

Titel

Aufbau eines Bohrwerkzeugs zur Herstellung kleiner, qualitätsgerechter Funktionsbohrungen in Hybridwerkstoffen - AquaDrill

IGF-Nr.: 01IF22306N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe - IFW
Papenberger Straße. 49, 42859 Remscheid

Ansprechpartner: Dr. Thomas Bruchhaus
+49 (0)2191 5921 176
bruchhaus@fgw.de



Forschungseinrichtung 2: Technische Universität Braunschweig
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik - IWF
Langer Kamp 19 b, 38106 Braunschweig

Ansprechpartner: Benjamin Winter, M. Sc.
+49 (0)531 391 7666
benjamin.winter@tu-braunschweig.de

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik



Danksagungen

Das IGF-Vorhaben "Aufbau eines Bohrwerkzeugs zur Herstellung kleiner, qualitätsgerechter Funktionsbohrungen in Hybridwerkstoffen" - AquaDrill IGF-Projekt Nr. 01IF22306N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW), Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



DLR Projektträger

Ausgangssituation

Faserverstärkte Kunststoffe (FKV) gewinnen im Leichtbau zunehmend an Bedeutung, da sie gegenüber klassischen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium erhebliche Gewichtsvorteile bieten. Durch den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt etabliert, finden FKV nun verstärkt Eingang in die Automobilindustrie – insbesondere in Form von glasfaserverstärkten, thermoplastischen Verbunden. Diese bieten zwar Kostenvorteile, erreichen aber oft nicht die nötige Festigkeit, weshalb zunehmend Hybridbauteile aus FKV und Metall eingesetzt werden.

Für die Verbindung solcher Hybridkomponenten – etwa bei Batteriegehäusen, Heckklappen oder Dachrahmen – sind präzise Bohrungen unerlässlich. Dabei liegt der Fokus weniger auf Maßtoleranzen als auf der Integrität der Materialien: Schäden wie Delaminationen oder Ausfaserungen können die Lebensdauer deutlich verkürzen. Zudem stellen Spanbildung und Werkzeugverschleiß bei der Bearbeitung von FKV-Metall-Verbundwerkstoffen eine Herausforderung dar. Herkömmliche Bohrwerkzeuge sind oft nicht für beide Werkstoffe geeignet, was Effizienz und Standzeit begrenzen.

Der Markt bietet bislang nur unzureichende Werkzeuge für die simultane Bearbeitung von FKV und Metall. Es fehlt ein leistungsfähiges Bohrwerkzeug, das sowohl die mechanischen Anforderungen als auch die wirtschaftlichen Bedingungen – insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) – erfüllt. Ziel ist es daher, ein neuartiges Werkzeug zu entwickeln, das reproduzierbare Bohrqualität bei reduzierten Nebenzeiten bietet, ohne aufwendige Maschinenanpassungen. So können KMU ihre Fertigung wirtschaftlicher, effizienter und wettbewerbsfähiger gestalten.

Forschungsziel

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines innovativen Bohrwerkzeugs zur effizienten Zerspanung von Hybridwerkstoffen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und hochfestem Stahl, insbesondere für Bohrdurchmesser im Bereich von 6 mm bis 10 mm zu ermöglichen. Im Fokus stand die Konstruktion eines dreistufigen Werkzeugs, das den spezifischen Anforderungen beider Werkstoffe gerecht wird und eine Bearbeitung unter Trockenzerspanungsbedingungen ermöglicht. Damit sollen qualitativ hochwertige Bohrungen erzeugt werden, ohne dass eine zusätzliche Nachbearbeitung erforderlich ist.

Ein zentrales Ziel war es, werkstoffbedingte Schädigungen wie Delaminationen oder Ausfaserungen zu vermeiden und zugleich die Werkzeugstandzeit zu erhöhen. Dazu wurden neue Geometrieconzepte sowie innovative Ansätze zur flexiblen Einstellung der Finishschneiden aufgezeigt, die eine präzise Bearbeitung beider Werkstoffarten in einem einzigen Arbeitsgang ermöglichen. Gleichzeitig wurden die bislang nur unzureichend erforschten Prozessparameter für die spezifische Kombination von GFK und Dualphasenstahl systematisch untersucht, um eine fundierte Basis für die optimale Prozessführung zu schaffen.

