

 <p>Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe (IFW)</p>	<p>Scherschneiden von Faserverbundwerkstoffen FVK</p> <p>Hinweise zur Entwicklung von Werkzeug- Aktivelementen zum Scherschneiden von Faserverbundwerkstoffen</p>	 <p>Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT</p> <p>Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST</p>
---	--	--

Inhalt

Schlagworte 1

1 Ziel und Zweck der Anwenderrichtlinie 1

2 Grundlagen 1

2.1 Symbole und Abkürzungen 1

2.2 Stand der Technik 1

2.2.1 Trennende Verfahren für FVK 1

2.2.2 Werkzeugbeschichtungen 2

3 Gültigkeit der Anwenderrichtlinie 2

4 Prozessmodellierung 3

5 Schichtentwicklung, Triboverschleißtest und -
analyse 3

6 Charakterisierung des
Scherschneidprozesses an FVK 4

6.1 Tape-Scherschneiden mit Schermessern . 4

6.2 Scherschneiden von Organoblechen 5

7 Gestaltung von Aktivteilen 5

7.1 Geometrische Gestaltung 5

7.2 Schneidkanten- und Oberflächen 6

7.3 Beschichtung 6

8 Anwendung im Folgeverbundwerkzeug 7

9 Literatur 7

Forschungseinrichtungen 8

Beteiligte Firmen 8

Schlagworte

Scherschneiden, Faserverbundkunststoffe FVK, Faserverbundwerkstoffe, Aktivteiloptimierung, Beschichtung, Folgeverbundwerkzeug, Stanzen

1 Ziel und Zweck der Anwenderrichtlinie

Aktuell dominieren Wasserstrahl- bzw. Laserstrahlverfahren sowie spanende Prozesse die Bearbeitung von Faserverbundkunststoffen (FVK). Diese sind aufgrund ihrer langen Bearbeitungszeiten jedoch nicht so wirtschaftlich wie das Scherschneidverfahren. Derzeitige Aktivteile im Scherschneidprozess sind für die Blechbearbeitung optimiert und führen beim Scherschneiden von FVK zu einem hohen Werkzeugverschleiß sowie schlechter Schnittqualität wie z. B. Faserauszügen oder Delamination.

Die Anwenderrichtlinie zeigt, welches die grundlegenden Zusammenhänge beim Scherschneiden von FVK sind und wie optimierte Aktivteile und Verschleißschutzbeschichtungen eingesetzt werden können. Die Anwendergruppen sind neben Werkzeug- und Bauteilkonstruktoren vor allem faserverbundverarbeitende KMUs in den Bereichen der Automobilzulieferer, im Konsumer- und Designbereich sowie in der Luftfahrtbranche. Großes Anwendungspotenzial besteht in Industriesektoren mit Leichtbau-

orientierung, um den Forderungen nach Gewichtsreduktion gerecht zu werden. Weiterhin können durch die Anweisungen der Anwenderrichtlinie höhere Werkzeugstandzeiten und höhere Schnittqualitäten sowie eine gesteigerte Produktivität, vergleichbar mit der Ausbringung der Blechbearbeitung, erzielt werden.

Die Anwenderrichtlinie enthält die Forschungsergebnisse der Untersuchungen die im Rahmen des IGF-Projekts „Entwicklung von Beschichtungen für Werkzeug-Aktivelemente zum Scherschneiden von Faserverbundwerkstoffen“ (IGF 20416N) stattgefunden haben [1].

2 Grundlagen

2.1 Symbole und Abkürzungen

Die verwendeten Symbole und Abkürzungen mit den jeweiligen Einheiten werden nachfolgend definiert.

Symbol	Bezeichnung	Einheit
t_n	n-te Einzelschicht	-
$\varnothing D$	Durchmesser Stempel	mm
CF	Kohlenstofffaser	-
CrN	Chromnitrid	-
FVK	Faserverbundkunststoffen	-
GF	Glasfaser	-
UD	Unidirektional	-
UT	Unterer Totpunkt	-
W	Schnittweite	mm
WC	Wolframcarbid	-
E	E-Modul	N/mm ²
n	Anzahl Einzelschichten	-

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Trennende Verfahren für FVK

Für die trennende Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen werden hauptsächlich das Wasser- und Laserstrahlschneiden sowie die spanende Bearbeitung eingesetzt. Beim Wasserstrahlschneiden tritt ein gerichteter Wasserstrahl mit einem Druck von bis zu 420 MPa aus der Düse des Werkzeugs aus. Für den Schneidvorgang wird die kinetische Energie des austretenden Strahls genutzt. Als wesentliche Vorteile des Verfahrens sind die geringen thermischen Lasten auf das Bauteil zu nennen sowie die Möglichkeit, große Bauteildicken zu schneiden [2].

Insbesondere für das Schneiden von FVK-Bauteilen in der Hochvolumenproduktion stellt die Bearbeitungszeit beim Wasserstrahlschneiden jedoch einen deutlichen Nachteil dar. Die Düse muss entlang der gesamten Schnittgeometrie verfahren werden, was

Dies Anwenderrichtlinie wurde durch die Forschungseinrichtungen Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST und Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe (IFW) erstellt und wird als Erkenntnisquelle empfohlen. Die Anwender müssen jeweils prüfen, inwieweit der Inhalt auf ihre speziellen Fälle anwendbar und ob die ihnen vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung der Ersteller und der an der Ausarbeitung und Freigabe Mitwirkenden ist ausgeschlossen.

beim Besäumen der Bauteilaußenkante hohe Durchlaufzeiten hervorruft. Durch den Schneiddruck kann Wasser in die Zwischenräume der Einzellagen gelangen oder zum Aufquellen des Matrixwerkstoffs führen. Zusätzlich werden Delaminationseffekte beobachtet [2], [3]. Um den hohen Festigkeiten der Fasern im Schnitt zu begegnen, werden dem Wasser abrasive Additive zugefügt. Das Abwasser ist dementsprechend mit diesen Zusätzen und kleinsten FVK-Partikeln kontaminiert, was eine Nachbehandlung und Entsorgung erfordert. Neben einem aufwändigen Handling der Bauteile haben hohe Wartungskosten der Anlagen einen negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit beim Wasserstrahlschneiden [4].

