

Innovatives ressourcenschonendes Konzept zur Bohrbearbeitung von GFK-Metall-Verbunden

Qualitätsbohrungen in Hybrid-Verbundwerkstoffen

B. Winter, T. Bruchhaus, K. Dröder

Die spanende Bearbeitung hybrider Leichtbaustrukturen ist aufgrund der Kombination unterschiedlicher Materialien und den daraus resultierend divergierenden Bearbeitungsparametern herausfordernd. Um die strukturelle Integrität der Werkstoffe bei Bohrprozessen zu gewährleisten, wurde ein Werkzeugkonzept entwickelt, das für thermoplastbasierte GFK-Stahl-Verbunde schädigungsfreie Bohrungen im Verbund ermöglicht. Neben dem Werkzeugkonzept selbst wird die experimentelle Validierung aufgezeigt.

STICHWÖRTER

Leichtbau, Werkzeuge, Bohren

High-quality drill holes in hybrid composites

Machining lightweight hybrid structures is challenging due to the combination of different materials and the resulting different machining parameters. To maintain the structural integrity of the materials, the paper presents a tooling method for thermoplastic-based GRP-steel hybrid composites, enabling damage-free holes to be drilled in the composite. In addition to the resource-efficient tooling method, experimental validations are presented.

1 Herausforderungen bei der Zerspanung von Hybridverbunden

Der hybride Leichtbau zeichnet sich durch die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe aus, um unter gezielter Ausnutzung der spezifischen Eigenschaften der Einzelwerkstoffe ein anwendungsspezifisches Eigenschaftsprofil zu ermöglichen. Dadurch können unter anderem höhere spezifische Steifigkeiten, bessere Dämpfungseigenschaften sowie höhere Energieabsorptionsraten erreicht werden. Zudem bietet der hybride Leichtbau Potenziale zur Massenreduktion von Bauteilen und Systemen und trägt folglich zur Verringerung der benötigten Energie bei, welche zur Bewegung der Systeme nötig ist [1–3]. Diese Vorteile werden unter anderem im Automobilbau, in der Luftfahrt, der Windenergie und dem Schienenverkehr für diverse Bauteile genutzt, in denen vielfältig faserverstärkte Kunststoffe (FVK) mit Metallen kombiniert werden [2, 4]. Während in der Luft- und Raumfahrtbranche bei hybriden Bauteilen vorwiegend Nichteisenmetalle zum Einsatz kommen, werden in der Automobilindustrie überwiegend Stähle verwendet, um vor allem bei Strukturbau Teile die passive Sicherheit im Falle von Unfällen zu erhöhen [5, 6]. Unabhängig von dem verwendeten Material steht die Reduktion der Masse zur Verringerung von Treibstoff- und Energieverbrauch für die Antriebe als Kernmotivation im Vordergrund.

Den vorteilhaften Bauteileigenschaften hybrider Strukturen stehen aufwendige Fertigungsprozesse gegenüber, welche durch unterschiedliche Herausforderungen geprägt sind. Bei der Bearbeitung hybrider Strukturen im Verbund stellen die unterschiedlichen verwendeten Werkstoffe verschiedene, teils gegensätzliche Anforderungen an den Zerspanprozess. Während die meisten

Metalle ein homogenes und duktiles Verhalten aufweisen und die Bearbeitung durch Scherung und plastische Verformung erfolgt – wodurch stabile Schnittbedingungen erreicht werden – führt die Bearbeitung von FVK zu unkontrollierten, intermittierenden Brüchen im Material.

FVK sind inhomogene Werkstoffe und bestehen aus harten, spröden Fasern, die in eine weiche, duktile, gering wärmeleitende Polymermatrix eingebettet sind. Polymere weisen im Gegensatz zu Metallen eine geringe Temperaturbeständigkeit auf. Dadurch erfährt der Zerspanprozess Limitierungen hinsichtlich maximal auftretender Prozesstemperaturen. Neben den thermischen Randbedingungen erschweren oszillierende Schnittkräfte die Zerspanung. Somit werden Materialausbrüche begünstigt, die erhöhten Produktionsausschuss und gesteigerten Ressourceneinsatz zur Folge haben.

Zudem sind die Werkzeugstandzeiten aufgrund der abrasiven Wirkung der spröden Fasern im Verbund negativ beeinflusst. Die Werkzeugschneiden werden stärker beansprucht, weshalb die Auslegung der Schneidegeometrie und Prozessparameter anwendungs- und beanspruchungsgerecht erfolgen muss. Werden die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften der im Verbund vorliegenden Werkstoffe nicht im Zerspanprozess berücksichtigt, tritt nicht nur hoher Verschleiß an den verwendeten Werkzeugen auf, sondern auch Werkstoffschädigungen am Werkstück. So können am FVK unter anderem Schädigungen in Form von Delamination und Faserausbrüchen auftreten, welche ohne Nachbearbeitung zu einer Reduzierung der Lebensdauer eines FVK-Werkstücks führen [7, 8].

Die Schädigungen, die aufgrund zerspanender Bearbeitungsprozesse im FVK auftreten, sowie vor allem deren Vorbeugung,



Bild 1. Gefertigtes Stufenbohrwerkzeug. Foto: FGW

sind bereits Gegenstand einer Vielzahl von Forschungen, die in *Fleischer et al.* [9] oder *Ge et al.* [10] zusammengefasst sind. In diesen Untersuchungen wurden neben optimierten Prozessparametern, Werkzeugbeschichtungen und Prozessführungen auch verschiedene Werkzeuggeometrien betrachtet. Dabei erzielte unter anderem der Stufenbohrer vielversprechende Ergebnisse bei gleichzeitig geringer Schädigung des FVK [11]. *Wang et al.* haben diese Grundform dahingehend weiterentwickelt, dass der erzeugte Span bei der Bearbeitung von Verbunden aus kohlenstofffaser-verstärktem Kunststoff (CFK) und Aluminium besser gebrochen und die Bohrungsqualität dadurch gesteigert werden kann [12]. Eine Alternative zu Bohrprozessen ist das Zirkularfräsen, bei dem zusätzlich zu der Rotationsbewegung des Werkzeugs ein gleichzeitiges Verfahren auf einer helikalen Kreisbahn stattfindet. Somit lassen sich im Vergleich zu konventionellen Bohrprozessen qualitativ hochwertigere Bohrungen in FVK-Werkstoffen erzeugen [13].

