



1 Verdichter- und Turbinenscheiben moderner Triebwerke bestehen aus hochfesten Materialien und weisen komplexe Strukturen auf (© PTW)

Prozessüberwachung ■ Temperatursensorik ■ sicherheitskritische Bauteile

## Höhere Prozesssicherheit durch sensorintegrierte Werkzeuge

Den hohen Qualitätsanforderungen von Bauteilen der Luftfahrtbranche kann mit einer gesteigerten Prozessüberwachung begegnet werden. Hierzu wurde ein Fräs Werkzeug mit integrierter Temperatursensorik entwickelt.

von Christopher Praetzas, Johannes Mayr, Tamara Tepperneegg, Andreas W. Nemetz und Franz Haas

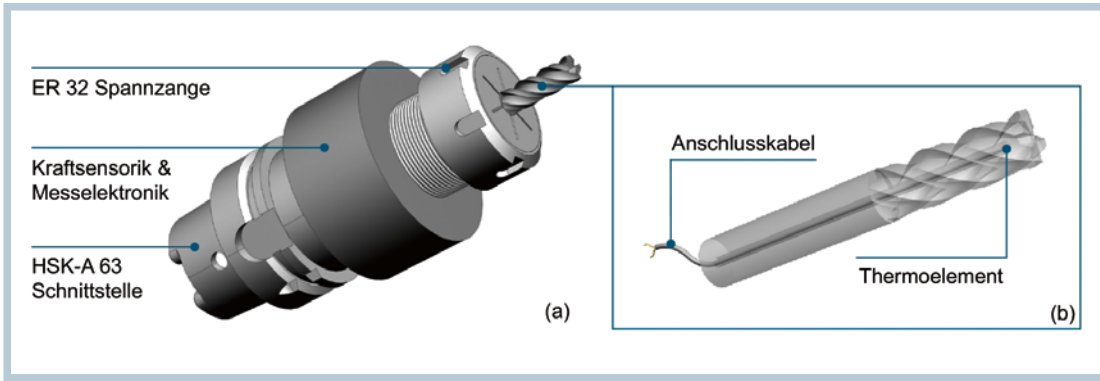
Die Luftfahrtbranche ist mit einer stetig steigenden Nachfrage konfrontiert. In den nächsten 20 Jahren sollen über 40 000 neue Flugzeuge ausgeliefert werden. Das entspricht der doppelten Menge aller aktuell im Betrieb befindlichen Flugzeuge [1]. Diese Entwicklung verdeutlicht das Potential und die Forderung nach effizienteren Fertigungsprozessen. Aktuelle Kapazitäten müssen erweitert und die Effizienz gesteigert werden, um den zukünftigen Bedarf bedienen zu können. Bei der Effizienzsteigerung darf jedoch die erhöhte Produktivität nicht zu Lasten der Qualität und Prozesssicherheit

gehen, um die uneingeschränkte Funktionalität von sicherheitskritischen Bauteilen im Flugbetrieb zu gewährleisten.

Sicherheitskritische Bauteile sind beispielsweise Integralbauteile, wie Rumpf- oder Triebwerkskomponenten (Bild 1). Diese werden zumeist mit spanende Verfahren aus Vollmaterial gefertigt. In modernen Flugzeugen kommen dabei zunehmend hochfeste Werkstoffe zum Einsatz, um die Betriebssicherheit und die Kraftstoffeffizienz weiter zu steigern. Zusätzlich weisen Integralbauteile häufig dünnwandige und komplexe Strukturen auf, welche für die spanende Fertigung

eine große Herausforderung darstellen. Im Besonderen sind die Eingriffsbedingungen schwer zu ermitteln, und auftretende Instabilitäten resultieren in geringer Produktivität und Bauteilqualität.

