

Titel

Entwicklung eines zweistufigen Bohrwerkzeugs für die beidseitige Bearbeitung hybrider FVK-Metall-Verbundwerkstoffe durch einen binäraktorischen Aussteuerungsmechanismus – “HyDrill“

IGF-Nr.: 19317 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe,
Remscheid (IFW)

Forschungseinrichtung 2: Technische Universität Braunschweig
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik -
(IWF)



Ansprechpartner beim IFW-Remscheid:

Dr. Frank Zobel
02191 / 5921.113
zobel@fgw.de

Ansprechpartner beim IWF-Braunschweig

M.Sc. Max Alberg
0531 / 391.7180
m.alberg@tu-braunschweig.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 19317 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. - FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

In vielen Industriebereichen ist seit einiger Zeit ein Trend zum Leichtbau mit Faserverstärkten Kunststoffen (FKV) zu erkennen. Aufgrund ihrer geringen Dichte bei gleichzeitig hohen Festigkeiten verfügen diese Werkstoffe über ein hervorragendes Leichtbaupotenzial. Da diese jedoch im Vergleich zu anderen Werkstoffen deutlich kostenintensiver sind, hängt ihre Einsatzfähigkeit wesentlich vom spezifischen Einsparpotenzial ab, welches FKV über die Lebensdauer eines Produkts generieren. So findet sich z.B. in der Luftfahrt ein stetig steigender Anteil kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK), der bei aktuellen Linienmaschinen (Produktlebensdauer ca. 30-40 Jahre) bereits mehr als die Hälfte des Flugzeuggewichts ausmacht. Bei vergleichsweise weniger langlebigen Produkten wie z.B. Automobilen wird in jüngster Zeit verstärkt der Ansatz von FKV in Kombination mit metallischen Werkstoffen, der so genannten Hybridbauweise, verfolgt. Bei dieser Leichtbaustrategie werden FKV gezielt zur Aufnahme von Lasten in mechanisch hochbeanspruchten Bauteilsegmenten integriert. Somit kann ein Leichtbaupotenzial erreicht werden, welches über den reinen Metall-Leichtbau hinausgeht. Zugleich können die Kosten im Vergleich zu einer reinen Faserverbundbauweise reduziert werden. Die Hybridbauweise bietet somit Anwendungsmöglichkeiten von Einzel- bis hin zu Großserienfertigungen.

Durch die Umsetzung der intrinsischen Hybridbauweise, bei der FKV und Metall in einem Bauteil integral kombiniert werden, ergeben sich neue Herausforderungen in Bezug auf die spanende Bearbeitung dieser Multi-Material-Verbunde. Eine besondere Rolle kommt dabei der Bohrbearbeitung zu, da das Bohren ein entscheidendes Verfahren für die Fügevorbereitung darstellt und somit Grundlage für spätere Fügeverfahren, Nieten und Schrauben, ist. Für die Fertigung resultieren hieraus Zielkonflikte bedingt durch die unterschiedlichen Anforderungen bei der Bearbeitung

von Metall und FKV. Insbesondere die Wahl des Werkzeugs (Geometrie, Schneidstoff) und der Prozessparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschub) stellt bei heutigen Werkzeugkonzepten immer einen Kompromiss zwischen den Anforderungen der beiden Werkstoffe dar. So entsteht bei der Metallzerspanung infolge der Reibung Wärme, wodurch die Späne abgeschert werden. FKV hingegen sollten möglichst ohne zusätzliche Prozesswärme zerspannt werden und verlangen nach Schneidwerkzeugen mit Schneidkantenradien unterhalb der Faserradien. Darüber hinaus kann der hohen Abrasivität von faserverstärkten Kunststoffen nur mit hochharten Beschichtungen (vorzugsweise Diamant) begegnet werden. Zusätzlich weichen geeignete Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten für Metalle und FKV erheblich voneinander ab. Aus diesem Grund stellt die Bohrbearbeitung hybrider FKV-Metall-Verbunde ein technologisches Problem sowie eine dringliche Forschungsfrage dar.

