

ENDKONTURNAHE FASERVERBUNDBAUTEILE DURCH HOCHGENAUE PREFORM-FEINBESÄUMUNG MITTELS LASERTECHNOLOGIE

A. Hindersmann, S. Malzahn, S. Torstrick, L. Brohme, Dr.-Ing. M. Meyer
DLR - Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik – Verbundprozesstechnologie,
Ottenbecker Damm 12, 21684 Stade, Deutschland

Zusammenfassung

Bei der Fertigung unterschiedlichster Bauteile spielt die Einhaltung der Fertigungstoleranzen und damit der geometrischen Vorgaben, eine bedeutende Rolle. Letztlich verbinden sich hiermit sowohl strukturelle Eigenschaften, sowie Aspekte der Weiterverwendung, in Form der Integration in eine Gesamtstruktur. Faserverbundwerkstoffe nehmen hier gegenüber konventionellen Leichtbauwerkstoffen, wie Aluminium, eine besondere Rolle ein. Der Faserverbundwerkstoff entsteht gemeinsam mit der Fertigung eines Bauteils. Endkonturnähe ist dabei wünschenswert, wird mit den Fertigungsverfahren nach Stand der Technik, wie der RTM¹- oder Prepreg²-Technologie, aber derzeit nicht erreicht. Dies erfordert eine äußerst zeitaufwendige und kostenintensive Nachbearbeitung nahezu aller Faserverbundbauteile, insbesondere bei komplexen Strukturbauteilen für Luftfahrtanwendungen. Diese äußert sich zum einen durch erheblichen Verschleiß an Werkzeugen, vornehmlich Fräswerkzeugen, zur spanenden Bearbeitung der Bauteilkontur, als auch nachfolgendem Aufwand zum Versiegeln der nachbearbeiteten Kanten („Edge Sealing“³). Zum anderen lassen sich diese Arbeitsvorgänge bisher schlecht automatisieren und erzeugen über die Personalkosten zusätzlichen Aufwand. Bei einer serienorientierten Bauteilfertigung sind Nachbearbeitungen daher im Idealfall zu vermeiden, insbesondere in Hinblick auf vollautomatisierte Fertigungsprozesse für hohe Stückzahlen.

Um dem Werkzeugverschleiß bei der Bearbeitung von CFK-Bauteilen zu begegnen, wobei nach ca. 80 Metern Bearbeitungslänge ein Austausch vorgenommen werden muss, können alternativ Laser zur Nachbearbeitung der Kontur genutzt werden. Diese zeichnet sich besonders durch hohe Präzision und nahezu nicht vorhandenen Verschleiß aus, da berührungslos gearbeitet wird. Ein anderes Verfahren, welches bereits erfolgreich eingesetzt wird, ist das Wasserstrahlschneiden, welches berührungsfrei ist, aber dennoch größerem Verschleiß unterliegt. Problematisch sind bei letzterem Verfahren jedoch Arbeiten an komplexen Bauteilen, aufgrund der Strahlführung. Alle Lösungen nach Stand der Technik kompensieren zudem bisher nicht den Zeitverlust, der durch den Nachbearbeitungsvorgang entsteht.

Aufgrund der beschriebenen Problemstellung, wurden am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, partnerschaftlich mit dem Laserzentrum Hannover (LZH), Untersuchungen zur Machbarkeit der Laserbesäumung von textilen Preforms⁴ durchgeführt. Der experimentellen Studie liegt der Gedanke zugrunde, die Besäumung vor der Bauteilfertigung mit hoher Genauigkeit und reduziertem Aufwand durchzuführen, d.h. nach Herstellung der textilen Preform und vor der Kombination mit dem Matrixwerkstoff. Dadurch kann der Vorgang unter deutlich geringerem Zeitaufwand durchgeführt werden, ohne dass die Matrix geschädigt wird. Neben Aspekten der Sicherheit eines robotergeführten Schneidprozesses, wurde hierbei auch die Wirtschaftlichkeit bei einer seriennahen Anwendung betrachtet. Eine weitere wichtige Fragestellung richtet sich an die mögliche Beeinträchtigung der mechanischen Kennwerte des Verbundes, sowie fertigungstechnischer Umsetzbarkeit der Fertigungsaufgabe (Machbarkeit). Um diese berechtigten Fragen zu klären, wurden Schneidversuche an zweidimensionalen und dreidimensionalen Prüfkörpern vorgenommen, sowie eine Analyse der Einflussparameter und Ermittlung der Prozessgrenzen durchgeführt.

¹ Engl., Resin Transfer Moulding = Harzinjektionstechnologie

² Engl., preimpregnated, vorimprägniertes Fasermaterial

³ Engl.; Kantenversiegelung

⁴ Engl., Vorformling

1. EINFÜHRUNG

Die außerordentlichen Leistungen von Faserverbundwerkstoffen führen in einer Vielzahl von Anwendungen dazu, dass diese isotrope Leichtbauwerkstoffe ersetzen. Eine vollständige Nutzung der Eigenschaften kann jedoch nur in Verbindung mit einer gezielten und effizienten Verarbeitung erfolgen. Neben materialgerechten technischen Lösungen, werden daher auch wirtschaftliche und hoch automatisierte Verarbeitungsmethoden großen Einfluss auf die zukünftige Anwendung der Faserverbunde haben. Viele technische Lösungen zeichnen sich derzeit noch als zu aufwendig, toleranz- und risikobehaftet aus, um für komplexe, hoch belastete Strukturen auch wirtschaftlich sinnvoll zu sein. Um die Akzeptanz in betreffenden Industriezweigen, vornehmlich Luft- und Raumfahrt, sowie Automobilindustrie zu steigern, müssen unter Berücksichtigung der Fertigungskosten Technologien entwickelt werden, die eine gezielte Nutzung der Eigenschaften ermöglichen.

In Zukunft liegt hier bei den Verkehrsträgern der Schwerpunkt auf der Produktion von Bauteilen in hoher Stückzahl, die sich gleichzeitig durch eine hohe Komplexität auszeichnen. Speziell Verkehrsflugzeuge und Kraftfahrzeuge führen zu Stückzahlen für Einzelbauteile oder Bauteilfamilien, die jenseits der 100.000 pro Jahr liegen. Rein strukturell betrachtet, kann bei der Verwendung von CFK anstelle von Aluminium für z.B. Spantsegmente in Flugzeugrümpfen Gewicht eingespart werden, was zu einer Leistungssteigerung des Gesamtsystems Flugzeug führt. Unter produktions-technischen Gesichtspunkten besteht hinsichtlich der Faserverbunde jedoch noch Verbesserungspotential, da die geforderten Produktionsraten speziell gegenüber integralgefrästen Aluminium-Spanten nicht vergleichbar sind. Um die geforderte Kapazität in einer Serienfertigung abzudecken, stünden pro Spantsegment ca. 5 Minuten Bearbeitungszeit zur Verfügung. Bei der Aluminiumbearbeitung ist dies möglich, für komplexe CFK-Bauteile jedoch ein ambitioniertes Entwicklungsziel.

Entlang der gesamten Prozesskette für die Bauteilherstellung müssen daher Möglichkeiten untersucht werden, wirtschaftlich und qualitätsgesichert hohe Kapazitäten zu erreichen. Zu erheblich gesteigerten Fertigungszeiten führen heutzutage insbesondere die Bearbeitungsschritte, die nach der Prozessierung, d.h. Harzinjektion und Aushärtung bei Faserverbundwerkstoffen, erforderlich sind. Die Faserverbundwerkstoffe zeichnet unter anderem aus, dass der Werkstoff, bestehend aus Fasern und Matrix, erst bei der Herstellung eines Bauteils erzeugt wird. In der Praxis entstehen daher überwiegend keine Endkonturen von Bauteilen, sondern diese müssen durch sehr aufwendige Bearbeitungsvorgänge erzeugt werden.

