

Steigerung der Lochleibungsfestigkeiten in CFK-Prepregs durch örtliche thermoplastische Faser-Verstärkungen

L. Hefft, G. Ziegmann

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

lars.hefft@tu-clausthal.de

Abstract

Leichtbaukonzepte sind vor allem im Transport- und Mobilitätssektor eine wichtige Triebfeder zur Erreichung aktueller Klima- und Energieziele, da sie sich aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften bei geringem Gewicht gegenüber klassischen Konstruktionswerkstoffen auszeichnen. Das Fügen großer Bauteilstrukturen erfolgt jedoch meist mit klassischen Verfahren wie dem Nieten oder durch Schraubverbindungen. Die dafür notwendigen Bohrungen weisen jedoch eine sehr hohe Kerbwirkung auf und die Störung des Faserverlaufes bzw. die Schädigung der Fasern durch den Bohrprozess sind extrem schädlich. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit lokale Verstärkungen für Bohrungen entworfen und hinsichtlich der Verbesserung der Lochleibungsfestigkeit hin untersucht. Dazu werden im ersten Teil der Arbeit verschiedene FE-Simulationen durchgeführt, um ein exaktes Verständnis über den Wirkmechanismus zu bekommen und die Form der Verstärkungen festzulegen. Der zweite Teil der Arbeit widmet sich der experimentellen Untersuchung der Verstärkungen im quasi-statischen Lastfall und unter dynamischen Belastungen bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0$.

Als Material wird ein unidirektionales Kohlenstofffaser-Prepreg auf Epoxidharzbasis gewählt und ein biaxialer $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_S$ Lagenaufbau. Die Verstärkungen weisen eine u-förmige Kontur auf und werden aus CF-Endlosfasern und PEI als Matrix hergestellt, sodass sie keiner eingeschränkten Lagerzeit unterliegen. Eine Verbindung von duromeren und thermoplastischen Kunststoffen ist unter dem Begriff Semi-Interpenetrating Polymer Networks bekannt, eine gute Anbindung ist grundsätzlich möglich.

Sowohl die quasi-statischen als auch die dynamischen Tests zeigen eine Verbesserung der Lochleibungsfestigkeiten durch die entwickelten Verstärkungen. Im statischen Lastfall kann eine Steigerung um circa 8 % erreicht werden, im dynamischen -abhängig vom Lasthorizont- eine Steigerung um das Siebenfache.

1 Einleitung

Das derzeitige Umdenken hinsichtlich eines nachhaltigen Energie- und Ressourceneinsatzes erfordert eine Umgestaltung in vielen Industriezweigen, insbesondere im Transport- und Mobilitätssektor. Verschärft durch neue gesetzliche Vorgaben und Richtlinien [1–2] werden Ansätze aus dem Bereich des Leichtbaus verstärkt benötigt. Eindeutige Trends der Publikations- und Patentdynamik der letzten Jahrzehnte [3] spiegeln das Potenzial und gesteigerte Interesse am Leichtbau wieder. Besonders faserverstärkte Kunststoffe (FVK) bieten sich aufgrund ihrer geringen Dichte und hohen spezifischen Festigkeiten als geeignete Werkstoffe für solche Ansätze an.

Doch das Fügen von FVK stellt immer besondere Anforderungen an die Fügeprozesse. Klassische mechanische Fügeverfahren, wie Bolzen- oder Nietverbindungen, führen aufgrund der notwendigen Bohrung zu einer Unterbrechung des Faserverlaufes und einer damit einhergehenden lokalen Schwächung der Struktur. Verfahren wie beispielsweise das Kleben oder Schweißen (bei thermoplastischen Matrixmaterialien) stellen Alternativen dar, bringen jedoch – abhängig vom Anwendungsfall – auch Nachteile mit sich, wie eine Nichtlösbarkeit der Verbindung, eine Nichteinsehbarkeit der Fügestelle und -qualität oder eine erforderliche Vorbereitung der Fügestelle.

Trotz ihrer Nachteile hinsichtlich des Faserverlaufes nehmen Bolzen- und Nietverbindungen auch heute noch eine wichtige Rolle als Verbindungselement ein. Die Reduktion der angesprochenen lokalen Schwächung durch Störung des Faserverlaufes, steht im Fokus der durchgeführten Untersuchungen in dieser Arbeit und ein neuartiger Ansatz zur lokalen Verstärkung durch fasergerecht ausgelegte Elemente soll untersucht werden.