Um diesen negativen Effekten entgegenzuwirken, sind ein umfangreiches Prozesswissen und moderne Systeme zur Prozessüberwachung notwendig. In der Vergangenheit lag der Fokus dabei häufig auf den Zerspankräften, da diese vergleichsweise einfach über spezielle Kraftmesssensoren (zum Beispiel Dehnmessstreifen oder Piezoaufnehmer) beziehungsweise durch die Leistungsaufnah-



2 (a) Sensorischer Werkzeughalter; (b) sensorintegriertes Fräswerkzeug [4]

(© PTW)

me der Arbeitsspindel und der Vorschubantriebe erfasst werden können. In Relation dazu ist die Erfassung der Temperatur in der Zerspanzone aufwendig. Entsprechende Sensorik muss in räumlicher Nähe der Zerspanzone angebracht werden (zum Beispiel Thermoelemente) oder eine freie Sichtlinie zur Messstelle (zum Beispiel Pyrometer) aufweisen. Des Weiteren muss für eine Prozessüberwachung eine Echtzeit-Datenübertragung bestehen, um rechtzeitig in den Prozess eingreifen und somit Ausschuss vermeiden zu können. Die bereits im Forschungsumfeld verwendeten Ansätze (beispielsweise [2] und [3]) zur Kraft- und Temperaturüberwachung von Zerspanungsprozessen weisen Nachteile hinsichtlich einer aufwendigen Instrumentierung und einer eingeschränkten Einsetzbarkeit bei Verwendung von Kühlschmierstoff auf.

**Sensorintegriertes Werkzeug zur Prozessüberwachung**

An dieser Stelle setzt das kooperative Forschungsprojekt ›CHIP‹ an und verfolgt neue Lösungsansätze. Ziel des Projekts ist die wissensbasierte Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Fräsbearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe mittels Vollhartmetallschaftfräsern. Zur Zielerreichung wurde in einem ersten Schritt das in Bild 2b dargestellte Fräswerkzeug mit integrierter Temperatursensorik entwickelt. Es weist auf der Rückseite eine Kernbohrung auf, welche 5 mm vor dem Tool Center Point (TCP) endet. Über diese Bohrung lassen sich Thermoelemente in das Werkzeug einbringen und wiederholgenau positionieren. Die Fixierung erfolgt mittels Leitsilber, welches gleichzeitig die thermische Leitfähigkeit zwischen den Thermoelementen und dem Hartmetall verbessert. Bei dem verwendeten Fräserdurchmesser von 10 mm ergibt sich ein Messabstand von 5 mm zu den vier Werkzeug-

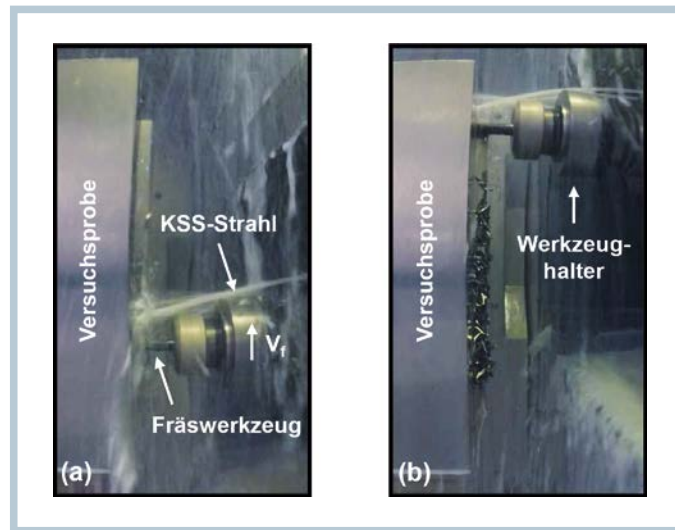
schneiden. Die hohe thermische Leitfähigkeit des Hartmetalls von über 70 W/m\*K und das eingesetzte Leitsilber stellen trotz des Messabstands eine geringe zeitliche Verzögerung im Temperatursignal sicher.

Für die Umsetzung einer Echtzeit-Prozessüberwachung wurde das entwickelte Fräswerkzeug mit einem adaptierten sensorischen Werkzeughalter (Bild 2a) der pro-micron GmbH kombiniert. »

Mit diesem lassen sich zusätzlich zu der Werkzeugkerntemperatur über die eingebrachten Thermoelemente auch die auf den Fräser wirkenden Biegemomente über Dehnmessstreifen im Werkzeughalter bestimmen. Der Werkzeughalter überträgt die mit einer Abtastrate von 1,6 kHz ermittelten Messwerte mittels WiFi unverzüglich an einen Messcomputer außerhalb der Maschine, wo sie gespeichert und für den Maschinenbediener visuell aufbereitet werden können.