Der Entwicklungsansatz, der in diesem Arbeitsdokument erläutert wird, ist die Herstellung der Endkontur vor der Bauteilprozessierung unter Zuhilfenahme der Lasertechnologie. Durch diese sollen jegliche oder zu mindest ein Großteil der Nacharbeiten an Bauteilen vermieden werden. Um eine Eignung nachzuweisen, sind daher sowohl die technologische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit untersucht worden, sowie der Einfluss auf die Verbundeigenschaften

2. STAND DER TECHNIK

2.1. Aspekte der Faserverbundfertigung

Durch die inzwischen schon Jahrzehnte andauernde Verwendung von Faserverbundwerkstoffen, ist eine ganze Reihe von Fertigungsverfahren und Technologien mit unterschiedlichen Eigenschaften entstanden. Die wesentlichen Anwendungen für komplexe Bauteile sind dabei die Prepreg- und RTM-Technologie. Andere Herstellungsverfahren, haben auch ihren Stellenwert, sind jedoch durch verfahrensbedingte Einschränkungen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie seltener zu finden. Zum Beispiel das Wickeln lässt sich nur bei rotations-symmetrischen Bauteilen anwenden. Generell verläuft die Herstellung in klar abzugrenzenden Schritten, die im Folgenden kurz erläutert werden, wobei eine Beschränkung auf Prepreg-Technologie und RTM erfolgt.

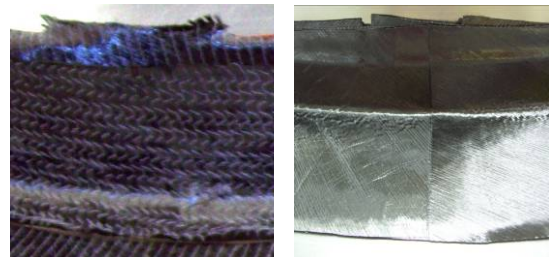


BILD 1. Randbereiche für Prepreg- und Trockenfasergelege

Das Faserhalbzeug wird vornehmlich als Rollenware mit spezifischem Faseraufbau produziert. Wo Prepreg meistens als UD⁵-Material verarbeitet wird, sind bei Trockenfasern Gelege oder Gewebe aus mehreren Lagen unterschiedlicher Orientierung üblich. Nach dem Zuschnitt mit einer automatisierten Schneideinrichtung wird das Material auf ein Werkzeug mit der dreidimensionalen Endgeometrie schichtweise aufgebracht. Erfahrung, Sorgfalt und Materialeigenschaften entscheiden wesentlich über die dabei erzeugte Qualität. Bei Trockenfasern sind thermoplastische Binder üblich, die bei Wärmeaktivierung die Formgebung ermöglichen. Bei Prepregs kann ebenfalls durch Wärmezufuhr derselbe Effekt durch das bereits vorhandene Harz erreicht werden. Nach dem Umformen (sog. Preforming) erfolgt die Prozessierung im Autoklav in definierter Temperatur- und Druckumgebung, wobei in einem Zwischenschritt bei den Trockenfasern die Injektion des Harzes erfolgen muss. In einem letzten Schritt wird das Bauteil nach Entformung auf Endkontur gebracht, was durch mechanische Bearbeitung passiert. Die Nachbearbeitungsverfahren werden im Abschnitt 2.2 detaillierter erläutert. Wesentlich bei der Prozessierung ist jedoch, dass sowohl bei Trockenfasern, als auch Prepreg derzeit nicht auf eine Nachbearbeitung verzichtet werden kann.

Mit dem Strukturbereich des Airbus A350 oder der Boeing 787 ist die Nutzung von Prepregs für hoch belastete Strukturbauteile im Rumpfbereich von Flugzeugen Stand der Technik. Der Fertigungsverfahren zeichnet sich jedoch gegenüber der Herstellung großer Schalelemente, für Flügel- oder Rumpf, durch einen großen manuellen Arbeitsaufwand aus. Die Herstellung großer Schalen

⁵ Unidirektional

erfolgt bereits mit sehr leistungsstarken, automatisierten Ablegesystemen, wie ATL⁶ und AFP⁷. Stringer und Spante für z.B. den Rumpf werden händisch umgeformt und im Autoklav prozessiert.

Gegenüber Prepreg, erweist sich die Verarbeitung trockener Faserhalbzuge in vielen Anwendungen noch als weniger präzise. Der Faservolumengehalt, d.h. das Verhältnis von Fasern zu Matrixwerkstoff, wird bei einem RTM-Prozess bei der Injektion eingestellt und kann daher abweichen. Auch in diesem Bereich wurden jedoch große Fortschritte erzielt, die den Unterschied zu Prepreg reduzieren, so dass RTM-Bauteile vergleichbare strukturmechanische Eigenschaften erreichen. Zudem sind die Fasern in einem Prepreg vollständig mit Harz umgeben und damit besser fixiert, mit weniger Flexibilität bei der Verarbeitung ausgestattet. Durch das schlechtere Anpassungsvermögen können Materialfehler durch Faserbrüche entstehen oder strukturelle Nachteile durch einen weniger lastgerechten Faserverlauf. Letzteres schlägt sich in der Auslegung bzw. Materialausnutzung wieder, was speziell für komplexe dreidimensionale Strukturen gilt.

Besonders in Randbereichen bzw. Schnittkanten treten bei Prepregs und Trockenfasern Ungenauigkeiten auf. Im Fall der Trockenfasern kommt es zu „Ausfransungen“, bedingt durch eine geringere Fixierung des Binders gegenüber den vollständig in Harz eingebetteten Fasern in einem Prepreg. Dennoch lässt sich auch bei letzteren eine Endkonturbearbeitung nicht umgehen, da durch ungenaues Ablegen oder geometrisch bedingte Überlappungen keine saubere Bauteilkante entsteht. Wie die Randbereiche im Extremfall aussehen können zeigt BILD 1. Aufgrund der hohen logistischen Kosten und Materialpreise von Prepreg, geht der Trend bei Faserverbundbauteilen zunehmend auch in Richtung der Trockenfasergelege. Deren Verarbeitungsdauer ist nicht auf einige Monate begrenzt, da Fasern und Matrix getrennt vorliegen und die Lagerung kann bei Raumtemperatur erfolgen. Prepreg hingegen müssen bei Temperaturen um -18° C gelagert und transportiert werden. Schließlich muss zwischen Materialausnutzung, Strukturleistung, Verarbeitungsfähigkeit, Kosten und Produktivität/Automatisierbarkeit ein Konsens gebildet werden, der dem individuellen Anwendungsfall gerecht wird.

2.2. Konventionelle Bearbeitungsverfahren für ausgehärtete kohlenstofffaserverstärkte Verbunde

Grundlegend muss bei der Bearbeitung von Faserverbundbauteilen die Unterscheidung gemacht werden, ob dies im ausgehärteten oder nicht ausgehärteten Zustand erfolgt. Das klassische berührende Verfahren aus der Metallbearbeitung ist das Konturfräsen. Mit einem rotierenden Schneidwerkzeug mit mehreren Schneiden werden dabei einzelne Späne vom Werkstück abgetragen. Die Schnittgeschwindigkeit und damit auch die Bearbeitungsgeschwindigkeit hängen hier sehr stark von den Werkstoffeigenschaften ab. Ohne eine geeignete Anpassung der Schneidparameter für Faserverbundwerkstoffe kommt es unweigerlich zu

Materialschädigungen in Form von Faserausrisen, Ausfransungen und Delamination. Zudem hat Kohlenstoff abrasive Eigenschaften, was einen hohen Verschleiß der Bearbeitungswerkzeuge verursacht. Bei der Fräsbearbeitung von CFK-Bauteilen können so nur rund 80 m Bauteil bei einem Vorschub von 5 m/min bearbeitet werden, bevor ein Austausch nötig wird. Neuartige Fräser bewirken hier zwar Verbesserungen, jedoch zu Ungunsten von Bearbeitungsgeschwindigkeit und Stückkosten. Gegenüber einem Stückpreis für konventionelle CFK-Fräser von ca. 250 Euro (PKD, 16 mm), schlagen spezielle Neuentwicklungen mit höheren Kosten zu Buche. Außerdem findet auch beim Fräsen ein Wärmeeintrag in das Material und die Bildung von Rissen (Mikrorisse, Delamination) statt, was die Bauteileigenschaften im Schneidbereich beeinträchtigt. Der naheliegende Schritt ist die Betrachtung von Schneidverfahren, die eine verschleißarme Bearbeitung ermöglichen. Hier bieten sich für die Endkonturbearbeitung sowohl das Wasserstrahl-, als auch Laserstrahlschneiden an. [1]