Vorgegangen wird dabei beginnend mit FE-Simulationen zur Untersuchung der grundlegenden Effekte und dem Nachweis des grundsätzlich positiven Einflusses. Weiterhin erfolgt eine Optimierung der Verstärkungsstruktur. Die entwickelten örtlichen Verstärkungen werden hergestellt und in entsprechenden Laminaten implementiert, an welchen statische und dynamische Belastungstests durchgeführt werden.

2 Stand der Technik

2.1 Konzepte zur Reduzierung der Kerbwirkung

Wie angedeutet ist mittlerweile eine Vielzahl von verschiedenen Verbindungselementen auf dem Markt verfügbar. Auch haben sich diverse Verfahren zur Verstärkung von Bohrungen etabliert, welche sich grundlegend in zwei Hauptgruppen aufteilen lassen und in unterschiedlichen Stufen des Herstellungsprozesses Anwendung finden. Verfahren der

ersten Gruppe ordnen die noch nicht imprägnierten Fasern oder die imprägnierten Fasern vor der Aushärtung so an, dass eine möglichst lastgerechte Faserorientierung im Bohrungsbereich erreicht wird. Verfahren wie das 3D-Weben, Flechtverfahren, Stricken oder das Tailored Fibre Placement können dieser Gruppe zugeordnet werden.

Die zweite Gruppe zur Reduzierung der Kerbwirkung durch Bohrungen werden erst nach der Aushärtung der Matrix angewandt. Die Faserorientierung ist hinsichtlich der Lastübertragung daher nicht optimierungsfähig, die Verfahren jedoch grundsätzlich flexibler und weniger aufwendig. Optimierte Bohrprozesse [4], elektromagnetische Nietverfahren [5], selbststanzende Nietverfahren [6–7] sollen beispielhaft für diese Gruppe genannt werden.

2.2 Versagensarten

In Abhängigkeit der geometrischen Parameter, treten verschiedene Versagensmechanismen bei belasteten Bolzenverbindungen auf. Abhängig von der Anzahl der Bolzenelemente, dem Laminataufbau, dem Radien-Breiten-Verhältnis, etc. kann es zu unterschiedlichen Versagensformen kommen und eine genaue Vorhersage ist aufgrund des komplexen Spannungszustandes nicht immer möglich. Nach [8] können hohe Lasten mittels Bolzenverbindungen in FVK übertragen werden, eine Auslegung der Verbindung kann in der Regel jedoch nur überschlägig erfolgen, was in den meisten Fällen jedoch zu einer ausreichenden Genauigkeit führt. Bei der Konstruktion von Bauteilen sollte die Auslegung so erfolgen, dass ein Versagen auf Lochleibung auftritt, da so die höchsten Lasten eingetragen werden können. Experimentelle Untersuchungen zum Versagensverhalten in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers d , dem Randabstand e und der Probenbreite w zeigen Scherbrüche bei einem Verhältnis $e/d < 3$ oder $w/d < 4$ (s. Abb. 1a), größere Verhältnisse führen zu einem Versagen auf Lochleibung [9]. Die häufigsten Versagensarten eines Laminats für Bolzenlasten können Abb. 1 entnommen werden.

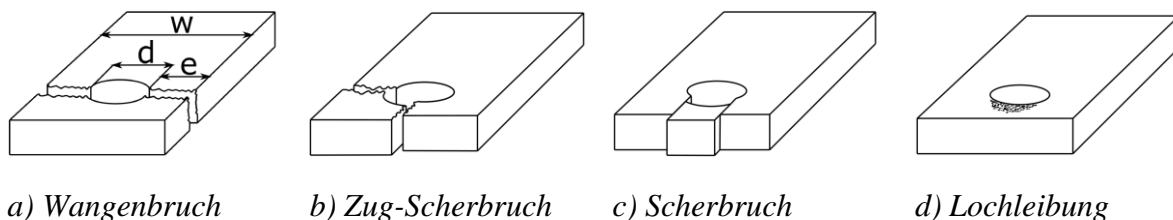


Abb. 1 – Typische Versagensformen bei Bolzenlasten

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

3.1 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung geometrisch einfacher und vielseitig einsetzbarer örtlicher Faserverstärkungen (nachfolgend Patch genannt), welche die hohe Kerbwirkung von Bohrungen in FVK reduzieren können und sich entsprechend positiv bei statischen und dynamischen Lasten auswirken. Aufgrund ihrer weiten Verbreitung, der hohen Qualität und der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten sollen dabei insbesondere aus Prepregs hergestellte Lamine im Fokus stehen. Dazu wird zuerst ein simulativer Ansatz gewählt, um die Form der Patches zu optimieren. Abgeschlossen werden soll die Arbeit mit einer ersten praktischen Überprüfung der Effektivität bei statischen und dynamischen Lasten.

