeit der Referenzreihe dieser Versuchsreihe, im Vergleich zu der aus 2018, + 7,4 % größer ist. Dieser Festigkeitsunterschied kann an einer präziseren Herstellung oder an einer qualitativ besseren Oberflächenvorbehandlung bzw. schnelleren Verarbeitung nach der Oberflächenvorbehandlung liegen. Für beide **ADP-Prozess** Versuchsreihen wurde der gleiche DLR interne zu Oberflächenvorbehandlung durchgeführt, weshalb eine bessere Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile ausgeschlossen werden kann. Die leichte Festigkeitssteigerung spiegelt sich ebenfalls in der Surface Toughening Probenreihe mit der 0,1 mm ST-Streifendicke wieder. Im direkten Vergleich mit den ST Proben des 0,125 mm dicken PVDFs, lässt sich eine ähnliche gemittelte Festigkeitssteigerung von + 7,8% berechnen.

Die ähnliche prozentualen Festigkeitssteigerungen der Referenz- und ST-Reihen lässt auf keine signifikante Festigkeitssteigerung oder -abnahme schließen.

Diese Annahme wird durch die Abb. 5.4 und Abb. 5.5 bestätigt. In diesen Diagrammen werden die direkten Festigkeitssteigerungen zur jeweiligen Referenz deutlich. Dabei

erfährt das Surface Toughening mit dem 0,125mm dicken PVDF eine Steigerung der Klebfestigkeit von 184 % zur Referenz ohne Surface Toughening. Das 20 % dünnere Surface Toughening zeigt eine vergleichbare Klebfestigkeitssteigerung von 184,5 %.



Abb. 5.4: Festigkeitssteigerung durch Surface Toughening mit 0,125mm PVDF-Streifen



Abb. 5.5: Festigkeitssteigerung durch Surface Toughening mit 0,1 mm PVDF-Streifen

Der Einfluss auf die gemittelte Festigkeitssteigerung mit ca. + 0,5 % fällt sehr gering aus und kann in dieser Größenordnung vernachlässigt werden. Die allgemeine, übereinstimmende Festigkeitssteigerung der zähmodifizierten Klebverbindungen ist trotz des Materialunterschieds gegeben und lässt auf eine Wiederholbarkeit des Surface Toughenings schließen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass aufgrund der hohen Standardabweichung der Versuchsreihe aus 2018 nur schwer eine Aussage getroffen werden kann. Außerdem wurden Wechselwirkungen nicht mit einbezogen und diese Ergebnisse gelten ausschließlich für das Material PVDF und einer Veränderung der Dicke von 20 %. Es folgt die These:

Es gibt keine signifikante Festigkeitsveränderung durch eine Dickenänderung des zähmodifizierenden Werkstoffs um 20%.

Über die Bildkorrelation mit ARAMIS und dem Programm GOM Correlate werden die Verformungen in der Überlappungsklebung zweidimensional aufgenommen. Das Programm bestimmt die Veränderung des Musters und wertet unterschiedliche Dehnungen aus. Hier wird die Dehnung von Mises betrachtet und über eine globale Skala ausgewertet, um alle Aufnahmen vergleichen zu können. Alle Proben werden kurz vor dem Versagen dargeboten.

Die größte Dehnung erfahren die Randbereiche der Überlappungsklebung. Dies geht einher mit der im Kapitel 2.6 erläuterten Spannungsspitzenbildung an den Randbereichen der Klebschicht.



Abb. 5.7: ARAMIS-Auswertung der Referenz Probe 3 kurz vor dem Bruch nach von Mises

Einhergehend mit den Messergebnissen aus Abb. 5.3 lässt sich bei der Referenz aus 2018 eine im Vergleich zur Referenz dieser Arbeit leicht geringere Dehnung beobachten. Die roten Bereiche am Rand der Überlappungsklebung sind dabei die maximal gedehnten Bereiche und folglich auch die spannungsreichsten Bereiche in der Klebverbindung. Die Dehnung nimmt zur Mitte der Klebverbindung erheblich ab. Zusätzlich ist in Abb. 5.7 noch eine leichte Dehnung zwischen der ersten und zweiten Faserlage festzustellen, was auf eine erhöhte Spannung in der Matrix an der Überlappung schließen lässt

Beide ARAMIS-Auswertungen (s. Abb. 5.8 und Abb. 5.9) der ST_10_PVDF Klebungen zeigen eine nahezu konstante, große Dehnung entlang der gesamten Klebschicht. Anders als bei den Referenzproben ist die Dehnung nicht auf die Randzone begrenzt. Deutliche Dehnungsunterschiede am Rand der Klebschicht, die auf große Spannungsspitzen in der Randzone schließen lassen könnten, sind nicht zu erfassen. Zusätzlich erfahren die Fügeteile eine große Dehnung zwischen der zur Klebschicht gerichteten ersten 0° und 45° Lage des CFK-Fügeteils. Weitere Dehnungen zwischen den Faserlagen sind vorhanden.



Abb. 5.9: ARAMIS-Auswertung der ST_10_PVDF Probe 4 mit einer ST-Dicke von 0,1 mm kurz vor dem Bruch nach von Mises

5.3 Steifigkeitseinfluss

Die Untersuchungen zum Steifigkeitseinfluss von zähmodifizierenden Werkstoffen werden durch eine Materialänderung geprüft. Im Vergleich stehen PVDF und PEEK. Die ST-Proben mit PEEK werden dabei in den Varianten ST_5, ST_10 und ST_30 geprüft. Das PVDF wird aufgrund früherer Studien (s. Kapitel 2.7) nur mit ST_10 durchgeführt, weil diese Variante bei dem PVDF die größte Festigkeitssteigerung erzielt.

Abb. 5.10 zeigt die gemittelten Werte sowie die Standardabweichung der berechneten Klebfestigkeitswerte der Probenreihen. Die Surface Toughening Proben mit PEEK liegen dabei alle unterhalb der Klebfestigkeit des Referenzwertes und erzielt somit keine Festigkeitssteigerung. Dabei ist festzustellen, dass es eine fallende Tendenz der Festigkeit gibt, je mehr PEEK in die Klebverbindung eingebracht wurde. Die ST-Probenreihe mit dem zähmodifizierenden PVDF liegen im Vergleich bei einer Festigkeitssteigerung zur Referenz von knapp 85 %.



Abb. 5.10: Steifigkeitsvergleich des ST-Materials auf die Klebfestigkeit

In dieser Versuchsreihe wird jeweils eine Probe pro Probenreihe per Bildkorrelation untersucht und soll Aufschluss auf die Versagensursache und die Dehnungsverteilung in der Klebung geben. Betrachtet wird jeweils eine Hälfte der Überlappungsklebung, weil die Klebverbindungen symmetrisch aufgebaut und belastet sind. Alle Proben werden kurz vor dem Versagen gezeigt. Zu sehen ist dementsprechend die maximale Dehnung nach von Mises der Überlappungsklebung. Bei den Abb. 5.11 bis Abb. 5.14 zeigen alle Proben hauptsächlich eine Dehnung am Rand der Überlappungsklebung. Die Referenzprobe und die drei ST - Proben mit PEEK zeigen alle ein ähnliches Dehnungsverhalten, welches auch die Messergebnisse in Abb. 5.10 widerspiegeln. Zusätzlich zeigen die Klebverbindungen, bis auf die ST_5_PEEK Probe, leichte Dehnungen im Bereich zwischen den Faserlagen in der Epoxidharzmatrix.

Die Klebverbindung mit dem ST_10_PVDF in Abb. 5.15 hingegen zeigt eine deutlich stärkere Dehnung, welche nicht nur in den Randbereichen der Überlappungsklebung auftritt, sondern sich über die gesamte Klebschicht erstreckt. Dadurch kann die Klebverbindung, die in Abb. 5.10 wiedergegebene Festigkeitssteigerung erzielen und einer deutlich größeren Belastung standhalten.



Abb. 5.13: Dehnungsmessung der ST_10_PEEK Probe 3 kurz vor dem Bruch



Abb. 5.15: Dehnungsmessung der ST_10_PVDF Probe 4 kurz vor Bruch

Im Folgenden liegen die Bruchbilder zu den ausgewerteten Proben des Bildkorrelationsprogramms vor.



Abb. 5.16: Bruchbild der Referenzprobe 3

Das Bruchbild der Referenzprobe (s. Abb. 5.16) zeigt größtenteils ein kohäsives Bruchverhalten (s. Kapitel 2.4). Durch die Schubbelastung der versagten Überlappungsklebung hat sich die für einen Schubbruch typische schuppige Klebstoffverteilung gebildet. Zu erkennen ist ebenfalls, dass der randnahe Kohäsivbruch an der Seite vorliegt, an dem die Last auf das Fügeteil anliegt, also an der Seite, wo das Fügteil gebogen wird. Ab ungefähr der Hälfte wechselt der randnahe Kohäsivbruch zur anderen Fügeteilseite. Es scheint als wäre der Klebstoff zu steif, um die Biegung des Fügeteils aushalten zu können und schert ab. Das würde ebenfalls die stark ausgebildeten Schuppen am Überlappungsende erklären.



Abb. 5.17: Bruchbild der ST_5_PEEK Probe 3

Das Bruchbild der ST_5_PEEK Probe (s. Abb. 5.17) weißt neben einem kohäsiven Bruchverhalten zusätzlich an manchen Stellen das Versagen der ersten Faserschicht auf. Dies ist an der 0° Faserausrichtung festzustellen. Ähnlich wie bei dem Bruchbild der Referenz (s. Abb. 5.16) sind auch hier in der Randzone ausgeprägte Klebstoffschuppen zu beobachten. Zum Teil hat sich das PEEK vom CFK gelöst und ist unregelmäßig weggebrochen. An manchen Stellen lässt sich ein schuppiges Abbild der Epoxidharzmatrix unter dem PEEK identifizieren, was darauf schließen lässt, dass eine nicht ausreichende Oberflächenvorbehandlung zunächst ausgeschlossen werden kann.

Bei der ST_10_PEEK Probe (s. Abb. 5.18) gibt es zur ST_5_PEEK Probe viele Parallelen. Das Bruchbild der Überlappungsmitte setzt sich aus einem fügeteilnahen Kohäsivbruch und einem versagen der ersten Faserlage (First Ply Failure) zusammen. Am Randbereich, wo das PEEK in die Fügeteile eingebettet ist, ist ebenso das ausgeprägte schuppige Bruchbild ersichtlich. Das PEEK löst sich auch bei der ST_10_PEEK Probe vom CFK, jedoch sind bei dieser Probe keine Schuppen am freiliegenden Harz erkennbar. Auffällig ist jedoch das zahlreiche Faserablösen, ab der gelösten PEEK-Folie, was wiederum auf eine ausreichende Oberflächenvorbehandlung schließen lässt.



Abb. 5.18: Bruchbild der ST_10_PEEK Probe 3 (Probe zur zugehörigen ARAMIS Auswertung)



Abb. 5.19: Bruchbild der ST_30_PEEK Probe 3 (Probe zur zugehörigen ARAMIS Auswertung)

Das Bruchbild der ST_30_PEEK Probe (s. Abb. 5.19) setzt sich ebenfalls aus einem fügeteilnahen, kohäsiven Bruch und einem Faserbündelversagen der ersten Laminatschicht zusammen. Anders als bei den vorherigen Bruchbilder ist kaum ein schuppiges Bruchverhalten der Klebschicht festzustellen. Nur am Klebschichtrand

sind Klebstoffschuppen auf dem PEEK und in der Mitte der Überlappungsklebung, wo die Fügeteilseite des randnahen, kohäsiven Bruchs wechselt, auszumachen. Des Weiteren sind breite Faserbündel aus der ersten Laminatschicht rausgerissen und nicht einzelne Fasern oder kleine Faserbündel. Im freiliegenden Epoxidharz lässt sich zusätzlich eine Schuppenbildung erfassen, was Hinweise auf eine ausreichende Oberflächenvorbehandlung gibt. Das Bruchbild spiegelt die Messergebnisse aus Abb. 5.10 wider, bei der die Probenreihe ST_30_PEEK die geringste Festigkeit aufweist. Auch die ARAMIS Auswertung zeigt kurz vor dem Versagen nur eine randnahe Dehnung der Klebschicht.

Das Bruchbild der ST_10_PVDF Probe setzt sich wie die erzielten Prüfmesswerte und die Dehnungsauswertung von den anderen Bruchbildern ab. Zu sehen ist ein gleichmäßiger schuppiger kohäsiver Bruch. Dies veranschaulicht die gleichmäßige Dehnung der ARAMIS Auswertung aus Abb. 5.15 wieder. Am Überlappungsrand ist ein Weißbruch vom PVDF identifizierbar. Der Weißbruch erstreckt sich als Trapez ca. 2 mm in die Überlappungsklebung hinein und zeigt eine starke Dehnung des PVDFs. Die Verformung des **PVDFs** entlastet den Klebstoff starke in der spannungsgefährdeten Randzone.



Abb. 5.20: Bruchbild zur ST_10_PVDF Probe 3 (Probe zur zugehörigen ARAMIS Auswertung)

Im Umfang dieser Studie wird zusätzlich eine Probenreihe mit dem Klebstoff EA 9695 als ST-Material hinzugezogen (s. Abb. 5.20). Die Steifigkeit des Klebstoffs liegt mit einem E-Modul von 2578 N/mm² zwischen dem E-Modul von PVDF und PEEK. Verglichen werden die Probenreihen ST_5_PEEK, ST_5_PVDF (aus 2018) und ST_5_EA9695. Die Werte der ST_5_PVDF Probenreihe wurden dabei der Studie von 2018 entnommen, da eine gute Vergleichbarkeit der Versuchsreihen in Kapitel 5.2 erzielt werden konnte. Die ausgewertete ST_5_PVDF Probenreihe hat dementsprechend eine ST-Dicke von 0,125 mm. Die beiden anderen ST-Materialien wurden mit einer ST-Dicke von 0,1 mm erstellt und geprüft. Zusätzlich haben alle Prüfkörper von 2018 einen schlechteren, gemittelten Festigkeitswert von ca. - 7,5 % und eine erhöhte Standardabweichung.

Die Ergebnisse sind in Abb. 5.21 zusammengefasst. Die ST_5_PEEK-Probenreihe erfährt mit einem E-Modul von 3200 N/mm² als einzige Probenreihe eine Festigkeitsminderung. Die beiden Surface Toughening Probenreihen mit dem kleineren E-Modul erfahren eine Festigkeitssteigerung (s. Abb. 5.21). Dabei erzielt die Probenreihe mit dem kleinsten E-Modul (ST_5_PVDF), die größte Festigkeitssteigerung, was zu der These führt:

Je kleiner das E-Modul des Surface-Toughening-Materials, desto größer die Klebfestigkeitssteigerung.

Dabei muss ein bestimmter E-Modul unterschritten werden, um eine Festigkeitssteigerung zu erzielen. Alle Materialien, bei dem die E-Module oberhalb dieses Wertes liegen, verursachen eine Festigkeitsminderung.