Die Schnittflächen sind häufig nicht parallel (vgl. Abb. 1), da der Wasserstrahl nach dem Austritt aus der Düse an Energie verliert. Während die Geschwindigkeit des Wassers abnimmt, steigt der Durchmesser mit zunehmender Entfernung zum Düsenaustritt [5].

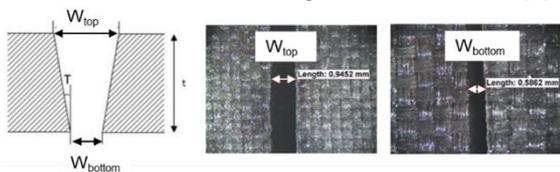


Abb. 1: Schnittprofil beim Wasserstrahlschneiden von Composite Bauteilen [5]

Beim Fräsen von FVK entsteht in der Kontaktzone zwischen dem Bauteil und den Werkzeugschneiden eine Wärmeeinflusszone, die das Bauteilmaterial beschädigen kann. Daraus resultieren hohe thermisch-mechanische Lasten im Schnittbereich. Auch bei der spanenden Bearbeitung sind Delaminationen möglich [6]. Aufgrund der hohen Faserfestigkeit sind die Fräswerkzeuge abrasivem Verschleiß ausgesetzt [7]. Durch die Wartung der Werkzeuge und die damit verbundenen Rüstzeiten entstehen hohe Kosten im Betrieb. Wie beim Laserstrahlschneiden muss eine Absaugung im Maschinenraum vorgesehen werden, um zu vermeiden, dass der Maschinenbediener gesundheitliche Schäden durch die Inhalation von Faserpartikeln erleidet [8].

Scherschneiden hat sich im Bereich der metallischen und nichtmetallischen Werkstoffe als Technologie mit hohen Produktionsraten bzw. Hubzahlen etabliert [9]. In der Metallbearbeitung lässt sich unter reproduzierbaren Prozessbedingungen eine gleichbleibend hohe Qualität der Schnittflächen am Bauteil erreichen. Durch lange Werkzeugstandzeiten ist das Stanzen ein äußerst wirtschaftlicher Prozess mit niedrigen Wartungs- und Reparaturkosten.

Beim Transfer des Scherschneidens auf faserverstärkte Kunststoffe sind jedoch ähnliche Effekte wie bei den oben aufgeführten Technologien zu beobachten. Durch den Schneidvorgang der Fasern stellt sich ein hoher Werkzeugverschleiß ein, der kurze Werkzeugstandzeiten zur Folge hat. Neben den abrasiven Verschleißerscheinungen treten Anhaftungen der Matrixwerkstoffe an den Mantelflächen der Werkzeuge auf, wodurch Qualitätseinbußen an der Schnittkante des Bauteils auftreten. Das konventionelle Scherschneiden kann demnach nicht ohne eine Weiterentwicklung der Werkzeug- und Prozesstechnik auf faserverstärkte Kunststoffe angewendet werden, sodass die Vorteile für die Bearbeitung von FVK weitgehend ungenutzt bleiben.

Ein qualitativer Vergleich der trennenden Verfahren für FVK findet sich in Tab. 1.

Tab. 1: Charakterisierung der trennenden Bearbeitungsverfahren nach dem Stand der Technik

Effekte								
	Delamination	Durchlaufzeit	Wassereintrag ins Bauteil	Werkzeugverschleiß	Bauteilhandling	Wartungskosten	Parallelität der Schnittflächen	Wärmeeintrag
Verfahren								
Wasserstrahlschneiden	○	-	-	○	-	○	-	+
Laserstrahlschneiden	-	○	+	+	-	○	-	-
Spanende Bearbeitung	+	○	+	-	○	-	+	-
Scherschneiden	○	+	+	-	+	○	+	+

2.2.2 Werkzeugbeschichtungen

Neben der Werkzeuggeometrie hat die Werkzeugoberfläche einen Einfluss auf den Schneidprozess. Durch Beschichtungen können sowohl der faserbedingte, abrasive Verschleiß, als auch die Materialanhaftungen auf dem Werkzeug reduziert und die Scherschnittqualität des Bauteils verbessert werden.

Beim Scherschneiden von Stahlwerkstoffen werden überwiegend nitridische Hartstoffschichten auf Basis von Titan oder Chrom eingesetzt, wie zum Beispiel TiN, TiAlN, CrN oder CrAlN. Diese Beschichtungen werden in der Regel mit PVD-Verfahren (Physikalische Gasphasenabscheidung) hergestellt. Für Anwendungen, die eine hohe Schichthärte und Verschleißbeständigkeit erfordern, werden insbesondere Schichten auf Basis von TiAlN und CrAlN ständig weiterentwickelt. Beim Schneiden von Metallwerkstoffen mit einer hohen Adhäsionsneigung (z.B. Aluminium, Edelstahl) werden nitridische Hartstoffschichten häufig mit geringadhäsiven Deckschichten kombiniert, wie metallhaltige Kohlenstoffschichten oder Trockenschmierstoffschichten.

Chrombasierte Schichten wie CrN oder Hartchrom werden oft bei Werkzeugen zur Verarbeitung von Kunststoffen eingesetzt, um Polymeranhaftungen zu reduzieren. Beim Bohren von FVK werden Kohlenstoffbasierte Beschichtungen, insbesondere a-C:H, ta-C, und Diamant eingesetzt. Die Anwendung von Diamant-Schichten ist für das Scherschneiden von FVK nicht ohne weiteres möglich, da die eingesetzten Aktivteile kaum mit CVD-Diamant beschichtet werden können. Amorphe Kohlenstoffschichten unterliegen diesen Einschränkungen nicht und können auf Standardwerkzeugen appliziert und optional mit zusätzlichen Zwischenschichten kombiniert werden.

