

# **DLR-IB-FA-BS-2022-99**

**Experimentelle Untersuchungen  
zur Validierung zähmodifizierter  
Klebverbindungen bei der  
Anwendung von HAPs**

**Studienarbeit**

Kimberley Niehage



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

**DLR-IB-FA-BS-2022-99**

## **Experimentelle Untersuchungen zur Validierung zähmodifizierter Klebverbindungen bei der Anwendung von HAPs**

### **Zugänglichkeit:**

**Stufe 1 Allgemein zugänglich:** Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

Braunschweig, *August, 2022*

Der Bericht umfasst: 59 Seiten

Abteilungsleiter:  
*Prof. Dr. Christian Hühne*

Autor:  
*Kimberley Niehage*

Autor 2 / Betreuer:  
*Martin Schollerer*



DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



## **Abstract**

Im Umfang dieser Versuchsreihe wird die zähmodifizierte Klebverbindungen für die Luftfahrt und insbesondere für HAPs (High Altitude Plattform) untersucht. Ein Aspekt, welcher erschlossen werden soll ist die Einflussnahme auf die Klebfestigkeit durch Umwelteinflüsse. Dazu werden ausgewählte Temperaturen aus dem luftfahrttypischen Temperaturbereich von – 55 °C bis 80 °C untersucht sowie eine andauernde feucht-warme Umgebung. Des Weiteren soll die zähmodifizierte Klebverbindung auf Aluminiumfügeteile übertragen werden, um einerseits die Funktionalität des Surface Toughening Konzeptes an anderen Materialien zu bestätigen und andererseits diese Klebmethode für die allgemeine Luftfahrt zu ermöglichen. Im Zuge dessen wird zusätzlich die Klebfläche untersucht, um das optimale Verhältnis von Klebfläche zu Klebfestigkeit zu prüfen. Als letzten Punkt werden Untersuchungen zu Reparaturmethoden durchgeführt, damit in Zukunft eine gute Patch-Variante für fehlerhafte oder ausbesserungsbedürftige Stellen geboten werden kann.

## **Inhaltsverzeichnis**

Abstract .....	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis .....	VIII
1 Einleitung .....	1
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	3
2.1 Klebverbindungen .....	3
2.2 Mehrschichtverbunde.....	5
2.3 Versagensarten von Überlappungsklebung .....	5
2.4 Prüfverfahren .....	7
2.5 Spannungsverteilung in einer Klebschicht .....	8
2.6 Festigkeitssteigerung durch Spannungsreduktion .....	11
2.7 Temperatur- und Feuchtebeständigkeit von Thermoplasten.....	18
3 Versuchsvorbereitung .....	21
3.1 Methodik .....	21
3.2 Materialdaten .....	25
3.3 Fertigungsprozess.....	27
3.4 Prüfkörperpräparation .....	29
4 Versuchsdurchführung .....	34
5 Versuchsauswertung.....	36
5.1 Klebfestigkeit unter verschiedenen Temperatureinflüsse.....	36
5.2 Klebfestigkeit unter maximalem Feuchtigkeitseinfluss .....	37
5.3 Klebfestigkeit unter veränderter Klebfläche.....	39
5.4 Wirkung von Surface Toughening bei Aluminiumsubstrat.....	42
5.5 Voruntersuchungen zu Patches .....	45

6	Diskussion.....	51
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	54
8	Quellenverzeichnis.....	56

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2.1 Begriffe einer einfachen Überlappungsklebung [vgl. Hab16, S. 5].....	3
Abb. 2.2 Adhäsions- und Kohäsionskräfte in einer Klebung [vgl. Hab16, S. 76] .....	4
Abb. 2.3: Versagensarten von Klebverbindungen [vgl. Hab06, S. 373].....	6
Abb. 2.4: Fügeteilversagen bei Faserverbundwerkstoffen [vgl. Ast99].....	6
Abb. 2.5: Zwischenfaserbruch mit Delaminationsentstehung [vgl. Sür07, S. 386].....	7
Abb. 2.6: Spannungen einer belasteten Überlappungsklebung [vgl. Hab16, S. 154] .....	9
Abb. 2.7: Dehnungsveränderung bei belasteter Klebverbindung [vgl. Sür07, S. 571] .....	9
Abb. 2.8: Schubspannungsverläufe bei einer belasteten Überlappungsklebung [vgl. Wie07, S. 785] .....	10
Abb. 2.9: Schubspannungsverlauf bei belasteter Überlappungsklebung [vgl. Sür07, S. 587] .....	11
Abb. 2.10: Druckaufbringung bei der Härtung von Klebstoffen [vgl. Hab16, S. 94] ...	12
Abb. 2.11: Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke [vgl. Hab06, S. 444].....	12
Abb. 2.12: Aufbau einer Gradientenklebung [vgl. Sür07, S. 600] .....	13
Abb. 2.13: Klebgeometrien zur Spannungsspitzensenkung [vgl. Sür07, S. 601].....	14
Abb. 2.14: Aufbau und Spannungsverlauf einer Surface Toughening Klebung [vgl. Sol18].....	15
Abb. 2.15: Detailaufnahme Surface – Toughening .....	15
Abb. 2.16: Temperatureauswirkung auf den PVDF-Streifen im Laminat mit und ohne Klebstoff .....	16
Abb. 2.17: Klebgeometrien im Vergleich .....	16
Abb. 2.18: Festigkeitssteigerungen von Klebverbindungen im Vergleich [vgl. Lei18] .....	17
Abb. 2.19: erstes Konzept der hybriden Klebschicht als Rissstoppkonzept mit Spannungsverlauf [vgl. Löl16] .....	18
Abb. 2.20: Rissstoppkonzept mit Rissfortbildung [vgl. Sol18].....	18
Abb. 3.1: Probengeometrie .....	22
Abb. 3.2: Schubspannung in einer belasteten Überlappungsklebung .....	24
Abb. 3.3: Autoklav-Zyklus Hexply 8552 IM7 (s.Anhang A.2 ) .....	26
Abb. 3.4: Verkleben der Füge-teile mit identischer Ausrichtung der Faserlagen .....	27
Abb. 3.5: Varianten des durchgeführten Surface Toughenings .....	28
Abb. 3.6: Prüfkörperbezeichnung .....	28
Abb. 3.7: Aufbau der DLR internen VUV-Anlage.....	30
Abb. 3.8: Vakuumaufbau .....	31



Abb. 3.9: Vakuumaufbau nach Evakuierung der Luft .....	31
Abb. 3.10: Autoklavgang .....	31
Abb. 3.11: Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile durch Atmosphärendruckplasma.....	32
Abb. 3.12: Platzierung der Passstifte .....	33
Abb. 3.13: Vakuumsackaufbau für Aushärteprozess des Klebstoffs .....	33
Abb. 4.1: Aufbau der Zugscherprüfung .....	35
Abb. 4.2: stochastisches Muster auf Überlappungsklebung.....	35
Abb. 5.1: Änderung der Klebfestigkeit durch äußere Einflüsse .....	37
Abb. 5.2: Konzept ausgelagerter Proben .....	37
Abb. 5.3: Auslagerungsschritte im Vergleich.....	38
Abb. 5.4: ARAMIS Untersuchung der Referenz 1000+ Probe 4 kurz vor Bruch (10237N) .....	39
Abb. 5.5: ARAMIS Untersuchung der ST10 1000+ Probe 4 kurz vor Bruch (20638N) .....	39
Abb. 5.6: Konzept unterschiedlich großer Überlappungen .....	40
Abb. 5.7: Klebfestigkeit in Abhängigkeit der Klebfläche .....	40
Abb. 5.8: Bruchbild der Probe mit 35mm Überlappungslänge.....	41
Abb. 5.9: Maximalkraft in Abhängigkeit der Klebfläche .....	41
Abb. 5.10: Konzept der Aluminium Proben .....	42
Abb. 5.11: Die Wirkung von Surface Toughening auf die Klebfestigkeit bei Aluminiumbauteilen .....	42
Abb. 5.12: Kraft - Weg Diagramm der geprüften Aluminium Proben .....	43
Abb. 5.13: ARAMIS Untersuchung Referenz Aluminium Probe 4 kurz vor Bruch .....	44
Abb. 5.14: ARAMIS Untersuchung der Surface Toughening Aluminium Probe 4 kurz vor Bruch .....	44
Abb. 5.15: Konzept der Patch2 Proben .....	45
Abb. 5.16: Klebfestigkeit der Patch2 Proben im Vergleich zum Standardverfahren.....	45
Abb. 5.17: ARAMIS Untersuchung der Patch2 Referenz Probe 4 kurz vor Bruch.....	46
Abb. 5.18: ARAMIS Untersuchung der Patch2 ST Probe 4 kurz vor Bruch.....	46
Abb. 5.19: Konzept der Patch1 Proben mit Surface Toughening .....	47
Abb. 5.20: Klebfestigkeit des Patch1 Verfahrens im Vergleich zum Standardverfahren.....	47
Abb. 5.21: ARAMIS Untersuchung der Patch1 Referenz Probe 4.....	48
Abb. 5.22: ARAMIS Untersuchung der Patch1 ST Probe 4.....	48
Abb. 5.23: Konzept der Cocured Proben ohne Klebstoff .....	48

Abb. 5.24: Surface Toughening Effekt bei Faserverbundwerkstoffen mit und ohne Klebstoff .....	49
Abb. 5.25: ARAMIS Untersuchung der Cocured Referenz Probe 4 kurz vor Bruch ..	49
Abb. 5.26: ARAMIS Untersuchung der Cocured Surface Toughening Probe 4 kurz vor Bruch .....	49

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2.1: Materialkennwerte der untersuchten PVDF-Folie Kynar® 740 (s. Anhang A.3) .....	14
Tabelle 2.2: Eigenschaften im Vergleich: PVDF und PEEK [Dom08, S. 620 ff., S. 984 ff., Belage 1] .....	21
Tabelle 3.1: Materialkennwerte der verwendeten PVDF-Folie, NOWOFLON, der Firma NOWOFOL (s. Anhang A.4).....	27
Tabelle 3.2: Übersicht aller Probenbeschriftungen.....	29
Tabelle 4.1: Daten der genutzten Prüfanlage, Zwick 1476.....	34
Tabelle 5.1: Materialdaten des verwendeten Aluminiums .....	43

## Abkürzungsverzeichnis

### Lateinische Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	belastete Fläche	mm <sup>2</sup>
F	Kraft	N
F <sub>m</sub>	maximale Kraft	N
G <sub>hK</sub>	Schubmodul des hartelastischen Klebstoffs	N/mm <sup>2</sup>
G <sub>zK</sub>	Schubmodul des zähelastischen Klebstoffs	N/mm <sup>2</sup>
l	Überlappungslänge	mm
M <sub>b</sub>	Biegemoment	N/mm <sup>2</sup>
n	Anzahl Prüfkörper	
s	Standardabweichung	
T <sub>g</sub>	Glasübergangstemperatur	°C
T <sub>m</sub>	Schmelztemperatur	°C
w	Fügeteilbreite	mm

### Griechische Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\sigma_{von\ Mises}$	Vergleichsspannung nach von Mises	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_x$	Spannungskomponente in x – Richtung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_y$	Spannungskomponente in y – Richtung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_z$	Normalkraft	N
$\tau$	Schubspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_b$	Klebfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_\varepsilon$	Schubspannung durch Fügeteildehnung	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_v$	Schubspannung durch Fügeteilverschiebung	N/mm <sup>2</sup>

$\tau_{xy}$	Schubspannungskomponente	N/mm <sup>2</sup>
$\bar{x}$	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
HAP	High Altitude Platform
HAPS	High Altitude Pseudo Satellite
HLFC	Hybrid Laminar Flow Control
m	Meter
MSV	Mehrschichtverbund
nm	Nanometer
PEEK	Polyetheretherkethon
PEKK	Polyetherkethonkethon
PVDF	Polyvinylidenfluorid

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 Platforms<sup>1</sup> (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. Nie21]

„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.“ [vgl. Nie21]

### 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 Überlappungsklebung entstehen jedoch hohe Spannungsspitzen, die zum Versagen führen können. Diese Arbeit befasst sich mit zähmodifizierten Klebverbindungen<sup>2</sup>, 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. Nie21]

---

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

<sup>2</sup> Engl. Surface Toughening (ST)

## 1.2 Zielsetzung

Das Verständnis der zähmodifizierten Klebverbindungen soll erweitert und die möglichen Anwendungsfälle näher untersucht werden. Dazu werden die Klebverbindungen unter verschiedenen Temperatureinflüssen geprüft. Diese Temperatureinflüsse sind angepasst an die Bedingungen, welche die HAPs auf dem Weg zur Stratosphäre ausgesetzt sein könnten.

Zusätzlich zu den Temperatureinflüssen sollen die Klebverbindungen auch unter maximalem Feuchtigkeitseinfluss geprüft werden, um die möglichen Umwelteinflüsse abzudecken.

Des Weiteren soll im Umfang dieser Versuchsreihe die optimale Überlappungslänge der Klebverbindung ermittelt werden, damit eine Überdimensionierung der Klebverbindung durch unnötiges Gewicht vermieden werden.

Da bisher ausschließlich CFK Fügeiteile mit ST ausgestattet und geprüft wurden, soll in diesem Umfang ein Augenmerk auf Aluminium als Fügeiteilpartner geworfen werden. So soll unter anderem das Prinzip des Surface Toughenings bestätigt werden.

Die HAPs haben den Vorteil, dass die Flugzeuge nach dem Einsatz wieder gelandet, ausgebessert und umgerüstet werden können. Das bietet die Möglichkeit der Reparatur und Ausbesserung beschädigter Elemente. Zu diesem Zweck werden in dieser Versuchsreihe erste Untersuchungen zu möglichen Patchverfahren mit dem zähmodifizierten Werkstoff durchgeführt und getestet.



## 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

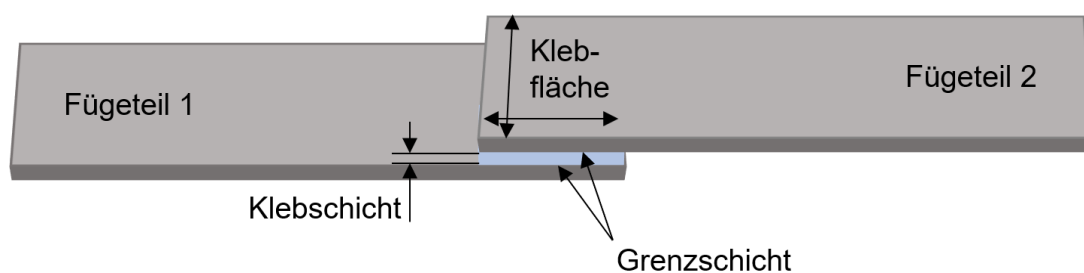


Abb. 2.1 Begriffe einer einfachen Überlappungsklebung [vgl. Hab16, S. 5]

Die Klebverbindung ist die Verbindung von Fügeteilen durch Klebstoff und wird auch Klebung genannt. In einer einfachen Überlappungsklebung werden zwei Fügeteile 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.]

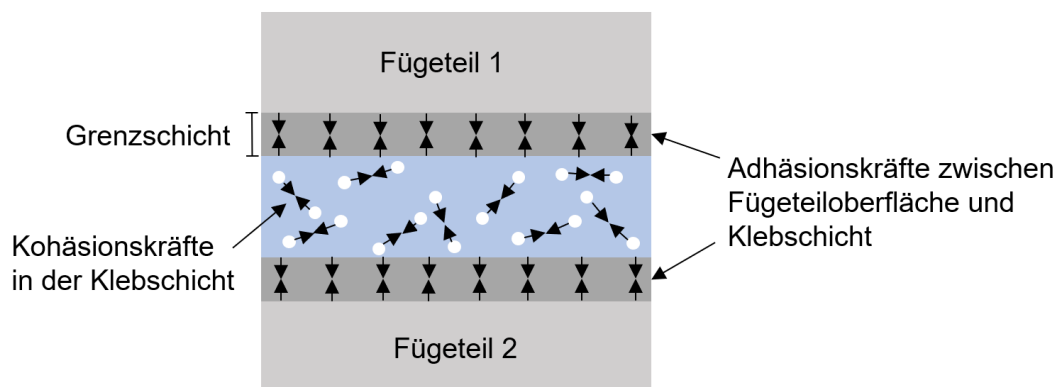


Abb. 2.2 Adhäsions- und Kohäsionskräfte in einer Klebung [vgl. Hab16, S. 76]

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

## 2.2 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.]

## 2.3 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. 2.3 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.

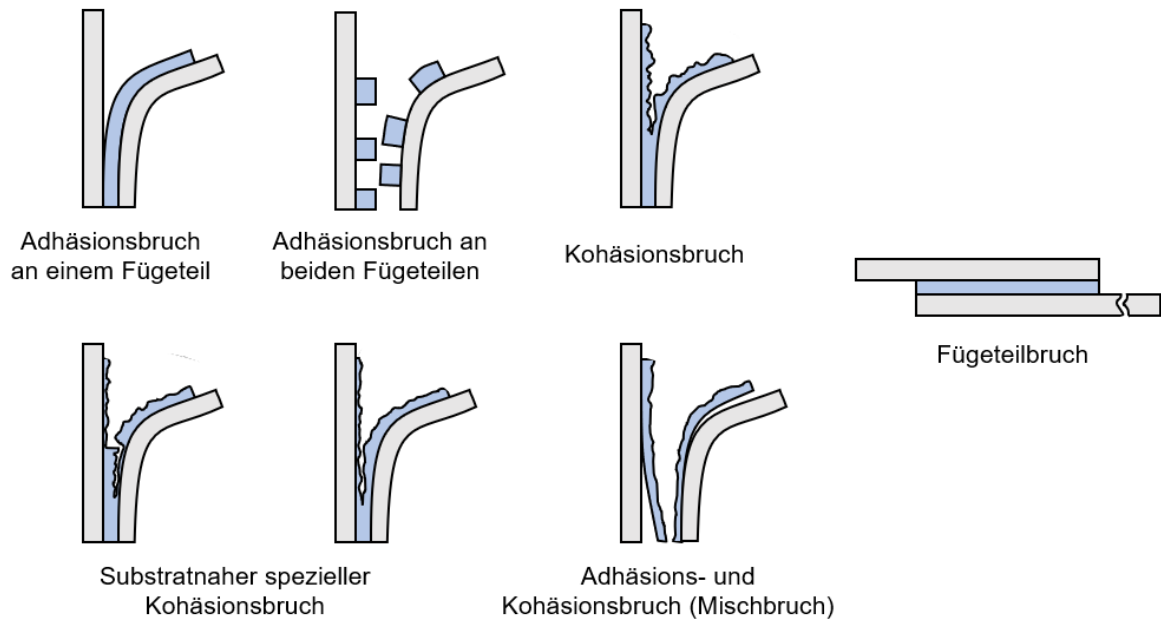


Abb. 2.3: Versagensarten von Klebverbindungen [vgl. Hab06, S. 373]

Da in dieser Arbeit mit FKV-Fügeparten gearbeitet wird, sind zusätzliche Unterteilungen des Fügepartversagens zu erläutern. Bei Faserverbundfugeparten kann es neben einem klassischen Fügepartbruch zum Versagen der Faserschichten kommen. Die sogenannte Delamination oder im Fall des Versagens der ersten Faserlage das F1st Ply Failure wird in Abb. 2.4 veranschaulicht. [vgl. Ast99].



Abb. 2.4: Fügepartversagen 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 Fügepartpartner. Bei einem Fügepartbruch 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 ( $F_b$ ) 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).