Im Umfang dieser Studie liegt der Wert des E-Moduls, der die erste beobachtete Festigkeitssteigerung erzielen konnte, ohne Betrachtung der Wechselwirkungen anderer Variablen bei 2577 N/mm² und entspricht dem E-Modul des

Klebstoffs. Zusätzlich zeigt die Bildkorrelation ein ähnliches Dehnungsbild bei allen Proben. Alle Klebverbindungen zeigen in der Randzone, wo die Spannungsspitzen zustande kommen, die größte Dehnung. Die ST_5_PVDF Probe dehnt sich von allen geprüften Proben am meisten. Dabei erstreckt sich im Gegensatz zu den anderen Proben zusätzlich zu der hohen Dehnung in der Randzone eine leichte Dehnung von 3 % über die gesamte Klebschicht. Aufgrund des kleinen Unterschieds der ARAMIS-Auswertung zu den Proben in Abb. 5.11 bis Abb. 5.15, werden die Bilder hier nicht aufgeführt und können dem Anhang D entnommen werden.



Abb. 5.21:Steifigkeitseinfluss auf das Surface Toughening mit einem ST-Streifen von 5mm Breite

5.4 Feuchtigkeitseinfluss

Die Ergebnisse einer Feuchtigkeitsuntersuchung nach einer 14 tägigen Auslagerung der Surface Toughening Proben mit PEEK und PVDF sind in Abb. 5.22 abgebildet. Es werden die Festigkeitswerte der feuchtigkeitsbeeinflussten Proben mit denen nicht ausgelagerter Proben verglichen. Die Differenz der beiden Referenzproben ohne Surface Toughening zeigen eine minimale Verschlechterung der Klebfestigkeit durch die Feuchtigkeitsaufnahme von - 2,1%. Die ST-Probenreihe mit PVDF verliert durch knapp - 9 % an Festigkeit. die Auslagerung Trotz des neunprozentigen Festigkeitsverlusts bewirkt das Surface Toughening mit PVDF immer noch eine ausgezeichnete Festigkeitssteigerung zur trockenen Referenz von knapp + 69 %. Das Surface Toughening mit PEEK hingegen erfährt durch die Feuchtigkeitsaufnahme einen gegenteiligen Effekt und erzielt im Gegensatz zu den anderen Probenreihen eine Festigkeitssteigerung und eine geringere Standardabweichung. Die Festigkeit erhöht sich um ungefähr + 29 % zur trockenen PEEK-Probenreihe. Die Festigkeitssteigerung des verwendeten PEEKs von + 1,7 % zur trockenen Referenz reicht jedoch nicht aus, um mit dem zähmodifizierenden PVDF in Konkurrenz zu treten. Dies ist auch der Fall, obwohl bei der Auslagerung der Surface Toughening Proben mit PVDF eine größere Standardabweichung vorliegt.



Abb. 5.22: Zugscherfestigkeitsveränderung durch Auslagerung bei Feuchtigkeit

Untersuchungen der Klebschichtdicke belegen, dass die Festigkeitssteigerung der ausgelagerten PEEK-Probenreihe nicht durch die Klebschichtdicke beeinflusst wurden. Beide Klebschichtdicken sind vor der Auslagerung ungefähr gleich dick (s. Abb. 5.23).



Abb. 5.23: Klebschichtdicke vor der Auslagerung einzelner, für die Auslagerung relevanten, Probenreihen

Im Folgenden werden die ARAMIS-Auswertungen der trockenen und ausgelagerten Klebverbindungen verglichen. Das Muster auf den ausgelagerten Proben ist etwas grober gesprüht und bewirkt teilweise eine nicht vollständige Auswertung des Programms. Wenn einfarbige Pigmente eine zu große Fläche erschaffen, so kann das Programm die Verschiebung nicht messen und gibt keine Dehnung aus.



Abb. 5.25: Dehnungsmessung der ausgelagerten Referenz Probe 3

Die ARAMIS-Auswertung der Referenzproben im Vergleich (s. Abb. 5.24, Abb. 5.25) zeigt bei der ausgelagerten Referenz eine größere Dehnung. Eine größere Dehnung lässt auf eine größere Klebfestigkeit schließen, die durch den Vergleich der Messwerte der beiden Proben jedoch widerlegt wird.

Das Bruchbild der ausgelagerten Referenzprobe (s. Abb. 5.27) sieht etwas gleichmäßiger aus als das der trockenen Referenz (s. Abb. 5.26). Der Klebstoff ist über die ganze Bruchfläche feiner geschuppt. Außerdem hat sich bei der ausgelagerten Referenz nicht der auffällig stark geschuppte Bereich in der Randzone gebildet.


Abb. 5.26: Bruchbild zur trockenen Referenz Probe 3



Abb. 5.27: Bruchbild zur ausgelagerten Referenz Probe 3

Die ARAMIS Auswertung der ausgelagerten und trockenen ST_10_PEEK Probenreihe sind in Abb. 5.28 und Abb. 5.29 dargelegt. Die ausgelagerte Klebung erzielt eine weiter zur Überlappungsmitte erstreckte Dehnung. In diesem Fall stimmt die Aussage, dass eine größere Dehnung eine größere Festigkeit bedeutet.

Die Bruchbilder der trockenen und ausgelagerten ST_10_PEEK Klebung (s. Abb. 5.30, Abb. 5.31) unterscheiden sich kaum. Auffällig ist, dass sich bei der ausgelagerten ST_10_PEEK Klebung weniger der PEEK-Folie vom CFK-Fügeteil gelöst hat. Aufgrund gleicher Prozessparameter kann der Grund nicht die Verarbeitung sein. Eine Möglichkeit wäre, dass durch die Feuchtigkeit das PEEK aufquillt und nachgiebiger wird bzw. der E-Modul kleiner. Zu sehen sind keine Weißbrüche im PEEK, was auf eine nicht voll ausgenutzte Dehnbarkeit des PEEKs hindeutet.

Eine hydrothermale Auslagerung von PEEK bewirkt bei der zähmodifizierten Klebverbindung eine Festigkeitssteigerung und eine verbesserte Homogenität der Klebverbindung.



Abb. 5.29: Dehnungsmessung zur ausgelagerten ST_10_PEEK Probe 3



Abb. 5.30: Bruchbild der trockenen ST_10_PEEK Probe 3



Abb. 5.31: Bruchbild der ausgelagerten ST_10_PEEK Probe 3

Die ARAMIS-Auswertung, zu der Auslagerung des Surface Toughenings mit PVDF, zeigt eine kleinere Dehnung der Klebschicht im Randbereich, wo der PVDF-Streifen eingebettet ist. Der PVDF-Steifen zeigt jedoch eine hohe Dehnung und nimmt scheinbar die Last und die daraus resultierende Dehnung der Klebschicht auf. Zur Überlappungsmitte verhält sich die Dehnung, wie bei der trockenen Klebung. Beide Proben zeigen eine ausgeprägte Dehnung zwischen den ersten beiden Faserlagen im Laminat.

Die Bruchbilder der ausgelagerten und trockenen ST_10_PVDF Proben (s. Abb. 5.34, Abb. 5.35) zeigen ein ähnliches Bruchbild. Beide Klebungen zeigen ein typisches, schuppiges Schubbruchverhalten. Bei beiden Proben ist ebenfalls der Weißbruch im PVDF zu beobachten, wobei der Weißbruch der trockenen ST_10_PVDF Probe sich weiter erstreckt. Schlussfolgernd hat die trockene ST_10_PVDF Probe eine größere Dehnung zugelassen und eine größere Last aufgenommen. Diese Vermutung wird durch einen größeren gemittelten Festigkeitswert der trockenen Proben bestätigt.

Eine hydrothermale Auslagerung des PVDFs bewirkt durch eine schlechtere plastische Verformung eine Festigkeitsminderung der zähmodifizierten Klebverbindung.



Abb. 5.33: Dehnungsmessung zur ausgelagerten ST_10_PVDF Probe 3



Abb. 5.34: Bruchbild der trockenen ST_10_PVDF Probe 4



Abb. 5.35: Bruchbild der ausgelagerten ST_10_PVDF Probe 3

5.5 Einfluss von thermischen Eigenspannungen im PVDF

Zur Untersuchung von möglichen Wirkungen durch temperaturbeeinflusste Eigenspannungen, wie in Kapitel 2.7, Abb. 2.20 thematisiert, werden zwei Begleitprobenreihen kaltverklebt. Der Klebstoffwechsel wirkt sich auf die Klebschichtdicke aus. Durch die Vermessung aller Proben vor dem Prüfen kann eine gemittelte Klebschichtdicke für den warmaushärtenden Klebstoff EA9695 Aero von 0,15 mm berechnet werden. Bei dem kaltaushärtenden Klebstoff EA 9394 Aero beträgt die gemittelte Klebschichtdicke 0,41 mm und ist um das 2,7-fache dicker als die des Filmklebstoffs. Die Literaturrecherche zeigt zudem, dass bei einer Klebstoffdicke im Bereich von 0,05 mm bis 0,2 mm die größten Festigkeitswerte entstehen, weshalb für den kaltaushärtenden, pastösen, 2K-Klebstoff EA 9394 Aero ein kleiner Nachteil entsteht.

Die gemittelten Messergebnisse der Klebfestigkeiten sind in Abb. 5.36 zusammengetragen. Der Vergleich der beiden Referenzprobenreihen bestätigt den Klebschichtdickeneffekt aus der Literatur (s. Kapitel 2.7). Hinzu kommt eine geringere kohäsive Festigkeit des EA9394 Klebstoffs. Die kaltverklebte Referenz Probenreihe mit dem EA 9394 Aero Klebstoff zeigt im Vergleich eine 16,2 %ige schlechtere Klebfestigkeit als die Referenz Probenreihe des warmausgehärteten EA 9695 Aero Klebstoffs.



Abb. 5.36: Klebschichtdicke der verwendeten Klebstoffe

Bei den Surface Toughening Probenreihen wird dieser Effekt entsprechend auch erwartet. Allerdings zeigen diese beiden Probenreihen nahezu den gleichen Festigkeitswert. Diese Ergebnisse lassen auf den nachteiligen Effekt der Eigenspannung im PVDF durch die Erwärmung im Klebprozess schließen.





Das Säulendiagramm in Abb. 5.38 schildert den Festigkeitswert des kaltausgehärten Surface Toughenings im Vergleich zur kaltausgehärteten Referenz. Das Ergebnis einer Festigkeitssteigerung von 120% ist die größte erzielte Festigkeitssteigerung durch die Anwendung des Surface Toughenings. Beeindruckend ist außerdem die kleine Standardabweichung der Probenreihen des EA9394 Klebstoffs, was auf eine hervorragende Homogenität der Klebfestigkeit in der Klebverbindung hindeutet.



Abb. 5.38: Festigkeitssteigerung des Surface Toughenings mit dem Klebstoff EA9394

Durch einen geeigneten, hochfesten, kaltaushärtenden Klebstoff könnte die herausragende maximale Festigkeitssteigerung eventuell nochmals wachsen. Möglich wäre ein begrenztes Maximum der Klebfestigkeit bei ungefähr 41,5 N/mm², weil dieser Wert bei allen ST_10_PVDF Proben als Grenzwert fungiert. Es wurden keine weiteren Wechselwirkungen betrachtet. Es wird die These aufgestellt:

Ein Warmverkleben der zähmodifizierten Klebverbindung führt durch thermalentwickelnde Eigenspannungen zur Festigkeitssenkung.

Bei den vier Probenreihen wurde jeweils eine Probe mit dem Bildkorrelationsprogramm ARAMIS begleitend zur Zugscherprüfung geprüft. Dabei lässt sich im Vergleich der Referenzen feststellen (s. Abb. 5.39 und Abb. 5.40), dass beide Referenzproben die maximale Dehnung in der Randzone erfahren. Die Probe mit dem kaltaushärtenden Klebstoff EA9394 in Abb. 5.40 zeigt hingegen nur eine maximale Dehnung von 4%. Beide Klebverbindungen zeigen keine Dehnung im Mittenbereich der Klebschicht.



Abb. 5.40: ARAMIS-Auswertung der Referenz Probe 3 mit dem kaltverklebten EA9394 Klebstoff kurz vor dem Bruch nach von Mises

Die Bruchbilder der beiden warm- und kaltaushärtenden Referenzklebungen sind in Abb. 5.41 und Abb. 5.42 abgebildet. Dabei unterscheidet sich das Bruchbild der Probe mit dem EA9394 Klebstoff deutlich. Der Klebstoff bricht in einem Stück aus der Probenmitte heraus. Ein schuppiger Schubbruch ist nicht zu erkennen. Zusätzlich gibt es einzelnes Faserversagen in der Probenmitte. Auffällig ist außerdem ein großer Klebstoffauslauf bei dem Klebstoff EA9394.



Abb. 5.41: Bruchbild der Referenz 3 mit dem warmverklebten Klebstoff EA9695



Abb. 5.42: Bruchbild der Referenz 3 mit dem kaltverklebten Klebstoff EA9394

Die Dehnungsuntersuchung per Bildkorrelation der ST_10_PVDF Proben mit den Klebstoffen EA9695 (s. Abb. 5.43) und EA9394 (s. Abb. 5.44) lässt sich ein ähnliches Verhalten ausmachen. Bei der Untersuchung der ST_10_PVDF Probe mit dem kaltaushärtenden EA9394 Klebstoff ist im Mittenbereich der Klebschicht eine große Dehnung erfassbar. Ein schmaler roter Streifen lässt jedoch vermuten, dass der PVDF-Streifen eine große Verformung erfährt und so wie gewünscht die Last von der Klebschicht nimmt und die hohe Belastung im Randbereich der Klebschicht vermeidet. Durch Auswertungsprobleme des GOM Correlate Programms, durch zu große einfarbige Bereiche im stochastischen Muster, kann über diesen Bereich keine klare Aussage getroffen werden. Statt einer großen Verformung in der Klebschichtrandzone entsteht hier eine ungewollte große Dehnung des CFK-Fügeteils zwischen der ersten 0° und 45° Lage. Auf der Abb. 5.44, die kurz vor dem Versagen der Klebschicht entstanden ist, ist bereits ein großer Riss zwischen den beiden Lagen entstanden. Vermutlich handelt es sich um einen Zwischenfaserbruch, der sich über die gesamte Fügeteilbreite erstreckt. Bei der Überlappungsklebung mit dem warmaushärtenden EA9695 Klebstoff hingegen erstreckt sich eine gleichmäßige Dehnung entlang der gesamten Klebschicht. Wobei auch bei dieser Klebverbindung eine große Dehnung am Rand der Klebschicht in dem Faserverbund-Fügeteil entsteht. Ein Riss ist jedoch nicht zu identifizieren.



