

a. Versuchsbeschreibung

Besäumen von duroplastischem CFK mit unterschiedlich starken Auskragungen, variierenden Werkzeuggeometrien und verschiedenen Maschinenparametern. Dieses Dokument dient als Nachschlagewerk zur Einschätzung der Zerspanungsgrößen. In diesem Zuge beschränkt sich die Beschreibung der Ergebnisse hauptsächlich auf die Bildunterschriften und eine zusammenfassende Schlussfolgerung.

b. Versuchsbedingungen

Material

Quasiisotrope mittensymmetrische Laminare aus Hexply® M21/T800S hergestellt im Autoclavverfahren (AC) und im Heißpressverfahren (HP) (Stackbeispiel für 0°-DLO = [0/45/90/-45]_{ns}):

- AC: Dicke = 2 mm ; Flächengewicht = 196 g/m²
- HP: Dicke = 2 mm ; Flächengewicht = 268 g/m²

Multidirektionales Gewebe ECG-Carbon 12k der Firma von Roll hergestellt im Heißpressverfahren (HP).

- HP: Dicke = 2 mm ; Flächengewicht = 268 g/m²

Versuchsablauf

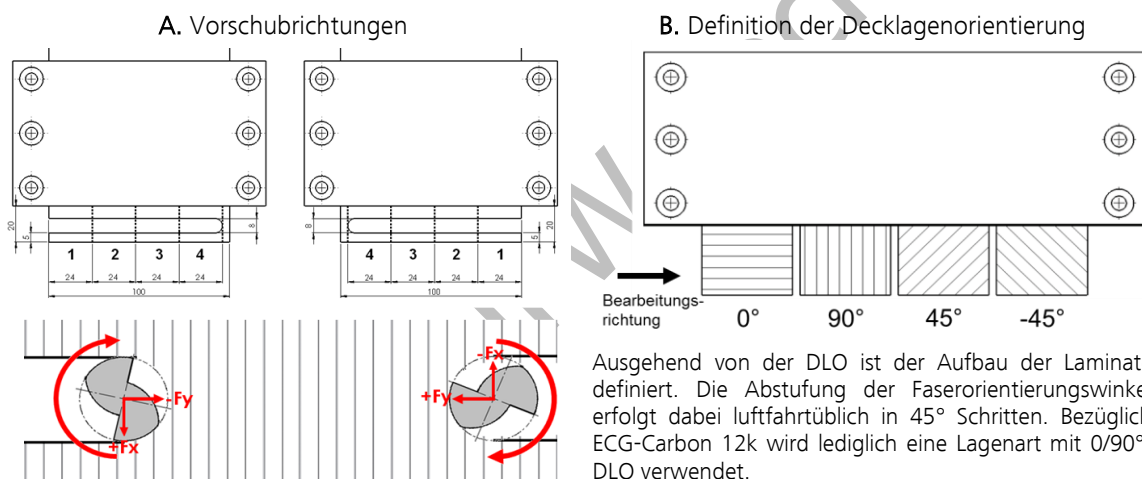


Bild 1: Versuchsaufbau und Definition der Richtungskoordinaten sowie der Decklagenorientierung (DLO).

Für die Zerspanungsversuche wurde die Kraftmessplattform Kistler 9527 B verwendet. Im Zuge der Variation der Maschinenparameter wird die CFK-Probe jeweils in 4 Abschnitte unterteilt und im Gleich- und Gegenlauf besäumt. Die dargestellte Bearbeitungssituation in Bild 1A stellt aufgrund der kurzen Auskragung von 20 mm eine unnachgiebige Einspannung dar. Für die nachgiebige Bearbeitungssituation wurde der Überstand auf 100 mm erhöht. Die Definition der Decklagen zur Unterscheidung der unterschiedlichen Gelegewerkstoffe geschieht gemäß Bild 1B in Abhängigkeit der Vorschubrichtung. Die verwendeten Maschinenparameter sind jeweils den Bildunterschriften zu entnehmen. Die unterschiedlichen Spansituationen werden nachfolgend vereinfacht mit labil und stabil bezeichnet.

Ermittelte Zerspanungsgrößen:

- Kraftkomponenten F_x , F_y , F_z
- Aktivkraft F_a
- Schnittkraft F_c
- Zerspankraft F
- Kantenqualität
- Schneidkantenverschleiß
- Werkstückschwingungen/Amplituden

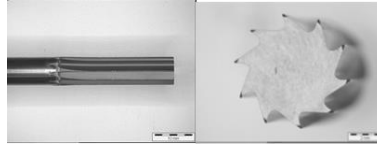
b. Versuchsbedingungen

Werkzeuge

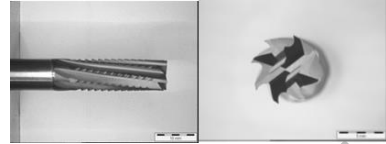
K2S0G: VHM-Fräser, 2 Schneiden, ohne Beschichtung, gerade genutet



G10S0Gb: VHM-Schaftfräser, 10 Schneiden, diamantbeschichtet, gerade genutet



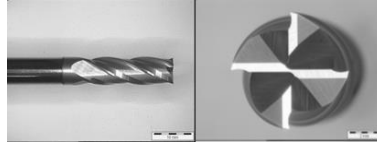
H8S8Rb: Fiber-Line-Honeycomb-Hexacut-Fräser, 8 Schneiden, diamantbeschichtet, 8° Rechtsspirale