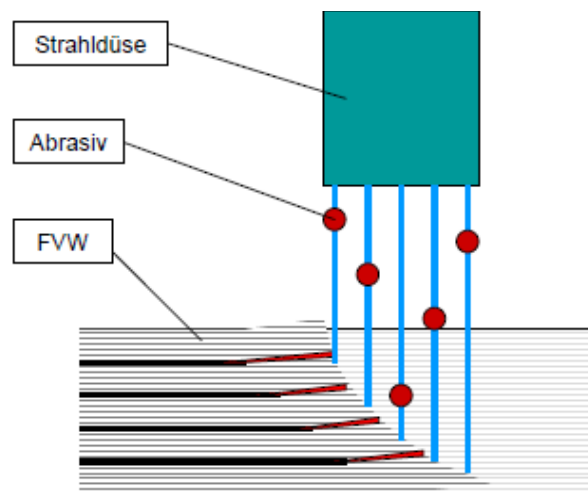


BILD 2. Schematische Darstellung des Wasserstrahlschneidens [1]

Beim Wasserstrahlschneiden wird ein Wasserstrahl unter hohem Druck (bis zu 6000 bar) zum Abtragen des Materials in der Schnittfuge verwendet. Dabei kann dem Strahl ein Abrasiv (z.B. Granat) hinzugefügt werden, welches die Bearbeitung sehr harter Materialien erst ermöglicht oder wirtschaftlicher macht. Die Vorteile liegen in einer geringen mechanischen Belastung des Materials, geringem Verschleiß, Ausbleiben einer Schadstoffentwicklung (Schleifstaub) und einer sauberen Schnittkante. Bei dünneren Wandstärken sind die erreichbaren Bearbeitungsgeschwindigkeiten jedoch weniger vorteilhaft. Zudem besteht bei der CFK-Bearbeitung die Gefahr von Delamination an der Schnittkante. In Verbindung mit einer genauen Führung lässt sich eine Positionierung des Strahls mit +/- 10 µm mit einer Wiederholgenauigkeit von 15 µm erreichen. Außerdem tritt bei höheren Schneidgeschwindigkeiten der sogenannte „Taper-Effekt“ (Kegeleffekt) auf. Dieser beschreibt eine Abweichung des Schnittprofils zwischen Eintritt und Austritt am Bauteil durch eine Aufweitung des Wasserstrahls und tritt verstärkt bei nicht geradliniger Schnitfführung auf. Im Vergleich zum Fräsen lässt sich mit dem Wasserstrahlschneiden von CFK ein maximaler Vorschub von 2 m/min bei 5 mm Bauteildicke erreichen. BILD 2 zeigt schematisch den Schneidvorgang mit einem Wasserstrahl

⁶ Automated Tape Laying

⁷ Automated Fiber Placement

an einem Faserverbundwerkstoff. [1], [2]

Bei der Anwendung im Luftfahrzeugbereich besteht bei allen Schneidvorgängen an Faserverbundbauteil die Anforderung, dass die Schnittflächen versiegelt werden. Das „Edge Sealing“⁸ erfolgt manuell mit Matrixharz des Faserverbunds. Da dieses bei Raumtemperatur aushärtet, sind Zusatzzeiten von 24 Stunden und mehr erforderlich. Der Beschnitt mit einem Laserstrahl wird separat im folgenden Abschnitt betrachtet.

2.3. Grundlagen, Vorteile und Nachteile der Lasertechnologie

Die Abkürzung Laser steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ und beschreibt ein „...technisches System, welches elektromagnetische Strahlung durch stimulierte Emission verstärkt.“ [3]. Die Strahlung ist monochrom und besitzt damit eine definierte Wellenlänge. Grundelemente sind ein Lasermedium, welches ein Festkörper, ein Gas, eine Flüssigkeit, Plasma oder ein Halbleiter sein kann, sowie eine Pumpquelle und ein Resonator. Bei der Bearbeitung von Kohlenstofffasern kommen vornehmlich Festkörperlaser zum Einsatz. Vielmehr handelt es sich dabei um moderne Scheibenlaser, die mit einem entsprechend ausgeführten Festkörpermateriale, z.B. aus Yttrium Aluminium Granat in Neodyn eingebettet (Nd:YAG), eine hohe Schnittqualität aufweisen. Mit Hilfe eines Spülgases (meistens Stickstoff) werden Schnittreste und –gase abgeführt, sowie die Schneidoptik vor Schädigungen geschützt. Letztere besteht aus einer Anordnung von Linsen oder Spiegel, die den Strahl fokussieren. Die Leitung des Laserstrahls erfolgt bequem mit einem Lichtleiterkabel bis zur Düse am Endeffektor.

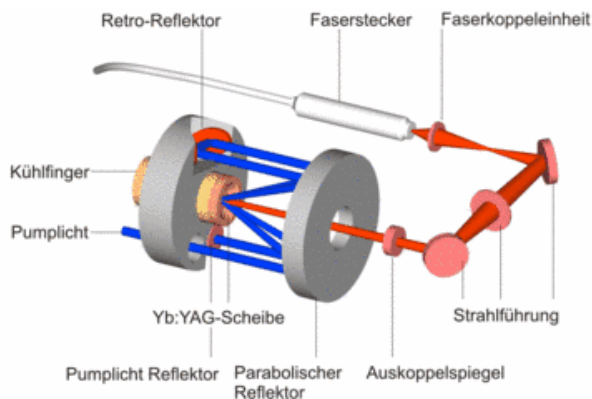


BILD 3. Grundaufbau eines Scheibenlasers (Quelle: rofin.de)

Angeregt durch ein elektrisches Feld, Teilchenkollision oder elektromagnetische Strahlung gelangen Elektronen eines Stoffs in einen angeregten, d.h. energetisch höherwertigen Zustand. Dieser wird auf natürlichem Wege innerhalb einer kurzen Zeitdauer (ca. 10^{-9} s) wieder verlassen. Geeignete Lasermedien ermöglichen im Gegensatz dazu eine relativ lange Verweildauer von ca. 1 s. In einem Laser werden durch den Einsatz der Pumpquelle, z.B. ein elektrisches Feld, mehr Elektronen in den angeregten Zustand versetzt, als solche die im Grundzustand verweilen. Dieser Zustand wird als

Besetzungsinversion bezeichnet. Angeregt durch ein Photon, dessen Wellenlänge der des Anregungszustands entspricht, werden alle angeregten Elektronen zu einer kontrollierten Freisetzung der Energie in Form von Strahlung angeregt. Es entsteht der hochenergetische Laserstrahl.

Zu den Vorteilen der Laserschneidtechnologie zählen die Anwendbarkeit auf verschiedene Materialien bzw. Materialkombinationen und ein nahezu senkrechtes, schmales Schnittbild (abhängig von der Fokusslage 0,1 bis 0,5 mm Schnittweite). Der Schneidprozess ist berührungsfrei und gut automatisierbar, sowie 3D-fähig und ermöglicht in Abhängigkeit der Prozessparameter gute Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Nachteilig ist der Wärmeeintrag in das Werkstück, der eine Wärmeeinflusszone (WEZ) in der Nachbarschaft des Schnitts hervorruft. Die WEZ kann durch Anpassung der Prozessparameter reduziert werden, wobei immer ein Kompromiss mit der Produktivität gemacht werden muss. Außerdem zeigen Faserverbundwerkstoffe, aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften von Verstärkungsfasern und Matrixmaterial, ein komplexes Verhalten bei der Wärmeleitung. Die WEZ ist mit dem Einflussbereich durch einen Wasserstrahl oder das Fräsen vergleichbar.

2.4. Anwendung der Lasertechnologie auf Faserverbundwerkstoffe

Das Abtragen von Material in einer Schnittfuge kann auch thermisch mit einem Laserstrahl erfolgen. Dabei wird das Material lokal über die Zersetzungstemperatur, bei CFK ca. 650°C, erwärmt (Zersetzungsbeginn bei Epoxidharzen ca. 350°C, Kohlenstofffasern ca. 500°C) und es entsteht ein Schnitt. Der Abtrag des Materials erfolgt durch das Schutz-/Spülgas. Unterschieden wird außerdem zwischen kontinuierlichem Schneiden und Laserimpulsen, die durch unterschiedliche Parameter beeinflusst werden. Prozesstechnisch sind zudem Bearbeitungszeit, Reproduzierbarkeit, laufende Kosten, Schnittqualität, Führungsgenauigkeit, Flexibilität, sowie Anschaffungs- und Folgekosten relevant.