Das Werkzeug soll universell einsetzbar sein und sich ohne aufwendige Modifikationen auf unterschiedlichen Maschinentypen wie Bearbeitungszentren, Roboterzellen oder Bohrvorschubeinheiten integrieren lassen. Eine Besonderheit stellt die geplante Funktionsweise in zwei Wirkrichtungen dar – sowohl im Vorschub als auch im Rückhub –, um die Flexibilität im industriellen Einsatz zu erhöhen. Ergänzend wurde ein Absaugkonzept zur sicheren Abführung von Spänen und Stäuben aufgezeigt, das die Trockenzerspanung unterstützt und die Maschinenverfügbarkeit verbessert.

Abschließend wurde das Verschleißverhalten des Werkzeugs unter realitätsnahen Bedingungen analysiert, um Aussagen zur Wirtschaftlichkeit und zur Dauerstandfestigkeit treffen zu können. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur industriellen Serienfertigung von Hybridbauteilen – insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen, die auf effiziente, flexible und wirtschaftliche Fertigungslösungen angewiesen sind.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Charakterisierung der Einzelkomponenten mit konventionellen Bohrwerkzeugen

Für die Entwicklung eines neuen Werkzeugkonzepts zur Zerspanung von GFK-Stahl-Hybridverbunden wurden zunächst die Einzelkomponenten getrennt untersucht. Zum Einsatz kamen Tepex dynalite 104 mit einer Polypropylenmatrix und einem Glasfaseranteil von 47 % sowie Dualphasenstahl DP600. Ziel der Untersuchungen war es, geeignete Bohrparameter und Werkzeuggeometrien für qualitativ hochwertige Bohrungen im Durchmesserbereich von 6 mm bis 10 mm zu identifizieren.

Für die Vorversuche wurde ein modulares Bohrsystem mit zwei verschiedenen Schneidkörpertypen verwendet: HPG-Schneidkörper für Stahl mit AlTiN-Beschichtung und SPF-Schneidkörper für CFK mit Diamantbeschichtung. Bohrungen wurden unter Variation von Schnittgeschwindigkeit (50–200 m/min) und Vorschub (0,025–0,150 mm) durchgeführt, wobei keine Kühlmittel verwendet wurden, um das Aufquellen der thermoplastischen Matrix zu vermeiden.

Die Auswertung der GFK-Bohrungen zeigte, dass bei allen Schneidkörpern die Delamination auf der Bohreraustrittsseite stärker ausgeprägt war als auf der Eintrittsseite. Die besten Ergebnisse hinsichtlich geringer Delaminationsfaktoren wurden mit SPF-Schneidkörpern bei spezifischen Parameterkombinationen erzielt. HPG-Schneidkörper zeigten keine klaren Trends und wiesen insgesamt höhere Delaminationswerte auf. Die doppelte Spitzengeometrie der SPF-Schneidkörper führte zu qualitativ besseren Schnittkanten, jedoch waren auch hier vereinzelt Faserreste und Oberflächenausbrüche sichtbar.

Eine hohe Streuung der Delaminationsfaktoren auf der Austrittsseite wurde ebenfalls beobachtet, deren Ursache auf wechselnde Faser-Matrix-Bindung und Gewebeorientierung zurückgeführt wird. Dies verdeutlicht die Bedeutung von Untersuchungen an thermoformierten Proben, wie sie im industriellen Einsatz verwendet werden.

Bei der Bearbeitung der DP600-Stahlplatten wurden ebenfalls Parameterstudien durchgeführt. Die erzeugten Bohrdurchmesser stimmten mit den Sollmaßen überein, allerdings traten auf der Austrittsseite bei HPG-Schneidkörpern Ringrate mit Bohrkappen auf, die bei Hybridbearbeitung potenziell problematisch sind. Auf der Eintrittsseite zeigten sich bei

geringem Vorschub zerkratzte Oberflächen, die mit steigendem Vorschub abnahmen. Bei SPF-Schneidkörpern wurden zusätzlich Aufstellungen des Stahls an der Bohrkante festgestellt, die bei höheren Schnittgeschwindigkeiten und Vorschüben stärker ausgeprägt waren.