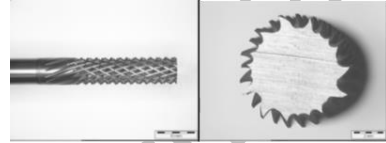
K2S5L/K2S5R: VHM-Fräser, 2 Schneiden, ohne Beschichtung, 5° Links- bzw. Rechtsspirale



L4S32Rn: VHM-Schaftfräser, 4 Schneiden, Nanosphere-Beschichtung, 32° Rechtsspirale



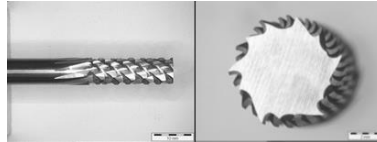
LFZ2820a: VHM-Router (fein verzahnt), 12 Zähne im Eingriff, AlTiN-Beschichtung, 28° Rechtsspirale, 20° Linksspirale



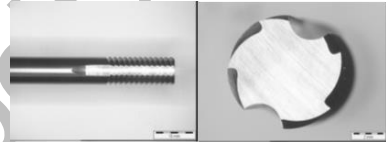
K6S5L /K6S5R: VHM-Fräser, 6 Schneiden, ohne Beschichtung, 5° Links- bzw. Rechtsspirale



SGZ: VHM-Router, 7 Zähne im Eingriff, 65° Rechtsspirale, 13° Linksspirale



S2N: Fräser, 2 Schneiden an 2 Nuten, 70° Rechtsspirale, 70° Linksspirale



c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Schneidkantenverrundung r_β

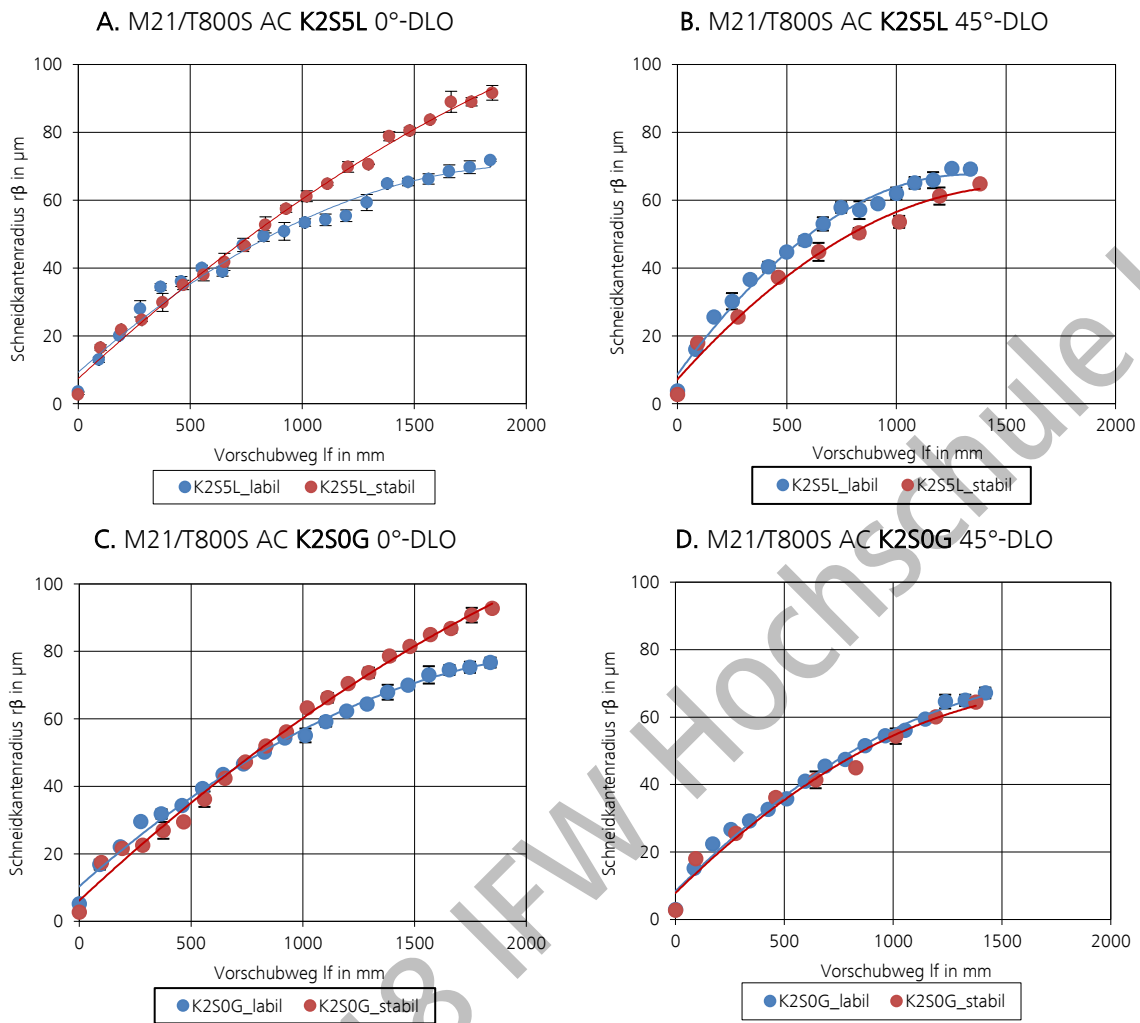


Bild 2: Schneidkantenverrundung in Abhängigkeit des Vorschubweges für 2-schneidige Fräswerkzeuge. Bei höherer Steifigkeit mit 45°-DLO sind die Messwerte vergleichbar. 0°-DLO weist mit zunehmendem Vorschubweg geringere Schneidkantenverrundungen auf. Es kann angenommen werden, dass die erhöhte Schwingungstendenz des Werkstückes bei der Bearbeitung mit gerade genutetem 2-Schneider einen ungleichmäßigeren Schneidenkontakt zur Folge hat. Ggf. bewirkt dies eine Verringerung der Spannungsdicke und damit der Kraftkomponenten und der Schneidkantenverrundung.