Gebhardt et al. haben als Alternative zu kontinuierlich ablaufenden Bearbeitungsprozessen ein radial zustellbares Bohrwerkzeug zur Bearbeitung von CFK-Titan-Verbunden entwickelt [14]. Dieses Werkzeug ermöglicht durch drei Durchmessersegmente und fünf Schneiden ein Bearbeiten des Hybridverbunds in beide Richtungen. Dabei wird die obere Lage zunächst vorgebohrt und anschließend auf den Solldurchmesser aufgebohrt. Beim Rückhub wird durch eine Drehrichtumkehrung das Bohrwerkzeug radial zugestellt und die untere Lage durch eine Schneide am verjüngten Segment zerspannt. Je nach Bearbeitungsrichtung sind dabei die Spitzenwinkel an das jeweilige zu bearbeitende Material angepasst.

Die hier aufgezeigten Untersuchungen beziehen sich zumeist auf die Zerspanung von duromerbasierteren FVK im Verbund mit metallischen Leichtbauwerkstoffen. Für die Erzeugung von Bohrungen in Hybridverbunden aus thermoplastbasierten GFK (glasfaserverstärkten Kunststoffen) und Stählen, die beispielsweise in Strukturbau Teilen im Automobilbau Anwendung finden [15, 16], existieren bislang keine optimalen Werkzeuglösungen, mit denen eine je nach Anwendung geforderte Bohrungsqualität erzeugt

werden kann. Um für diese Anwendungsfälle geeignete Lösungen zu entwickeln, wird im Folgenden ein Werkzeugkonzept vorgestellt, mit dem schädigungsfreie Bohrungen im GFK-Stahl-Verbund mit einer Grundtoleranz von IT10 erzeugt werden können. Zusätzlich wird die Validierung in der Anwendung mit Bearbeitungszentren und robotergeführter Prozesstechnik aufgezeigt.

2 Dreistufiges Werkzeugkonzept

Die aufgezeigten Forschungsergebnisse zeigen bereits anhand angepasster Werkzeuggeometrien und Prozessstrategien Möglichkeiten zur Zerspanung von CFK im Verbund mit metallischen Leichtbauwerkstoffen auf. Diese Erkenntnisse werden für die Bearbeitung von thermoplastbasiertem GFK im Verbund mit Stahl auf ein innovatives Werkzeugkonzept in modifizierter Form übertragen. Dabei wird eine Dreiteilung vorgenommen, welche sich in die folgenden Prozessschritte unterteilt:

- Vollbohren des Werkstoffverbundes mit einem Durchmesser erheblich kleiner als der Solldurchmesser
- Aufbohren der oberen Lage in Bohrvorschubrichtung auf den Solldurchmesser
- Helikales Auffräsen der unteren Lage im Rückhub auf den Solldurchmesser

Anhand dieser Bearbeitungsschritte ist das in **Bild 1** dargestellte Vollhartmetall-Stufenwerkzeug abgeleitet, das zwei Schneiden für die Vollbohroperation, zwei für den stoßenden Aufbohrprozess und ebenfalls zwei Schneiden für den abschließenden helikalen Fräsprozess aufweist.

Das Werkzeug ist für Bohrungen mit einem Durchmesser von 6 mm dimensioniert, wobei der vordere Schaft für das Vollbohren einen Durchmesser von 5,0 mm aufweist, der hintere Schaft zum Aufbohren 6,0 mm sowie der verjüngte Schaft 3,8 mm. Am Übergang vom verjüngten Schaft zum 5,0-mm-Schaft befinden sich die Schneiden zum helikalen Auffräsen.

Das Ziel der initialen Vollbohrung ist, eine Vorbohrung für die nachfolgenden Prozessschritte zu fertigen. Dadurch werden die Zerspankräfte, insbesondere die Vorschub- und Schnittkraft, während des Aufbohr- sowie Auffräsprozesses reduziert, was wiederum die Erzeugung schädigungsfreier Bohrungen begünstigt. Folglich muss die Qualität der Bohrung dahingehend ausreichen, dass auftretende Schädigungen wie Delamination und Faserausbrüche im GFK sowie Gratbildung im Stahl bis zum gewünschten Solldurchmesser der Bohrung durch die anschließenden Operationen behoben werden können. Das anschließende Aufbohren erfolgt in der oberen Materiallage bis zum Anfassen der unteren Materiallage, die eine stützende Wirkung aufweist und vor allem im GFK ein Ausbrechen der Fasern verhindert.

Nach dem Aufbohren wird das Werkzeug soweit aus der Bohrung herausgefahren, bis der verjüngte Schaft frei in der Bohrung steht. Für das abschließende helikale Auffräsen erfolgt ein Herausstellen des Werkzeugs aus der Bohrungsmitte und ein Zerspanen der unteren Materiallage durch die Auffräschneiden anhand einer helikalen Bahnbewegung. In dem hier aufgezeigten Stufenwerkzeug beträgt die maximale Herausstellung 0,6 mm ohne einen unerwünschten Kontakt des vorderen Schafts mit dem Hybridverbund zu erhalten. Abschließend wird das Werkzeug wieder in die Bohrungsmitte positioniert und kontrolliert herausgefahren. Die Kombination der stoßenden Bearbeitung im oberen und die ziehende im unteren Bereich hat das Ziel, dass die resul-

tierende Bohrung im Stahl grätfrei sowie im GFK schädigungsfrei in Form von Delamination und Faserausbrüchen hergestellt wird.

Da das Vorbohren in beiden Bearbeitungsrichtungen sowohl durch den GFK als auch durch den Stahl erfolgt, wurde ein Spitzensinkel von 120° gewählt, welcher eine Kompromisslösung aus den jeweils materialspezifisch zu wählenden Spitzenswinkeln ist. Zudem soll das hier aufgezeigte Werkzeugkonzept zunächst unabhängig von der Bearbeitungsrichtung eingesetzt werden können. Aus diesem Grund wurden die Aufbohr- sowie Auffrässchneiden ebenfalls mit einem Spitzensinkel von 120° versehen. In einer späteren Anwendung mit festgelegter Bearbeitungsrichtung ist eine Anpassung der Aufbohr- sowie Auffrässchneiden hinsichtlich des Spitzenswinkels an das jeweilige Material anwendungskonform umsetzbar.

3 Untersuchung der Leistungsfähigkeit

Für die Validierung der Funktions- und Leistungsfähigkeit des vorgestellten Stufenwerkzeugs in der Anwendung sind Versuche erforderlich. Da GFK-Stahl-Verbunde vor allem für Großstrukturen hohe Potenziale bieten, sind flexibilisierte und durch weitere Achsen potenziell mit sehr großem Arbeitsraum einsatzfähige Zerspanungslösungen ebenso Teil dieser Validierung. Deshalb wird im Folgenden ein Einsatz des Werkzeugkonzepts sowohl innerhalb einer konventionellen Werkzeugmaschine als auch mithilfe eines Industrieroboters untersucht, um potenzielle Herausforderungen und Schwachstellen des mehrstufigen Werkzeugkonzepts für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche aufzuzeigen.