3.2 Materialien

Eine Übersicht über die verwendeten Materialien und ihrer wichtigsten Eigenschaften wird nachfolgend in Tab. 1 angegeben.

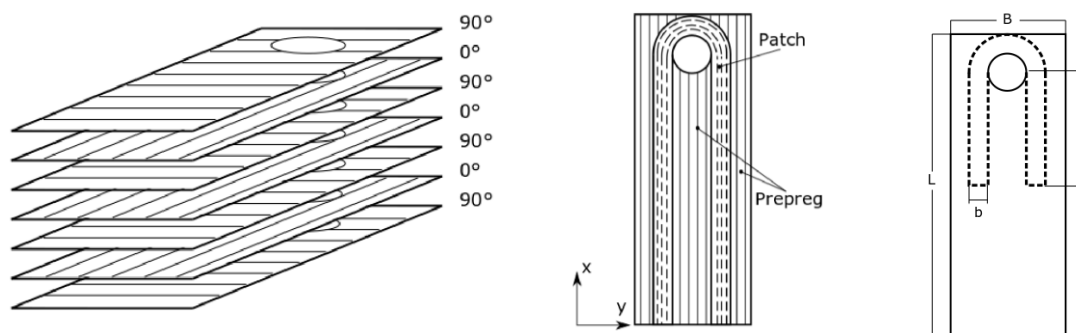
Tab. 1 - Technische Daten der verwendeten Materialien

Bezeichnung	Wert	Einheit	Bezeichnung	Wert	Einheit
Prepreg – HexPly M12\35%\268\T800S			PEI-Folie Tecfilm TC 00420		
Flächengewicht	412	g/m ²	Dicke	50	µm
Dicke pro Lage	0,262	mm	Glasübergangstemperatur	217	°C
Faservolumenanteil	56,6	%	Zugdehnung	50	%
Zugfestigkeit	3039	MPa	Zugfestigkeit	95	MPa
Verstärkungsfaser – Toray T300\1k\66tex					
Zugfestigkeit	3530	MPa			
Bruchdehnung	1,5	%			
Feinheit	66	tex			

3.3 Vorgehensweise

Die Untersuchungen erfolgen an kohlenstofffaserverstärkten UD-Prepreg Materialien auf Epoxidharzbasis und es wird ein biaxialer $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]_S$ Lagenaufbau gewählt. Die Verstärkungspatches sollen u-förmig um die Bohrungen gelegt werden und werden aus CF-Endlosfasern und Polyetherimid (PEI) produziert. Ein thermoplastischer Kunststoff wird hierbei gewählt, da er im Vergleich zu Reaktionsharzen keine eingeschränkte Lagerzeit aufweist. Ein grundsätzliche Mischbarkeit zwischen Thermoplasten und

Duromeren auf molekularer Ebene mit hoher Leistungsfähigkeit ist bereits an einigen Stellen untersucht worden und als Semi-Interpenetrating Polymer Networks (sIPNs) bekannt [10–11]. Die Referenzproben bestehen aus sieben Lagen mit wechselnden Faserwinkeln (vgl. Abb. 2a). Erprobt werden drei verschiedene Patches. In der ersten Versuchsreihe werden die Patches jeweils zwischen die 0° und 90° -Lagen gelegt, sodass es zu geringfügigen Aufdickungen im Bohrungsbereich kommt und zwei beispielhafte Längen l werden gewählt. Die Dimensionen der Gesamtprobe betragen $L = 80$ mm und $B = 30$ mm, der Bohrungsdurchmesser ist $d = 10$ mm, die Breite der Patches $b = 5$ mm und die Länge l wird für die kurzen Patches auf 30 mm und für die langen Patches auf 70 mm festgelegt.



a) Laminataufbau der Proben

b) Verstärkungslage

c) Patch-Dimension

Abb. 2 - Aufbau der Proben

Weiterhin soll eine Integration der langen Patches in einzelne Lagen geprüft werden. Dazu wird Material in Form der Verstärkungen in den 0° -Lagen ausgestanzt und mit den Patches gemäß Abb. 2b ausgefüllt. Die Abmaße der Gesamtprobe werden nicht verändert.