3 Gültigkeit der Anwenderrichtlinie

Der Einsatz von thermoplastischem FVK in Form von ebenen (Organo-) Blechen bietet hohes Anwendungspotenzial für Großserienbauteile. Für das Scherschneiden werden daher nachfolgend aufgeführte Einzelschicht-UD-Tapes und mehrschichtige Organobleche betrachtet. Aufgrund von spezifischen Untersuchungen an Aktivteilwerkstoffen und -beschichtungen beschränken sich die Ergebnisse der Anwenderrichtlinie auf folgende Materialien:

- Aktivteilwerkstoffe: 1.2379 und 1.3343
- Beschichtungen: Nitrierung, CrN und WC
- FVK: Organoblech: PA6 + GF, PA6 + CF
Tapewerkstoff: PP + GF, PA6 + CF

Bei der Verwendung anderer Aktivteil- und FVK-Werkstoffe sind ggf. Anpassungen vorzunehmen.

4 Prozessmodellierung

Mithilfe der Bildung von Hypothesen zum Scherschneiden von FVK können allgemeingültige Einflussparameter detektiert und Prozessparameter abgeleitet werden. Abb. 2 zeigt die schrittweise aufgegliederten Schermechanismen von mehrschichtigen Organoblechen mit n UD-Einzelschichten der Dicke t_1 bis t_n und unterschiedlichen Faserorientierungen. Durch die elasto-plastische Pressung der Fasern auf die Matrix in einer Einzelschicht können die Fasern aufgrund der wesentlich geringeren Steifigkeit des Matrixwerkstoffs ($E_{Faser} \gg E_{Matrix}$) nicht mehr in Position gehalten werden, die Matrix verformt sich plastisch aufgrund der Lochleibungsspannung. Überlagerte Zug-, Biege- und Scherspannungen werden in der Faser induziert. In Bezug auf die 3D-Einzelschicht erfolgt ein nicht rechtwinkliges Abscheren der Faser, wodurch ein schräg nach außen laufender Schnitt resultiert. Hierbei sind einerseits längere Einzelfaserreste zu erwarten, die aus der Schnittfläche des Organoblechs herausstehen. Andererseits können die Fasern durch die induzierte Zugspannung an der schwächsten Stelle reißen, welche mit einer statistischen Verteilung entfernt von der Scherstelle liegen. Abstehende und ausgezogene Faserreste wären die Folge.

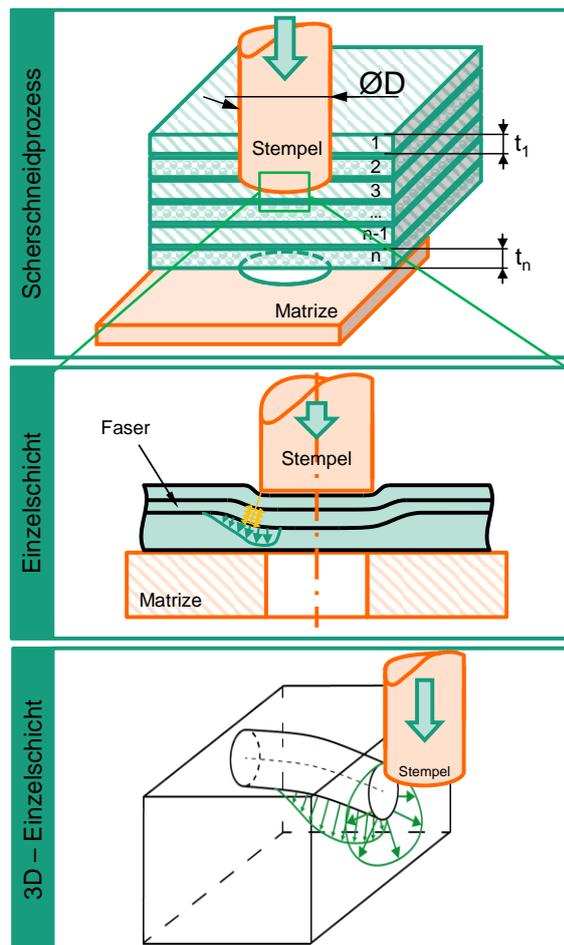


Abb. 2: Modellierung des FVK-Scherschneidprozesses

5 Schichtentwicklung, Triboverschleißtest und -analyse

Um die Scherschneidwerkzeuge für die Verarbeitung von FVK zu befähigen sind angepasste Werkzeugbeschichtungen, Oberflächen und Randzonen für Aktivteile aus Werkzeugstählen notwendig. Die Anforderungen an die Werkzeugoberfläche von Aktivteilen für das Schneiden von Faserverbundmaterialien sind vielfältig. Aufgrund der Materialkombination aus Glas- bzw. Kohlefaser in einer thermoplastischen Matrix, sind verschiedene Belastungen vorhanden (weiche Matrix; Fasern mit höherer Härte und Festigkeit).

Bei der Entwicklung der Werkzeugbeschichtung ist die Belastungskombination zu beachten, weshalb ein breiter Ansatz mit verschiedenen Werkzeugbeschichtungen aus verschiedenen Schichtklassen und Randzonenhärtung durch Diffusionsbehandlung (Nitrierung) der Werkzeugstähle, in Betracht gezogen werden sollte. Die Anwenderrichtlinie enthält hierzu Testergebnisse und Bewertungen zu Nitriden, kohlenstoff- und sauerstoffhaltigen Hartstoffschichten (abgeschieden mittels PVD und PECVD-Verfahren). Eine weitere Kombination der Beschichtungen mit einer Randzonenhärtung der Werkzeugstähle mittels Plasmanitrieren ist ebenfalls Bestandteil, vgl. auch Abb. 3.

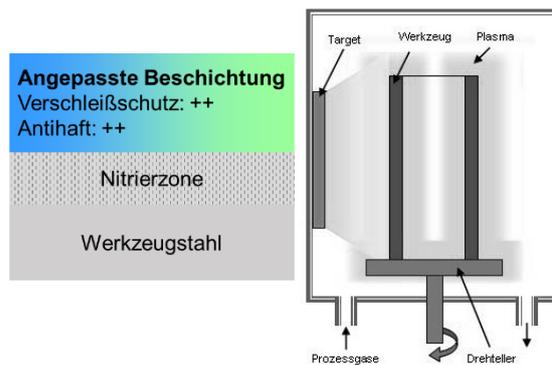


Abb. 3: Links: Schematisch Lösungsansatz Werkzeugbeschichtung; rechts: Schema PVD-Anlage

Um applikationsangepasste Werkzeugoberflächen und Beschichtungen zu entwickeln, müssen die Verschleißmechanismen und Ausprägungsformen (Abrasion, Adhäsion etc.) mittels optisch und mikroskopisch, taktiler Messungen oder auch REM/EDX untersucht, eingeordnet und bewertet werden. Die Anwenderrichtlinie zeigt im Folgenden spezifische Referenzwerte.

