

Herausforderung CFK-Stahl-Mischbau: Quantifizierung von Delaminationen infolge des umformtechnischen Fügens

Maximilian WILHELM*, Uwe FÜSSEL**, Torsten NANCHE*, Matthias DUSCHL
* BMW AG
** TU Dresden - Professur für Fügetechnik und Montage
(Kontakt: maximilian.f.wilhelm@bmw.de)

Kurzfassung. In der Automobilindustrie kommen zur Realisierung von Mischbaustrukturen vielfach umformtechnische Fügeverfahren zum Einsatz. Das Stanzen oder Bohren von Löchern mittels Fügeelementen sowie die beim umformtechnischen Fügen notwendige Umformarbeit führen verstärkt zu Delaminationen, Zwischenfaserbrüchen und anderen Fügeimperfektionen im Faserkunststoffverbund (FKV). Hinsichtlich der Auswirkung dieser Imperfektionen auf die Verbindungsfestigkeit liegen jedoch nur wenige Erfahrungswerte vor. Zur Analyse der Auswirkungen ist eine Kombination aus zerstörungsfreier Imperfektionsquantifizierung und anschließender zerstörender Festigkeitsbestimmung notwendig. Hierdurch soll ein Zusammenhang zwischen spezifischen Schädigungsumfängen und der Material- sowie Verbindungsfestigkeit ermittelt werden. Aufgrund des Materialmixes der Verbindung (Fügeelement aus Stahl, kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK) sowie Stahlfügepartner) sollen verschiedene zerstörungsfreie Prüfverfahren auf ihre Eignung zur Bewältigung der vorliegenden Prüfaufgabe untersucht werden.

1. Einführung

Ein Baustein zur Emissionsreduktion zukünftiger Fahrzeuggenerationen ist der strukturelle Leichtbau in Multi-Materialbauweise [1]. Insbesondere der Einsatz von CFK verspricht aufgrund des geringen spezifischen Werkstoffgewichtes ein hohes Potential [2]. Der Fügetechnik kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Nur wenn die Fügbarkeit von Bauteilen aus verschiedenen Werkstoffen gewährleistet werden kann, ist ein belastungsgerechter Einsatz von FKV in von Stahl und Aluminium dominierten Karosseriekonstruktionen möglich. Aufgrund der Anforderungen des Automobilbaus insbesondere hinsichtlich Kosten, Stückzahl und Taktzeit können die aus dem Flugzeugbau bekannten Fügeverfahren für FKV nur in beschränktem Maße eingesetzt werden. Eine im automobilen Karosseriebau zur Realisierung von Mischbaustrukturen z.B. aus Stahl und Aluminium genutzte Technologiegruppe ist das umformtechnische Fügen insbesondere auf selbstlochender Basis. Das Stanzen oder Bohren von Löchern mittels Fügeelementen sowie die zur Ausbildung der Fügepunkte notwendige Umformarbeit führt verstärkt zu Delaminationen, Zwischenfaserbrüchen und anderen Fügeimperfektionen im FKV (siehe Abbildung 1). Hinsichtlich der Auswirkung dieser Imperfektionen auf die Verbindungsfestigkeit liegen jedoch nur wenige Erfahrungswerte vor.



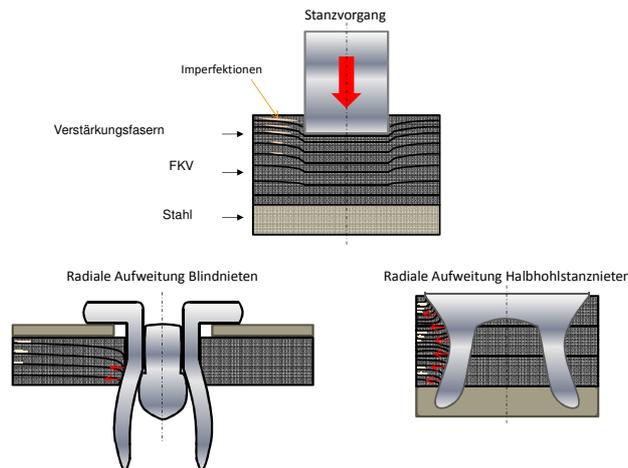


Abbildung 1: Einbringung von Imperfektionen beim umformtechnischen Fügen

Bisherige Untersuchungen konzentrieren sich zumeist auf Betriebsschäden an FKV-Strukturen, d.h. vornehmlich auf Impactschäden in Folge von Vogel- oder Steinschlag. Fertigungsfehler, wie z.B. Material- oder Fügeimperfektionen werden hingegen wenig betrachtet [3, 4, 5]. Lediglich [6] leistet wertvolle Pionierarbeit hinsichtlich der Betrachtung des Einflusses der Lochqualität auf die 4%-Lochleibungsfestigkeit von Durchsteckverbindungen. Hierbei wird jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen Imperfektionsumfängen und den Festigkeitsauswirkungen hergestellt, anstelle dessen werden drei verschiedene Fräsmethoden mit unterschiedlichen zu erwartenden Schädigungsgraden gegenübergestellt. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wird ein deutlicher Unterschied der verschiedenen Fertigungsverfahren hinsichtlich erreichbarer 4%-Lochleibungsfestigkeiten unter quasistatischer als auch dynamisch zyklischer Belastung konstatiert. In [7] wird der Einfluss unterschiedlicher Vorlocheinbringungsverfahren auf die Verbindungsfestigkeit dagegen als untergeordnet charakterisiert. Hierbei erfolgt jedoch keine direkte Betrachtung der Schädigungsgrade bei den verschiedenen Locheinbringungsverfahren. Aus diesem Grund sowie auf Basis der hier verwendeten Werkstoffe kann die Aussage nur bedingt verallgemeinert werden. Untersuchungen zum umformtechnischen Fügen von Stahl mit CFK, welches mittels Flechtprozessen hergestellt wurde und zudem in größerem Umfang Glasfasern in Strukturlagen beinhaltet, sind momentan zudem nicht bekannt.

2. Untersuchungsziel

Aufgrund der beim umformtechnischen Fügen wirkenden Kräfte ist je nach Fügeverfahren mit einem gewissen Schädigungsgrad des FKV's zu rechnen. Zunächst werden die zu erwartenden Fügeimperfektionen anhand mikroskopischer Betrachtungen überprüft und klassifiziert, um anschließend ausgewählte zerstörungsfreie Prüfmethoden hinsichtlich ihrer Eignung zur Detektion dieser zu untersuchen. Nach Erarbeitung einer geeigneten Quantifizierungsmethode für die Fügeimperfektionen, gilt es im nächsten Schritt deren Auswirkungen zu bewerten. Die Untersuchung der Auswirkungen kann nach den für die unterschiedlichen Versagensfälle bei FKV-Bolzenverbindungen relevanten Materialfestigkeiten gegliedert werden. Weiterhin erfolgt eine Untergliederung der Untersuchungen in mittels Flächenpressung belastete Proben und Proben mit unterschiedlicher Güte der Locheinbringung.

3. Klassifizierung der auftretenden Imperfektionen

Die durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass beim umformtechnischen Fügen vorwiegend Delaminationen und Zwischenfaserbrüche sowie in geringerem

Umfang Faserbrüche und -ondulationen als Fügeimperfektionen zu beobachten sind. Da Faserbrüche unmittelbar am Lochrand systemimmanent sind, werden diese im Folgenden nicht als Imperfektionen betrachtet.

Das Blindnieten mittels Hülsenweiser in der Fügeichtung Stahl in FKV bildet aufgrund der Ausprägung des Schließkopfes im FKV den beim Blindnieten hinsichtlich Fügeimperfektionen kritischsten Fall. Bei der Schließkopfausbildung kommt es zum einen zu einer Aufweitung der Blindnietaußenkontur und damit zu einer radialen Druckbelastung des FKV. Zum anderen kommt es durch das schlagartige Einziehen des Nietdorns zu einer vertikalen Krafteinwirkung auf das FKV und in Folge dessen zu flächigen Faserondulationen. Diese Materialverformungen führen zu Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen im Bereich des Nitelementes.

Beim Fließformschrauben lassen sich gegenüber dem Blindnieten umfangreichere Fügeimperfektionen beobachten. Dies ist zum einen auf den selbstlochenden Prozess und zum anderen auf die Ausbildung von Gewindegängen im FKV zurückzuführen. Der Einbringung von Fügeimperfektionen beim Selbstlochen steht jedoch das direkte Anliegen der Schraubenoberfläche in Form einer perfekten Passung gegenüber. Weitere Schädigungen, insbesondere sich rissartig ausbreitende Zwischenfaserbrüche und Delaminationen werden durch das Schraubengewinde hervorgerufen. Das Gewinde entfaltet aufgrund seiner spezifischen Form eine Keilwirkung und damit eine Schälbeanspruchung, welche zu einem Lösen der Faser-Matrix-Bindung oder zu Matrixbrüchen führt.

Die beim Halbhohlstanznieten eingebrachten Fügeimperfektionen weisen im Vergleich der Verfahren die größte Schwere auf (siehe Abbildung 2). Da der Bereich im Inneren des Elementes vollständig vom Grundmaterial abgetrennt ist und damit keinen Beitrag zur Verbindungsfestigkeit leistet, ist dieser bei mikroskopischen Betrachtungen von der Bewertung auszuschließen. Die im Gegensatz zu den anderen Fügeelementen abweichend verwendete Kopfform des Senkrundkopfs führt aufgrund der hier zusätzlich verrichteten Umformarbeit zu verstärkten Delaminationen und Zwischenfaserbrüchen im Kopfbereich (siehe rechtes unteres Bild in Abbildung 2). Diese Verformungen sowie die spezifische Ausbildung des Schließkopfes im Stahlpartner führen zu Faserondulationen in Fügeichtung, welche wiederum Delaminationen und Zwischenfaserbrüche zur Folge haben (siehe linkes unteres Bild in Abbildung 2). Die gewählte Kopfform bietet jedoch hinsichtlich des korrosiven Verhaltens und der Aufbringung einer gewissen Vorspannkraft Vorteile. Durch das Aufspreizen der Nietfüße kommt es zudem zu einer radialen Kraftwirkung senkrecht zur Fügeichtung und damit zu einer Belastung des CFK-Substrats, die in Fügeimperfektionen resultiert.

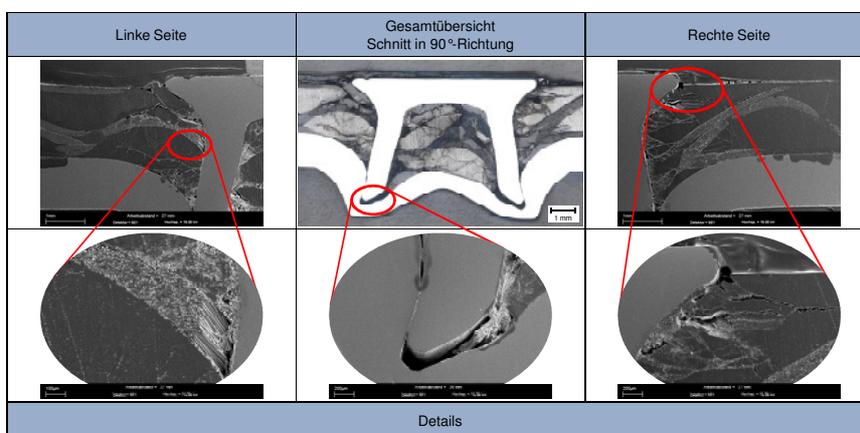


Abbildung 2: Mikroskopische Analyse von Fügeimperfektionen beim Halbhohlstanznieten

Das Vollstanznieten kennzeichnet sich gegenüber dem Halbhohlstanznieten unter anderem durch den anders gearteten Stanzvorgang. Trotz der hier relativ gesehen stärkeren Materialverdrängung in Fügeichtung und der ungünstigeren Schneidengeometrie kommt es

beim Vollstanznieten im Vergleich zum Halbhohlstanznieten zu Fügeimperfektionen in geringeren Umfang. Dies ist auf die fehlende Umformarbeit in radialer Richtung sowie die anders geartete Kopfform zurückzuführen. Der Scherschneidprozess führt in Verbindung mit der Schneidgeometrie sowie Oberflächenrauheiten zu Faserondulationen und in stärkerer Ausprägung zu Faserbrüchen in der Nähe des Lochrandes. Diese ziehen wiederum Zwischenfaserbrüche und Delaminationen auch in größerer Entfernung vom Lochrand nach sich.

4. Prüfmethodewahl

Um die beim Fügen eingebrachten Imperfektionen zu quantifizieren und anschließend ihre Auswirkung zu ermitteln, bedarf es einer zerstörungsfreien Prüfmethode. Hinsichtlich der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von FKV sind verschiedene Methoden bekannt [4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Auch für die ZfP von metallischen Verbindungen sowohl mechanischer als auch thermischer Fügeverfahren sind verschiedene Methoden Stand der Technik [16, 17, 18, 19, 20]. Hinsichtlich der Untersuchung von FKV-Imperfektionen im Bereich umformtechnischer Fügeverbindungen wurden erste Ergebnisse in [21] veröffentlicht.

Auf Basis der für FVK und Verbindungen verfügbaren Untersuchungsmethoden gilt es, geeignete Prüfverfahren für die vorliegende Prüfaufgabe auszuwählen, zu testen und zu optimieren. Als erster Schritt wird die Prüfaufgabe wie folgt spezifiziert: „Quantifizierbare Messung von Delaminationen und Zwischenfaserbrüchen im unmittelbaren Umfeld des metallischen Fügeelementes“. In Anlehnung an [10] werden die vier Prüfmethode Röntgen, Computertomografie, Thermografie und Ultraschall in Tauchtechnik für Detailuntersuchungen ausgewählt.

Die Auswahl von Ultraschall in Tauchtechnik ist der Einkopplung des Schallsignals in das Bauteil geschuldet, da die Kontur bzw. Erhebung des Fügeelementkopfes den Einsatz von Kontaktprüfköpfen verhindert. Tabelle 1 zeigt Prüfmethode, welche als wenig zielführend nach dem Vorselektionsprozess nicht weiter verfolgt wurden. Für die weiterführenden Untersuchungen werden Vollstanzniete als Verbindungselemente in der Materialkombination FKV (Gelegematerial) und Stahl verwendet.

Tabelle 1: Nicht weiterverfolgte ZfP-Methoden

Prüfverfahren	Gründe für ein Nichtweiterverfolgen des Verfahrens
Magnetpulverprüfung	Nicht möglich, da FVK nicht ferromagnetisch sind.
Eindringprüfung	Nicht möglich, da das Prüfmedium nur in bis zur Oberfläche reichende Defekte eindringen kann.
Akustische Verfahren	Nicht sinnvoll, da die Einflussgrößen der verschiedenen Fügeelemente sowie des inhomogenen FVK-Aufbaus zu groß sind.
Shearografie	Nicht sinnvoll, da die zu erwartende laterale Auflösung zu gering ist und die out-of-plane Verformung durch das Fügeelement behindert wird.
Wirbelstromprüfung	Nicht sinnvoll, da Delaminationen überwiegend parallel zur Oberfläche auftreten und durch das Fügeelement Beeinträchtigungen des Wirbelstromsignals zu erwarten sind.

Die Röntgenprüfung wird mittels des hochauflösenden Mikrofokus-Röntgensystem phoenix micromelX von General Electrics durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die gewonnenen Daten. Durch die starken Dichteunterschiede zwischen dem metallischen Nitelement und dem Stahlfügepartner auf der einen sowie dem FKV auf der anderen Seite kommt es zu Artefakten und Kanteneffekten, so dass nur das Element an sich geprüft werden kann, nicht aber Delaminationen oder andere Imperfektionen im FKV detektiert werden können. Für die Computertomografieprüfung wird während der Prüfmethodeentwicklung eine Anlage der Fa. Xlon mit einer Mikrofokusröhre und einem 200 µm Pixel Flate Panel verwendet. Auf Basis der verwendeten Probengröße kann eine Voxelauflösung von ca. 0,04 mm erreicht werden. Auch bei der Computertomografieprüfung verhindern die selben wie bei der

Röntgenprüfung auftretenden Effekte eine zielführende Prüfung des FKV (siehe Abbildung 3).

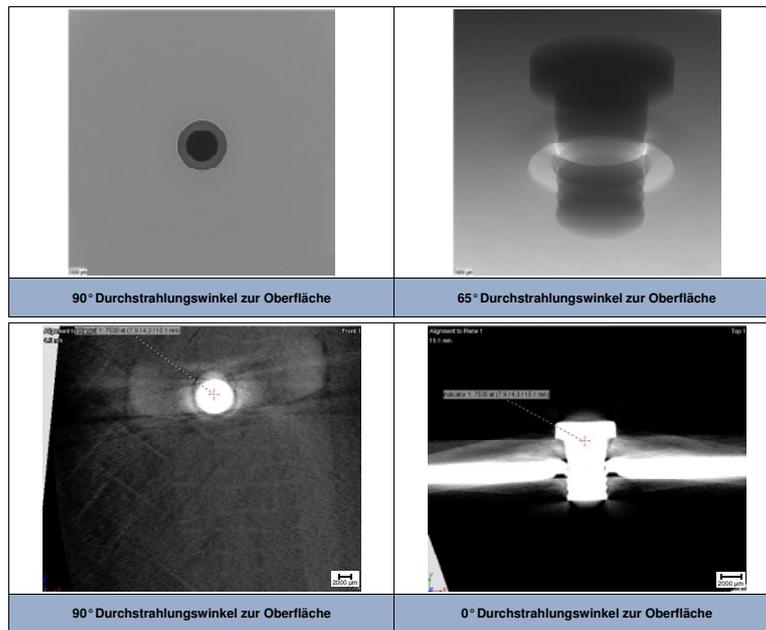


Abbildung 3: ZfP-Voruntersuchungen zur Röntgenprüfung (oben) und Computertomografie (unten)

Mittels der Thermografieprüfung können an der Verbindung scheinbar bessere Ergebnisse erzielt werden. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass es hier zu Kanten- und Abschattungseffekten sowie Artefakten kommt, die eine Auswertung im Elementumfeld unmöglich machen (siehe Abbildung 4). Für die verwendete Lock-in-Thermografie kommt das Prüfsystem OTvis der Fa. edevis mit der Kamera Cedip Silver 660 zum Einsatz. Die Anregung erfolgt mittels zweier Halogenstrahler von je 1 kW Leistung bei einer Anregungsfrequenz von 0,08 Hz.

Die Ergebnisse der Ultraschallprüfung weisen im Vergleich die besten Ergebnisse an den Verbindungsproben auf (siehe Abbildung 4). Deutlich ersichtlich ist die Verringerung des Rückwandeckos (RWE) aufgrund der ringförmigen oberflächennahen Beschädigungen sowie Delaminationen im Materialinneren infolge des Fügeprozesses. Für die Ultraschallaufnahmen wird das System ScanMaster LS-200S eingesetzt. Zur Erzielung einer möglichst hohen Auflösung kommt ein punktfokussierter Prüfkopf zum Einsatz.

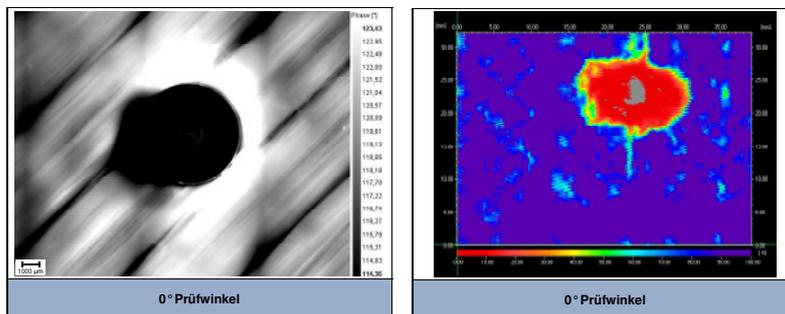


Abbildung 4: ZfP-Voruntersuchungen zur Thermografie- (links) und Ultraschallprüfung C-Bild (rechts)

Zur Verifizierung bzw. Validierung der gewonnenen Ergebnisse werden nach Entfernung des Elementes erneut zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt. Ein Vergleich der Ultraschalldaten vor und nach Elemententfernung gegeneinander sowie zu den Ergebnissen der Computertomografie nach Elemententfernung ist relativ konsistent (siehe Abbildung 5). Im Gegensatz hierzu korrelieren die Ergebnisse der Thermografieprüfung vor und nach Entfernung des Fügeelementes nur bedingt zueinander sowie zu den Daten aus Ultraschall- und Computertomografieprüfung. Diese eingeschränkte Übereinstimmung kann auf Kan-

teneffekte am Fügeelement sowie am durch den Fügeprozess eingebrachten Loch zurückgeführt werden. Delaminationen lassen sich mit der Computertomografie insgesamt weniger gut detektieren als mittels Ultraschall, dafür können Risse mit einer geringen lateralen Ausbreitung dargestellt werden.

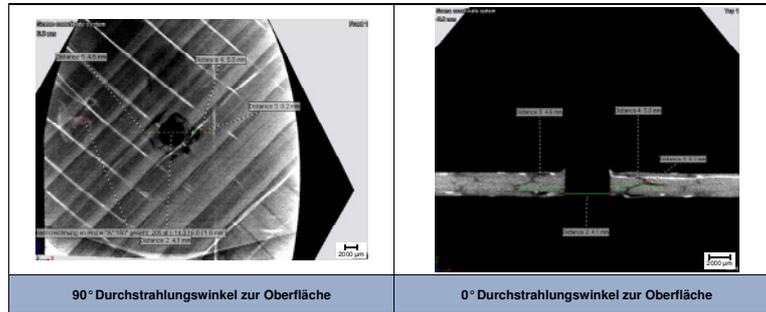


Abbildung 5: Ergebnisse der Computertomografieprüfung nach Elemententfernung

Im Hinblick auf weitere Untersuchungen wird daher die Ultraschallprüfung für Verbindungs- und Materialproben eingesetzt. Zur Verifizierung der Ergebnisse kommt die Computertomografie bei reinen Materialproben zum Einsatz. Die Signale, die sich mittels Ultraschall gewinnen lassen, zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Ausdehnung von Rissen und Delaminationen, die sich in anschließend, in Richtung der 0°-Lagen, angefertigten Makroschliffen finden lassen (siehe Abbildung 6).

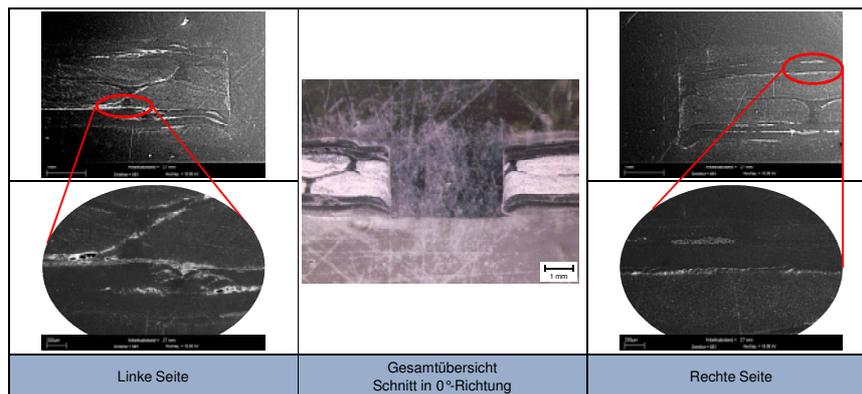


Abbildung 6: Validierung der ZfP-Voruntersuchungen mittels zerstörender Prüfung

Um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf ein mit C- und G-Fasern verstärktes Geflechtmaterial zu überprüfen, werden vor Beginn weiterer Untersuchungen einige Flechtmaterial-Proben analysiert. Die hier gewonnenen Ergebnisse bestätigen die Einsetzbarkeit von Ultraschall und Computertomographie. Es zeigt sich allerdings, dass die Prüfbarkeit des Flechtmaterials, durch den Einsatz von Glasfasern in der Struktur, weniger gut ausgeprägt ist als beim Gelegematerial, welches bis auf die Nähfäden komplett mit Kohlefasern verstärkt ist. Unter Kenntnis des strukturellen Aufbaus der Flechtstruktur kann jedoch eine Prüfung durchgeführt werden. Abbildung 7 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Ultraschallprüfung einer Verbindung Flechtmaterial – Stahl sowie das zugehörige Ergebnis der Computertomografieprüfung nach der Entfernung des Fügeelementes. Ein Vorteil der Ultraschalluntersuchung rührt aus der Tatsache, dass auch die Trennung der Glasfasern von der Matrix detektiert werden kann. In der CT-Auswertung kann diese Trennung dagegen aufgrund der Nähe zur Glasfaser und der geringen Dickenausdehnung fast nicht erfasst werden. Verschärfend kommt hinzu, dass die Glasfaser durch ihre stärkere Röntgenschwächung zu Artefakten führt.

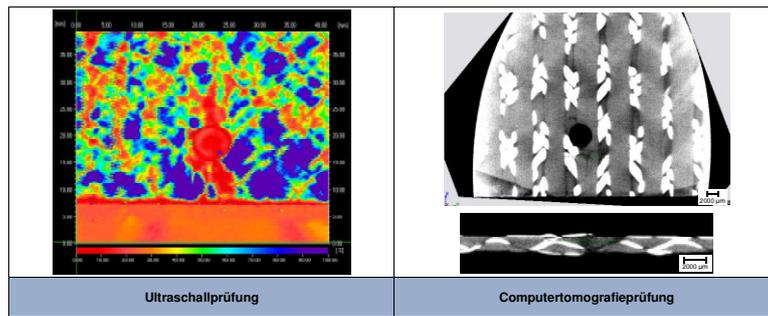


Abbildung 7: Überprüfung der ZfP-Voruntersuchungen an Flechtmaterial

Welche Fehlergröße mittels Ultraschallprüfung bei der Flechtstruktur noch detektierbar ist, wird mittels in einer Probe eingebrachten Flachbodenbohrungen überprüft. Vorab werden Optimierungen der Signalverstärkung vorgenommen, um den Effekt der Glasfasern abzuschwächen und ein Maximum an Imperfektionen zu detektieren. Es lässt sich erkennen, dass es eine optimale Verstärkung gibt, ab der die Empfindlichkeit gegenüber schadbehafteten Bereichen zu stark abnimmt. Die Struktur der Gasfasern wird als $\pm 45^\circ$ Inhomogenität im Ultraschallbild erfasst.

Mittels der Bohrungen kann gezeigt werden, dass Delaminationen bis zu einer lateralen Ausdehnung von ca. 2,0 mm nachgewiesen werden können (siehe Abbildung 8). Bei Delaminationen im Bereich von ca. 1,5 mm kann die Ausprägung nicht mehr vom Grundrauschen des Glasfasergeflechts unterschieden werden. Aufgrund der konischen Spitze der Bohrer dieser Größenordnung ist für flächige Delaminationen eine bessere Detektionsauflösung zu erwarten.

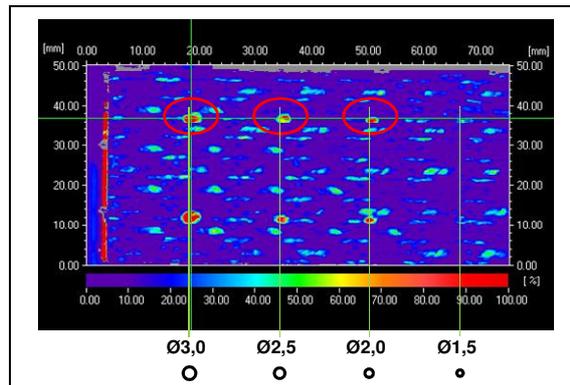


Abbildung 8: Ergebnisse der Probe mit eingebrachten Flachbodenbohrungen

5. Untersuchungsergebnisse

5.1 Auswirkungen auf die Zugfestigkeit

Die bestimmende Materialkenngröße im Versagensfall Flankenzugbruch ist die Zugfestigkeit in Richtung der 0° -Lagen. Zur Untersuchung ihres Verhaltens erfolgt zunächst eine Einbringung von Imperfektionen über definierte Flächenpressungen. Aufgebracht wird die Flächenpressung mittels eines Stempels in vier Untersuchungsstufen, wobei Stufe 0 die Referenz ohne Flächenpressung bildet. Bei Stufe 1 sind erste Defekterscheinungen auch auf der Rückseite der CFK-Zugprobe erkennbar, bei Stufe 2 erfolgt ein Eindringen des Stempels in die Oberfläche in Verbindung mit Faserbrüchen während Stufe 3 als oberer Grenzwert gewählt wurde. Bei Stufe 1 können lediglich geringe Anzeigen der Imperfektionsausdehnung im C-Scann detektiert werden, welche zudem mit einer großen Streuung behaftet sind. Bei Stufe 2 steigt die Schädigungsausdehnung sprunghaft an, es kommt zum Eindrin-

gen des Stempels in das Material und in Folge dessen zu Faserbrüchen. Bei einer weiteren Erhöhung auf Stufe 3 verändert sich das Niveau nicht mehr, wobei die Streuung aber abnimmt. Die Imperfektionsausdehnung zeigt ein stufenförmiges Verhalten, welches sich auch in den zugehörigen Zugfestigkeiten widerspiegelt.

Die angestellten Untersuchungen lassen mehrere Schlussfolgerungen zu. Zum einen existiert offenbar eine maximale Schädigungsausprägung bei konstantem Stempeldurchmesser. Ab einem gewissen Punkt kann zusätzlich aufgebrachte Kraft von den bereits geschädigten Material nicht mehr in noch ungeschädigte Bereiche abgeleitet werden und somit keine weiteren Imperfektionen hervorrufen. Zum anderen zeigt sich, dass die Schädigungsausdehnung parallel zu den C-Fasern (0° -Richtung) stärker ausgeprägt ist als quer zu diesen. Dieser Effekt kann durch die vornehmliche Kraftleitung der C-Fasern erklärt werden. In Querrichtung erfolgt die Kraftübertragung dagegen durch die duktilere Matrix sowie die Glasfasern. Hierbei wird die Entstehung von Imperfektionen durch die C-Fasern ähnlich Korngrenzen beim Stahl behindert. Neben diesen Beobachtungen kann aber auch ein deutlicher Einfluss von Imperfektionen auf die Zugfestigkeit unter quasistatischer Belastung konstatiert werden. Wenn jedoch das Einsinken des Stempels als Lochbildung betrachtet und eine Gegenüberstellung auf Basis von Spannungen mit entsprechend angepassten Querschnitt vorgenommen wird, ergibt sich ein anderes Bild. Für den angestellten Vergleich werden die Stufen 0 und 1 auf den Ausgangsquerschnitt bezogen, während für die Stufen 2 und 3 eine Bereinigung des Ausgangsquerschnitts um den Durchmesser des Stempels erfolgt. Der negative Einfluss von Imperfektionen auf die Zugfestigkeit fällt nun geringer aus, ist aber auch bei einem Bezug auf mittels Fräsen gelochte Proben immer noch vorhanden.

Um den Einfluss verschiedener im Automobilbau notwendiger Temperaturprozesse auf Fügeimperfektionen zu untersuchen, wird analog der ersten eine weitere Probenreihe aufgebaut. Für diese erfolgt nach der Schädigung und einer ersten ZfP eine Erwärmung auf 180° über 20 Minuten. An diesen Temperaturprozess schließt sich eine weitere ZfP und ein Vergleich zu den vor den Wärmeprozess gewonnenen Daten an. Es zeigt sich, dass nur minimale Abweichungen innerhalb der Streubreite vor und nach dem Wärmeprozess erfasst werden, jedoch keine signifikanten Veränderungen zu beobachten sind. Zur abschließend Evaluation des Einflusses von entsprechenden Wärmeprozessen wurden die Zugfestigkeiten vor und nach Wärme gegenübergestellt. Es zeigt sich ein unverändertes stufenartiges Verhalten auf gleichem Niveau, so dass auf dieser Basis der Einfluss von in Automobilbau üblichen Wärmeprozessen auf die Materialzugfestigkeit abgelehnt werden kann.

Unter dynamisch zyklischer Belastung erweist sich der Einfluss der eingebrachten Imperfektionen viel folgenschwerer. Hierbei ist anzuführen, dass das Niveau der ungeschädigten Proben tendenziell noch höher liegen müsste, da diese im Bereich der Einspannung versagten. Durchgeführte CT-Untersuchungen an Proben, welche 1.000.000 Schwingspiele ohne Probenbruch überstanden, liefern eine Erklärung für die Gründe. So kommt es bei vorgeschädigten Proben zu einem starken Delaminations- bzw. Risswachstum ausgehend von den bereits vorhandenen Delaminationen in der Mitte der Probe. Bei den ungeschädigten Proben kommt es hingegen zu einem Risswachstum in Randnähe, wobei diese wesentlich weniger stark ausgeprägt sind als bei den vorgeschädigten Proben.

Eine weitere Möglichkeit der Imperfektionseinbringung sind Lochprozesse. Als Referenz werden gefräste Löcher herangezogen durch welche keine oder nur minimale Imperfektionen hervorgerufen werden. Die mittels Scherschneiden bei gleichen Stempel- / Nietdurchmesser hervorgerufenen Imperfektionen fallen wesentlich geringer aus als die mittels Flächenpressung erzeugbaren Imperfektionen. Auch hier ist die Querausdehnung geringer als die Längsausdehnung, wobei der Unterschied weniger stark ausgeprägt ist. Dies und die insgesamt geringeren Schädigungen sind auf die saubere Trennung in Form des Scherschneidens zurückzuführen, bei welcher die Kraftumlenkung entlang der Fasern geringer

ausfällt. Zu den Ultraschalluntersuchungen angestellte metallographische Untersuchungen bestätigen die beobachtbaren Imperfektionsumfänge.

Weiterhin zeigt sich, dass die Imperfektionen nahezu ausschließlich beim Stanzprozess eingebracht werden. So bleibt die zu beobachtende Imperfektionsausdehnung über die ansteigenden Prägekräfte auf gleichem Niveau. Es zeigt sich, dass die um den Lochdurchmesser bereinigten Zugfestigkeiten im Streubereich der ungeschädigten Proben gleicher Geometrie liegen. Unter dynamisch zyklischer Belastung lassen sich demgegenüber jedoch negative Auswirkungen feststellen. Die Niveauabnahme ist auf die bei den mittels Scherschneidprozessen gelochten Proben bereits vorhandenen Risse zurückzuführen. Die Phase der Rissbildung muss im Gegensatz zu den gefrästen Referenzproben daher nicht mehr durchlaufen werden.

5.2 Auswirkungen auf die Lochleibungsfestigkeit

Die bisher angestellten Untersuchungen zur Zugfestigkeit werden ergänzt um Untersuchungen zur Auswirkung auf die Lochleibungsfestigkeit. Zur Simulation der Imperfektionen in Folge des umformtechnischen Fügens werden um gefräste Löcher mit einem Durchmesser von 10 mm zwei verschiedene Flächenpressungen aufgebracht. Die Flächenpressung wird mit Stempeln von 13 und 16 mm Durchmesser erzeugt, wodurch sich drei Belastungskraftstufen ergeben. Bei gleicher, rechnerischer Flächenpressung werden hierbei durch den kleineren Stempeldurchmesser größere Imperfektionsumfänge hervorgerufen als durch den größeren Stempeldurchmesser, was auf Spannungsüberhöhungen am Lochrand zurückgeführt werden kann. Im Kraft-Weg-Diagramm lässt sich für geschädigte Proben anfangs ein flacherer Verlauf beobachten, der die Auswertung der 2%-Lochleibungsfestigkeit verfälscht. Bei Auswertung der Lochleibungsfestigkeit bei 0,2 mm Lochaufweitung, entsprechend 2% des Lochdurchmessers von 10 mm, kann jedoch ein Abfall der Festigkeiten für eine Zunahme der detektierten Imperfektionen nachgewiesen werden.

6. Zusammenfassung

Mittels der angestellten Untersuchungen konnte die Eignung der Ultraschalltauchtechnik für die Prüfung von elementaren CFK-Stahl-Elementverbindungen hinsichtlich der wesentlichen Fügeimperfektionen nachgewiesen werden. Aufbauend auf diesen Nachweis konnte ein geringfügiger Einfluss dieser Imperfektionen auf die Zugfestigkeit von gelochten und ungelochten Proben beobachtet werden. Für die Lochleibungsfestigkeit konnte darüber hinaus in Folge von Imperfektionen ein im Vergleich zur Zugfestigkeit stärkerer Niveauabfall beobachtet werden. Ausstehend sind Untersuchungen zur Auswirkung von Imperfektionen auf mit Klebstoffunterstützung hybrid gefügte Proben. Hier zeigt sich auch die Prüfung von hybrid gefügten CFK-Stahl-Elementverbindungen hinsichtlich Imperfektionen durch die Überlagerung von Fehlern in der Klebschicht weiterhin herausfordernd.

7. Referenzen

- [1] Füssel, U.: „Auswahl von Fügeverbindungen für den Leichtbau“. Vortrag Technische Universität Dresden, Dresden, 2000.
- [2] Heyn, H.: „Fügetechnologien im Wettbewerb – Anforderungen der Automobilindustrie“. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium, Hannover, 2011.
- [3] Schmidt, A. P.: „Faserverbundwerkstoffe im Automobilbau: Methodischer Ansatz zur Analyse von Schäden“. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.

- [4] Bisle, W.; Hicken, H.; Scherling, D.: „ZfP von Flugzeug-CFK-Strukturen in der Wartung - Überblick über den aktuellen Stand bei Airbus“. DGZfP-Jahrestagung, Bremen, 2011.
- [5] Schulze, M.; Goldbach, S.; Heuer, H.; Meyendorf, N.: „Ein Methodenvergleich - ZfP an Kohlefaserverbundwerkstoffen mittels wirbelstrom- und ultraschallbasierender Prüfverfahren“. DGZfP-Jahrestagung, Bremen, 2011.
- [6] Persson, E.; Eriksson, I.; Zackrisson, L.: „Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates“. In Composites Part A 28A, pp. 141-151, Elsevier Science Limited, Amsterdam, 1997.
- [7] Tönshoff, H.-K.; Kaak, R.; Christoph, G.; Mester, O.: „Festigkeitsverhalten blindgenieteter FVK/Stahl-Verbindungen“. VDI-Z Nr. 9/10, S.58-60, Springer - VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [8] Schürmann, H.: „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007.
- [9] Erb, T.; Mühlmeister, A.; Renz, R.: „CFRP components at Porsche – Vehicle projects and technical challenges“. Plastics in Automotive Engineering, Düsseldorf, 2011.
- [10] Kochan, Antje: „Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung im Automobilbau. Dissertation, Universität Dresden, 2011.
- [11] Hanke, R.: „Computertomographie in der Materialprüfung – Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen“. DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 2010.
- [12] Hübner, S.; Stackelberg, B. v.; Fuchs, T.: „Multimodale Defektquantifizierung“. DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 2010.
- [13] Oster, R.: „Einsatz der ZfP in der Entwicklung und Produktion bei Eurocopter Deutschland“. Carbon Composites e.V. Fachtagung, Augsburg, 2010.
- [14] Busse, G.: „Dynamische Thermografie für die zerstörungsfreie Prüfung“. Carbon Composites e.V. Fachtagung, Augsburg, 2009.
- [15] Berger, R.: „Optische Prüf- und Messtechnik in der Luftfahrt“. Carbon Composites e.V. Fachtagung, Augsburg, 2009.
- [16] Šrajbr, C.; Dillenz, A.: „Active Thermography – NDT Method for Structural Adhesive and Mechanical Joints“. Fügen im Karosseriebau, Bad Nauheim, 2012.
- [17] Siemer, U.: „Thermografische Prüfung von Fügeverbindungen im Karosseriebau“. DGZfP-Jahrestagung, Bremen, 2011.
- [18] Zwoch, S.; Reimche, W.; Klotz, J.; Bach, F.-W.: „Entwicklung einer Ultraschallprüftechnik zur Qualitätsbewertung von Bolzenschweißverbindungen“. DGZfP-Jahrestagung, Münster, 2009.
- [19] Zweschper, Th.: „Active Thermography for non-destructive testing of car body components“. Fügen im Automobilbau, Bad Nauheim, 2007.
- [20] Berke, M.; Witte, H.: „Vollständige Dokumentation bei der manuellen Schweißnahtprüfung“. DGZfP-Jahrestagung, Münster, 2009.
- [21] Wilhelm, M.: „Fügen von CFK mit Stahl“. BMW ProMotion Dialogtag, München, 2012.