

## Qualitätsaspekte bei der Sägebearbeitung von CFK

# Zerspanung von CFK mittels Kreissägeverfahren

T. Mayer, M. Schneider

**ZUSAMMENFASSUNG** Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) finden immer breitere Verwendung in der Industrie. Neben Freiformbauteilen kommen vermehrt Halbzeuge wie Rohre und Profile zum Einsatz. Bei anderen Werkstoffen wie Metallen oder reinen Kunststoffen kommen für Ablängprozesse meist Kreissägeverfahren zum Einsatz. Für CFK besteht noch ein grundlegender Wissensbedarf, wie Werkzeuggeometrie, Prozess- und Materialparameter die Qualitätsausbildung beeinflussen und welche Schädigungsbilder am Bauteil vorliegen.

### STICHWÖRTER

Sägen, Leichtbau, Forschung

## Machining of CFRP by circular sawing – Quality in circular sawing of CFRP

**ABSTRACT** Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are being applied in a wider range of industrial fields. They are not only used for free-formed surfaces, but increasingly also for profiles, tubes, and bars. When cutting other materials to length, such as steel or plastics, circular saw machining is used. When it comes to sawing CFRP, there is a lack in knowledge of correlations and influences of tool, process, and material parameters on the resulting quality, as well as regarding material damage.

## 1 Motivation und Problemstellung

Leichtbauwerkstoffe wie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) haben in den letzten Jahren ein deutliches Markt wachstum gezeigt. Die Gründe sind vielfältig: Neben der wachsenden Bedeutung des Themas Leichtbau aufgrund von Umwelt- und Klimaschutzzielen steht bei vielen technischen Applikationen von Leichtbauwerkstoffen eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit und technischen Leistungsfähigkeit im Vordergrund. Beispiele sind technische Vorteile bei der Beschleunigung von Lasten, die Erzielung höherer Steifigkeitskennwerte bei kleinem Gewicht, Vorteile beim thermischen Ausdehnungsverhalten oder bei der Ergonomie von bewegten Lasten durch den Menschen. Neben Freiformflächen, die etwa im Kraftfahrzeugbereich, Flugzeugbau oder bei Sportapplikationen üblich sind, kommen zunehmend Halbzeuge aus CFK auf den Markt, also Profile, Rohre, Stäbe und ähnliche Geometrien. Grundsätzlich müssen Bauteile und Halbzeuge mechanisch bearbeitet werden. Die Zerspanung von faserverstärkten Kunststoffen ist eine Herausforderung: Die Inhomogenität von Faser und Matrix sowie die Anisotropie des Werkstoffes in Abhängigkeit des Lagenaufbaus und der Faserausrichtung, verbunden mit der Abrasivität der C-Faser und der damit verbundene Werkzeugverschleiß sind Kennzeichen der spanenden Bearbeitung von CFK [1–3].

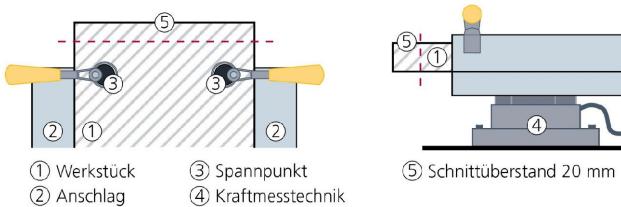
Neben der Fräsbearbeitung für Freiformflächen bietet sich wie bei anderen Halbzeugen auf Basis von Fertigungsverfahren, etwa der Extrusion oder der Pultrusion, der Einsatz von Kreissägeverfahren zum Ablängen an. Große Materialstärken, Durchmesser oder Querschnitte können mittels Kreissägeverfahren wegen der hohen Vorschubgeschwindigkeit und der geringen Fugenbreite

(Verschnitt) wirtschaftlich abgelängt werden [4, 5]. Die Auslegung von Kreissägewerkzeugen und -prozessen für neue Anwendungen erfolgt bei Holzwerkstoffen, Kunststoffen und vielen metallischen Werkstoffen auf Basis jahrzehntelanger Erfahrung der Werkzeug- und Maschinenhersteller. Für faserverstärkte Kunststoffe sind zu Frä- und Bohrbearbeitung mittlerweile vielfältige wissenschaftliche Ergebnisse zu den Zusammenhängen zwischen Werkzeuggeometrie, Prozessparametern, Kräften in der Zerspanung und Bearbeitungsqualität vorhanden (siehe [6–9]).

Für die Kombination faserverstärkter Kunststoffe mit dem Bearbeitungsverfahren Kreissägen soll der vorliegende Beitrag eine zusammenfassende Darstellung liefern, die auf den Forschungstätigkeiten im Rahmen von Promotion und eines Forschungsvorhabens basieren [10, 11]. Dabei werden vor allem die Zusammenhänge zwischen Werkzeugparametern, Prozessparametern und Faserorientierung im Hinblick auf die Schädigung am Bauteil analysiert, um daraus abgeleitet die erzielbare Qualität zu quantifizieren.

## 2 Stand der Technik

Bauteile aus Faserverbundkunststoffen werden im Gegensatz zu metallischen Bauteilen nur in geringem Umfang spanend bearbeitet. Dies betrifft zum Beispiel Nachbearbeitungsschritte, wie das Besäumen des Randbereichs von CFK-Bauteilen [3]. Grundsätzlich treten an CFK-Bauteilen wegen der Inhomogenität und Anisotropie andere Bearbeitungsfehler auf als bei metallischen Bauteilen, die spanend bearbeitet werden. Typische reversible Schädigungen sind Ausfransungen und Gratbildung, irreversibl e Schädigungen sind Delaminationen, Ausbrüche von Faser und



**Bild 1** Aufspannung der Werkstückproben mit festgelegtem seitlichen Schnittüberstand. *Grafik: [10]*

**Tabelle.** Übersicht zu den untersuchten Werkzeugparametern.

| Zahnform     | Wechselzahn       | Wechselzahn mit Fase | Flachzahn mit Fase | Rückenhohlzahn |
|--------------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------|
| Spanwinkel   | -4° bis +9°       |                      |                    |                |
| Eckwinkel    | 10° bzw. 40°      |                      |                    |                |
| Schnittdicke | 1,8 mm bis 3,2 mm |                      |                    |                |
| Zähnezahl    | 84 bzw. 120 Zähne |                      |                    |                |

Matrix sowie thermische Schädigungen des Gefüges [12, 13]. Wissenschaftlich am häufigsten behandelt ist die Delamination, also die Ablösung von einzelnen oder mehreren Lagen des Schichtaufbaus [2].

Die Schädigungen in der spanenden Bearbeitung sind verfahrensabhängig. Für die Bohrbearbeitung liegen umfangreiche Untersuchungen vor. Dies ist durch die Bedeutung der Bohrbearbeitung für ein anschließendes Nietsetzen im Flugzeugbau begründet. *Pfeifroth* und *Klotz* stellen die Zusammenhänge der Qualitätsbildung in Bezug auf Werkzeuggeometrie, Lagenaufbau und Prozessparameter umfassend dar [7, 14]. Maßgebliches Schädigungsbild ist die Delamination auf der Austrittsseite der Bohrwerkzeuge. Dabei ist die Vorschubkraft die bestimmende Größe, die zur Ablösung des Laminats führt. Seitens der verfahrenstechnischen Einstellgrößen ist für die Vorschubkraft die Vorschubgeschwindigkeit maßgebend. Seitens des LaminatAufbaus und der Werkzeuggeometrie gibt *Franke* [15] eine umfassende Darstellung der Zusammenhänge.

Die Schädigungsbilder und damit die Qualitätsbewertung bei der Bohrbearbeitung wird üblicherweise durch den durchmesserbezogenen Delaminationsfaktor nach *Chen* [16] beschrieben, der das Verhältnis der tiefsten Schädigung bezogen auf den Soll-durchmesser der Bohrung bildet.

Neben der Bohrbearbeitung ist die Fräsbearbeitung von CFK Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen, vor allem am Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) der Technischen Universität Hamburg, zum Beispiel in der Dissertation von *Hartmann* [17].

In der Fräsbearbeitung liegt im Gegensatz zur Bohrbearbeitung ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Bauteilqualität in der Orientierung der Fasern der Decklage zur Werkzeugschneide und der Schnittrichtung [17, 18]. Die maßgeblichen Kenngrößen zur Beschreibung der gegenseitigen Lage sind der Faserorientierungs-

winkel zwischen Faserrichtung und Vorschubrichtung und der Fasertrennwinkel zwischen Faserrichtung und Schnittrichtung der Werkzeugschneide [18].

Im Gegensatz zur Bohrbearbeitung besteht kein einheitlicher Ansatz zur Qualitätsbewertung. Ein Ansatz von *Davim* [19] für das Nutfräsen setzt analog zum Bohren die Tiefe der Delamination ins Verhältnis zur Nutbreite. Eine tiefergehende Schädigungsanalyse liegt an der TU Wien der Beurteilung von Zerspanwerkzeugen für die FVK-Bearbeitung als „quality index“ vor. Dieser wird aus der maximalen Schadenslänge bei Ausfransung, Delamination und Absplitterung an unterschiedlichen Bauteilabschnitten eines Musterwerkstücks errechnet [20]. Darauf aufbauend entstand die DIN SPEC 25713 „Beurteilung der Bauteilqualität nach der trennenden Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen“. Hierin werden Bohrungen ebenso wie Fräskanten anhand von Delamination, Absplitterung und Ausfransung bewertet.

Eine Spezifizierung oder besondere Berücksichtigung von Kreissägeverfahren spiegeln die bisherigen Qualitätsdefinitionen nicht wider. Zugleich sind Bewertungsmethoden der Bauteilqualität und Schädigungsbilder für Kreissägeverfahren bei beschichteten Holzwerkstoffen bekannt. Dabei wird statt der Delamination der Kantenausbruch als Qualitätskenngröße betrachtet. Maßgeblichen Einfluss auf die Qualität beim Kreissägen von beschichteten Holzwerkstoffen haben die Schneidenanzahl, der Zahnvorschub, Rund- und Planlauf, der Verschleißzustand sowie der Sägeblattüberstand, woraus der Austrittswinkel der Schneide aus dem Werkstück resultiert [4, 21].

Aus dem Stand der Technik wird deutlich, dass Schädigungsbilder, die Qualitätsentstehung und deren Einflussfaktoren bei der Kreissägebearbeitung von CFK in der Forschung unterrepräsentiert sind. Eine wesentliche Forschungsarbeit zum Thema ist das IGF-Vorhaben Nr. 18399 N, in dem maßgebliche Einflussgrößen auf die Qualität beim Kreissägen von CFK untersucht wurden [11]. Eine Vertiefung der Forschungsarbeit erfolgte in der Dissertation des Autors, die Grundlage für die folgende Darstellung ist [10].

### 3 Vorgehensweise

Im Folgenden werden die Versuchsbedingungen, die untersuchten Kreissägewerkzeuge und die CFK-Varianten beschrieben. Weiterhin wird aufgezeigt, wie die Bewertung der Schädigungsbilder beziehungsweise Schnittqualität erfolgte.

Für die Zerspanversuche wurde ein Kreissägeprüfstand genutzt, wobei die ebenen Werkstückproben mit vorgegebener Vorschubgeschwindigkeit am ortsfesten Sägeblatt vorbeigeführt wurden. Wesentlich für die Qualitätsbildung beim Sägen ist die Nachgiebigkeit der Werkstückprobe und Spannsituation. Daher wurde der seitliche Schnittüberstand der Werkstückproben jeweils auf 20 mm eingestellt. **Bild 1** zeigt die Aufspannung der Werkstückproben.

Als Versuchswerkzeuge kamen eigens hergestellte Kreissägewerkzeuge mit einem Durchmesser von 300 mm zum Einsatz, die in Anlehnung an heutige Werkzeuge für die Holzwerkstoffbearbeitung gestaltet waren. Bei den Parametern wurden die Zahnform, der Spanwinkel, der Eckwinkel, die Schnittdicke und die Zähnezahl der Werkzeuge variiert. Die **Tabelle** gibt dazu eine Übersicht.

Als Versuchswerkstoff wurde eine praxisübliche CFK-Variante genutzt (Sigafil C30 T050/FT 109 Epoxy). Für die Versuche

wurde der Faserlagenaufbau mit 8 Lagen in einem 0°-90°-UD-Aufbau gewählt. Die Decklage wurde in der Orientierung zur Vorschubrichtung des Kreissägewerkzeugs in vier Stufen variiert (0°, 45°, 90°, 135°). Die Dicke der Werkstückproben betrug 4,8 mm.

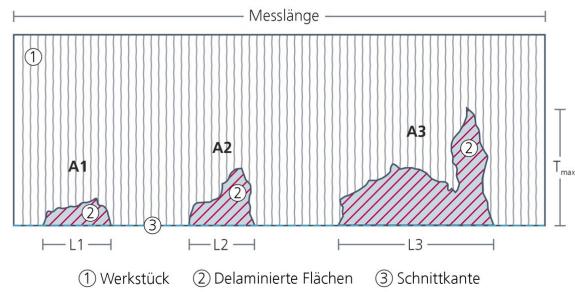
Die Ausprägungen der Schädigungen beim Kreissägen entsprechen anderen zerspanenden Verfahren und sind im Wesentlichen die Delamination der Deckschichten sowie Ausfransungen. Für Bohrungen und die Fräsbearbeitung, etwa beim Nuten, werden Delaminationen und Ausfransungen üblicherweise ins Verhältnis zum Durchmesser beziehungsweise der Nutbreite gesetzt [16, 19]. Dieser Ansatz ist für die Sägebearbeitung nicht zielführend, weshalb eine Bewertung in Anlehnung an Kantenausbrüche in der spanenden Bearbeitung von beschichteten Holzwerkstoffen [4, 21] gewählt wurde. Zum einen wurde entlang der Schnittkante die Summe der delaminierten Einzelflächen bestimmt (Delaminationsfläche  $A_{del}$ ), zum anderen wurde die tiefste Delamination ermittelt (maximale Delaminationstiefe  $T_{max}$ ). In **Bild 2** ist das Schema der Bewertungskriterien der Schnittqualität aufgrund der Delamination dargestellt.

In Abwandlung zur Auswertung in [10] wird die Delaminationsfläche  $A_{del}$  zusätzlich ins Verhältnis zur Messlänge der Werkstückproben gesetzt, welche eine Länge von 150 mm aufwiesen. Zur Berücksichtigung des Werkzeugeinlaufs und -auslaufs wurden jeweils 10 mm nicht messtechnisch erfasst, woraus eine Messlänge von 130 mm resultiert. Durch das Verhältnis von Delaminationsfläche zu Messlänge ergibt sich rechnerisch eine mittlere Delaminationstiefe. Dieses Vorgehen ist vergleichbar mit den Kennwerten der Rauheitsmessung in Form von  $R_{max}$  als maximale Einzelrautiefe innerhalb der Gesamtstrecke oder  $R_a$ , dem Mittenrauwert.

## 4 Ergebnisse zur Qualität der Schnittkante

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schädigungsanalyse vorgestellt. Dabei wird die entstandene Qualität an der Kante der Werkstückproben, die von den verschiedenen Kreissägewerkzeugen besäumt wurden, in Anlehnung an Qualitätskennwerte der Automobilindustrie nach Heusser [22] eingeteilt. Die drei relevanten Qualitätsklassen lassen sich folgendermaßen beschreiben:

1. Hohe Qualität: Durch den Schnitt ist keine oder nur eine geringe, örtlich begrenzte Delamination von maximal 2 mm Tiefe entstanden.
2. Mittlere Qualität: Es liegt eine höhere, oft flächige Delamination, mit Tiefen über 2 mm vor.
3. Unbrauchbare Qualität und Proben mit starker Schädigung, die eine messtechnische Analyse nicht sinnvoll erlauben: Es liegen tiefe Delaminationen vor, der Umfang der Ausdehnung in Tiefe und Breite ist erheblich.



**Bild 2** Kenngrößen zur Bewertung der Schnittqualität an der Werkstückkante auf Basis der delaminierten Fläche ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ) sowie der maximalen Tiefe der Delamination. *Grafik: [10]*

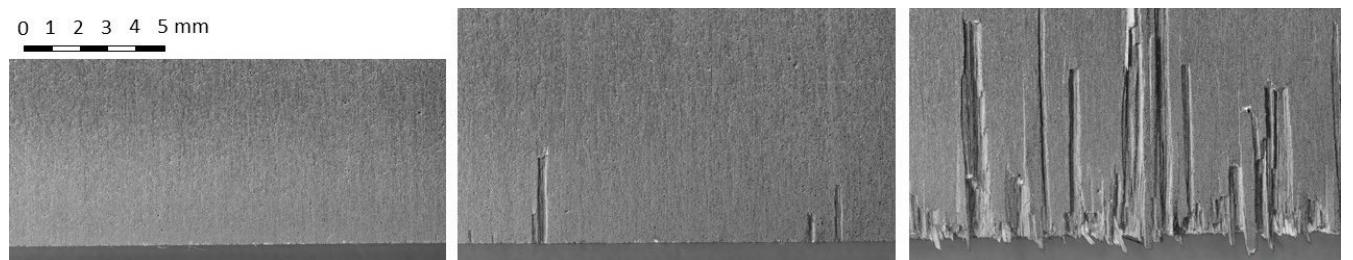
In **Bild 3** sind die drei Qualitätsklassen vergleichend dargestellt.

Neben der Delamination als Schädigungsbild können, ähnlich zu Fräsprozessen, auch Ausfransungen (Faserüberstände) entstehen. In den Versuchen konnte dies nur im Zusammenhang mit starker Delamination beobachtet werden, weshalb die Faserüberstände nicht als eigenes Fehlerbild ausgewertet wurden. Weiterhin ist, wie bei anderen Kreissägeapplikationen, eine eindeutige Unterscheidung in die Seite des Schneideneintritts und -austritts des Werkzeugs zu beobachten. Die untersuchten Werkstückproben zeigten grundsätzlich keine Eintrittsdelamination, weshalb nur die Werkzeugaustrittsseite messtechnisch erfasst wurde. Dies steht im Gegensatz zur Frä- und Bohrbearbeitung, bei der bei plattenförmigen Werkstücken Delaminationen beidseitig auftreten können.

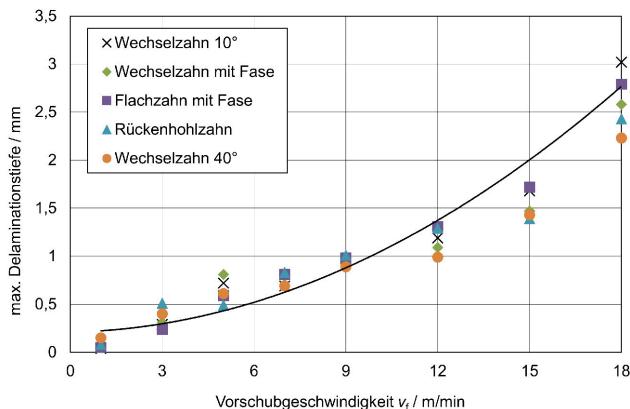
Im Kreissägeprozess entsteht die Qualität der Schnittkante durch die Schneidenecke und Nebenschneide, weshalb der Einfluss der Zahnform untersucht wurde. Die Auswertung der maximalen Delaminationstiefe in Abhängigkeit von Zahnform und Vorschubgeschwindigkeit (und damit Spanungsdicke bei konstanter Drehzahl) ist in **Bild 4** zu sehen.

Die Zunahme der Delaminationstiefe mit steigender Vorschubgeschwindigkeit ist deutlich erkennbar. Der Einfluss der Zahnform ist im Vergleich dazu von geringer Bedeutung. Zugleich kann kein systematischer Zusammenhang zwischen der Zahnform und der Delaminationstiefe bei den arbeitsscharfen Werkzeugen erkannt werden.

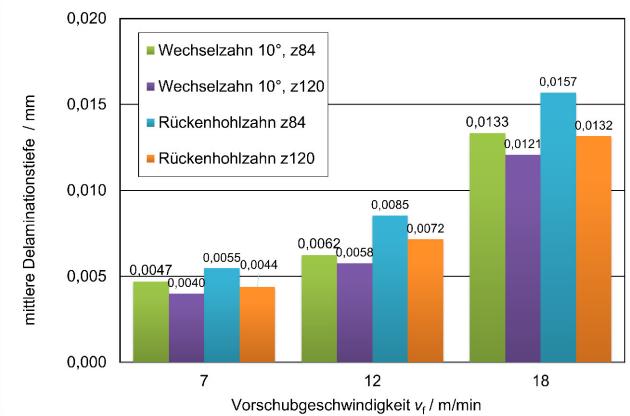
In den durchgeföhrten Versuchen wurde bei gleicher Zahnform die Zähnezahl variiert. Die Zähnezahl beeinflusst zum einen den Zahnvorschub (bei konstanter Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit) zum anderen sind bei höherer Zähnezahl zeitgleich mehr Schneiden im Eingriff. Dies hat im Allgemeinen einen positiven Einfluss auf die Schnittqualität beim Kreissägen, da eine höhere Dämpfung des dünnen und damit schwingsanfälligen Kreissägeblatts gegeben ist.



**Bild 3** Qualitätsunterschiede auf der Austrittsseite des Kreissägewerkzeugs: keine, leichte und starke Delamination. *Grafik: eigene Darstellung*



**Bild 4** Qualität in Form der maximalen Delaminationstiefe in Abhängigkeit der Zahnform. Grafik: nach [10]

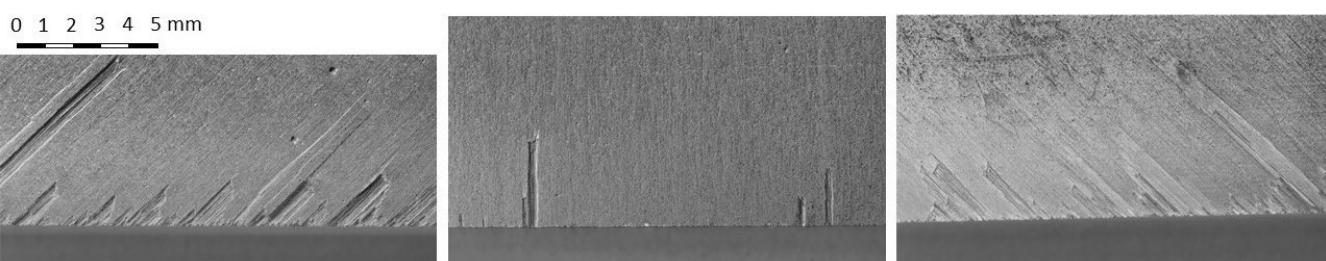


**Bild 5** Vergleich der mittleren Delaminationstiefe bei den Blätter Wechselzahn 10° und Rückenholzahn jeweils mit 84 beziehungsweise 120 Zähnen. Grafik: eigene Darstellung

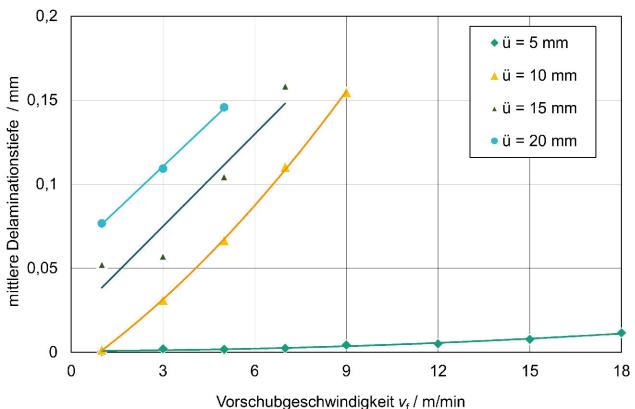
**Bild 5** zeigt den direkten Vergleich von zwei Zahnformen mit der Zähnezahl 84 und 120. Die Erhöhung der Zähnezahl führt systematisch bei beiden Zahnformen zu einer Reduktion der mittleren Delaminationstiefe (bei konstantem Zahnvorschub).

Zusammenfassend konnte durch die Variation der Zahnform und Zähnezahl nur ein geringer Einfluss auf die Delamination nahegewiesen werden.

Neben den Variationen der Zahnform wurden die Prozessparameter auf ihren Qualitätseinfluss untersucht. Der Sägeblattüberstand ist in anderen Bereichen, wie der Kreissägebearbeitung von beschichteten Spanplatten [21], von besonderer Bedeutung.



**Bild 7** Delaminationen in Richtung der Faserorientierung der Decklagen auf der Austrittsstelle des Sägezahns aus dem Werkstück. Grafik: eigene Darstellung



**Bild 6** Verlauf der mittleren Delaminationstiefe in Abhängigkeit von Sägeblattüberstand und Vorschubgeschwindigkeit. Grafik: eigene Darstellung

Nach den Ergebnissen in **Bild 6** kann die übergeordnete Bedeutung des Sägeblattüberstands auch für den Werkstoff CFK bestätigt werden.

Während für einen Sägeblattüberstand von 5 mm bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit von 18 m/min noch ein sehr hohes Qualitätsniveau mit einer maximalen Delaminationstiefe von 2 mm eingehalten werden kann – wobei eine mittlere Delaminationstiefe von 11 µm vorliegt – wird bei einem Sägeblattüberstand von 20 mm, schon ab einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min eine maximale Delaminationstiefe von 4 mm mit einer mittleren Delaminationstiefe von 109 µm erreicht.

Während beschichtete Holzwerkstoffe im Allgemeinen eine homogene Deckschicht besitzen, die stark auf den Sägeblattüberstand reagiert, muss bei CFK zusätzlich die Faserorientierung der Deckschicht berücksichtigt werden. Es konnte bei allen untersuchten Orientierungen der Decklage auf der Schneidenaustrittsstelle jeweils nur eine eindeutige Delamination in Faserrichtung festgestellt werden, wie **Bild 7** verdeutlicht.

Eine messtechnische Analyse der mittleren Delaminationstiefe in Abhängigkeit der Faserorientierung bei einem Sägeblattüberstand von 10 mm bei Werkzeug „Wechselzahn 40°“ zeigt **Bild 8**.

Während bei einer Orientierung von 0°, einer Orientierung der Fasern in Vorschubrichtung, bis zu Vorschubgeschwindigkeiten von 18 m/min sehr gute Qualitäten erzielt wurden, zeigen sich die Orientierungen von 45° und 135° als besonders kritisch. Die Werkstückproben konnten hier ab Vorschubgeschwindigkeiten von 5 beziehungsweise 7 m/min aufgrund der starken Schädigung nicht mehr ausgewertet werden. Die 90°-Orientierung zeigt ein mittleres Qualitätsniveau.

Anhand von **Bild 8** in Vergleich zu **Bild 9** soll abschließend der Vorteil der Auswertung der mittleren Delaminationstiefe im

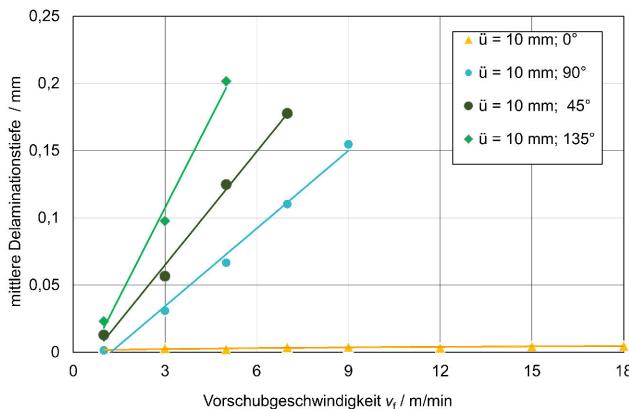


Bild 8 Verlauf der mittleren Delaminationstiefe in Abhängigkeit der Faserorientierung. Grafik: eigene Darstellung

Vergleich zur maximalen Delaminationstiefe hervorgehoben werden.

Qualitativ beschreiben beide Auswertungen ein identisches Qualitätsbild. Allerdings ist die maximale Delaminationstiefe von zufälligen Abweichungen stärker betroffen als die mittlere Delaminationstiefe. Mit steigender Messlänge nimmt der Wert der maximalen Delaminationstiefe aufgrund ihres statistischen Charakters zu. Weiterhin sind die Werte verschiedener Analysen bei unterschiedlicher Messlänge der Werkstückproben nicht vergleichbar. Die mittlere Delaminationstiefe ist hingegen aufgrund der ausgewerteten Fläche eine weniger schwankungsanfällige Größe. Zusätzlich ist sie auf die Messlänge bezogen, weshalb letztere keinen Einfluss auf den Kennwert besitzt. Jedoch muss betont werden, dass beide Kennwerte in gemeinsamer Betrachtung eine sinnvolle Ergänzung bieten. Einzelne tiefe Delaminationen können das optische Erscheinungsbild qualitativ stark herabsetzen. Dies kann mit einem Mittelwert nicht wiedergegeben werden. Aus optischer und funktionaler Sicht muss derjenige Kennwert herangezogen werden, der die Qualitätsanforderungen am besten beschreibt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zum Schädigungsbild beim Kreissägen von CFK zeigen erstmals systematisiert die unterschiedlichen Einflüsse von Prozessparametern wie der Vorschubgeschwindigkeit, Zahnformen, Sägeblattüberstand und Faserorientierung der Deckschichten. Die Ergebnisse wurden nur für einen Werkstoff (Faserart, Matrix, Faser-Matrix-Anteil) und Laminataufbau gewonnen. Allerdings lassen sich daraus die phänomenologischen Erkenntnisse grundlegend erfassen.

Maßgebendes Schädigungsbild ist die Delamination, die messtechnisch als Maximalwert und Mittelwert erfasst werden kann. Es zeigt sich, dass höhere Vorschubgeschwindigkeit und damit Spanungsdicken stets zu einem Anstieg der Delaminationstiefe führen. Es wurde ein linearer Anstieg der Delaminationstiefe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit beobachtet. Es konnte gezeigt werden, dass im betrachteten Vorschubgeschwindigkeitsbereich bis 18 m/min eine Verringerung der Delamination über

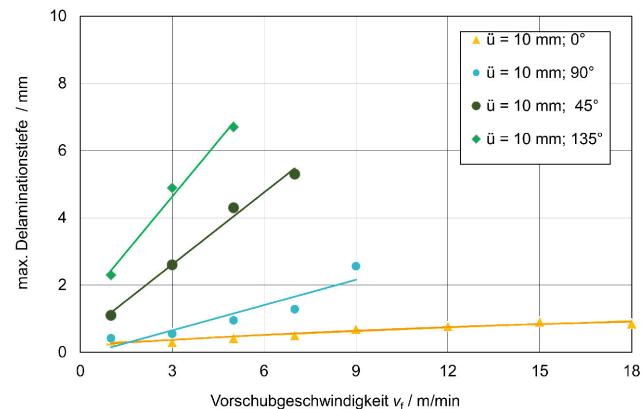


Bild 9 Verlauf der maximalen Delaminationstiefe in Abhängigkeit der Faserorientierung. Grafik: nach [10]

die Auswahl der Zahnformen oder eine Steigerung der Zähnezahl nur in einem begrenzten Maß möglich ist.

Die Untersuchung zum Einfluss der Faserorientierung der Decklage ergab bei einer Faserorientierung in Vorschubrichtung ( $0^\circ$ ) eine deutlich geringere Neigung zur Delamination als die Anordnungen  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$ . Die unterschiedlichen Trennmechanismen führen analog zur Fräsbearbeitung zu einer starken Beeinflussung der Schädigung. Als verfahrensspezifische Einstellgröße zeigte sich der Sägeblattüberstand beziehungsweise dessen Einfluss auf den Austrittswinkel der Schneide aus dem Laminat als besonders bestimmender Parameter. Bereits geringe Sägeblattüberstände von 5 mm beziehungsweise 10 mm führten zu einem erheblichen Anstieg der Delamination. Die erzielten Ergebnisse zeigen eine maßgebliche Qualitätsbeeinflussung durch Werkzeug- und Prozessparameter nur an den Decklagen des Laminats. Daher kann geschlossen werden, dass ähnliche Schadensbilder und Abhängigkeiten auch bei anderen Laminatdicken und -aufbauten auftreten.

Zusammenfassend ergeben sich bezogen auf die Schädigungsbilder zum einen Parallelen zur Fräsbearbeitung, was den Einfluss des Zahnvorschubs und die Abhängigkeit der Faserorientierung der Decklagen betrifft. Zum anderen zeigen sich verfahrensspezifische Einflussgrößen des Kreissägeprozesses, vor allem der Sägeblattüberstand, als besonders bedeutend für eine qualitativ hochwertige Prozessführung. Daraus lassen sich Optimierungsgrundsätze für die Sägebearbeitung von Platten und Profilen ableiten. Während die Werkzeuggeometrie im untersuchten Bereich keinen wesentlichen Einfluss aufzeigte, ist die Zähnezahl und der Sägeblattüberstand für die Bearbeitung besonders relevant. Grundsätzlich kann abgeleitet werden, dass ein minimaler Sägeblattüberstand die besten Qualitätsergebnisse erzielen kann. Diese Erkenntnis gilt allerdings für arbeitsscharfe Werkzeuge. Der geringe Sägeblattüberstand ist mit einer Verlängerung des Schnittwegs verbunden, der bei dem abrasiven Verschleißmechanismus von CFK eine verstärkte Schneidenverrundung und damit Qualitätsverschlechterung bedingt. Hieraus ergeben sich weitere Forschungsfragen, wie in diesem Spanungsfeld eine Optimierung der Prozessführung gelingen kann.

## FÖRDERHINWEIS

Das dem Beitrag unter anderem zugrundeliegende Forschungsvorhaben IGF-Vorhaben Nr. 18399 N „CFK Sägen“ wurde im Rahmen der AiF-Gemeinschaftsforschung gefördert. Hierbei haben namhafte Werkzeughersteller das Vorhaben unterstützt. Die Autoren danken der AiF für die gewährte Förderung sowie den Projektpartnern für die Unterstützung.

## LITERATUR

- [1] König, W.; Wulf, C.; Graß, P. et al.: Machining of Fibre Reinforced Plastics. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 34 (1985) 2, S. 537–548
- [2] Fleischer, J.; Teti, R.; Lanza, G. et al.: Composite materials parts manufacturing. *CIRP Annals*, 67 (2018) 2, pp. 603–626, doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.005
- [3] Hintze, W.: CFK-Bearbeitung. Trenntechnologien für Faserverbundkunststoffe und den hybriden Leichtbau. Heidelberg: Springer-Verlag 2021
- [4] Gottlöber, C.: Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen. Grundlagen – Systematik – Modellierung – Prozessgestaltung. München: Carl Hanser Verlag 2023
- [5] Rummenhöller, S.: Werkstofforientierte Prozessauslegung für das Fräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1996
- [6] Becke, C.: Prozesskraftrichtungsangepasste Frässstrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, 2011
- [7] Klotz, S.: Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, 2017
- [8] Schütte, C.: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage. Dissertation, TU Hamburg, 2014
- [9] Voß, R.: Fundamentals of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Machining. Dissertation, ETH Zürich, 2017. doi.org/10.3929/ethz-b-000165454
- [10] Mayer, T.: Untersuchung zum Zusammenhang von Zerspankräften und Delamination beim Kreissägen von CFK. Dissertation, Universität Stuttgart, 2024
- [11] Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe: CFK Sägen. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben-Nr. 18399 N: Berichtszeitraum: 01.10.2014 bis 31.01.2017. Remscheid: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe (IFW) 2017
- [12] Schneider, M.; Becker, D.; Pfeifroth, T.: Messverfahren zur Erfassung der Gratbildung beim Bohren von CFK. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 10, doi.org/10.3139/104.111208
- [13] Gringel, M.; Heußer, T.; Esch, P.: CFK COMPLETE – Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie. Projektabschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, 2019
- [14] Pfeifroth, T.: Beitrag zur Verbesserung der spanenden Bohrbearbeitung von CFK auf Basis von Schädigungsmechanismen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2013
- [15] Franke, V.: Drilling of long fiber reinforced thermoplastics – Influence of the cutting edge on the machining results. *CIRP Annals* 60 (2011) 1, pp. 65–68, doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.078
- [16] Hartmann, D.: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2012
- [17] Hohensee, V.: Umrissbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe durch Fräsen und Laserschneiden. Dissertation, Universität Hannover, 1992
- [18] Davim, J. P.; Reis, P.: Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments, *Journal of Materials Processing Technology* 160 (2005), 2, pp. 160–167
- [19] Zemann, R.; Sacherl, J.; Hake, W. et al.: New Measurement Processes to Define the Quality of Machined Fibre Reinforced Polymers. *Procedia Engineering* 100 (2015), pp. 636–645
- [20] Tröger, J.; Schneider, M.: Grundlagen und Verfahren der Holzbearbeitung. Berlin: Logos Verlag 2015
- [21] Chen, W.-C.: Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37 (1997) 8, pp. 1097–1108, doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8
- [22] Heusser, T.; Meyer, F.: Referenzbauteil und derzeitige Bearbeitung – Vorstellung des möglichen Referenzbauteils der Firma AUDI, B-Säule Lamborghini und der derzeitigen Bearbeitungstechnologie. Vortrag am 22.11.2016, Neckarsulm, Carbon Connected, Sitzung der Arbeitsgruppe Bearbeitung. Internet: www.carbon-connected.de/Group/cu.ag.bearbeitung/meetings/Start/Index/123320. Zugriff am 09.09.2025

**D r . - I n g . T i m M a y e r**  
tim.mayer@ipa.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
www.ipa.fraunhofer.de

**P r o f . D r . - I n g . M a r c o S c h n e i d e r**   
marco.schneider@hs-offenburg.de  
Hochschule für Technik, Wirtschaft  
und Medien Offenburg  
Badstr. 24, 77652 Offenburg  
www.hs-offenburg.de

## LIZENZ



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