

Die besonderen Herausforderungen beim Laserschneiden von CFK

Die konsequente Weiterführung der Leichtbauanstrengungen führt dazu, dass auch im Automobil- und Maschinenbau zunehmend karbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zum Einsatz kommen. Für eine wirtschaftliche Produktion ist es dabei erforderlich, CFK mit derselben Geschwindigkeit verarbeiten zu können, wie dies bei Stahl- und Aluminiumelementen üblich ist. Gleichzeitig gilt es, die Schädigung des Materials in den erforderlichen Toleranzen zu halten. Dabei bietet sich auch beim Schneiden von CFK der Laser als ideales Werkzeug an. Im Vergleich zum bekannten Laserschneiden von Metallen haben aber die außergewöhnlichen Materialeigenschaften von CFK zur Folge, dass die Bearbeitung besonders anspruchsvoll ist. Die Grundlagen dazu und deren Konsequenzen werden am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSWS) der Uni Stuttgart untersucht.

Die erste Besonderheit ergibt sich direkt aus dem Phasendiagramm von Kohlenstoff, aus dem hervorgeht, dass bei Umgebungsdrücken unter 100 bar keine flüssige Phase existiert. Zum Laserschneiden der Karbonfasern muss das Material also größtenteils sublimiert werden. Die Prozesstemperatur ist somit die Sublimationstemperatur. Beim herkömmlichen Laserschneiden von Metallen dagegen ist die Prozesstemperatur die wesentlich tiefere Schmelztemperatur, wo das Material als Flüssigkeit mit hohem Druck aus der Schnittfuge ausgetrieben werden kann (Abbildung 1). Betrachtet man den Energiebedarf, um das Material auf Prozesstemperatur zu erwärmen und anschließend zu schmelzen oder zu verdampfen, so folgt beim Sublimationsschneiden der Karbonfasern sofort ein im Vergleich zum Schmelzschnitten viel höherer spezifischer Energieverbrauch. Der Unterschied ist vor allem auf die im Vergleich zur

Schmelzenthalpie von Metallen deutlich höhere Sublimationsenthalpie von Karbon zurückzuführen.

Setzt man ohne Berücksichtigung der Verluste P_V die entsprechende Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c_p und Schmelztemperatur ein, so ergibt sich für das Schmelzschnitten von Eisen ein Energiebedarf von 10 J pro mm³ Schnittfuge. Für das Sublimationsschneiden der Karbonfasern sind hingegen mindestens 85 J pro mm³ erforderlich. Energetisch betrachtet ist der Anteil der Kunststoffmatrix mit 2 J pro mm³ vernachlässigbar.

Die Eigenschaften der Kunststoffmatrix haben hingegen bezüglich Prozessqualität und der dafür notwendigen Prozessgestaltung eine große Bedeutung. Die Sublimationstemperatur der Karbonfasern beträgt 3900 K, jene der Kunststoffmatrix hingegen nur 800 K, wobei die Schädigung der Matrix-Struktur bereits ab 450 K einsetzt. Die vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit von ca. 50 W/(m·K) entlang der Karbonfasern hat daher zur Folge, dass thermische Schädigungen bis tief ins Werkstück hineinreichen können, wenn die Wärmeeintragszeit nicht kurz genug gehalten wird. Die Ausbreitung der Wärme entlang der Carbonfasern kann sehr schön mit Thermo-Kameras qualitativ und quantitativ untersucht werden (Abbildung 2).

Die Wärmeeintragszeit wird durch die Zeit bestimmt, die es braucht, um erstens die Karbonfasern auf Sublimationstemperatur zu erwärmen und zweitens die für die Sublimation benötigte Energie aus dem Laserstrahl zu absorbieren. Sobald das Material sublimiert und entfernt ist, endet der Wärmeeintrag in das benachbarte Material. Es ist daher unmit-

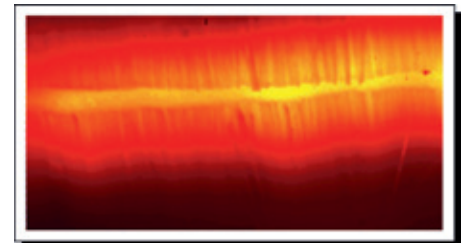


Abbildung 2. Einzelnes Bild von der Schnittfuge, gemacht mit einer Thermo-Hochgeschwindigkeits-Kamera. Das Bild entstand ca. 200 ms nach dem Durchgang des Lasers.

telbar ersichtlich, dass die Wärmeeintragszeit abnimmt, wenn der Prozess mit zunehmender Laserintensität verkürzt wird.