Gratbildung war ein zentraler Aspekt der Untersuchung. Während HPG-Schneidkörper gleichmäßige Ringgrate mit zunehmender Höhe bei höherem Vorschub erzeugten, führten SPF-Schneidkörper bei hohen Schnittgeschwindigkeiten zu unregelmäßigen Kronengratbildungen mit teils deutlich höheren Grathöhen. Die Gratbildung kann in Hybridverbunden sowohl die Festigkeit beeinträchtigen als auch lokale Verstärkungen erzeugen, abhängig vom Ausmaß und der Form des Grats. Insgesamt ergaben die Versuche, dass HPG-Schneidkörper in Bezug auf Gratkontrolle Vorteile bieten, während SPF-Schneidkörper bessere Bohrungsqualität im GFK ermöglichen.

Die Erkenntnisse dieser Voruntersuchungen bilden die Grundlage für die Entwicklung eines angepassten Bohrwerkzeugkonzepts, das beide Werkstoffkomponenten effizient und prozesssicher bearbeiten kann.

Bohrversuche mit der Bohrvorschubeinheit (BVE)

Zur sicheren Fixierung des GFK-Stahl-Hybridbauteils wurde ein Spannrahmen entwickelt, der ein verschiebungsfreies Spannen nicht-verklebter Blechlagen während der Bohrbearbeitung gewährleistet. Die Vorrichtung ist sowohl für Bearbeitungszentren als auch für den Einsatz mit einer Bohrvorschubeinheit (BVE) geeignet.

Da die optimalen Schnittparameter unbekannt waren, wurden Versuche mit verschiedenen BVE-Konfigurationen im Technikum der Firma Lübbering durchgeführt. Für jede Bohrung wurden detaillierte Prozessdaten aufgezeichnet, wobei sich Übergänge zwischen GFK und Stahl deutlich im Drehmomentverlauf widerspiegeln. Es wurden Vorschübe von 0,05–0,10 mm und Schnittgeschwindigkeiten von 50–100 m/min bei Bohrdurchmessern von 6,35 mm und 7,938 mm eingesetzt. Die bekannten Delaminationsmuster bestätigten sich auch bei diesen Versuchen.

Ein spezieller Versuchsstand mit Linearschlitten und Kreutztisch wurde entwickelt, um Bearbeitungen im Rückhub zu ermöglichen und das Werkstück präzise zu positionieren. Eine gekapselte Bauweise mit integrierter Absaugung schützt die Arbeitsumgebung vor gesundheitsgefährdenden Stäuben.

Vibrationsunterstütztes Bohren und Orbitalbohren

Es wurden Bohrversuche mit Vollhartmetallwerkzeugen durchgeführt – sowohl konventionell, vibrationsunterstützt als auch orbital. Beim Orbitalbohren bewegt sich das Werkzeug in einer spiralförmigen Bahn, wodurch es sich streng genommen um ein Bohrfräsen handelt. Dieses Verfahren liefert eine gute Spanbildung und hohe Bohrungsqualität. Besonders bei höheren Schnittgeschwindigkeiten wurde das Ausreißen von Fasern deutlich reduziert, da die Schneide durch den höheren Impuls sauberere Faserbrüche erzeugt.

Trotz dieser Vorteile zeigten sich auch beim Orbitalbohren Einschränkungen, etwa das Auftreten sogenannter Ausbohrteiler aufgrund der Zähigkeit des Dualphasenstahls. Beim konventionellen Bohren bildet der Stahl lange, harte Späne, die beim Durchbruch durch die GFK-Schicht die Bohrung und Oberfläche beschädigen können. Zudem erhitzen sich die Späne stark, was zur lokalen Aufschmelzung der Kunststoffmatrix führt.

Zur Verbesserung der Spanbildung wurde ein Spanbruchzyklus eingesetzt, der über Vorschubunterbrechungen oder durch einen mechanischen Adapter realisiert wurde. Das vibrationsunterstützte Bohren führte hierbei zu einer signifikanten Verbesserung der Bohrqualität. Die entstehenden kurzen Späne beschädigten die GFK-Oberfläche nicht mehr, wodurch das Verfahren eine effektive Alternative für das Bohren in Hybridwerkstoffen darstellt.