Bearbeitungsparameter: Gleichlauf; stabil: $x = 10$ mm; labil $x = 100$ mm Vorschubgeschwindigkeit $v_c = 88$ m/min; Vorschub/Zahn $f_z = 0,07$ mm; Drehzahl $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a_p = 2$ mm; radiale Zustellung $a_e = 8$ mm.

c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Schnittkraft F_c und Zerspankraft F

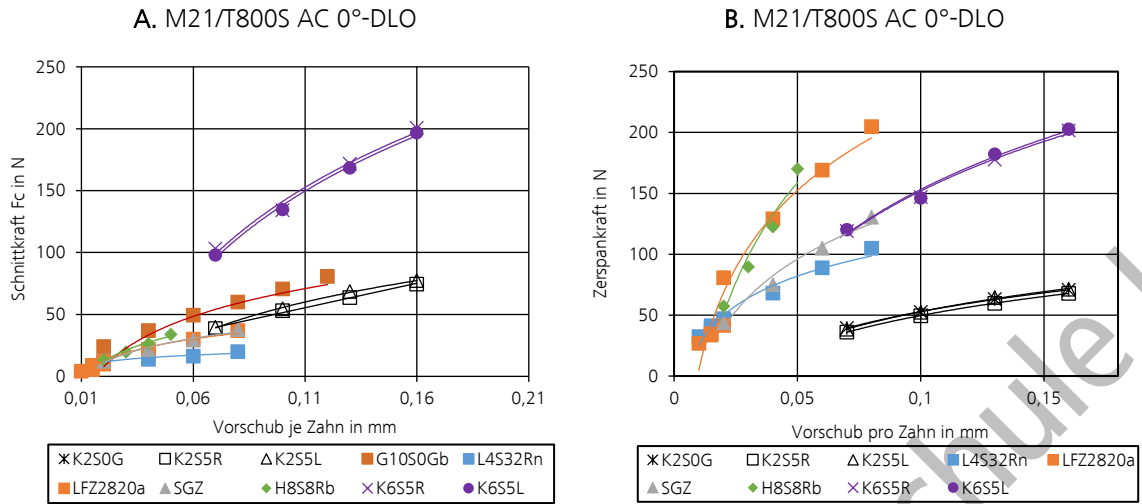


Bild 3: Entwicklung der Vorschubkräfte in Abhängigkeit des Vorschubes pro Zahn für das Besäumen unnachgiebiger CFK-Proben.

Bearbeitungsparameter: Gleichlauf; stabil: $x = 10$ mm; $f = \text{div.}$; $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a_p = 2$ mm; radiale Zustellung $a_e = 8$ mm.

c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Verformung

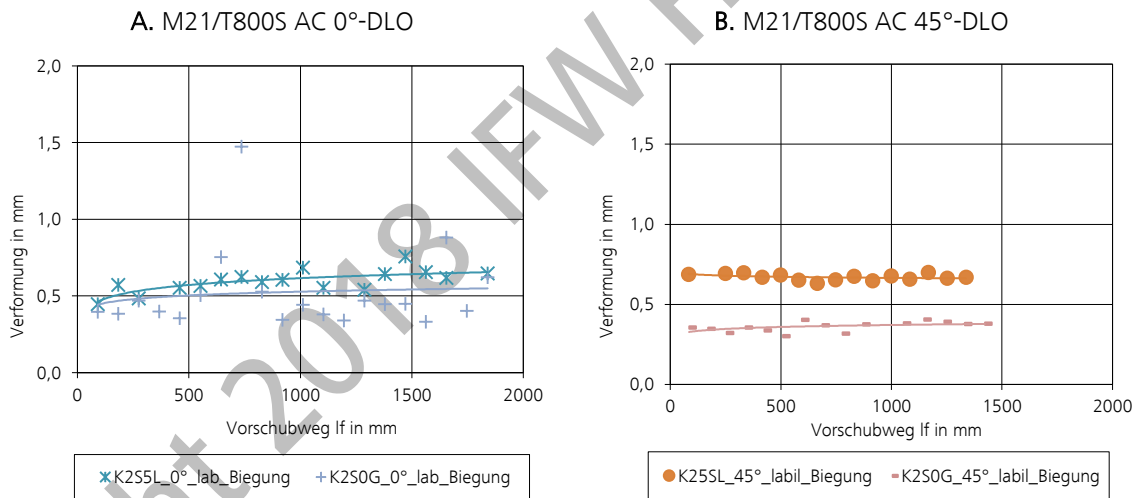


Bild 4: Verformung beim labilen Fräsprozess mit 2-schneidigen Fräswerkzeugen. Spiralisierte Werkzeuge weisen tendenziell eine höhere statische Verformung auf. Bei 0°-DLO ist die Steifigkeit der Probe gering, dementsprechend bildet sich für das gerade genutete Werkzeug eine starke Streuung aus. Bei 45°-DLO kann das spiralisierte Werkzeug durch die höhere z-Kraftkomponente auch bei höherer Werkstücksteifigkeit eine höhere Verformung erzielen.