Abb. 5.44: ARAMIS-Auswertung der ST_10_PVDF Probe 3 mit dem EA9394 Klebstoff kurz vor dem Bruch nach von Mises

Das Bruchbild der Klebverbindung mit dem EA9394 Klebstoff in Abb. 5.46 gibt Aufschluss auf die Versagensart. Die Surface Toughening Probe in Abb. 5.45 mit dem warmaushärtenden Klebstoff zeigt einen typischen, überwiegend kohäsiven, Schubbruch und einen bis zur Mitte des PVDF-Steifen ragenden Weißbuch. Hingegen zeiat das Bruchbild der Surface Toughening Klebverbindung mit dem kaltaushärtenden Klebstoff eine Delamination der ersten Lage, was an den 45° ausgerichteten Fasern im Bruch wahrnehmbar ist. Im Bereich des STs kommt es zu einem Faserversagen bis zur dritten Faserlage, der 90° Lage. Da bei dem Bruchbild der dritten ST_10_PVDF Probe der Probenreihe mit dem Klebstoff EA9394 keine Aussage über das Verhalten des PVDFs getätigt werden kann, ist in Abb. 5.47 zusätzlich das Bruchbild der sechsten Probe dieser Probenreihe dargestellt. Diese Klebverbindung hat ebenfalls eine Delamination erfahren, welche bis zur zweiten 0° Lage stattgefunden hat. In diesem Bruchbild ist auf einer Seite der freigelegte PVDF-Streifen auszumachen. Der PVDF-Streifen ist in einen Weißbruch übergegangen, welcher sich nahezu über die gesamte Breite des PVDF-Streifens unter der Klebschicht erstreckt. Der ausgeprägte Weißbruch lässt auf eine maximale Verformung des PVDFs schließen.



Abb. 5.45 Bruchbild der ST_10_PVDF Probe 4 mit dem Klebstoff EA9695:



Abb. 5.46: Bruchbild der ST_10_PVDF Probe 3 mit dem Klebstoff EA9394



Abb. 5.47: Bruchbild der ST_10_PVDF Probe 6 mit dem EA9394 Klebstoff

Der Wärmeeinfluss bei dem Verkleben des EA9695 Klebstoffs ist folglich kontraproduktiv und schränkt die Wirksamkeit der Oberflächenzähmodifikation des PVDFs ein. Zusätzlich ist anzumerken, dass eine Delamination ungewollt ist und plötzlich auftritt. Sollte also ein kaltaushärtender Klebstoff im Rahmen einer zähmodifizierten Klebverbindung genutzt werden, so muss sichergestellt werden, dass die Fügeteile nicht in einem Zwischenfaserbruch versagen.

Des Weiteren hat dieser Versuch gezeigt, dass ein günstiger Klebstoff mit einer geringeren kohäsiven Festigkeit und größeren Steifigkeit durch das Surface Toughening einer sehr hohen Belastung standhalten kann. Durch das Anwenden der Oberflächenzähmodifikation in der Industrie kann schlussfolgernd viel Geld für einen teuren, hochfesten Klebstoff gespart werden.

6 Diskussion

Um zähmodifizierte Klebverbindungen bei Faserverbundwerkstoffen besser einschätzen zu können, wurden anhand qualitativer Forschung Änderungen der zähmodifizierten Klebverbindung vorgenommen und analysiert. Dazu wurden Materialeigenschaften variiert und Umweltbedingungen simuliert. Die Forschungsergebnisse geben Aufschluss auf die Wirkung der Materialform, der Steifigkeit, der Feuchtigkeit und des Klebprozesses auf die Festigkeit und Qualität der Klebverbindung.

Zu Beginn wurde angenommen, dass eine Vergrößerung der Steifigkeit des zähmodifizierenden Werkstoffs bei ansonsten ähnlichen Materialeigenschaften eine ähnliche Festigkeitssteigerung zeigen würde. Dementgegen galt die Annahme, dass die Feuchtigkeitseinwirkung auf die Klebverbindung sowie ein niedrigtemperierter Klebprozess die Qualität mindern würde. Durch die Forschungsergebnisse wurden die Behauptungen geprüft und teilweise widerlegt.

Die These "Es gibt keine signifikante Festigkeitsveränderung durch eine Dickenänderung des zähmodifizierenden Werkstoffs um 20%." wurde in der Auswertung zum Dickeneinfluss aufgestellt. Durch eine hohe Standardabweichung der Probenreihen von Leichen aus 2018 kann keine klare Aussage zur Klebfestigkeitssteigerung getroffen [vgl. Lei18]. Die werden gemittelten Festigkeitswerte lassen jedoch darauf hinweisen, dass keine signifikante Festigkeitsänderung durch eine ST-Dickenreduktion von stattfindet. 20% Bruchuntersuchungen haben feststellen lassen, dass der zähmodifizierende Werkstoff beim Versagen der Klebverbindung keine maximale Verformung erfahren hat. Dies scheint ein weiteres Indiz für die erzielte Festigkeitskonstanz trotz kleinerer Surface Toughening Dicke zu sein.

Zum Steifigkeitseinfluss auf das Wirkprinzip der zähmodifizierten Klebverbindung wurde die These aufgestellt: *"Je kleiner das E-Modul des Surface Toughening Materials, desto größer die Klebfestigkeitssteigerung"*. Eine Möglichkeit der negativen Auswirkung des steiferen Materials wird durch *Schürmann* beschrieben. *Schürmann* erklärt, dass eine Umlagerung der Spannungsverteilung in der Klebschicht auftritt. Dieser Umstand kann positiv genutzt werden, wenn ein niedriger Schubmodul in der Randzone und ein hoher Schubmodul im Mittenbereich angewandt wird. [vgl. Sür07, S. 600] Durch das Verwenden eines steiferen ST-Materials in der Randzone und eines im Verhältnis zum zähmodifizierenden Werkstoff duktileren Klebstoffs tritt genau der gegenteilige Effekt auf. Die Klebfestigkeit wird gemindert.

Möglich wäre eine Festigkeitssteigerung mit PEEK, wenn der Klebstoff entsprechend steifer gewählt werden würde. Dementsprechend wird eine neue These aufgestellt:

"Eine Festigkeitssteigerung wird dann erzielt, wenn der zähmodifizierende Werkstoff duktiler als der verwendete Klebstoff ist."

Anhand der gewählten Materialvariation der geprüften zähmodifizierten Klebverbindung kann zu PEEK als Material der Oberflächenzähmodifikation nicht geraten werden. Jedoch kann die Verwendung eines steiferen Klebstoffs die Nutzung von PEEK begünstigen, diese These muss allerdings erst geprüft werden.

Durch einen Auslagerungsprozess in feuchtwarmer Umgebung wurde die Reaktion der Klebverbindung auf Feuchtigkeit simuliert. Die Ergebnisanalyse zeigt eine Festigkeitsminderung von ungefähr 9 % der Oberflächenzähmodifikation durch PVDF. "Eine hydrothermale Auslagerung des PVDFs bewirkt durch eine schlechtere plastische Verformuna Festigkeitsminderung der zähmodifizierten eine Klebverbindung", ist die Folgerung. Löbbecke erläutert eine weitere Möglichkeit, warum PVDF unter Feuchtigkeit schlechter agiert. Durch die hydrothermale Auslagerung wird die adhäsive Verbindung des PVDFs zum Faserverbundfügeteil leicht geschwächt und die Klebfestigkeit nimmt ab. [vgl. Löb19, S. 25 f.] Der kurzzeitige Feuchtigkeitseinfluss der Tropen wird demnach eine Verschlechterung der Klebverbindung bewirken. Möglich wäre eine Erholung der Klebverbindung durch den Trocknungsvorgang, dies sollte in weiteren Versuchen untersucht werden. Mit einer Klebfestigkeitssteigerung der feuchtigkeitsbeeinflussten Proben von knapp 69% repräsentiert die zähmodifizierte Klebverbindung dennoch eine gute Möglichkeit der Verbindungstechnik der HAPs.

"Eine hydrothermale Auslagerung von PEEK bewirkt bei der zähmodifizierten Klebverbindung eine Festigkeitssteigerung und eine verbesserte Homogenität der Klebverbindung." PEEK bewirkt in einer trockenen Umgebung eine Festigkeitsminderung von ungefähr 20 % zur Referenz, zeigt aber nach einer Feuchtigkeitsaufnahme eine Festigkeitssteigerung von ungefähr 1,7 % zur trockenen Referenz. Domininghaus beschreibt eine größere Wasseraufnahme von PEEK bis zu 0,11 %-Massengehalt [vgl. Dom08, S. 986]. Diese Wasseraufnahme führt zu einem Aufquellen des PEEKs und nimmt durch ein vergrößertes Volumen bei der Zugscherprüfung zunächst Druck von der Randzone. Hinzu kommt eine von Schulze erläuterte bessere Langzeitstabilität durch mikromechanische Adhäsion nach der zusätzlich Dieses Phänomen beschreibt Auslagerung. die verringerte Standardabweichung der ausgelagerten zähmodifizierten Klebverbindungen mit PEEK. [vgl. Sul14, S. 545] Die minimale Verbesserung der Klebverbindung genügt

70

jedoch nicht, um eine Anwendung für die zähmodifizierte Klebverbindung mit PEEK zu empfehlen.

Weiter wurde durch eine Änderung der Klebstoffform und Aushärtebedingungen der Einfluss der thermisch bedingten Materialeigenspannungen im zähmodifizierenden Werkstoff geprüft. Erwartet wurde eine positive Auswirkung auf die Klebfestigkeit durch die Eigenspannungen im zähmodifizierenden Werkstoff. Diese Vermutung wurde durch die Versuchsergebnisse widerlegt. "Ein Warmverkleben der zähmodifizierten Klebverbindung führt durch thermalentwickelnde Eigenspannungen zur Festigkeitssenkung." Die Verklebung ohne hohe Temperaturbelastung führt zu einer Festigkeitssteigerung zur Referenzprobe von ungefähr 120 % und bietet die größte Festigkeitssteigerung, die durch die zähmodifizierte Klebverbindung bisher nachgewiesen werden konnte. Somit können in Zukunft günstigere, steifere und nicht hochfeste Klebstoffe in Verbindung mit dem Prinzip der zähmodifizierten Klebverbindung genutzt werden. Diese Erkenntnis kann eine große Kostenersparnis herbeiführen. Eine Validierung mit weiteren kostengünstigen, kaltaushärtenden Klebstoffen in Kombination mit dem Surface Toughening sollte folgen. Dennoch kann nach dem Abschließen der Versuchsreihe eine Anwendung der zähmodifizierten Klebverbindung mit einem kaltaushärtenden Strukturklebstoff empfohlen werden.

Allgemein muss berücksichtigt werden, dass in dieser Forschung keine Wechselwirkungen betrachtet wurden. Diese Ergebnisse gelten nur für die gegebenen Randbedingungen. Bei einer Änderung der Prozessparameter können dahingegen Abweichungen auftreten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Arbeit galt es den Steifigkeitseinfluss auf die Klebfestigkeit durch eine Materialvariation zu untersuchen und durch eine hydrothermische Auslagerung den Feuchtigkeitseinfluss auf die Klebfestigkeit festzustellen. Eine weitere Aufgabe war es die Wirkung der Klebprozesstemperatur im Hinblick auf die Klebfestigkeit der zähmodifizierten Klebverbindung zu untersuchen. Über die Aufgabenstellung hinaus wurde anschließend an Vorversuche von Schollerer und Leichen eine dünnere PVDF-Folie eines anderen Herstellers in Bezug zur Festigkeitssteigerung der Klebverbindung [vgl. Sol18, Lei18]. Dazu wurden Parametervariationen untersucht der zähmodifizierten Klebverbindung thematisiert und durchgeführt. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche wurde eine geeignete Prüfmethodik ausgewählt, die Probengeometrie definiert und ein Prüfplan erstellt.

Die Validierung einer dünneren PVDF-Folie eines anderen Herstellers hat keinen signifikanten Dickeneinfluss bei einer Dickenänderung von - 20 % sowie dem Herstellerwechsel gezeigt. Die Messergebnisse haben entsprechend der bereits in vorigen Studien untersuchten PVDF-Folie eine Festigkeitssteigerung von knapp 85 % ergeben.

Die Ergebnisse zur Steifigkeitsuntersuchung bilden eine Festigkeitsminderung der zähmodifizierten Klebverbindung mit dem steiferen PEEK ab. Es gilt die These: *"Eine Festigkeitssteigerung wird dann erzielt, wenn der zähmodifizierende Werkstoff duktiler ist als der verwendete Klebstoff."*

Die Versuche zum Feuchtigkeitseinfluss zeigen eine werkstoffspezifische Auswirkung auf die Festigkeit der zähmodifizierten Klebverbindung. Die hydrothermal ausgelagerten Überlappungsklebungen mit PVDF zeigen eine degradierte Festigkeit von 9 %. Zu einem Einsatz in den Tropen dieser zähmodifizierten Klebverbindung, kann mit einer Festigkeitssteigerung von 69% dennoch geraten werden. Die ausgelagerten Überlappungsklebungen mit PEEK zeigen nach der Auslagerung erstmalig eine geringe Festigkeitssteigerung. Eine Anwendung des PEEKs kann aufgrund der Festigkeitsminderung im trockenen Zustand und dem zu kleinen positiven Einfluss unter Festigkeit mit den verwendeten Prozessparametern jedoch nicht empfohlen werden.

Der Wärmeeinfluss des Klebprozesses von warmaushärtenden Klebstoffen folgert festigkeitsentgegenwirkende Eigenspannungen. Der kaltaushärtende Vergleichsklebstoff liefert in Kombination mit der Oberflächenzähmodifikation durch PVDF eine Festigkeitssteigerung von 120 % und eröffnet die Möglichkeit einer kostengünstigen Klebmethode für die Industrie.

Eine Empfehlung für weitere Studien zum Steifigkeitseinfluss bei zähmodifizierten Klebverbindungen besteht in der Validierung eines steifen Klebstoffs in Kombination mit PEEK als zähmodifizierenden Werkstoff. Eine hydrothermal ausgelagerte Versuchsreihe der Klebverbindungen bis zur Feuchtigkeitssättigung kann zudem erfassen was eine maximal feuchte Umgebung für Auswirkungen auf die Funktion der Klebverbindung haben könnte. Darüber hinaus bietet es eine Möglichkeit der Erkenntnis zur Anwendungseinschränkung sowie dem Langzeitverhalten. Zum Aufschluss des Langzeitverhaltens der Oberflächenzähmodifikation kann entsprechend der gegebenen Umständen beim Starten und Landen der HAPs sowie dem Flug in der Stratosphäre zu einem zusätzlichen Klimawechseltest geraten werden. Damit auch die wirkenden Temperaturen der Luftfahrt bei gleichzeitig großer Belastung geprüft werden können, wird zusätzlich empfohlen zähmodifizierte Klebverbindungen unter Temperatureinflüssen zwischen - 55 °C und + 150 °C zu testen. Weitere Prüfungen mit kostengünstigen, kaltaushärtenden Klebstoffen in Verbindung mit dem Surface Toughening sollen die These einer möglichen großen Kostenersparnis durch kostengünstige Klebstoffe bestätigen.