Hybride Bauteile, realisiert durch FKV-Metall-Verbunde, werden großserientauglich im BMW 7er verarbeitet. Die spanende Bearbeitung dieser Bauteile findet heute in zwei Arbeitsschritten statt. Eine Bearbeitung in einem Arbeitsschritt reduziert notwendige Vorarbeiten und den Montageaufwand. Die am Markt existierenden monolithischen Bohrwerkzeuge, die eine Bearbeitung von FKV-Metall-Verbunden grundsätzlich ermöglichen, weisen jedoch aufgrund der fehlenden Anpassung an werkstoffspezifische Anforderungen bislang zu geringe Standzeiten auf. So liegen die Standzeiten von Hybrid-Composite-Bohrern in etwa um den Faktor 10 unter denen von Bohrern für eine reine FKV- bzw. Metallbearbeitung. Zudem sind heute verfügbare Bohrwerkzeuge zumeist für Aerospace-Composites entwickelt worden, die in der Regel aus CFK sowie Aluminium und/oder Titan bestehen, die als Nichteisenmetalle mit diamantbeschichteten Werkzeugen bearbeitet werden können. Für die Stahlbearbeitung ist eine solche Beschichtung aufgrund der chemischen Affinität von Kohlenstoff zu Eisen jedoch nicht möglich, die Verwendung von Diamanten für die Bohrbearbeitung von CFK jedoch unumgänglich.

Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand in der Entwicklung eines neuartigen Werkzeugkonzepts für die zweiseitige Bohrbearbeitung hybrider Bauteile aus CFK und den Metallen Stahl, Aluminium und Titan. Das Werkzeug ermöglicht eine beliebige, aber werkstoffangepasste Bearbeitung hybrider Verbundbauteile. Eine austrittsseitigen Delaminationen des CFK tritt dabei nicht auf. In einem Arbeitsgang, ohne Werkzeugwechsel und Neujustierung, kann ein Verbundschichtsystemen gebohrt werden.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Ausgelegt wurde das Bohrwerkzeug für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Als zu bearbeitenden Hybridwerkstoff wurde die Kombination von Metall mit kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) festgelegt. Die Metallkomponenten bestehen aus Stahl (DP600), Aluminium (EN AW7050) und Titan (Ti6Al4V) mit einer Stärke von jeweils 4 mm. Für die CFK-Komponente wurden Kohlefasern aus T800S in einer Matrix aus Epoxidharz vom Typ M21E mit einem $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ Lagenaufbau festgelegt. Die Stärke der Einzelkomponenten betrug jeweils 4 mm. Die Vorversuche wurden getrennt an Metall und CFK durchgeführt. Der Bohrdurchmesser betrug 10 mm.

An den Bohrungen in Aluminium traten keine Auffälligkeiten hinsichtlich Grat- oder Deckelbildung auf. Bei der Auswertung der Bohrungen in Stahl wurden mit den beschichteten Bohrern bei keinem der untersuchten Einstellparameter Abweichungen von der Sollform festgestellt. Deckel- und Gratbildung traten bei Verwendung des unbeschichteten Bohrers an der Bohreraustrittsseite auf. Am unbeschichteten Bohrer kam es zum Schneidkantenausbruch und zu Verschweißungen von Spänen an der Bohrerspitze. Für das zu entwickelnde Werkzeug wurden somit beschichtete Bohrspitzen für den Vorbohrprozess im Hybridwerkstoff eingesetzt.

Im Hinblick auf den Hybridwerkstoff ist die Bearbeitung der metallischen Komponenten als unkritisch hinsichtlich der Bohrungsqualität einzustufen. Durch die Wahl von Spitzenwinkeln $> 90^\circ$ und der Einstellung von geeigneten Schnittparametern ($f \geq 0,17$ mm/U, $v_c = 150$ m/min) wurden in den Metallkomponenten geeignete Bohrungsqualitäten erzeugt.