Für die Aufnahme des GFK-Stahl-Verbundes aus PP-basiertem Verbundwerkstoff mit 47% Glasfaseranteil und einem Dualphrasenstahl DP600 mit einer jeweiligen Materialstärke von 2 mm wird eine definierte Spannvorrichtung verwendet. Diese Vorrichtung ermöglicht eine Bearbeitung von Verbundplatten der Größe 40 mm x 300 mm und gewährleistet, dass diese weder beim Bohren noch beim im Rückhub erfolgenden helikalen Auffräsen eine axiale Bewegung durch Biegung erfährt. Zusätzlich ist eine Bearbeitung sowohl von geklebten Verbundplatten als auch von lediglich aufeinander gelegten Einzelplatten möglich (**Bild 2**). Diese Vorrichtung wird sowohl im Bearbeitungszentrum als auch für den Industrieroboter verwendet.

Als Ausgangsbasis wird das Stufenwerkzeug zunächst in einem Bearbeitungszentrum „Spinner VC450“ eingespannt und grundlegende Untersuchungen zur Bestimmung nutzbarer Prozessparameter zur Erzeugung von anforderungsgerechten Bohrungen durchgeführt. Hierbei basiert eine anforderungsgerechte Bohrung auf dem Kriterium der Maßgenauigkeit von konventionellen Wendelbohrern, die eine prozesssicherer einzuhaltende Toleranz von mindestens IT10 aufweisen. Des Weiteren dürfen die erzeugten Bohrungen keine sichtbare Schädigung in Form von Faserausbrüchen und Delamination im GFK, einer Gratbildung im Stahl sowie einer Grenzschichtablösung zwischen GFK und Stahl aufweisen. Im Anschluss erfolgen Zerspanversuche mithilfe eines Industrieroboters mit montierter Spindel, um die Übertragbarkeit der zuvor festgelegten Prozessparameter zu prüfen. Abschließend werden Standzeitversuche für beide Bearbeitungsrichtungen am Industrieroboter durchgeführt.

Aufgrund der geringeren Steifigkeit des Industrieroboters im Vergleich zu Bearbeitungszentren werden im Zerspanprozess stärkere Vibrationen erwartet, die wiederum in einer höheren Belastung auf das Werkzeug resultieren. Folglich wird von einem



Bild 2. Versuchsaufbau auf einem Bearbeitungszentrum. Foto: FGW

höheren Verschleiß der Werkzeugschneiden am Industrieroboter ausgegangen und die definierte Standzeit als Mindeststandzeit für Bearbeitungszentren angesehen.

3.1 Parameteruntersuchung im Bearbeitungszentrum

Für die Versuche mit einer konventionellen Werkzeugmaschine wird ein CNC-Bearbeitungszentrum Spinner VC450 eingesetzt. Das Ziel der Untersuchung ist die Identifikation eines geeigneten Parametersatzes zur prozesssicheren Bearbeitung des Hybridverbundes sowie die Erzeugung von Bohrungen in der zuvor definierten anforderungsgerechten Qualität sowohl in der Bearbeitungsrichtung von Stahl in GFK als auch umgekehrt.

Da es sich bei dem Werkzeugkonzept zunächst um eine Werkzeuggestaltung für die richtungsunabhängige Bearbeitung ohne materialspezifisch angepasste Werkzeugschneiden handelt, werden Prozessparameter, bestehend aus Schnittgeschwindigkeit v_c und Vorschub f , für das Vor- und Aufbohren identifiziert, welche für beide Bearbeitungsrichtungen universell einsetzbar sind. Zur Reduktion der Prozesszeit wird das Vor- und Aufbohren in einer Bewegung durchgeführt, weshalb die Prozessparameter für beide Teilprozesse identisch sind. Beim helikalen Auffräsprozess sind die Prozessparameter der Schnittgeschwindigkeit v_c und der Mittelpunktbahngeschwindigkeit v_{fk} Bestandteil der Untersuchungen. Die axiale Schnitttiefe a_p von 0,1 mm sowie die Herausstellung des Stufenwerkzugs aus der Bohrungsmitte Δx von 0,5 mm werden nicht variiert.

Bei den Vor- und Aufbohrversuchen ergeben sich bei der Bearbeitungsrichtung insbesondere von Stahl in GFK mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 75 \text{ m/min}$ und einem Vorschub $f = 0,075 \text{ mm/U}$ anforderungsgerechte Bohrungsqualitäten im Stahl sowie geringe Schädigungen in Form von Faserausbrüchen im GFK, die durch das anschließende helikale Auffräsen behoben werden können. In umgekehrter Bearbeitungsrichtung ist diese Parameterkombination grundsätzlich auch für eine anforderungs-



Bild 3. Links: Bandspanbildung am Werkzeug. Rechts: resultierende Beschädigung des GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff). Foto: FGW



Bild 4. Resultierende Bohrungsqualität, links: der GFK-Seite und rechts: der Stahl-Seite. Foto: FGW

gerechte Bohrungsqualität nutzbar, jedoch bilden sich vermehrt Bandspäne beim Vorbohren der Stahllage (**Bild 3** links), die in Spanwicklern um das Werkzeug und die Werkzeugaufnahme resultieren.

Daraus folgt eine Beschädigung der oben liegenden GFK-Lage (**Bild 3** rechts), weshalb die Prozesssicherheit nicht gegeben ist. Die thermoplastische GFK-Matrix wird thermisch so stark überlastet, dass sie erweicht, die Fasern teilweise aus der Matrix herausgezogen werden und Delaminationseffekte auftreten. Dieser Effekt tritt auch bei einer Variation der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs auf. Die Schädigungen sind teilweise derart ausgeprägt, dass sie durch die nachfolgende stoßende Aufbohroperation nicht vollständig entfernt werden.

Durch den Einsatz eines vibrationsunterstützenden Bohradapters oder durch das Programmieren von Spanbruchzyklen kann ein zuverlässiger Spanbruch erreicht und damit auch die Boh-

rungsqualität verbessert werden (**Bild 4** links), sodass durch das Aufbohren eine anforderungsgemäße Bohrung hergestellt werden kann.

Für die Bearbeitungsrichtung von Stahl in GFK hat der Effekt der Bandspäne keinen Einfluss auf die unten liegende GFK-Lage, jedoch entstehen in der Bohrungswand der Stahllage Reibmarken. Diese haben zwar keinen Einfluss auf die zuvor definierte anforderungsgerechte Bohrungsqualität der Stahllage, können aber zu einem erhöhten Verschleiß des Werkzeugs sowie einer erhöhten Wärmeentwicklung führen. Durch die bereits beschriebene Spanbruchstrategie können diese Reibmarken ebenfalls vermieden werden, weshalb diese Strategie auch für die Bearbeitungsrichtung von Stahl in GFK übernommen wird.