Laserschneidprozesse werden bereits für die Endkonturbearbeitung von CFK-Bauteilen untersucht, wobei die maximale Schnittgeschwindigkeit mit der Laserleistung steigt und sich umgekehrt proportional zur Bauteildicke verhält. Bei gepulsten Laserschneidprozessen entsteht genauso eine Wärmeeinflusszone, wie bei einem Dauerstrichstrahl. Beim Laserpuls entscheiden Vorschub, Leistung, Pulsenergie, Frequenz, Pulsdauer und Spot⁹-Überlappung über Schnittqualität, Produktivität und Wärmeeinfluss. Als negative Effekte können dabei Debonding¹⁰ und Matrixdegradation sowie leichte Faserausrisse in der Schnittfuge auftreten. Der Vorschub liegt beim gepulsten Laserschneiden von ausgehärteten Bauteilen aus CFK im Bereich von 1m/min. Die Ausbreitung der WEZ hängt exponentiell von der Spot-Überlappung und linear von der Schnittgeschwindigkeit ab. Der Einfluss kann sich über einen Bereich von 200 bis 1000 µm vom Fokuspunkt aus erstrecken, wobei mit hoher Impulsenergie (0,65 J), bei niedriger Impulsdauer (0,25 ms) relativ hohe Schneidgeschwindigkeiten (ca. 1m/min)

⁸ Engl. Kantenversiegelung

⁹ Engl. hier Brennpunkt

¹⁰ Engl. Ablösung, Haftfehler

bei geringer Ausprägung der WEZ realisierbar sind. Beim Beschnitt von Duromeren und Thermoplasten sind jeweils ähnliche Effekte und Einflüsse zu beobachten. [4]

Mit dem hier vorgestellten Konzept soll insbesondere die Herstellungszeit von Bauteilen reduziert werden. Entgegen dem Ansatz die zeit- und kostenintensive Nachbearbeitung zu optimieren, soll das Einstellen der Bauteilendkontur vor der Prozessierung, d.h. nach dem Umformen (Preforming¹¹) bei Trockenfaserhalbzeuge erfolgen. Nacharbeiten beschränken sich im Idealfall höchstens auf das Entfernen von Harzansammlungen, was verschleißarm, schnell und ohne Kantenversiegelung („Edge Sealing“) erfolgen kann. Um für einen vollautomatisierten Prozess tauglich zu sein, muss die technologische und werkstoffwissenschaftliche Machbarkeit demonstriert werden. Zu diesem Zweck wurden durch das DLR Institut FA und das Laserzentrum Hannover Untersuchungen zu Einflussparametern und Prozessgrenzen durchgeführt. Die Zielsetzung ist dabei eine Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm bezogen auf die Endkontur des Bauteils. Die Bearbeitungsdauer soll möglichst gering sein, um eine hohe Produktivität zu erreichen. Technologische Machbarkeit und Materialverträglichkeit müssen demonstriert werden.

3. UNTERSUCHUNG DES LASERSCHNEIDENS

Die Untersuchungen der Laserbesäumung umfassen zum einen die Analyse der Schnittkanten und zum anderen den Einfluss des Wärmeeintrages (Wärmeeinflusszone) beim Schneiden. Für weitere Untersuchungen, die Aufschluss über den Einfluss der WEZ auf die mechanischen Eigenschaften geben, werden Prüfkörper in Endkontur gefertigt. Des Weiteren sollen in Abhängigkeit der Laserleistung, der Fokusslage, des Spülgasdrucks und der Lagenanzahl die maximalen Schneidgeschwindigkeiten bestimmt werden.

Das Versiegeln der Schnittkanten durch den Laserschnitt macht es nötig Harzinfilitrationsversuche an den Preformen durchzuführen.

Als Grundlage aller Versuche werden ein Gewebe (Hexcel G0926), ein MAG (Saertex Multiaxialgelege) und ein UD-Gelege (ECC797-1) verwendet. Als Strahlquelle dient bei den nachstehend beschriebenen Versuchen ein Scheibenlaser „Truedisk 3001.5“ der Firma Trumpf Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG, dessen Maximalleistung 3 kW beträgt.

3.1. Prozessgrenzen bezüglich der Schnittgeschwindigkeiten

Bei Untersuchungen zur Umsetzung eines Laserbeschnitts von Kohlenstofffaser-Preforms wurde bei verschiedenen Laserleistungen ermittelt, welche Lagenanzahl bei welchem Vorschub ohne ein unzulässiges Schnittbild, z.B. Faserausfransungen an der Schnittkante, durchtrennt werden kann. Der Gasdruck wurde im Bereich von 1 bis 6 bar variiert, die Fokusslage auf die Oberseite, Mitte oder Unterseite des Lagenpakets eingestellt. Das Diagramm in BILD 4 zeigt, dass sich in den Versuchen mit 3 kW

Laserleistung für das biaxiale Gewebe sehr hohe Schnittgeschwindigkeiten von 9 bis 10 m/min bei 6 Einzellagen erreichen lassen. Bei 8 Einzellagen sind noch 6 m/min möglich. Das MAG erreicht bis 8 Einzellagen 5 m/min. Das UD ergibt das schlechteste Schnittergebnis mit maximal 5 bis 6 m/min bei 4 bzw. 6 Einzellagen und nur noch 3 m/min bei 6 Einzellagen. Ein Schnittversuch mit 16 Lagen ergibt, dass sich Gewebe und MAG hier nur noch mit einer Geschwindigkeit von 2 m/min schneiden lassen, wenn das Material vollständig mit gutem Schnittbild durchtrennt werden soll.

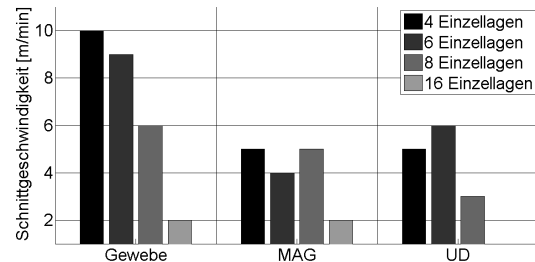


BILD 4. Ermittelte maximale Schnittgeschwindigkeit pro Material bei 3 kW Laserleistung

Die Ergebnisse bei dem Beschnitt von 16 Einzellagen UD können aufgrund von Widersprüchen bei der Versuchsdurchführung nicht berücksichtigt werden. Bei den verwendeten Materialien entsprechen 16 Einzellagen einer Wandstärke von ca. 4 mm.

Ebenfalls untersucht wurde die Lage des Fokuspunktes. Hier konnte gezeigt werden, dass mit Verschiebung der Fokusslage auf die Probenunterseite, eine immer höhere Schnittgeschwindigkeit bei gutem Schnittbild erreichbar ist.

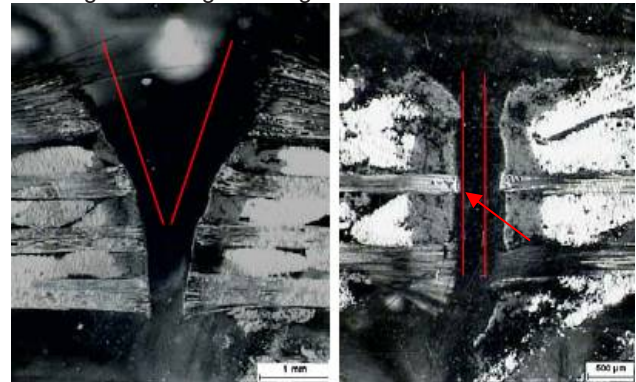


BILD 5. Schnittbild bei variabler Fokusslage

In der Abbildung BILD 5 ist links das Schnittbild bei Fokussierung der Preformoberseite dargestellt und im Vergleich dazu rechts, die Fokussierung der Unterseite. Anhand der Schattierung ist auch der Unterschied im Wärmeeintrag zu erkennen und insgesamt eine deutlich weitläufigere ungestörte und damit nutzbare Werkstückkante. Ursache hierfür ist vermeintlich die sogenannte Strahlkaustik, d.h. dem Effekt eines divergierenden Laserstrahls hinter dem Fokuspunkt. Aufgrund der mangelnden Leistungsdichte zum vollständigen Durchtrennen des Lagenpakets bei Fokusslage auf der Oberseite, muss die Schnittgeschwindigkeit reduziert werden, wodurch das Richtung Laserstrahl ausgerichtete V-förmige Schnittbild zustande kommt. Alternativ kann auch eine Schneidoptik

¹¹ Vorformen

mit höherer Brennweite genutzt werden. In folgenden Versuchen konnten mit einem 6 kW Laser noch höhere Schneidgeschwindigkeiten, bei gutem Schnittbild erreicht werden.