8 Quellenverzeichnis

Kennzeichnung

[Ast14]	ASTM International. D5868-01: Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding. ASTM International, West Conshohocken, 2014
[Ast99]	ASTM International. D 5573-99. Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints. West Conshohocken: ASTM International, 1999
[Bar10]	Bárdos, L.; Baránková, H.: Cold atmospheric plasma: sources, processes, and application, thin solid films: Thin Solid Films, Elsevier, Uppsala, ISSN 0040-6090, 518 Jg. (2010), H. 23, S. 6705-6713
[Bre18]	Brenne, F.: Selektives Laserschmelzen metallischer Materialien – Einfluss von Prozessparametern und Miniaturisierung auf Mikrostruktur und mechanisches Verhalten geometrisch komplexer Strukturen. Dissertation Universität Kassel. (Hrsg.): Niendorf, T; Scholters, B.; Forschungsberichte aus dem Institut für Werkstofftechnik – Metallische Werkstoffe der Universität Kassel. Kassel university press GmbH, Kassel 2018, ISBN 978-3-7376-0596-0
[Bro05]	Brockmann, W.; Geiß, P. L.; Klingen, J.; Schröder, B.: Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. 1. Aufl., WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2005, ISBN 3-527-31091-6
[Dom08]	Domininghaus, H.; Elsner, P (Hrsg.).; Eyerer, P. (Hrsg.); Hirth, T. (Hrsg.): Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen, 7. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008, ISBN 978-3-540-72400-1
[Doo18]	Doobe, M.: Kunststoffe erfolgreich kleben. Grundlagen, Klebstofftechnologien, Best-Practice Beispiele. 1. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018, ISBN 978-3-658-18444-5
[Esc18]	d. I. Escalera, F. M.; Essa, Y.; Castello, M. Á.; Pillai, U.; Chiminelli, A.; Lizaranzu, M; Maimi, P.: Challenges of Hybrid Laminar Flow Controll (HLFC) in aircraft design an manufacturing. Internet Publikation: https://nottingham- repository.worktribe.com/output/2515251/challenges-of-hybrid-laminar-flow- control-hlfc-in-aircraft-design-and-manufacturing Stand: 28.06.2018 (abgerufen am 6.05.2021)
[Hab06]	Habenicht, G.: Kleben. Grundlagen, Technologie, Anwendungen. 5. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006, ISBN 3-540-26273-3

[Hab16]	Habenicht, G.: Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. 7. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016, ISBN 978- 3-658-14695-5
[Hal21]	v. Halteren, A.; Fraunhofer, IFAM; Industrieverband Klebstoffe e.V.: Leitfaden - Kleben – aber richtig. Internet Publikation: https://leitfaden.klebstoffe.com/ (abgerufen am 21.01.2021)
[Hin13]	Hinsch, M. (Hrsg.); Olthoff, J. (Hrsg.): Impulsgeber Luftfahrt. Industrial Leadership durch Luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte. 1. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-642-32668-4
[Kaw20]	Kawasaki, S.; Ishida Y.; Ogasawara, T.: Effect of vacuum–ultraviolet irradiation in a nitrogen gas atmosphere on the adhesive bonding of carbon-fiber- reinforced polyphenylene sulfide composites. The Journal of adhesion, (2020), pp. 1-15, Taylor & Francis, Tokyo, DOI: 10.1080/00218464.2020.1822172
[Küt14]	Kütting, H.; Sauer, M. J.: Elementare Stochastik - mathematische Konzepte und didaktische Grundlagen. 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014, ISBN 978-3-642-40857-1
[Lei18]	Leichen, B.: Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenzähmodifikation bei Überlappungsklebungen mit Filmklebstoffen. Bachelorarbeit Jade Hochschule Wilhelshaven Oldenburg Elsfelth. (Hrsg.): Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2018
[Leu21]	Leuthäußer, J.; INNOVENT Technologieentwicklung Jena; Forschungsbereich Primer und Chemische Oberflächenbehandlungen: VUV-Anlagen. Internet Publikation: https://www.innovent-jena.de/pco/vuv-anlagen (abgerufen am 21.03.2021)
[Löb19]	Löbbecke, M.: Einflussfaktoren und deren Auswirkung auf das Adhäsions- und Alterungsverhalten von Titan-Polymer-Klebungen. Dissertation Ruhr- Universität Bochum. (Hrsg.): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Köln, Institut für Werkstoff-Forschung, Abteilung für Experimentelle und Numerische Methoden, Bochum 2019
[Löl16]	Löbel, T.: The Hybrid Bondline: A Novel Disbond-Stopping Design for Adhesively Bonded Composite Joints. Dissertation Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. (Hrsg): Faserverbundstruktur und Verfahren zur Herstellung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V, Braunschweig 2016, Patent 10 2013 107 849
[Met17]	Metzler, N.: Strukturelles Kleben im Flugzeugbau: Plasmainduzierte Grenzflächenphänomene in CFK-Klebverbindungen und deren Auswirkung auf mechanische Eigenschaften. Dissertation Universität Augsburg. Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Augsburg 2017

[Moh11]	Mohammed, A.; Mehmood, A.; Pavlidou, FN.; Mohorcic, M.: The Role of High- Altitude Platforms (HAPs) in the Global Wireless Connectivity. Proceedings of the IEEE vol. 99 (2011), no. 11, pp. 1939-1953, ISSN 0018-9219, DOI 10.1109/JPROC.2011.2159690
[Oni21]	Onishi H.; Ushio Deutschland GmbH: Was genau verbirgt sich hinter der Excimer-Technologie? Internet Publikation: https://www.ushio.eu/de/excimer-technik/# Stand: 2021 (25.01.2021)
[Ret17]	Rettig, K.: Hochleistungsthermoplast – Composite – Werkstoffe in der Luftfahrtindustrie. Internet Publikation: 2017- 04_Hochleistungsthermoplaste_Aerospace.pdf (teijincarbon.com) Stand: 04.2017 (abgerufen am 29.04.02021), Toho Tenax Europe GmbH, Wuppertal, 2017
[Rie20]	Riedel, C.; Riedel, T.; IOT Innovative Oberflächentechnologien GmbH, Leipzig: Excimer – Aufbau und Prinzip. Funktionsweise. Internet Publikation: https://www.iot-gmbh.de/uv-technik/excimer-2/ Stand:2020 (abgerufen am 19.03.2021)
[Roo05]	Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung und Prüfung, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005, ISBN 3-540- 22034-8
[Sau19]	M. Sauer, Composites-Marktbericht 2019. Der globale CF- und CC-Markt 2019. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. Internet Publikation: https://composites-ited.com/media/3989/ger_ccev_marktbericht_ 2019_kurzversion.pdf Carbon Composites e. V., Stand: 11.2019 (abgerufen am 3.05.2021)
[Sko14]	Skolaut, W. (Hrsg.): Maschinenbau. Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor – Studium. 1. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014, ISBN 978-3-8274- 2553-9
[Sol18]	Schollerer, M.; Kosmann, J.; Völkerink, O.; Holzhüter, D.; Hühne, C.: Surface toughening – An industrial approach to increase the robustness of pure adhesive joints with film adhesives, The Journal of Adhesion 95 (2018), pp. 495-515, DOI 10.1080/00218464.2018.1555041
[Sow18]	Sowka, S.: Experimentelle Untersuchungen von festigkeitssteigernden Maßnahmen an Überlappungsklebungen mit Filmklebstoffen, Bachelorarbeit Hochschule Hamm Lippstadt. (Hrsg.): Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Lippstadt 2018

[Sra13]	Schrauf, G.; Airbus Operations GmbH, Bremen: The Need of Large-Scale HLFC Testing in Europe. schrauf_2013_HLFC_research-needs_v2.pdf (aflonext.eu) Stand: 2013 (abgerufen am 08.01.2021)
[Sul14]	Schulze, K.; Hausmann, J.; Heilmann, S.; Wielage, B.: Bruchmechanische Untersuchung der Titan-PEEK-Grenzfläche in thermoplastischen Titan- CF/PEEK-Laminaten durch Mixed-Mode-Bending-Versuche. Matwiss und Werkstofftech. 45 (2014), Nr. 6, S.537-545, WILEY-VCH Verlag GmbH und Co. KGaA, Weinheim, DOI 10.1002/mawe.201400269
[Sür07]	Schürmann, S.: Konstruieren mit Faser – Kunststoff – Verbunden. 2. Aufl., Springerverlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007, ISBN 978-3-540-72189-5
[Swo80]	Swozil, A.; Ullmann, G.: Unter welchen Voraussetzungen bewähren sich Korrosionsschutzauskleidungen aus Fluorkunststoff-Folien. Chemie Ing. Tech 52 (1980) Nr. 4, S. 292-298, Verlag Chemie, Weinheim, DOI 0009-286X/80/0404-0292\$02.50/0
[Wei18]	Weißbach, W.; Dahms, M.; Jaroschek, C.: Werkstoffe und ihre Anwendungen - Metalle, Kunststoffe und mehr. 20. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018, ISBN 978-3-658-19891-6
[Wid06]	Widiawan, A. K.; Tafazolli, R.: High Altitude Platform Station (HAPS): A Review of New Infrastructure Development for Future Wireless Communications. Wireless Personal Communications 42 (2006), pp. 387-404, Springer, Guildford, DOI 10.1007/s11277-006-9184-9
[Wie07]	Wiedemann, J.: Leichtbau. Elemente und Konstruktion. 3. Aufl., Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007, ISBN 3-540-33656-7

Anhangsverzeichnis

Anhang A	Datenblätter und Protokolle A-1
Anhang A.	Life Data Sheet A-1
Anhang A.2	2 Prepreg Hexply [®] 8552 A-8
Anhang A.3	3 Kynar®740A-11
Anhang A.4	4 NOWOFLON A-12
Anhang A.	5 Lite TK (PEEK) A-13
Anhang A.6	6 Loctite EA 9695 Aero A-14
Anhang A.7	Z Loctite EA 9394 Aero A-17
Anhang A.8	3 Vermessungsprotokoll A-20
Anhang B	MesswerttabellenB-1
Anhang B.	Aufgenommene MesswerteB-1
Anhang B.2	2 Berechnete SchubspannungswerteB-4
Anhang B.3	3 Mittelwert und StandardabweichungB-8
Anhang C	DiagrammeC-1
Anhang D	ARAMIS AuswertungD-1
Anhang D.	1 Vergleich des Steifigkeitseinflusses einer ST-Breite von 5mm D-1
Anhang E	BruchbilderE-2

Anhang A Datenblätter und Protokolle

Im Anhang A sind alle Datenblätter und Protokolle hinterlegt, die zum Verständnis dieser Arbeit relevant sind.

Anhang A.1 Life Data Sheet

DLR LDS - Tension to	DokNr. Ausgabe Daum Seite Seite	LDS-Stacking-01 1.0 1 von 13	Dok. Auego Patro DLR LDS - Tension test Stacking sequence	r. LDS-Stacking-01 be 1.0 2 von 13
			Inhaltsverzeichnis	
	Life Data Sheet		1 ALLGEMEINE INFORMATIONEN	3
]-	Diese Akte ist am Bauteil mitzuführen -		2.1 Prepreg	5
			3.1 Ablage der Lagen und Ausrichtung 3.2 Versuchsaufbauten 3.3 Prozessbeschreibung Autoklav	8 8 6 9
			4 LAMINAI FLATI EN ENUNON INCULLE	10
	Projekt: SLS Proben ST		5 BEMERKUNGEN	11 12
	Kurzkennung: ECHO			
Kostenträger:	3012845			
Geplanter Beginn:	18.11.2020			
Geplanter Abschluss:				
Erstellt:	Schollerer Datum, Projektleiter			
Geprüft:	Datum, Fertigung			

Į.

Kontakt: Martin Schollerer, <u>Martin Schollerer@dlr.de</u> oder Durchwahl 2224



040	omein	l actionation of the second	Einzellagenanzahl		harößa	
Nr	-	-	Stück	Maße [mm] 0° x 90°		1
5	Winkel	06	1x	400 x 28	Je 1 Lage	>
5	Winkel	06	1x	400 x 26	Je 1 Lage	>
5	Winkel	06	1×	400 x 24	Je 1 Lage)
5	Winkel	06	1×	400 x 22	Je 1 Lage)
5	Winkel	06	1×	400 x 20	Je 1 Lage	,
2	Winkel	06	1x	400 x 18	Je 1 Lage	,
2	Winkel	06	1x	400 x 16	Je 1 Lage	,
2	Winkel	06	1x	400 x 14	Je 1 Lage	-
5	Winkel	06	1x	400 x 12	Je 1 Lage	,
2	Winkel	06	1x	400 × 10	Je 1 Lage	· ·

-45°

+45°

°06

ò

Plattengeometrie und Schnittplan für Proben

DLR Braunschweig Prepreg Handlegen Autoklav, Cutter, Abzugshaube

Fertigungsort: Fertigungsart: Fertigungsanlagen:

3 Fertigung

LDS-Stacking-01 Dok.-Nr.

Dok.-Nr. LDS--Stacking-01 Ausgabe 1.0 Datum 5 von 13 Seite 5 von 13

DLR LDS - Tension test Stacking sequence

2

		30° < <	30' 11	50°	50° / V											
		0.10	00	°,	0	7	2	7	7	7	7	2	2	>	2	>
50	Fertig	Je 12 Lagen /Ausrichtung	Je 20 Lagen /Ausrichtung	Je 10 Lagen /Ausrichtung	Je 8 Lagen /Ausrichtung	Je 1 Lage										
OH.12.20	Maße [mm] 0° x 90°	390x418	390x209	141x400	325x400	29 x 400	27 x 400	25 x 400	23 x 400	21 x 400	19 x 400	17 x 400	15 x 400	13 x 400	11 x 400	54 x 400
au	An- zahl	3x	5x	1x	1x ×	1x	1×	1×	1×	1×	1×	1×	1×	1×	1×	1x
udd e	La- gen															
ende Platten: 2ປຣວໄແ	Lagenaufbau	[0°, -45°, 90°, +45°, 0°, -45°, 90°,+45°,]s	[0°, -45°, 90°, +45°, 0°, -45°, 90°,+45°,]s	[0°, -45°, 90°, +45°, 0°, -45°, 90°,+45°,]₅	[0°, -45°, 90°, +45°, 0°, -45°, 90°,+45°]4	0°	°0	°0°	°0	°O	°O	°O	°O	°O	°O	00
ht zu fertig	Name	Große Platte	Kleine Platte	Demonst- rator2	Demonst- rator3	Winkel										
Übersic	Platte	-	2	e	4	5	5	2	5	5	5	2	2	5	5	5

Anhang





Aufbau gesiegelt und evakuiert: [< 0,3 mbar]

aufbringen ● Vakuumsack aufbringen → mit Schnellverschluss evakuieren

Trennfolie auf Prepregpaket legen (siehe Versuchsaufbau)

Deckblech (gereinigt und getrennt) aufbringen

Beschreibung:
Trennfolie auf Grundplatte legen
Prepregpatet auf Grundplatte mit Trennfolie legen
Prepregpatet legen (she Versucht

DLR LDS - Tension test Stacking sequence

Unterschrift i.O.