Das im Rückhub erfolgende helikale Auffräsen führt sowohl für die Bearbeitungsrichtung von Stahl in GFK als auch umgekehrt mit einer Schnittgeschwindigkeit von 200 m/min und einer

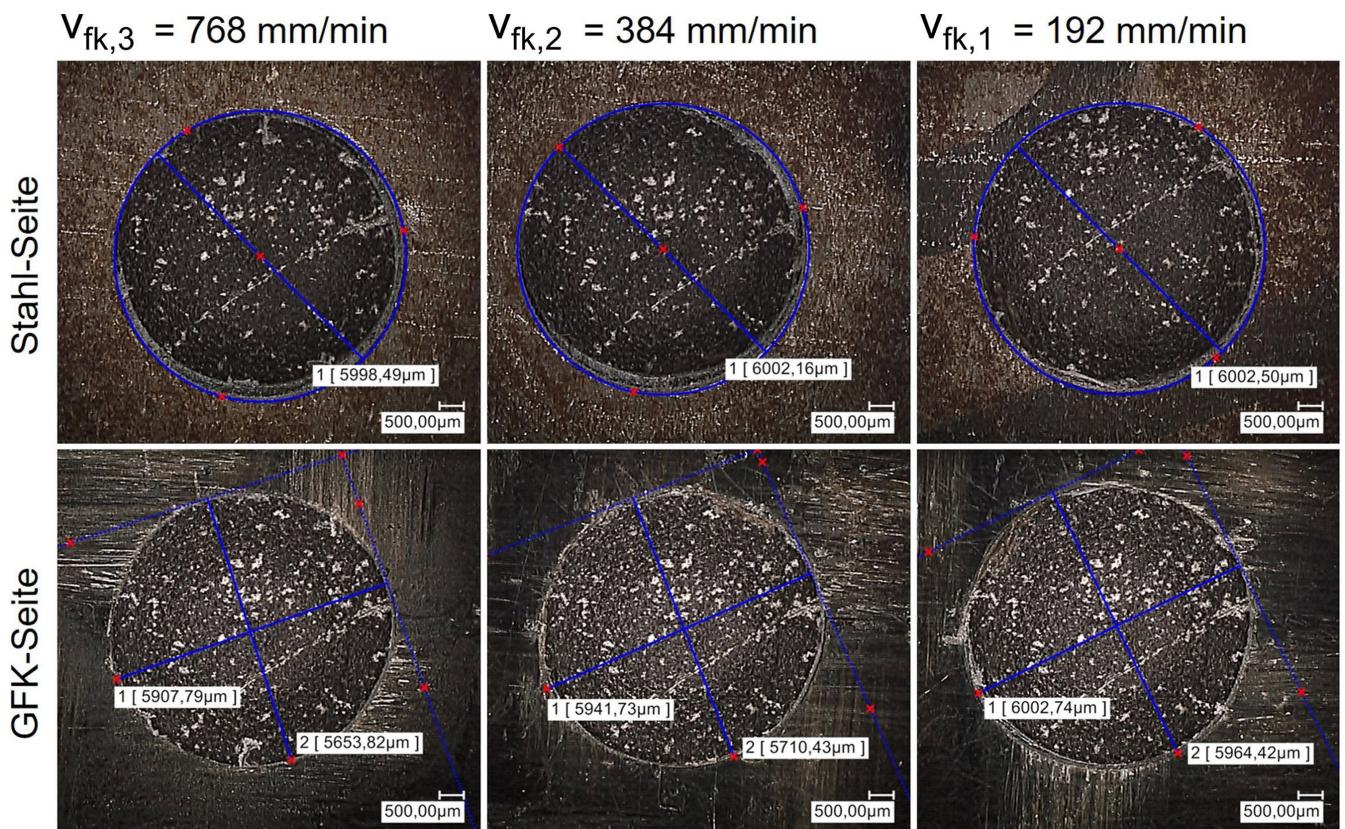


Bild 5. Resultierende Bohrungen unter Verwendung konstanter Vor- und Aufbohrparameter ($v_c = 75 \text{ m/min}$, $f = 0,075 \text{ mm}$) und variierenden Vorschubgeschwindigkeiten beim helikalen Rückwärtsfräsprozess mit einem Industrieroboter. Foto: IWF

Mittelpunktbahngeschwindigkeit von 762 mm/min zu anforderungsgerechten Bohrungsqualitäten. Dabei leitet sich die Mittelpunktbahngeschwindigkeit aus vier Kreisbewegungen je Sekunde ab. Die Stahllage kann prozesssicher mit schädigungsfreien Bohrungskanten und einem Solldurchmesser innerhalb der Toleranzklasse IT10 bearbeitet werden (Bild 4 rechts), wobei der zuvor entstandene Ausbohrgrat vollständig entfernt wird. In umgekehrter Reihenfolge wird die GFK-Lage ebenso schädigungsfrei auf den Solldurchmesser mit geforderter Toleranzklasse aufgefräst.

Aus den grundlegenden Untersuchungen wird deutlich, dass mit den ermittelten Prozessparametern der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 75 \text{ m/min}$ und des Vorschubs $f = 0,075 \text{ mm/U}$ beim Vor- und Aufbohren in beide Bearbeitungsrichtungen anforderungsgerechte Bohrungen der oberen Lage und schädigungsarme Bohrungen der unteren Lage erzeugbar sind. Durch die ausgelegte Werkzeuggeometrie ist jedoch kein zuverlässiger Spanbruch möglich, wodurch vor allem der GFK als obere Lage beschädigt wird. Dieser Effekt lässt sich durch einen Spanbruchzyklus beheben und wird für beide Bearbeitungsrichtungen angewendet.

Das abschließende helikale Auffräsen auf den Solldurchmesser mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 200 \text{ m/min}$, einer Mittelpunktbahngeschwindigkeit $v_c = 762 \text{ mm/min}$, einer Schnitttiefe $a_p = 0,1 \text{ mm}$ und einer Herausstellung des Werkzeugs aus der Bohrungsmitte $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$ erzielt ebenso anforderungsgerechte Bohrungsqualitäten der unteren Lage. Die hier ermittelten Bearbeitungsparameter werden im Folgenden als Startwerte für die Bearbeitung mit einem Industrieroboter gewählt.