Die Ergebnisse lassen sich demnach wie folgt zusammenfassen. Eine höhere Streckenenergie, d.h. Laserleistung im Verhältnis zur Schneidgeschwindigkeit, ermöglicht eine größere Anzahl von Lagen mit einem Schnitt zu durchtrennen. Für ein gutes Schnittbild sollte der Laserstrahl auf der Werkstückunterseite fokussiert sein. Zudem wurde ein optimaler Spülgasdruck von 4 bar ermittelt, welcher hauptsächlich die Schnittqualität, über den Zustand der Schnittkanten, beeinflusst.

Beim Beschnitt können für das Gewebe die größten Schnittgeschwindigkeiten bei hoher Lagenanzahl erreicht werden. MAG und UD haben vergleichbare Schnittgeschwindigkeiten ergeben, die sich ebenfalls mit steigender Lagenanzahl, aufgrund von Schnittbild und Leistungsdichte zum Durchtrennen, verringern. Der Beschnitt einer hohen Lagenanzahl ergibt mit 2 m/min relativ niedrige Schnittgeschwindigkeiten, die hier nur anhand von MAG und Gewebe verglichen werden können. Die Schnittgeschwindigkeit entspricht aber zum Beispiel dem Maximum beim Wasserstrahlschneiden. Bessere Leistungen sind beim Beschnitt mit einem Laser der 6 kW-Klasse möglich. In Anschlussuntersuchungen muss eine weitere Verbesserung der Schnittqualität und -leistungen anhand der Prozessparameter, sowie reproduzierbare Bauteilqualität, auf mechanischer und werkstofftechnischer Seite, untersucht werden. Dabei sollen speziell Laser höherer Leistungsklasse betrachtet werden, sowie ausgiebige Materialversuche (z.B. SLS¹² und CAI¹³) und Randbedingungen einen hoch automatisierten Prozess betreffend.

3.2. Analyse der Schnittkanten

Bei der Besäumung von Preformen entscheidet die Schnittkante über die Qualität des Verfahrens. Hierbei sollten die beiden Kanten einer Schnittfuge möglichst parallel verlaufen. Wie bereits erwähnt ist der Schnittkantenverlauf durch die Fokusslage beeinflussbar (BILD 5). Ein ähnlicher Effekt tritt beim Wasserstrahlschneiden auf.[12]

An der Schnittkante entsteht durch den Wärmeeintrag eine gräulich schimmernde Schicht die vermutlich aus Pyrokohlenstoff besteht und die Kanten versiegelt. Somit wird das Ausfransen der Schnittkanten verringert. Eine Einschränkung besteht jedoch beim UD- Gelege. Hier kann das Ausfransen nur dann verhindert werden, wenn die unterste und oberste Lage der Preform mit der 0°-Richtung in Schnittrichtung angeordnet sind.

Die erwähnte Schicht (BILD 6) hat neben der Versiegelung gleichzeitig die Eigenschaft, dass das verwendete Epoxidharzsystem (Hexcel RTM6) keine Haftung an den Rändern besitzt. Wobei ein Grund im Abblättern der Schicht bei mechanischer Beanspruchung liegt und sich somit die Schicht selbst voneinander trennt.

¹² Engl. Single Lap Shear = einachsiger Schub

¹³ Engl. Compression After Impact = Druckbelastung nach Einschlag

Außerdem kann festgestellt werden, dass entlang der Schnittkante das Fasermaterial etwas aufdickt. In der Literatur ist dieses Verhalten als „fibre swelling“ bekannt. Dieser Effekt ist aber noch nicht weitgehend genug untersucht, um die Ursache endgültig zu klären. Nach Voisey, Fouquet and Clyne [13] wird aber das Auftreten durch die Herstellungstemperatur der Fasern beeinflusst.



BILD 6. Versiegelte Schnittkante einer laserbesäumten Preform

So neigen Fasern die bei Temperaturen um die 1300°C hergestellt werden eher zu diesem Effekt als die Fasern die bei höheren Temperaturen (1800°C – 2500°C) produziert werden.

Trotz der Verwendung von Stickstoff als Schutzgas sind beim Schneidprozess Verbrennungs- bzw. Zersetzungsprozesse zu erkennen. So sind auf der Oberseite, im Gegensatz zur Unteren, Bereiche mit Schmauchkontamination zu finden. Diese Verunreinigung ist allerdings leicht löslich.

Das Schneiden mit einem starren Messer oder einer oszillierenden Klinge ruft im Gegensatz zum Laserschnitt keinen signifikanten Wärmeeinfluss hervor. Die Schnittqualität bzw. ein Ausfransen der Schnittkanten geschieht jedoch leichter und ist am Größten bei UD-Gelegen die nicht bebindert sind. Im nachfolgendem BILD 7 sind zwei Proben dargestellt, wobei die untere konventionell mit einem Messer geschnitten worden ist und die obere durch einen Laser.

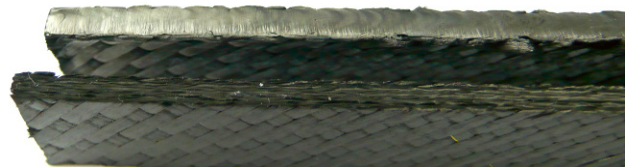


BILD 7. Vergleich der Schnittkanten (oben Laser, unten Messer)

Mit dem für die Messerbesäumung verwendeten Zündcutter können nicht alle acht Lagen der Preform gleichzeitig geschnitten werden, weshalb das Lagenpaket geteilt werden musste.

3.3. Wärmeeinflusszone

Anders als beim Schneiden von bereits imprägnierten und ausgehärteten Faserverbundwerkstoffen, kann die durch den Laserschnitt hervorgerufene Wärmeeinflusszone (WEZ) bei Preformen keinen primären Einfluss auf die Harzmatrix haben. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass die Schlichte der Fasern in diesem Bereich verdampft und somit die Adhäsion zwischen Matrix und Faser geschwächt wird.

Wie die Untersuchungen am LZH zeigen ist die WEZ bei einer Fokusslage des Lasers auf der Unterseite der Preform am Geringsten (BILD 8). Im Vergleich mit dem verwendeten Gewebe weist das UD- Gelege eine kleinere Wärmeeinflusszone auf. Hierbei stellt WEZ- Max. den jeweils größten Wert und WEZ Mitte die Ausbreitung der WEZ in der Werkstoffmitte dar.

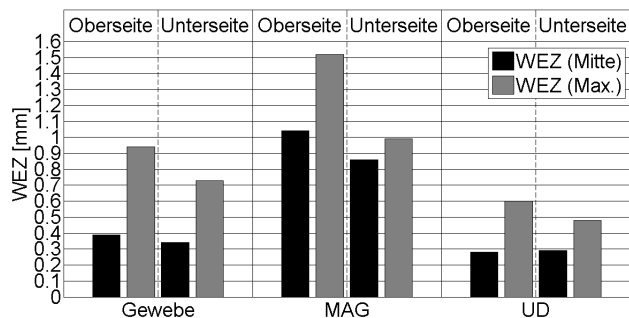


BILD 8. Größe der Wärmeeinflusszone

Ein direkter Vergleich zwischen den Fasermaterialien ist hier nicht möglich, da sich Lagenanzahl zwischen UD-Gelege und Gewebe unterscheidet. Anders als beim UD-Gelege und Gewebe verläuft die Schnittrichtung beim MAG nicht parallel bzw. senkrecht zu den Rovings, sondern in einem Winkel von 45°. Somit vergrößert sich die Schnittlänge entlang der einzelnen Rovings und damit entstehen Unterschiede im Wärmeeintrag.