3.3 Prozessbeschreibung Autoklav

- Autoklavzyklus: (Gr. Autoklav: 100, Kl. Autoklav:) 1. Anschluss volles Vakuum (-1 bar) 2. Einschatten voller Autoklavdruck (+7 bar absolut) 3. 1-3°C/min heizen auf 110°±5°C

A-5

- 3. 1-3°C/min heizen auf 110°±5°C
 4. 60 Minuten (±5 min) auf 110°±5°C
 5. 1-3°C/min auf 180°±5°C heizen
 5. 1-20 Minuten (±5 min) auf 180°C haiten
 6. 120 Minuten (±5 min) auf 180°C haiten
 7. Abkühen mit 2 -5°C pro Minute
 8. Bei 60°C Bautelitemperatur Autoklav belüften



— 3.2 bar

7 bar

- -0.2 bar -1 bar

Vacuum



Dok.-Nr. Ausgabe Datum Seite



A-6



Epoxy matrix (180°C	
HEXCEL	Product Data Sheet
® 8552	ix (180°C/356°F curing matrix)

HexPly

Description HexPIy[®] 8552 is a high performance tough epoxy matrix for use in primary aerospace structures. It exhibits good impact resistance and damage tolerance for a wide range of applications.

HexPly® 8552 is an amine cured, toughened epoxy resin system supplied with unidirectional or woven carbon or glass fibres.

HexPly® 8552 was developed as a controlled flow system to operate in environments up to 121°C (250°F)

- Benefits and FeaturesToughened epoxy matrix with excellent mechanical properties
 - Elevated temperature performance
- Good translation of fibre properties
 Controlled matrix flow in processing
 - Available on various reinforcements
 - Excellent drape and tack

Resin Matrix Properties



Product Data Sheet 5**52** C/356°F curing matrix)

Prepreg Properties - HexPly[®] 8552 UD Carbon Prepregs

Physical Properties

	Units	AS4	IM7
Fibre Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.79 (0.065)	1.77 (0.064)
Filiament count/tow		12K	12K
Resin density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.30 (0.047)	1.30 (0.047)
Nominal Cured Ply Thickness 8552 /35%/134	mm (inch)	0.130 (0.0051)	0.131 (0.0052)
Nominal Fibre Volume	%	57.42	57.70
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.58 (0.057)	1.57 (0.057)

Anhang A.2 Prepreg Hexply® 8552

Test	Units	Temp °C (°F)	Condition	AS4	1M7
		-55 (-67)	Dry	1903 (267)	2572 (373)
0°Tensile Strength	MPa (ksi)	25 (77)	Dry	2207 (320)	2724 (395)
		91 (195)	Dry	ı	2538 (368)*
		-55 (-67)	Dry	I	174 (25.3)
90°Tensile Strength	MPa (ksi)	25 (77)	Dry	81 (11.7)	64 (9.3)
		93 (200)	Dry	75 (10.9)	92 (13.3)*
		-55 (-67)	Dry	134 (19.4)	163 (23.7)
0°Tensile Modulus	GPa (msi)	25 (77)	Dry	141 (20.5)	164 (23.8)
		91 (195)	Dry	I	163 (23.7)*
		ı	I	1	ı
	GPa (msi)	25 (77)	Dry	10 (1.39)	12 (1.7)
INIOUUUS		93 (200)	Dry	8 (1.22)	10 (1.5)*
00Commence		-55 (-67)	Dry	1586 (230)	1
C CUTIPIESSION	MPa (ksi)	25 (77)	Dry	1531 (222)	1690 (245)
Infilme		91 (195)	Dry	1296 (184)	1483 (215)
and an		-55 (-67)	Dry	124 (18)	ı
	GPa (msi)	25 (77)	Dry	128 (18.6)	150 (21.7)
INIOUUIUS		91 (195)	Dry	122 (17.7)	162 (23.5)
		-55 (-67)	Dry	164 (23.8)	I
		25 (77)	Dry	128 (18.5)	137(19.9)
0° ILSS	MPa (kci)	91 (195)	Dry	122 (14.7)	94 (13.6)*
(Shortbeam shear)		25 (77)	Wet	117 (16.9)	115 (16.7)
		71 (160)	Wet	84 (12.2)	80 (11.6)**
		91 (195)	Wet	78 (11.3)	I
In-plane Shear	MDa (kei)	25 (77)	Dry	114 (16.6)	120 (17.4)
Strength		93 (200)	Dry	105 (15.2)	106 (15.4)*

Bold 93°C (200°F) Bold* 104°C (220°F) Bold** 82°C (180°F)

-

BISS Metacolity antixy Metacolity antixy Metacolity antixy Metacolity antixy Metacolity antixy sector barreshow Product bars show Prodeshars show <td< th=""><th>Pa (ms) -55 (-67) Dry 66 (9.5) 70 (10.22) B6 (12.3) B6 (12</th><th>25 (77) Dy 84 (12.2) 76 (11.4) Bear sec geory Bear sec (geory Bear sec (geory -55 (67) Vet 75 (10.2) - - Typical Neat Resin Data Yellow 25 (67) Wet 75 (10.2) - - Typical Neat Resin Data Yellow 25 (77) Wet 75 (10.2) - - Dour Yellow 25 (77) Wet 72 (10.4) - - Colour Yellow 91 (195) Wet 59 (8.5) - - Datas Transition Temperature, T dry 200°C (392°F) czoory Bear-serc (reory - 0.045 (10.4) - - 0.047 (10.47°)</th></td<>	Pa (ms) -55 (-67) Dry 66 (9.5) 70 (10.22) B6 (12.3) B6 (12	25 (77) Dy 84 (12.2) 76 (11.4) Bear sec geory Bear sec (geory Bear sec (geory -55 (67) Vet 75 (10.2) - - Typical Neat Resin Data Yellow 25 (67) Wet 75 (10.2) - - Typical Neat Resin Data Yellow 25 (77) Wet 75 (10.2) - - Dour Yellow 25 (77) Wet 72 (10.4) - - Colour Yellow 91 (195) Wet 59 (8.5) - - Datas Transition Temperature, T dry 200°C (392°F) czoory Bear-serc (reory - 0.045 (10.4) - - 0.047 (10.47°)
---	--	--

4

0

HEXCEL	Η	exPlv® 85!	52	HEXCI	
rix) Product Data Sheet	Ebo	oxy matrix (180°C	//356°F curing matrix)	Product D	ata Sheet
	Storage Life Tack Life:	10 days at RT (23°C/	73°F)		
the autoclave pressure reaches	Out Life:	30 days at RT (23°C/	73°F)		
± 9°F) minutes.	Shelf Life:	12 months at -18°C(0°F) (maximum, from date of manufa	acture)	
± 9°F) 5 minutes.	Definitions: Shelf Life:	The maximum storac	le life for HexPIV® preprea. upon rec	eipt by the customer, when stored	
.60°C (140°F) or below.		continuously, in a sea expiry date, consult t	aled moisture-proof bag, at -18°C(0° he box label.	F). To accurately establish the exert of the exercised of the exercise	t
	Tack Life:	The time, at room ter lay-up.	nperature, during which prepreg ret	ains enough tack for easy compor	lent
the autoclave pressure reaches	Out Life:	The maximum accun freezer and cure.	urlated time allowed at room temper	ature between removal from the	
± 9°F) minutes.					
± 9°F) 5 minutes.	Precautions fo	or Use	uncurred synthetic resins and fine fib	rous materials should be observe	-
(60°C (140°F) or below.	and a Safety Da for the operator	atta Sheet is available for and avoids contamine	or this product. The use of clean dist attion of material and components.	oosable inert gloves provides prot	ction
w heat-up rates should be used for thicker tents of the component should be made during the					
s to ensure suitability for the particular application.					
its.					
ure Presure	For more info Hexcel is a lead Our comprehen	mation ling worldwide supplier isive range includes:	of composite materials to aerospac	e and industrial markets.	
	 HexTow[®] car 	bon fibers	 HexFlow[®] RTM resins 	 Engineered core 	
	 HexForce[®] re HiMav[®] multi 	einforcements avial	 HexBond[™] adhesives HexTool[®] trooling materials 	 Engineered products Polysnaad® laminatas 	
	reinforcemen	ts	HexWeb® honeycombs	& pultruded profiles	
	 HexPly[®] prep HexMC[®]-i m 	aregs olding compounds	 Acousti-Cap[®] sound attenuating honeycomb 	 HexAM[®] additive manufacturi 	Ð
1	For U.S. quotes telephone numk	, orders and product i bers and a full address	Information call toll-free 1-800-688-7 list, please go to:	734. For other worldwide sales of	027M-STO-A
ii	https://www.h	excel.com/contact			Ŀ
Vacuum	©2020 Hexcel Corpor provided herein was n information at any time of the suitability of our inplied warranties of r	ation – All rights reserved. Hexc raterially accurate as of the date a. Any performance values provi products for your particular pur neochatability with who who	el Corporation and its subsidiaries ("Hexca") believe this document was issued. Hexcel reserves the ing dead are considered in progressmithation. Dose: Hexcel makes to warranty or representation, particular purpose, and disclatims any liability arking particular purpose.	that the technical data and other information In to update, revise or modify such technical da admitted not constitute a sustistute for your own to express or implied, including but not immited to or out of or related to, the use of or reliance upon	a and sting he any of
2	11/2 (OVIIII)(CII (CII CI		47.101.11.		9

HexPIy[®] 8552 Epoxy matrix (180°C/356°F curing m

- Curring Conditions *Cure cycle for monolithic components* 1. Apply full vacuum (1 bar). 2. Apply 7 bar gauge autoclave pressure. 3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when t

- approximately 1 bar gauge. 4. Heat at 1.3°C/min (2.8°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 6 5. Hold at 1.3°C/min (2.8°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9 6. Heat at 1.3°C/min (2.8°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9° 7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 m 8. Uodi at 2.5°C (4.3°F) per minute 9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60

- Cure cycle for honeycomb sandwich components
 1. Apply full vacuum (1 bar).
 2. Apply 101 vacuum (1 bar).
 2. Apply 3.2 bar gauge autoclave pressure.
 3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the a approximately 1 bar gauge.
 4. Heat at 1.3°C/min (2.8°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 min.
 6. Heat at 1.3°C/min (2.8°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 80 minutes ± 5 min.
 8. Cool at 2.5°C (4.9°F) per minute
 9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°

- Note: For both cure cycles at each stage, use the temperature shown by the leading t

Heat-up rates are dependent on component thickness, eg, slc components and large tools. Accurate temperature measurent cure cycles by using thermocouples. Performance testing should accompany alternative cure cycle

Curing Cycle for Honeycomb and Monolithic Componer



Professional Plastics				Thermal Properties			
)				CTE, linear 20°C	150 µm/m-°C 8	33.3 µin/in-°F	Parallel to flow
Kunar® 740	DVDF _ Ma	tarial Data (hoot Abot	Melting Point	168 °C	334 °F	10°C/min
Dhvsical Pronerties	Metric	Endlish	Comments	Maximum Service Temperature, Air	135 °C	275 °F	Deflection Temp at 0.46 MPa Load
	1 70 2/00	0 DE49 IN/IN3		Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	135 °C	275 °F	
	2000 o			Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	105 °C	221 °F	
Water Absorption	0.03%	0.03 %	Li meridiki . A konserti ne	Vicat Softening Point	135 °C	275 ∘F	50°C/hr; 50N
	% CI0.0			Glass Temperature	-40 °C	-40 °F	10°C/min
Melt Flow	1.1 g/10 min	1.1 g/10 min	230°C/5 kg load	Flammability, UL94	0-7	0-V	1.6 mm
Mechanical Properties				Flammability, UL94	٥-٧	0-N	0.8 mm
Tensile Strength, Yield	50 MPa	7250 psi	50 mm/min	Oxygen Index	43 %	43 %	
Elongation at Break	Min 50 %	Min 50 %	Nominal Strain; 50 mm/min				
Elongation at Yield	2 %	7 %	50 mm/min				
Tensile Modulus	1.7 GPa	247 ksi	1 mm/min			100	
Charpy Impact, Unnotched	24.4 J/cm ²	116 ft-lb/in ²				いう	UNAL
Charpy Impact, Notched Low Temp	0.5 J/cm ²	2.38 ft-lb/in ²	at -30°C				
Charpy Impact, Unnotched Low Temp	18.6 J/cm ²	88.5 ft-lb/in ²	at -30°C		S	S	NC/
Charpy Impact, Notched	1.4 J/cm ²	6.66 ft-lb/in ²		in Super-	unliar of Enc	- Danada	lactic Change
Tensile Creep Modulus, 1 hour	1050 MPa	152000 psi		Inc Guinean			lastic ollapes
Tensile Creep Modulus, 1000 hours	570 MPa	82700 psi					
Electrical Properties				nod nich	000/00	7277 JC	
Electrical Resistivity	2e+014 ohm- cm	2e+014 ohm- cm			e (000) a:	1011-06	
Surface Resistance	Min 1e+015 ohm	Min 1e+015 ohm		or E-Mail: <u>sa</u>	ales@pro	plas.co	٤I
Dielectric Constant	7.7	7.7	1 MHz	Asia Custome	ers call +65 (5266 6193	
Dielectric Constant, Low Frequency	10.8	10.8	100 Hz	or E-Mail asia	-sales@pro	plas.com	
Dielectric Strength	21 kV/mm	533 kV/in				:	
Dissipation Factor	0.231	0.231	1 MHz	15 Locat	cions Worldv	vide	
Dissipation Factor, Low Frequency	0.026	0.026	100 Hz				
Comparative Tracking Index	600 V	009 V					

Anhang A.3 Kynar®740

۳	
Π	
mm	
Hh	
jiiij	
-Unit	
MIII	

Anhang A.4 NOWOFLON

Technische Eigensch NOWOFLON PVDF	aften von	Tech NOW	OFLON	PVDF	of	
Merkmal Property	Prüfmethode Test Method	Einheit Unit	NOWOFL homopoly 50 µm, unv 50 µm, unv	ON PVDF mer film verstreckt ioriented	NOWOF copoly 50 µm, u 50 µm, u	LON PVDF /mer film, nverstreckt, unoriented
Mechanisch Mechanical			M.D.	T.D.	M.D.	Ū.
Zugfestigkeit Tensile Strength at Break	DIN EN ISO 527	MPa	>50	>35	>35	>25
Bruchdehnung Elongation at Break	DIN EN ISO 527	%	>450	>450	>450	>450
Weiterreißfestigkeit Tear Strength	DIN EN ISO 8256	N/mm	>4000	>200	>450	>100
Thermisch Thermal						
Schmelzpunkt Melting Point	DIN EN ISO 11357	ů	175	175	163	163
Schrumpf 150 °C/10 Min Shrinkage 150 °C/10 min	DIN EN ISO 11501	%	5	2	15	0
Elektrisch Electrical						
Durchschlagsfestigkeit (100 µm) Dielectric Strength (100 µm)	ASTM D 149	kV/mm	20			70
Dielektrizitätskonstante Dielectrical Constant	ASTM D 150 1 kHz at 23 °C		6			0
Dielektrischer Verlustfaktor Dissipation factor	ASTM D 150 1 kHz at 23 °C		0'0	12		0,02
Diese Messwerte sind materialtyr doch keine Produktspezifikation r -ür weitere Informationen kontaktie	ische Mittelwerte, je- nit Garantieanspruch. ren Sie uns bitte direkt.	This dat should r informat	a represents not be used fi ion please co	typical perform or specificat	ormance pr tion purpos DFOL direc	roperties an es. For mor tly.
Permeation NOVOFLON PVDF Homopolyme Permeability NOVME ON PVNE homopolyme		Mittelwert Mean Value			Einheit Unit	
Wasserdampf Water Vapour		0			g/m² x d	
Luft		0,7		cm	l3/m² x d x l	bar

www.nowofol.com
1ail: info@nowofol.de •
602-0 • E-N
+49 (0)8662 6
÷.
H-
Germany •
sdorf •
• 83313 Sieg
ŝ
5
Breslauer St.