Das Bohren des CFK-Werkstoffs mit den beschichteten sowie unbeschichteten Bohrern (Spitzenwinkel 118° und 135°) verursacht über alle Parametervariationen alle Schadensarten: Ausfransung, Absplitterung und Delamination.

An der Bohreintrittsseite nahmen die Imperfektionen mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit in Anzahl und Größe zu. Die größten Werkstoffschäden wurden durch Absplitterungen erzeugt. Die geringsten Werkstoffschäden traten am CFK mit den Einstellparametern $v_c = 90$ m/min und $f = 0,02$ mm/U auf.

An der Bohreraustrittsseite wurden hauptsächlich Absplitterungen und Ausfransungen gemessen. Die geringsten Schäden wurden wie an der Bohreintrittsseite mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 150$ m/min und dem Vorschub $f = 0,17$ mm/U gemessen.

Die Bohrwerkzeuge wurde für einen Durchmesser von 30 mm ausgelegt, da für diese Durchmesser ein größerer Bedarf in der Luftfahrt besteht. Es besitzt drei Schneiden. Die vordere Schneide dient zunächst dem Vorbohren und zerspannt Metall und CFK nacheinander. Sie wurde so ausgelegt, dass die Delamination des CFK möglichst gering

ausfällt. Dann folgt das Finishbohren des Metalls mit einer speziell für das Metall (Stahl, Aluminium oder Titan) ausgelegten Schneide. Bei Erreichen der Grenzschicht ist das Finishbohren des Metalls abgeschlossen. Der untere Teil des Bohrers ragt auf der gegenüberliegenden Seite aus dem Hybridwerkstoff heraus. Jetzt wird in diesem Teil des Bohrers eine dritte Schneide, die speziell für CFK ausgelegt ist, ausgefahren. Beim Rückwärtsbohren wird das CFK zerspannt. Bei dem erneuten Erreichen der Grenzschicht ist das Bohren des CFK abgeschlossen. Die Schneide wird wieder eingefahren und der Bohrer aus dem Werkstück gezogen. Der Bohrprozess ist abgeschlossen.

Es wurden zwei Werkzeugdemonstratoren entwickelt, bei denen auf unterschiedliche Art die Schneide für das CFK ausgefahren wird:

Beim elektromechanisch arbeitenden Demonstrationswerkzeug (Abbildung 1) treibt ein Schrittmotor eine Exzenterwelle die den Schneideneinsatz um 1 mm aus dem Werkzeug herausfährt. Ein Akku übernimmt für vier Stunden die Stromversorgung und muss danach erneut geladen werden. Die Fernsteuerung wird per Infrarot durchgeführt und funktioniert auch bei rotierender Spindel.