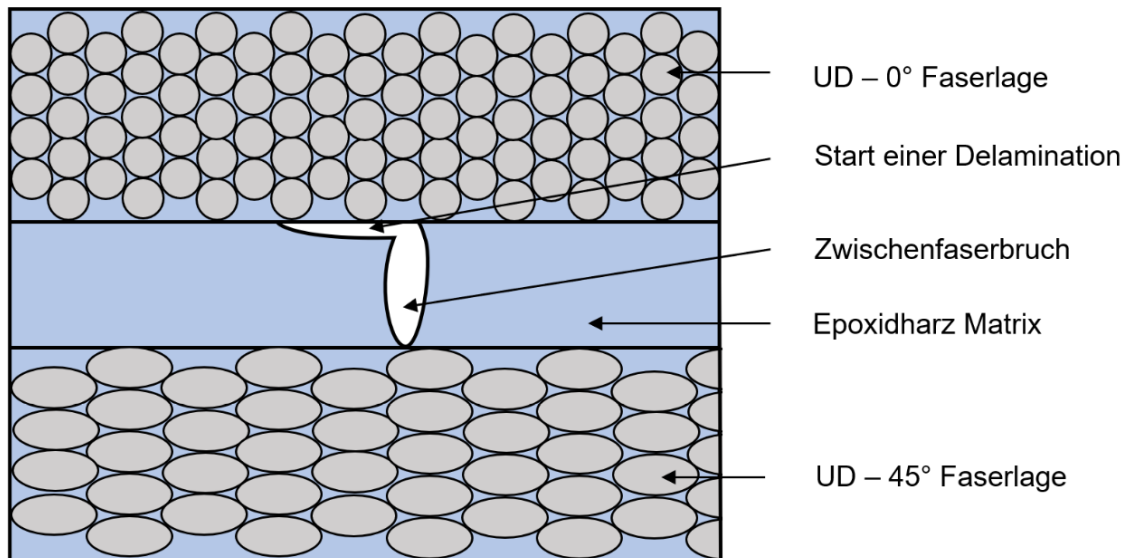


Abb. 2.5: Zwischenfaserbruch mit Delaminationsentstehung [vgl. Sür07, S. 386]

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 Krafrichtung gedehnt. Die Festigkeit des Materials wird bei diesem Vorgang gesteigert, die Verformung selbst ist dabei irreversibel. [vgl. Wei18, S. 519]

## 2.4 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 Überlappungsklebung, 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  $\tau_b$  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 Schälwiderständen, 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 testen eine Beanspruchung durch korrosive Medien und eine Temperaturwechselbeanspruchung.

## **2.5 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.

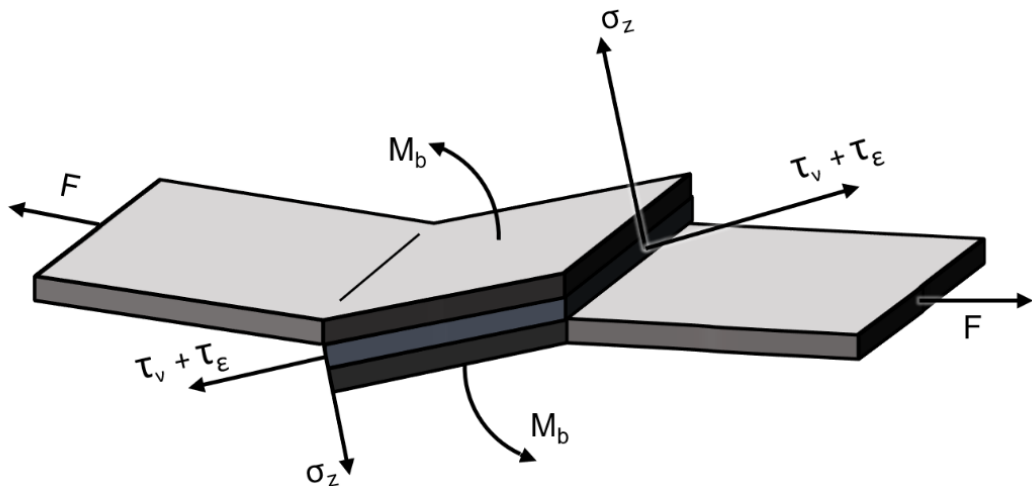


Abb. 2.6: Spannungen einer belasteten Überlappungsklebung [vgl. Hab16, S. 154]

Die in einer zugscherbelasteten Überlappungsklebung auftretenden Spannungen sind in Abb. 2.6 dargeboten. Durch eine der Überlappung zuzuschreibenden exzentrisch angreifenden Kraft  $F$  entsteht ein Biegemoment  $M_b$ . Jenes erzeugt durch die wachsende Normalkraft  $\sigma_z$  eine vergrößerte Zugbelastung auf die Klebschicht. Zusätzlich verschieben sich die Fügeteile und werden auseinandergezogen. Diese Fügeteilverschiebung erzeugt homogene Schubspannungen  $\tau_v$ , die parallel zur Klebfläche wirken. Durch die exzentrisch angreifende Kraft  $F$  entsteht darüber hinaus eine Verformung der Fügeteile an den Überlappungsenden (s. Abb. 2.7). Diese elastische Längsdehnung in dem Bereich der Überlappung führt zu Zug- und Schubspannungen  $\tau_\epsilon$  parallel zur Klebfläche, welche sich hauptsächlich auf die Randzone der Klebschicht auswirken. [vgl. Hab16, S. 153]

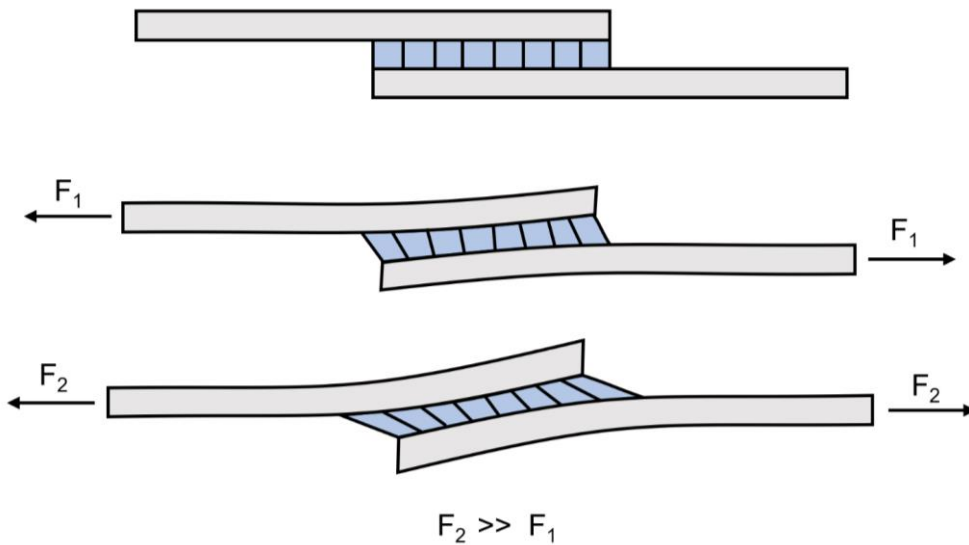


Abb. 2.7: Dehnungsveränderung bei belasteter Klebverbindung [vgl. Sür07, S. 571]

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

Spannungsursachen führt zu den in Abb. 2.8 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]

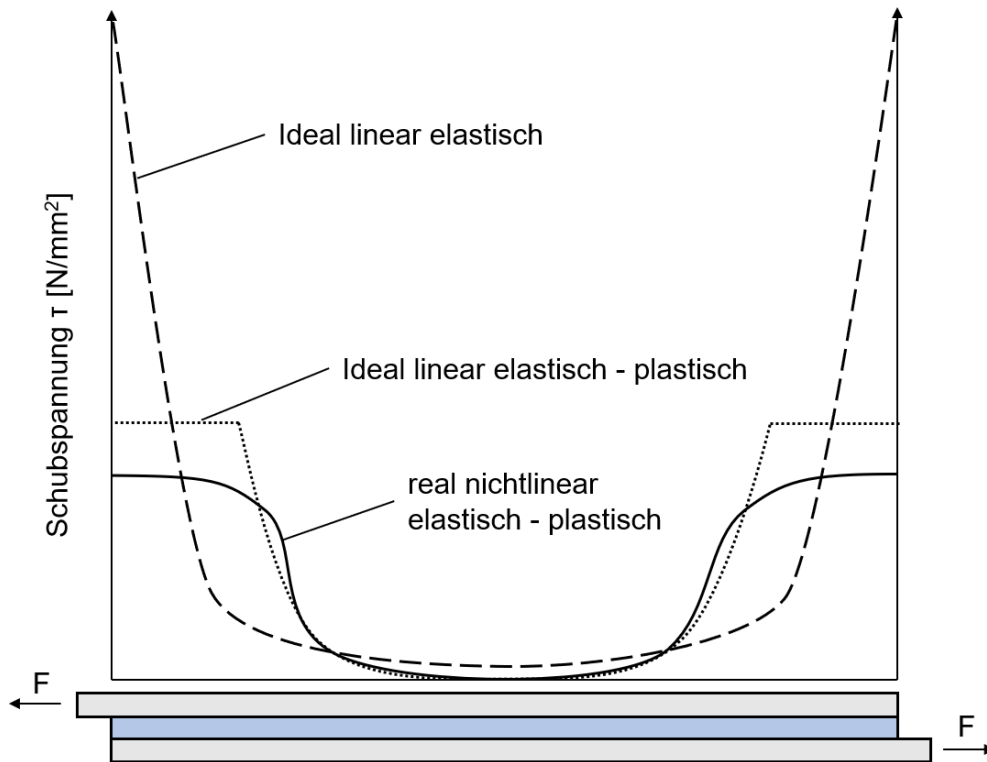


Abb. 2.8: Schubspannungsverläufe bei einer belasteten Überlappungsklebung [vgl. Wie07, S. 785]

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. 2.8). 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 in Abb. 2.9 dargestellte Spannungsverlauf ein. Die Schubspannungsverteilung ist abhängig von den Klebstoffeigenschaften. Je höher die Bruchfestigkeit, die Bruchverformung sowie die Eigenschaft des plastischen Fließens und je niedriger das Schubmodul, desto besser ist das Schubspannungs - Gleitungs - Verhalten der Klebschicht. [vgl. Wie07, S. 785; 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].

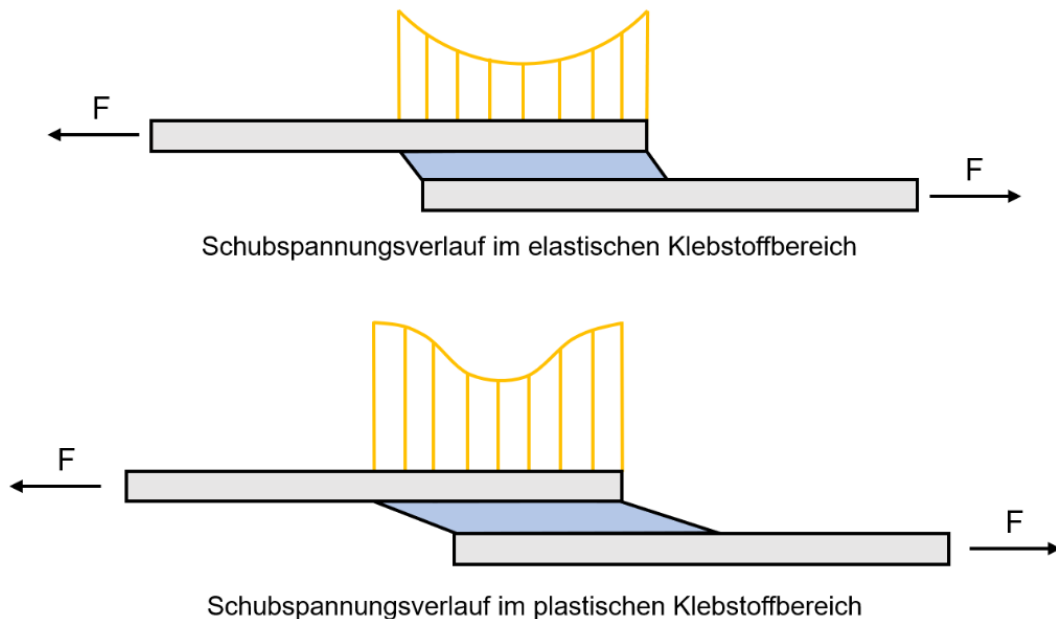


Abb. 2.9: Schubspannungsverlauf bei belasteter Überlappungsklebung [vgl. Sür07, S. 587]

## 2.6 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. 2.10 visualisierte, gleichmäßige Druckverteilung auf die Klebschicht wirkt.

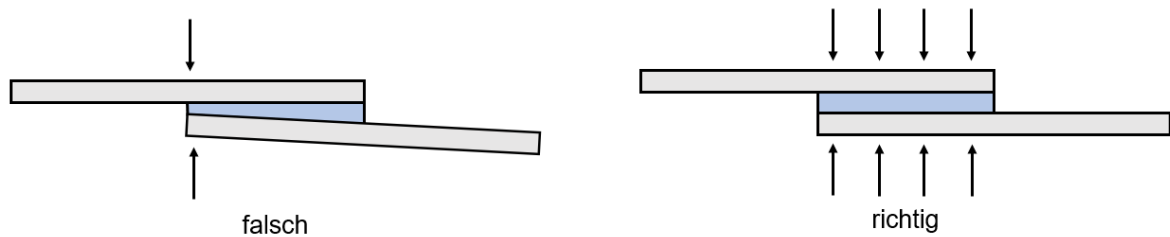


Abb. 2.10: Druckaufbringung bei der Härtung von Klebstoffen [vgl. Hab16, S. 94]

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. 2.11 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.]

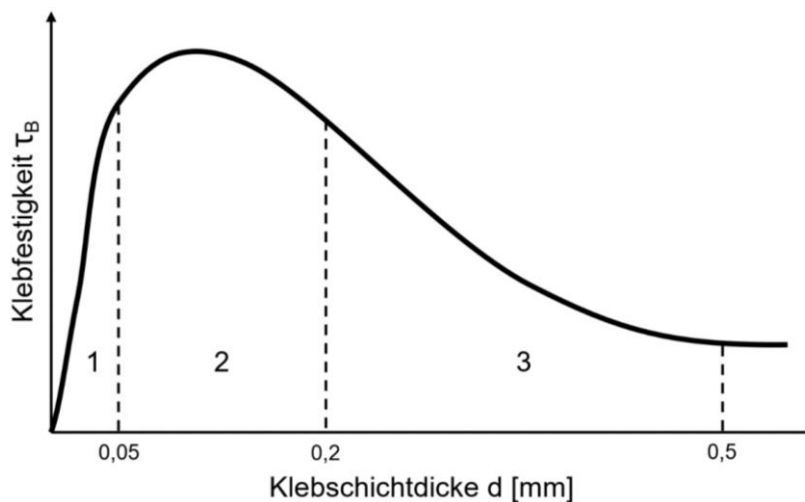


Abb. 2.11: Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke [vgl. Hab06, S. 444]

Damit eine Klebverbindung eine größere Last aufnehmen kann, müssen entsprechend nach Kapitel 2.5 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. 2.12 visualisiert.

Eine weitere Möglichkeit der Spannungsspitzenenkung erfolgt durch eine Veränderung der Klebgeometrie. Mit einer keilförmigen Klebfuge (s. Abb. 2.13) 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 Spannungsspitzenenkung. [vgl. Sür07, S. 601]

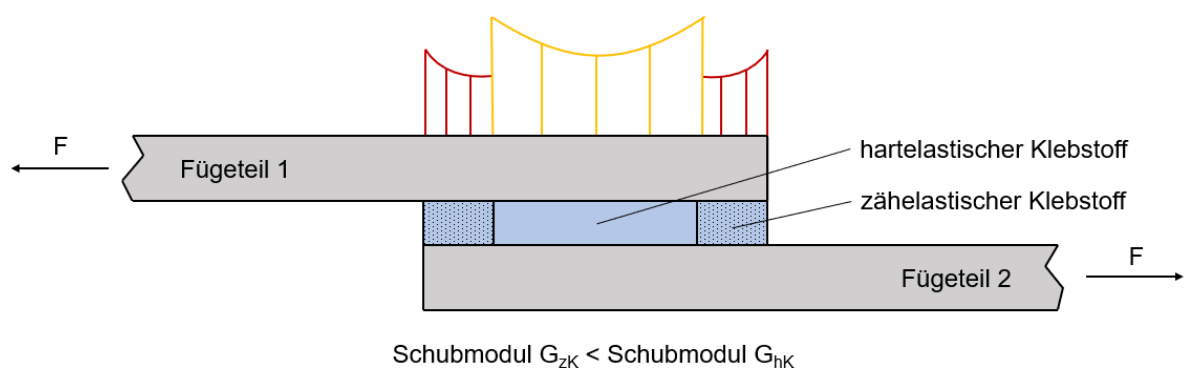


Abb. 2.12: Aufbau einer Gradientenklebung [vgl. Sür07, S. 600]

Wird bei dem Klebprozess der Klebstoff herausgedrückt, so entsteht an den Fügeileenden, wie in Abb. 2.13 veranschaulicht, eine Kehle aus Klebstoff. Diese Kehle bewirkt wie auch die keilförmige Klebfuge eine Spannungsspitzenenkung. Damit bei der Kleberkehle jedoch keine Kerbwirkung mit einhergehender induzierter Kerbspannung auftritt, die wiederum zu früherem Versagen führt, sollten die Fügeileenden stark verrundet werden. [vgl. Sür07, S. 601]

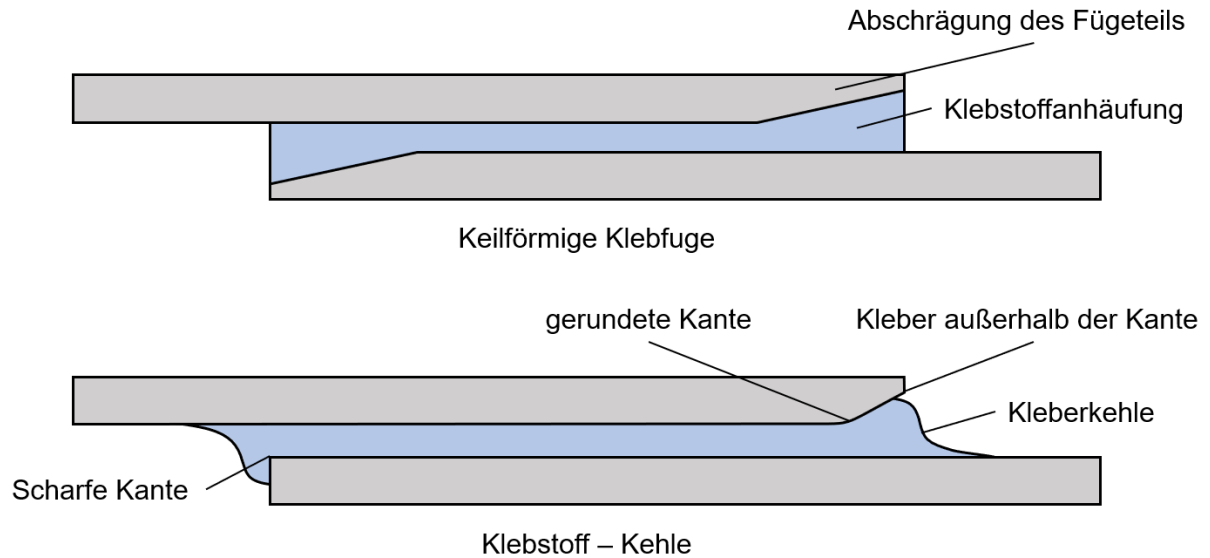


Abb. 2.13: Klebgeometrien zur Spannungsspitzenenkung [vgl. Sür07, S. 601]

Eine neue Möglichkeit der Festigkeitssteigerung über die Spannungsspitzenreduzierung bietet das Einbringen eines zähmodifizierenden Werkstoffs in die Fügeteile an den Überlappungsenden (s. Abb. 2.14). 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, duktileres 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/mm <sup>2</sup>
Reißdehnung	≥ 50	%
Festigkeit	50	N/mm <sup>2</sup>
Glasübergangstemperatur T <sub>g</sub>	- 40	°C
Schmelztemperatur T <sub>m</sub>	168	°C

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

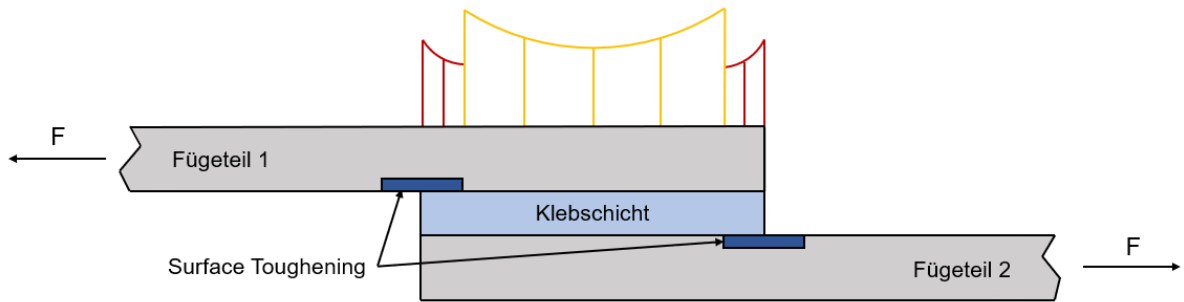


Abb. 2.14: Aufbau und Spannungsverlauf einer Surface Toughening Klebung [vgl. Sol18]

Die bisher in der Forschung angewandten Fügeile 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. 2.15).

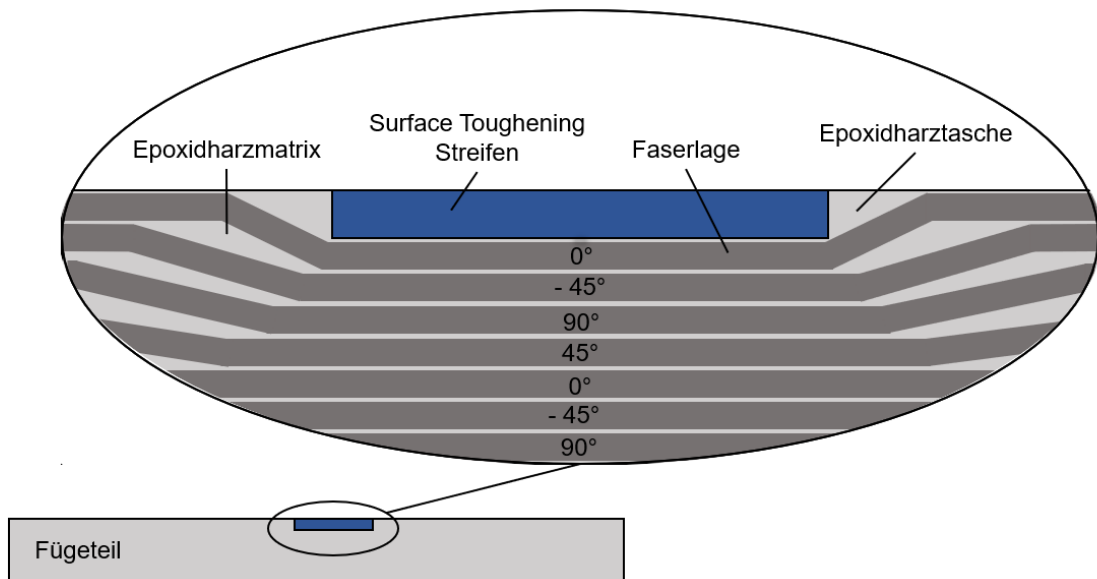


Abb. 2.15: Detailaufnahme Surface – Toughening

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. 2.16). Es bilden sich thermisch bedingte Eigenspannungen im Material.

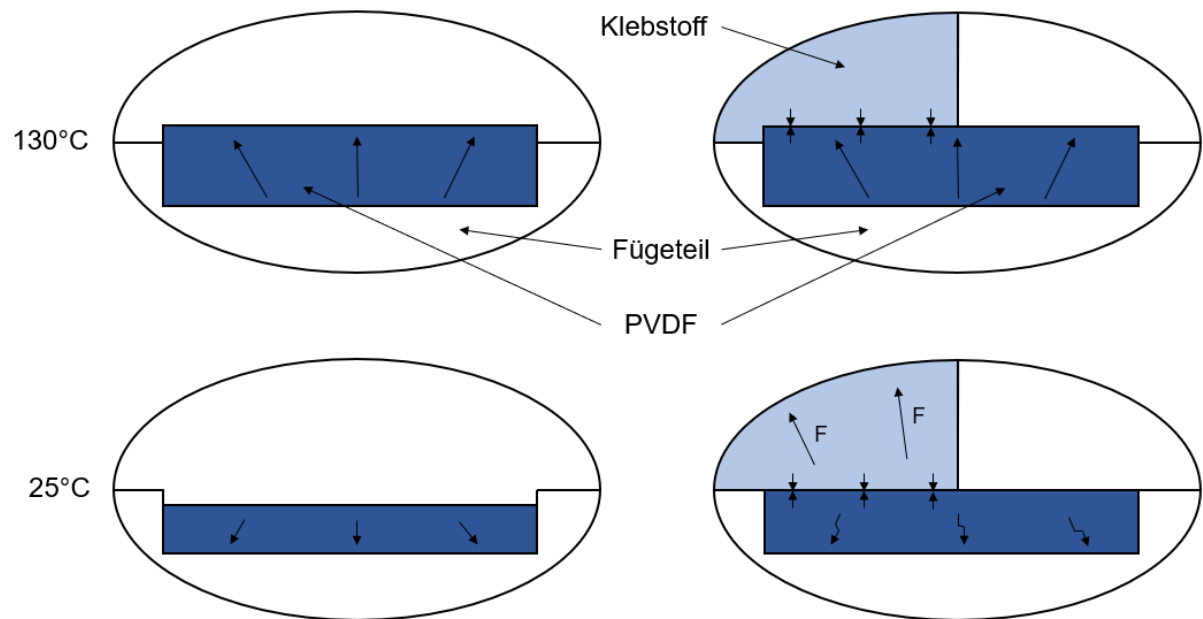


Abb. 2.16: Temperatureuswirkung auf den PVDF-Streifen im Laminat mit und ohne Klebstoff

Weitere Untersuchungen, zu der Breite des ST-Streifens (s. Abb. 3.5), haben ergeben, dass Klebungen mit einer PVDF-Streifenbreite von 10 mm, die größte Festigkeitssteigerung erzielen. [vgl. Lei18, S. 48]

Zur Übersicht zeigt Abb. 2.18 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. 2.17 gegeben, zusätzlich wird die in Abb. 2.14 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]

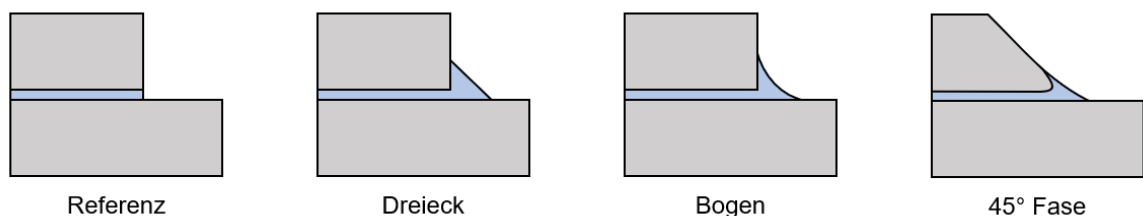


Abb. 2.17: Klebgeometrien im Vergleich

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

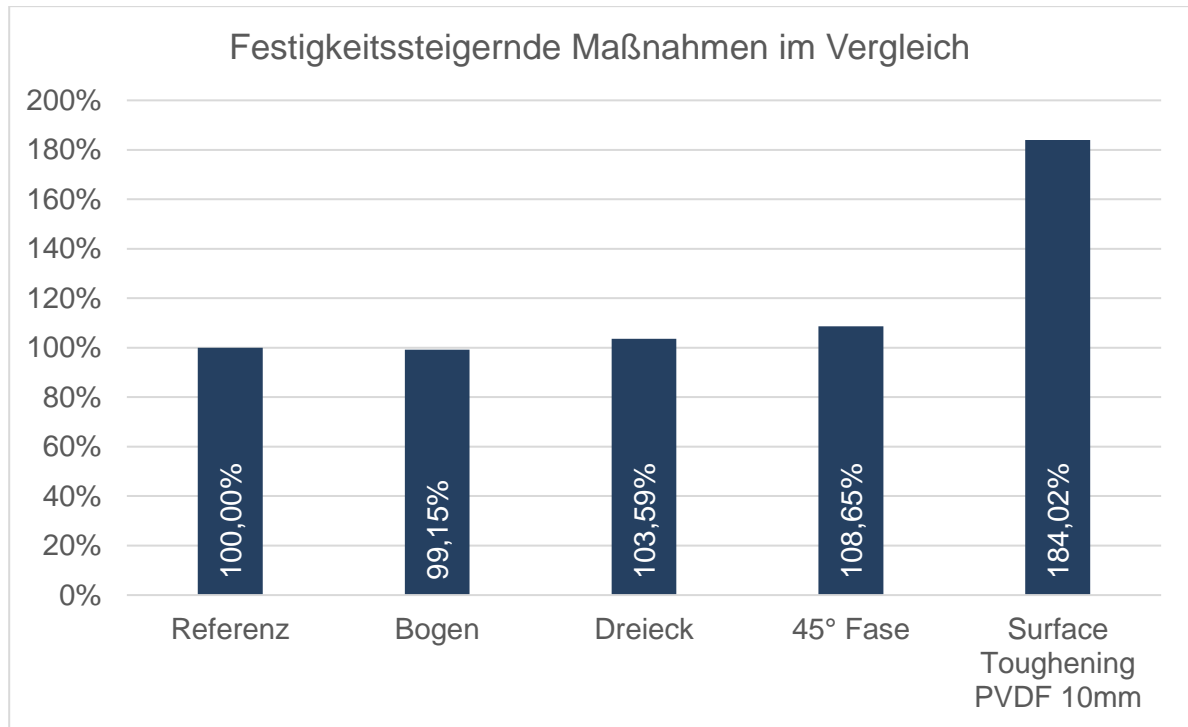


Abb. 2.18: Festigkeitssteigerungen von Klebverbindungen im Vergleich [vgl. Lei18]

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. 2.20 gezeigte Rissstoppkonzept eingesetzt werden kann. Somit bietet dieses Verfahren eine maximale Begrenzung der auftretenden Schädigung. [vgl. Löl16]

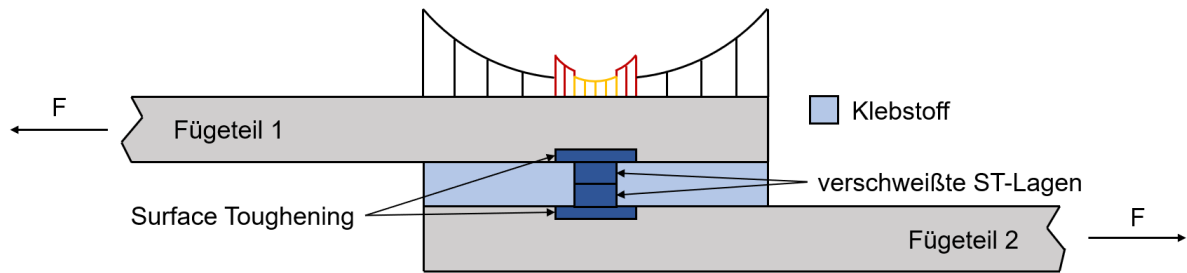


Abb. 2.19: erstes Konzept der hybriden Klebschicht als Rissstoppkonzept mit Spannungsverlauf [vgl. Löl16]

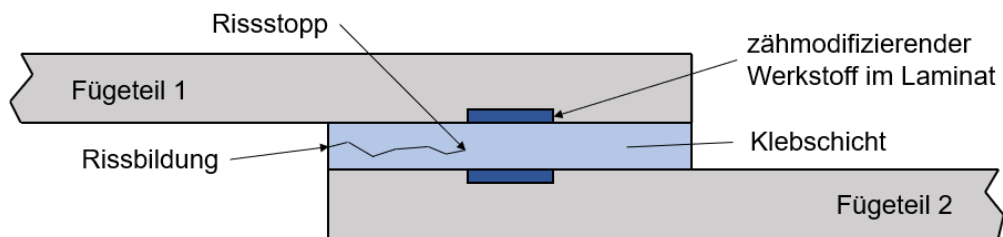


Abb. 2.20: Rissstoppkonzept mit Rissfortbildung [vgl. Sol18]

Dafür wurde in ersten Versuchen zusätzlich zu den Lagen in den Fügeteilen zwei weitere Lagen PVDF mittig der Überlappung platziert (s. Abb. 2.19). 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. 2.19 sichtbar. [vgl. Sol18, S. 4]

## 2.7 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 Van-der-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 Glasatemperatur eingesetzt werden, wohingegen die teilkristallinen Thermoplaste bis in den Bereich der Schmelztemperatur  $T_m$  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 in der Lage geringe Mengen an Luftfeuchtigkeit aufzunehmen. Die Feuchtigkeitsaufnahme lässt die Polymere aufquellen 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 ist, und einem Wasserdampfgemisch hat sich laut *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  $T_g$  von 143 °C und einer Schmelztemperatur  $T_m$  von 334 °C nicht 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 weist 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 ausgelagert. Prüfungen nach Mixed-Mode-Bending Versuchen zeigen eine Verschlechterung der Energiefreisetzungsrates 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.

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

	Einheit	PVDF
Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	46
Reißdehnung	%	100 bis 400
Zug-E-Modul	N/mm <sup>2</sup>	840
Schmelztemperatur	°C	171
Glasübergangstemperatur	°C	-40
Gebrauchstemperatur		
maximal kurzfristig	°C	180
maximal dauernd	°C	150
minimal dauernd	°C	-60
Linearer Ausdehnungskoeffizient	10 <sup>-6</sup> /K	85
Wasseraufnahme (23°C, 24h)	%- Massengehalt	0,04
Chemikalienbeständigkeit	-	ausgezeichnet
Strahlenbeständigkeit	-	sehr gut
Brennbar	-	selbsterlöschend

### 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  $\tau_b$  der zähmodifizierten Klebverbindung zu ermitteln, bietet laut der Literaturrecherche in 2.4 der Zugscherversuch. Für diesen statischen Prüfversuch werden zwei Fügeiteile überlappend verklebt. Dazu wird in der Literatur häufig die DIN EN 1465 mit Fügeiteilbreite von  $w = 25\text{mm}$  und Überlappungslänge von  $l = 12,5\text{mm}$  empfohlen. Diese Norm ist jedoch für Fügeiteil-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-Fügeiteile geprüft. Für FKV – Fügeiteile legt die ASTM D5868 eine Fügeiteilbreite von  $w = 25\text{mm}$  und eine Fügeiteillänge von  $l = 25\text{mm}$  nahe [vgl. Ast14].“ [Nie21]

Es werden entsprechend zu vorherigen Prüfversuchen und an die Norm ASTM – D5868 angelehnte Prüfkörper erstellt. Die Breite der Prüfkörper wird in diesem Umfang nicht variiert und beträgt bei allen Prüfkörpern 25mm. Die Überlappungslänge wird bei einer Untersuchung variiert. Hier werden die Überlappungslängen 15mm und 35mm untersucht. Diese Überlappingsänderung gilt der erhofften Zähigkeitsänderung mit dem ST, um so eine optimale Klebfestigkeit  $\tau_b$  mit ST zu bestimmen. Alle weiteren Prüfkörper folgen der Norm und den in Vorversuchen am besten abgeschnittenen Ergebnissen und werden mit einer Überlappung von 25mm verklebt.

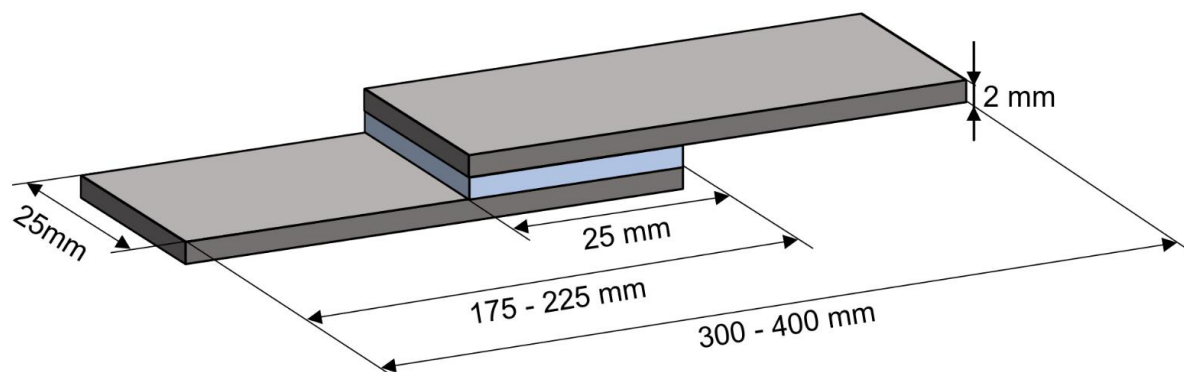


Abb. 3.1: Probengeometrie

„Für eine Fügeteildicke von 2 mm wird ein FBL (s. Kapitel 2.2) mit 16 Faserlagen gelegt, wobei eine ausgehärtete Faserlage eine Dicke von 0,125 mm ergibt. 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:

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

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 Wiederholgenauigkeit getroffen werden kann. “ [Nie21]

Als Referenz dient eine Probenreihe ohne zähmodifizierenden Werkstoff der letzten Versuchsreihe [s. Nie21].

Die für das Surface Toughening Anwendung findende Folie PVDF NOWOFLON, der Firma NOWOFOL, wird mit einer Foliendicke von 0,1mm auf die Proben aufgelegt. Die Folienbreite beträgt hier abhängig der Proben entweder 10mm oder 5mm.

Damit die Rahmenbedingungen einer nahe maximal feuchten Umweltbedingung auf die zähmodifizierte Klebverbindung geprüft werden kann, wird eine hydrothermale Auslagerung für über 1000h in einem Klimaschrank bei 70° C und 85 % Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Für diese Prüfreihe wird zusätzlich eine Referenzreihe ohne zähmodifizierenden Werkstoff ausgelagert.

Eine aussagekräftige, qualitative Auswertung der Prüfmesswerte erfolgt über die Klebfestigkeit  $\tau_b$ . Die Schubspannung  $\tau$  entsteht bei der Zugbelastung der Fügeteile, welche eine Scherung der Klebschicht verursacht (s. Abb. 3.2). Die Klebfestigkeiten der Probenreihen sollen in der Auswertung verglichen werden.

„Die Schubspannung berechnet sich nach Kapitel 2.4 über den Quotienten der maximal angreifenden Kraft  $F_m$  und der Klebfläche [vgl. Sko14, S. 86]:

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

$$A = w \cdot l \quad [2]$$

mit  $F_m$  – maximal wirkende Kraft  
 $A$  – belastete Fläche  
 $w$  – Fügeteilbreite  
 $l$  – Fügeteillänge

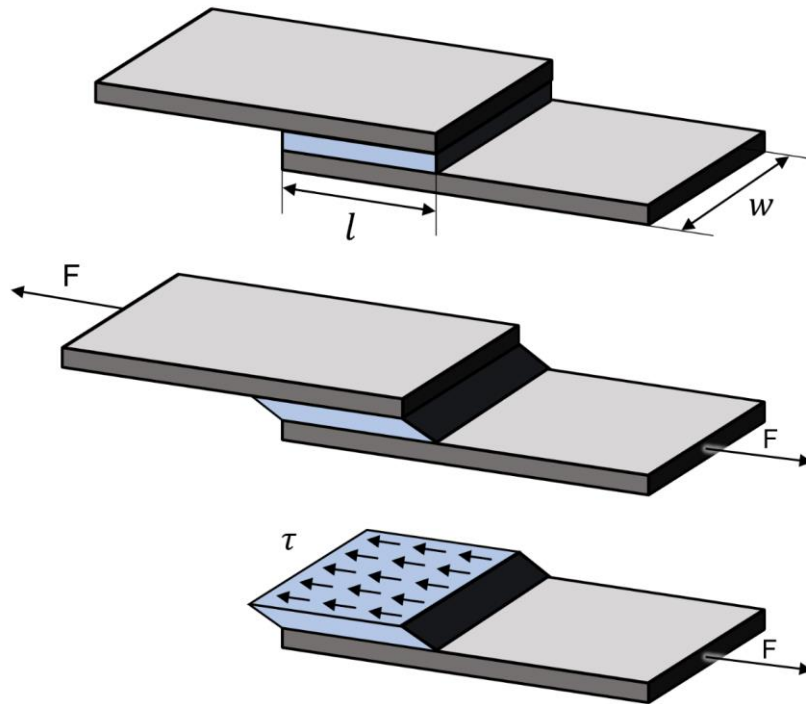


Abb. 3.2: Schubspannung in einer belasteten Überlappungsklebung

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

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

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]

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

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] gegebenen Vergleichsspannung von Mises berechnet [vgl. Bre18, S. 22, f.]:

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

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

$\sigma_x$  – Spannungskomponente in x – Richtung

$\sigma_y$  – Spannungskomponente in y – Richtung

$\tau_{xy}$  – Schubspannungskomponente

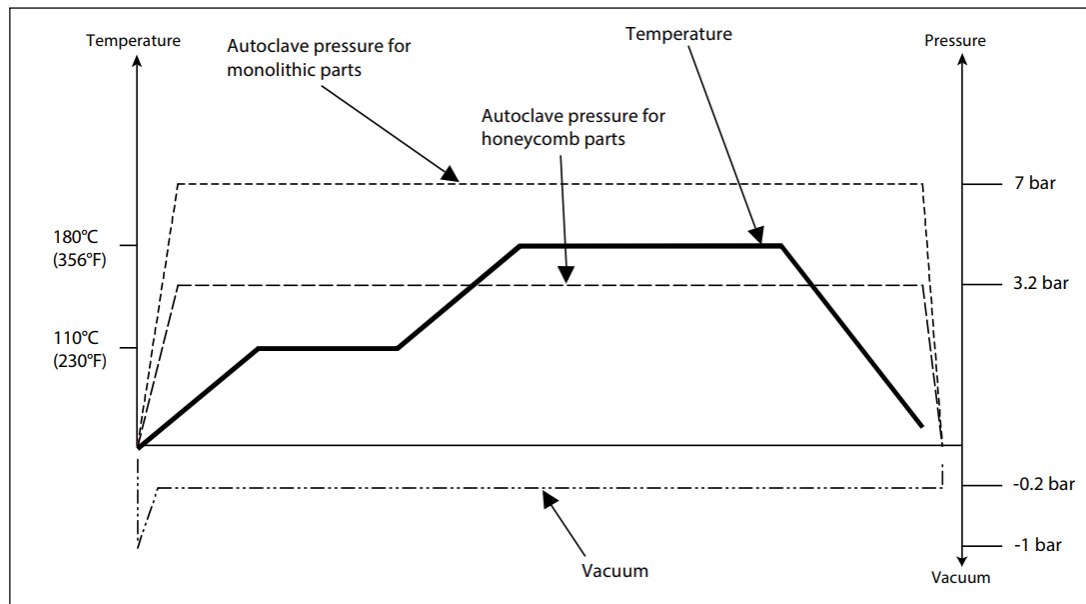
Bei der Vergleichsmethode von Mises wird vom Auswertungsprogramm ein Änderungsvergleich der Pigmente mit den angrenzenden Pigmenten gezogen, eine große Veränderung des Pigments ist gleichzusetzen mit einer großen Dehnung. Durch den aufgenommenen Dehnungsverlauf kann im Teil der Auswertung auf die wirkende Spannung geschlossen werden. Des Weiteren werden, wie in Kapitel 2.4 empfohlen, die Bruchbilder dokumentiert und ausgewertet.“ [Nie21]

### 3.2 Materialdaten

Die Anwendung findenden Materialien werden an die Standards der Luftfahrtindustrie angelehnt. Das CFK Laminat, aus dem die meisten Fügeile dieser Versuchsreihe gefertigt werden, wird mit dem Material Hexply® 8552 IM7 der Firma Hexel gelegt Das Material ist ein unidirektionales Kohlefaserprepreg, getränkt in einer Epoxidharzmatrix

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.“ [Nie21]

### Curing Cycle for Honeycomb and Monolithic Components



Copyright © 2020 – Hexcel Corporation – All Rights Reserved.

Abb. 3.3: Autoklav-Zyklus Hexply 8552 IM7 (s.Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.)

Zusätzlich finden auch Aluminiumfügeteile Anwendung in dieser Versuchsreihe. Das eingesetzte Aluminium ist zu Voruntersuchungszwecken und Kostengründen das günstige EN AW 5754 H22. Das Material wird, wie auch das ausgehärtete CFK-Laminat, mit einer Dicke von 2mm verwendet. Für das ST muss in das Material eine zusätzliche Nut gefräst werden, da es bei Aluminium bisher keine erfasste Möglichkeit gibt, den Surface Toughening Streifen in die Oberfläche einzuarbeiten.

Der Strukturklebstoff Loctite EA 9695 Aero findet bei allen Prüfkörpern, die mithilfe eines Klebstoffs verklebt werden, Anwendung. Es handelt sich bei diesem Klebstoff um einen warmushärtenden Filmklebstoff, welcher in festem Zustand auf das Fügeteil aufgetragen wird, mit einer vorgegebenen Klebstoffdicke von 0,15mm. Diese Dicke kann bei dem Aushärtungsprozess durch entsprechenden Druck geändert werden. In dieser Versuchsreihe wird der Klebstoff im Vakuum unter 3 bar und einer Temperatur von 130 °C zu einem resultierenden Dicken von 0,1mm ausgehärtet.

Das Surface Toughening wird folgendermaßen realisiert. Es wird ein PVDF Streifen auf dem Fügeteil platziert. Bei den CFK Proben wird der Kunststoffstreifen auf das unausgehärtete Laminat gelegt und mit dem Aushärtungsprozess des CFK-Laminats in das Fügeteil eingebracht. Bei den Aluminiumproben werden die Kunststoffstreifen in eine zuvor gefräste Nut geklebt und mit dem Klebprozess mit dem Fügeteil verbunden.



Tabelle 3.1: Materialkennwerte der verwendeten PVDF-Folie, NOWOFLON, der Firma NOWOFOL (s. Anhang A.4)

Parameter	Wert	Einheit
E-Modul*	1700	N/mm <sup>2</sup>
Reißdehnung	> 450	%
Festigkeit	> 35	N/mm <sup>2</sup>
Glasübergangstemperatur T <sub>g</sub> *	-40	°C
Schmelztemperatur T <sub>m</sub>	163	°C

### 3.3 Fertigungsprozess

Nach Kapitel 3.1 sollen Fügebauteile erstellt werden, die ein Zuschneiden von sechs Prüfkörpern zulassen. Die Größe des Laminats folgt den Abmaßen 220mm Breite und 420mm Länge.

Damit eine gleiche Faserausrichtung beider Fügebauteile ermöglicht wird, werden die Fügebauteile aus einem Laminat gefertigt und wie in Abb. 3.4 gefügt. Bei den ST-Proben wird somit auf beiden Seiten auf verschiedenen Längen ein ST Streifen auf das Laminat aufgelegt.

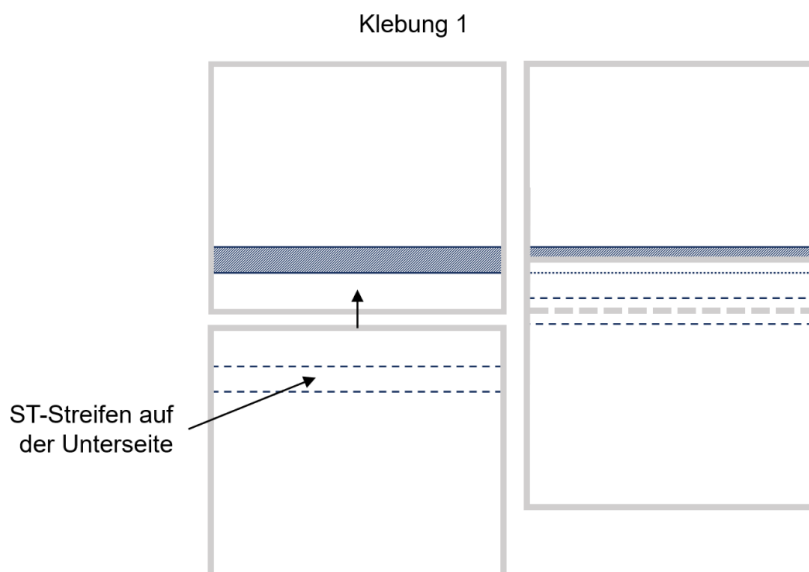


Abb. 3.4: Verkleben der Fügebauteile mit identischer Ausrichtung der Faserlagen

Je nach Surface Toughening Breite erfolgt eine spezifische Positionierung jener auf dem Laminat. Die verschiedenen Abmaße und Platzierungen auf den Fügebauteilen sind

\* Werte wurden nicht vom Hersteller angegeben und wurden vom Kynar® 740 übernommen

in Abb. 3.5 dargestellt. Surface Toughening Streifen mit der Breite 5 mm und 10 mm werden symmetrisch zur Überlappung positioniert.

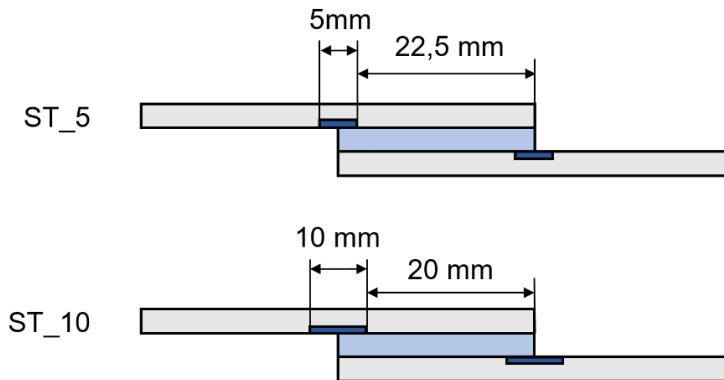


Abb. 3.5: Varianten des durchgeführten Surface Toughenings

Die Benennung der Proben erfolgt durch die in Abb. 3.6 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. Die Zahl am Ende der Nomenklatur bezeichnet die laufende Probennummer und beläuft sich entsprechend der sechs Prüfkörper einer Probenreihe zwischen „1“ und „6“.

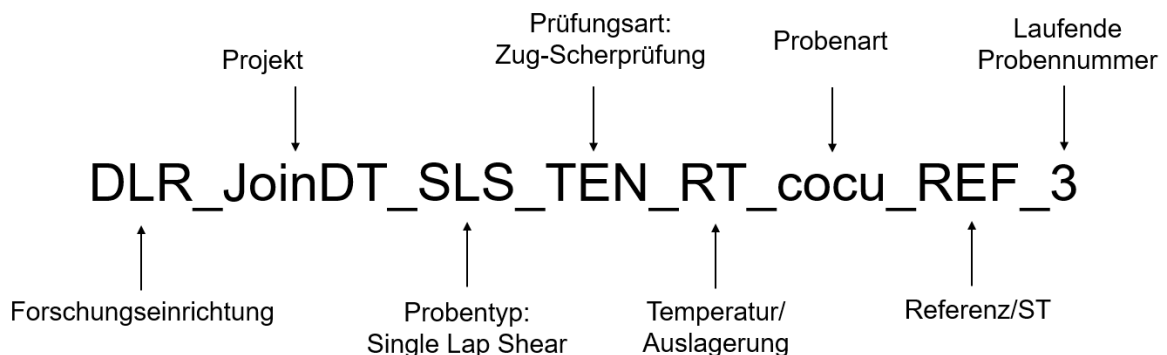


Abb. 3.6: Prüfkörperbezeichnung

Eine Übersicht aller Probenreihen ist in Tabelle 3.2 gegeben.

Tabelle 3.2: Übersicht aller Probenbeschriftungen

Probenreihe	Probenbezeichnung	Probenanzahl
1	DLR_JoinDT_SLS_TEN_outs_REF	6
2	DLR_JoinDT_SLS_TEN_outs_ST10	6
3	DLR_JoinDT_SLS_TEN_-55°C_REF	6
4	DLR_JoinDT_SLS_TEN_-55°C_ST10	6
5	DLR_JoinDT_SLS_TEN_-22°C_REF	6
6	DLR_JoinDT_SLS_TEN_-22°C_ST10	6
7	DLR_JoinDT_SLS_TEN_80°C_REF	6
8	DLR_JoinDT_SLS_TEN_80°C_ST10	6
9	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_15mm_REF	6
10	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_15mm_ST10	6
11	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_35mm_REF	6
12	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_35mm_ST10	6
13	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_ALU_REF	6
14	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_ALU_ST10	6
15	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_patch2_REF	6
16	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_patch2_ST	6
17	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_patch1_REF	6
18	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_patch1_ST	6
19	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_cocu_REF	7
20	DLR_JoinDT_SLS_TEN_RT_15mm_cocu_ST	7

### 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  $-18\text{ °C}$  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. Um die Kunststoffe keiner thermischen Belastung auszusetzen, werden diese mit einer Xenon – Excimer -

Lampe erzeugten VUV-Strahlung vorbehandelt. Damit keine unbekanntenen Störgrößen entstehen durchlaufen alle ST-Streifen den gleichen standardisierten Prozess einer DLR internen VUV-Anlage (s. Abb. 3.7). Dafür werden die Kunststoffstreifen auf einen Lineartisch gelegt und unter der Xe - Excimer - Lampe hindurchgefahren. Die Vorbehandlung erzeugt eine Oberflächenaktivierung von  $540 \text{ mJ/cm}^2$  ( $135 \text{ mJ/cm}^2$  pro Durchgang bei vier Durchgängen) [Oni21].

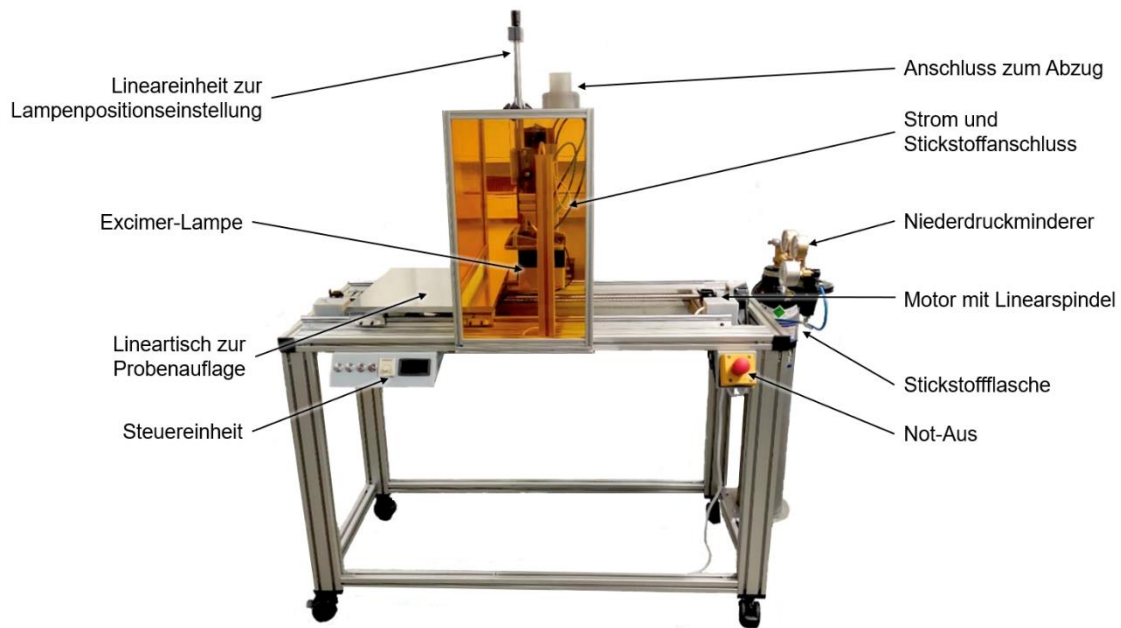


Abb. 3.7: Aufbau der DLR internen VUV-Anlage

Auf die genaue Positionierung der ST-Streifen auf dem Laminat ist zu achten. Für den Aushärteprozess des Laminats werden alle gelegten Fügeiteile 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 Lamine angewandte Vakuumaufbau wird in Abb. 3.8 veranschaulicht. Alle Fügeiteile 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 Lamine 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. 3.9).

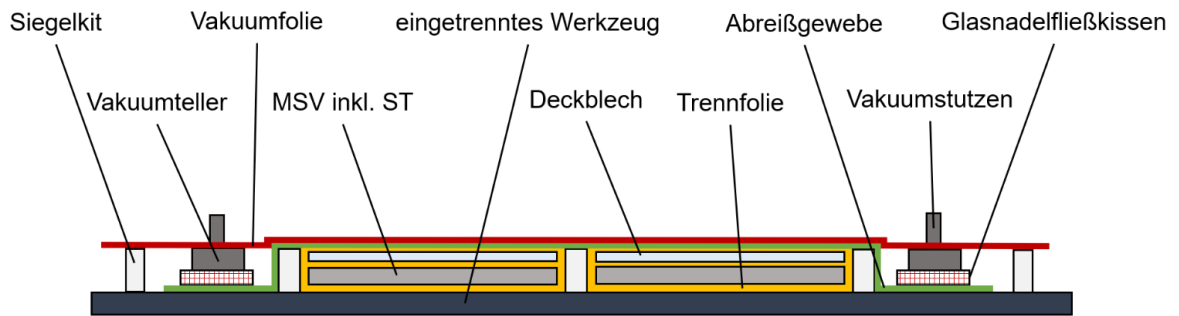


Abb. 3.8: Vakuumaufbau

Um Lufteinschlüsse im MSV zu vermeiden, ist es sinnvoll die gelegten Lamine 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. 3.10) wird bei dem in Abb. 3.3 geschilderten Autoklav Zyklus vorgenommen.

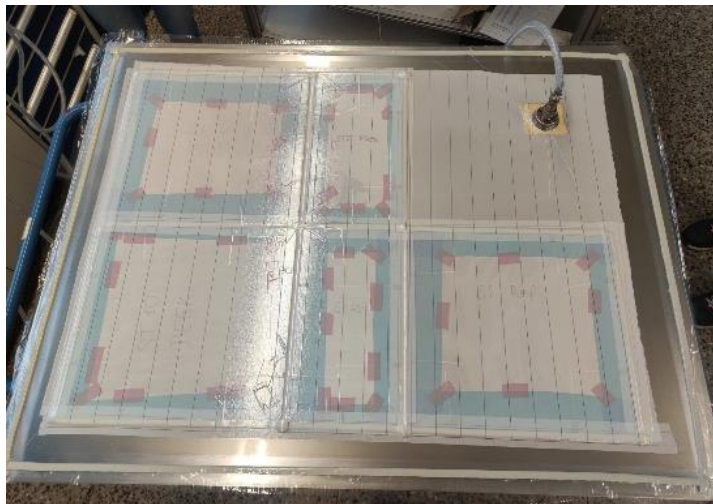


Abb. 3.9: Vakuumaufbau nach Evakuierung der Luft



Abb. 3.10: Autoklavgang

Die ausgehärteten Füge­teile werden entformt und besäumt. Vor dem Klebstoffauftrag wird die Klebfläche mit Atmosphärendruckplasma vorbehandelt (s. Abb. 3.11). 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. 3.11: 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 Lamine vor der Oberflächenvorbehandlung angebohrt und mit Stiften zentriert (s. Abb. 3.12). 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.



## 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 über 1000h bei 75°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % ausgelagert.

Tabelle 4.1: Daten der genutzten Prüfanlage, Zwick 1476

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

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 Fügeiteilenden 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.



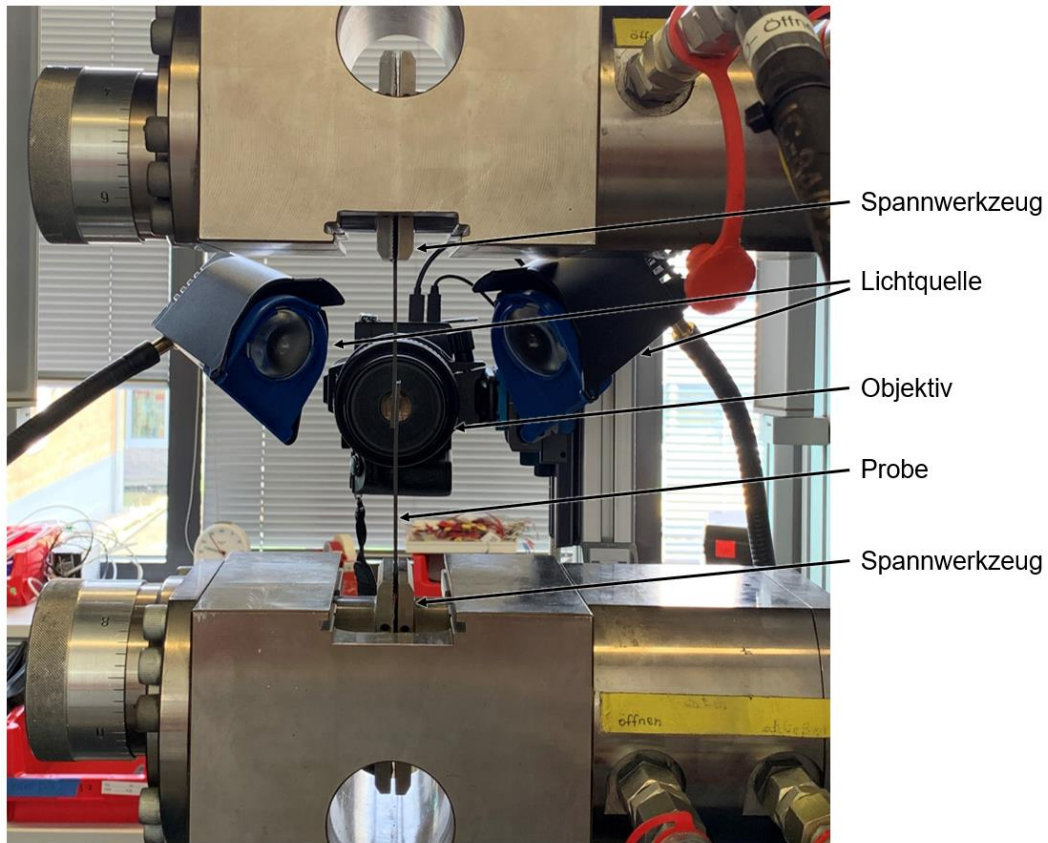


Abb. 4.1: Aufbau der Zugscherprüfung

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.

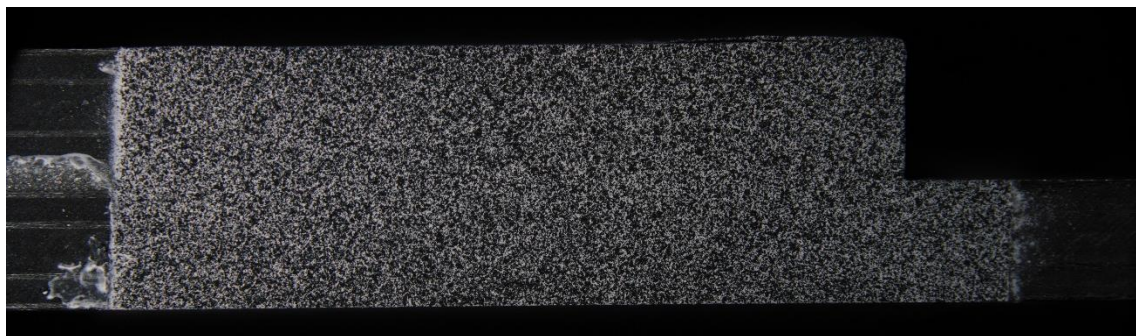


Abb. 4.2: stochastisches Muster auf Überlappungsklebung

Für die Aufnahmen zur optischen Auswertung durch ARAMIS wird ein Bild pro Sekunde über eine Spiegelreflexkamera (Sony  $\alpha$  7R-III) aufgenommen. Das aufgesetzte 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.

### 5.1 Klebfestigkeit unter verschiedenen Temperatureinflüsse

Damit auch die wirkenden Temperaturen der Luftfahrt bei gleichzeitig großer Belastung eingeschätzt werden können, werden zähmodifizierte Klebverbindungen unter Temperatureinflüssen zwischen  $-55\text{ °C}$  und  $+80\text{ °C}$  getestet. Die Zugscherprüfung wird dafür in einer Klimakammer unter der entsprechenden Temperatur durchgeführt. Es werden jeweils eine Referenzprobenreihe und eine Surface Toughening Probenreihe pro Temperatur geprüft.

Die gemittelten Messergebnisse sind in Abb. 5.1 grafisch dargestellt. Dabei ist bei den Referenzproben zu erkennen, dass die Klebfestigkeit kontinuierlich mit der Temperatur steigt. Ebenfalls mit der Temperatur steigt auch die Standardabweichung. Die Surface Toughening Proben unterscheiden sich im Temperaturverlauf von den Referenzproben ohne Surface Toughening. Die geringste Klebfestigkeit in diesem Versuch besteht bei  $-55\text{ °C}$ . Dabei zeigt das Surface Toughening eine verschlechtere Klebfestigkeit von rund 11 % zur einfach verklebten Probe bei  $-55\text{ °C}$ . Bei allen anderen geprüften Temperaturen zeigen die Surface Toughening Proben eine erhöhte Klebfestigkeit zur Referenz. Bei einer Prüftemperatur von  $-22\text{ °C}$  zeigt sich die erste Steigerung der Klebfestigkeit. Durch das Surface Toughening steigt die Klebfestigkeit um 37%. Die größte prozentuale Steigerung der Klebfestigkeit von 88 % zeigen die Surface Toughening Proben bei geprüfter Raumtemperatur, wo die Klebfestigkeit der Surface Toughening Reihe fast doppelt so groß ist wie die der Referenzreihe. Bei der höchsten gemessenen Temperatur in diesem Versuch nähert sich die Surface Toughening Reihe wieder der Referenz an und zeigt nur noch eine gemittelte leichte gesteigerte Klebfestigkeit von 5% zur Referenzreihe.

Wo die Temperaturen liegen, an denen die Surface Toughening und die Referenz Proben die gleiche Klebfestigkeit haben - also die Wendepunkte, an denen die Surface

Toughening Proben eine schlechtere bzw. bessere Klebfestigkeit zeigen als die Referenz - werden aus diesem Versuch nicht deutlich.

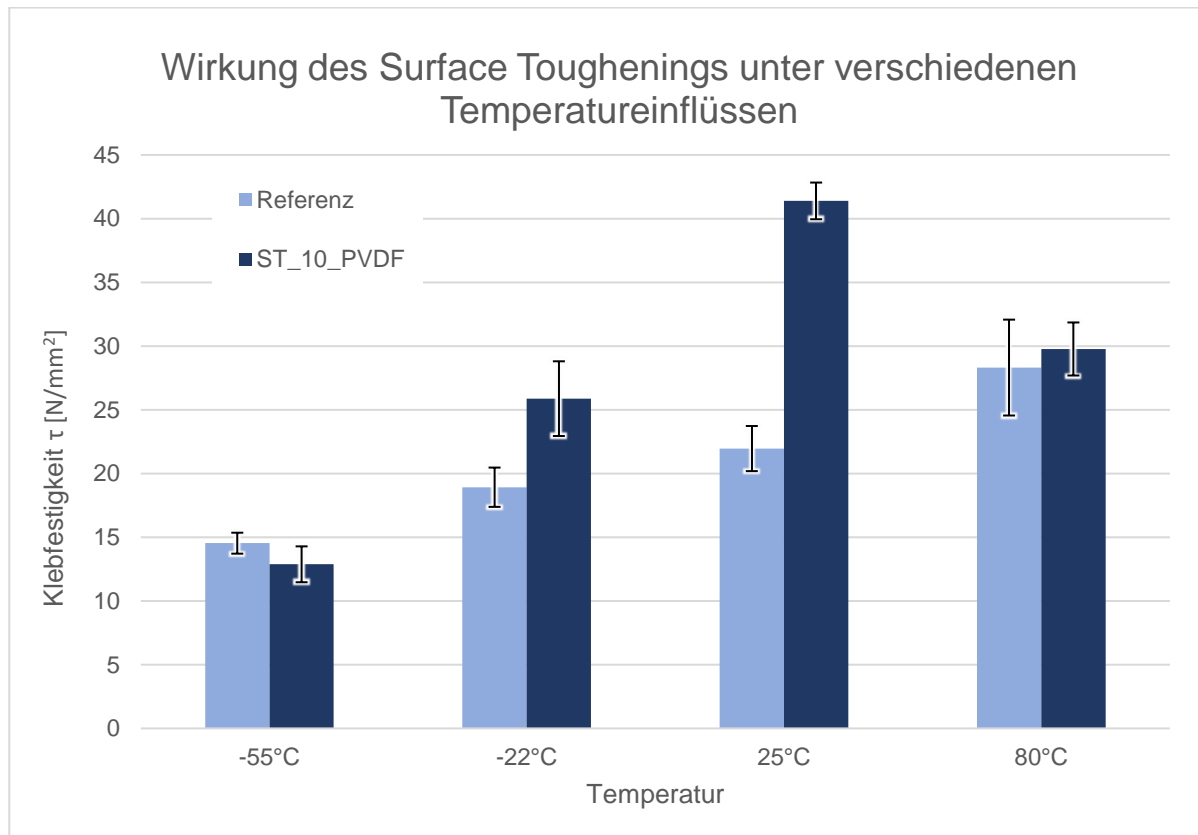


Abb. 5.1: Änderung der Klebfestigkeit durch äußere Einflüsse

## 5.2 Klebfestigkeit unter maximalem Feuchtigkeitseinfluss

Zusätzlich zu den bisher erzielten Ergebnissen zur Feuchtigkeitsuntersuchung in der letzten Versuchsreihe, wird hier einmal die Auslagerung in hydrothormaler Umgebung (s. Abb. 5.2) für über 1000h untersucht.

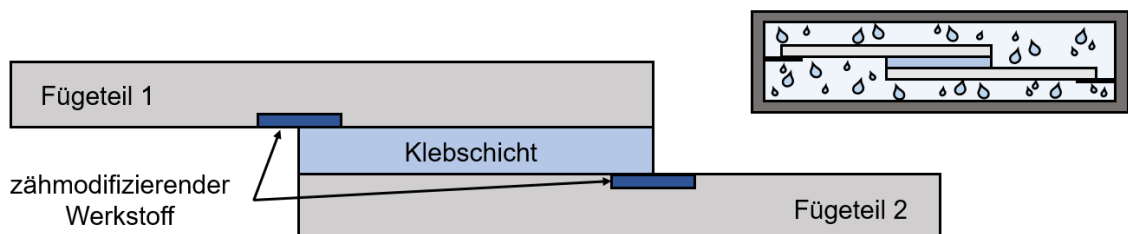


Abb. 5.2: Konzept ausgelagerter Proben

Die Ergebnisse der weiterführenden Feuchtigkeitsuntersuchung sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Die Messergebnisse der

trockenen Referenzproben sowie die 14 tägig ausgelagerten Proben (300+) werden hier aus der letzten Versuchsreihe entnommen [vgl. Nie21].

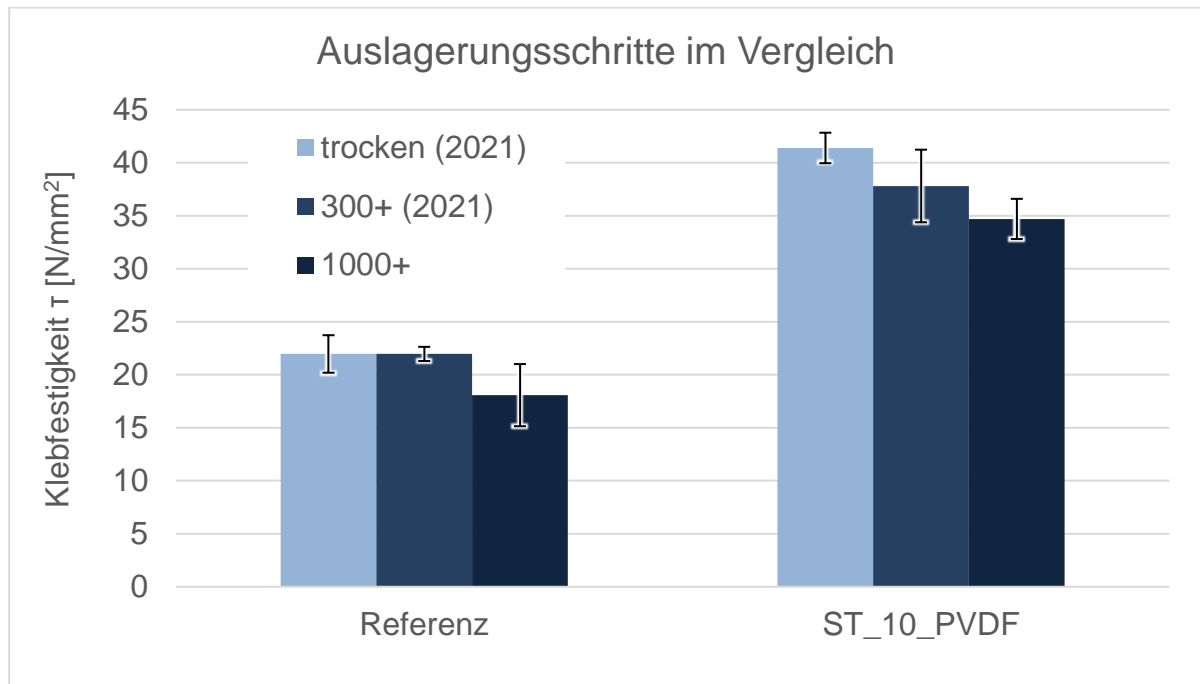


Abb. 5.3: Auslagerungsschritte im Vergleich

Festzustellen ist, dass es einen stetigen Abfall der Klebfestigkeit mit zunehmender Feuchtigkeit gibt. Dementsprechend haben die am längsten ausgelagerten Probenreihen die geringste Klebfestigkeit. Nach 1000h Auslagerung in feuchtwarmer Umgebung fällt ebenfalls die Klebfestigkeit der Referenz deutlich ab, welche im Versuch zuvor nach 14-tägiger Auslagerung ungefähr die gleiche Klebfestigkeit erzielen konnte. Wird somit ein Vergleich zwischen der 1000h ausgelagerten Referenz Proben und der 1000h ausgelagerten ST Proben gezogen so erzielen die ST Proben im Mittel eine 93%ige Steigerung der Klebfestigkeit. In einer trockenen Umgebung wird von den ST Proben eine Festigkeitssteigerung von 85% erzielt.

Die Abb. 5.4 und Abb. 5.5 zeigen eine weitere zur Auswertung hinzugezogene Untersuchung mit ARAMIS. Bei den ausgelagerten Proben ist hier eine deutlich schlechtere Dehnung in der Klebschicht zu erkennen. Konstant geblieben ist die deutlich bessere Dehnung in der Klebschicht bei der ST Probe, im Vergleich zur Probe ohne ST, welche zu eine fast doppelt so großen aufnehmbaren Maximalkraft führt.



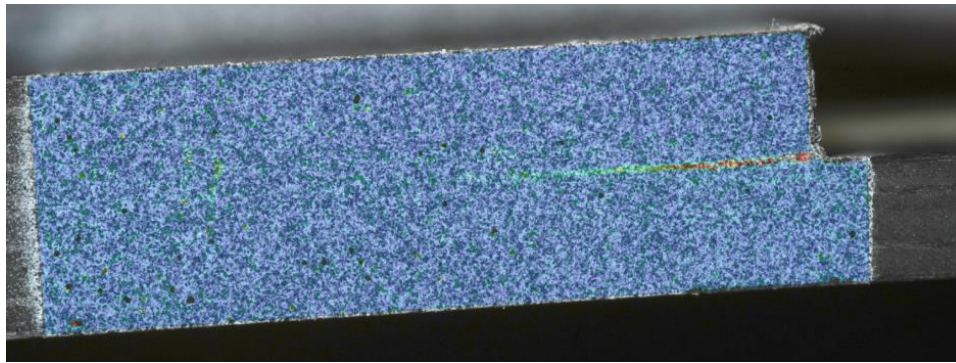


Abb. 5.4: ARAMIS Untersuchung der Referenz 1000+ Probe 4 kurz vor Bruch (10237N)

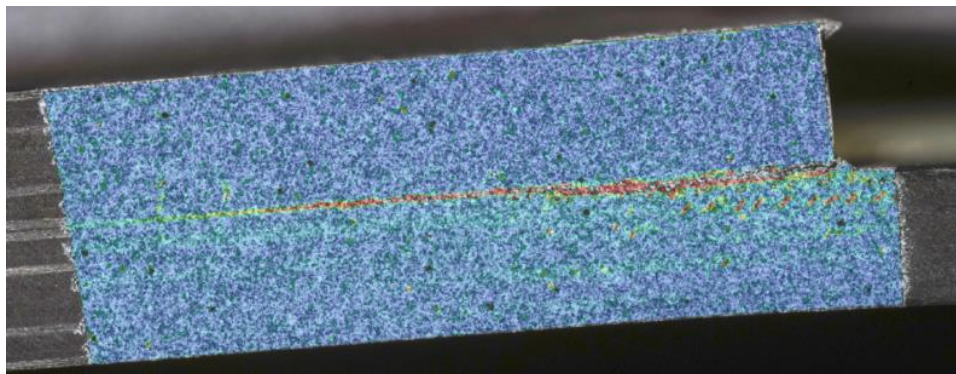
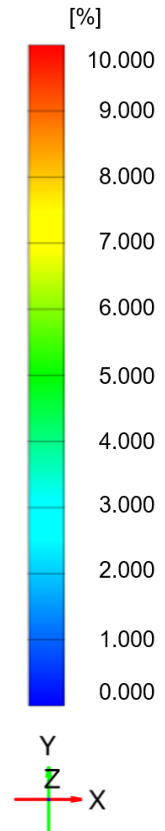


Abb. 5.5: ARAMIS Untersuchung der ST10 1000+ Probe 4 kurz vor Bruch (20638N)



### 5.3 Klebfestigkeit unter veränderter Klebfläche

Die Untersuchungen zu den unterschiedlichen Überlappungslängen dienen der Klebfestigkeitsbetrachtung. Damit die Klebverbindung nicht überdimensioniert wird, soll hier die Überlappungslänge gefunden werden, wo die Klebfestigkeit sinkt bzw. stagniert. Dazu werden neben den bisher verwendeten 25mm Überlappung auch noch Überlappungslängen von 15mm und 35mm geprüft. Die qualitative Darstellung der Probengeometrie ist in Abb. 5.6 visualisiert.

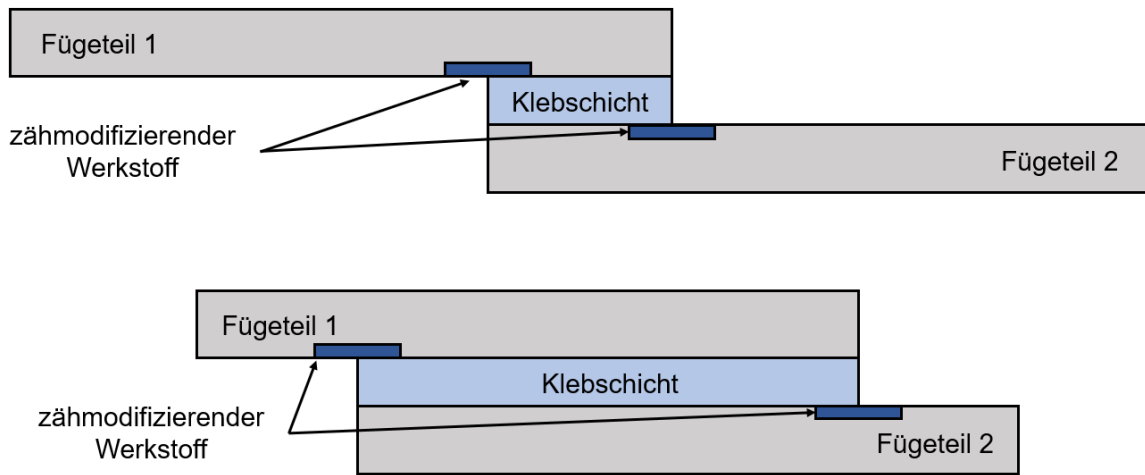


Abb. 5.6: Konzept unterschiedlich großer Überlappungen

Die Klebfestigkeitsentwicklung der gemittelten Messergebnisse wird in Abb. 5.7 dargestellt.

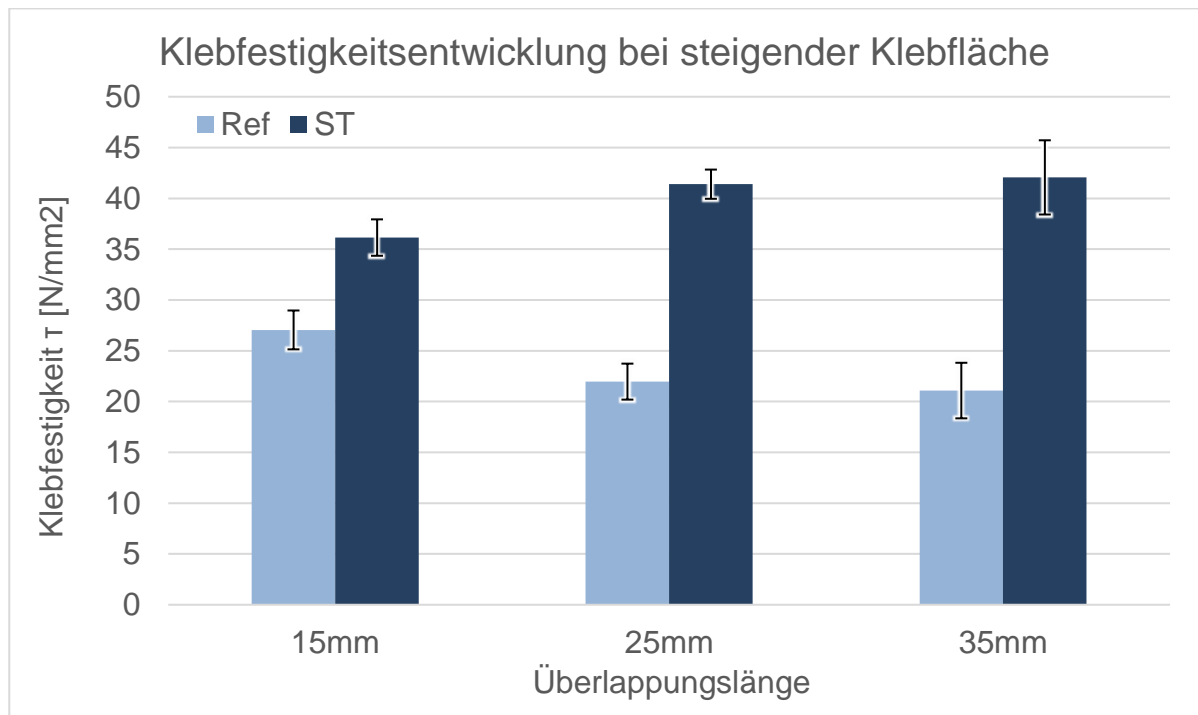


Abb. 5.7: Klebfestigkeit in Abhängigkeit der Klebfläche

Die gemittelte Klebfestigkeit der Referenz nimmt mit bei den geprüften Überlappungen mit zunehmender Klebfläche ab. Hingegen die ST-Probenreihen erhalten mit zunehmender Klebfläche eine verbesserte Klebfestigkeit. Der Steigerung der Klebfestigkeit zwischen einer Überlappungslänge von 25 mm und 35 mm ist jedoch gering. Werden hier die Bruchbilder (s. Abb. 5.8) betrachtet, so ist auffällig, dass bei einer Überlappungslänge von 35mm die Klebschicht nicht mehr der versagensinitiiierende Faktor ist. Die Klebverbindungen versagen alle mit einem Faser- oder einem Fügeteilbruch. Somit wird hier die Klebverbindung überdimensioniert

werden. Mehr Überlappung bedeutet überdies eine unnötige Gewichtszunahme. Die bisherigen 25mm Überlappungslänge sind dementsprechend gerechtfertigt.

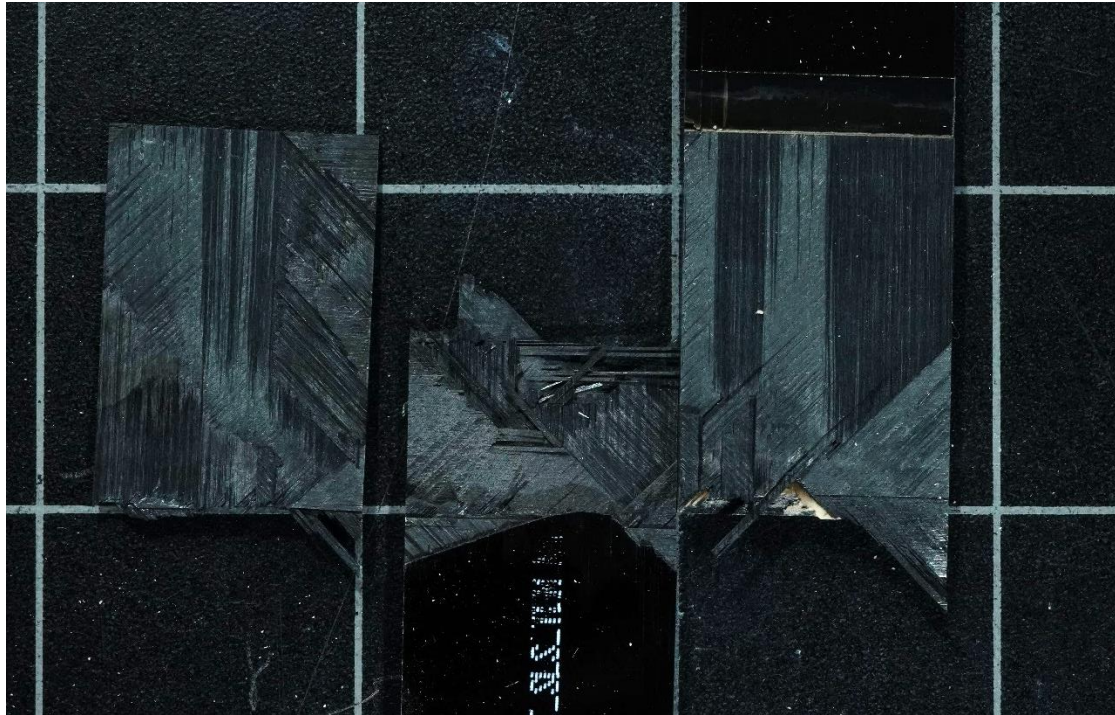


Abb. 5.8: Bruchbild der Probe mit 35mm Überlappungslänge

Neben der Klebfestigkeit ist die maximal aufnehmbare Kraft der Verbindung von Bedeutung. Diese steigt, wie in Abb. 5.9 zu erkennen, bei beiden Probenreihen mit Zunahme der Klebfläche.

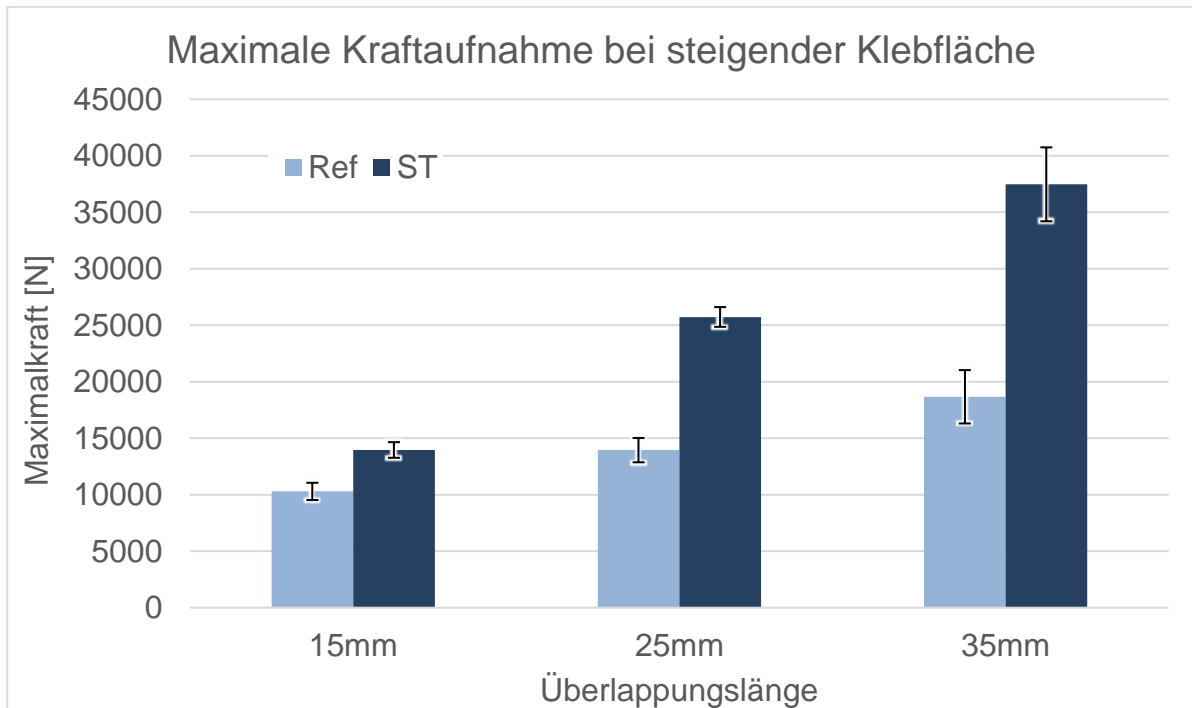


Abb. 5.9: Maximalkraft in Abhängigkeit der Klebfläche

## 5.4 Wirkung von Surface Toughening bei Aluminiumsubstrat

Der am meisten genutzte Werkstoff in der Luftfahrt ist nach wie vor das kostengünstige Leichtmetall Aluminium. Eine Untersuchung mit Aluminium Fügebauteilen soll zeigen, ob das Prinzip des Surface Toughenings auch auf andere Materialien, bzw. vor allem auf Aluminium, übertragbar ist. Zusätzlich soll das Überführen des ST Prinzips auf ein anderes Material die Funktionalität des Surface Toughenings ein weiteres Mal beweisen. Dazu wurden Fügebauteile, wie in Abb. 5.10 dargestellt, aus Aluminium zugeschnitten und mit einer gefrästen Nut für die Surface Toughening Streifen versehen. Surface Toughening Streifen müssen vor dem Verkleben der beiden Aluminium Fügebauteilen separat verklebt werden, da die Streifen hier - anders als bei dem Faserverbundkunststoff, wo die ST-Streifen durch das Harz fixiert und verklebt werden - nicht von alleine haften.

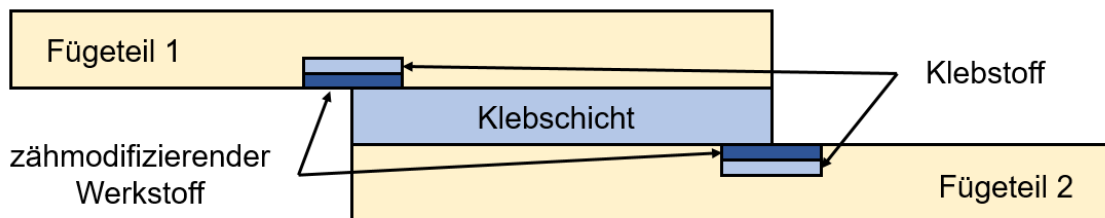


Abb. 5.10: Konzept der Aluminium Proben

Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abb. 5.11 aufgetragen. Es wird die gemittelte Klebfestigkeit der Referenzprobenreihe mit der Surface Toughening Probenreihe verglichen.

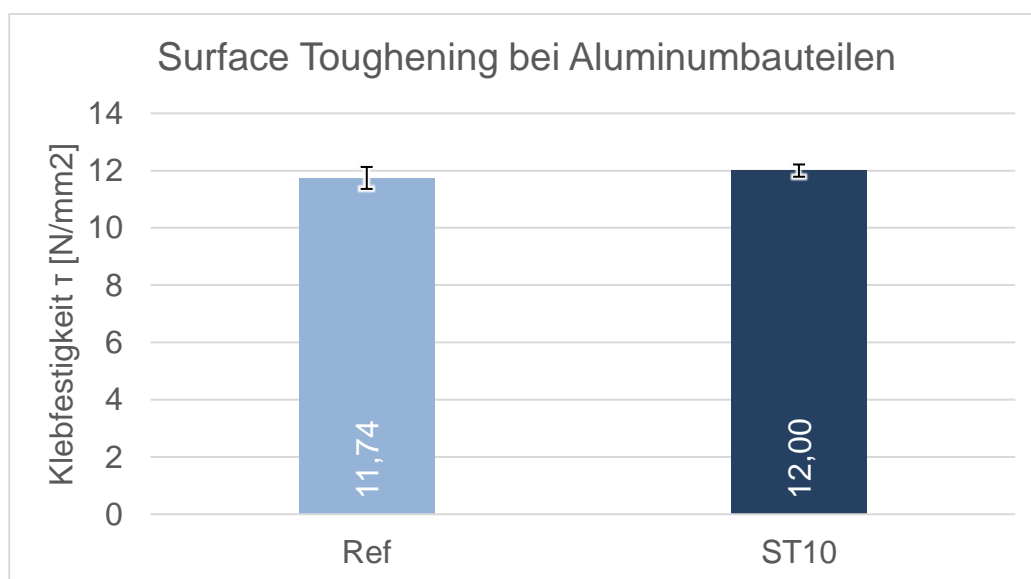


Abb. 5.11: Die Wirkung von Surface Toughening auf die Klebfestigkeit bei Aluminiumbauteilen



Zu erkennen ist keine nennenswerte Veränderung der Klebfestigkeit durch die Anwendung des Surface Toughenings. Die Klebfestigkeit ist mit 12 MPa ebenfalls sehr niedrig. Nach Betrachtung der Materialeigenschaften des genutzten Aluminiums 5754 in Tabelle 5.1 wird folgendes auffällig. Das weiche Aluminium beginnt bereits bei 130 MPa an zu fließen.

Tabelle 5.1: Materialdaten des verwendeten Aluminiums

Legierung	Rm	Rp0,2	Ebr	E
EN AW	[MPa]	[Mpa]	[%]	[Gpa]
5754 H22	220	130	11	71

Die anliegende Kraft  $F$ , die anliegen muss damit das Aluminium die Dehngrenze  $R_{p0,2}$  erreicht, liegt bei 6500 N und berechnet sich folgendermaßen:

$$F = R_{0,2} \cdot A$$

$$F = 130 \text{ MPa} \cdot 25 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm} = 6500 \text{ N}$$

A – Querschnittsfläche des Aluminiums

Die maximal anliegende Kraft einer guten ST-Proben mit CFK-Fügeteilpartnern liegt im Vergleich bei 27000 N.

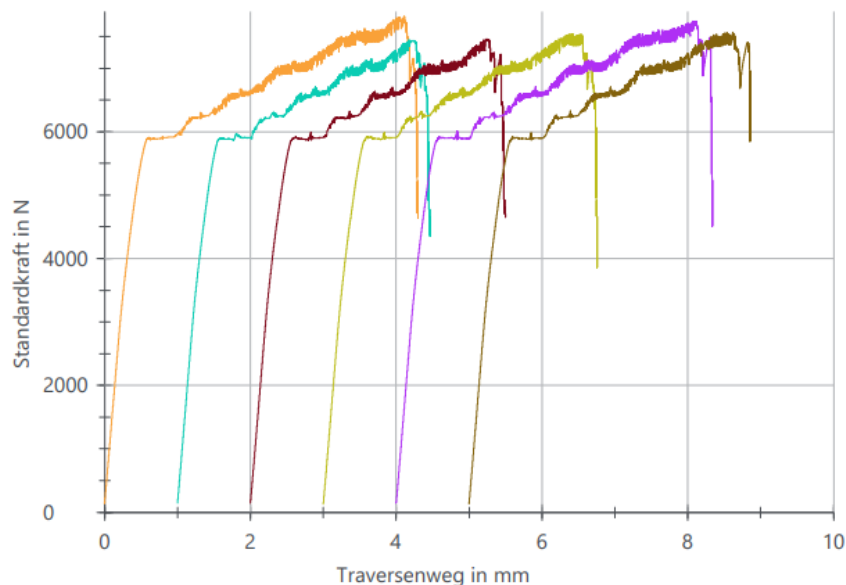


Abb. 5.12: Kraft - Weg Diagramm der geprüften Aluminium Proben

Diese Erkenntnis zeichnet sich auch in den aufgezeichneten Graphen der Prüfmaschine ab, welche in Abb. 5.12 aufgetragen sind. Die Proben zeigen hier eine Fließgrenze bei etwa 6000 N an. Der Grund, weshalb das Material bereits bei 6000 N anfängt zu fließen und nicht wie bei der zu erwarteten, berechneten Kraft, liegt vermutlich an der orthogonal zur Walzrichtung gezogenen Prüfkörper. Gut zu erkennen ist außerdem ein sich wiederholendes Muster. Das Aluminium fängt an zu fließen und die Kraft stagniert, dann scheint sich das Material zu verfestigen und die Kraft beginnt erneut zu steigen bevor die Kraft wiederum stagniert und nach ein paar Wiederholungen komplett abfällt und die Verbindung versagt.

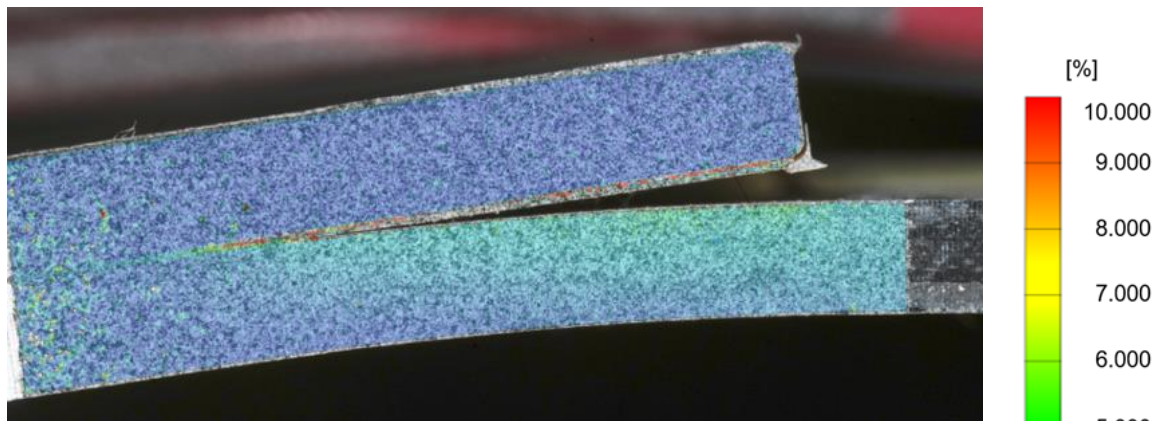


Abb. 5.13: ARAVIS Untersuchung Referenz Aluminium Probe 4 kurz vor Bruch

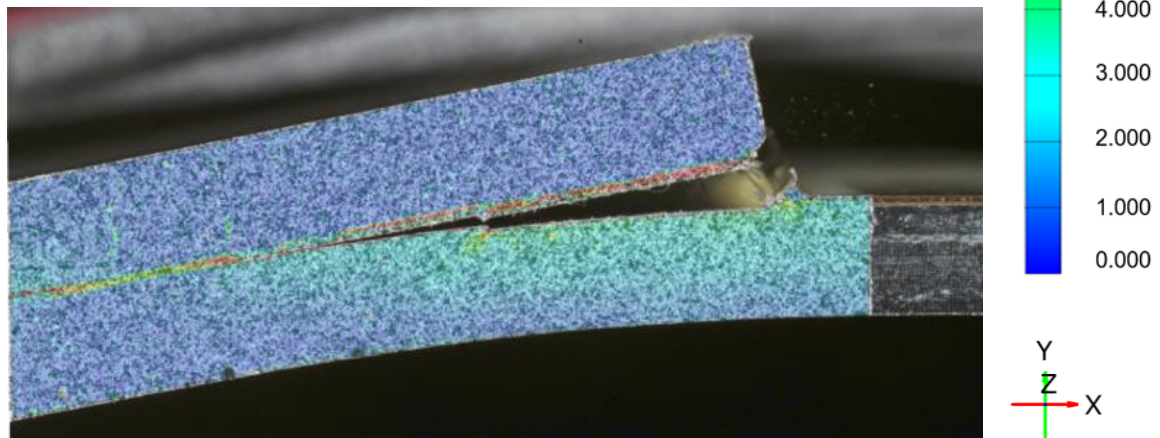


Abb. 5.14: ARAVIS Untersuchung der Surface Toughening Aluminium Probe 4 kurz vor Bruch

Die große Dehnung im Aluminium lässt sich zusätzlich in der Dehnungsmessung per ARAVIS betrachten. Die Aufnahmen zeigen schon nach wenig Kräfteinwirkung einen großen S-Schlag und einen Anriss. Bei der Abb. 5.13 und Abb. 5.14 werden die Referenz und die Surface Toughening Probe kurz vor Bruch gezeigt. Hier ist die große Verformung des Aluminiums deutlich zu erkennen. Bei der ST Probe ist ebenfalls zu erkennen, dass der ST Streifen bereits komplett aus der Probe rausgerissen wurde und sich der Rissfortschritt in der Klebschicht sich schon deutlich hinter dem ST Streifen befindet. Somit kann das Surface Toughening hier keine aktive

Spannungsreduktion leisten. Was aber dennoch bei der ST Probe in Abb. 5.14 auffällt ist der Ansatz einer gleichmäßige Spannungsverteilung in der Klebschicht, die in Abb. 5.13 nicht vorhanden ist.

## 5.5 Voruntersuchungen zu Patches

Im Umfang dieser Versuchsreihe wurden Voruntersuchungen für drei verschiedene Patch Möglichkeiten mit Surface Toughening getätigt.

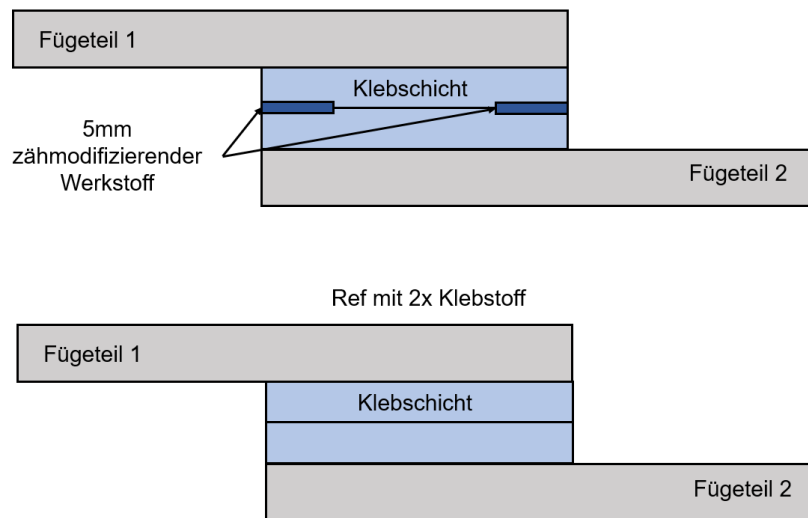


Abb. 5.15: Konzept der Patch2 Proben

Die erste untersuchte Möglichkeit wird mit zwei Klebschichten gefertigt. Das Surface Toughening wird zwischen die Klebschichten gelegt. Eine Darstellung des Probenaufbaus der Patch2 Proben ist in Abb. 5.15 visualisiert. Der ST Streifen ragt bei dieser Methode nicht über die Klebschicht hinaus und wird mit einer Breite von 5mm aufgelegt.

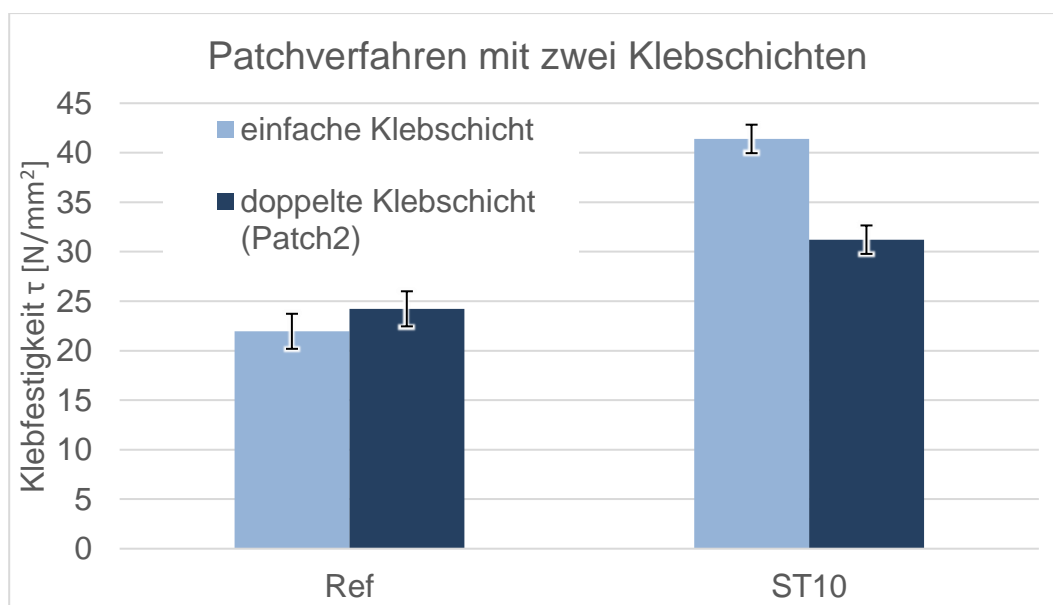


Abb. 5.16: Klebfestigkeit der Patch2 Proben im Vergleich zum Standardverfahren

Die Messergebnisse zeigen einen deutlichen Abfall in der Klebfestigkeit der ST-Proben mit dem Pacht2 Verfahren. Im Vergleich zu den Referenzproben ist die Klebfestigkeit der Patch2 Probenreihe mit Surface Toughening jedoch um knappe 10 N/mm<sup>2</sup> höher.

Auch die Dehnungsmessung zeigt den gewünschten Effekt durch das Surface Toughening (s. Abb. 5.18). Die Dehnung erstreckt sich durch die gesamte Klebschicht und fokussiert sich nicht allein auf die Randzone, wie bei der Referenz in Abb. 5.17. Das lässt auf kleinere Spannungsspitzen in der Randzone schließen, jedoch ist die Dehnung und somit auch schlussfolgernd die Spannung, in der Randzone der Überlappungsklebung am größten.

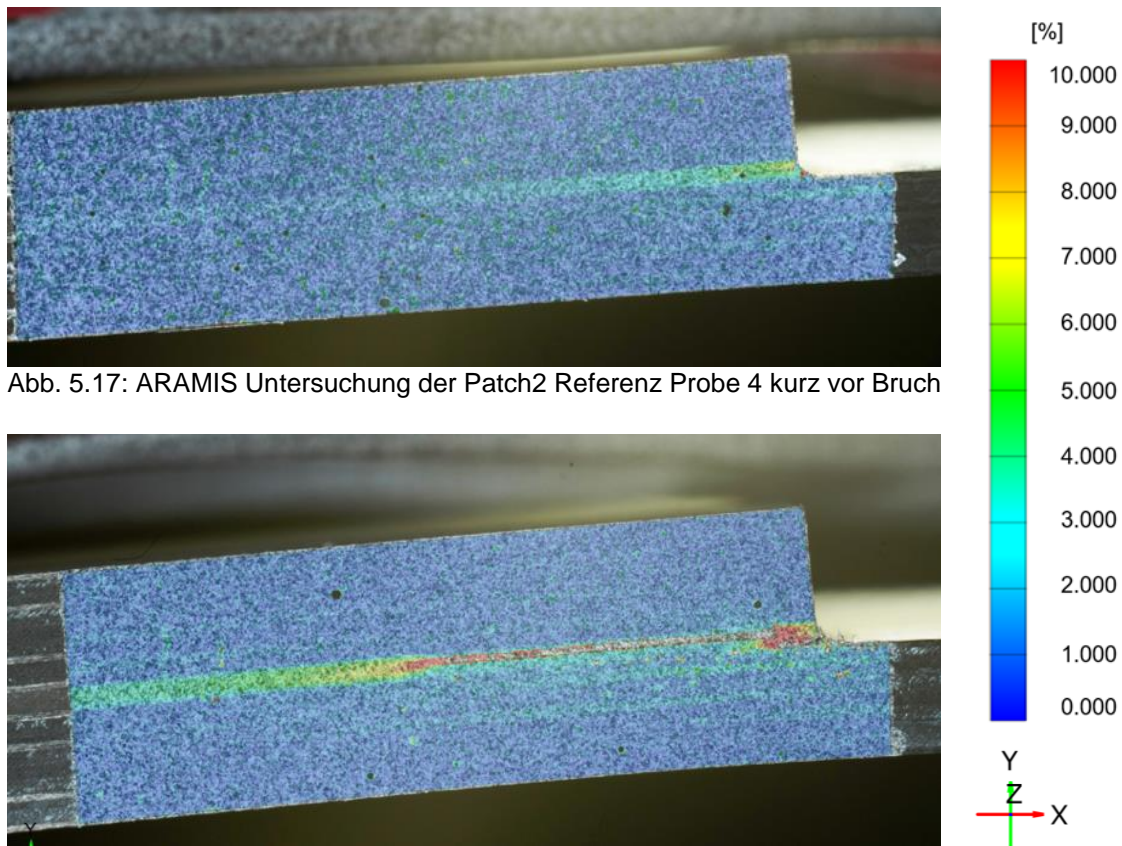


Abb. 5.17: ARAMIS Untersuchung der Patch2 Referenz Probe 4 kurz vor Bruch

Abb. 5.18: ARAMIS Untersuchung der Patch2 ST Probe 4 kurz vor Bruch

Ein weiteres mögliches Patchverfahren, Patch1, ist in Abb. 5.19 dargestellt. In diesem Verfahren soll das Surface Toughening in das Patch eingearbeitet und dann auf die auszubessernde Stelle geklebt werden.

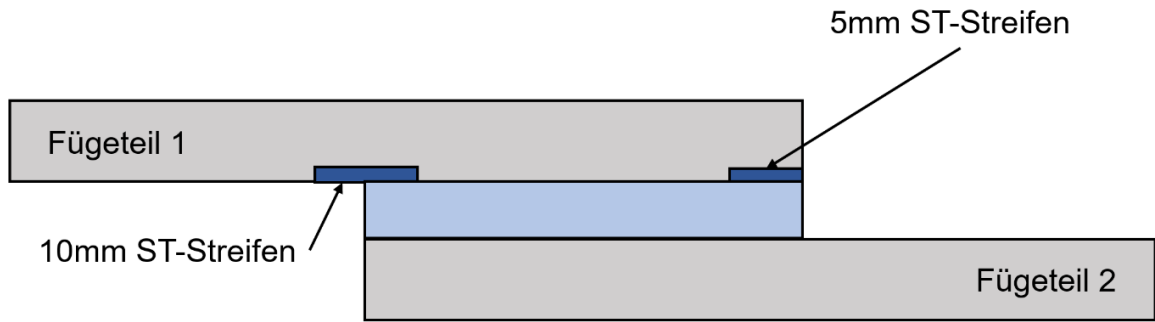


Abb. 5.19: Konzept der Patch1 Proben mit Surface Toughening

Die Messergebnisse des Patch1 Verfahrens in Abb. 5.20 zeigen eine über 50% verschlechterte Klebfestigkeit gegenüber dem bisher erforschten Surface Toughening Verfahrens.

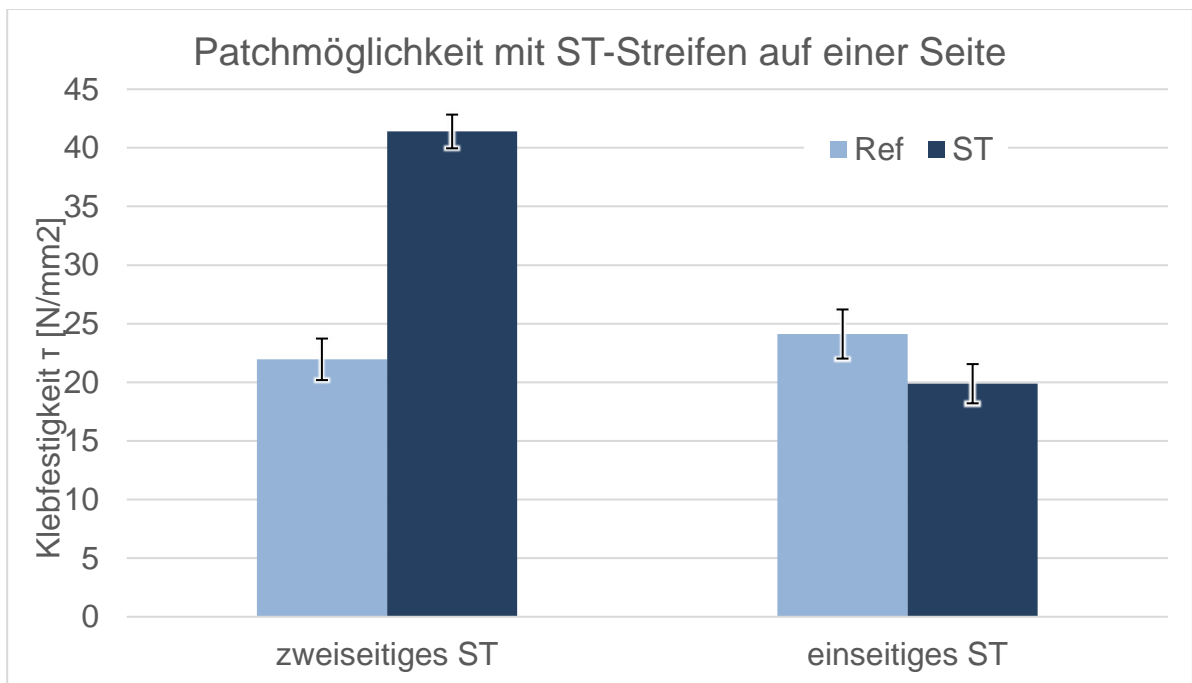


Abb. 5.20: Klebfestigkeit des Patch1 Verfahrens im Vergleich zum Standardverfahren

Ein auftretendes Problem bei dem Patch1 Verfahren scheint zu sein, dass sich die Spannung nur im Surface Toughening Streifen verteilt und sich nicht, wie angestrebt, homogen in der Klebschicht verteilt. Den schmalen gedehnten Bereich in der Randzone wird in Abb. 5.22 ersichtlich. Im Vergleich dazu zeigt die Referenz ohne ST in Abb. 5.21 eine Dehnungsverteilung in der im Verhältnis zum ST Streifen breiten Klebschicht, weshalb die Referenz hier vermutlich etwas mehr Spannung aufnimmt als die ST-Probe.



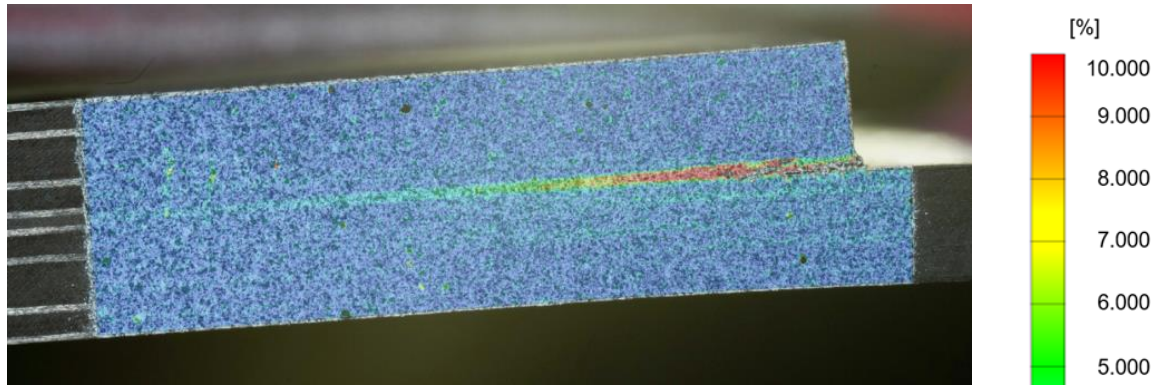


Abb. 5.21: ARAMIS Untersuchung der Patch1 Referenz Probe 4

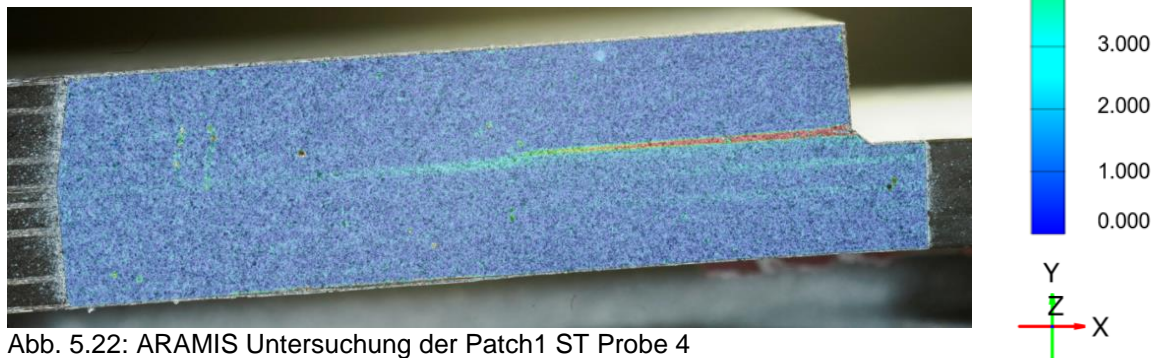


Abb. 5.22: ARAMIS Untersuchung der Patch1 ST Probe 4

Als letztes Patchverfahren wurde eine Variante ohne Klebstoff betrachtet. Das Surface Toughening wird wie bei dem Ursprungsformat auf jeweils einem Füge­teil, wie in Abb. 5.23 dargestellt, in der Randzone platziert. Im Aushärteprozess werden die Füge­teile durch die Harzmatrix verklebt.

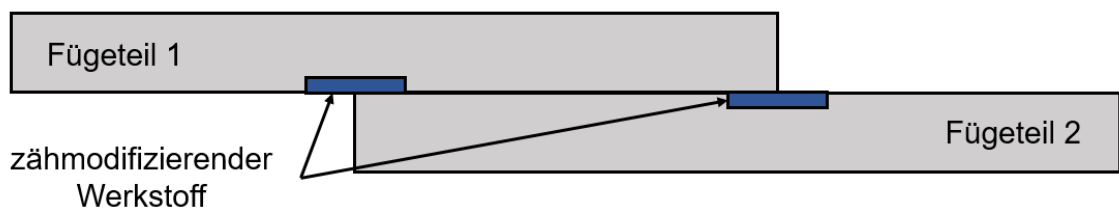


Abb. 5.23: Konzept der Cocured Proben ohne Klebstoff

Die Messergebnisse durch das Cocured Verfahren in Abb. 5.24 zeigen bei der Referenz ohne ST gegenüber der Referenz mit Klebschicht einen leichten Abfall in der Klebfestigkeit. Bei den Proben mit ST hingegen sind die Messwerte in einem ähnlichen Bereich. Dabei liegt der Mittelwert der geprüften Cocured Proben sogar leicht über dem der ST Reihe mit Klebstoff, lediglich die Standardabweichung fällt hier größer aus.