Kohlendioxid Carbon Dioxide

Helium Helium

60 10

cm³/m² x d x bar cm3/m2 x d x bar cm3/m2 x d x bar

cm3/m2 x d x bar

N с

Sauerstoff Stickstoff Nitrogen Oxygen



vohl als steife, ho	als flexible, weich	
OWOFLON PVDF Folie ist sow	omopolymervariante, als auch a	olymervariante verfügbar.

vor allem durch niedrige Permeationswerte, d. h. gute Barriereeigenschaften aus, während NOWOFLON PVDF Copolymerfolien durch besseres Kättebruch- bzw. Ver-NOWOFLON PVDF Homopolymerfolien zeichnen sich sprödungsverhalten überzeugen.

Folieneigenschaften:

Flame resistance UL 94
 Low permeation against gases
 High chemical resistance
 Good electrical properties
 Plezoelectric properties – on request

Film thickness:	25 - 500 µm	Standard width:	500 / 780 mm	Colour:	Natural clear	Weight:	179 g/m ² for 100 µm
Folienstärke:	25 - 500 µm	Standardbreiten:	500 / 780 mm	Farbe:	Natur transparent	Flächenbezogene Masse:	179 g/m ² bei 100 µm

Anhang A.5 Lite TK (PEEK)



>> Eigenschaften im Vergleich

Spannungsrissbeständig

LITE TK (PEEK)	Prüfmethode	Einheit	
PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN			
Dichte	ISO 1183	g/cm³	1,3
Glasübergangstemperatur	ISO 11357	°C	143
Kristallitschmelzpunkt		°C	343
MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN			
Streckspannung bei 23°C	ISO 527	N/mm²	90
Streckspannung bei 150°C	ISO 527	N/mm²	35
Zugfestigkeit bei 23°C	ISO 527	N/mm²	130
Zugfestigkeit bei 150°C	ISO 527	N/mm ²	80
Reißdehnung bei 23°C	ISO 527	%	170
Reißdehnung bei 150°C	ISO 527	%	300
E-Modul	ISO 527	N/mm ²	3200
Kanteneinreißkraft	EN 60674	Ν	140
Weiterreißwiderstand Trapez	ISO 8296	N/mm²	240
ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN			
Dielektrizitätszahl 1kHz (bei 23°C)	IEC 250	-	3,3
Dielektr. Verlustfaktor: 1kHz (bei 23°C)	IEC 250		0,0013
Spezif. Durchgangswiderstand	IEC 93	OHM.cm	1,00E+18
Spezif. Oberflächenwiderstand	IEC 93	OHM	1,00E+16
Durchschlagsfestigkeit	IEC 243	kV/mm	180
СТІ	IEC 112	V	175
THERMISCHE EIGENSCHAFTEN			
Dauergebrauchstemperatur	UL746B	°C	220
Brandklasse	UL94	VTM/µ	0/25
Lin. Wärmeausdehnungskoeff. x 10 ³	E831	1/°K	0,046
Wärmeleitfähigkeit x 10 ²	DIN 52612	W/mK	25
>> Eigenschaften im Vergleich			

Technical Process Bulletin LOCTITE EA 9695 AERO Epoxy Film Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9695)	LOCTITE.	schnical Process Bulletin	LOCTITE EA 9695 AERO Epoxy Film Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9695)	
composite bonding film adhesive with excellent environmental resistance. It is tructures, both for co-cure and pre-cured laminates. Its ability to cure at lower to the second pre-cured laminates to a billy to cure at lower to be a second with the second pre-cured laminates and the second pre-cure and the second pre-cured laminates and the second pre-cured laminate	Curring - This product may be cu up rate to the cure temperature is Pressure should be applied bef assembly.	red for 1 - 1 ½ hours @ 250 s not critical, but should be ore heating the parts to b	0°F/121°C or for 1 - 2 hours @ 350°F/177°C. Heat between 1° and 10°F (0.5° and 5.5°C) per minute. e bonded and maintained until cool down of the	ee.
r for repair of composite structures. Its low now characteristics minimize prepreg esistance	Cleanup - It is important to remo the adhesive is cured, it is diffu- removed with detautured alcohol entering the uncured bondline as information pertaining to the safe	we excess adhesive from th sult to remove except by r and many common industri solvent will degrade the fin and proper use of solvents	he part and bonding tools before it hardens. Once mechanical abrasion. Uncured adhesive may be al solvents. Be careful to prevent any solvent from al bond performance. Consult with your supplier's	e e e s
Noisture Resistance	Bond Strength Performance Tensile Lap Shear Strength Tensile Ian shear strength teste	ed per ASTM D1002. Adh	erends are 2024-T3 bare aluminum treated with	£
	phosphoric acid anodizing per AS	STM D3933. Adhesive cure	ecycle: 120 minutes @ 350°F/177°C.	
hop Floor Usage and Repair Applications		Typical Resu 0.035 psf (171 α/m²)	ults for Film Weight 0.050 nsf (244 n/m²)	
rd is ready to use as received. The adhesive should be removed from cold to room temperature (77°F/25°C). All moisture should be removed from the pening. The adhesive film has a protective liner(s) on it which must be removed "Applying" below). The liner(s) will always be a contrasting color from the y confirmation of removal.	Test Temperature. °F/°C 77/25 250/121 300/149	psi 4,600 31.7 4,400 30.3 2,900 20.0	bei 5,000 34.5 3,400 23.4	
quires refrigerated storage. Store @ 0°F/-18°C or below for maximum storage C is greater than 12 months from date of shipment. Store only in sealed • contamination. Allow all moisture to evaporate from container before opening	Double Lap Shear Strength Properties were measured on Adhesive cure cycle: 120 minute:	double overlap shear sp s@350°F/177°C.	ecimens of pre-cured epoxy graphite laminate.	aj
should be clean, dry and properly prepared. For optimum surface preparation Preparation Guide. The adhesive film, with one liner left on it, may be tacked to shape and size. The liner should remain with the adhesive until just before ther faying surface. This will minimize contamination of the adhesive bond. The in contact until the adhesive has cured. Usually 25 to 50 ps/17 to 34 kPa is mating.	Test Temperature, °F/°C -67/-55 77/25 160/71 270/132	Typical Result 0.035 psf (171 g/m ²) psi 0.000 5,000 34.5 5,000 34.5 5,000 34.5 5,000 34.5 5,000 34.5 5,000	ts for Film Weight 0.050 psf (244 g/m ³) 201 5,000 34.5 5,400 37.2 2,800 19.3	
adhesive may be used within the following schedule after removing from cold				
90 days 45 days				
Henkel			Henkel	

Anhang

Anhang A.6 Loctite EA 9695 Aero



LOGTITE

INTRODUCTION LOCITTE EA 9895 AERO is a co suited for bonding composite stru temperatures makes it suitable fo resin intermingling.

FEATURES

- X-ray Opaque
 Excellent Environmental Resis
 Reticulatable
 Good Pre and Post Bond Mois
 Low Flow
 Allows 250°F/121°C or 350°F.
 Allows 250°F/121°C or 350°F.
 Co-Cure with Composites
 Long Out time Facilitates Shop

Handling This product is in film form and storage and allowed to warm to protective packaging before open prior to parts assembly (see "A adhesive to allow the user easy c

Application Storage Life - This product requ life. Warranty life @ 0°F/-18°C containers to prevent moisture of for use.

Applying - Bonding surfaces shu consult the LOCTITE Surface Pre the detail part for cutting to shr assembly of the detail to the othe bonded parts should be held in-sufficient to assure proper part m

Open Assembly Time - This at storage: @ 77°5/25°C at least 90 @ 90°5/32°C at least 45



1 of 5
LOCTITE EA 9695 AERO Epoxy Film Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9695)	L 0 C1	Technical Process Bull	LOCTIT E	E EA 9 poxy Fi (KNOWF	1695 AEI Im Adhes	
2^{n} (5.1 cm x 5.1 cm) honeycomb sandwich bonds e sheets bonded to honeycomb core HRP 3/16	Environmental Con Composite specimen up rate of 3° to 5°F (cured laminates for d	ditioning s for Flatwise Tensile were co- (1.8° to 3°C) per minute. Autoc touble overlap shear used the s.	cured using a 120 minu lave pressure was 45 p ame cure with the exce	te cure @ 35 si/310 kPa d btion of 85 ps	0°F/177°C with uring cure cycle si/585 kPa pressi	a heat Pre- ure.
sults for Film Weight r ²⁾				Typical I 0.050 psf (Results 244 g/m²)	
2a psi MPa 9 1,000 6.9	Test Property	Environmental Conditioning	Test Temperature, °F/°C	psi	MPa	
9 1,200 8.3 9 1,200 8.3		Dry		5,400	37.2	
	Composite	1000 hour soak @ 160°F/71°C & 100% RH	77/25	4,400	30.3	
	Double Lap Snear Strength	Dry		5,400	37.2	
ained using 3" x 6" (7.1 cm x 15.2 cm) honeycomb		1000 hour soak @ 160°F/71°C & 100% RH	160/71	3,900	26.9	
prepreg tace sheet bonded to honeycomb core HKP 28 kg/m ³ . Pull rate used 4" (10.2 cm) per minute.	Composite	Dry		1,200	8.3	
	Flatwise Tensile Strength	1000 hour soak @ 160°F/71°C & 100% RH	160/71	850	5.9	
ilim Weight g/m ² 5.2 4.5 4.5	Service Temperatur Service temperature test method ASTM D	e is defined as that temperature ∂ 1002 and is >300°F/149°C.	at which this adhesive s	till retains 100	00 psi/6.9 MPa u	buisr
	Bulk Resin Properti Glass Transition Te the G' curve.	ies • mperatute (Tg) - Tg, measurec	d by dynamic mechanic	al analysis, is	taken at the kne	se of
erends treated with phosphoric acid anodizing per Its 89.6	<u>T</u>g Dry Cured 1 hr. @ 250° Cured 1 hr. @ 350°	F/121°C Result F/177°C 302°F/150°C F/177°C 302°F/150°C				
Henkel					E	Kel

LOCTITE. Technical Process Bulletin

Flatwise Tensile Composite to Honeycomb (co-cured). Specimen was 2" x 2" (5.1 c using two plies of co-cured epoxy graphite prepreg face sheet inch/4.76 mm cell, 0.50 inch/12.7 mm thick - 8 pd/128 kg/m³).

Ŧ	244 g/m²)	MPa	6.9	8.3	8.3
for Film Weigh	0.050 psf (psi	1,000	1,200	1,200
pical Results	171 g/m²)	MPa	6.9	6.9	6.9
Tyl	0.035 psf (psi	1,000	1,000	1,000
		Test Temperature, °F/°C	-67/-55	77/25	160/71

Short Beam Shear Performance Composite to Honeycomb (co-cured). Properties were obtained us sandwich bonds torm at three-py do-cured epoxy graphite preped it 3/16 inch/4.46 mm cell, 0.50 inch/12.7 mm thick - 8 pcl/128 kg/m^{*} Adhesive cure cycle: 120 minutes @ 350°F/177°C.

ilts for Film Weight sf (244 g/m ²)	<u>MPa</u>	2.2 4.5	4.5
Typical Resu 0.050 p	psi JEO	650	650
	Test Temperature, °F/°C	77/25	160/71

Peel Performance Bell peel strength tested on 2024T-3 bare aluminum adherends ASTM D3933. Cure cycle: 120 minutes @ 350°F/177°C.

Typical Results Ib/in N/25mm 20 89.6 Test Temperature, °F/°C 77/25 4 of 5

3 of 5

	LOCI
Technical Process Bulletin	
LOCTITE.	

CTITE EA 9695 AERO Epoxy Film Adhesive (KNOWN AS HYSOI EA 9695)

Handling Precautions

Do not handle or use until the Material Safety Data Sheet has been read and understood. For industrial use only.

DISPOSAL INFORMATION

Dispose of spent remover and paint residue per local, state and regional regulations. Refer to HENKEL TECHNOLOGIES MATERIAL SAFETY DATA SHEET for additional disposal information.

PRECAUTIONARY INFORMATION General:

As with most epoxy based systems, use this product with adequate ventilation. Do not get in eyes or on skin. Avoid breathing the vapors. Wash thoroughly with soap and water after handling. Before using this product refer to container label and HENKEL TECHNOLOGIES MATERIAL SAFETY DATA SHEET for additional precautionary, handling and first aid information.

Note

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility to determine subability to there wore whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine subability to the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any paracid shaft may be involved in the handling and use thereor. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel corporation specificality disclaims any liability to consequential or incidential damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Ucorporation patents that may cover such processes or compositions is not to be interpreted as representation patents that may cover such processes or compositions is not to be interpreted as ucorporation patents that may cover such processes or compositions is not to be interpreted as the resonantiation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be exerted by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Rev. 9/2013

Henkel Corporation Aerospace | 2850 Willow Pass Road | Bay Point, CA 94565 PHONE: +1.925,458.8000 | FAX: +1.925,458,8030| www.henkel.com/aerospace

Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Herkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patient and Trademark Office.

Henke

The data contribute free in a functionation who and se biological to be entited as anne expondibility for the careful station of the production by other one other other and the static station of the production of the careful static s

5 of 5

Anhang A.7 Loctite EA 9394 Aero



Epoxy Paste Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9394) LOCTITE EA 9394 AERO

INTRODUCTION LOCTITE EA 9394 AERO is a two-part structural paste adhesive, which cures at room temperature and possesses serveillent strength to 350°F/17°C and higher. Its thixotropic nature and excellent high temperature compressive strength also make it ideal for porting, filling and liquid shim applications. LOCTITE EA 9394 AERO is qualified to MMM-A-132 Rev A, Type I, Class 3.

The mechanical properties in this data sheet are also valid for LOCTITE EA 9394S AERO. LOCTITE EA 9394S AERO is only available in Semkits and differs from LOCTITE EA 9394 AERO as it has 1 part less thixotrope in the Part B to aid packaging. All other mechanical and handling properties similar.