3.2 Überführung auf einen Industrieroboter

Die Untersuchungen am Bearbeitungszentrum zeigen, dass mit dem Werkzeugkonzept die Erzeugung qualitativer Bohrungen im GFK-Stahl-Verbund in beide Bearbeitungsrichtungen möglich ist. Bei der Überführung der Ergebnisse auf einen Industrieroboter stellt sich die Herausforderung, ob die geringere Systemsteifigkeit des Industrieroboters den Anforderungen nachkommen kann. Die nachfolgenden Untersuchungen erfolgen mit einem Kuka Industrieroboter „KR300 R2500 Ultra“, einer angebrachten Diebold Schwenkspindel „HSG-S 180.24-37.AK.2“ und der zuvor beschriebenen Aufnahme für die GFK-Stahl-Verbundplatten. Es werden erneut beide Bearbeitungsrichtungen untersucht.

Die bereits verwendeten Prozessparameter für das Vor- und Aufbohren zeigen auch in diesem Szenario qualitative Bohrungsergebnisse, die die definierten Anforderungen erfüllen. Während die jeweils zuerst zu bearbeitende Werkstoffsschicht nach dem Aufbohren keine Schädigungen aufweist und im Solldurchmesser von 6 mm mit geforderter Grundtoleranz IT10 liegt, weisen die vorgebohrten Bohrungen der unten liegenden Lage nur geringfügige Schädigungen in Form von Gratbildung beim Stahl und Faserüberständen in der Bohrung beim GFK auf. Diese können durch den abschließenden helikalen Fräsprozess behoben werden. Allerdings ist diese finale Bearbeitung nur sehr eingeschränkt mit dem verwendeten Industrieroboter umsetzbar. Der helikale Fräsprozess weist die Grenzen des eingesetzten Industrieroboters deutlich auf. Wie in Bild 5 dargestellt, entsteht bei voller Vorschubgeschwindigkeit $v_{k,3} = 768 \text{ mm/min}$ des Industrieroboters beim helikalen Fräsprozess keine den Toleranzen entsprechende

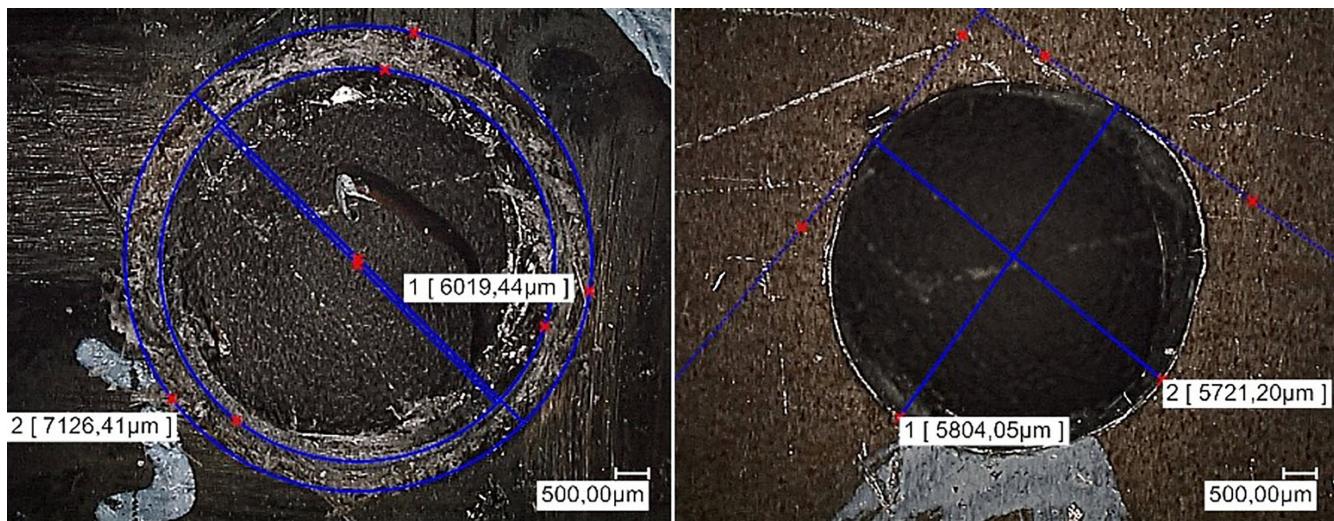


Bild 6. Bohrungsqualitäten in Bearbeitungsrichtung GFK-Stahl nach Erreichen des Standzeitendes von 168 Bohrungen, links: auf der GFK-Seite und rechts: auf der Stahl-Seite. Foto: IWF

kreisförmige Bohrung. Erst durch das Reduzieren dieser Vorschubgeschwindigkeit formt sich eine annähernd kreisförmige Bohrung. Diese Beobachtung kann sowohl beim Fräsprozess von Stahl als auch von GFK festgestellt werden. Als Herausforderungen werden die verbundenen mitschwingenden Massen in der Bewegung im Vergleich zu der vorgesehenen, für die Genauigkeiten des Roboters vergleichsweise kleinen Kreisbewegung angesehen.

Für den Auffräsprozess verfährt der Industrieroboter das Werkzeug analog zum Bearbeitungszentrum um 0,5 mm aus der Bohrungsmitte heraus und bewegt sich entlang der einprogrammierten Helixbahn mit einer Steigung $\Delta h = 0,1$ mm um die Bohrungsmitte herum aus dem GFK-Stahl-Verbund. Mit der Vorschubgeschwindigkeit $v_{fk,3}$ ergeben sich ungefähr vier Kreisumdrehungen pro Sekunde, welche der Industrieroboter anhand von Punkten auf der Bahn überschleifend anzufahren versucht. Durch die hohe Bahngeschwindigkeit und den mitschwingenden Massen ist es dem Industrieroboter nicht möglich, diese Punkte einzeln genau genug anzufahren, sondern nur die Start- und Endpunkte. Auch bei Anpassung der Überschleifparameter verändert sich aufgrund der hohen Sollgeschwindigkeit das Resultat nicht sichtbar. Daher wird davon ausgegangen, dass die Grenzen der Bahngenaugkeit nicht den Anforderungen genügen.

Anhand dieser Erkenntnisse lässt sich eine Überführung der ermittelten Prozessparameter unter Verwendung eines Bearbeitungszentrums nur bedingt auf einen Industrieroboter gewährleisten. Für den verwendeten Industrieroboter sind die Parameter der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 75$ m/min und des Vorschubs $f = 0,075$ mm für das Vor- und Aufbohren im Prozess keine Herausforderung für Werkzeug und Werkstück, jedoch muss die Vorschubgeschwindigkeit beim helikalen Fräsprozess zur Erreichung einer anforderungsgerechten Bohrungsqualität auf $v_{fk} = 192$ mm/min reduziert werden. Dabei bildet sich zwar keine kreisrunde Bohrung aus, jedoch liegt der Solldurchmesser an allen gemessenen Stellen innerhalb der Grundtoleranz IT10. Mit diesen Prozessparametern wird im Folgenden das Zeitverhalten des entwickelten Stufenwerkzeugs bestimmt, um die Nutzbarkeit im industriellen Einsatz zu untersuchen.