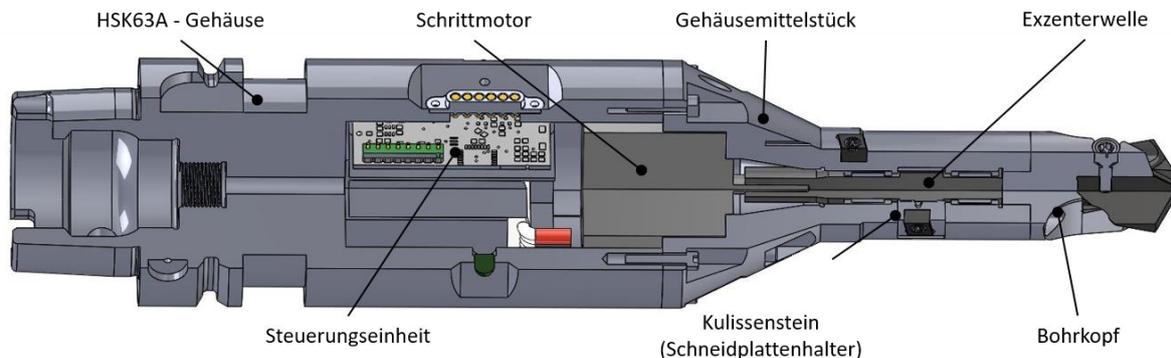


Abbildung 1: Elektromechanisch arbeitendes Demonstratorwerkzeug

In dem Bohrstangenrohling wurde bei dem pneumatisch/ hydraulisch Bohrwerkzeug (Abbildung 2) ein Hohlraum eingearbeitet, der eine Druckkammer im Werkzeuginneren bildet. Auf der Mantelfläche ist eine Bohrung zur Entlüftung der Kammer gesetzt. Somit wird die Rückzugsbewegung der Schneide ermöglicht und ein kontinuierlicher Durchfluss der Druckluft gewährleistet.

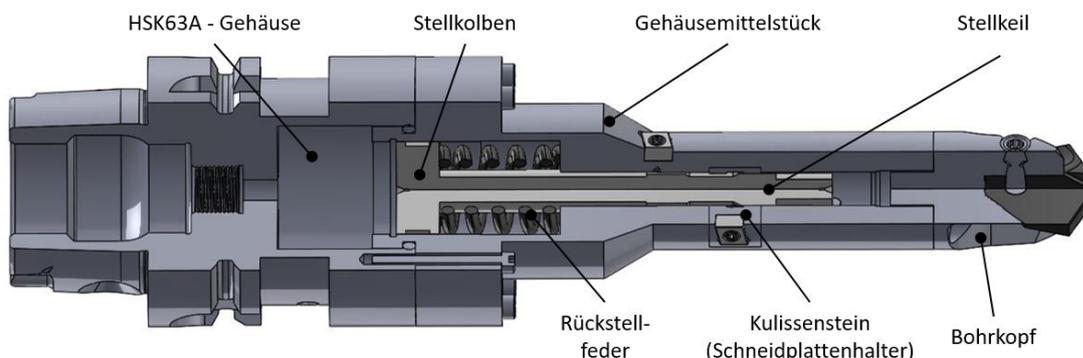


Abbildung 2: Pneumatisch/ hydraulisch arbeitender Werkzeugdemonstrator

Der Druckluftdurchfluss ist maschinenseitig erforderlich, da die Werkzeugmaschine mit Sensoren ausgestattet wurde, die den Durchfluss registrieren und Maschinen bei Überschreitung eines Grenzdrucks abschalten. Die Rückzugsbewegung wird durch die Rückstellfeder ermöglicht. Dieses Werkzeug musste daher auch den Spezifikationen der verwendeten CNC-Maschine angepasst werden.

Beide Demonstratoren sind in der Lage, die Schneide aus dem Grundkörper heraus zu verfahren und zurückzuziehen. Das elektromechanisch arbeitende Werkzeug benötigt für das Ein- und Ausfahren 1 s. Das pneumatisch/hydraulisch für die Ausfahrbewegung 0,45 s und für die Rückzugszeit 1,5 s.

Bei der Zerspanung von Aluminium und CFK ist die Zerspanung der CFK-Komponente qualitätsentscheidend. Während der Bohrversuche traten keine Schädigungen am Aluminium auf, während am CFK Delaminationen und Ausfransungen gemessen wurden, welche durch das Finishbohren beseitigt werden sollten. Die besten im Hybridwerkstoff Aluminium/CFK erzielten Ergebnisse konnten tendenziell mit den geringsten untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten ($f = 0,17 \text{ mm/U}$) und den Schnittgeschwindigkeiten von $v_c = 150 \text{ m/min}$ sowie $v_c = 200 \text{ m/min}$ erzielt werden.