### Versuchsaufbau zur Untersuchung eines Prozessfehlers

Das entwickelte System aus sensorintegriertem Fräswerkzeug und sensorischem Werkzeughalter wurde nachfolgend für Zerspanuntersuchungen in dem für die Luft- und Raumfahrtbranche üblichen Material TiAl6V4 eingesetzt. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung der Auswirkung von Kühlschmierstoff (KSS) bezogenen Prozessfehlern, wie fehlerhaft ausgerichtet oder verschatteter KSS-Düsen, auf die thermomechanische Werkzeugbelastung. Insbesondere bei der Bearbeitung geometrisch komplexer Integralbauteile mit äußere-



**3** (a) Nassbearbeitung; (b) Trockenbearbeitung aufgrund fehlerhaft ausgerichteter KSS-Düsen (© PTW)

rer KSS-Zufuhr kann es zeitweise zu Defiziten bei der Versorgung und somit zu einer temporären Trockenbearbeitung kommen.

Die linearen Schulterfräsversuche wurden auf dem Bearbeitungszentrum Grob G350 (horizontale Spindelanzordnung) mit der KSS-Emulsion Novamet 910 durchgeführt. Dabei waren die KSS-Düsen auf einen Punkt 20 mm oberhalb des TCP ausgerichtet. Die vertikale Vor-

wurden mit neuen, unbenutzten Fräs Werkzeugen durchgeführt.

### Ergebnisse

Betrachtet man die in Bild 5a dargestellten Temperaturprofile der einzelnen Versuche, sieht man, dass sich nach einer kurzen Einlaufphase ein konstantes Temperaturniveau im Kern des Fräasers einstellt. In diesem Abschnitt befinden sich

## INFORMATION & SERVICE



### LITERATUR

- [1] *Boeing*: Anzahl der weltweiten Auslieferungen von Flugzeugen im Zeitraum der Jahre 2017 bis 2036 nach Regionen und Flugzeugtypen. Statista
- [2] *M. Sato, N. Tamura, H. Tanaka (2011)*: Temperature Variation in the Cutting Tool in End Milling. *J. Manuf. Sci. Eng.* 133(2):21005.
- [3] *G. le Coz, M. Marinescu, A. Devillez, D. Dudzinski, L. Velnom (2012)*: Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys. *Applied Thermal Engineering* 36:434–41.
- [4] *C. Praetzas, T. Teppernegg, J. Mayr, C. Czettl, J. Schäfer, E. Abele E (2018)*: Investigation of Tool Core Temperature and Mechanical Tool Load in Milling of Ti6Al4V. 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018). *Procedia CIRP*.
- [5] *A. W. Nemetz, W. Daves, T. Klünsner, W. Ecker, T. Teppernegg, C. Czettl, I. Krajinović (2018)*: FE temperature- and residual stress prediction in milling inserts and correlation with experimentally observed damage mechanisms. *Journal of Materials Processing Tech.* 256:98–108

Versuchsnummer	Schnittgeschwindigkeit [m/min]	Zahnvorschub [mm]	Axiale Zustellung [mm]	Radiale Zustellung [mm]	Zeitspanvolumen [cm <sup>3</sup> /min]
V1	80	0,04	10	3	12,22
V2	100	0,04	10	3	15,28
V3	80	0,06	10	3	18,33
V4	100	0,06	10	3	22,92
V5	90	0,05	10	3	17,19

### 4 Versuchsparameter (© PTW)

schubrichtung hatte somit zur Folge, dass der Fräser indirekt über den abprallenden KSS gekühlt wurde, solange er sich über der Versuchsprobe befand (Bild 3a). Am oberen Rand der Probe verfehlte der KSS-Strahl jedoch das Werkzeug, was in einer Trockenbearbeitung auf den letzten 20 mm der insgesamt 250 mm langen Fräsbahnen resultierte (Bild 3b). Eine Parametervariation erfolgte über die Schnittgeschwindigkeit und den Zahnvorschub, um deren Einfluss auf die thermomechanische Werkzeugbelastung im Fall eines vorliegenden Prozessfehlers zu untersuchen. Die axiale und die radiale Zustellung wurden bei allen Versuchen konstant gehalten. In Bild 4 sind die Parameterkombinationen aller Versuche dargestellt. Alle Versuche