3.4. Injektionseigenschaften

Die bereits erwähnte, versiegelte Schnittkante muss für eine Infusion oder Injektion eine ausreichende Permeabilität aufweisen. Um dies zu untersuchen werden mit dem Laser und vergleichend dazu mit einem Messer Löcher aus einer ebenen Preformplatte ausgeschnitten. Die Unterseite der Preform wird mit Klebeband versiegelt, so dass von hier kein Harz in das Fasermaterial eintreten kann. Über einen zentralen Punktanguss innerhalb des Kreises wird das Harzsystem infiltriert und der Fließfrontfortschritt der Matrix verglichen.

Durch die ringförmige Angusskante ist eine Unabhängigkeit vom Lagenaufbau gewährleistet. Unterschiede können sich lediglich durch Imperfektionen im Fasermaterial oder im Lagenaufbau ergeben. Um dies auszuschließen werden alle Faserlagen vor dem Preformen optisch auf Fehler untersucht und für alle Versuche jeweils die gleiche Preformplatte verwendet.

Im direkten Vergleich hat sich beim Infiltrationsversuch zwischen lasergeschnittener und messergeschnittener Kante gezeigt, dass die durch den Laser hervorgerufene versiegelte Schnittkante kaum Einfluss auf das Fließverhalten hat. Die in BILD 9 in weiß dargestellte Fließfront zeigt zwar zunächst einen kleineren durchtränkten Bereich bei der laserbesäumten Preform (Bild unten). Nach einer Infiltrationszeit von ca. 30 min ist jedoch kaum noch ein Unterschied zu erkennen. Es besteht hier aber die Möglichkeit, dass das Harz eher zwischen Folie und Preform fließt als durch die Schnittkante. Ein Anzeichen hierfür liefert auch die leichte Ellipsenform der Fließfront, da das Harz entlang der Fasern schneller fließt als quer zur Faserrichtung.

Ein Durchschneiden der ausgehärteten Proben gibt hierauf allerdings keinen Hinweis, da keine Fließkeile über die Probendicke zu erkennen sind. Für das Gewebe und das untersuchte MAG ergeben sich ähnliche Ergebnisse.

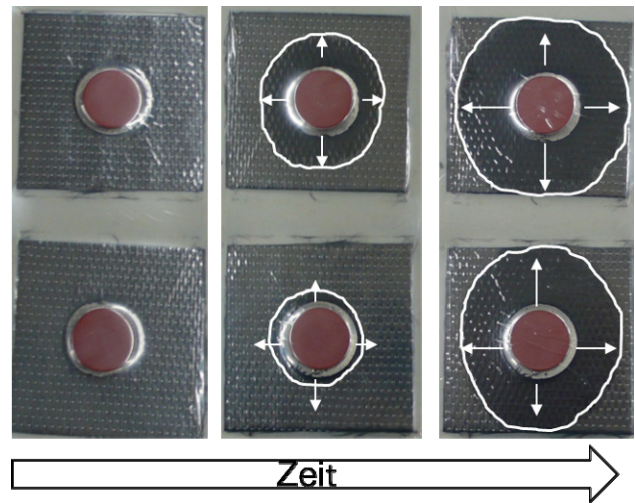


BILD 9. Infusionsversuch (oben konventionelle hergestellte Schnittkante, unten lasergeschnittene Schnittkante)

Die Infiltrationsversuche haben gezeigt, dass die Schnittkante prinzipiell keine Harzbarriere darstellt. Für die angestrebte Endkonturnähe ist jedoch ein Anguss über die Kante hinderlich, da der Angusskanal nachträglich entfernt werden muss. Die prozesssicherste Injektionsstrategie ergibt sich damit über die Fläche der Preform. Des Weiteren muss das Besäumen der Prüfkörper vermieden werden, um die mechanischen Eigenschaften der Laserfeinbesäumung nicht zu beeinflussen. In BILD 10 ist der Versuchsaufbau dargestellt.



BILD 10. Versuchsaufbau für eine endkonturnahe Injektion

Für die Konturgebung wird ein Aluminiumblech mit lasergeschnittenen Taschen verwendet. Die Abmaße der Taschen entsprechen hierbei der Endgeometrie der Prüfkörper. Die Wärmeausdehnung der Taschen wird nicht mit berücksichtigt. Die Längenänderung liegt in Probenlängsrichtung unter 1 mm und in Querrichtung unter 0,1 mm. Wohingegen die Längenänderung der Preform vernachlässigbar ist und daher der wärmebedingte Spalt zwischen Preform und Werkzeug nicht kompensiert werden kann. Der Einfluss der Längenänderung zeigt sich beim Entformen, da bei Raumtemperatur das Blech eine leichte Krümmung aufweist und nach der Entnahme der injizierten Prüfkörper in die Ursprungsform zurück kehrt.

An den mit dem Messer zugeschnittenen Prüfkörpern sind optisch keine Harzränder zu erkennen. Jedoch treten an den Enden der laserbesäumten Proben Reinharzbereiche auf, da die Feinbesäumung nicht präzise genug

durchgeführt worden ist (BILD 11).

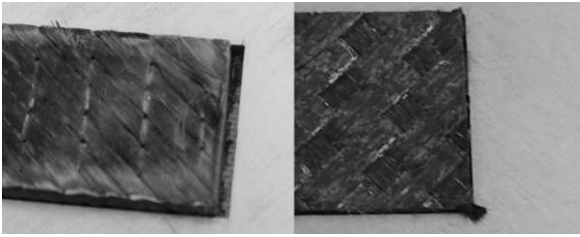


BILD 11. Spalt zwischen Preform und Werkzeug (links), exakt passende Preform (rechts)

Die in der TAB 1 gemittelten Faservolumengehalte resultieren aus einer Dickenmessung und einer vergleichenden Gewichtsmessung der einzelnen Proben.

	MAG	UD	Gewebe
Laser	56 %	50 %	49 %
Messer	58 %	57 %	58 %

TAB 1. Gemittelte Faservolumengehalte der Proben

Die Unterschiede bei den Faservolumengehalten sind deutlich zu erkennen, wobei sich der größte Unterschied beim Gewebe ergibt. Aufgrund des verdickten Randbereiches der Preformen ist keine ausreichende Kompaktierung möglich und es bildet sich während der Injektion ein Spalt zwischen dem Form- und Deckblech (siehe BILD 9). Als Resultat entsteht eine 0,5 mm starke Reinharzschicht wie sie in BILD 12 gezeigt ist. Des Weiteren ist das durch mechanische Einwirkungen hervorgerufene Abblättern der Randschicht an den Schnittkanten zu erkennen.

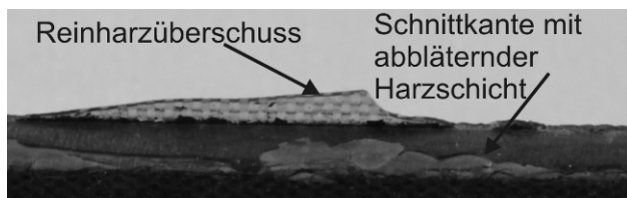


BILD 12. Reinharzüberschuss und abblättrende Harzschicht

Eine Aussage zu den mechanischen Kennwerten kann bisher noch nicht gemacht werden, da die Prüfung der Proben noch aussteht. Jedoch kann nach Meyer [14] eine Aussage zum Verhalten bei Druckbeanspruchung gemacht werden. Proben die mit einem Cutter (Messer) geschnitten werden sind bei den Druckfestigkeiten vergleichbar mit Nd:YAG- Laser geschnittenen, sowie mit Proben die konventionell erst nach dem Aushärten mit einer Säge zugeschnitten werden. Allerdings führt der Einsatz eines CO₂- Lasers zu schlechteren Kennwerten. Dieses Verhalten ergibt sich auch bei den Drucksteifigkeiten.