Es ist somit primär die Intensität und nicht die Pulsdauer, welche die Schädigungstiefe bestimmt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3 dargestellt, welcher die analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung zugrunde liegt. Hier wurde angenommen, dass das durch Strahldurchmesser und optische plus thermische Eindringtiefe gegebene Volumen sich so lange auf Sublimationstemperatur befindet, bis aus dem Laser die für den Übergang in den dampfförmigen Zustand benötigte Energie absorbiert ist. Danach wird die Wärmequelle ausgeschaltet und der Zerfall der Temperaturverteilung berechnet. In Abhängigkeit der Strahlintensität zeigen die beiden Kurven, bis zu welcher Tiefe entlang der Karbonfasern die Schädigungstemperatur von 450 K und die Verdampfungstemperatur von 800 K der Matrix erreicht wird. Die beiden Kurven zeigen damit die prinzipiell minimal erreichbare Schädigung der Matrix durch Wärmeleitung. Die Messpunkte in der Grafik stammen aus dem IFSWS und diversen Publikationen. Details sind zu finden in

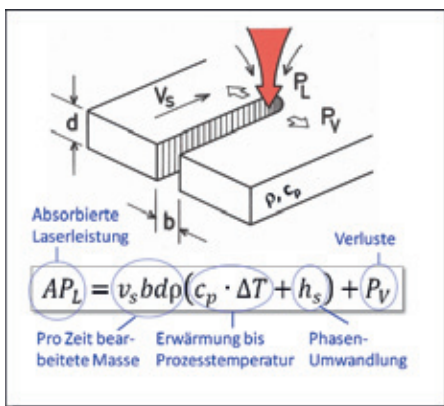


Abbildung 1. Beim Schmelzschnitten von Metallen wird das Volumen der Schnittfuge nur aufgeschmolzen und dann mit hohem Druck ausgetrieben. Beim Schneiden von CFK muss hingegen das gesamte Volumen sublimiert werden.

[1, 2]. Für Strahlquerschnitte mit steilen Flanken (Supergauß) haben sich diese Kurven bisher gut bestätigt (Messpunkte bei tiefen Intensitäten).

Bei Gauß-förmigen Strahlen ist die Schädigungstiefe z.T. erheblich größer (Messpunkte bei hohen Intensitäten), was auch darauf zurückzuführen ist, dass in den Strahlflanken die für die vollständige Sublimation erforderliche Intensität nicht erreicht wird und die Wärme im Material zurückbleibt. Zudem können dort auch Effekte wie Streuung am Plasma und Energietransport durch schnelle Elektronen auftreten.

Soll eine Schädigungstiefe von 10 µm unterschritten werden, muss also mindestens mit einer Laserintensität von 10^9 W/cm² geschnitten werden. Dies hat beachtlichen Einfluss auf die Anforderungen an die Bearbeitungsanlage:

Um die heutigen Produktivitätserwartungen zu erfüllen, müssen beispielsweise 2 mm dicke CFK-Bauteile mit einer effektiven Schnittgeschwindigkeit von 10 m/min geschnitten werden können, wobei die Fugenbreite zur Erleichterung der Teileentnahme etwa 100 µm betragen soll. Unter Vernachlässigung der Matrix folgt aus der für die oben angesprochene Bildung der Schnittfuge notwendigen Energie (Abbildung 1) bei einem realistisch angenommenen Absorptionsgrad von $A = 84\%$ eine mindestens erforderliche Laserleistung von 3,3 kW. Die für die maximal 10 µm Schädigungstiefe notwendige Intensität von 10^9 W/cm² wird erreicht, wenn dieser Strahl auf einen Durchmesser von ca. 20 µm fokussiert wird. Um die angestrebte Fugenbreite von 100 µm zu erreichen, sind

also bereits 5 seitlich versetzte Überfahrten notwendig. Wenn pro Überfahrt das Aspektverhältnis der Fuge zugunsten eines effizienten Materialabtrags 1:10 nicht überschreiten soll, darf pro Überfahrt nicht mehr als 200 µm tief abgetragen werden. Um die gesamte Fuge abzutragen, sind also 10 Lagen mit je 5 seitlich versetzten Spuren abzutragen, was insgesamt 50 Überfahrten erfordert. Damit die effektive Schneidgeschwindigkeit die geforderten 10 m/min beträgt, muss daher die einzelne Überfahrt mit einem Vorschub von 500 m/min erfolgen! Weit über den Geschwindigkeiten also, die heute beim laserbasierten Schneiden von Metallen üblich sind. Erschwerend kommt dabei hinzu, dass der oben vorausgesetzte kleine Fokus nur mit einer starken Fokussierung erfolgen kann. Nimmt man eine Beugungsmaßzahl von $M^2 = 10$, so muss die Fokuslage während der Bearbeitung auf eine Genauigkeit in der Größenordnung von ca. ± 30 µm relativ zum (nicht zwingend ebenen) Werkstück konstant gehalten werden. Zudem bedingt der kleine Fokussdurchmesser, dass im obigen Beispiel bei einem typischen Rohstrahldurchmesser von 25 mm die Brennweite der Fokussierlinse nur ca. 50 mm sein darf. Diese kurzen Brennweiten und die zudem oft großen Bauteile machen auch den Einsatz von Scannern sehr schwierig.