der aus dem Fräsprozess resultierende Wärmeeintrag und die Wärmeabfuhr durch KSS im Gleichgewicht. Der anschließende Abschnitt ist durch einen starken Anstieg der Fräserkerntemperatur gekennzeichnet. Hier erreicht kein KSS den Fräser, und der Werkstoff wird trocken bearbeitet. Die Spitze im Temperaturprofil kennzeichnet den Fräseraustritt aus der Versuchsprobe und somit das Ende des Fräsprozesses. Das Werkzeug kühlt im Anschluss an der Luft ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schnittgeschwindigkeit und der Zahnvorschub einen großen Einfluss auf die Fräserkerntemperatur haben. Dabei hat die Schnittgeschwindigkeit einen größeren Einfluss auf die entstehende Wärme als der Zahnvorschub. Der über alle Ver-

suche hinweg erfasste starke Anstieg im Abschnitt der Trockenbearbeitung verdeutlicht jedoch, dass die KSS-Zufuhr den stärksten Einfluss auf die Temperatur im Fräswerkzeug hat. Bereits ein Fräsweg von 20 mm bei unterbrochener KSS-Zufuhr führt in allen Versuchen zu einer Verdoppelung der Werkzeugkern-temperatur. Dieser Effekt verstärkt sich bei hoher Schnittgeschwindigkeit und

gleichzeitig geringem Vorschub (V2), da hier eine hohe Wärmeentwicklung auftritt und der Fräser dieser über längere Zeit ausgesetzt ist.

Bild 5c zeigt die Aktivkraftprofile (Kraft senkrecht zur Drehachse des Werkzeugs) der einzelnen Versuche. Im Gegensatz zur Fräserkerntemperatur weisen diese eine starke Abhängigkeit vom Zahnvorschub auf, was auf die un-

ne KSS-Zufuhr kann zwar im Kraftsignal identifiziert werden, jedoch ist die Auswirkung auf die Fräserkerntemperatur sehr viel deutlicher. Insbesondere bei komplexeren Bahnparametern und den daraus resultierenden komplexeren Eingriffsverhältnissen und Zerspanskräften sind derart geringe Abweichungen im Kraftsignal schwer zu identifizieren. Für die Forschung stellt das entwickelte Sys-

## INFORMATION & SERVICE



### INSTITUTE

**PTW - Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen Technische Universität Darmstadt**

64287 Darmstadt  
Tel. +49 6151 16-20080

[www.ptw.tu-darmstadt.de](http://www.ptw.tu-darmstadt.de)

**MCL – Materials Center Leoben Forschung GmbH**

A-8700 Leoben  
Tel. +43 3842 45922-0

[www.mcl.at](http://www.mcl.at)

**IFT – Institut für Fertigungstechnik Technische Universität Graz**

A-8010 Graz  
Tel. +43 316 873-7171

[www.tugraz.at/institute/ift](http://www.tugraz.at/institute/ift)

### HERSTELLER

**Ceratizit Austria GmbH**

A-6600 Reutte  
Tel. +43 5672 200-0

[www.ceratizit.com](http://www.ceratizit.com)

### DIE AUTOREN

**M. Sc. Christopher Praetzas** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Zerspanungstechnologie des PTW  
[c.praetzas@ptw.tu-darmstadt.de](mailto:c.praetzas@ptw.tu-darmstadt.de)