Bearbeitungsparameter: Gleichlauf; stabil: $x = 10$ mm; labil $x = 100$ mm Vorschubgeschwindigkeit $v_c = 88$ m/min; Vorschub/Zahn $f = 0,07$ mm; Drehzahl $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a = 2$ mm; radiale Zustellung $a_e = 8$ mm

c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Kraftkomponenten F_x , F_y , F_z , Schnittkraft F_c

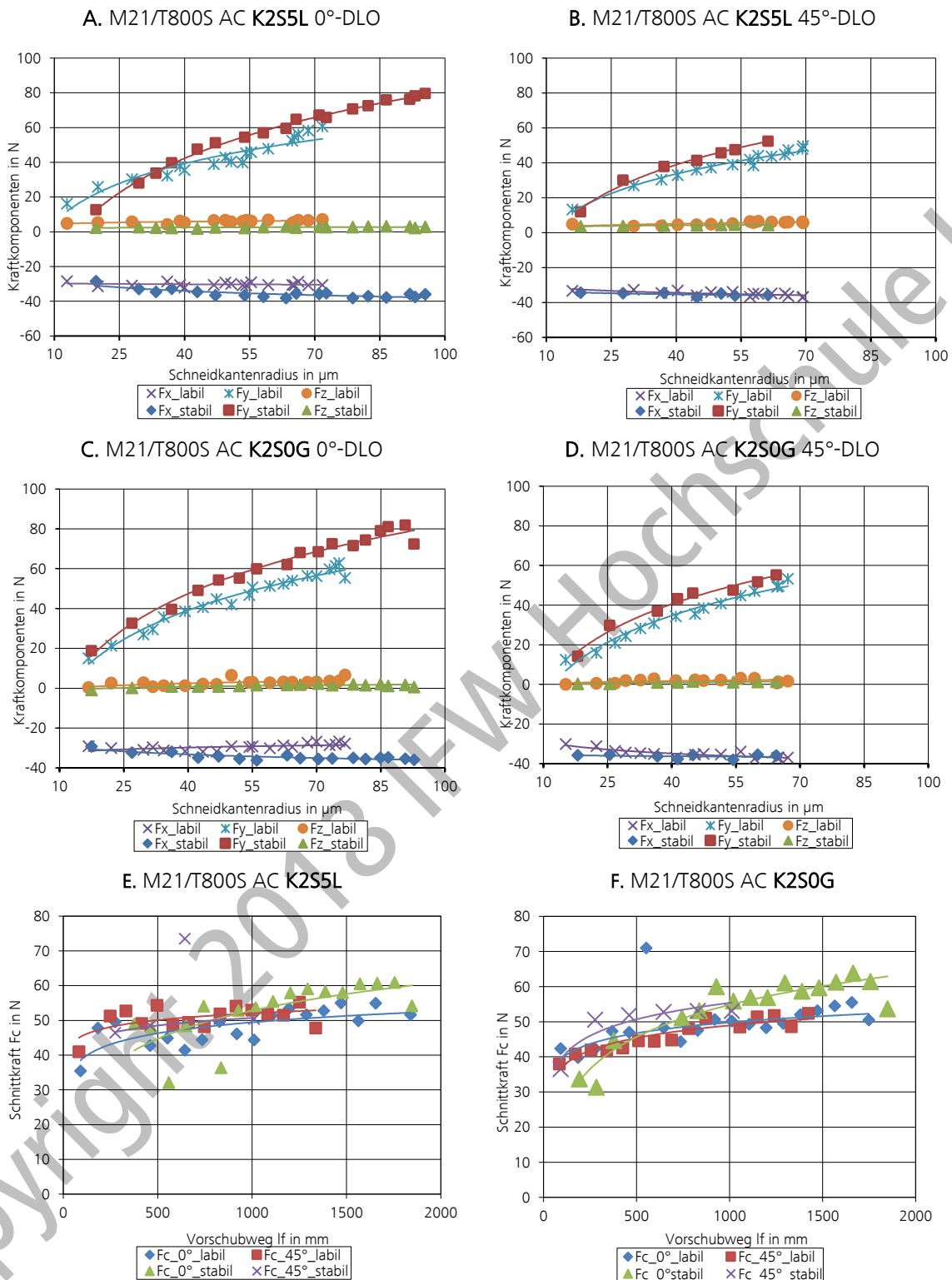


Bild 5: Entwicklung der Kraftkomponenten in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung bzw. des Vorschubweges für 2-schneidige Fräswerkzeuge. Aufgrund des quasiisotropen Aufbaus der Laminats unterscheiden sich die Kraftkomponenten kaum. Insbesondere die Schnittkraft ist für gerade genutetes als auch spiralisiertes Werkzeug identisch. Das lässt auf übereinstimmende spez. Schnittkräfte für beide Laminats schließen.

Bearbeitungsparameter: Gleichlauf; stabil: $x = 10$ mm; labil $x = 100$ mm Vorschubgeschwindigkeit $v_c = 88$ m/min; Vorschub/Zahn $f_z = 0,07$ mm; Drehzahl $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a_x = 2$ mm; radiale Zustellung $a_r = 8$ mm