Am Fraunhofer IST wurde hierzu eine Prozedur für Tribometertests für eine Vorbewertung von Hartstoffschichten bzw. Behandlungen der Werkzeugoberflächen entwickelt. Dafür werden Organoblechproben in eine Halterung eingebaut. Die Organoblechprobe weist eine Kantenpräparation auf, damit sowohl Faser- als auch Matrixmaterial tribologisch wirksam sind. Als Gegenkörper kommen verschieden behandelte, beschichtete Probekörper (Ø 35 mm, Dicke 4 mm) aus Werkzeugstahl (1.2379) zum Einsatz. Folgende Tribologietest-Parameter dienen als Rahmenbedingung:

- Testkörper: GFK/CFK-Organoblech-Probe
- Gegenkörper: beschichtete Stahlkörper
- Last: 20 N
- Frequenz: 3 Hz

- Testdauer: 7200 s
- Hub/Weg: 10 mm
- Überläufe: 21600

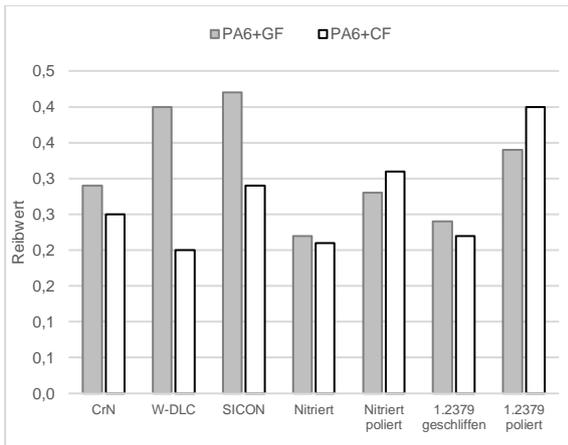


Abb. 4: Reibwerte verschiedener Schichten und Oberflächen gegen GFK und CFK

Die Messwerte zeigen, dass sowohl Unterschiede im tribologischen Verhalten unter den Beschichtungs-klassen und Behandlungen, als auch im Reibverhalten des Organoblechmaterials bestehen. Besonders DLC-Schichtvarianten (DLC: Diamantähnlicher amorpher Kohlenstoff) weisen Unterschiede bezüglich des tribologischen Verhaltens gegen Organobleche mit Glas- und Kohlefaserverstärktem Kunststoff auf. Bei kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff weist z.B. Wolfram-DLC (W-DLC) sehr niedrige Reibwerte und damit geringen Verschleiß auf (siehe Abb. 4).

Glasfaserverstärkter Kunststoff zeigt wiederum einen hohen Reibwert und einen stärkeren Verschleiß. Bei nitridischen Hartstoffschichten wie CrN oder nitrierten Oberflächen ist der Unterschied geringer.

Nitrierte Oberflächen und einige Hartstoffschichten erweisen sich als geeignet für das Schneiden von GFK und CFK. Bei den DLC-Varianten gibt es ausgeprägte Unterschiede gegen CFK (niedriger Reibwert und Verschleiß) und GFK (hoher Reibwert und Verschleiß). Eine moderate Rauheit erweist sich weiterhin als vorteilhaft für den Reibwert. GFK zeigt im allgemeinen höhere Reibwerte und höheren abrasiven Verschleiß als CFK.

6 Charakterisierung des Scherschneidprozesses an FVK

Anhand zweier Beispiele erfolgt die Charakterisierung des Scherschneidprozesses im Rahmen dieser Darstellung. Am Fraunhofer IPT konnte eine Charakterisierungsmethodik mit entsprechenden Prüfständen wie nachfolgend beschrieben entwickelt werden. Die grundlegenden Verschleißbilder an einem Schermesser aus Werkzeugstahl (1.2379) werden zunächst an einem Scherschneid-Prüfstand an der Einzelschicht (Tape-Werkstoff) ermittelt. Weiterhin werden beim Scherschneiden von Organoblechen weitere Effekte tiefgehend analysiert.

6.1 Tape-Scherschneiden mit Schermessern

Der Scherschchnitt am unidirektionalen FVK-Tape bietet die Möglichkeit, in kurzer Zeit eine hohe Anzahl geschnittener Teile unter kontrollierten Bedingungen in der Einzelschicht zu untersuchen, und damit einen hohen Verschleiß zu erzeugen. Hierbei wird ein FVK-Tape von einer Spule abgewickelt und mit einem

Walzenvorschub einem pneumatisch betätigten Messer zugeführt, siehe Abb. 5. Somit können bei 300 Schnitten/Minute eine Datenbasis für die weiteren Versuche gebildet und erste Oberflächentopografien bzw. Beschichtungen untersucht werden.

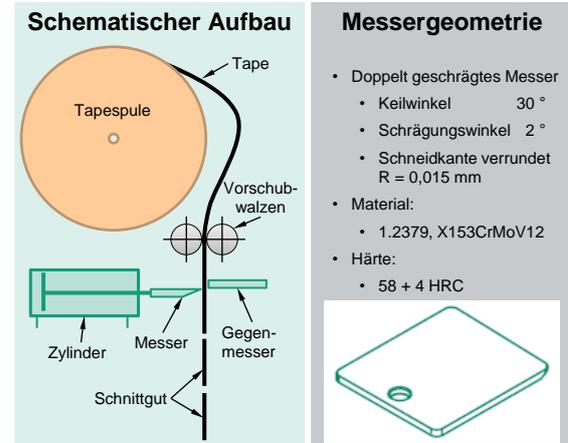


Abb. 5: Schematische Darstellung des Tapeschneidprüfstands am Fraunhofer IPT

Pro Konfiguration werden 10.000 Schnitte durchgeführt und mit dem Ausgangszustand des Messers verglichen. Verwendet werden doppelt geschrägte Messer mit einem Keilwinkel von 30° und einem Schrägungswinkel von 2°. Die Härte beträgt 60 HRC. Zum Vergleich werden Messer mit einer einseitigen sowie Messer mit einer allseitigen Nitrierung getestet.