4 FE-Simulation

Um die grundsätzlichen Wirkmechanismen der Verstärkungen analysieren zu können und um eine optimierte Patch-Form zu finden, werden im Rahmen dieser Arbeit FE-Simulationen durchgeführt. Weiterhin wird damit untersucht, welchen Einfluss die Integration der Patches ins Laminat gegenüber der Einbringung in den Zwischenlagenbereich aufbringt. Verwendet wird dazu ANSYS Workbench in der Version 18.0, das Zusatzmodul ANSYS Composite PrepPost wird weiterhin zur Erstellung des Composite-Materials verwendet.

4.1 *Materialmodell*

Das Materialmodell wird um ein progressives Schädigungsverhalten erweitert, wodurch Schäden im Material simuliert werden können und entsprechende Lastumlagerungen innerhalb der Probe bei lokalen Schäden ermöglicht werden. Als Schadensinitiationskriterium wird das Faserversagenskriterium nach PUCK verwendet und ein progressives Schadensgesetz wird definiert. Bei erster Schädigung eines Elements wird ein Abfall der mechanischen Eigenschaften angewendet, bei einem vollkommenden Versagen steht das Element nicht mehr zur Kraftübertragung zur Verfügung. Nach [12] wird die Steifigkeit eines Elementes um 50 % bei Zugversagen der Faser und um 55 % für Druckversagen gesenkt. Die Steifigkeiten bei Zugversagen der Matrix um 60 % und um 65 % für Druckversagen.

4.2 *Modellvalidierung*

Im ersten Schritt soll die Qualität des erstellten FE-Modells geprüft werden, wozu vier verschiedene Lamine simuliert werden und anschließend äquivalente Proben mechanisch getestet werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Für verschiedene Lochleibungsdrücke wird die Dehnung im Bohrungsbereich simuliert. Eingezeichnet im Diagramm sind die maximal ertragbaren Lochleibungsdrücke der mechanischen Tests, bei denen es zum Versagen der Struktur kommt.

Die maximal ertragbaren Lochleibungsdrücke aus den mechanischen Tests decken sich nicht mit dem Versagen der Simulationen, liegen jedoch alle im Bereich von 0,2 % Dehnung, sodass von einer guten Modellqualität ausgegangen werden kann, die Schädigungsparameter jedoch angepasst werden müssen. Trotz dieser Abweichung zeigt sich jedoch, dass mit Hilfe der Patches eine deutliche Steigerung der maximal übertragbaren Bolzenlast ermöglicht werden kann. Die Länge der Patches zeigt aber keinen signifikanten Einfluss auf das Dehnungsverhalten des Laminates, eine Integration der Patches in die einzelnen Lagen hingegen erhöht die Festigkeiten.