3.3 Zeitverhalten

Zur Abschätzung möglicher Einflüsse auf den Verschleiß durch die Stoß- und Rückzugsbelastung werden erste Standzeitversuche mit je einem Stufenwerkzeug je Bearbeitungsrichtung durchgeführt. Dies ermöglicht es, die unterschiedlichen Eingriffszeiten und auftretenden Bearbeitungskräfte an den jeweiligen Schneiden sowie der richtungsabhängigen Bearbeitung zu differenzieren. Die Versuche werden mit dem als anspruchsvoller erwarteten Einsatz am Industrieroboter durchgeführt. Als Kriterium der Standzeit wird die Qualität der erzeugten Bohrungen herangezogen und anhand ihrer Form und Abweichung bewertet. Außerdem werden die umliegenden Regionen des Werkstücks auf Schädigungen geprüft. Sobald die Form der erzeugten Bohrung derart von der Sollgeometrie abweicht, dass ein nachträgliches Einstellen der Bahnbewegung des Stufenwerkzeugs diese Abweichung nicht mehr ausgleichen kann oder Schädigungen im Hybridverbund auftreten, ist das Standzeitende des Stufenwerkzeugs erreicht. Bei dieser Untersuchung ist die zugrunde liegende Formabweichung der erzeugten Bohrungen durch den Industrieroboter bereits berücksichtigt.

Das Stufenwerkzeug wird beim helikalen Fräsprozess in den durchgeföhrten Untersuchungen um 0,5 mm aus der Bohrungsmitte herausgestellt. Geometrisch bedingt ist die maximale Herausstellung 0,6 mm, ehe es bei weiterem Verfahren des Stufenwerkzeugs aus der Bohrungsmitte zu einer Kollision des 5,0-mm-Schafts mit dem Hybridverbund beim helikalen Fräsprozess kommt. Somit kann durch die Herausstellungsvariation im idealen Fall ein zuvor erzeugter Durchmesser von mindestens 5,8 mm noch ausgeglichen werden. Ein weiteres Kriterium der Standzeiterreichung ist die Erzeugung von Bohrungen mit einem größeren Durchmesser als der Zielgröße von 6 mm, die unter anderem durch Aufbauschneiden am Werkzeug entstehen können. Die Untersuchung der Bohrungsqualitäten erfolgt nach je 14 Bohrungen unter Verwendung eines Mikroskops „VW9000“ der Firma Keyence.

Für die Bearbeitungsrichtung GFK in Stahl zeigten sich nach 168 Bohrungen erkennbare Abnutzungen des Stufenwerkzeugs. Während die umliegende GFK-Schicht nach 154 Bohrungen

weiterhin keine kritische Schädigung sowie die erzeugte Bohrung keine signifikante Form- und Maßabweichung zur ersten eingebrachten Bohrung aufweist, entstehen nach 168 Bohrungen Beschädigungen in Form von Ausfransungen und Delamination (**Bild 6 links**). Ebenso ist ein abweichendes Bohrungsbild auf der Stahlseite zu erkennen (**Bild 6 rechts**).

Die erzeugte Bohrung weist nur noch 5,8 mm in der längsten Richtung auf. Des Weiteren verbleibt ein Span an der Bohrungswandung, was wiederum auf eine Schädigung der Schneide hindeutet. Die Mikroskopaufnahmen der Schneiden bestätigen diese These. Die Auffrässchneide weist einen Ausbruch an der äußeren Kante auf (**Bild 7**), während die vordere Schneide zum Vorbohren sowie die Schneide zum Aufbohren keine kritischen Verschleißmerkmale aufweisen. Durch das Herausbrechen der Schneidenecke und den Verschleiß der übrigen Schneidkante liegt kein kontrolliertes Zerspanen der Stahlseite mehr vor. Durch die fehlende Schneidenecke und dem Verfahrweg des Industrieroboters wird außerdem der letzte Bereich der Stahlseite nicht mehr ausreichend bearbeitet, wodurch der Span an der Bohrungswandung verbleibt.

Für die Bearbeitungsrichtung Stahl in GFK wiederum zeigen sich nach etwa 504 Bohrungen erste Verschleißerscheinungen, welche zu einem Erreichen des Standzeitendes führen. Dabei ist keine Beschädigung der jeweiligen Komponente beim Bohren und helikalen Fräsprozess festzustellen, sondern ein exzentrisches Eintauchen des Stufenwerkzeugs in den Hybridverbund, was eine unrunde Bohrung zur Folge hat (**Bild 8**).

In Mikroskopaufnahmen ist die gegenüberliegende Bohrungskante mit einem Versatz von etwa 0,2 mm an mehreren Stellen zu erkennen. Außerdem unterschreitet der erzeugte Durchmesser in der GFK-Schicht den zulässigen Minimalwert von 5,8 mm. Die Aufnahmen des Stufenwerkzeugs weisen dabei eine beschädigte und abgestumpfte Vorderschneide (**Bild 9**) auf, die beim Eindringen in das Stahlblech durch hohe Reibprozesse dunklen und verdichteten Span erzeugt. Die Untersuchung der Auffräschneide und Aufbohrschnäide zeigen hingegen nur geringe Verschleißmerkmale.

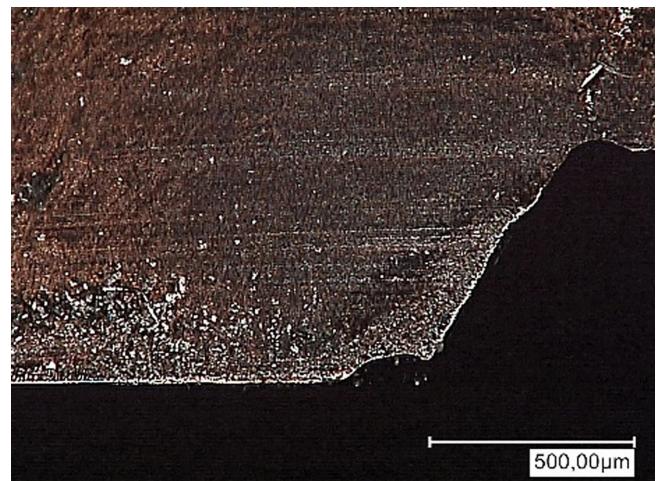


Bild 7 Mikroskopaufnahme der geschädigten Auffrässchneide. Foto: IWF

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der hybride Leichtbau kombiniert verschiedene Werkstoffe, um optimale Eigenschaften für spezifische Anwendungen zu erzielen. Allerdings stellt die zerspanende Bearbeitung hybrider Strukturen eine große Herausforderung dar, da sich die Materialeigenschaften der Verbundpartner stark unterscheiden, wodurch materialspezifisch angepasste Werkzeuggeometrien und Prozessparameter notwendig sind. Während Metalle meist homogen und duktil sind, bestehen FVK aus spröden Fasern und einer weichen, vergleichsweise temperaturanfälligen Polymermatrix.