3.5. 3D- Besäumungsversuch

Damit die Feinbesäumung mittels Laser in einem automatisierten Herstellungsprozess von realen Bauteilen integriert werden kann, muss die grundlegende Eignung des Verfahrens für komplexe 3D- Profile nachgewiesen

werden. Als Versuchspreform wird ein C- Spant verwendet. Der Lagenaufbau besteht aus zwei durchgehenden MAG- Lagen und in den beiden Gurten liegen als innerste Lagen zwei 0° UD- Lagen.

Die Schnittkanten verlaufen entlang des Gurtes, wobei die Besäumung mit einem robotergeführten Laserbearbeitungskopf durchgeführt worden ist. Am Außengurt des Spantes sind leichte Ausfransungen des Fasermaterials zu erkennen. Aufgrund des geteachten Schneidprozesses sind die Bahnkurven des Roboterarms nicht präzise genug und daher variieren die Schneidergebnisse. Am Innengurt, wie im BILD 13 gezeigt, des C- Spantes sind solche Ausfransungen nicht zu erkennen. Das Bild zeigt gleichzeitig den Wärmeeinfluss des Schneidprozesses, so sind die Glasfasernähfäden im Randbereich aufgeschmolzen. Vergleichend zu den ebenen Zuschnitten bildet sich auch bei der dreidimensionalen Besäumung eine gräulich schimmernde Schicht aus.



BILD 13. Schnittkante des Innengurtes

Als weiterer Versuch ist die Laserleistung von 3 kW auf 6 kW verdoppelt und die Schneidgeschwindigkeit von 5 m/min auf 8 m/min erhöht worden. Bemerkenswert ist, dass die Nähfäden bei Erhöhung der Laserleistung und der Schneidgeschwindigkeit in einem kleineren Abstand wegschmelzen als beim Versuch mit geringerer Leistung und Schneidgeschwindigkeit. Durch die höhere Schneidgeschwindigkeit und die damit verbundene geringere Verweilzeit kann der Wärmeeinfluss begrenzt werden. Der vergrößerte Wärmeeinflussbereich im Vergleich zu den ermittelten Werten in BILD 8 liegt an den kleineren Besäumungsabschnitten, da diese wesentlich weniger Wärme abführen können.

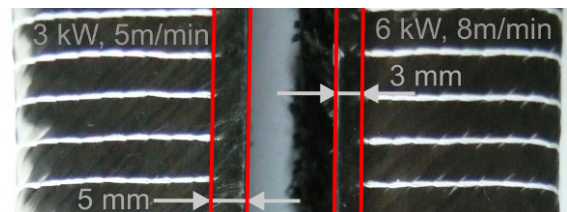


BILD 14. Wärmeeinfluss bei Veränderung der Laserleistung und der Schneidgeschwindigkeit

Bei allen Zuschnittversuchen kann ein deutliches nachglimmen der Kohlenstofffasern beobachtet werden.

4. WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG UND LEISTUNGEN

4.1. Kosten

Einen wesentlichen Einfluss auf die Bauteilkosten pro

Stück hat die Nachbearbeitung von Bauteilen. Sowohl bei der Prepreg-, als auch Injektionstechnologie bilden sich ungleichmäßige Bauteilkonturen aus, die durch mechanische Bearbeitung entfernt und anschließend versiegelt werden müssen. Vor diesem Hintergrund wird die Laserfeinbesäumung der Preform untersucht. Den vielen Anwendungsmöglichkeiten eines Lasers, auch bei der Bearbeitung von CFK-Bauteilen, stehen neben dem Wärmeeintrag auch die Anschaffungskosten und laufenden Kosten gegenüber. Um diese zu gängigen Verfahren ins Verhältnis zu setzen, erfolgt hier eine Gegenüberstellung der geschätzten Kosten. Die folgende Abbildung BILD 15 stellt die Anschaffungs-, Strom-, Verschleiß- und Betriebsmittelkosten für Laser- und Wasserstrahlschneiden, sowie Fräsen gegenüber (jeweils v.l.n.r.).

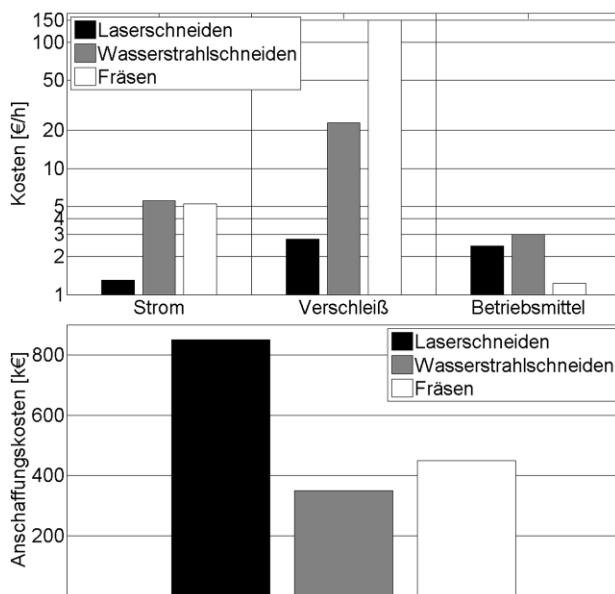


BILD 15. Kostenvergleich der Bearbeitungsverfahren

Bezüglich der Anschaffung, liegt ein Laserschnittsystem bei ca. 850 k€ (6 kW-Laser) und ist damit um den Faktor 2 teurer als eine Wasserstrahlschneidanlage und Fräszelle. Dabei entfallen ca. 350 k€ auf den Laser und 500 k€ auf Automatisierungs- und Sicherheits-einrichtungen. Pro Betriebsstunde fallen bei einem Lasersystem jedoch nur ca. 1,3 € gegenüber rund 5 € bei den verglichenen Systemen an. Erhebliche Unterschiede bezüglich der laufenden Kosten erweist der Verschleiß. Bei einem Lasersystem müssen lediglich Luftfilter, Schutzgläser der Schneidoptik und die Dioden der Laserpumpquelle ausgewechselt werden, was bei dem für die Versuchszwecke verwendeten 3-kW-Laser 6,50 €/h ausmacht. Durch die Pumpleistung und das Abrasiv einer Wasserstrahlschneidanlage ergeben sich bei dieser bereits ca. 40 €/h. Bei der Fräsbearbeitung müssen noch höhere Verschleißkosten angesetzt werden, da die Fräswerkzeuge bei einer äquivalenten Schnittgeschwindigkeit von 6 m/min nach etwa 80 m Schnittweg getauscht werden müssen. Somit ergeben sich hier, bei geringen sonstigen Verschleißkosten, ca. 150 €/h. Als weitere Betriebsmittel fallen bei einem Laser rund 2,5 €/h für das Schutzgas (hier Stickstoff), beim Wasserstrahlschneiden 3 €/h für den Wasserverbrauch und beim Fräsen ca. 1,3 € für Kühlwasser an.

Der Vergleich zeigt, dass der Laser trotz erheblich höherer Anschaffungskosten im laufenden betrieb deutliche Kostenvorteile aufweist. Die erhöhten Anschaffungskosten sind dabei nicht nur auf das System, sondern auch die Sicherheitseinrichtungen (Einhausung) zurückzuführen. Dabei wird nicht einbezogen, dass beim Beschnitt der Preform statt des Endbauteils mit einem großen Gewinn bezüglich Personal- und Materialkosten, aufgrund der entfallenden Kantenversiegelung und dem Zeitverlust durch die Nachbearbeitung, gerechnet werden kann.