c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Schnittkraft F_c

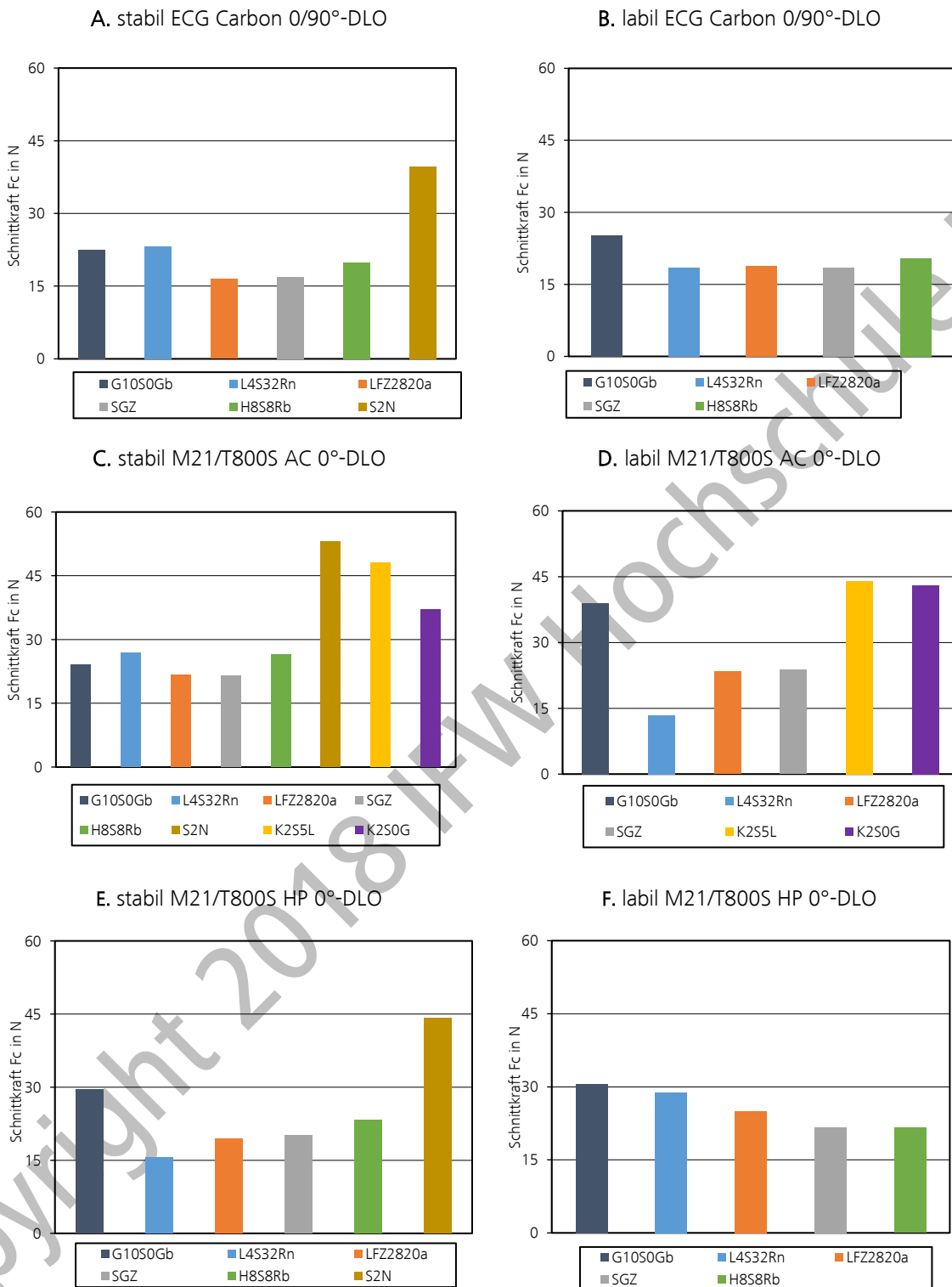


Bild 6: Entwicklung der Schnittkräfte in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie für das Besäumen.

Bearbeitungsparameter: Gleichlauf; stabil: $x = 10$ mm; labil $x = 100$ mm Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 88$ m/min; Vorschub/Zahn $f_z = 0,04$ mm; Drehzahl $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a_x = 2$ mm; radiale Zustellung $a_r = 8$ mm