Eine höhere mittlere Leistung, um größere Fokussdurchmesser und weniger Überfahrten zu ermöglichen, mildert das Problem nicht wesentlich, da auch so hohe Vorschubgeschwindigkeiten resultieren (z.B. 250 m/min bei 83 kW in 100 µm Fokus).

Intensitäten über 10^9 W/cm² bei gleichzeitig großem Fokussdurchmesser können natürlich mit Lasern mit kurzen und ultrakurzen Pulsen erreicht werden. Aus den hier gemachten Überlegungen folgt aber bereits, dass auch dann eine mittlere Leistung von 3,3 kW verfügbar sein muss. Die Pulsenergie muss dabei genau der Energie entsprechen, die für die Ablation des durch Strahldurchmesser und Eindringtiefe definierten Volumens erforderlich ist. Andernfalls geht die im Material deponierte Energie in die Wärmeleitung. Zum Erreichen der minimal möglichen Schädigung müsste zudem

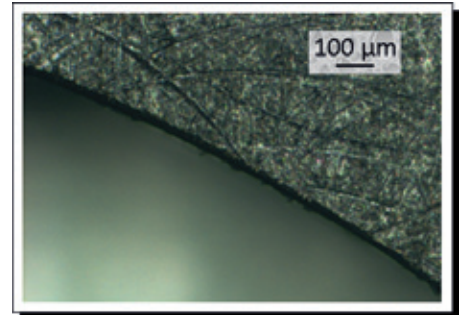


Abbildung 4. Qualitativ hochwertige Kante eines lasergeschnittenen Loches in CFK.

neben dem örtlichen auch der zeitliche Pulsverlauf ein Rechteckprofil aufweisen.

Die hier beispielhaft gemachte Abschätzung verdeutlicht erstens, dass das Laserstrahlschneiden hohes Potential hat, CFK mit höchster Qualität zu trennen (Abbildung 4).

Zweitens aber auch, dass dazu hohe anlagentechnische Herausforderungen zu meistern sind. Wie genau diese aussehen, werden weitere experimentelle und theoretische Untersuchungen ergeben.

Referenzen:

1. R. Weber, M. Hafner, A. Michalowski, T. Graf; Minimum damage in CFRP laser processing, Physics Procedia 12(2), 2011, Pages 302-310
2. R. Weber, M. Hafner, A. Michalowski, P. Mucha, T. Graf; Analysis of Thermal Damage in CFRP processing, Paper 1205, ICALEO 2011, Orlando

Autoren:

Prof. Dr. Thomas Graf (links) ist Physiker und seit 2004 Leiter des IFSW
graf@ifsw.uni-stuttgart.de

Dr. Rudolf Weber (rechts) ist Physiker und leitet am IFSW die Verfahrensentwicklung
rudolf.weber@ifsw.uni-stuttgart.de

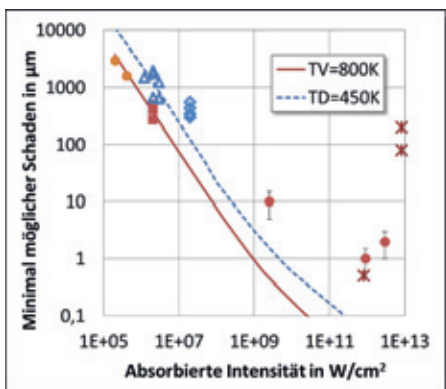
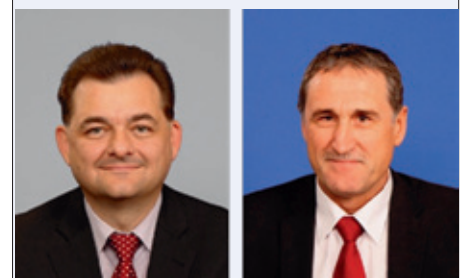


Abbildung 3. Minimal mögliche Schädigung des Matrix Materials aufgrund von Wärmeleitung.