Diese unterschiedlichen Materialeigenschaften erschweren die Zerspanung und führen zu hohem Werkzeugverschleiß sowie Materialschädigungen wie Delamination und Faserausbrüchen im FVK. Dies kann im schlimmsten Fall zur Fertigung von nicht anforderungsgerechten Bauteilen und folglich zu Ausschuss führen.

Es existieren bereits verschiedene Prozessstrategien und Werkzeuggeometrien, um die Bohrungsqualität im Verbund und die Standzeit der Werkzeuge zu verbessern. Diese Ansätze zielen aber meist auf duromerbasierte CFK und Verbunde mit Leichtmetallwerkstoffen ab. Für die zukünftig vielversprechenden thermo-

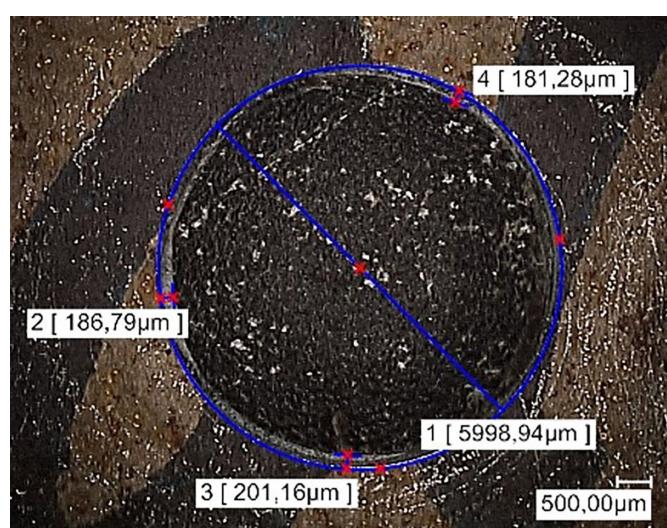
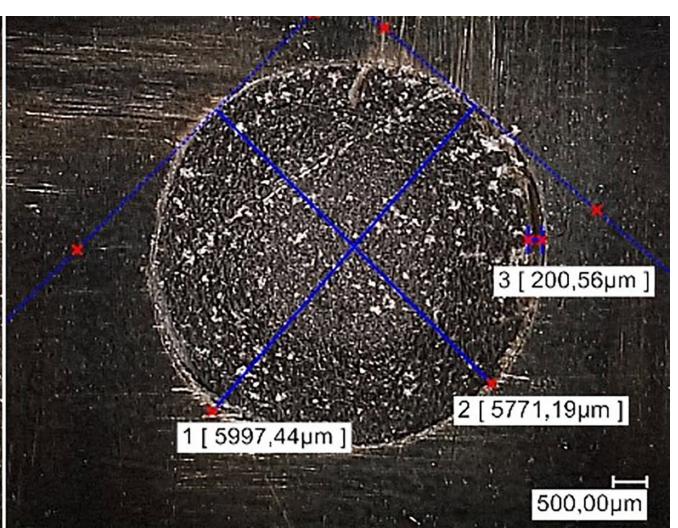


Bild 8. Bohrungsqualitäten in Bearbeitungsrichtung Stahl-GFK nach Erreichen des Standzeitendes von 504 Bohrungen, links: auf der Stahl-Seite und rechts: auf der GFK-Seite. Foto: IWF



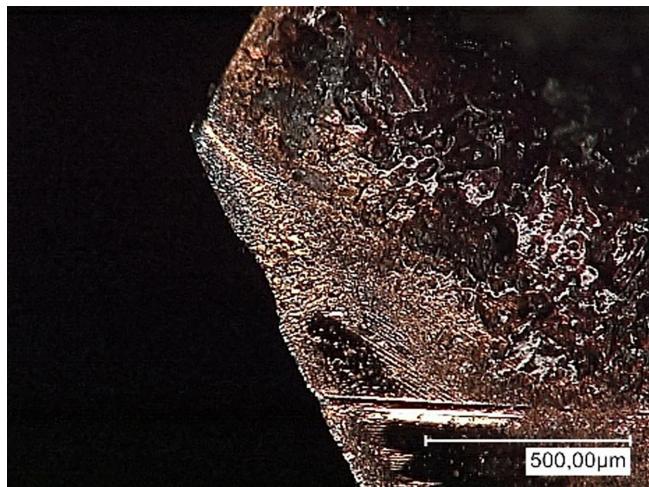


Bild 9. Mikroskopaufnahme der abgestumpften Vorbohrschneide. Foto: IWF

plastbasierten GFK-Stahl-Verbunde ist bislang keine ausreichende Lösung vorliegend.

An dieser Stelle konnte das hier präsentierte Werkzeugkonzept ansetzen, welches auf einem dreistufigen Zerspanprozess beruht. Ziel war die Erzeugung von qualitativen Bohrungen in einem GFK-Stahl-Hybridverbund für beide Bearbeitungsrichtungen. Erste Untersuchungen am Bearbeitungszentrum zeigten, dass mit einem Demonstratorwerkzeug qualitative Bohrungen mit einer Toleranz IT10 für den Durchmesser 6 mm im GFK-Stahl-Verbund in beide Bearbeitungsrichtungen möglich sind. Die Übertragung der Prozessparameter auf einen Industrieroboter war hingegen nur teilweise möglich. Während das Vor- und Aufbohren auch in diesem Fall gute Ergebnisse hervorbrachte, führte ein helikales Auffräsen der unteren Lage durch die Randbedingungen des Industrieroboters nur durch eine Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer ausreichenden Qualität der Bohrungen. Somit kann eine grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Werkzeugkonzepts als erwiesen angesehen werden.

Abschließende Untersuchungen zum Zeitverhalten im Einsatz mit einem Industrieroboter zeigten eine Standzeit von etwa 168 Bohrungen für die Bearbeitungsrichtung von GFK in Stahl. Dabei entstanden Ausbrüche an den Schneidkanten der Auffrässchneiden, welche zu einem unkontrollierten Zerspanen der Stahlseite führten, wodurch die geforderten Qualitätskriterien nicht erreicht wurden. Für die Bearbeitungsrichtung von Stahl in GFK zeigte sich dagegen eine höhere Standzeit von etwa 504 Bohrungen, bevor die Anforderungen an eine qualitative Bohrung nicht mehr erfüllt wurden. Der Verschleiß der Vorderschneide des Stufenwerkzeugs war derart ausgeprägt, dass das Werkzeug exzentrisch in den Verbund eindrang und durch die hohen Reibprozesse dunkel verfärbten Span erzeugte. Anhand dieser initialen Experimente ist eine höhere Standzeit des Werkzeugs für die Bearbeitungsrichtung von Stahl in GFK ersichtlich. Unabhängig von der Bearbeitungsrichtung weisen jedoch jeweils die Schneiden, welche im Stahleingriff sind, die ersten kritischen Verschleißerscheinungen auf.