Aufbohrversuche mit Wendeschneidplatten

PA-Mitglieder stellten Ausdrehwerkzeuge mit Wendeschneidplatten für Versuche zur Verfügung, die auf einem Bearbeitungszentrum am IFW in Remscheid durchgeführt wurden. Das Probenmaterial wurde nicht verklebt, sondern im Spannrahmen fixiert und in Bearbeitungsrichtung GFK-Stahl gebohrt. Für die Grundbohrung kam ein beschichteter DTS-Bohrer Ø 5,90 mm zum Einsatz. Es wurden zunächst 20 Bohrungen mit Kühlschmierstoff durchgeführt, anschließend 10 weitere ohne Schmierung. Der Bohrerverschleiß wurde mikroskopisch dokumentiert.

Anschließend wurden die Bohrungen durch Aufspindeln mit einem Micro-Ausdrehkopf bearbeitet. Hierfür kamen Schneidplatten mit CVD-D- und CBN-Bestückung zum Einsatz. Die CVD-D-Platte war für GFK vorgesehen, zeigte jedoch nach nur kurzem Einsatz bereits starke Ausbrüche an der Schneidkante. Dies deutet auf eine ungeeignete Werkstoffpaarung hin.

Die Bearbeitung des Stahlblechs erfolgte mit zwei verschiedenen Parametersätzen. Weder der erste noch der angepasste zweite Satz führten zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Die CBN-bestückte Wendeschneidplatte verschliss frühzeitig, auch bei umgekehrter Bearbeitungsrichtung (Stahl -> GFK) änderte sich das Verschleißbild nicht.

Die Versuche zeigten, dass die getesteten Schneidstoffe in dieser Kombination ungeeignet sind. Für eine optimierte Bearbeitung sollten VHM-Wendeschneidplatten für Stahl und PKD-bestückte Schneidplatten für GFK verwendet werden.

Monolithisches Stufenbohrwerkzeug mit materialangepassten Spitzenwinkeln (Variation 1)

Die Voruntersuchungen zeigen, dass die Bearbeitung von Stahl und GFK unterschiedliche Parameter erfordert, um schädigungsfreie und maßhaltige Bohrungen zu erzielen. Der Bohraustritt beeinflusst die Bohrungsqualität stärker als der Eintritt, vor allem durch Gratbildung im Stahl und Faser-Ausbrüche im GFK. Das Orbitalbohren reduziert Delaminationen im GFK, behebt jedoch nicht vollständig die Ausbohrterbildung im Stahl. Daraus wurde ein monolithisches Stufenbohrwerkzeug entwickelt, das eine dreistufige Bearbeitung erlaubt und für Hybridmaterialien ausgelegt ist.

Das Werkzeug erzeugt zunächst ein Vorbohrloch mit einem Kompromiss-Spitzenwinkel von 120°. Anschließend erfolgt das Aufbohren der oberen Materiallage auf den Zieldurchmesser mit materialangepassten Spitzenwinkeln (140° für Stahl, 90° für GFK). Danach wird die untere Materiallage durch helikales Auffräsen bearbeitet. Das Werkzeug ist dabei so gestaltet, dass nur die Schneiden in Kontakt mit dem Werkstück kommen. Positiver Spanwinkel und Gegenlaufbearbeitung sollen Oberflächenqualität und Spanabfuhr verbessern, jedoch können höhere Zerspankräfte auftreten.

Zur Verschleißminderung ist das Werkzeug vollständig beschichtet und verfügt über Druckluftkühlung. Für jede Bearbeitungsrichtung wurden drei Werkzeuge gefertigt. Die Funktionsfähigkeit wurde durch Versuche mit Hybridverbundplatten geprüft, die durch Verpressung von Organoblech und Stahlblech unter hoher Temperatur und Druck hergestellt

wurden. Eine spezielle Aufspannkassette verhindert ein Durchbiegen während der Bearbeitung.