**Dipl. Ing. Johannes Mayr** ist Entwicklungsingenieur für Stäbe und Formrohlinge bei der Ceratizit Austria GmbH

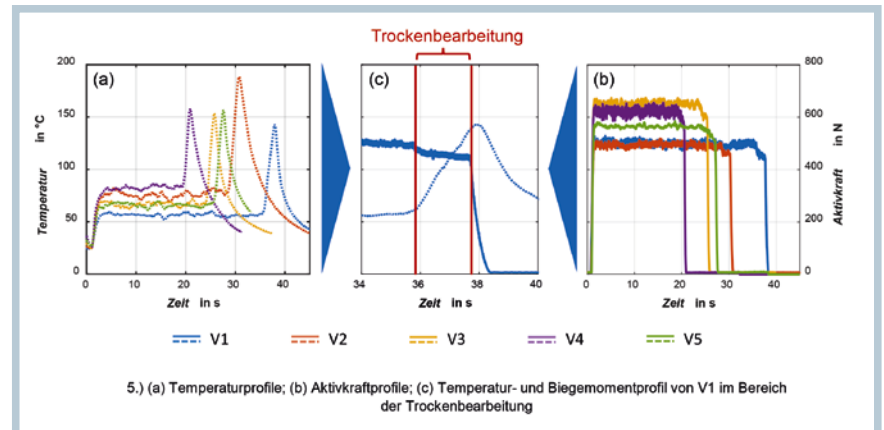
**Dr. Tamara Teppernegg** ist Entwicklungsingenieurin für Zerspanungswerkzeuge bei der Ceratizit Austria GmbH

**DI Andreas W. Nemetz** ist Dissertant in der Forschungsgruppe Simulation des MCL

**Univ.-Prof. Dr. Franz Haas** ist Vorstand des Institutes für Fertigungstechnik der TU Graz

### PDF-DOWNLOAD

[www.werkstatt-betrieb.de/6846359](http://www.werkstatt-betrieb.de/6846359)



5 (a) Temperaturprofile; (b) Temperatur- und Biegemomentprofil von V1 im Bereich der Trockenbearbeitung; (c) Aktivkraftprofile (© PTW)

terschiedlichen Spandicken zurückzuführen ist. Auffällig ist auch die Abnahme der Aktivkraft im Abschnitt der Trockenbearbeitung, welcher in Bild 4b vergrößert dargestellt ist. Diese Abnahme kann nicht mit dem Fräseraustritt aus der Versuchsprobe und der damit verbundenen reduzierten Umschlingung des Werkzeugs begründet werden, da diese Eingriffsbedingung nur auf den letzten 2,5 mm einer Fräsbahn auftritt. Vielmehr sind die veränderten Kühlschmierbedingungen für die Reduktion der Aktivkraft verantwortlich. Zum einen muss bei der Trockenbearbeitung kein KSS aus der Spannut verdrängt werden. Zum anderen führen die hohen Temperaturen in der Zerspanzone zu einem raschen Verdunsten des Wassers im KSS, sodass nur noch ein dünner Ölfilm zurückbleibt, welcher eine verbesserte Schmierleistung zur Folge hat.

### Identifikation von Prozessfehlern mit sensorintegrierten Werkzeugen

Die erzielten Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial der Kombination aus sensorintegriertem Werkzeug und sensorischem Werkzeughalter. Speziell im Bereich der Prozessüberwachung stellt die Temperatursensorik eine wertvolle Ergänzung der bisher vorherrschenden Kraftüberwachung dar. Die unterbroche-

tem ebenfalls einen enormen Zugewinn dar, weil mit geringem Aufwand sowohl Zerspanskraft als auch -temperatur werkzeugseitig bestimmt und somit das Prozessverständnis gesteigert werden kann.

Im weiteren Verlauf des Projektes werden die gesammelten Daten für die Erstellung einer 3D-FEM-Simulation des Fräsprozesses verwendet (beispielsweise in [5] für Wendeschneidplatten). Hierdurch sollen über die gemessene Fräserkerntemperatur Rückschlüsse auf die Schneidentemperatur und damit auf die genaue thermische Belastung der Werkzeugschneide gezogen werden können. In einem weiteren Arbeitspaket wird der Wärmeeintrag in das Werkstück untersucht. Dieser wird auch experimentell anhand eines Multi-sensor-Systems im Werkstück bestimmt und simuliert. Gerade für dünnwandige Integralbauteile ist dies von besonderer Bedeutung, da ein zu hoher Wärmeeintrag einen Bauteilverzug zur Folge hat. Zudem werden die gesammelten Daten und Erkenntnisse in einen »Machine Learning Algorithmus« überführt und damit ein wichtiger Schritt in Richtung einer intelligenten, selbstlernenden Werkzeugmaschine gesetzt. Zusammenfassend trägt das Projekt somit zu einer zukünftigen Steigerung der Produktivität und Sicherheit in der Luftfahrtbranche bei. ■