c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Aktivkraft F_a

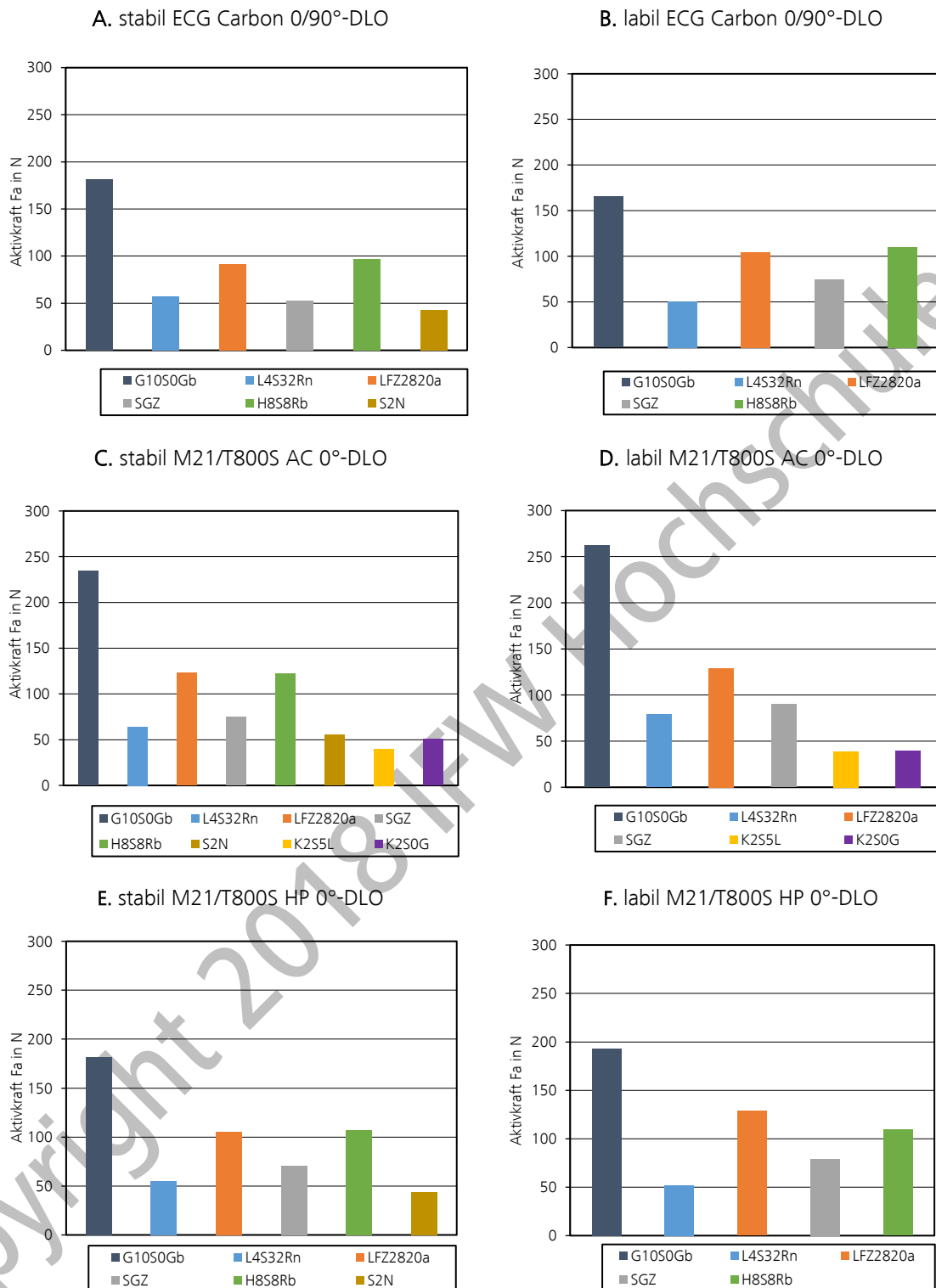


Bild 7: Entwicklung der Aktivkräfte in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie für das Besäumen.

Bearbeitungsparameter: Gleichlauf; stabil: $x = 10$ mm; labil $x = 100$ mm Vorschubgeschwindigkeit $v_c = 88$ m/min; Vorschub/Zahn $f = 0,04$ mm; Drehzahl $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a = 2$ mm; radiale Zustellung $a_r = 8$ mm

c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Kraftkomponenten F_y

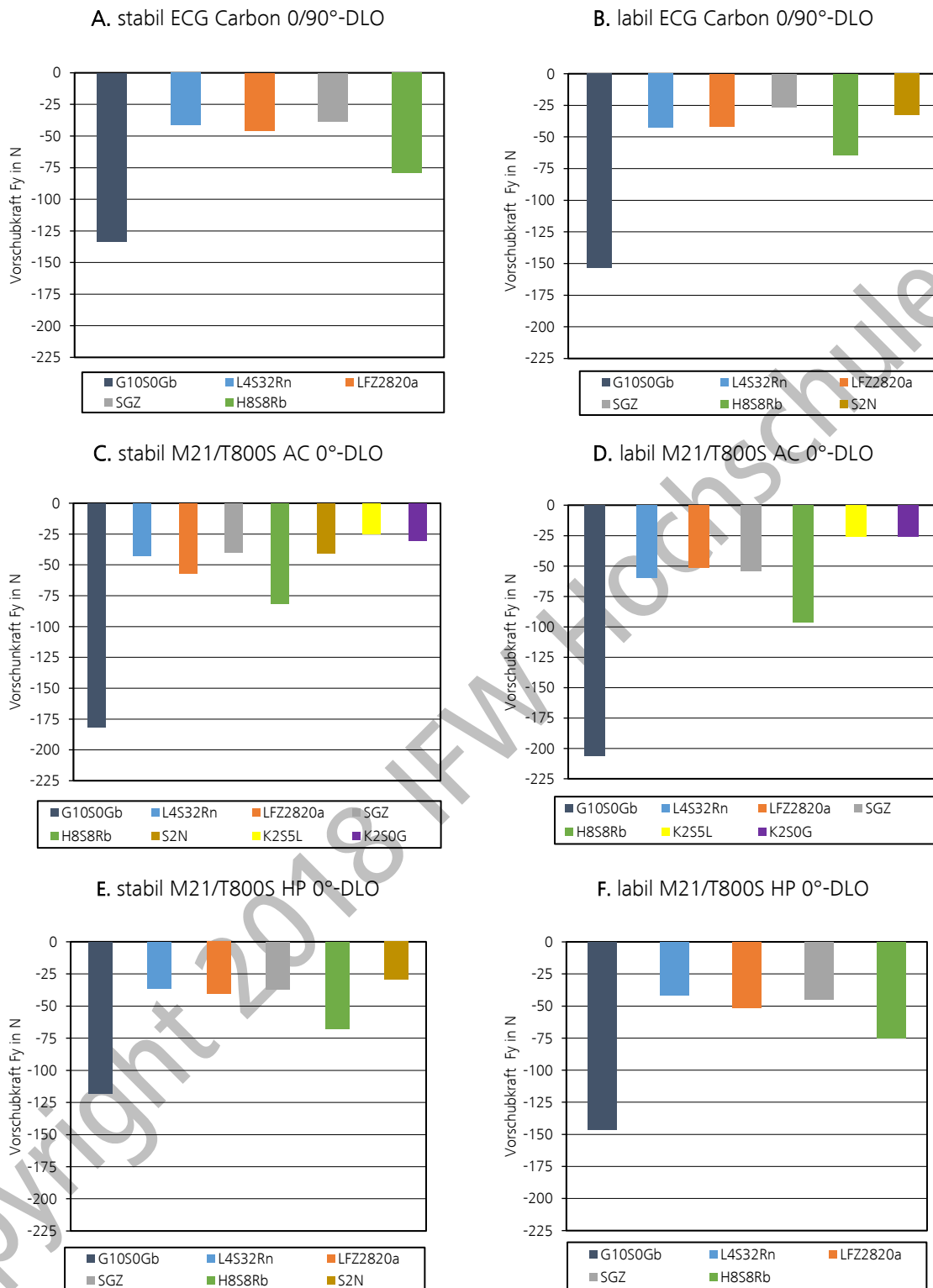


Bild 8: Entwicklung der Vorschubkräfte in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie für das Besäumen.