Die Versuche untersuchten systematisch den Einfluss von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub. Beim Vorbohren traten vor allem bei ungünstigen Parametern Schädigungen in Form von Faser-Ausbrüchen im GFK und zerkratzten Stahloberflächen auf. Das Verpressen des Organoblechs reduzierte jedoch die Delaminationsneigung im Vergleich zu unverpresstem Material.

Beim Aufbohren bestätigten sich viele der Ergebnisse aus den Vorversuchen. Kritische Schädigungen traten weiterhin bei bestimmten Parameterkombinationen auf, insbesondere auf der Stahlseite. Ein enger Parameterbereich für schädigungsfreie Bohrungen konnte eingegrenzt werden.

Im letzten Schritt, dem helikalen Auffräsen, zeigte sich, dass der Prozess effektiv Grat und Faserausbrüche beseitigen kann. Allerdings führte die mechanische Belastung, insbesondere durch die Gestaltung mit Kühlkanälen und verjüngtem Schaft, wiederholt zum Werkzeugversagen an der Übergangsstelle. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit zur Überarbeitung des Werkzeugdesigns, um die Stabilität unter Zerspankräften zu erhöhen.

Monolithisches Stufenbohrwerkzeug ohne materialangepasste Spitzenwinkel (Variante 2)

Die zweite Variante bestand aus einem Vollhartmetallwerkzeug ohne Kühlkanäle, bei denen alle drei Schneidentypen mit einem Spitzenwinkel von 120 ° gefertigt wurden, da eine Bearbeitung weiterhin in beide Richtungen (Stahl/GFK sowie GFK/Stahl) möglich sein sollte.

Der Wegfall der Kühlkanäle macht den Bohrergrundkörper signifikant stabiler, die geradgenuteten Spankanäle ermöglichen ebenso eine stärkere Seele des Bohrers. Die Aufbohrschneiden für die Rückwärtsbearbeitung wurden so ausgeführt, dass ein Abbremsen und eine Drehzahlumkehr nach dem im Hinhub erfolgenden Aufbohrprozess vor der Zirkularbearbeitung nicht mehr erforderlich sind. Der jeweilige Spitzenwinkel von 120 ° stellt dabei einen Kompromiss zwischen dem einerseits üblichen Spitzenwinkel beim Bohren von Stahl und andererseits dem bewährten Winkel bei der Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen dar. Die Bohrversuche werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

Zerspanversuche im Bearbeitungszentrum

Die Versuche wurden auf einem CNC-Bearbeitungszentrum durchgeführt. Die Bearbeitungsparameter wurden zunächst für einen prozesssicheren Ablauf und gute Bohrungsqualität optimiert. Die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub beim Voll- und Aufbohren wurden konstant bei 75 m/min bzw. 0,075 mm gehalten. Beim helikalen Fräsen variierte die Schnittgeschwindigkeit von 192 mm/min bis auf 768 mm/min. Gebohrt wurde in beiden Richtungen, also sowohl Anbohren in GFK und Ausbohren in Stahl als auch umgekehrt.

Bei den Bohrversuchen mit günstigen Schnittdaten konnten die GFK-Lagen mit guter Bohrungsqualität bearbeitet werden. Beim Vorbohren der Stahllage kam es jedoch zu unerwünschter Bandspanbildung, die zu Spanwickeln um das Werkzeug und somit zu Prozessstörungen führte. Zudem verursachten die schlecht gebrochenen, heißen Späne Schäden an der oberflächennahen GFK-Lage, die thermisch überlastet wurde, Fasern aus der Matrix herausgerissen wurden und Delamination auftrat. Diese Schäden konnten durch die nachfolgende Aufbohroperation nicht beseitigt werden.

Durch den Einsatz eines vibrationsunterstützten Bohradapters oder das Programmieren von Spanbruchzyklen konnte die Spanbildung verbessert und somit auch die Bohrungsqualität signifikant erhöht werden. Das helikale Auffräsen im Rückhub verlief prozesssicher und entfernte zuvor entstandene Grate zuverlässig. Bohrungsqualitäten der Toleranzklasse IT10 wurden erreicht, und eine Erhöhung des Vorschubs beeinträchtigte die Qualität nicht.