4.2. Leistungen

Hinsichtlich der Bearbeitungsleistungen ist vermeintlich die erreichbare Schnittgeschwindigkeit am interessantesten. Diese hängt abgesehen vom Material insbesondere von der geforderten Schnittqualität ab. Bei einer Fräsbearbeitung limitieren Delamination und Faserausrisse die Schnittgeschwindigkeit. Mit modernen Fräsern lassen sich Vorschübe von bis zu 6 m/min erreichen, die allerdings nur eine Standzeit von 80 m haben. Für eine längere Lebensdauer muss die Schnittgeschwindigkeit deutlich reduziert werden. Neuartige Fräser, mit höheren Anschaffungskosten erreichen ca. 200 m Schneidweg, sind in der Anschaffung aber entsprechend teurer. [1]

Beim Wasserstrahlschneiden limitieren ebenfalls Delamination und ein unsauberes Schnittbild den Vorschub. Der Tapereffekt, also eine kegelförmige Schnittkante, tritt insbesondere bei höheren Schnittgeschwindigkeiten und an nicht geradlinigen Schnitten auf, so dass derzeit eine maximale Bearbeitungsgeschwindigkeit von 2 m/min bei 5 mm Bauteildicke möglich ist. Für die Bearbeitung mit einem Laser empfiehlt sich bei ausgehärteten CFK-Bauteilen das gepulste Laserschneiden, mit dem lediglich 1 m/min erreicht wird. Gänzlich anders muss der Vergleich mit dem Beschnitt von Trockenfaser-Preforms per Dauerstrahlschneiden erfolgen. Hier limitiert das Schnittbild in Verbindung mit der Laserleistung den Vorschub. Mit einem 3kW-Laser lassen sich 8 MAG- oder Gewebelagen mit bis zu 5 m/min schneiden, ohne dass es zu Faserausrisse und schlechtem Schnittbild kommt.

Schwerer greifbare Vorteile beim Laserschneiden sind die Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitung unterschiedlicher Materialien, Bauteildicken und Formen. Laser lassen sich nicht nur durch Anpassung der Parameter für verschiedene Schneidaufgaben einsetzen, sondern in Hinblick auf eine geschlossene Qualitätssicherung auch für andere Aufgaben. Zum Beispiel können Laser genutzt werden, um Formwerkzeuge für einen RTM-Prozess zu reinigen (CleanLaser). Laser sind zudem zum beschichten von Oberflächen einsetzbar und für die Verarbeitung von Thermoplasten bzw. beim Laserschweißen. In Hinblick auf Reparaturprozesse können mit einem Laser dünne Materialschichten abgetragen werden, wenn eine Schäffung für eine Patch-Reparatur erfolgen soll. Lasersysteme mit einem geeigneten Laserschneidprozess können zudem auch im Post-Processing¹⁴, wie dem Einbringen der „Mouse Holes“¹⁵ in Spante, genutzt werden. Führung (3D-Portalsystem) sind für komplexe

¹⁴ Engl. Nachbearbeitung

¹⁵ Engl. wörtl. Mauselloch, hier: Durchbruch

Bearbeitungsvorgänge geeignet, die im Vergleich zum Konturfräsen und Wasserstrahlschneiden eine deutlich bessere Formfreiheit erlauben, wenn z.B. die Einschränkung durch den Fräskopfdurchmesser hinsichtlich der Zugänglichkeit mit bedacht wird. [3]

5. FAZIT

In diesem Arbeitspapier wurden die Anforderungen an die Herstellung und Nachbearbeitung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen, speziell CFK, aufgeführt und ein Vergleich zwischen der Endkonturbearbeitung mittels Fräsen, Wasser- und Laserstrahlschneiden, sowie dem Beschnitt von Trockenfasergelegen (Preforms) vor der Bauteilprozessierung mit einem Laser gemacht. Dieser Ansatz stellt eine Möglichkeit dar, die Folgekosten der Bauteilherstellung deutlich zu reduzieren, sofern der Wärmeeintrag in das Material (WEZ) beherrschbar ist. Für eine Bewertung wurde die technologische Machbarkeit des Laserschneidens von Trockenfasern untersucht, sowie der Einfluss auf die Verbundeigenschaften. Eine abschließende Beurteilung anhand zerstörender Werkstoffprüfung steht noch aus.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Beeinträchtigung durch den Wärmeeintrag ein mit der Einstellung der Schnittparameter beherrschbarer Effekt ist. Insbesondere die Anpassung des Schutzgasdrucks beim Schneiden, aber auch die Wahl der Fokusslage und die eingebrachte Laserleistung ermöglichen einen konkurrenzfähigen Bearbeitungsprozess mit guten Schnittgeschwindigkeiten. Wird die Schnittgeschwindigkeit bei der Bearbeitung eines komplexen Bauteils ins Verhältnis zur Nachbearbeitungszeit gesetzt, fällt diese nicht ins Gewicht. Hier entsteht bei der Endkonturbearbeitung eines Spantsegments mit 6 Metern Bogenlänge und damit einem Schneidweg von ca. 13 Metern beim Fräsen und Laserbesäumen eine Zeitdauer von ca. 3 Minuten an. Beim deutlich langsameren Wasserstrahlschneiden ca. 6 Minuten. Diese Prozesszeiten sind gegenüber dem nachträglichen „Edge Sealing“ jedoch minimal, so dass zu Gunsten der Schnittqualität insbesondere beim Laser günstigere Schnittparameter mit geringerer Bearbeitungs-geschwindigkeit gewählt werden können. Zudem treten Bearbeitungseffekte auch durch das Wasserstrahl-schneiden und Fräsen auf. Im Vergleich weisen Lasersysteme eine hohe Anpassungsfähigkeit und Flexibilität auf und lassen sich in einem Gesamtprozess auch für andere Aufgaben nutzen. Dem vergleichsweise hohen Anschaffungspreis stehen geringe laufende Kosten gegenüber, sowie der Vorteil eines minimalen Aufwands an Verschleißteilen.

Den zukünftigen Anforderungen an die Produktivität einer Bauteilherstellung können Fertigungsprozesse nur mit erträglichen Kosten gerecht werden, wenn der Bearbeitungsaufwand pro Einzelbauteil sinkt. Besonders die Nachbearbeitung und Versiegelung der Bauteile, die in derzeitigen Fertigungsprozessen unvermeidbar sind, tragen zu gesteigerten Kosten und Fertigungszeiten bei, sowie verschleißintensive Arbeitsvorgänge. Der Laser als berührungsfreies Schneidwerkzeug, mit geringen laufenden Kosten und der „Endkonturbearbeitung vor der Endkonturherstellung“ kann zum Erreichen der geforderten Produktivität wirtschaftlich sinnvoll angewendet werden.

Quellen

- [1] Dr Müller-Hummel, P: Werkzeuglösungen zur Bearbeitung von CFK; MAPAL
- [2] Bijmolt, H: Schneller Wasserstrahlschneiden ohne Präzisions-verlust; www.innovations-report.de; 2008
- [3] Klocke, F.; König, W: Fertigungsverfahren 3 – Abtragen, Generieren, Lasermaterialbearbeitung;., Springer-Verlag, 2007
- [4] Pagano, N.; Leone, C.; Lopresto, V.; De Iorio, I: Laser cutting of CFRP sheet by pulsed Nd:YAG source: Influence of pulse energy, pulse duration and overlapping on kerf geometry and HAZ; University of Naples
- [5] Modest, M.F: Heat conduction in a semi-finite solid subjected to pulsed laser irradiation; J. Heat Transfer 108, 1986
- [6] Speker, N: Potenziale des Lasers im Kontext Faserverbundkunststoff; Trumpf Laser- und Systemtechnik GmbH; 2011
- [7] Abedin, F: Review on heat Affected Zone (HAZ) in Laser Machining; Wichita State University; 2010
- [8] Jaeschke, P.; Fischer, F.; Kern, M.; Kracht, D.: Laser cutting of CETEX® thermoplastic composites using high-power multimode fibre laser; Laser Zentrum Hannover e.V.;
- [9] Li, Z. L.; Chu, P. L.; Zheng, H. Y.; Lim, G. C.: Process development of laser machining of carbon fibre reinforced plastic composites; SIMTech; 2009
- [10] Uhlmann, E.; Spur, G.; Hocheng, H.; Liebelt, S.; Pan, C.T.: The extent of laser-induced thermal damage of UD and crossply composite laminates; 1997
- [11] Dr. Heidenhain, J.: „Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen“; Dr. Johannes Heidenhain GmbH; 2010
- [12] Shanmugama, D.K.; Masood, S.H: An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites; Journal of materials processing technology 209 (2009) 3887–3893; 2009
- [13] Voisey, K.T.; Fouquet, S.; Roy, D.; Clyne, T.W.: Fibre swelling during laser drilling of carbonfibre composites“; Optics and Lasers in Engineering 44 (2006) 1185–1197; 2006
- [14] Dipl.-Ing. Meyer, O.: Kurzfaser-Preform-Technologie zur kraftflussgerechten Herstellung von Faserverbundbauteilen; Dissertation; Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart, 2008