Bearbeitungsparameter: Gleichlauf; stabil: $x = 10$ mm; labil $x = 100$ mm Vorschubgeschwindigkeit $v_c = 88$ m/min; Vorschub/Zahn $f_z = 0,04$ mm; Drehzahl $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a_x = 2$ mm; radiale Zustellung $a_r = 8$ mm

c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Schnittkanten

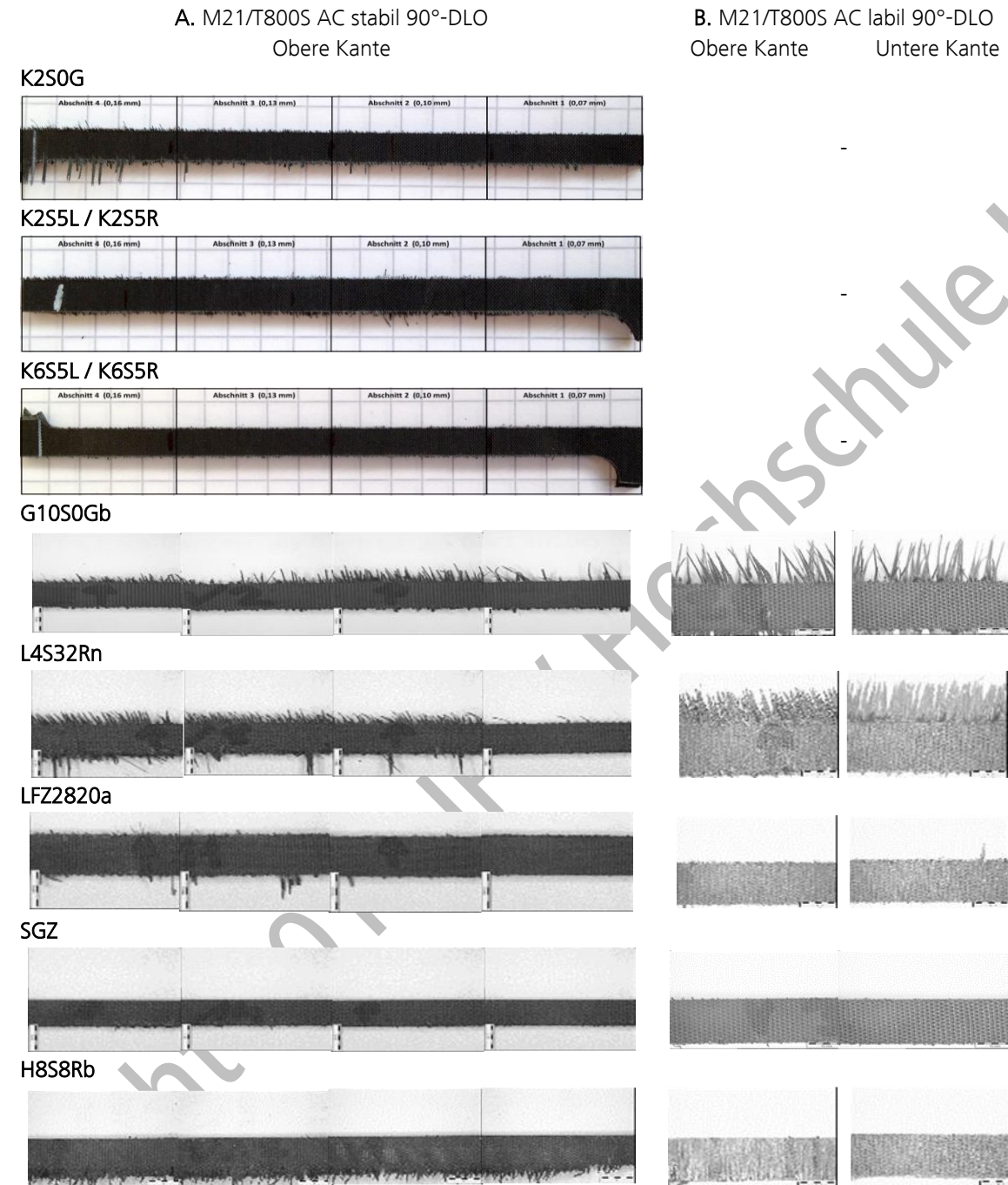


Bild 9: Entwicklung der Schnittkanten in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie für das Besäumen.

