EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VON RISS-STOPPERN IN CFK-KLEBEVERBINDUNGEN UNTER FATIGUE-BELASTUNG

M. GNÄDINGER, R. SACHSE, P. MIDDENDORF
Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau, 70569 Stuttgart, Deutschland

Zusammenfassung

Diese Publikation beschäftigt sich mit dem Wirkverhalten eines potentiellen Riss-Stoppers. Gegenstand der Untersuchung ist eine Rivetless Nutplate, welche zur experimentellen Bestimmung ihrer Leistungsfähigkeit in Cracked Lap Shear Probekörper integriert wird. Aufgrund des realitätsnahen Belastungszustandes der Probe sowie der unterschiedlich hoch angesetzten Ermüdungslasten wird bei konstant gehaltenem R-Verhältnis ein repräsentativer Belastungsbereich im Versuch abgedeckt. Die Auswertung des Risswachstums mittels Mikroskopkameras und luftgekoppeltem Ultraschall zeigt, dass bei Erreichen der Rivetless Nutplate die weitere Ausbreitung effektiv unterbunden wird. Für eine weiterführende Betrachtung werden der Herstellungsprozess und das eingebrachte Element derart verändert, dass die Riss-Stopper Effekte systematisch getrennt untersuchbar sind. Dabei zeigt sich insbesondere die Reduktion der Schälspannung als dominierender Mechanismus, wohingegen für die hohe Effektivität einer Rivetless Nutplate auch deren lokale Versteifung und somit die Kombination beider Effekte benötigt wird.

Schlüsselwörter: Klebeverbindung, Riss-Stopper Wirkmechanismen, CLS-Probe, Fatigue-Belastung

1. EINLEITUNG

Bei der Entwicklung moderner Passagierflugzeuge spielt Leichtbau eine entscheidende Rolle. Mit steigender Tendenz werden daher Strukturteile aus faserverstärkten Kunststoffen in die Flugzeugzellen integriert. Klebeverbindungen gelten dabei als materialgerechte Fügetechnik, dürfen aber unter anderem aufgrund ihrer Sensitivität bezüglich schlechter Adhäsion (weak bonds) nicht als eigenständige Verbindungstechnik bei Primärstrukturen zum Einsatz kommen. Bis dato wird diesem Nachteil mit einem „fail-safe" Ansatz in Übereinstimmung mit der Advisory Circular AC 20-107B Rechnung getragen [1]. Sogenannte "Angstniete" dienen als zweiter Lastpfad und müssen bei einem Versagen der Klebeschicht weiterhin eine ausreichende Belastungsfähigkeit der Verbindung gewährleisten. Obwohl praktikable Möglichkeit und heutiger "Stand der Technik" bei der Zertifizierung, muss die beschriebene Herangehensweise für zukünftige Zulassungsverfahren kritisch hinterfragt werden: So unterbrechen die dafür benötigten Bohrungen lokal die Endlosfasern und induzieren infolgedessen schädliche Spannungskonzentrationen in den Strukturteilen. Die ursprünglichen Vorteile der Klebeverbindung (geringes Gewicht, gleichmäßigere Spannungsverteilung, beschädigungsfreies Fügen etc.) gehen teilweise oder sogar vollständig verloren.

Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes BOPACS [2] wurden deshalb Lösungsansätze erarbeitet, die den Status quo hinsichtlich der Zertifizierung von Klebeverbindungen verbessern. Der Fokus lag dabei auf Riss-Stoppern und deren Möglichkeit einer „damage-toleranten" Umsetzung der Zulassung. So werden Risse in einer Klebeschicht bewusst erlaubt, müssen jedoch gestoppt werden, bevor sie ein sicherheitskritisches Ausmaß annehmen. Dies verspricht in Zukunft eine gesteigerte Akzeptanz von geklebten Primärverbindungen durch Reduktion der benötigten Nietanzahl bzw. deren vollständigen Ersatz durch Verwendung einiger weniger Riss-Stopper.

2. PROBEKÖRPER

Für die experimentellen Versuche kommt eine Cracked Lap Shear (CLS-) Probe zum Einsatz. Zwei wesentliche Vorteile geben ihr den Vorzug gegenüber anderen Probekörpern. Zum einen ist der geometrische Aufbau der Probe stark asymmetrisch. Dadurch werden bei einer axialen Zugkraft außer Mode II & III auch Mode I - Belastungen in der Klebeschicht induziert (respektive Scher- & Schälspannungen). Das beschriebene Belastungsszenario eignet sich somit, um in realen Strukturen vorkommende Spannungszustände abzubilden, wie sie dort z.B. auch durch mehrachsige Belastungsfälle auftreten können. Das Verhältnis der Energiefreisetzungsraten (Mixed Mode Ratio, MMR) aufgrund der unterschiedlichen Modi ist dabei wie folgt definiert:

$$\text{(1)} \quad MMR = \frac{G_{II}+G_{III}}{G_{I}+G_{II}+G_{III}}$$

Wie sich durch Simulationen [3] zeigen lässt, kann für den in der Untersuchung interessanten Überlappungsbereich der Probe ein annähernd konstanter Wert angenommen werden ($MMR \approx 0{,}69$).

Ein zweiter wesentlicher Vorteil ist, dass die Nachgiebigkeitsänderung der Probe bei zunehmender Risslänge unverändert bleibt, was sich in Verbindung mit dem konstanten MMR an einer gleichbleibenden Energiefreisetzungsrate ($\Delta G = G_{max} - G_{min}$) und damit Rissgeschwindigkeit im Versuch manifestiert. Eine Abweichung von der anfänglichen Ausbreitungsrate kann dadurch direkt mit der Leistungsfähigkeit des eingesetzten Riss-Stoppers korreliert werden, was den Vergleich wesentlich vereinfacht.