Das Messer ohne Beschichtung weist nach dem Belastungskollektiv mit GFK deutlichen Verschleiß und verrundete Schneidkanten auf. Bei CFK hingegen zeigt sich ein Verschleißbild bestehend aus Grübchenbildung und daraus resultierender Schneidkantenverrundung. Zusätzlich lässt sich Reibverschleiß auf den Oberflächen (Schneidfri- und Schneid-druckfläche) erkennen.

Die allseitige Nitrierung wird aufgrund der Härtesteigerung in der gesamten Schneidkante nicht empfohlen, da Ausbrüche auftreten können. Vorteilhaft für einen geringen Verschleiß zeigen sich Messer mit einer einseitigen Nitrierung auf der langen Messerseite (hinten, Lauffläche zum Gegenmesser). Bei GFK stellt sich kein detektierbarer Verschleiß ein, bei CFK ist eine leichte Kantenverrundung sichtbar. Eine weitere Konfiguration besitzt zusätzlich zur einseitigen Nitrierung eine allseitige Chromnitrid-Beschichtung (CrN). Diese Kombination zeigt eine gute Beständigkeit gegen den (tribologischen und abrasiven) Verschleiß beim Tape-Scherschneiden.

Hinsichtlich der Schnittqualität am Schnittgut lässt sich mit zunehmendem Messerverschleiß verringerte Schneidqualität detektieren: Dabei franst das Schnittgut zunehmend aus und splittet schlussendlich. Dieser Effekt tritt vornehmlich bei CFK auf. Durch die höhere Festigkeit der Fasern im Vergleich zur Matrix wird der Matrixwerkstoff abgeschabt, die Fasern hingegen drücken sich in die Matrix ein und brechen dann (vgl. Abb. 2 Prozessmodellierung). Daraus resultieren zwei weitere negative Effekte: Einerseits liegen durch das Schaben die Fasern am Schnitt frei, andererseits erfolgt der Schnitt durch das Schaben des Matrixwerkstoffes und die Biegung der Fasern im Schnittgut nicht mehr rechtwinklig.

6.2 Scherschneiden von Organoblechen

Anhand der Scherschneidversuche von Organoblechen wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem Tape-Scherschneiden gezeigt und durch ergänzende Analysen erweitert. Um den Einfluss des Schneidspalts auf die Schnittqualität zu ermitteln, werden Versuchsreihen mit insgesamt drei Schneidspalten durchgeführt. Konventionelle Stempel aus 1.2379 ohne Beschichtung kommen zum Einsatz. In Kombination mit einem Stempeldurchmesser von 10,0 mm und drei Matrizen mit 10,2 mm, 10,1 mm und 10,05 mm resultieren blechdickenbezogene Schneidspalte von 6,67 %, 3,33 % und 1,67 % bei einer Organoblechdicke von 1,5 mm. Die betrachteten FVK-Werkstoffe sind folgende:

- PA6 + GF, Organoblech, 1,5 mm Dicke
 - Tepex® dynalite 102-RG600(3)/47% Typ B
- PA6 + CF, Organoblech, 1,5 mm Dicke
 - Tepex® dynalite 202-C200(6)/45% Typ B

Abb. 6 zeigt, dass bei den größeren Schneidspalten sowohl am Stanzbutzen als auch am Stanzgitter ausgezogene Fasern vorliegen. Teilweise werden komplette Faserbündel ausgezogen (oft bei $\approx 90^\circ$ zwischen Faserrichtung & Schnitt) und die Fasern fransen aus. Gleichzeitig werden diese in den Schneidspalt eingequetscht, sodass eine schräge Schnittfläche mit Geometrieabweichungen entsteht. Die Schnittqualität nimmt sowohl für GFK, als auch für CFK mit kleiner werdendem Schneidspalt zu. Durch einen geringeren Anteil ausgezogener Fasern weist CFK jedoch bessere Scherergebnisse auf als GFK. Weiterhin ergeben die Untersuchungen bezüglich der Scherkraft nur geringfügige Unterschiede bei der Maximalkraft zwischen Glas- und Kohlefasern. Lediglich der Schnit Schlag fällt bei CFK wesentlich höher aus.

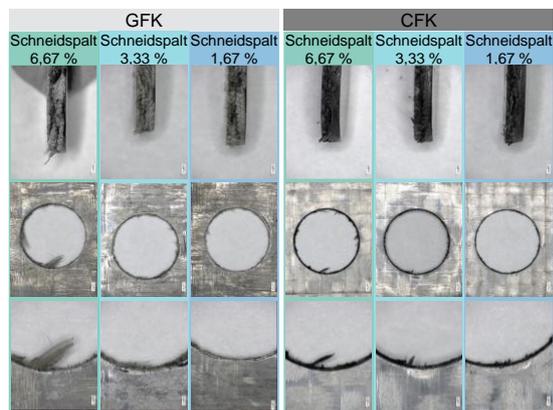


Abb. 6: Prozessuntersuchung zum Einfluss des Schneidspalts auf die Schnittqualität

7 Gestaltung von Aktivteilen

Mittels einer makroskopischen und mikroskopischen Analyse des Scherprozesses im Bereich des Schneidspalts können die Mechanismen bei unterschiedlichen Eindringtiefen des Stempels nachträglich im Schliffbild analysiert werden.