Bei der Bearbeitung in der Richtung Stahl zu GFK traten ähnliche Probleme mit langen Spänen und Reibmarken auf, die durch die gleichen Spanbruchmaßnahmen verbessert werden konnten. Das Bohren der GFK-Lage führte nur bei erhöhtem Vorschub zu Schäden wie Delamination oder Faserauszug. Mit den ermittelten Parametern und anschließendem helikalen Auffräsen wurde auch hier eine gute Bohrungsqualität erzielt. Diese Prozessparameter dienten anschließend als Startwerte für die Bearbeitung mit einem Industrieroboter.

Überführung auf einen Industrieroboter

Nachdem am Bearbeitungszentrum die Funktionsfähigkeit des monolithischen Stufenbohrwerkzeugs sowie schädigungsfreie Bohrungen im Hybridverbund mit Toleranz IT10 bestätigt wurden, wurde geprüft, ob diese Ergebnisse auf einen Industrieroboter mit montierter Spindel übertragbar sind. Die Bohrversuche erfolgten mit einem Industrieroboter und einer Schwenkspindel an Hybridverbundplatten, wobei die zuvor ermittelten Prozessparameter übernommen wurden.

Beim Vor- und Aufbohren mit Schnittgeschwindigkeit 75 m/min und Vorschub 0,075 mm sowie Spanbruchzyklen erzielte der Roboter schädigungsarme Bohrungen. Die Bohrungen in beiden Bearbeitungsrichtungen wiesen die geforderte Toleranz IT10 auf. Die Austrittsseite im GFK zeigte lediglich kleinere Faserschäden, die durch den anschließenden helikalen Fräsprozess als unkritisch bewertet wurden.

Der helikale Fräsprozess mit hoher Vorschubgeschwindigkeit (768 mm/min) führte jedoch zu einer außerhalb der Toleranz liegenden ovalen Bohrungsform mit verkleinertem Durchmesser. Durch Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit auf 192 mm/min konnte eine nahezu kreisförmige Bohrung mit minimaler Formabweichung erreicht werden. Diese Einschränkung war unabhängig von der Bearbeitungsrichtung, was auf die Bewegung und dynamische Eigenschaften des Roboters zurückzuführen ist.

Der Industrieroboter kann aufgrund seiner begrenzten Bahngenaugkeit bei hohen Geschwindigkeiten die Helixbahn nicht exakt abfahren, was die Bohrungsqualität beim Fräsen einschränkt. Anpassungen an den Bewegungsparametern brachten keine Verbesserung.

Zusammenfassend sind die Prozessparameter für Vor- und Aufbohren vom Bearbeitungszentrum gut auf den Industrieroboter übertragbar und führen zu schädigungsfreien Bohrungen mit Toleranz IT10. Beim helikalen Auffräsen muss die Vorschubgeschwindigkeit deutlich reduziert werden, um eine akzeptable Bohrungsqualität zu erzielen. Die ermittelten Parameter dienten auch zur Bestimmung des Zeitverhaltens des Stufenbohrwerkzeugs beim Roboter.

Zeitverhalten

Die Untersuchungen am Bearbeitungszentrum und am Industrieroboter bestätigen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des monolithischen Stufenbohrwerkzeugs, auch wenn mit dem Roboter keine Bohrungen in der Grundtoleranz IT10 erreicht werden können. Ein

Schwerpunkt liegt auf der Standzeit des Werkzeugs, die anhand der Bohrungsqualität und Schädigungen am Werkstück bewertet wird.

Standzeitversuche am Industrieroboter zeigen, dass die Belastungen durch geringere Systemsteifigkeit und Schwingungen zu einem höheren Verschleiß führen. Als Standzeitende gilt, wenn die Bohrungsformabweichung nicht mehr durch Roboterbewegungen kompensiert werden kann oder nach drei aufeinanderfolgenden Bohrungen Schäden im Hybridverbund auftreten.