Bearbeitungsparameter: Gleichlauf; stabil: $x = 10$ mm; labil $x = 100$ mm Vorschubgeschwindigkeit $v = 88$ m/min; Vorschub/Zahn $f = 0,04$ mm; Drehzahl $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a = 2$ mm; radiale Zustellung $a = 8$ mm

c. Zusammenfassung der Ergebnisse – Amplituden und Verformung

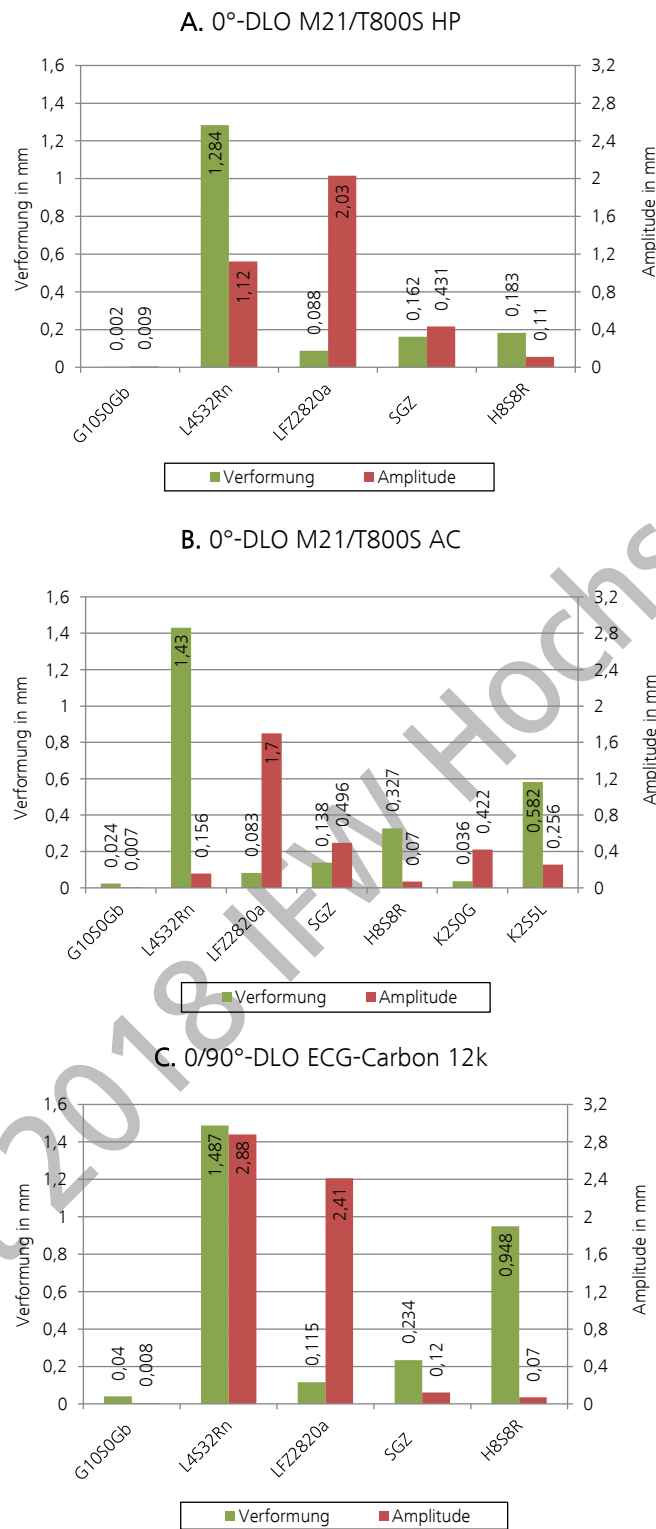


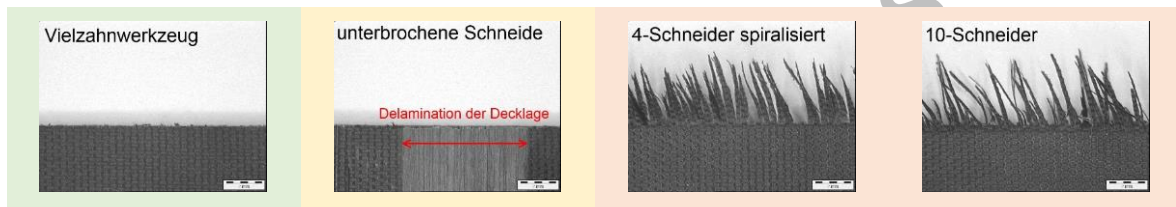
Bild 10: Entwicklung der statischen Verformung und der Schwingungsamplitude des Werkstückes in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie für das Besäumen.

Bearbeitungsparameter: Gegenlauf; labil $x = 100$ mm Vorschubgeschwindigkeit $v = 88$ m/min; Vorschub/Zahn $f = 0,04$ mm; Drehzahl $n = 3519$ 1/min; axiale Zustellung $a = 2$ mm; radiale Zustellung $a = 8$ mm

c. Schlussfolgerung - Werkzeugbewertung

Tabelle 1: Einstufung unterschiedlicher Werkzeuge hinsichtlich ihrer Eignung für den labilen Fräsprozess.

Werkzeug	Verformung	Amplitude	Qualität
G10S0Gb	•	•	•••
L4S32Rn	••••	••	•••
LFZ2820a	•	••••	•
SGZ	•	•••	•
H8S8Rb	••	•	••
K2S5L	•••	••	•••
K2S0G	•	•••	••



Insbesondere Vielzahnwerkzeuge sind für die labile Fräsbearbeitung von CFK-Werkstoffen geeignet. Sie weisen meist eine geringere statische Verformung auf und haben gleichzeitig höher Schwingungsamplituden zur Folge. Durch die Schwingungen werden Faserüberstände direkt im Besäumprozess entfernt. Spiralisierte Werkzeuge hingegen haben durch die hohe statische Verformung bzw. die Ausweichbewegung des Werkstückes Delaminationen und Faserüberstände zur Folge.

d. Weiterführende Dokumente

Fabian Lissek, M. K.-P. (KW39 2015). Maschinenmarkt. *Spanende Bearbeitung von labilen CFK-Bauteilen.*