FEATURES

- Room Temperature Cure
 Good Gap Filling Capabilities
 350°F/177°C Performance
- Potting Material
- Room Temperature Storage
 Outstanding Mechanical Properties
 Long Pot Life
 Low Toxicity

Uncured Properties

A-17

<u>Mixed</u> Gray	1600 Poise Spdl 5 @ 20 rpm	160 Pa·S Spdl 5 @ 2.09 rad/sec 1.36
<u>Part B</u> Black	200-700 Poise Spdl 4 @ 20 rpm	20-70 Pa·S Spdl 4 @ 2.09 rad/sec 1.00
<u>Part A</u> Gray	4000-8000 Poise Spdl 7 @ 20 rpm	400-800 Pa·S Spdl 7 @ 2.09 rad/sec 1.50
Color	Viscosity, 77°F Brookfield, HBT	Viscosity, 25°C Brookfield, HBT Density (g/ml)

1 year 1 year Shelf Life @ <77°F/25°C

This material will normally be shipped at ambient conditions, which will not alter our standard warranty, provided that the material is placed into its intended storage upon receipt. Premium shipment is available upon request.



1 of 6

40671776. Technical Process Bulletin LOCTITE EA 9394 AERO Epoxy Paste Adhesive (known as Hysol EA 9394)	40671715. Technical Process Bulletin LOCTITE EA 9394 AERO Epoxy Paste Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9394)
 Do not allow the adhesive to sit in the static mixer unattended for more than 90 minutes. The material is curing within the static mixer and when pressure is re-applied back onto the plungers, back pressure will occur and potentially result in cartridge failure. 	After Exposure to/Test Temperature Typical Results
Failure to follow the recommended procedures stated in this TDS will void the Warranty of the Adhesive.	Bosi MFB Room Temperature Control (no exposure) 4,300 29.6 77% / 25°C 4,100 28.2 Isonnonvi Alcohol - 7 davs 67.7% / 27.6°C 4,000
Note: Special precautions are recommended to minimize carbonate formation in large assemblies subject to extended open times in humid environments. A special memo is available upon request from Henkel providing users with suggestions for minimizing carbonate formation.	Hydraulic Oil - 7 days @ 77°F/25°C 4,100 28.2 JP-4 Fuel - 7 days @ 77°F/25°C 4,200 28.9
Curing - LOCTITE EA 9394 AERO may be cured for 3 to 5 days @ 77°F/25°C to achieve normal performance. Accelerated cures up to 200°F/93°C (for small masses only) may be used as an alternative. For example, 1 hour @ 150°F/66°C will give complete cure.	Peel Strength T-Peel strength tested per ASTM D1876 after curing for 5 days @ 77°F/25°C. Adherends are 2024-T3 AlClad aluminum treated with phosphoric acid anodized per ASTM D3933. Test Temperature. •F/C blin N2 mm 77/25 5 5 5
Cleanup - It is important to remove excess adhesive from the work area and application equipment before it hardens. Denatured alcohol and many common industrial solvents are suitable for removing uncured adhesive. Consult your supplier's information pertaining to the safe and proper use of solvents.	Bell Peel strength tested per ASTM D3167 after curing for 7 days @ 77°F/25°C. Adherends are 2024-T3 AlClad aluminum treated with phosphoric acid anodized per ASTM D3933. Typical Results Test Temperature, °F/°C Lb/in W25mm 77/25 20 89
Bond Strength Performance Tensile Lap Shear Strength - tested per ASTM D1002 after curing for 5 days @ 77°F/25°C. Adherends are 2024-T3 bare aluminum treated with phosphoric acid anodized per ASTM D3933.	Service Temperature Service temperature at which this adhesive still retains 1000 psi/6.9 MPa) using test method ASTM D1002 and is 350°F/177°C.
Test Temperature, °F,°C Typical Results -67/-55 -57/-55 -57/-55 -67/-55 3.300 22.7 77/ 25 3.300 22.7 77/ 25 3.300 22.7 78/082 3.300 20.7 20093 2.9,00 20.0 250/121 2.300 15.8 350/149 1,500 11.10 350/127 1,500 8.3 400/204 6.00 4.1	Bulk Resin Properties Tensile Properties . Tested using 0.125 inch/ 3.18 mm castings per ASTM D638. Tensile Renegit @ 777F/25°C 6.675 psi 46.0 MPa Tensile Modulus @ 777F/25°C 615 ksi 4.237 MPa Shear Modulus, weig @ 777F/25°C 1212 ksi 1,461 MPa Shear Modulus, weig @ 777F/25°C 1212 ksi 1,027 MPa Elongation at Break @ 777F/25°C 166% Shore D Hardness, @ 777F/25°C 88 To dy 154°F 68°C Tg wet
Henkel	Henkel

Anhang

<u>Typical Results</u>	psi MPa	3,300 22.7	4,200 28.9	3,000 20.7	2,900 20.0	2,300 15.8	1,600 11.0	1,200 8.3	600 4.1	
	Test Temperature, °F/°C	-67/-55	77/ 25	180/82	200/93	250/121	300/149	350/177	400/204	



Epoxy Paste Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9394) LOCTITE EA 9394 AERO

Compressive Properties - tested with rectangular specimens 0.5 in/12.7 mm width by 1.0 in/25.4 mm length by 0.5 in/12.7 mm height per ASTM D695.

Compressive Strength, °F/°	C psi 10,000		<u>MPa</u> 58.9
Electrical Properties - tested per	ASTM D149, D150. סיו געויי	- 10 1	-10 0 KH-
Dielectric Constant	7.72	7.51	7.20
Dissipation Factor	.017	.022	.033
Thermal Conductivity	7.92 x 10 ⁻⁴ cal/sec	c-cm-°C	[0.331 W/(m•K)]
Volume Resistivity	4.05×10^{13} ohm-cm		$[4.05 \times 10^{11} \text{ ohm}]$

urtace Hesistivity	4.05 x 10 ¹³ onm-cm 4.60 x 10 ¹³ ohm
oefficient of Thermal Expansion	55.6µm/m°C @ 40°C 80.6µm/m°C @ 100°

Handling Precautions Do not handle or use until the Material Safety Data Sheet has been read and understood. For industrial use only.

DISPOSAL INFORMATION Dispose of spent remover and paint residue per local, state and regional regulations. Refer to HENKEL TECHNOLOGIES MATERIAL SAFETY DATA SHEET for additional disposal information.

PRECAUTIONARY INFORMATION Genera

As with most epoxy based systems, use this product with adequate ventilation. Do not get in eyes or on skin. Avoid breathing the vapors. Wash thoroughly with soap and water after handling. Empty containers retain product residue and vapors so obey all precautions when handling empty containers.



Epoxy Paste Adhesive LOCTITE EA 9394 AERO (KNOWN AS Hysol EA 9394)

PART A CAUTION! This material may cause eye and skin irritation or allergic dermatitis. It contains epoxy resins.

PART B

WARNING! This material causes eye and skin irritation or allergic dermatitis. It contains amines.

Before using this product refer to container label and HENKEL TECHNOLOGIES MATERIAL SAFETY DATA SHEET for additional precautionary, handling and first aid information.

Note

user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of prosens against any hazards that may be involved in the handling and use thereot. In light of the foregoing, **Henkel Corporation** specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Herkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits. The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications. The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel

Rev. 9/2013

Henkel Corporation Aerospace | 2850 Willow Pass Road | Bay Point, CA 94565 PHONE: +1.925.458.8000 | FAX: +1.925.458.8030 | www.henkel.com/aerospace

Trademark usage Except and thereverse noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark except and the U.S. Patient and Trademark Olitice.

Henke



Anhang A.8 Vermessungsprotokoll











Mittelwert aus t _{a 1} bis t _{a 4} [mm]			
t _{a4} [mm]			
t _{a3****} [mm]			
t _{a 2} [mm]			
t _{a 1} [mm]			
Coupon No.			

measurement of the length (I,L) and width was performed by calliper gauge, measurement uncertainty is estimated to be

±10µm ** measurement of the thickness (t) was performed by micrometer gauge, measurement uncertainty is estimated to be ±3µm

*** measurement of the parallelity (p) was performed by dial indicator gauge,

measurement uncertainty is estimated to be

±10µm **** measurment of the adhesive thickness (t_a) was performed by

Seite 4

Anhang B Messwerttabellen

In Anhang B werden alle wichtigen berechneten Werte sowie alle wichtigen Messwerttabellen aufgeführt.

Anhang B.1 Aufgenommene Messwerte

Referenz	h	b	Α	Fm	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	N	N/mm²	S
1	4,2	25,1	104,2	12806,6	122,9	70,5
2	4,2	25,0	105,3	13827,6	131,4	77,8
3	4,3	25,0	107,5	14527,4	135,1	80,5
4	4,3	25,0	108,0	15031,3	139,2	83,7
5	4,3	25,0	106,5	14934,2	140,2	81,7
6	4,2	25,0	103,8	12533,2	120,8	69,4

Tab. B.1: Messwerte Referenz

Tab. B.2: Messwerte ST_5_EA9695

ST_5_EA9695	h	b	Α	F _m	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,2	25,0	105,5	13692,4	129,8	76,4
2	4,3	25,0	107,0	15557,3	145,4	88,0
3	4,3	25,0	107,0	15535,5	145,2	87,6
4	4,3	25,0	108,5	15631,9	144,1	87,6
5	4,3	25,0	107,0	15946,2	149,0	89,5
6	4,2	25,0	104,5	14827,5	141,9	82,7

Tab. B.3: Messwerte ST_5_PEEK

ST_5_PEEK	h	b	Α	F _m	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,2	25,0	105,5	12259,9	116,2	71,3
2	4,3	25,0	106,8	12840,4	120,3	74,3
3	4,2	25,0	105,5	11427,0	108,3	63,7
4	4,1	25,0	103,3	12396,9	120,1	71,0
5	4,2	25,0	106,0	12275,7	115,8	68,3
6	4,2	25,0	105,5	14214,1	134,7	80,0

Tab. B.4:Messwerte ST_10_PEEK

ST_10_PEEK	h	b	Α	Fm	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,2	25,0	105,0	10131,3	96,5	58,7
2	4,3	25,0	107,0	10668,2	99,7	60,5
3	4,3	24,8	107,1	13661,9	127,5	77,1
4	4,3	25,0	108,5	9856,2	90,8	54,8
5	4,3	25,0	108,0	10906,5	101,0	60,5
6	4,2	25,0	105,5	11714,6	111,0	64,9

Tab. B.5: Messwerte ST_10_PVDF

ST_10_PVDF	h	b	А	F _m	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,2	25,0	105,0	24777,2	236,0	146,9
2	4,3	25,0	107,3	26073,9	243,1	155,2
3	4,3	25,0	107,8	26215,5	243,3	156,9
4	4,3	25,0	107,0	27007,7	252,4	161,5
5	4,2	25,0	105,5	25502,8	241,7	150,4
6	4,2	25,0	104,8	24800,4	236,8	146,7

Tab. B.6: Messwerte ST_30_PEEK

ST_30_PEEK	h	b	Α	Fm	t _{sLs}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,3	25,0	108,3	9225,2	85,2	53,5
2	4,4	25,0	111,0	12152,6	109,5	69,2
3	4,5	25,0	111,5	11716,0	105,1	65,4
4	4,5	24,9	110,8	10901,5	98,4	60,2
5	4,4	25,0	110,5	10599,7	95,9	58,3
6	4,4	25,0	109,0	10593,9	97,2	60,3

Tab. B.7: Messwerte Ref_wet

Ref_wet	h	b	Α	Fm	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,2	25,0	104,5	13880,7	132,8	90,8
2	4,2	25,0	105,5	14396,6	136,5	79,3
3	4,3	25,0	106,3	13967,1	131,5	77,7
4	4,3	24,9	105,8	13523,6	127,8	75,2
5	4,2	25,0	105,3	13367,8	127,0	75,6

Tab. B.8: Messwerte ST_10_PEEK_wet

ST_10_PEEK_wet	h	b	А	Fm	t _{sLs}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,2	25,0	105,5	14090,4	133,6	79,8
2	4,3	25,0	107,3	14421,7	134,5	83,8
3	4,3	25,0	108,5	15376,5	141,7	91,9
4	4,3	25,0	108,3	14799,5	136,7	84,9
5	4,3	25,0	107,8	14844,9	137,8	85,2
6	4,2	25,0	105,3	13949,5	132,5	79,7

Tab. B.9: Messwerte ST_10_PVDF

ST_10_PVDF_wet	h	b	Α	Fm	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,2	25,0	104,8	19371,9	184,9	110,7
2	4,3	25,0	106,3	24457,1	230,2	141,7
3	4,3	25,0	108,3	24334,0	224,8	143,1
4	4,3	25,0	108,5	24489,7	225,7	147,5
5	4,3	25,0	107,5	24826,0	230,9	147,5
6	4,2	25,0	104,3	23705,3	227,4	138,4

Tab. B.10: Messwerte Ref_kalt

Ref_kalt	h	b	Α	Fm	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,4	25,0	111,0	11573,0	104,3	78,6
2	4,4	25,0	110,5	11938,3	108,0	69,0
3	4,5	25,0	112,0	12276,1	109,6	69,1
4	4,5	25,0	112,0	11131,1	99,4	79,9
5	4,4	25,0	110,5	11290,3	102,2	80,3
6	4,5	25,0	111,3	11865,3	106,7	66,9

Tab. B.11: Messwerte ST_10_PVDF_kalt

ST_10_PVDF_kalt	h	b	Α	F _m	t _{sls}	t _{Fm}
Probennr.	mm	mm	mm²	Ν	N/mm²	S
1	4,5	25,0	112,0	25588,8	228,5	159,5
2	4,6	25,1	114,2	26266,3	230,0	164,4
3	4,6	25,1	116,2	25620,0	220,5	158,9
4	4,6	25,0	116,0	25485,1	219,7	190,7
5	4,6	25,1	115,5	26043,2	225,6	162,7
6	4,5	25,0	112,5	26729,1	237,6	166,8

Anhang B.2 Berechnete Schubspannungswerte

Tab. B.12:Schubspannungsberechnung Referenz

Sc	Schubspannungsberechnung Referenz									
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	τ_{b}						
	[mm]	[mm]	[mm²]	[N/mm²]						
12806,6	25,0	25,0	624,4	20,5						
13827,6	24,9	25,0	623,2	22,2						
14527,4	24,8	25,0	620,7	23,4						
15031,3	24,8	25,0	620,9	24,2						
14934,2	24,8	25,0	619,9	24,1						
12533,2	24,8	25,0	620,4	20,2						

Schubspannungsberechnung ST_5_EA9695								
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	τ_{b}				
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]				
13692,4	24,7	25,0	616,8	22,2				
15557,3	24,7	25,0	616,7	25,2				
15535,5	24,7	25,0	617,7	25,2				
15631,9	24,7	25,0	616,8	25,3				
15946,2	24,7	25,0	618,7	25,8				
14827,5	24,7	25,0	618,0	24,0				

Tab. B.13: Schubspannungsberechnung ST_5_EA9695

Tab. B.14: Schubspannungsberechnung ST_5_PEEK

Schubspannungsberechnung ST_5_PEEK						
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	$ au_{b}$		
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]		
12259,9	24,8	25,0	619,4	19,8		
12840,4	24,9	25,0	622,8	20,6		
11427,0	25,1	25,0	628,7	18,2		
12396,9	25,0	25,0	624,9	19,8		
12275,7	24,9	25,0	620,6	19,8		
14214,1	24,9	25,0	620,6	22,9		

Tab.	B.15:	Schubsp	annung	gsberechr	nung S	ST_	10_	PEEK
------	-------	---------	--------	-----------	--------	-----	-----	------

Schubspannungsberechnung ST_10_PEEK						
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	$ au_{b}$		
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]		
10131,3	25,1	25,0	626,3	16,2		
10668,2	25,0	25,0	624,2	17,1		
13661,9	24,8	24,8	614,0	22,2		
9856,2	25,1	25,0	628,4	15,7		
10906,5	25,2	25,0	630,1	17,3		
11714,6	25,3	25,0	632,3	18,5		

Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF					
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m		А	τ_{b}
	[mm]	[mm]		[mm²]	[N/mm²]
24777,2	25,0		25,0	624,4	39,7
26073,9	24,9		25,0	623,2	41,8
26215,5	24,8		25,0	620,7	42,2
27007,7	24,8		25,0	620,9	43,5
25502,8	24,8		25,0	619,9	41,1
24800,4	24,8		25,0	620,4	40,0

Tab. B.16: Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF

Tab. B.17: Schubspannungsberechnung ST_30_PEEK

Schubspannungsberechnung ST_30_PEEK						
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	$ au_{b}$		
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]		
9225,2	25,0	25,0	625,5	14,7		
12152,6	25,0	25,0	626,0	19,4		
11716,0	25,0	25,0	624,2	18,8		
10901,5	24,9	24,9	620,3	17,6		
10599,7	25,1	25,0	628,4	16,9		
10593,9	25,1	25,0	628,7	16,9		

Tab. B.18: Schubspannungsberechnung Ref_wet

Schubspannungsberechnung Ref_wet						
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	$ au_{b}$		
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]		
13880,7	25,3	25,0	632,6	21,9		
14396,6	25,1	25,0	628,0	22,9		
13967,1	25,2	25,0	628,0	22,2		
13523,6	25,2	24,9	628,3	21,5		
13367,8	25,2	25,0	630,7	21,2		

Schubspannungsberechnung ST_10_PEEK_wet						
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	$ au_{b}$		
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]		
14090,4	25,4	25,0	635,4	22,2		
14421,7	25,4	25,0	635,3	22,7		
15376,5	25,4	25,0	636,1	24,2		
14799,5	25,2	25,0	629,0	23,5		
14844,9	25,2	25,0	630,6	23,5		
13949,5	25,1	25,0	628,7	22,2		

Tab. B.19: Schubspannungsberechnung ST_10_PEEK_wet

Tab. B.20: Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF_wet

Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF_wet					
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	$ au_{b}$	
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]	
19371,9	25,1	25,0	626,8	30,9	
24457,1	25,0	25,0	624,6	39,2	
24334,0	25,0	25,0	624,3	39,0	
24489,7	24,8	25,0	620,3	39,5	
24826,0	24,8	25,0	620,9	40,0	
23705,3	24,7	25,0	618,3	38,3	

Tab. B.21: Schubspannungsberechnung Ref_kalt

Schubspannungsberechnung Ref_kalt						
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	$ au_{b}$		
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]		
11573,0	24,8	25,0	621,8	18,6		
11938,3	24,8	25,0	621,5	19,2		
12276,1	24,8	25,0	621,9	19,7		
11131,1	24,8	25,0	620,5	17,9		
11290,3	24,8	25,0	620,9	18,2		
11865,3	24,8	25,0	621,4	19,1		

Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF_kalt						
F _m [N]	l ₂ *	W 2-4 m	А	$ au_{b}$		
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm²]		
25588,8	25,0	25,0	625,6	40,9		
26266,3	25,0	25,1	626,5	41,9		
25620,0	25,1	25,1	627,9	40,8		
25485,1	25,1	25,0	626,4	40,7		
26043,2	25,1	25,1	627,6	41,5		
26729,1	25,0	25,0	625,5	42,7		

Tab. B.22: Schubspannungsberechnung ST_10_PVDF_kalt

Anhang B.3 Mittelwert und Standardabweichung

Tab. B.23: Messwerttabelle inkl. \bar{x} und s des Dickenvergleichs

Probe	Referenz		ST_10_PVDF	
	F _m	$ au_{b}$	F _m	$ au_b$
	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]
1	12806,6	20,5	24777,2	39,7
2	13827,6	22,2	26073,9	41,8
3	14527,4	23,4	26215,5	42,2
4	15031,3	24,2	27007,7	43,5
5	14934,2	24,1	25502,8	41,1
6	12533,2	20,2	24800,4	40,0
Mittelwert	13943,4	22,4	25729,6	41,4
Standardabweichung	1077,1	1,8	872,9	1,4

Probe	Referenz	[Lei18]	ST_10_PVDF [Lei18]		
	F _m	$ au_{b}$	F _m	$ au_{b}$	
	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	
1	11118,0	17,7	21473,0	34,1	
2	14329,0	22,8	25847,0	41,1	
3	13725,0	21,9	26147,0	41,6	
4	13581,0	21,7	23169,0	37,0	
5	12033,0	20,2	14993,9	23,9	
Mittelwert	12957,2	20,9	22326,0	35,5	
Standardabweichung	1332,0	2,0	4533,1	7,2	

Tab. B.24: Messwerttabelle aus 2018 inkl. \bar{x} und s des Dickenvergleich

Tab. B.25: Messwerttabelle inkl. \bar{x} und s des Steifigkeitseinflusses 1

Probe	Referenz		ST_5_PEEK		ST_10_PEEK	
	Fm	$ au_{b}$	Fm	$ au_{b}$	Fm	τ_{b}
	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]
1	12806,6	20,5	12259,9	19,8	10131,3	16,2
2	13827,6	22,2	12840,4	20,6	10668,2	17,1
3	14527,4	23,4	11427,0	18,2	13661,9	22,2
4	15031,3	24,2	12396,9	19,8	9856,2	15,7
5	14934,2	24,1	12275,7	19,8	10906,5	17,3
6	12533,2	20,2	14214,1	22,9	11714,6	18,5
Mittelwert	13943,4	22,4	12569,0	20,2	11156,5	17,8
Standardabweichung	1077,1	1,8	926,9	1,6	1387,9	2,4

Probe	ST_30_PEEK		ST_10_	PVDF
	F _m	$ au_{b}$	F _m	$ au_{b}$
	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]
1	9225,2	14,7	24777,2	39,7
2	12152,6	19,4	26073,9	41,8
3	11716,0	18,8	26215,5	42,2
4	10901,5	17,6	27007,7	43,5
5	10599,7	16,9	25502,8	41,1
6	10593,9	16,9	24800,4	40,0
Mittelwert	10864,8	17,4	25729,6	41,4
Standardabweichung	1021,4	1,6	872,9	1,4

Tab. B.26: Messwerttabelle inkl. \bar{x} und s des Steifigkeitseinflusses 2

Tab. B.27: Messwerttabelle inkl. \bar{x} und s des Steifi	igkeitsvergleichs der ST_5 Probenreihen
---	---

Probe	Refe	renz	ST_5_EA9695		ST_5_PEEK		ST_5_PVDF [Lei18]	
	Fm	τ_{b}	F _m	τ_{b}	F _m	τ_{b}	F _m	τ_{b}
	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]
1	12806,6	20,5	13692,4	22,2	12259,9	19,8	21473,0	34,1
2	13827,6	22,2	15557,3	25,2	12840,4	20,6	25847,0	41,1
3	14527,4	23,4	15535,5	25,2	11427,0	18,2	26147,0	41,6
4	15031,3	24,2	15631,9	25,3	12396,9	19,8	23169,0	37,0
5	14934,2	24,1	15946,2	25,8	12275,7	19,8	14994,0	23,9
6	12533,2	20,2	14827,5	24,0	14214,1	22,9		
\bar{x}	13943,4	22,4	15198,5	24,6	12569,0	20,2	22326,0	35,5
s	1077,1	1,8	824,1	1,3	926,9	1,6	4533,0	7,2

Probe	Refe	Referenz		Ref_wet		ST_10_PEEK		ST_10_PEEK_wet	
	F _m	$ au_{b}$	F _m	τ_{b}	F _m	$ au_b$	F _m	$ au_b$	
	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	
1	12806,6	20,5	13880,7	21,9	10131,3	16,2	14090,4	22,2	
2	13827,6	22,2	14396,6	22,9	10668,2	17,1	14421,7	22,7	
3	14527,4	23,4	13967,1	22,2	13661,9	22,2	15376,5	24,2	
4	15031,3	24,2	13523,6	21,5	9856,2	15,7	14799,5	23,5	
5	14934,2	24,1	13367,8	21,2	10906,5	17,3	14844,9	23,5	
6	12533,2	20,2			11714,6	18,5	13949,5	22,2	
\bar{x}	13943,4	22,4	11522,6	18,3	11156,5	17,8	14706,6	23,2	
s	1077,1	1,8	403,1	0,7	1387,9	2,4	484,1	0,8	

Tab. B.28: Messwerttabelle inkl. \bar{x} und s des Feuchtigkeitseinflusses 1

Tab. B.29: Messwerttabelle inkl. \bar{x} und s des Feuchtigkeitseinflusses 2

Probe	ST_10_F	PVDF	ST_10_P\	/DF_wet
	Fm	$ au_{b}$	Fm	$ au_{b}$
	[N]	[N/mm ²]	[N]	[N/mm²]
1	24777,2	39,7	19371,9	30,9
2	26073,9	41,8	24457,1	39,2
3	26215,5	42,2	24334,0	39,0
4	27007,7	43,5	24489,7	39,5
5	25502,8	41,1	24826,0	40,0
6	24800,4	40,0	23705,3	38,3
x	25729,6	41,4	23530,7	37,8
S	872,9	1,4	2070,1	3,4

Probe	Refe	erenz	Ref_kalt		ST_10_PVDF		ST_10_PVDF_kalt	
	F _m	$ au_{b}$	F _m	τ _b	F _m	$ au_{b}$	Fm	τ_{b}
	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]	[N]	[N/mm²]
1	12806,6	20,5	11573,0	18,6	24777,2	39,7	25588,8	40,9
2	13827,6	22,2	11938,3	19,2	26073,9	41,8	26266,3	41,9
3	14527,4	23,4	12276,1	19,7	26215,5	42,2	25620,0	40,8
4	15031,3	24,2	11131,1	17,9	27007,7	43,5	25485,1	40,7
5	14934,2	24,1	11290,3	18,2	25502,8	41,1	26043,2	41,5
6	12533,2	20,2	11865,3	19,1	24800,4	40,0	26729,1	42,7
\overline{x}	13943,4	22,4	11679,0	18,8	25729,6	41,4	25955,4	41,4
S	1077,1	1,8	429,2	0,7	872,9	1,4	484,0	0,8

Tab. B.30: Messwerttabelle inkl. \bar{x} und s des Temperatur Einflusses beim Klebprozess

Tab. B.31: Berechnung der Klebstoffdicke der warmverklebten Probenreihen mit EA9695 1

	Referenz	ST_5_EA9695	ST_5_PEEK
	[mm]	[mm]	[mm]
1	4,15	4,22	4,22
2	4,21	4,28	4,27
3	4,30	4,33	4,22
4	4,32	4,34	4,13
5	4,26	4,28	4,24
6	4,15	4,18	4,22
Mittelwert	4,23	4,27	4,22
durchschnittliche Fügeteildicke	2,05	2,05	2,05
Klebstoffdicke	0,13	0,17	0,12

	ST_10_PEEK	ST_10_PVDF	ST_30_PEEK
	[mm]	[mm]	[mm]
1	4,20	4,20	4,33
2	4,28	4,29	4,44
3	4,32	4,31	4,46
4	4,34	4,28	4,45
5	4,32	4,22	4,42
6	4,22	4,19	4,36
Mittelwert	4,28	4,25	4,41
durchschnittliche Fügeteildicke	2,05	2,05	2,05
Klebstoffdicke	0,18	0,15	0,11

Tab. B.32: Berechnung der Klebstoffdicke der warmverklebten Probenreihen mit EA9695 2

Tab. B.33: Berechnung der Klebstoffdicke der warmverklebten Probenreihen mit EA9695 3

	Ref_wet	ST_10_PEEK_wet	ST_10_PVDF_wet
	[mm]	[mm]	[mm]
1	4,18	4,22	4,19
2	4,22	4,29	4,25
3	4,25	4,34	4,33
4	4,25	4,33	4,34
5	4,21	4,31	4,30
6		4,21	4,17
Mittelwert	4,22	4,28	4,26
durchschnittliche Fügeteildicke	2,05	2,05	2,05
Klebstoffdicke	0,12	0,18	0,16

Tab. B.34: Berechnung der Klebstoffdicke der kaltverklebten Probenreihen mit EA9394

	Ref_kalt	ST_10_PVDF_kalt
	[mm]	[mm]
1	4,44	4,48
2	4,42	4,55
3	4,48	4,63
4	4,48	4,64
5	4,42	4,60
6	4,45	4,50
Mittelwert	4,45	4,57
durchschnittliche Fügeteildicke	2,05	2,05
Klebstoffdicke	0,35	0,47



Anhang C Diagramme

Abbildung C.1: Klebstoffdicke der warmverklebten Probenreihen mit EA9695



Abbildung C.2: Klebstoffdicke der kaltverklebten Probenreihen mit EA9394



Abbildung C.3: Festigkeitsverteilung über die gesamte Fügeteilbreite aller trocken geprüften Probenreihen



Abbildung C.4: Festigkeitsverteilung über die gesamte Fügeteilbreite aller ausgelagerten Probenreihen



Abbildung C.5: Festigkeitsverteilung über die gesamte Fügeteilbreite aller kaltverklebten Probenreihen

Anhang D ARAMIS Auswertung

Anhang D.1 Vergleich des Steifigkeitseinflusses einer ST-Breite von 5mm







Abbildung D.4: Dehnungsmessung nach Mises der ST_5_PVDF Probe 3 aus 2018 kurz vor Bruch



Abbildung E.1: Übersicht der Bruchbilder der Referenz Probe 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.2: Übersicht der Bruchbilder der ST_5_EA9695 Probe 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.3: Übersicht der Bruchbilder der ST_5_PEEK Probe 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.4: Übersicht der Bruchbilder der ST_10_PEEK Probe 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.5: Bruchbilder der ST_10_PVDF Proben 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.6: Bruchbilder der ST_30_PEEK Proben 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.7: Bruchbilder der Ref_wet Probe 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.8: Bruchbilder der ST_10_PEEK_wet Probe 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.9: Bruchbild der ST_10_PVDF_wet Probe 1 bis 6 bon oben nach unten



Abbildung E.10: Bruchbild der Ref_kalt Probe 1 bis 6 von oben nach unten



Abbildung E.11: Bruchbild der ST_10_PVDF_kalt Probe 1 bis 6 von oben nach unten