Für die Bearbeitungsrichtung von GFK in Stahl sind nach etwa 154 bis 168 Bohrungen deutliche Qualitätsgrenzen erreicht: Bohrungsdurchmesser weichen ab, Späne verbleiben an den Bohrungswänden und Schädigungen wie Ausfransungen und Delamination treten auf. Die Aufrässchneide zeigt starke Verschleißerscheinungen und Ausbrüche, während die Vor- und Aufbohrschneiden noch funktionsfähig bleiben.

In der Bearbeitungsrichtung Stahl in GFK treten die ersten Verschleißerscheinungen erst nach etwa 476 Bohrungen auf. Die Bohrungen zeigen dann eine reduzierte Maßhaltigkeit und leichte exzentrische Abweichungen. Alle Schneiden weisen Verschleiß auf, besonders die Vorbohrschneide mit verrundeten Kanten und Beschädigungen der Beschichtung. Ausbrüche an der Bohrspitze führen zu erhöhtem Reibverschleiß und Ablagerungen von Matrixmaterial am Werkzeug, was den Spanabtransport behindert und die Bohrqualität beeinträchtigt.

Insgesamt zeigt das Stufenbohrwerkzeug eine längere Standzeit von bis zu 504 Bohrungen bei der Bearbeitung von Stahl nach GFK. Die Verschleißursachen unterscheiden sich je nach Bearbeitungsrichtung: Bei GFK nach Stahl verschleißt vor allem die Aufrässchneide frühzeitig, während bei Stahl nach GFK die Vorderschneide zuerst betroffen ist.

Um eine richtungsunabhängige Bearbeitung mit längerer Standzeit zu ermöglichen, muss die Aufrässchneide hinsichtlich Geometrie und Schneidstoff verbessert werden. Zudem könnten materialabhängige Spitzenwinkel und eine erhöhte Steifigkeit des Werkzeugs die Standzeit weiter verbessern und den Belastungen besser standhalten.

Span- und Stauberfassung

Bei der zerspanenden Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) entstehen feine Stäube, die hauptsächlich aus Fasern bestehen und ein hohes Gesundheitsrisiko für Maschinenbediener sowie eine Gefahr für Maschine und Bauteil darstellen. Die Verwendung von Kühlschmierstoffen kann diese Staubbildung mindern, ist bei thermoplastbasierten Matrizen im FVK jedoch nicht empfehlenswert, da diese die Matrix schädigen können. Daher wird FVK in diesem Projekt trocken bearbeitet, wodurch eine effektive Absaugvorrichtung notwendig ist, um Faserstaub und Metallspäne zuverlässig zu erfassen und abzutransportieren.

Das bearbeitete Material ist ein Stahl-GFK-Hybridverbund, bei dem sowohl feine Glasfaserstäube als auch Metallspäne des DP600-Stahls (mit langem Spanverhalten) erfasst werden müssen. Die Absaugvorrichtung muss leicht montier- und demontierbar sein, um einen schnellen Werkzeugwechsel zu ermöglichen und einen maximalen Absaugdurchmesser von 35 mm aufweisen. Sie soll einen Erfassungsgrad von mindestens 95 % garantieren.

Die Konstruktion basiert auf einem Befestigungsflansch an der Maschinenspindel, an dem ein formflexibler Faltenbalg mit Druckfedern angebracht ist. Dieser sorgt dafür, dass die Absaugvorrichtung während der Zerspanung stets auf das Werkstück gedrückt wird und den

Arbeitsbereich abgeschlossen hält. Ein Schlauchadapter mit Bürsten ermöglicht die Absaugung der Stäube und Späne, wobei die Bürsten flexibel genug sind, um sich an unterschiedliche Oberflächen anzupassen und Beschädigungen zu vermeiden.

Die Absaugvorrichtung wurde am Industrieroboter getestet, wobei mehrere Bohrungen in einem Durchlauf durchgeführt wurden. Die Erfassung der Stäube und Späne wurde über ein Filtersystem mit HEPA-Filter gemessen, das Partikel bis $0,3\ \mu\text{m}$ zurückhält. Nach fünf Bohrungen lag der gemessene Erfassungsgrad bei etwa 88,9 %. Da sich Metallspan und Fasern um das Werkzeug wickelten und kleinere Späne sich im Faltenbalg ansammelten, wurde durch Berücksichtigung dieser Faktoren der tatsächliche Erfassungsgrad auf etwa 95,7 % korrigiert.