Analog zu den Ergebnissen am Hybridwerkstoff aus Aluminium/CFK, ist die erreichbare Bohrungsqualität an der Werkstoffkombination CFK und Stahl (DP600) hauptsächlich von der CFK-Komponente abhängig. An der Stahlkomponente konnte keine Grat- oder Deckelbildungen festgestellt werden. Am CFK traten vor allem Absplitterungen und Delaminationen auf, die mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit an Größe zunahmen. Die besten Ergebnisse konnten beim Vorbohren mit $v_c = 75 \text{ m/min}$ und $f = 0,07 \text{ mm/U}$ reproduzierbar erzielt werden. Mit diesen Einstellparametern konnten die Defekte am CFK in einer geringen Größe um den Bohrungsrand gehalten und durch die Aussteuerschneide beim Finishbohren entfernt werden.

Die Ergebnisse der Bohruntersuchungen am Hybridwerkstoff aus Titan (Ti6Al4V) und CFK zeigen die gleichen Tendenzen hinsichtlich der Einstellparameter wie an den beiden anderen untersuchten Werkstoffkombinationen. Die besten Ergebnisse wurden mit der geringsten eingestellten Vorschubgeschwindigkeit ($f = 0,07 \text{ mm/U}$) erzielt. Am CFK überwogen Absplitterungen und Delamination, während Ausfransungen nicht auftraten.

Die Funktionsfähigkeit der beiden Werkzeugdemonstratoren konnte somit nachgewiesen werden. Beide Demonstratorwerkzeuge erzielten in Abhängigkeit der Einstellparameter die gleichen Bohrungsqualitäten.

Zusammenfassung

In Rahmen des Forschungsvorhaben wurde ein Werkzeugkonzept entwickelt, gebaut und getestet, mit dem eine qualitätsgerechte Bohrbearbeitung von Hybridwerkstoffen aus CFK und Metall in einem Arbeitsgang ohne anschließende Nacharbeit ermöglicht wird. Dies wird gewährleistet durch mehrere, voneinander unabhängige Schneidensätze, die den jeweiligen Werkstoffkomponenten angepasst sind. Durch den Einsatz eines im Prozess beweglichen Schneidensatzes arbeitet das Werkzeug in zwei Wirkrichtungen während eines Bohrhubs. Dadurch ist eine anschließende Nacharbeit der Bauteile nicht erforderlich. Zunächst wurden die Anforderungen an das zu entwickelnde Werkzeug in Form eines Lastenheftes konkretisiert. Anschließend erfolgte eine Definition von Teilaufgaben, für die in Form eines morphologischen Kastens verschiedene Lösungen gefunden wurden. Daraus wurden zwei Werkzeuge entwickelt, die mit unterschiedlichen Wirkprinzipien den beweglichen Schneidensatz im Bohrprozess zustellen und wieder zurückziehen. Ein Werkzeug arbeitet elektromechanisch mit einem im Grundkörper verschraubten Schrittmotor, während das zweite Werkzeug den Schneidensatz pneumatisch/hydraulisch mit einem Stellkeil bewegt.

Zur Ermittlung von geeigneten Prozessparametern für die Zerspanung des Hybridwerkstoffs wurden zunächst Untersuchungen an den Einzelkomponenten durchgeführt. Dabei erfolgte eine gezielte Variation der Schneidengeometrie sowie der Schnittparameter. Es wurde festgestellt, dass keine optimalen Werkzeuge und Prozessparameter für eine gleichzeitige Zerspanung beider Werkstoffe mit nur einer Schneide des Hybridwerkstoffs existierten. Bei der Wahl geeigneter Schnittparameter für den Vorbohrer können die Schäden im CFK-Werkstoff jedoch in einem Bereich von 1 mm um die Bohrungskante gehalten werden, weshalb der Verfahrenweg des beweglichen Schneidensatzes auf 1 mm festgelegt wurde.

Die Schneide, die für das Finishbohren von Stahl, Aluminium und Titan ausgelegt ist, zerspannt das Metall beim Vorwärtsbohren. Beim Rückwärtsbohren kommt die für CFK ausgelegte Schneide zum Einsatz und zerspannt, ohne Delamination zu verursachen, das Verbundmaterial.

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.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn Dr. Frank Zobel unter 02191 5921.113.