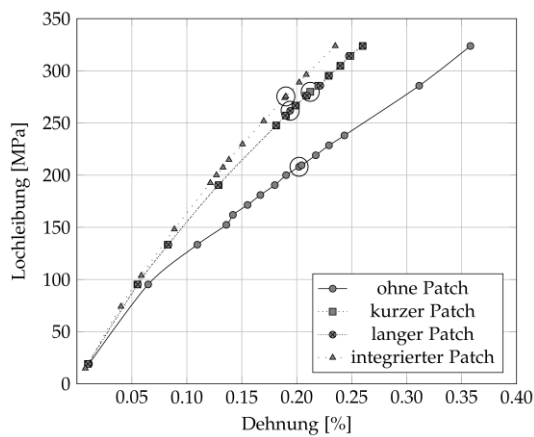


Abb. 3 - Lochleibungs-Dehnungskurven der simulierten Probenkörper

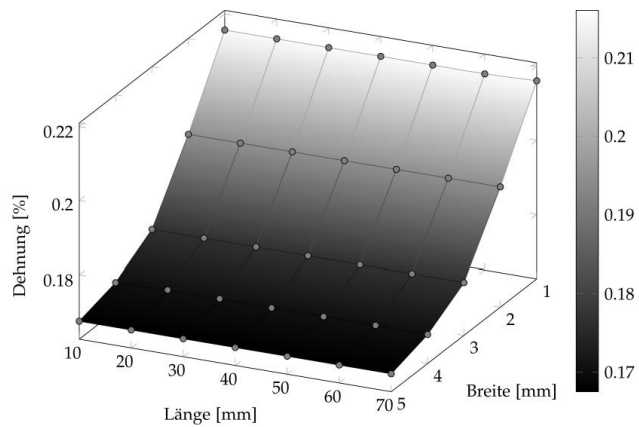


Abb. 4 - Simulationsergebnisse - Variation der Patch-Form (2500 N)

4.2 Optimierung der Patch-Geometrie

Anhand dieses Modells und des Schädigungsmodells wird im nachfolgenden Schritt die Geometrie der Patches optimiert. Dazu wird das Modell der integrierten Patches modifiziert und für eine Parameterstudie verwendet. Die Abmaße der Gesamtprobe werden gleich gehalten, die Länge l und Breite b der Patches werden variiert. Alle Kombinationen der Länge von 10 mm bis 70 mm (Schrittweite: 10 mm) und der Breite von 1 mm bis 5 mm (Schrittweite: 1 mm) werden untersucht. Eine Optimierung hinsichtlich einer maximal ertragbaren Dehnung von 0,2 % wäre hinsichtlich der vorherigen Ergebnisse sinnvoll, würde aufgrund des komplexen Modells jedoch hohe Rechenkapazitäten und -zeiten benötigen. Daher wird zur Vereinfachung eine Kraft von 2500 N für alle Patch-Formen festgelegt und die sich einstellende Dehnung der Probe wird ausgegeben. Somit lässt sich eine qualitative Aussage über die Spannungsverteilung innerhalb des Laminates treffen. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Simulationen.

Es ist erkennbar, dass die Länge l der Patches in den Simulationen im untersuchten Bereich keinen Einfluss auf die Schädigung des Laminates nimmt. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus den ersten Simulationen und mechanischen Test, bei denen kein signifikanter Unterschied zwischen den langen und kurzen Patches gezeigt werden kann.

5 Mechanische Tests

5.1 Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit

Die vielversprechenden Ergebnisse der Simulationen sollen im nächsten Schritt durch mechanische Tests überprüft werden. Dazu werden in Anlehnung an DIN EN 6037 die

Lochleibungsfestigkeiten der verstärkten Proben ($b = 5 \text{ mm}$ und $l = 70 \text{ mm}$) bestimmt und mit unverstärkten Referenzproben mit gleichem Lagenaufbau getestet.