Die Absaugvorrichtung erfüllt somit die Anforderungen, auch wenn die Spanwicklung um das Werkzeug den Erfassungsgrad zunächst reduziert. Ein zusätzlicher Spanbruchzyklus kann eingesetzt werden, um die Späne zu zerkleinern und so die Absaugung zu verbessern.

Die Länge der Absaugvorrichtung wird durch den Faltenbalg bestimmt, dessen Stauchung manuell eingestellt werden kann. Bei der Bearbeitung komplexer Bauteile kann es jedoch zu Kollisionen mit den herausragenden Gewindestangen kommen, weshalb ein Austausch der Druckfedern gegen Gasdruckfedern oder Teleskopstangen mit Druckfedern empfohlen wird.

Zusammenfassung

In dem Forschungsvorhaben wurde ein Werkzeugkonzept für dreistufiges Bohrwerkzeug entwickelt, das einen seriellen Werkstoffverbund (je 2 mm dick) aus tiefziehgeeignetem Dualphasenstahl und einem thermoplastischen faserverstärktem Kunststoff bohren kann.

Zunächst wurden Zerspanversuche an den Einzelkomponenten durchgeführt, um den funktionalen Zusammenhang zwischen den Prozesseingangsgrößen und der Werkstückqualität zu erarbeiten. Dabei wurden konventionelle Bohrwerkzeuge sowie Wendeschneidplatten verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bearbeitung von Stahl und GFK unterschiedliche Bearbeitungsparameter benötigt, um eine möglichst schädigungsfreie und maßhaltige Bohrung im jeweiligen Material zu erhalten.

Die Untersuchung ergab, dass die Delaminationseffekte bei der Bearbeitung von GFK mit dafür angepassten Bohrköpfen am geringsten sind, insbesondere bei einem Vorschub von 0,025 mm und einer Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min für einen Durchmesser von 6,350 mm. Für die für Stahl entwickelten Köpfe variieren die optimalen Parameter je nach Durchmesser, wobei die geringsten Schädigungen bei einem Vorschub von 0,050 mm und einer Schnittgeschwindigkeit von 50 m/min für einen Durchmesser von 6 mm erzielt wurden.

Ein monolithisches Stufenbohrwerkzeug wurde als Demonstrator entwickelt, das für die Bearbeitung von Hybridwerkstoffen konzipiert ist und eine qualitativ hochwertige Bohrung in kürzester Fertigungszeit ermöglicht. Die Versuche zur Prüfung der Funktionsfähigkeit des Werkzeugs zeigten, dass insbesondere bei einem geringen Vorschub die Delaminationseffekte am geringsten ausfallen. Die Standzeitversuche ergaben, dass das monolithische Stufenbohrwerkzeug bei der Bearbeitungsrichtung von Stahl in GFK eine Standzeit von 504 Bohrungen aufweist, während bei der Bearbeitungsrichtung von GFK in Stahl die Aufrässhneide nach 168 Bohrungen verschleißt.

Ein weiteres Werkzeugkonzept umfasste ein Vollhartmetallwerkzeug ohne Kühlkanäle, das eine höhere Stabilität und eine bessere Bohrungsqualität ermöglichte. Zudem wurde ein Werkzeug mit einer radial ausschwenkbaren Schneide als Demonstrator entwickelt, das durch den Kontakt mit dem Bauteil je nach Bewegungsrichtung und Position des Bohrers betätigt wird.

Bei dem Industrieroboter sind die auf dem Bearbeitungszentrum ermittelten Bearbeitungsparameter anwendbar. Bei der Bohreintrittsseite wurden schädigungsarme Bohrungen mit der Grundtoleranz IT10 erreicht.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass durch den Einsatz eines vibrationsunterstützten Bohradapters oder durch das Programmieren von Spanbruchzyklen die Bohrungsqualität signifikant verbessert werden konnte.

Es wurde eine Absaugvorrichtung entwickelt, die sowohl auf einem Bearbeitungszentrum als auch auf einem Industrieroboter montierbar ist und einen Span- und Staub-Erfassungsgrad von mindestens 95 % aufweist.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.