2.1. Probenaufbau

Das aus CFK gefertigte Laminat der Proben besteht aus Hexply 8552/IM7 UD-Prepreg mit einem quasi-isotropen

©2017

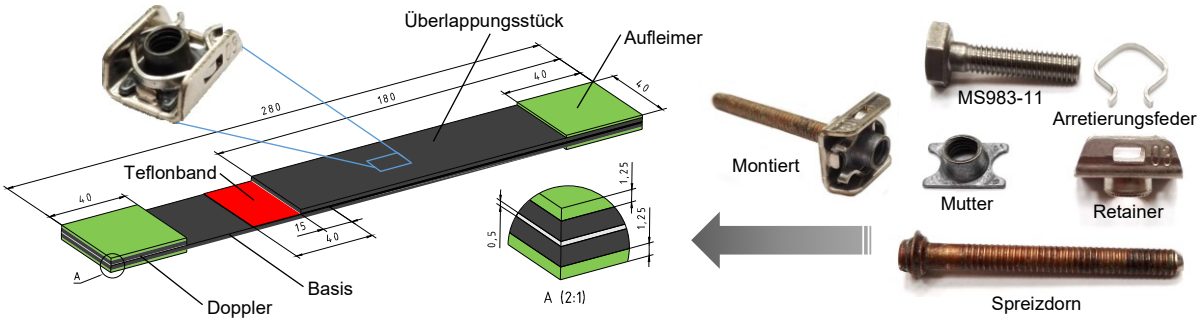

BILD 1. Darstellung der verwendeten CLS-Probengeometrie sowie der Komponenten einer Rivetless Nutplate

Lagenaufbau von [0°, 45°, 90°, -45°, -45°, 90°, 45°, 0°]$_s$. Es ergibt sich damit eine nominelle Dicke der Fügepartner von 2 mm. Aus einer Grundplatte wird die Basis, das Überlappungsstück sowie der Doppler als wesentliche Elemente des Probekörpers gefertigt (Länge: 280 mm / 180 mm / 40 mm, respektive). Die Breite aller Stücke ist mit 40 mm an die maximale Dimension der vorhandenen Prüfmaschineneinspannung angepasst. Zum Erhalt eines definierten Startpunktes für das Risswachstum wird vor dem Kleben ein 15 mm langer künstlicher Anriss in Form eines selbstklebenden Teflonbandes über die volle Breite der Basis aufgebracht. Dadurch verkürzt sich die zu klebende Fläche von der Überlappungslänge auf nunmehr lediglich 165 mm. Als Klebstoff wird der Zweikomponenten-Strukturklebstoff Scotch-Weld™ EC-9323 B/A (Epoxidsystem) von 3M™ verwendet. Die nominelle Fugenhöhe der Klebeschicht beträgt 0,5 mm. Die Position der zu untersuchenden Riss-Stopper liegt mittig in der Probe bzw. hat einen Abstand von 45 mm zum anfänglichen Anriss. Somit wird erreicht, dass sich über einen hinreichend langen Bereich eine gleichmäßige, unbehinderte Rissgeschwindigkeit einstellen kann, bevor die Wirkung der Riss-Stopper einsetzt. Um beim Testen eine axiale Lasteinleitung durch die Spannbacken zu ermöglichen, wird zusätzlich zu dem Überlappungsstück am noch freien Ende der Doppler auf die Basis aufgeklebt. Die in BILD 1 links dargestellte Skizze veranschaulicht die entsprechende Geometrie.

2.2. Probenherstellung

Aus dem von der Forschungseinrichtung FIDAMC[1] zur Verfügung gestellten CFK-Basislaminat werden drei Plattenstücke ausgesägt. Diese entsprechen den oben benannten Bestandteilen der Probe (Basis / Überlappungsstück / Doppler). Zum Entfernen eines potentiellen Feuchteeinflusses und den möglicherweise resultierenden Schwankungen in der Güte der Verklebung (Ausdampfen beim Abbindeprozess), werden die CFK-Platten vor dem Kleben bei +70°C für zwei Tage trocken ausgelagert. Unmittelbar vor dem Kleben schließt sich eine Reinigung mit Isopropanol an, um grobe Verunreinigungen wie Fette oder andere Fremdkörper zu beseitigen. Die eigentliche Oberflächenbehandlung der zu klebenden Flächen erfolgt durch ein Niederdruckplasma. Eine dazu separat durchgeführte Arbeit [4] bestätigt die wirkungsvolle Oberflächenaktivierung und liefert die für den Prozess notwendigen Parameter, siehe dazu auch TAB 1. Die Wirkung der physikalischen Aktivierung durch das Plasma und die somit gesteigerte Bindungsfähigkeit der CFK-Oberflächen unterliegt einer zeitlichen Abhängigkeit. Im Sinne der Reproduzierbarkeit werden daher die Platten direkt im Anschluss geklebt. Dazu wird das Teflonband an der dafür vorgesehenen Stelle auf der Basis platziert und an den Rändern Abstandshalter in Form von Federstahlbändern eingelegt. Deren Dicke von 0,5 mm entspricht der gewünschten Klebeschichtstärke und garantiert diese über den kompletten Klebeprozess. Die zwei Komponenten des Scotch-Weld™ werden durch eine Sulzer Mixpac DM 200-01 Klebepistole mit einem statischen Mischeraufsatz EPX-Mixing-Nozzle-200 ml vermengt und manuell auf die Basis aufgetragen. Eine Vorrichtung fixiert die Fügepartner und ermöglicht das Aufbringen eines definierten Anpressdruckes durch ein System aus Anpressstempel & Druckplatten zwischen Basis / Überlappungsstück bzw. Basis / Doppler. Der Aushärtezyklus in einem unbedruckten Ofen besteht aus einem zweistündigen Abbinden bei +65°C. Um beim späteren Testen ein Herausgleiten der Probe aus der Spannvorrichtung zu verhindern, werden nach dem Aushärten Aufleimer aus Glasfaser auf alle Enden aufgeklebt (Klebstoff: Hexion Epikote™ A10/B10). Ein Zusägen auf die finalen Maße entsprechend 2.1 entfernt die noch an den Rändern vorhanden Federstahlbänder.

Parameter		Wert
Prozessgas	[-]	N_2
Behandlungsdauer	[s]	10
Behandlungsdruck	[mbar]	0,1
Gasfluss	[sccm/min]	50
Leistung	[kW]	2x 1,2 @ 50%

TAB 1. Parameter bei der Niederdruckplasmabehandlung

3. RISS-STOPPER & RISS-STOPPER EFFEKTE

Die experimentelle Arbeit widmet sich einer Rivetless Nutplate Verbindung und deren Einfluss hinsichtlich einer Rissausbreitung in einer CLS-Probe. Um die zugrundeliegende Wirkweise des Elementes herauszuarbeiten, werden im Folgenden zunächst die einzelnen Riss-Stopper-Mechanismen identifiziert. Auf Basis dieser werden 2 Varianten entwickelt, um die beschriebenen Effekte der Nutplate voneinander getrennt zu untersuchen.

[1] The Composites Research, Development and Application Centre; Avda Rita Levi Montalcini, 29, 28906 Getafe, Madrid, Spanien

3.1. Rivetless Nutplate-Verbindung

Nutplates als Verbindungselemente finden hauptsächlich in der Luftfahrt Anwendung. Der generelle Aufbau variiert dabei nur im Detail: Eine Schraube (hier: Military Standard MS983-11) wird durch die dafür vorgesehenen Bohrungen in den Fügepartnern geführt und in eine Mutter eingedreht. Diese ist ihrerseits auf dem der Schraube gegenüberliegenden Fügepartner fixiert. Im Falle der verwendeten Rivetless Nutplate (Cherry® Aerospace CNP53C3-1-03) findet die Arretierung durch einen Retainer statt. In diesem kann sich die Mutter zu einem gewissen Grad frei bewegen, ein Mitdrehen beim Einschrauben wird jedoch durch den dabei entstehenden Kontakt zum Retainer verhindert (siehe auch BILD 1 mittig und rechts). Das infolgedessen auftretende Drehmoment wird vom Retainer über einen Presssitz in der Bohrung abgeführt. Der Montageprozess einer Rivetless Nutplate in Kombination mit einer Klebeverbindung ist noch kein industrieller Standard und wird für die Versuche daher wie nachfolgend definiert:

1) Herstellen konzentrischer Bohrungen in der Basis (∅ 4,81 mm) sowie dem Überlappungsstück (∅ 7,1 mm) an der späteren Riss-Stopper Position.
2) Vor- & Oberflächenbehandlung der Probe gemäß Abschnitt 2.2.
3) Aufsetzen des Retainers auf ∅ 7,1 mm-Bohrung, Aufweiten seiner Hülse in der Bohrung durch Ausziehen des Spreizdornes (Erzielen des Presssitzes).
4) Einsetzen der Mutter in den Retainer, lose Fixierung / Herausfallschutz der Mutter durch Einspannen der Arretierungsfeder in den Retainer.
5) Abdichten der Bohrungen, um herausquellenden Klebstoff zu verhindern (Perforation erlaubt verdrängter Luft aus den Bohrungen zu entweichen).
6) Applikation des Klebstoffes & Vorkompaktierung der beiden Fügepartner bis Bohrungen vollständig mit Klebstoff gefüllt sind.
7) Entfernen der Abdichtungen, handwarmes Eindrehen der Schraube im noch unausgehärteten Zustand.
8) Weiteres Fortfahren entsprechend Abschnitt 2.2.

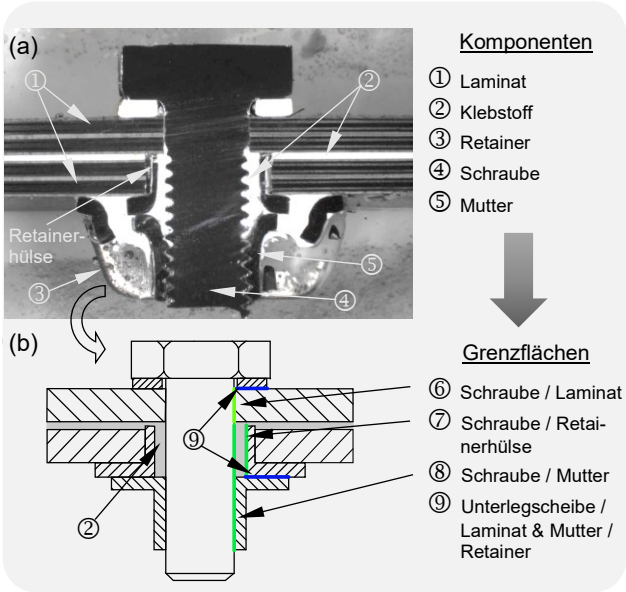

BILD 2. Schliffbild (a) und schematische Skizze (b) eines Rivetless Nutplate - Querschnittes

Das Schliffbild in BILD 2 (a) [5] zeigt den Querschnitt einer Rivetless Nutplate-Verbindung nach vollständigem Abbinden des Klebstoffes. Gut zu erkennen ist die finale Länge der Retainerhülse nach Ziehen des Spreizdornes: Diese ragt bis in die eigentliche Klebeschicht hinein bzw. stößt auf den gegenüberliegenden Fügepartner. Als positiver Nebeneffekt kann die Fugenhöhe um die Nutplate herum somit auf die gewünschten 0,5 mm eingestellt werden. Die Gefahr des Verdrängens von Klebstoff durch zu starkes Anziehen der Schraube besteht dadurch nicht mehr. Dieser Vorteil wird durch Kürzen der ursprünglichen, unverformten Hülsenlänge um ebenfalls 0,5 mm erreicht. Weiterhin sichtbar ist, dass die Schraube vollkommen von Klebstoff umgeben ist und somit ein Formschluss in der Bohrung existiert. Abstrahiert man den Aufbau wie in BILD 2 (b) gezeigt, ergeben sich für die Untersuchung 4 interessante Grenzflächen, die eine potentielle Lastübertragung und damit Reduzierung von ΔG ermöglichen:

Schraube-Laminat:

Der Schaft der Schraube besitzt einen Durchmesser von ∅ 4,801 mm, wohingegen die kleinere Bohrung im Laminat einen Durchmesser von ∅ 4,81 mm aufweist. Es handelt sich demnach um eine Spielpassung, die nur dann eine nennenswerte Lastübertragung ermöglicht, wenn eine relative Verschiebung von Laminat zu Schraube stattfinden kann. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Klebstoffes wird dies erst ermöglicht, wenn der Riss die Rivetless Nutplate erreicht bzw. passiert hat.

Schraube-Retainerhülse

Der Abstand zwischen dem Außendurchmesser der Schraube und dem Innendurchmesser der Retainerhülse beträgt im gesetzten Zustand 0,36 mm. Der den Zwischenraum vollständig ausfüllende Klebstoff kann jedoch einen großflächigen Formschluss in der Bohrung realisieren. Somit können - eine relative Verschiebung vorausgesetzt - Scherkräfte durch Lochleibung von einem Fügepartner auf den anderen übertragen werden.

Schraube-Mutter

Aufgrund des asymmetrischen Aufbaus der Probe wird ein Moment induziert, welches das Überlappungsstück in einer Schälbewegung aufzubiegen trachtet. Durch die Verbindung Schraube - Mutter und den dabei entstehenden Kontakt im Gewinde wird der Biegebelastung auf die Schraube entgegengewirkt. Die gerade bleibende Ausrichtung in der Bohrung begünstigt somit den gerade genannten Lochleibungs-Effekt.

Unterlegscheibe-Laminat & Mutter-Retainer

Zusätzlich ermöglicht die Schraubverbindung eine Reduktion der Mode I - Belastung, da bei der Öffnungsbewegung ein Normaldruck von Unterlegscheibe und Mutter auf die Fügepartner ausgeübt wird. Eine Vorspannung der Verbindung findet jedoch nicht statt, wird die Schraube doch im noch niedrigviskosen Zustand des Klebstoffes angezogen. Im Zuge des Verfestigens kann sich daher ein spannungsfreier Zustand einstellen.

Durch die genauere Betrachtung lassen sich demnach zwei prinzipielle Wirkmechanismen erkennen: Dies ist zum einen die Reduktion der Mode I – Belastung, die der Klebstoff zu ertragen hat und zum anderen eine lokale Versteifung und damit Verminderung der Mode II & III Anteile.

3.2. Varianten zur getrennten Untersuchung der Riss-Stopper Effekte

Um quantifizierbare Aussagen über die Wichtigkeit der jeweiligen Wirkmechanismen zu erhalten, müssen deren Hauptmerkmale in einer Probe getrennt untersucht werden. Es werden daher sowohl Design wie Montageprozess des Riss-Stopper Elementes wie nachfolgend dargestellt modifiziert.

3.2.1. Pin-Konfiguration

Die Variante untersucht die lokale Versteifung der Rivetless Nutplate. Ziel ist daher die Vermeidung aller Mode I reduzierender Effekte, wie sie in der Rivetless Nutplate auftreten. Die Einspannung durch Schraube & Mutter wird daher entfernt. Ein stattdessen frei eingeklebter Pin mit dem (angenäherten) Schaftduchmesser der Schraube (∅ 4,81 mm) wird als Ersatzelement verwendet. Um beim Aushärten einen geraden Sitz in der Bohrung zu erzielen sowie ein Herausfallen zu verhindern, schließen sich an beiden Seiten Gewindezapfen (M4) an. Darauf aufgeschraubte Muttern fixieren den Pin vertikal und eine zusätzlich eingelegte Gummidichtung zwischen Mutter und Fügeteiloberfläche verhindert ein Festkleben. Das Herunterdrehen nach dem Aushärten bleibt dadurch möglich. Ein zentrierter Sitz stellt sich alleine durch die Bohrung gleicher Größe ein. Der Montageprozess des Elementes weicht von dem der Rivetless Nutplate von Punkt 3) an ab (siehe dazu auch 3.1):

4) Applikation des Klebstoffes & Vorkompaktierung der beiden Fügepartner, bis Bohrungen vollständig mit Klebstoff gefüllt sind.
5) Einsetzen des Pins in die Bohrung, Aufsetzen der Gummidichtungen, Aufschrauben der Muttern auf beide Gewindezapfen.
6) Aushärten des Klebstoffes & anschließendes Entfernen der Muttern.
7) (optional) Versteifung des Pins durch einseitigen Auftrag von Klebstoff auf Retainerseite.

Punkt 7) stellt eine notwendige Optimierung dar, die im Laufe der Versuche eingeführt wurde. Mit dieser wird das frühzeitig festgestellte Ausbrechen des Pins aus der Bohrung verhindert. Die entsprechenden Geometrien und Grenzflächen sind in BILD 3 (a) verdeutlicht.

3.2.2. Bolt-Konfiguration

Das Riss-Stopper Element dient dazu, die Auswirkung einer Mode I – Reduktion durch die Rivetless Nutplate eingehender zu studieren. Deren lokale Versteifungseffekte (Übertragung von Scherlasten) werden durch Entfernen des Formschlusses (respektive des Klebstoffes) im Bohrungsbereich aufgehoben. Die Schraubverbindung bleibt weiter bestehen. Relativbewegungen der Fügepartner resultieren fortan in keiner Lastübertragung durch Lochleibung mehr (der entstehende Freiraum von ca. 0,36 mm zwischen Schraube und Retainerhülse wird im untersuchten Lastbereich nicht überwunden). Elementar für den Montageprozess bleibt, dass die Fließfront des Klebstoffes im Bereich der Bohrung nicht durch ein Element behindert werden darf, da ansonsten die Gefahr von Lufteinschlüssen in dessen Nachlauf besteht. Der diesen Umstand berücksichtigende Montageprozess variiert im direkten Vergleich zur Rivetless Nutplate ebenfalls ab Punkt 3):

4) Abdichten der Bohrungen um herausquellenden Klebstoff zu verhindern (Perforation erlaubt der Luft zu entweichen).
5) Applikation des Klebstoffes & vollständige Kompaktierung.
6) Entfernen der Abdichtungen & des Klebstoffes im Bereich der Bohrung.
7) Einlegen eines Dichtrings (∅ 4,5 mm, Schnurstärke 1 mm) in die Bohrung von der Seite des Retainers aus.
8) Einführen einer Distanzhülse (Außendurchmesser ∅ 5,5 mm, Innendurchmesser ∅ 3,5 mm) von der Seite des Retainers aus.
9) Verspannen der Hülse auf dem Dichtring mittels M3 Schrauben.
10) Aushärten des Klebstoffes & anschließendes Entfernen der Hülse sowie des Dichtringes.
11) Anbringen der Mutter am Retainer & Anziehen der MS983-11 Schraube.

Der Dichtring zusammen mit der Distanzhülse garantiert, dass kein Klebstoff im Verlauf des Aushärtens (niedrigere Viskosität) zurück in die Bohrung fließt. Da die Schraube bei dieser Konfiguration erst nach dem Aushärten eingeschraubt wird, wird als Maß an Vorspannung 1,3 Nm festgelegt. Eine entsprechende Darstellung der Konfiguration ist in BILD 3 (b) gezeigt.

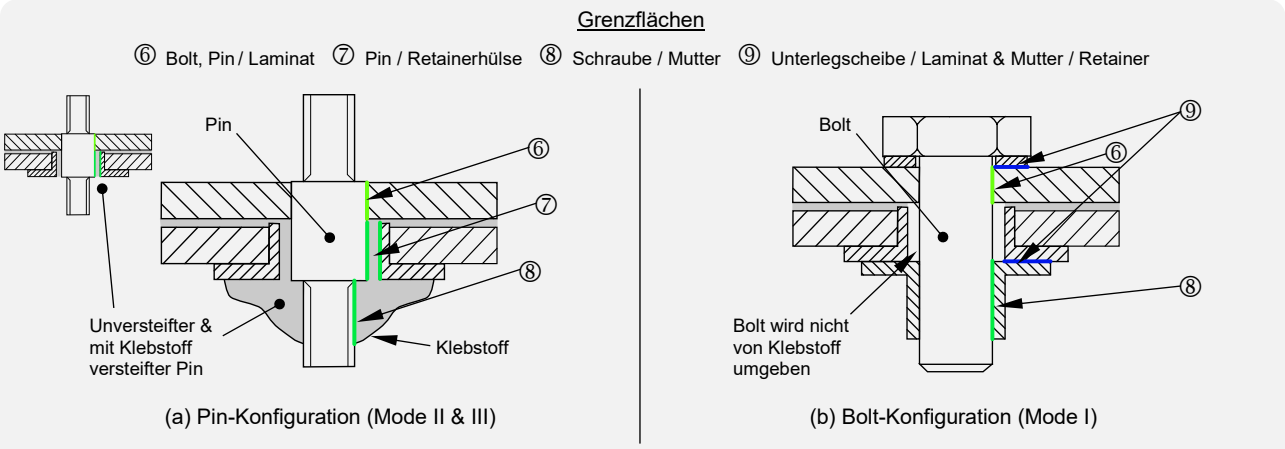

BILD 3. Schematische Querschnitte der zusätzlich untersuchten Riss-Stopper Elemente zur differenzierten Betrachtung der Wirkweise einer Rivetless Nutplate hinsichtlich deren Rissverlangsamungsmöglichkeit

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1. Versuchsprogramm

Für die dynamischen Versuche werden servo-hydraulische Prüfmaschinen (25 kN & 250 kN, Instron GmbH) eingesetzt. Das Prüfsignal besteht dabei aus einem kraftgeregelten Sinus mit konstant gehaltener Amplitude. Um die Leistungsfähigkeit der Rivetless Nutplate in einem Belastungsbereich zu testen werden 3 Maximallasten angesetzt. Die zum besseren Verständnis dienenden Konfigurationen Pin & Bolt werden hingegen nur in einer Belastungsregion untersucht (siehe TAB 2). Eine Anzahl von jeweils 4 Proben wird für den Versuch hergestellt und getestet.

Probe mit	F_{max} [kN]		
	14	20	30
Rivetless Nutplate	✓	✓	✓
Pin		✓	
Bolt		✓	

R = 0,1 | f = 5 Hz

TAB 2. Übersicht über die durchgeführten Versuche

Der Hauptuntersuchungsbereich mit F_{max} = 20 kN korrespondiert mit einer Dehnung des unverklebten Laminates von ca. 4000 µstrain. Die Wahl des R – Verhältnisses schließt Druckbelastungen und damit eventuelles Beulen während des Versuches aus. Die gewählte Frequenz wird als Kompromiss zwischen Versuchsdauer und möglicher Beeinflussung der Ergebnisse aufgrund einer Erwärmung des Klebstoffes (Reibungseffekte) angesehen.

4.2. Messmethoden

Zur Dokumentation von Rissfortschritt & Geschwindigkeit kommen zwei Messverfahren zum Einsatz:

Mikroskopkameras

Um das eindimensionale Risswachstum am Probenrand zu erfassen, werden zwei handelsübliche USB-Kameras (bis 200-fache Vergrößerung) an die Probe herangeführt. Eine zuvor dünn aufgetragene, weiße Lackschicht bietet einen ausreichenden Kontrast zur Detektion der Rissspitze. In jeweils 5 mm Abständen wird zusätzlich ein Maßstab mittels eines Cutter-Messers in die obere Lackschicht eingeritzt. Die den Kameras beiliegende Software erlaubt die Aufnahme von Bildern und damit, zusammen mit dem Maßstab, das rückwirkende Ausmessen der Risslängen. Der Versuch muss dabei aufgrund des limitierenden Faktors Kamera (Verzögerung bei der Aufnahme) angehalten werden. Um einen gegebenenfalls kriechenden Rissfortschritt während der Messung zu vermindern, wird von der angelegten Mittelkraft auf lediglich 5 kN statische Last reduziert. Die verminderte aber noch endliche Kraft erweist sich in der praktischen Ausführung als günstig, da der maximale Rissfortschritt durch die Mode I – Öffnung optisch präziser bestimmbar ist.

Luftgekoppelter Ultraschall

Das Messsystem macht sich die Eigenschaft zunutze, dass durch einen auftreffenden Schalldruck in der Probe Lamb-Wellen angeregt werden. Diese senden ihrerseits Ultraschallwellen aus, die von einem Empfänger auf der Gegenseite erfasst werden können. Ein Defekt im Laminat äußert sich durch einen Abfall der dort gemessenen Amplitude. Bei Lufteinschlüssen (z.B. durch einen Riss) führt dies aufgrund der erhöhten Impedanz dazu, dass jeglicher Signalempfang unterbunden bleibt. Kodiert man die Amplituden farblich (hier blau=beschädigter / gelb=intakter Bereich), ergibt sich so in einem C-Scan ein differenziertes Bild der noch verklebten oder bereits vom Riss geschädigten Bereiche. Eine gesonderte Arbeit [6] [7] beschäftigt sich mit Entwicklung und Aufbau des für diese Untersuchung verwendeten Messsystems. Die gefundene Lösung erlaubt ein autonomes, schrittweises Verfahren der Ultraschallköpfe (207 kHz airstar®) entlang der Breite & Höhe der Probe sowie die Erfassung der Amplitude an jedem Messpunkt. Zur Minimierung der Reflexion wird unter einem Winkel eingeschallt. An den Probenseiten wird ein Durchschallschutz angeklebt, um ein Übersteuern des Signals beim Verfahren dicht an den Rändern (direkter Sichtkontakt zwischen Emitter und Empfänger) zu verhindern. Aufgrund dessen und der Eigenschaft, dass es an den Rändern zu einer Überlagerung von eingestrahlter zu reflektierter Welle kommt, gehen an den Rändern ca. 5 mm Messbereich verloren. Die Probe wird während des Scanvorganges lediglich mit ca. 0,1 kN statischer Last belastet.

Durch die Kombination beider Methoden kann der Rissverlauf zweidimensional aufgelöst werden (siehe BILD 4). Aufgrund der deutlich längeren Messdauer des Ultraschallsystems (1 Messung ca. 10 min) wird jedoch nur jeweils eine Probe pro Konfiguration / Belastungsregion abgescannt.

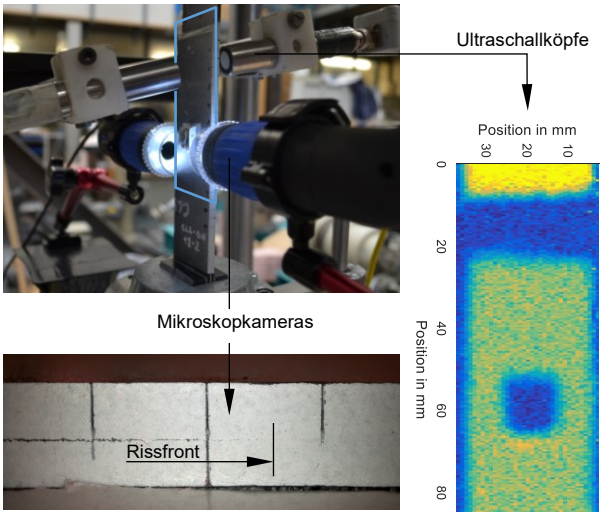

BILD 4. Hilfsmittel zur zweidimensionalen Erfassung des Rissfortschrittes in der Klebeverbindung

Die Messzeitpunkte werden individuell an das Risswachstum angepasst. Zu Beginn bieten sich vermehrte Messungen an, um die noch unbeeinträchtigte Rissgeschwindigkeit jeder Probe zu ermitteln. Eine erneut gesteigerte Messanzahl ist im Bereich der Riss-Stopper Elemente notwendig, da nur so die Verzögerungswirkung mit gewünschter Genauigkeit erfasst werden kann. Bei erfolgreichem Verlangsamen des Risses werden die Intervalle zwischen den Messungen wiederum sukzessive erhöht.

5. VERSUCHSAUSWERTUNG & ERKENTNISSE

5.1. Auswertemethodik

Mit den in Abschnitt 4.2 behandelten Messmethoden lässt sich im Versuch direkt auf die Risslänge schließen. Wichtigste Referenz ist die Messung mit Hilfe der Mikroskopkameras. Vergleiche mit der zuletzt gemessenen Risslänge ergeben bei gewaltsam aufgebrochenen Proben eine gute Übereinstimmung zur tatsächlichen Lage ($\Delta a \leq 3$ mm, mit a als Risslänge). Da zu einer Zyklenzahl jeweils zwei Werte existieren (linke & rechte Probenseite) wird der Übersichtlichkeit halber das arithmetische Mittel gebildet und stets nur dieses im Folgenden dargestellt. BILD 5 (a)-(e) zeigt die gemessenen Verläufe für die Rivetless Nutplate sowie Pin & Bolt-Konfiguration. Weiterhin ist die Position der Elemente in der Probe bezogen auf den anfänglichen Anriss eingezeichnet. Als quantitatives Maß der Verzögerung eignet sich jedoch primär die errechnete Rissgeschwindigkeit. Das Differential wird durch einen zwischen den Messungen als konstant angenommen Differenzenquotienten ersetzt:

(2) $$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{a_t - a_{t-1}}{N_t - N_{t-1}}$$

Der Zeitpunkt *t* korrespondiert mit der aktuellen Messung, währenddessen der Zeitpunkt *t-1* den vorangegangenen Messzeitpunkt kennzeichnet. *N* steht für die gefahrene Zyklenzahl. Aufgrund des unterschiedlich hoch gewählten Belastungsniveaus und der von Probekörper zu Probekörper schwankenden Klebefestigkeit kommt es zu einer variablen Rissausbreitungsgeschwindigkeit und infolge dessen zu einer stark schwankenden Gesamtanzahl an zu testenden Zyklen. Um dennoch einen Vergleich der Proben untereinander zu ermöglichen wird eine Normierung nach folgender Form durchgeführt:

(3) $$N_{norm} = \frac{N}{N_{a=45mm}}$$

Der Nenner entspricht der Zyklenzahl, bei dem der Riss eine Länge von 45 mm und damit die Position des Riss-Stopper Elementes erreicht hat. Die sich daraus ergebenden Verläufe sind in BILD 5 (f) abgebildet. Charakteristisch für den Graph ist das Zusammenlaufen aller Risslängen für $N_{norm} = 1$.

Die angefertigten C-Scans der Ultraschallaufnahmen werden - entsprechend skaliert - über die Fotos der jeweiligen Proben gelegt und die Rissverläufe auf diese übertragen. Es ergeben sich dadurch zyklisch gestaffelte Rissfronten wie sie in BILD 6 zu sehen sind.

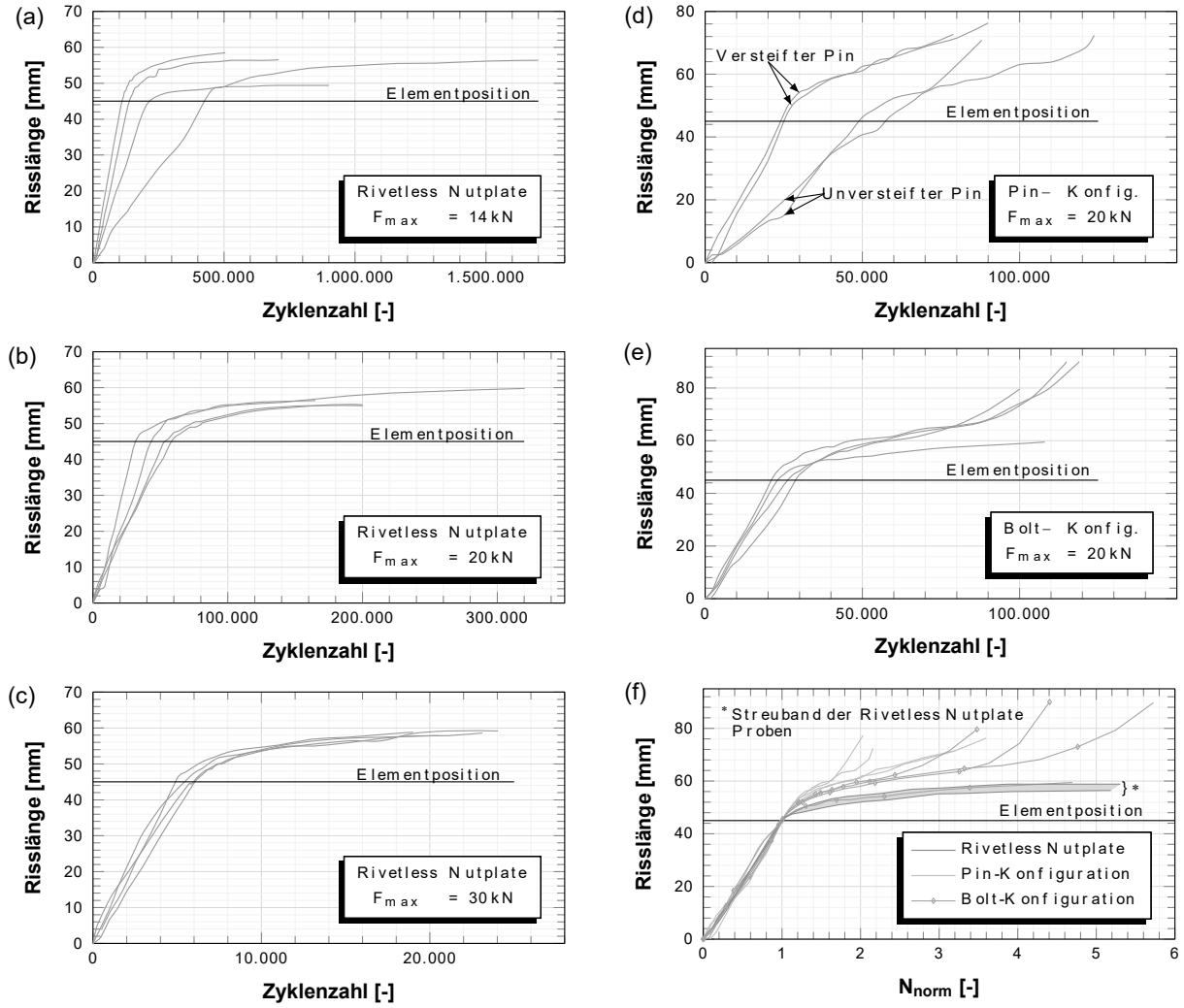

BILD 5. Veränderung der Risslänge in Abhängigkeit von der getesteten Zyklenzahl für die untersuchten Riss-Stopper Rivetless Nutplate, Pin und Bolt in einer Fatigue-Belastung unterworfenen CLS-Probe

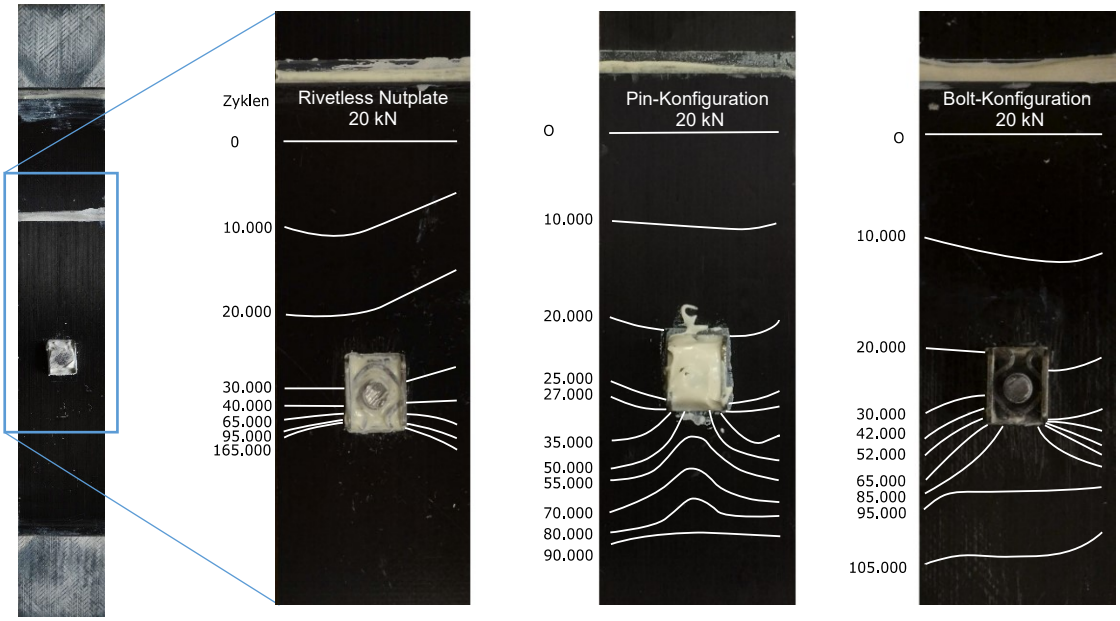

BILD 6. Mittels luftgekoppeltem Ultraschall abgescannte Probenbereiche sowie dabei detektierter Rissverläufe für die unterschiedlichen Riss-Stopper Elemente in Abhängigkeit von der getesteten Zyklenzahl

5.2. Diskussion der Ergebnisse

Durch die Diagramme und den vom anfänglich linearen Risswachstum abweichenden Verläufen ergeben sich folgende Beobachtungen:

Rivetless Nutplate

Die Verläufe der Risslängen weisen für 11 der 12 getesteten Proben ein äußerst reproduzierbares (geringes Streuband) und somit charakteristisches Verhalten auf: Eine beginnende Verzögerung der Rissgeschwindigkeit ist in den ersten 5 mm nach Unterwandern der Rivetless Nutplate festzustellen. Der Effekt verstärkt sich mit weiter zunehmendem Abstand, sodass der Riss spätestens 15 mm hinter der Nutplate nahezu gestoppt wird. Das verbleibende Risswachstum beträgt lediglich 3% des ursprünglichen Wertes, siehe dazu auch BILD 7. Unterschiede aufgrund des Belastungsniveaus sind marginal, deuten jedoch tendenziell auf eine leicht abnehmende Wirksamkeit bei größer werdender Belastung hin.

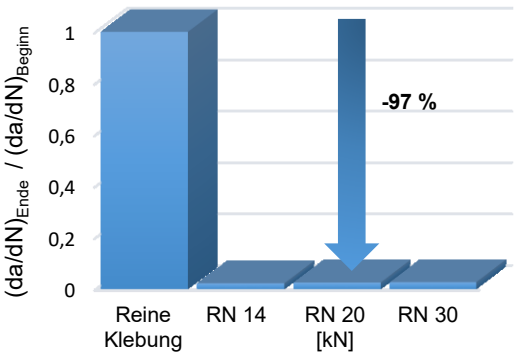

BILD 7. Minimierung der Rissausbreitungsgeschwindigkeit in einer CLS-Probe über alle Laststufen hinweg durch Einsatz einer Rivetless Nutplate

Lediglich eine 14 kN Probe wird als (positiver) Ausreißer betrachtet, da es dort zu so einer starken Verzögerung kommt, dass bereits 5 mm hinter dem Element der Riss vollständig stoppt.

Der Verlauf der Rissfronten nach BILD 6 legt den Schluss nahe, dass der Einflussbereich der Nutplate nach außen hin abnimmt, da der verbleibende Rissfortschritt hauptsächlich an den Randbereichen der Probe stattfindet und weniger direkt um das Element herum. Eine konkav ausgeprägte Rissfront bildet sich infolgedessen aus. Durch eine exemplarisch bis zu 50.000 Zyklen ($N_{norm} = 10$, nicht dargestellt) getestete Probe kann ein erneutes Beschleunigen des Risses insgesamt aber ausgeschlossen werden.