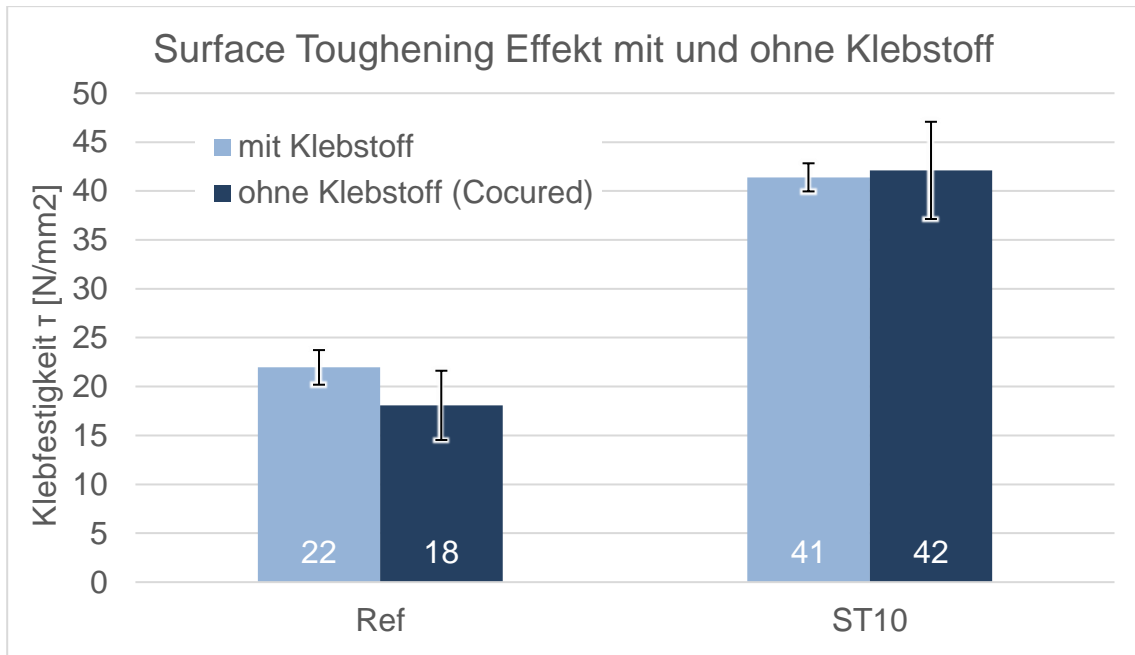


Abb. 5.24: Surface Toughening Effekt bei Faserverbundwerkstoffen mit und ohne Klebstoff

Die Dehnungsmessung per ARAMIS zeigt bei der Cocured Probe ohne ST in Abb. 5.25 eine durchweg homogene Dehnung der gesamten Probe kurz vor Bruch. Die typischerweise in der Randzone der Klebschicht auftretende Dehnung ist somit hier nicht zu erkennen. Die Cocured Probe mit ST (Abb. 5.26) zeigt bei der Dehnungsmessung per ARAMIS eine Dehnungsänderung in der Randzone und im Übergang der beiden Fügeile.

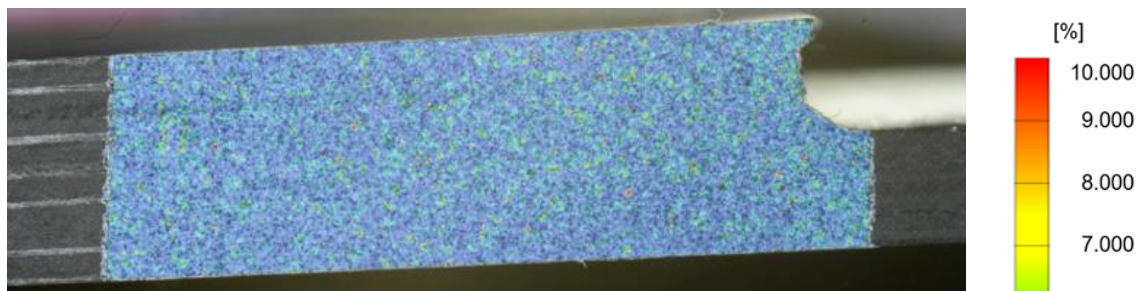


Abb. 5.25: ARAMIS Untersuchung der Cocured Referenz Probe 4 kurz vor Bruch

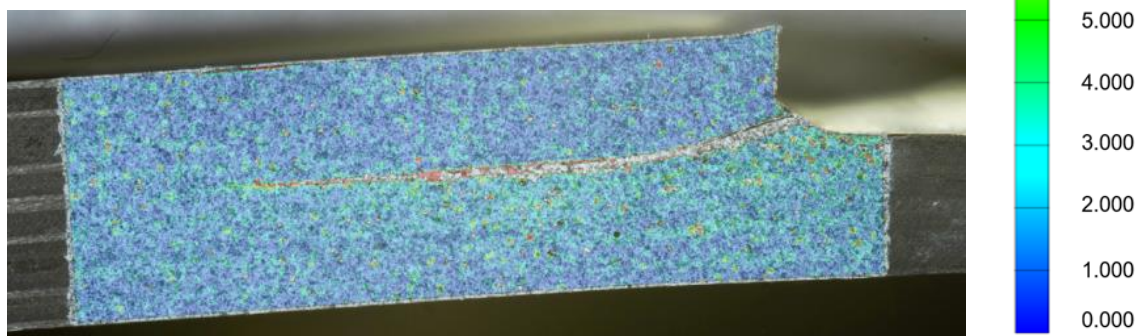
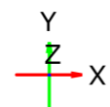


Abb. 5.26: ARAMIS Untersuchung der Cocured Surface Toughening Probe 4 kurz vor Bruch



Es scheint eine sehr große Dehnungsänderung im ST Streifen stattzufinden, da das Programm nicht mehr in der Lage ist diesen Bereich sauber auszuwerten. Vermutlich handelt es sich bei der erkennbaren Linie um den ST Streifen, allerdings scheinen sich die CFK-Lagen etwas zu verziehen, sodass zusätzlich eine größere Harztasche in der Randzone entsteht. Darüber hinaus ist die Dehnung in der Probe fast homogen. Unterhalb des ST Streifens ist die Dehnung minimal erhöht, die einzelnen Faserlagen lassen sich hier jedoch nicht erkennen.



## 6 Diskussion

Damit die zähmodifizierten Klebverbindungen in den HAPs eingesetzt werden können, wurden weitere Messwerte zu möglichen Anwendungsfällen validiert.

Vorweg wurden die Klebverbindungen, in der für die Luftfahrt typischen Temperaturzonen, zwischen  $-55^{\circ}\text{C}$  und  $80^{\circ}\text{C}$  geprüft. Die Luftfeuchtigkeit wurde bei diesem Versuch konstant gehalten. Herausgekommen ist dabei eine parabelförmige Verlaufskurve der Klebfestigkeit, welche ihre maximale Klebfestigkeit der gemessenen Temperaturen bei  $25^{\circ}\text{C}$  Raumtemperatur erreicht. Bei niedrigeren sowie höheren Temperaturen verringert sich die Klebfestigkeit. Im Vergleich dazu zeigen die Proben ohne ST einen steigenden Verlauf mit der Temperatur. Das lässt darauf schließen, dass es zwei Schnittpunkte der beiden Klebvarianten gibt. Der erste Schnittpunkt befindet sich zwischen  $-55^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$ , weil die Probe ohne ST bei  $-55^{\circ}\text{C}$  eine höhere Klebfestigkeit aufweist. Zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $80^{\circ}\text{C}$  zeigen die Proben mit ST eine deutlich höhere Klebfestigkeit, jedoch fällt auf, dass sich die Klebfestigkeitswerte der beiden Probenvarianten bei  $80^{\circ}\text{C}$  deutlich annähern. Das lässt darauf schließen, dass die Proben ohne ST ab einer bestimmten Temperatur über  $80^{\circ}\text{C}$  wiederum einen höheren Klebfestigkeitswert aufweisen werden als die ST Proben. Allgemein wird jedoch eine deutliche Festigkeitssteigerung im Anwendungsbereich zwischen  $-55^{\circ}\text{C}$  und  $80^{\circ}\text{C}$  durch die ST Proben festgestellt. Somit erfüllen die ST Proben die Anwendungskriterien in dem erprobten Anwendungsbereich.

Ein weiterer kritischer Umweltfaktor für die Surface Toughening Proben stellt der Feuchtigkeitseinfluss dar. Mithilfe einer Feuchtigkeitsauslagerung im Klimaschrank über 1000h wurden die Proben in einer nahen maximal feuchten Umgebung getestet. Die Ergebnisse weisen mit zunehmender Feuchtigkeit eine abnehmende Klebfestigkeit auf. Der Vergleich zwischen den Proben mit und ohne ST zeigen jedoch ganz klar, dass die Surface Toughening Proben auch unter diesen Umweltbedingungen hervorragend funktionieren. Der Klebfestigkeitsmittelwert der ST Proben liegt 93% höher als der Mittelwert der Klebkörper ohne ST. Das spricht sehr für die Verwendung des Surface Toughenings.

Um die optimale Klebfläche herauszufinden wurden drei verschiedene Überlappungslängen unter konstanten Umweltbedingungen geprüft. Das soll helfen eine maximale Materialeinsparung zu erzielen und somit möglichst viel Masse zu sparen. Auf der anderen Seite jedoch das höchste Maß an Sicherheit und die größtmögliche Klebfestigkeit zu erreichen. Durch den Zugscherversuch ist erkenntlich geworden, dass die Referenzproben mit zunehmender Klebfläche an Klebfestigkeit verlieren. Die ST Proben zeigen hingegen eine Zunahme der Klebfestigkeit bei größer

werdender Klebfläche. Bei  $42 \text{ N/mm}^2$  stagniert die Klebfestigkeit. Werden die Bruchbilder hinzugezogen, so wird deutlich, dass der Grund der Stagnation die Fügeiteile darstellen. Das Versagen wurde bei diesen Proben durch Faserbrüche initiiert. Da ein wichtiger Faktor der HAPs ein möglichst geringes Gewicht mit möglichst geringem Energieverbrauch ist, empfiehlt sich hier ganz klar die untersuchte mittlere Überlappungslänge von 25mm, welche mit einem mittleren Klebfestigkeitswert von  $41,4 \text{ N/mm}^2$  nah an der Grenze der  $42 \text{ N/mm}^2$  gelangt.

Die Überführung des Surface Toughening Konzepts auf Aluminium Fügeiteile soll das festigkeitssteigernde Prinzip auch bei Metallen bestätigen. Des Weiteren soll geprüft werden, ob es eine simple Methode gibt, um das ST Konzept auf Aluminiumbauteile anzuwenden. Das könnte eine gute und günstige Methode für die allgemeine Luftfahrt bieten, da der Großteil der Bauteile aus dem günstigen Aluminium hergestellt werden. Das verwendete Aluminium für diesen Versuch entspricht jedoch nicht den Vorgaben der Luftfahrt und die Ergebnisse liefern keinen relevanten Festigkeitsunterschied zwischen den Proben mit und ohne ST. Die Betrachtung der Materialkennwerte des Aluminiums ENAW 5754 H22 ergeben ein  $R_{p0,2}$  des Aluminiums bei 130MPa. Umgerechnet bedeutet das ein Start des Fließens im Aluminium bei ca. 6500N. Zusätzlich wurde das Material orthogonal zur Walzrichtung geprüft und hat wiederum eine verminderte Festigkeit. Vermutet wird, dass das Fügeiteil aus dem weichen Aluminium früher und stärker anfängt zu fließen als das Surface Toughening Material. Somit kann das Prinzip mit dem verwendeten ST Material hier nicht zum Tragen kommen.

Schließlich wurden im Umfang dieser Versuchsreihe noch mögliche Verfahren für das Reparieren von vorhandenen Strukturen mittels Patchverfahren geprüft. Dies soll einerseits helfen, bereits vorhandene Bauteile in der Luftfahrt auszubessern und verstärken zu können und in der Zukunft eine Methode für die Fügeiteile der HAPs zu bieten, welche durch den Vorteil des Startens und Landens, ausgebessert bzw. repariert werden zu können. Dabei wurden im Vorfeld drei Patchverfahren ausgewählt, bei denen das Surface Toughening integriert werden könnte.

Bei der ersten Patchvariante soll das Surface Toughening nicht in das Fügeiteil direkt integriert werden, sondern findet in der Klebschicht Anwendung. Hierfür werden, statt der sonst einfachen Klebschicht, zwei Klebschichten aufgetragen. Die 5 mm breiten Surface Toughening Streifen werden in die Randzone zwischen den Klebschichten eingeklebt. Die Messwerte zeigen eine Steigerung der Klebfestigkeit gegenüber der Proben ohne Surface Toughening mit und auch ohne doppelte Klebschicht. Eine nähere Betrachtung des Dehnungsverlaufes in der Klebschicht der Patchvariante lässt zudem auf eine Spannungsverteilung in der gesamten Klebschicht schließen, anstatt

der sonst auftretenden alleinigen Spannungsspitzen in den Randzonen der Überlappungsklebung. Werden allerdings die Festigkeitswerte dieser Patchvariante mit den Festigkeitswerten des besten ST Verfahrens verglichen, so erzielt dieses Patchverfahren eine um 25% schlechtere Festigkeitssteigerung. Als erstes Reparaturkonzept sind die Ergebnisse jedoch positiv zu bewerten und zeigen im Ansatz die erwartete Spannungsverteilung in der gesamten Klebschicht und eine 45%ige Festigkeitssteigerung gegenüber der Referenzprobe mit der einfach ausgeführten Klebschicht.

Bei der zweiten Patchvariante werden die ST Streifen lediglich auf dem Patch eingefügt, weil es schwierig ist die ST Streifen nachträglich in bereits fertige Bauteile zu integrieren. Das einseitige Auftragen der Surface Toughening Streifen führt zu keiner Festigkeitssteigerung. Im Gegenteil wird die Klebfestigkeit durch diese Methode um ca. 10% zur Probe ohne ST verschlechtert. Die Dehnungsmessung zeigt, dass die Dehnung und somit die auch die anliegende Spannung lediglich in dem ST Streifen stattfindet und gar nicht wirklich in die Klebschicht geleitet wird. Möglicherweise führt die einseitige Steigerung der Fließfähigkeit durch das ST Material zu einer einseitig vergrößerten Belastung und somit zu einem frühen Versagen.

Bei der dritten Patchvariante wird die Möglichkeit des Cocurings des Faserverbundmaterials genutzt. Das bedeutet, dass es bei dieser Variante keine zusätzliche Klebschicht eingeführt wird, sondern die Lamine im feuchten, also nicht ausgehärteten Zustand, aufgelegt werden und sich bei dem Aushärtungsprozess über die Harzmatrix miteinander verbinden. Die Messergebnisse der cocurten Prüfkörper ohne ST zeigen einen leichten Festigkeitsabfall der Klebverbindung. Die cocurten Prüfkörper mit ST liefern die größte Festigkeitssteigerung der drei getesteten Patchvarianten. Die Klebfestigkeit liegt bei diesen Proben im Mittel, wie die ST Prüfkörper mit dem bisher bestehenden Herstellungsverfahren, im Bereich der 42 N/mm<sup>2</sup>. Oberhalb der 42 N/mm<sup>2</sup> kommt es werkstoffbedingt zu Fügeiteilver sagen. Fraglich ist jedoch, wie sich dieses Verfahren in der Praxis umsetzen lässt. Zusätzlich kann diese Methode ausschließlich bei Fügeiteilen Anwendung finden, welche über Cocuring miteinander verbunden werden können. Entsprechend können keine Metallfügeteile mit dieser Patchvariante ausgebessert oder repariert werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Umfang dieser Versuchsreihe galt es die Klebverbindungen der High Altitude Plattform unter den auftretenden Umwelteinflüssen näher zu betrachten. Dazu wurden an das Einsatzgebiet angepasste Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse ausgewählt und geprüft. Damit das Gewicht und der einhergehende Energieverbrauch für einen geforderten Solarantrieb möglichst gering gehalten werden kann, wurden zusätzliche Versuche zur Überlappungslänge der Klebverbindungen getätigt und ausgewertet. Der Vorteil die HAPs nach durchgeführten Einsätzen oder in Notfällen wieder auf der Erde landen zu können, bedingt ein gutes Reparatur- und Ausbesserungsverfahren der Klebverbindungen. Dazu wurden erste mögliche Patchvarianten entwickelt und geprüft. Des Weiteren sollte eine Überführung des ST Prinzips auf Aluminium Fügeiteile zeigen, ob das Surface Toughening universell auf andere Materialien übertragbar ist und ebenfalls mit einer Klebfestigkeitssteigerung gerechnet werden kann.

Mit der Durchführung der Zugscherprüfung bei ausgewählten Temperaturen aus der Umwelttemperaturzone der HAPs, konnte eine Klebfestigkeitssteigerung durch das Surface Toughening bei den Temperaturen  $-55^{\circ}\text{C}$ ,  $-22^{\circ}\text{C}$  und  $80^{\circ}\text{C}$  generiert werden. Bei der geprüften Temperatur von  $-55^{\circ}\text{C}$  musste hingegen eine leichte Festigkeitsminderung festgestellt werden.

Die Validierung der Klebverbindungen mit ST in maximal feuchter Umgebung haben eine Reduzierung der Klebfestigkeit von ca. 16% ergeben. Die Vergleichsprobe ohne ST verfügt nach der 1000h Auslagerung sogar einen Klebfestigkeitsverlust von 18%. Die Klebfestigkeitswerte der ST Proben sind auch nach der Auslagerung den Anforderungen der HAPs entsprechend.

Eine Veränderung der Klebfläche hat ergeben, dass die Klebfestigkeit mit ST zunächst mit steigender Klebfläche zunimmt und dann bei einer Klebfestigkeit von  $42\text{N/mm}^2$  stagniert. Mit Bezug auf das steigende Gewicht mit größer werdender Klebfläche, stellt die Überlappungslänge von 25mm aktuell beste Variante für die HAPs dar.

Die Überführung des ST Prinzips auf Aluminiumfügteile hat im Umfang dieser Versuchsreihe nicht die erwarteten Ergebnisse gezeigt. Grund für die verfälschten Ergebnisse ist das Auswählen eines zu weichen Aluminiums. Dieses fängt zu früh an zu fließen, wodurch das ST gar nicht zum Tragen kommen kann.

Das Untersuchen drei verschiedene Patchvarianten hat ergeben, dass die Cocuring Verbindung in Kombination mit der aktuell verwendeten ST Streifen Platzierung im maximalen Festigkeitsbereich der ST Proben liegt. Die Patchvariante mit den ST

Streifen in der doppelten Klebschicht konnte eine leichte Klebfestigkeitssteigerung generieren. Die Variante der einseitigen ST Streifen Bestückung zeigt eine Festigkeitsminderung.

Mit Betracht auf die Ergebnisse der Temperaturuntersuchungen, empfiehlt sich hier nach einer Methode zu forschen, welche es ermöglicht, bei sehr kleinen, als auch sehr hohen Temperaturen standzuhalten. Denkbar wäre ein ST Prinzip mit mehr als nur einem ST Material.

Eine Überführung auf Aluminium Bauteile sollte bei weiteren Untersuchungen an einem für die Luftfahrt geeignetem Aluminium mit hoher Zugfestigkeit geprüft werden.

Die festigkeitssteigernden Patchvarianten sollten im nächsten Schritt in der Ausführung validiert werden. So kann herausgefunden werden, ob diese Verfahren umsetzbar sind und ob sich weitere Komplikationen eröffnen.

## 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.; Kligen, 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 Control (HLFC) in aircraft design and 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 Überlappungsklebung mit Filmklebstoffen. Bachelorarbeit Jade Hochschule Wilhelmshaven Oldenburg Eilsfelth. (Hrsg.): Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2018
- [Leu21] Leuthäuser, 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-Klebung. Dissertation Ruhr-Universität Bochum. (Hrsg.): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Köln, Institut für Werkstoff-Forschung, Abteilung für Experimentelle und Numerische Methoden, Bochum 2019
- [Lö16] 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-Kleberverbindungen und deren Auswirkung auf mechanische Eigenschaften. Dissertation Universität Augsburg. Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Augsburg 2017

- [Moh11] Mohammed, A.; Mehmood, A.; Pavlidou, F.-N.; 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 29.04.2021), 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](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 Überlappungsklebung 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. Mat.-wiss 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., Springer-Verlag, 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