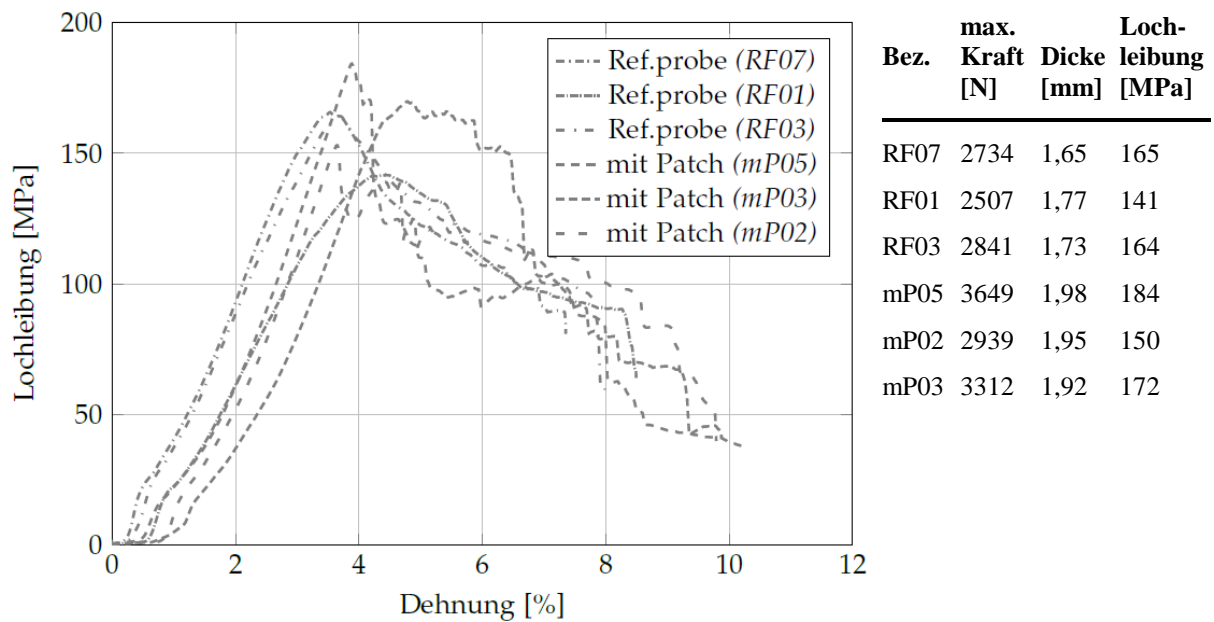


Abb. 5 - Lochleibungsfestigkeiten

Die Verläufe der Lochleibungs-Dehnungs-Kurven zeigen für die Proben mit und ohne Verstärkungen einen sehr ähnlichen Verlauf und unterliegen Schwankungen. Die Proben mit Verstärkungen weisen nach Auftreten erster Schäden einen unregelmäßigen Verlauf mit vielen lokalen Maxima auf, was auf Lastumlagerungen im Patch hinweist. Die Proben zeigen ein schrittweises Versagen und damit ein schadenstolerantes Verhalten. Aufgrund der nur geringen Anzahl von Proben und der vorliegenden Streuung kann keine endgültige Aussage über eine mögliche Steigerung der maximal zulässigen Lochleibungsdrücke durch Verwendung der Patches getroffen werden. Die maximal ertragbaren Lochleibungsdrücke ergeben für die Referenzproben im Mittel 157 MPa, für die Proben mit Verstärkung 169 MPa, was einer Steigerung um circa 8 % entspräche.

5.2 Bestimmung der Zeitfestigkeit bei schwingender Beanspruchung

Zur Bestimmung der Zeitfestigkeitsgeraden stehen grundsätzlich zwei Verfahren zur Verfügung; das Horizontenverfahren und das Perlenschnurverfahren. Bei ersterem werden mehrere Proben auf einem Lasthorizont getestet und daraus der Verlauf der Zeitfestigkeitsgeraden ermittelt. Da der Bereich der Zeitfestigkeitsgeraden bei den zu untersuchenden Proben jedoch nicht bekannt ist, soll gemäß [13] das Perlenschnurverfahren verwendet werden. Durch die Verteilung der Proben im gesamten Bereich der Zeitfestigkeitsgeraden wird ein größerer Lastbereich abgedeckt, wodurch bessere Ergebnisse zu erwarten sind. Als Bereich der Zeitfestigkeit werden Lastwechsel zwischen 1.000 bis

1.000.000 Lastwechseln untersucht. In Kombination mit den Ergebnissen der Zugversuche werden daraus die zu untersuchenden Lasthorizonte festgelegt.

Gemäß [8] stehen für die Darstellung der Versuchsergebnisse als Wöhlerlinie zwei Typen zur Verfügung. Eine Darstellung als Typ-2-Wöhlerlinie erfordert die Ermittlung einer Reihe von Parametern, welche mittels einer nicht linearen Regressionsrechnung bestimmt werden müssen. Das Modell der Wöhlerlinie beachtet dabei den horizontalen Verlauf im Bereich kleiner Lastwechselzahlen, die Bestimmung der Parameter ist hingegen entsprechend aufwendig. Als Alternative kann eine vereinfachte Form verwendet werden, welche einer Geraden im doppelt-logarithmischem Wöhlerdiagramm entspricht. Die Bestimmung der Geraden erfolgt mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Durchläufer werden hervorgehoben und durch einen kleinen Pfeil im Diagramm ergänzt. Die Anzahl der Durchläufer auf dem jeweiligen Lasthorizont wird angegeben, sie finden aber keine Berücksichtigung bei der Regression, da die genaue Schwingspielzahl nicht bekannt ist und somit die Regression verfälschen würden.

Da die Prüffrequenz aufgrund einer möglichen Selbsterwärmung entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse nehmen kann, wird eine Frequenz von 5 Hz festgelegt. Untersucht wird ein Spannungsverhältnis $R = 0$ und die Ergebnisse sind in Abb. 6 gezeigt.

Die Ergebnisse der dynamischen Versuche zeigen eindeutige Unterschiede zwischen den Referenzproben und den, mit Patch verstärkten Proben. Im Bereich von etwa 1.000 Lastwechseln zeigen sich zwar kaum merkliche Unterschiede der ertragbaren Schwingspiele, der Verlauf der Zeitfestigkeitsgeraden, bei doppelt-logarithmischer Darstellung, ist für die verstärkten Proben jedoch deutlich flacher. Somit ergeben sich bei kleineren Lasthorizonten deutliche Unterschiede in den ertragbaren Lastwechselzahlen. Die Regressionsgeraden werden jeweils nur bis zum niedrigsten getesteten Lasthorizont, mit Schwingspielzahlen von weniger als 1.000.000, aufgetragen, da der Verlauf unterhalb dieser Grenze nicht bekannt ist und aufgrund der durchgeführten Versuche keine entsprechende Aussage getroffen werden kann.

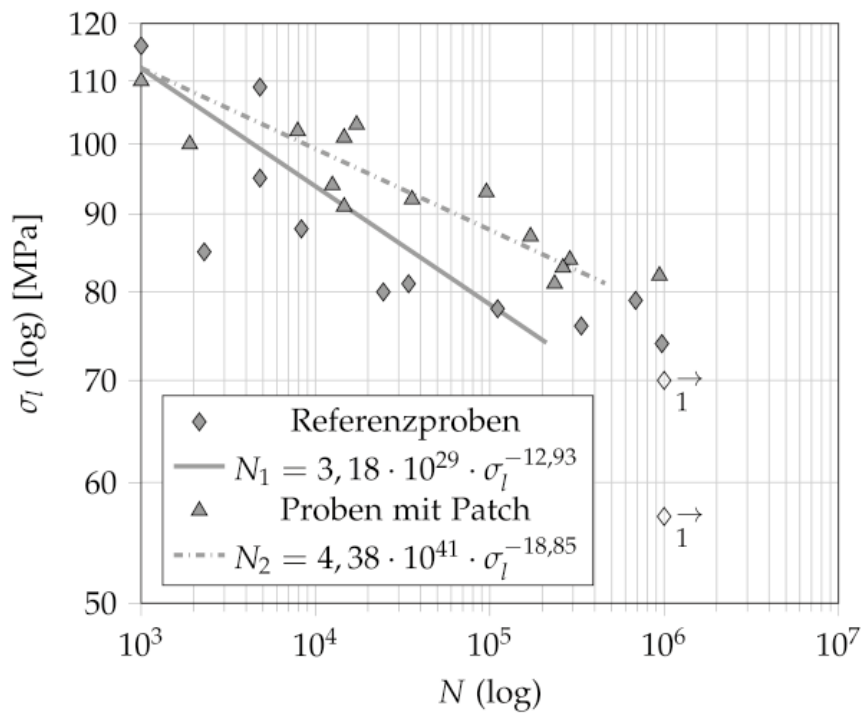


Abb. 6 - Wöhlerlinien der Proben mit und ohne Verstärkung

6 Zusammenfassung

Aufgrund der aktuellen technischen Entwicklungen und der allgemeinen Problematik von belasteten Bohrungen in FVK, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Entwicklung spezieller Verstärkungen zur Minderung der Kerbwirkung von Bohrungen in FVK. Ausgehend von einer allgemeinen Betrachtung des Problems und bereits durchgeführter Voruntersuchungen wird die Form der Verstärkungen optimiert und festgelegt.

Die erste Überprüfung der Effektivität der Verstärkungen erfolgt mittels diverser FE-Simulationen. Dabei wird stets versucht, einen sinnvollen Mittelweg zwischen Abbildungsgenauigkeit und Rechenaufwand zu gehen. Die Überprüfung der verwendeten Modelle erfolgt über einen Abgleich experimenteller Ergebnisse und den Simulationsergebnissen. Die getroffenen Vereinfachungen scheinen die Modellqualität nicht unzulässig zu stören und es zeigen sich gute Übereinstimmungen. Weitergehende Simulationen werden benutzt, um die Grenzen der Verstärkungen abzustecken und die Form der Patches zu optimieren.