Pin-Konfiguration

Die 4 getesteten Proben unterteilen sich in zwei unversteifte sowie zwei mit zusätzlichem Klebstoff an der Außenseite versteifte Varianten (siehe dazu Abschnitt 3.2.1). Die Notwendigkeit der letzteren Optimierung wird besonders im normierten Risslängengraph ersichtlich: nach einer beginnenden Verlangsamung löst sich der Pin in der Bohrung bei Erreichen von $a \approx 60$ mm. Als Grund hierfür werden ansteigende Scherkräfte vermutet. Das Resultat ist eine sofortige Beschleunigung des Risses auf die ursprüngliche Geschwindigkeit (respektive der im Vergleich zum Anfang gleichen Steigung) und damit Verlust jeglicher Riss-Stopper Funktion. Der versteifte Pin hingegen zeigt kein Ausbrechen und kein erneutes Beschleunigen. Jedoch, die sich neu einstellende Geschwindigkeit liegt im direkten Vergleich mit der Rivetless Nutplate höher, sodass nur eine Reduktion auf ca. 20% der anfänglichen Rissgeschwindigkeit stattfindet.

Die Ultraschallbilder zeigen zudem ein höheres Maß an Risswachstum im Bereich um den Pin herum und damit letztendlich auch dort ein weiteres Ausbreiten bis sich die Verklebung im Umfeld vollständig gelöst hat. Die Rissfront beginnt sich auszugleichen, aufgrund der lokalen Versteifung des Pins jedoch mit der angesprochenen, verlangsamten Geschwindigkeit.

Bolt-Konfiguration

Die 4 untersuchten Proben zeigen im Versuch ein sehr inkonsistentes Verhalten. Nach einer beginnenden Verlangsamung auf knapp 12% der anfänglichen Geschwindigkeit kommt es zu einer erneuten Beschleunigung bei sehr variablen (normierten) Zyklenzahlen. Eine weitere Probe zeigt darüber hinaus einen Verlauf, der ähnlich der Rivetless Nutplate ist. Da es sich als Ursache aufgrund des Designs der Konfiguration nur um eine unterschiedlich starke Mode I-Reduzierung handeln kann, liegt der Schluss nahe, dass beim Festziehen der Schraube mit dem Drehmoment von 1,3 Nm eine zu hohe Bandbreite an Vorspannung auftritt. Bestärkt wird die These durch die leicht ovale Form der Mutter (vgl. selbstsichernde Muttern bzw. BILD 1) und das dadurch erhöhte - aber von Mutter zu Mutter aufgrund der Herstellungstoleranzen variierende – Drehmoment bereits während des Anziehvorganges der Schraube. Die Rissfronten ähneln zunächst denen der Rivetless Nutplate (konkaver Verlauf), lösen sich jedoch auch vom Bereich um das Element herum und gleichen sich anschließend dahinter wieder zu einer geraden Rissfront aus. Im Vergleich zum analog ablaufenden Prozess bei der Pin-Konfiguration erfolgt der Vorgang jedoch mit deutlich erhöhter Geschwindigkeit. Diese Beobachtung ist insofern schlüssig, als dass dort bei der Pin-Konfiguration durch die relative Verschiebbarkeit zunehmende Lasten mittels Lochleibung übertragen werden können, was bei der Bolt-Konfiguration nicht der Fall ist.

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Die experimentelle Untersuchung zeigt die hervorragende Riss-Stopper Funktion einer Rivetless Nutplate in einer Klebeverbindung. Das noch vor dem Element unbeeinflusste Risswachstum in der Klebeschicht wird ab Erreichen der Nutplate wirkungsvoll am weiteren Ausbreitungsvorgang behindert. Es kommt dabei über alle getestete Laststufen hinweg zu einer Reduktion der Geschwindigkeit um min. zwei Größenordnungen. Ein erneutes Beschleunigen konnte nicht festgestellt werden. Die Rivetless Nutplate kann damit de facto als Riss-Stopper angesehen werden. Durch die zusätzlich getesteten Konfigurationen kann als wesentlicher Mechanismus die Reduzierung der Mode I-Belastung ausgemacht werden. Hier zeichnet sich jedoch in hohem Maße der Einfluss der Vorspannkraft ab. Eine genauere Untersuchung dieses Parameters ist dementsprechend unerlässlich. Der Effekt der lokalen Versteifung und somit die Lastübertragung durch Lochleibung ist weniger stark ausgeprägt. Der Einfluss scheint jedoch dahingehend wichtig zu sein, als dass dadurch einem Beschleunigen des Risses wie etwa bei einer reinen Mode I-Reduktion entgegengewirkt werden kann.

7. DANKSAGUNG

Mein aufrichtiger Dank gilt dem Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart für die Überlassung des Forschungsthemas sowie die Unterstützung während des Anfertigens der Abschlussarbeit. Hierbei möchte ich insbesondere meinen Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. R. Sachse hervorheben. Des Weiteren ist es mir Freude und Ehre von der Deutschen Gesellschaft für Luft- & Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e. V. für die Arbeit mit dem Nachwuchspreis 2017 ausgezeichnet worden zu sein. Dank gebührt in diesem Zusammenhang auch dem Stifter des Innovationspreises, der Firma MT Aerospace.

8. LITERATURVERZEICHNIS

[1] Federal Aviation Administration, “Advisory Circular 20-107B - Composite Aircraft Structure,” 2009, S. 4-6.

[2] Boltless Assembling Of Primary Composite Structures (BOPACS), “Description of Work,” EU FP7 Research Project, 2012.

[3] R. Sachse, A.K. Pickett, W. Adebahr, M. Klein, M. Käß, P. Middendorf, “Experimental Investigation Of Mechanical Fasteners Regarding Their Influence On Crack Growth In Adhesively Bonded CFRP-Joints Subjected To Fatigue Loading,” in 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 2015.

[4] M. Miller, “Untersuchung des Einflusses verschiedener klimatischer Bedingungen und Oberflächenvorbehandlungen auf das Risswachstumsverhalten in CFK-Klebeverbindungen," Universität Stuttgart, 2015.

[5] M. Käß, "Charakterisierung des Risswachstums und experimentelle Untersuchung eines Riss-Stopper Konzepts für CFK-Klebeverbindungen bei Fatigue-Belastung,“ Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, 2014.

[6] S. Gröninger, “Überwachung des Risswachstums in CFK-Klebeverbindungen,” Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, 2014.

[7] W. Adebahr, M. Rahammer, R. Sachse, S. Gröninger, M. Käß, M. Kreutzbruck and G. Busse, "Crack growth monitoring at CFK adhesive bondings," in Proc. 24. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 2015.