Die Rissinitiierung geht dabei immer von der Werkzeugschneidkante des Stempels und der Matrize aus, siehe Abb. 7. Die Fasern der Einzellagen werden durch die Scherbewegung im Bereich des Schneidspalts gebogen. Analog zu den Thesen der Prozessmodellierung kann nachgewiesen werden, dass durch die aus der Scherbewegung überlagerten

Biege und Zugspannungen in den Fasern starke Belastungen auf die Einzelschichten wirken. Die Fasern werden aufgrund des höheren E-Moduls nicht mehr vom Matrixwerkstoff in Position gehalten und reißen schlussendlich an der schwächsten Stelle. Die Rissstelle liegt teilweise nicht auf direkter Linie zwischen Stempel und Matrize, sondern oft tiefer im Grundmaterial. Das führt zu Faserresten, die aus Stanzgitter und -butzen ausgezogen werden. Der Bruchradius um das Aktivteil ist somit hoch, wodurch kein definiertes Brechen der Fasern umgesetzt werden kann. Die Zielstellung in der Optimierung der Aktivteilgeometrie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Fasern sollen definiert geschert werden, ein undefiniertes Reißen ist zu vermeiden
2. Reduzierung von Faserauszügen, Ausfransungen und Faserresten durch verkürzten Bruchradius (stempelmittige Krafteinleitung)
3. Ein Quetschen des Materials und daraus resultierendes Abgleiten der Schneide auf den Fasern ist zu vermeiden

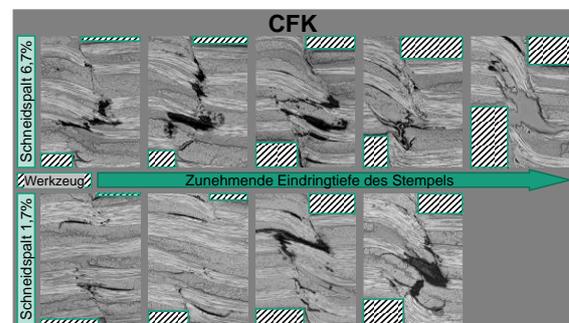


Abb. 7: Mikroskopische Analyse des Faserverlaufs im Schneidspalt am Beispiel von CFK-Organoblechen

7.1 Geometrische Gestaltung

Zur Aktivteilentwicklung lassen sich zwei Ziele ableiten: Erstens das Vorbrechen der Fasern unmittelbar vor dem eigentlichen Scherschneid und zweitens die Reduzierung des Faserauszugs und die Erhöhung des Anteils geschnittener Fasern. Abb. 8 stellt eine Übersicht der entwickelten Geometrien zum Scherschneiden von FVK dar. Die Geometrien und deren Beschreibung ist nachfolgend aufgeführt. Stempel ST-01 bildet den Ausgangszustand für die konventionelle Blechbearbeitung ab.

ST-02 – ST-05 → Voreilender Riss / Faserbruch

Biegeradius der Fasern verringern Faserbruch. Zentrische Krafteinleitung + Außenscherschnitt

ST-06 – ST-07 → Umlaufende Schneide

Freiwinkel für exaktes Abschneiden der Fasern

ST-08 – ST-09 → Nachschneiden

Nachschnitt der Ausfransungen durch nachgeschaltete Schnittkanten

ST-10 – ST-11 → Schrägschnitt

Schrägschnitt mit versch. Schrägungswinkeln

ST-12 → Voreilender Riss + umlaufende Schneide

Kombination: ST-02 bis ST-05 + ST-06 bis ST-07

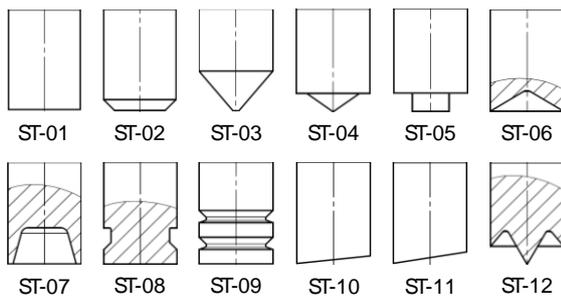


Abb. 8: Optimierte Stempelgeometrien

Abgeleitet von den Versuchen wird zunächst ein kleiner Schneidspalt (z. B. 1,7 %) empfohlen. Weiterhin ist anwendungsspezifisch eine Bewertung der Stanzgitter- und -butzenqualität sowie der maximalen Scherkraft durchzuführen. Abb. 9 dient als Hilfestellung bei der Auswahl optimaler Aktivteilgeometrien. Hierbei wurden für jeden Stempel eine Bewertung der Stanzgitter- und -butzenqualität sowie der maximalen Scherkraft durchgeführt (0 ... 5, wobei 5 das beste Ergebnis, bzw. minimale Kräfte darstellt).

Rang	Stempel	Stanzgitter	Stanzbutzen	Kraft	Gesamt
1	ST-10	3	3	5	11
1	ST-11	3	3	5	11
2	ST-06	5	2	2	9
2	ST-12	5	0	4	9
5	ST-07	4	4	0	8
6	ST-04	5	1	1	7
8	ST-01	3	3	0	6
8	ST-02	1	1	4	6
8	ST-03	1	0	5	6
8	ST-08	3	2	1	6
8	ST-09	3	3	0	6
12	ST-05	4	0	1	5

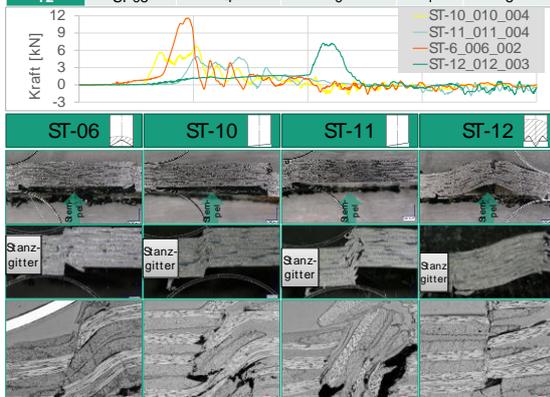


Abb. 9: Stempelbewertung und Schnittanalyse

Ausblickend sind für FVK-Scherschneidprozesse jeweils die Anwendungsfälle zu betrachten und in Gut- und Abfallteil zu differenzieren (Stanzgitter versus Stanzbutzen). Dahingehend werden folgende Handlungsempfehlungen ausgesprochen:

