



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Institut für  
Fertigungstechnik und  
Photonische Technologien



# Diplomarbeit

## Schwingungsunterstütztes Bohren von Luftfahrtwerkstoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Master of Science) unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Friedrich Bleicher**

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

und der Betreuung von

**Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Christian Baumann BSc**

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Peter Josef Brandt**

00828581 (066 482)

Rembrandtstraße 6/9

1020 Wien

Wien, im September 2021

---

Peter Josef Brandt

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und, dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im September 2021

---

Peter Josef Brandt

## Danksagung

Ich bedanke mich bei meinen Eltern, Irene und Josef, die mir Zeit meines Lebens uneingeschränkte Unterstützung zukommen ließen und lassen und ohne deren Unterstützung ich diese Worte nicht zu Papier bringen würde.

Ich möchte mich auch bei meinem Betreuer Christian Baumann recht herzlich für die Unterstützung und Beratung bei der Ausarbeitung dieser akademischen Arbeit bedanken. Sein Engagement bezüglich des Themas schwingungsunterstütztes Bohren von Luftfahrtwerkstoffen und bei der Betreuung hat mich akademisch enorm weitergebracht und wird mir den Weg auf meinem weiteren beruflichen Werdegang ebnen.

Die Mitarbeiter am IFT – im Speziellen möchte ich hier Markus Prießnitz für seine Unterstützung in Python, Johann Sauprigl, der mir neue Einblicke in die Werkzeugvermessung ermöglicht hat und Stephan Krall, der immer ein offenes Ohr für mich hatte, erwähnen – haben mir stets unter die Arme gegriffen und jede meiner fachlichen Fragestellungen immer zu meiner vollsten Zufriedenheit beantworten können.

# Kurzfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sind wesentliche Entwicklungsschritte zur Optimierung eines schwingungsunterstützten Bohrprozesses (SUB) im niederfrequenten Bereich von Werkstoffverbunden (CFK/Ti), die überwiegend in der Luftfahrtindustrie zum Einsatz kommen, aufgezeigt worden. Auf Basis eines steifen Versuchsaufbaus ist die grundlegende Datenbasis für die Entwicklung einer optimierten Vibrationsspindel geschaffen worden. Der Hauptfokus lag auf der Etablierung eines Clean-One-Shot-Drilling, bei dem kein Schmierstoff und auch kein Span bzw. keine Bohrkappe austrittsseitig austritt/abfällt (single-side-extraction). Zur Anwendung kam ein unbeschichteter Hartmetallbohrertyp, der in Folge von Versuchsfortschritten mehrmals umgeschliffen worden ist, um eine für den Prozess passende Schneidengeometrie ausfindig machen zu können.

In den Versuchsreihen stellte sich speziell für die Austrittsstrategie heraus, dass nur eine spez. Geometriewahl des Bohrers (Hauptmerkmale großer/kleiner Spanwinkel/Keilwinkel, keine Spanteiler), ein begrenzter Parameterraum für die Schnittparameter als auch eine genaue Steuerung der MMS-Kühlung (Druckabbau) zielführend ist. Macht man sich für das Hauptloch eine spezifische Frequenz, die nicht dem ganzzahligen Vielfachen der Schneidenanzahl entspricht, zunutze, um einen Spanbruch herbeizuführen, wählt man für die Bohrkappenzerstörung bewusst ein ganzzahliges Vielfaches der Schneidenanzahl für die spez. Frequenz. Dies erzeugt Segmente auf der Bohrkappe, die von den Hauptschneiden periodisch "abgeschält" und über eine installierte Absaugung (eintrittsseitig) abgesaugt werden.

Thermische Untersuchungen zum SUB führten u. a. zu folgenden Erkenntnissen:

- Die Schnittunterbrechung und die damit einhergehende Totzeit  $t_t$  führt beim SUB zur temporären Abkühlung des Werkzeugs und des Werkstücks.
- Da das Werkzeug während dieser Zeit nicht in Eingriff ist, kann eine vollständige Schmierung der Schneidkanten und des Bohrgrundes gewährleistet werden. Dies sollte zu einer Reduktion der während des Schnittvorgangs induzierten Reibungswärme führen.
- Der durch das SUB entstandene Kurzspan kann im Vergleich zum konventionellen Bohren leichter über die Spannuten aus der Zerspanungszone abgeführt werden. Ergo ergibt sich hierdurch eine signifikant verkürzte Kontaktzeit zwischen dem relativ heißen Kurzspan und dem Werkzeug bzw. dem Werkstück.
- Die Austrittsstrategie führt aufgrund des kontinuierlichen Eingriffs der Schneiden und des hohen eingestellten Vorschubs zu stark erhöhten Prozesstemperaturen und einem entsprechend damit einhergehenden Verschleiß.

## Abstract

Within the scope of this diploma thesis, essential development steps for the optimization of a vibration-assisted drilling process (VAD) in the low-frequency range of material composites (CFRP/Ti), which are predominantly used in the aerospace industry, have been demonstrated. Based on a stiff experimental setup, the fundamental data basis for the development of an optimized vibration spindle has been obtained. The main focus was on establishing a clean-one-shot drilling process in which no lubricant and also no chip or drill cap exits/falls off on the exit side (single-side extraction). An uncoated carbide drill type was used, which was recontoured several times in a series of test steps in order to find a suitable cutting geometry for the process.

In the series of experiments, it was found, especially for the exit strategy, that only a special geometry selection of the drill (main features large/small rake angle/wedge angle, no chip breakers, small inner main cutting edge), a limited parameter space for cutting speed, feed, amplitude and spec. frequency as well as a precise control of the MQL cooling (pressure reduction) is target-oriented. While using a specific frequency for the main hole, which is not an integral multiple of the number of cutting edges, to cause chip breaking, deliberately choosing an integral multiple of the number of cutting edges for the spec. frequency leads to superior results for the drill cap destruction. This approach creates segments on the drill cap that are periodically "peeled off" by the main cutting edges and exhausted via an installed vacuummer (entrance side).

Thermal investigation on the SUB led to the following findings, among others:

- With VAD, the interruption of the cut and the associated dead time  $t_t$  leads to temporary cooling of the tool and the workpiece.
- Since the tool is not engaged during this time, complete lubrication of the cutting edges and the bottom of the hole can be ensured. This should result in a reduction of the frictional heat induced during the cutting process.
- Compared to conventional drilling, the short chip produced by SUB can be more easily removed from the cutting zone via the chip flutes. Ergo, this results in a significantly shorter contact time between the relatively hot short chip and the tool or workpiece.
- Due to the continuous engagement of the cutting edges and the high set feed rate, the exit strategy leads to greatly increased process temperatures and a correspondingly associated wear.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen und Stand der Technik .....	2
2.1	Aktuelle Entwicklungen im Flugzeugbau.....	2
2.2	Verfügbare Spindellösungen für das niederfrequente SUB .....	9
2.3	Bearbeitung von CFK.....	10
2.3.1	Stoffspezifische Eigenschaften von CFK.....	10
2.3.2	Herausforderungen beim Bohren von CFK .....	12
2.4	Bearbeitung von Titan-Legierungen .....	14
2.4.1	Stoffspezifische Eigenschaften von Titan .....	14
2.4.2	Herausforderungen beim Bohren von Titan.....	16
2.5	Bearbeitung von Stackaufbauten .....	19
2.5.1	Spezifische Eigenschaften von Stackaufbauten.....	19
2.5.2	Herausforderungen beim Bohren von CFK-/Ti-Stackaufbauten.....	20
2.6	Schneidstoffe & Bohrergeometrien .....	23
2.7	Kühlschmierung.....	25
3	Zielsetzung, Forschungsbedarf & Vorgehensweise .....	28
4	Versuchsumfeld.....	30
4.1	Versuchsmaschine und Schwingungserzeugung.....	30
4.2	Werkstückaufspannung.....	32
4.3	Bohrwerkzeuge .....	33
4.4	Versuchswerkstoffe .....	35
4.4.1	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) .....	35
4.4.2	Titanwerkstoff .....	35
4.5	Mess- & Analysetechniken .....	36
4.5.1	Prozesskräfte.....	36
4.5.2	Prozesstemperaturen im Titanwerkstück.....	36
4.5.3	Spanabfuhr & Saugleistung.....	37
4.5.4	Bohrungsdurchmesser.....	38
4.5.5	Grathöhe.....	38

---

4.5.6	Rauheitskenngrößen .....	39
4.5.7	High-Speed-Kamera-Aufnahmen für Durchbruchstrategie.....	40
4.5.8	Werkzeugvermessung & Verschleißindikation .....	41
4.5.9	Spanbruchvisualisierung mittels MATLAB.....	41
5	Kinematische Analyse der schwingungsunterstützten Bohrbearbeitung.....	43
6	Experimentelle Bohrversuche in CFK/Ti-Stackaufbauten .....	49
6.1	Kleine Parameterstudie konventionelles Bohren.....	49
6.1.1	Parametervariation CFK .....	50
6.1.2	Parametervariation Titan .....	52
6.1.3	Gratminimierung Bohreraustritt.....	56
6.2	Untersuchung Hauptlochqualität SUB .....	57
6.2.1	Parameterstudie zur Hauptlochqualität SUB .....	58
6.2.2	Standzeitversuch Hauptlochqualität SUB .....	62
6.3	Entwicklung einer Durchbruchstrategie.....	64
6.3.1	Klenk-Basisvariante – ungeschliffen.....	66
6.3.2	Alternative Ansätze.....	69
6.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Bohrervarianten V <sub>1-5</sub> .....	79
6.3.4	Reduzierte spez. Frequenz F <sub>s</sub> & erhöhte Amplitude A für Variante V <sub>4</sub> ..	81
6.3.5	Reduzierung Vorschub für Variante V <sub>4</sub> .....	83
6.3.6	Reduzierung Vorschub & Amplitude für Variante V <sub>4</sub> .....	85
6.3.7	Weitere Erkenntnisse bzgl. Bohrergeometrie & Parameterwahl.....	86
6.4	Thermische Untersuchung des Bohrprozesses im Titan.....	88
6.5	Use-Case Landeklappenmontage – FACC .....	93
6.5.1	Kleine Parameterstudie zum Senken in CFK .....	93
6.5.2	Standzeitversuch Use-Case Landeklappenmontage.....	95
6.5.3	Weitere Erkenntnisse aus dem Use-Case Landeklappenmontage .....	106
7	Ergebnisse / Auswertung / Lastenheft.....	112
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	114
9	Literaturverzeichnis .....	119
10	Abbildungsverzeichnis.....	124
11	Formelverzeichnis .....	128
12	Tabellenverzeichnis.....	129

---

13	Abkürzungsverzeichnis .....	130
14	Formelzeichenverzeichnis .....	132