Kritisch waren bei den Versuchen dabei nicht die initialen Vollbohroperationen, sondern vor allem die Aufbohr- und Fräsoperationen auf den Solldurchmesser. Hier besteht in zukünftigen Untersuchungen hinsichtlich der Schneidengestaltung und des Schneidstoffes für die Aufbohr- und die Fräsoperation weiteres

Optimierungspotenzial. Je nach Bearbeitungsfolge des GFK-Stahl-Hybridverbundes muss das jeweilige Material entweder durch die Aufbohr- oder die Auffrässchneiden bearbeitet werden. Diese Schneiden sollten entsprechend der anwendungsbezogenen Bearbeitungsrichtung auf die tribologischen Anforderungen des Materials und des Prozesses abgestimmt sein. Es ist zu erwarten, dass dadurch die Standzeit des entwickelten Werkzeugkonzepts deutlich gesteigert werden kann. Weiterhin können die Zerspanungsparameter gezielt den Eingriffsverhältnissen der einzelnen Schneiden angepasst werden. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob eine Durchmesseranpassung zu unerwarteten Skaleneffekten führt.

Zusammenfassend kann die Anwendbarkeit des entwickelten Werkzeugkonzepts durch die Demonstratoren als gegeben angenommen werden. Dabei müssen aufgrund der helikalen Fräsprozesse Anforderungen hinsichtlich der Bahngenaugkeiten durch die verwendeten Anlagen erfüllt sein. Mit den aufgezeigten weiteren Optimierungsansätzen besteht das Potenzial, dass derartige Werkzeugkonzepte die Zerspanung von Hybrid-Verbundwerkstoffen mit thermoplastischen Bestandteilen langfristig effizienter und ressourcenschonender gestalten.

FÖRDERHINWEIS

Das gemeinschaftliche IGF-Projekt 22306N wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

L iteratur

- [1] Fang, X.; Kloska, T.: Hybrid forming of sheet metals with long Fiber-reinforced thermoplastics (LFT) by a combined deep drawing and compression molding process. *International Journal of Material Forming* 13 (2020), pp. 561–575, doi.org/10.1007/s12289-019-01493-4
- [2] Lin, Y.; Min, J.; Teng, H. et al.: Flexural Performance of Steel-FRP Composites for Automotive Applications. *Automotive Innovation* 3 (2020), pp. 280–295, doi.org/10.1007/s42154-020-00109-x
- [3] Kavitha, K.; Vijayan, R.; Sathishkumar, T.: Fiber-metal laminates: a review of reinforcement and formability characteristics. *Materials Today. Proceedings* 22 (2020), pp. 601–605, doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.232
- [4] Reisgen, U.; Schiebahn, A.; Lotte, J. et al.: Innovative joining technology for the production of hybrid components from FRP and metals. *Journal of Materials Processing Technology* 282 (2020), doi.org/10.1016/j.jmatprot.2020.116674
- [5] Drössler, R.; Waffler, R.; Krahl, M. et al.: Tool technology for lightweight structures in 3-D hybrid designs. *Lightweight Design Worldwide* 11 (2018), pp. 42–47, doi.org/10.1007/s41777-018-0040-x
- [6] Lee, M.; Seo, H.; Kang, C.: Comparison of collision test results for center-pillar reinforcements with TWB and CR420/CFRP hybrid composite materials using experimental and theoretical methods. *Composite Structures* 168 (2017), pp. 698–709, doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.068
- [7] Sheikh-Ahmad, J.: *Machining of polymer composites*. New York: Springer- 2009, doi.org/10.1007/978-0-387-68619-6
- [8] Nguyen-Dinh, N.; Hejjaji, A.; Zitoune, R. et al.: Machining of FRP Composites: Surface Quality, Damage, and Material Integrity: Critical Review and Analysis. In: Sidhu, S.; Bains, P.; Zitoune, R. et al. (eds) *Futuristic Composites. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*. Singapore: Springer 2018, doi.org/10.1007/978-981-13-2417-8_1
- [9] Fleischer, J.; Teti, R.; Lanza, G. et al.: Composite materials parts manufacturing. *CIRP Annals* 67 (2018) 2, pp. 603–626, doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.005
- [10] Ge, J.; Catalanotti, G.; Falzon, B. et al.: Process characteristics, damage mechanisms and challenges in machining of fibre reinforced thermo-

- plastic polymer (FRTP) composites: A review. Composites Part B: Engineering 273 (2024) #111247, doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.11124
- [11] Bhatnagar, N.; Singh, I.; Nayak, D.: Damage Investigation in Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates. Materials and Manufacturing Processes, 19 (2004) 6, pp. 995–1007, doi.org/10.1081/AMP-200034486
- [12] Wang, F.; Zhao, M.; Fu, R. et al.: Novel chip-breaking structure of step drill for drilling damage reduction on CFRP/AI stack. Journal of Materials Processing Technology 291 (2021) #117033, doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117033.
- [13] Uhlmann, E.; Sammler, F.; Richarz, S. et al.: Machining of Carbon and Glass Fibre Reinforced Composites. Procedia CIRP 46 (2016), pp. 63–66, doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.197
- [14] Gebhardt, A.; Esch, P.; Hertwich, M.: Bohrbearbeitung von Luftfahrt-Stack-Werkstoffen. Lightweight Design 9 (2016) 4, pp. 12–15, doi.org/10.1007/s35725-016-0037-5
- [15] Modler, N.; Adam, F.; Maaß, J. et al.: Intrinsic Lightweight Steel-Composite Hybrids for Structural Components. Materials Science Forum 825–826 (2015), pp. 401–408, doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.825–826.401
- [16] Bader, B.; Berlin, W.; Demes, M.: Multimaterialbauweise in der Fahrzeugstruktur. ATZ Produktion 7 (2020) 3–4, pp. 34–39, doi.org/10.1007/s35726-020-0089-9



Benjamin Winter, M.Sc. 
benjamin.winter@tu-braunschweig.de
Tel. +49 531 / 391-7666
Foto: IWFTU Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder 

Technische Universität Braunschweig
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig
www.tu-braunschweig.de/iwf
Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST
Riedenkamp 2, 38108 Braunschweig
www.ist.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Thomas Bruchhaus 

Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V.
Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid
www.fgw.de



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)