- Ziehende Schnitte (z. B. Schrägschnitte) sowie umlaufende Schneiden mit geringem Keilwinkel erzielen die besten Ergebnisse beim Scherschneiden von FVK
- Voreilende Schnitte induzieren Zug- und Biegespannungen in den Fasern, wodurch die Durchtrennung exakt erfolgen kann

7.2 Schneidkanten- und Oberflächen

Neben den geometrischen Ausprägungen der Aktivteile ist weiterhin die Schneidkanten- und Oberflächengestaltung relevant. Generell sind hohe Oberflächengüten bei Aktivteilen und eine gute Schneidkantenqualität zu bevorzugen. Aus den Tribologietests

ist bekannt, dass eine gewisse Rauheit bzw. Topografie ein günstiges tribologisches Verhalten unterstützen kann. Folgende Eigenschaften können auf Basis der getesteten Aktivteile im Ausgangszustand empfohlen werden:

- Stempel aus 1.2379 mit einer Kantenverrundung von ca. 36-44 µm (Radius) und Rauheiten von $R_a = 0,18 \mu\text{m}$; $R_z = 0,97 \mu\text{m}$; $R_t = 1,15 \mu\text{m}$.
- Schneidmesser mit einer Kantenverrundung von ca. 9-11 µm (Radius) und eine Oberflächenrauheit von ca. $R_a = 0,8 \mu\text{m}$; $R_z = 6,1 \mu\text{m}$ und $R_t = 8,2 \mu\text{m}$.

Höhere Oberflächengüten mit kleineren Schneidkantenverrundungen führen in Abhängigkeit vom verwendeten Werkzeugstahl zu einem schnelleren Verschleiß sowie zu Ausbrüchen infolge einer Überlastung der Schneidkante. Allgemein ist der minimal mögliche Schneidkantenradius durch die Scheraufgabe (Kräfte, Belastung), den Werkzeugstahl, Beschichtung und die Werkzeuggeometrie bestimmt.

7.3 Beschichtung

Entsprechend der Charakterisierung des Schneidprozesses und der tribologischen Tests zeigt diese Anwenderrichtlinie die übertragene Anwendung auf ein industrienahes Werkzeug/Aktivteile. Die Beschichtungen und Behandlungen sind dabei auf Rund- und Quadratstempeln sowie Schneidmessern appliziert, siehe Kapitel 8 Anwendung im Folgeverbundwerkzeug.

Schneidwerkzeuge haben generell eine höhere Härte als das zu schneidende Material aufzuweisen. Härtere Werkzeugstähle und Oberflächenschichten zeigen eine bessere Schneidhaltigkeit gegenüber FVK-Materialien. Für eine gute Schneidleistung werden Oberflächenhärten > 1000 HV empfohlen. Dies kann bei Werkzeugstählen z.B. durch eine Diffusionsbehandlung (z.B. Nitrieren) erreicht werden. Hartstoffschichten mit > 2000 HV sind für eine Schneidleistungsverbesserung zielführend. Es ist auf eine gute Beschichtungsqualität im Bereich der Schneidkanten zu achten (gute Schichthftung und Anbindung an das Werkzeugmaterial, keine Durchhärtung) und zudem muss die gesteigerte Härte der Hartstoffbeschichtung mit einem hohen Abrasivverschleißwiderstand einhergehen, insbesondere beim Schneiden von GFK.

Abb. 10 zeigt das Verschleißbild eines unbeschichteten Stempels nach je 1000 Stanzungen mit CFK und GFK. Im Vergleich hierzu weisen die beschichteten Stempel mit einer WC- bzw. CrN-Schicht wesentlich geringere Verschleißraten auf, siehe Abb. 11. Ebenfalls weist das Schneidmesser mit der Kombinationsbeschichtung aus einer Nitrierung und einer CrN-Schicht deutlich weniger Verschleiß auf, vgl. Abb. 12. Entsprechend der gezeigten Verschleißanalysen kann für diese Beschichtungen eine Anwendungsempfehlung ausgesprochen werden.



Abb. 10: Stempel (1.2379) unbeschichtet nach ca. 1000 Schneidtests von CFK (links) und GFK (rechts) (Lichtmikroskop 500-fach)

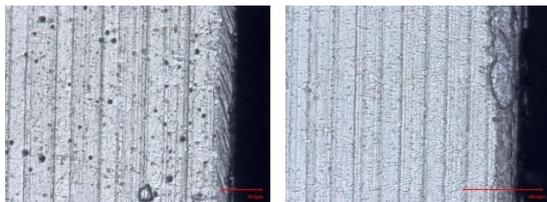


Abb. 11: Beschichtete Stempelkante (1.2379) nach ca. 1000 Schneidtests von GFK. WC-Schicht (links), CrN-Schicht (rechts) (Lichtmikroskop 1000-fach)

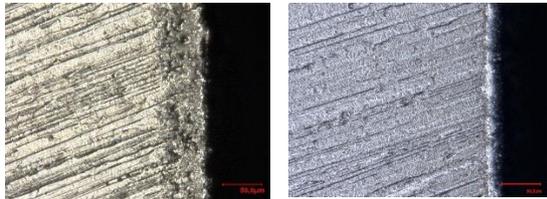


Abb. 12: Messerkante (1.2379) nach ca. 10.000 Schnitten von GFK-Tape. Links: unbeschichtet; rechts: Nitriert+CrN-beschichtet. (Lichtmikroskop 1000-fach)

Bei Beschichtungen muss zudem auf eine ausreichende Stützwirkung z.B. durch eine graduelle Härtesteigerung in der Randzone (z.B. Nitrieren) geachtet werden, um ein Abplatzen zu vermeiden.

Bei geringen Schnittspalten oder geringen Toleranzen von Aktivteilen ist außerdem das Aufmaß von Oberflächenbehandlungen und -beschichtungen, auch bzgl. der Kantenverrundung, zu beachten.

Generell gilt, dass eine Beschichtung und Behandlung applikations- und werkzeugmaterialangepasst und somit als Bestandteil des Werkzeugsystems erfolgen sollte.