Angeschlossen an die Simulationen erfolgt eine intensive Untersuchung der Patches durch eine Reihe von Zugversuchen. Eine Steigerung von circa 8 % der maximalen Lochleibungsdrücke kann durch die Verstärkungen erreicht werden.

Im Anschluss an die quasi-statischen Zugversuche erfolgt eine Überprüfung des dynamischen Verhaltens durch Einstufenschwingversuche. Die Proben werden analog zu den

Zugversuchen auf ein Versagen durch Lochleibungsdrücke hin untersucht und die zugehörigen Wöhlerlinien durch Minimierung der Fehlerquadrate aufgestellt. Verwendet wird das Perlenschnurverfahren im Bereich von 1.000 bis 1.000.000 Lastwechseln.

Die Einstufenschwingversuche zeigen deutliche Verbesserungen der ertragbaren Lastwechsel durch Verwendung der entwickelten Patches. Die Zeitfestigkeitsgerade bei doppelt-logarithmischer Darstellung zeigt für die verstärkten Proben einen deutlich flacheren Verlauf. Im Bereich größerer Lasten (etwa 1.000 Lastwechsel) zeigen sich keine merklichen Unterschiede zwischen beiden Probenformen. Bezogen auf eine Lochleibung von 81 MPa kommt es bei den verstärkten Proben jedoch erst bei ungefähr der siebenfachen Schwingspielzahl zum Bruch, verglichen mit den Referenzproben. Diese deutliche Steigerung zeigt das Potenzial der entworfenen Verstärkungen zur Minderung der negativen Einflüsse durch Bohrungen in FVK.

Literatur

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO): Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation, 2016.
- [2] Europäische Union: Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, 2009.
- [3] Leichtbau BW GmbH: Leichtbau – Trends und Zukunftsmärkte, 2014.
- [4] Becke, C.: Prozesskraftrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen, 2011.
- [5] Cao, Z.; Cardew-Hall, M.: "Interference-fit riveting technique in fiber composite laminates," Aerospace Science and Technology, 2006.
- [6] Gay, A.; Lefebvre, F.; Bergamo, S.; Valiorgue, F.; Chalandon, P.; Michel, P.; Bertrand, P.: „Fatigue performance of a self-piercing rivet joint between aluminum and glass fiber reinforced thermoplastic composite“, International Journal of Fatigue, 2016.
- [7] Kang, J.; Rao, H.; Zhang, R.; Avery, K.; Su, X.: „Tensile and fatigue behaviour of self-piercing rivets of CFRP to aluminium for automotive application“, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering), 2016.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund - Berechnungen, Berlin, 2006.

- [9] Cooper, C.; Turvey, G.: „Effects of joint geometry and bolt torque on the structural performance of single bolt tension joints in pultruded GRP sheet material“, Composite Structures, Nr. Volume 32, Issues 1–4, pp. 218-226, 1995.
- [10] Wippo, V.; Rettschlag, K.; Surjoseputro, W.; Jäschke, P.; Suttmann, O.; Ziegmann, G.; Overmeyer, L.: „Laser transmission welding of semi-interpenetrating polymer networks-composites“, Journal of Laser Applications, 2017.
- [11] Harismendy, I.; Del Rio, M.; Marieta, C.; Gavaldà, J.; Mondragon, I.; „Dicyanate ester–polyetherimide semi-interpenetrating polymer networks. II. Effects of morphology on the fracture toughness and mechanical properties“, Journal of Applied Polymer Science, pp. 2759 - 2767, 2001.
- [12] CAE Associates, „CAE Associates,“ [Online]. Available: https://caeai.com/sites/default/files/CAEA_v15_ANSYS_Composite_Damage.pdf. [Zugriff am 12 11 2018].
- [13] Martin, A.; Hinkelmann, K.; Esderts, A.: „On the Analysis of Fatigue Tests in Finite Life Fatigue Strength Regions - Part 1: How Reliable Can 50% Wohler Curves be Determined from Experimental Data?“, Material Testing, pp. 502-512, 2011.

Autorenanschriften

M.Sc. Lars Thorsten Hefft

Technische Universität Clausthal

Clausthaler Zentrum für Materialtechnik

Agricolastraße 2

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-723368

Telefax: 05323-723399

E-Mail: lars.hefft@tu-clausthal.de