8 Anwendung im Folgeverbundwerkzeug

Für die Anwendung der Technologie auf hochvolumige Produktionslose zielt die Anwenderrichtlinie auf eine Validierung der Technologie im Folgeverbundwerkzeug ab. Hierbei soll das Potenzial einer Verarbeitung mit im Vergleich zum Fräsen, Wasser- und Laserstrahlschneiden sehr kurzen Zykluszeiten von < 0,5 Sekunden/Teil offengelegt und die Funktionsfähigkeit der entwickelten Beschichtungen und der angepassten Aktivteile dargestellt werden.

Am Fraunhofer IPT steht für Validierungs- und Verschleißuntersuchungen ein eigenentwickeltes Werkzeug bereit. Das Streifenlayout umfasst ein Folgeverbundwerkzeug mit drei Stufen (Dreieck durch Quadratstempel, Rundloch und Trennschnitt). Die Aktivteile werden aus 1.2379 und 1.3343 im gehärteten sowie mit einer Nitrierung und einer Nitrierung plus WC-Schicht getestet, siehe Abb. 13.



Abb. 13: Aktivteile für das Folgeverbundwerkzeug

Als Werkstoff für das Demonstratorbauteil kommt ein glasfaserverstärktes Polypropylen-Tape zum Einsatz (Celstran® CFR-TP PP GF70; Dicke = 0,25 mm). Betrieben wird das Werkzeug auf der Servopressenlinie des Fraunhofer IPT (Schuler MSC2000). Die

Stößelkurve der Servopresse ist dahingehend optimiert, dass eine maximale Schließgeschwindigkeit von 1,3 m/s erreicht wird. Für den Schnitt wird ab 10 mm vor UT auf 0,5 m/s abgebremst. Diese Stößelkurve führt zu optimalen Schnittergebnissen, wobei das Werkzeug somit bei max. 124 Hub/min betrieben werden kann.



Abb. 14: Folgeverbundwerkzeug auf der Servopressenlinie am Fraunhofer IPT

Jeweils nach Erreichen der 6.000 gestanzten Demonstratorteile erfolgt ein Umbau der Aktivteile auf den nächsten Satz. An den schergeschnittenen Werkstücken lassen sich geringe Unterschiede über die Anzahl der Hübe erkennen. Es ist zu erkennen, dass die Schnitte keine Fransenbildung, gesplittertes Schnittgut oder schräg geschnittene Kanten aufweisen, siehe Abb. 15.

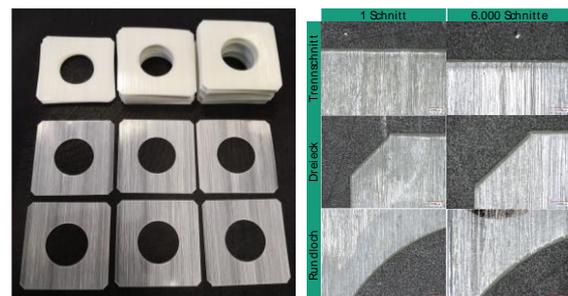


Abb. 15: Links: Geschnittene Demonstratorbauteile. Rechts: Mikroskopische Analyse der Schnittqualität

Abschließend ist für die Hochvolumenversuche anzumerken, dass eine Flitter- und Staubbildung im Werkzeug stattfindet. Einerseits ist das auf die Reibung zwischen FVK-Werkstoff und der Tapeführung im Werkzeug zurückzuführen, andererseits entstehen beim Scherschneiden feine Faserpartikel, welche sich an den Aktivteilen und im Werkzeug absetzen. Zusätzlich haften die FVK-Stanzbutzen in der Matrize wesentlich stärker an der metallischen Oberfläche als metallische Stanzbutzen, wodurch sich diese teilweise in der Matrize verkanten und gegebenenfalls auch wieder aus der Matrize hochkommen und sich im Werkzeug sammeln. Eine Absaugung zum Schutz der umliegenden Werkzeugkomponenten vor den Partikeln ist vorzusehen.

9 Literatur

- [1] Schlussbericht „Entwicklung von Beschichtungen für Werkzeug-Aktivelemente zum Scherschneiden von Faserverbundwerkstoffen“ (IGF 20416N)
- [2] Watzke, J.; Schomäker, M.; Brosius, A.: Cryogenic Shear Cutting of Fibre Reinforced Plastics (FRP). Procedia CIRP 18. 2014, S. 80-83
- [3] Shanmugam, D.K; Nguyen, T.; Wang, J.: A study of delamination on graphite/epoxy composites in

abrasive waterjet machining. Composites: Part A 39. 2008, S. 923-929

- [4] Becke, C.: Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2011
- [5] Alberdi, A.; Suárez, A.; Artaza, T.; Escobar-Palafox, G.A.; Ridgway, K.: Composite Cutting with Abrasive Water jet. Procedia Engineering 63 2013, S. 421-429
- [6] Heisel, U.; Pfeifroth, T.: Influence of Point Angle on Drill Hole Quality and Machining Forces when Drilling CFRP. Procedia CIRP 1. 2012, S. 471-476
- [7] Wang, X.; Kwon, P.Y.; Sturtevant, C.; Kim, D.; Lantrip, J.: Tool wear of coated drills in drilling CFRP. Journal of Manufacturing Processes 15. 2013, S. 127-135
- [8] Kraus, J.-M.: CFK verändert die Automobilindustrie. MM Maschinenmarkt vom 04.06.2012. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/cfk-veraendert-die-automobilindustrie-a-366675/>
- [9] Hellwig, W.: Spanlose Fertigung: Stanzen. 9. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009

Forschungseinrichtungen

Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe (IFW)
Papenberger Str. 49
42859 Remscheid

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST)
Bienroder Weg 54 E
38108 Braunschweig

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT)
Steinbachstraße 17
52074 Aachen

Beteiligte Firmen

Albrecht + Schumacher Oberflächentechnik GmbH
Böhler-Uddeholm Deutschland GmbH
Bond Laminates
Dr.-Ing. Rainer Heyer Werkzeugtechnik GmbH
ElringKlinger AG
FAKUtec
FRIMO GmbH
Muhr und Bender KG
Plascotec GmbH
Schotten Oberflächenservice
Ullmann Werkzeugbau GmbH
Zimmer Werkzeugbau GmbH & Co. KG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages