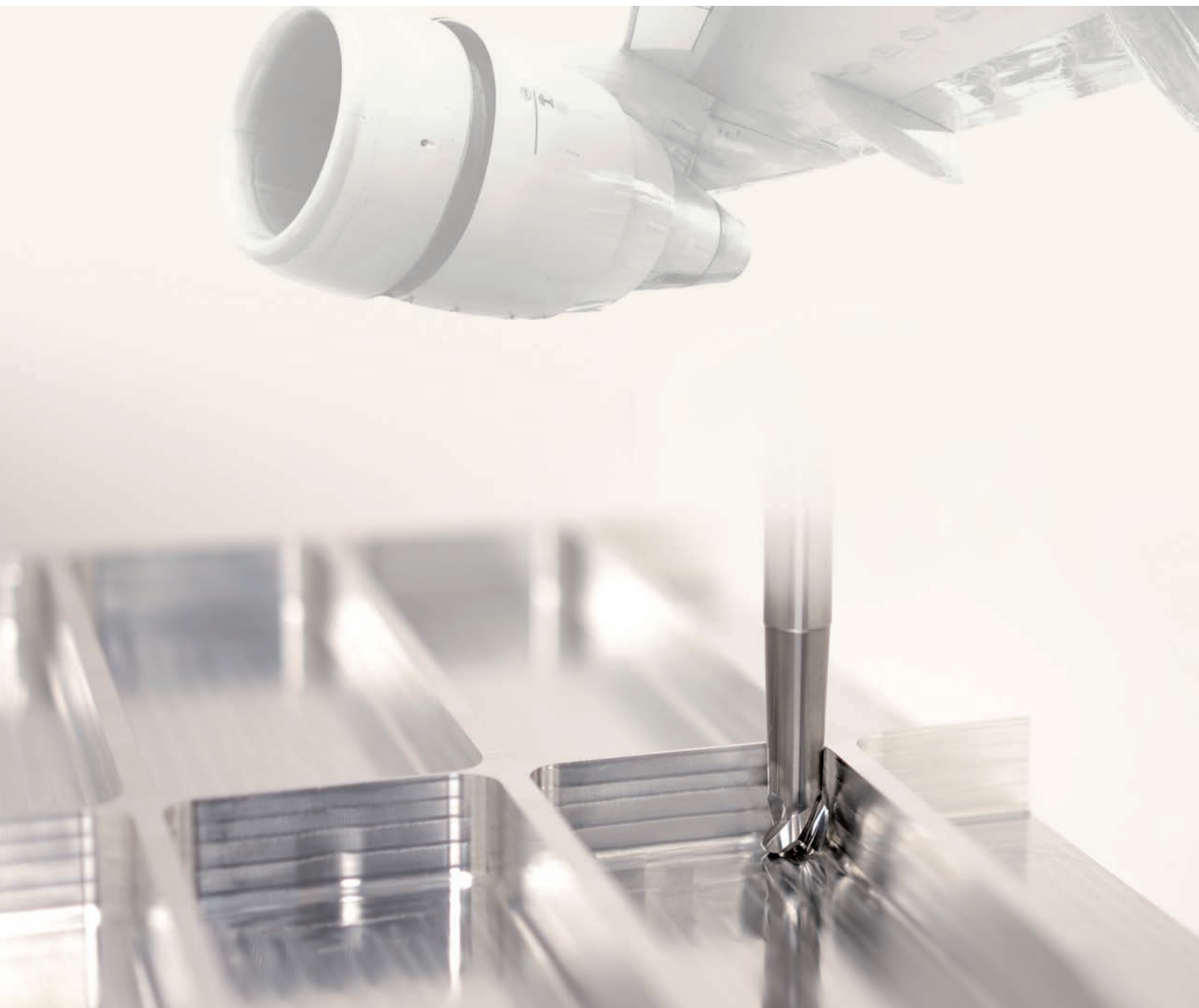




# TECHNOLOGIE REPORT

06 | Volumenerspannung – Höchste Wirtschaftlichkeit bei der Aluminiumbearbeitung



## Einleitung

### Einleitung

In der Luft- und Raumfahrtindustrie werden aufgrund der Kosten- und Gewichtsersparnis und maximaler Qualitätsansprüche überwiegend aus dem Vollen gefräste Strukturbauteile in Integralbauweise eingesetzt. Bei dieser Volumenzerspanung werden hohe Anforderungen an die Bauteilqualität und vor allem die Produktivität gestellt. Der Anteil an Strukturbauteilen aus Aluminiumlegierungen macht dabei neben Verbundwerkstoffen und Titan den Großteil der Werkstoffe in modernen

Flugzeugen aus. Bei der Volumenzerspanung von Aluminium stellen die hohen Zerspanraten und die daraus resultierende Spanabfuhr, das Zeitspanvolumen sowie eine optimale Ausnutzung der Maschinenleistung Herausforderungen dar. Die Steigerung von bauteil- und werkstoffspezifischen Prozesseinstellgrößen und Werkzeugen im Rahmen der Volumenzerspanung bietet hohes Potenzial zur produktiven und wirtschaftlichen Aluminiumbearbeitung.

## Motivation

### Motivation

Der stetig zunehmende Luftverkehr, sowohl im Passagiersektor als auch in der Luftfracht, erfordert in den kommenden Jahren eine Erhöhung der Transportkapazitäten um bis zu 5 % pro Jahr (siehe Abbildung 1). Verschärfungen der Emissionsrichtlinien sowie ökonomisch und ökologisch bedingte Ressourceneinsparungen stellen dabei Anforderungen an effiziente Antriebslösungen, eine verbesserte Aerodynamik und stetige Gewichtseinsparungen der Flugzeuge. Der hierdurch steigende Anteil an

Strukturbauteilen und zunehmender Kostendruck führen zu erhöhten Anforderungen an eine effiziente und hochproduktive Fertigung. Die technologischen Entwicklungen der vergangenen 40 Jahre führten bei gleichzeitiger Erhöhung des Komforts für Flugreisende zu einer Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 70 %, des Lärmpegels um 75 % und der unverbrannten Kohlenwasserstoffe um 90 % [1].

### Index

## INDEX

|  |    |
|--|----|
| Einleitung   | 2  |
| Motivation   | 2  |
| HPC- und HSC-Bearbeitung   | 4  |
| Herausforderung bei der HPC-Bearbeitung                          | 5  |
| Lösungen und Optimierungen bei der HPC-Bearbeitung von Aluminium | 6  |
| Ergebnisse   | 9  |
| Zusammenfassung und Ausblick                                     | 10 |
| Literaturverzeichnis   | 11 |
| Impressum  | 11 |

## Motivation

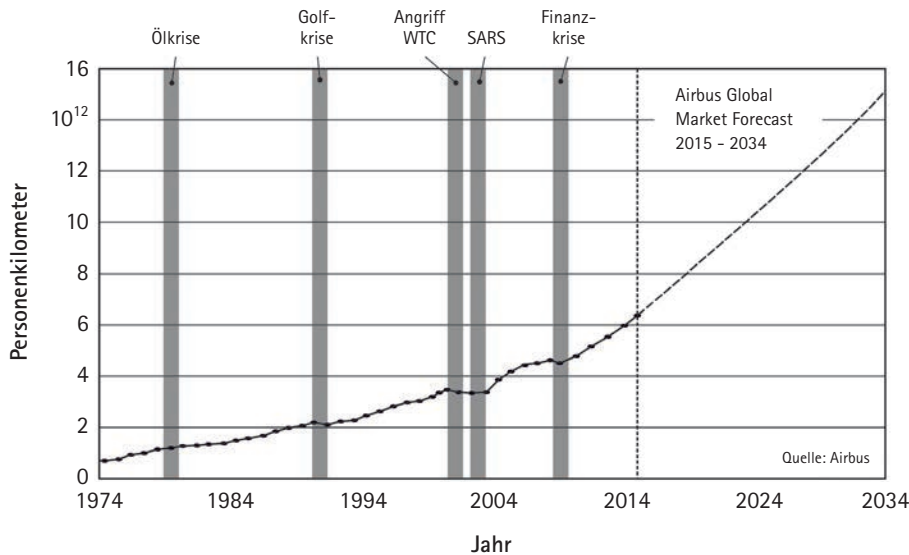


Abbildung 1: Prognose der Entwicklung des Luftverkehrs [2]

Neben Werkstoffen wie kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) und Titan werden hauptsächlich Aluminiumlegierungen für Strukturbauteile wie Spanten und Flügelkomponenten in der Luftfahrt eingesetzt (siehe Abbildung 2). Die hier überwiegend verwendeten aushärtbaren Aluminiumlegierungen zeichnen sich dabei durch ihre hohen Festigkeitseigenschaften mit einer Streckgrenze oberhalb von  $500 \text{ N/mm}^2$  bei gleichzeitig geringer Dichte von etwa  $2,7 \text{ g/cm}^3$  aus. Aluminium-Strukturbauteile werden meist aus dem Vollen mit einem Zerspananteil von bis zu 95 % des Ausgangsvolumens des Bauteils gefräst und erfordern daher bei der Zerspaltung effiziente Werkzeuge und Prozessstrategien.

Durch neue Maschinengenerationen mit Spindeldrehzahlen bis zu  $30.000 \text{ min}^{-1}$  und gleichzeitig leistungsstarken Antrieben konnte in den vergangenen Jahren die Hochleistungserspanung von Aluminium insbesondere bei der Schruppbearbeitung produktiver gestaltet werden. Die anschließende Optimierung der eingesetzten Werkzeuge führte jedoch dazu, dass erneut die Maschinenleistungsgrenze hinsichtlich der Spindelleistung, der maximalen Drehzahl und der Dynamik der Vorschubachsen häufig das den Prozess limitierende Kriterium darstellt. Weitere prozessspezifische Verbesserungen der Schneidengeometrie und der Werkzeuggrundkörper sowie der Werkzeug- und Werkstückspannung bieten hier Potenziale, die Ausnutzung der verfügbaren Maschinenleistung weiter zu steigern und so eine noch höhere Wirtschaftlichkeit bei der Volumenerspannung von Aluminium zu erreichen.



Abbildung 2: Aluminium-Strukturbauteile aus der Luftfahrtindustrie; Quelle: MAPAL, iStock

## HPC- und HSC-Bearbeitung

# HPC- und HSC-Bearbeitung

Eine signifikante Steigerung des Zeitspanvolumens grenzt die HPC-Bearbeitung (High Performance Cutting) von der HSC-Bearbeitung (High Speed Cutting) ab [3]. Die im Vergleich zur HPC-Bearbeitung nochmals höheren Drehzahlen (bis zu  $n = 60.000 \text{ min}^{-1}$ ) und Schnittgeschwindigkeiten (bis zu  $v_c = 7.000 \text{ m/min}$ ) bei der HSC-Bearbeitung reduzieren zwar die auftretenden spezifischen Prozesskräfte, führen jedoch auch zu spin-

deleitigen Verlustleistungen und somit zu sinkendem Nutzleistungsanteil [3, 4, 5]. Ferner unterscheidet sich die HSC-Bearbeitung durch deutlich kleinere Zustellungen und einer daraus resultierenden höheren Anzahl an Fräsbahnen gegenüber der HPC-Bearbeitung. Die Abgrenzung zwischen der HSC- und HPC-Bearbeitung ist in Abbildung 3 zusammenfassend dargestellt.

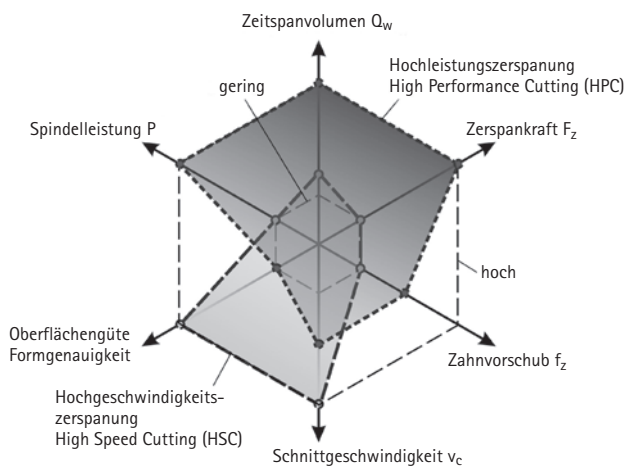


Abbildung 3: Abgrenzung zwischen HPC und HSC [3]

Das High Performance Cutting ist gekennzeichnet durch eine Maximierung des Zeitspanvolumens  $Q_w$ . Gefordert sind eine hohe radiale und axiale Zustellung  $a_e$  und  $a_p$  in Kombination mit hohen Zahnvorschüben  $f_z$  sowie gesteigerten Schnittgeschwindigkeiten  $v_c$ . Dies führt insgesamt zu maximalen Zeitspanvolumina (siehe Gl. 1) unter Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Spindelleistung

[3, 4]. Gegenüber der konventionellen Fräsbearbeitung kann das Zeitspanvolumen beim HPC-Prozess durch optimierte Prozesseinstellgrößen um 200 bis 500 % gesteigert werden. Diese Produktivitätssteigerung aufgrund der erhöhten Zeitspanvolumina senkt die Fertigungskosten um 10 bis 30 % [6].

$$Q_w = a_p \cdot a_e \cdot v_f = a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot z \cdot n = \frac{a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot z \cdot v_c}{\pi \cdot d}$$

Gl. 1

## Herausforderungen bei der HPC-Bearbeitung

Den begrenzenden Faktor bei der Volumenzerspanung von Aluminium-Strukturbauteilen stellt in den meisten Fällen nicht die Maß- und Formgenauigkeit oder die Oberflächenqualität dar, sondern die zur Verfügung stehende Antriebsleistung der Bearbeitungsmaschinen [4]. Aus den für die HPC-Bearbeitung charakteristischen hohen Prozesseinstellgrößen resultieren starke thermische und mechanische Werkzeugbelastungen, die vibrationsarme Werkzeugaufnahmen, optimierte Plattensitze und stabile Schneiden sowie leistungsstarke und steife Spindeln. Die hohen Zerspanraten erfordern aufgrund der großen Spanungsquerschnitte bei der Volumenzerspanung eine gesicherte Spanabfuhr. Diese wirkt Werkzeugbruch entgegen und stellt eine ausreichende Kühlmittelversorgung sicher. Die Gestaltung und Größe der Spanräume besitzt damit eine Schlüsselfunktion für eine deutliche Leistungssteigerung der Werkzeuge.

Neben der verfügbaren Antriebsleistung der Werkzeugmaschine wird die HPC-Bearbeitung durch die dynamische Stabilität des Prozesses begrenzt. Durch Schwin-

gunen der Maschinenstruktur und des Werkzeugs wird eine Welligkeit auf der Werkstückoberfläche erzeugt. Diese Welligkeit regt im nachfolgenden Schnitt des Werkzeugs aufgrund einer Modulation der Spanungsdicke das System zu weiteren Schwingungen an. Bei unzureichender Dämpfung des Systems werden diese Schwingungen verstärkt und können zum sogenannten regenerativen Rattern führen. Stabile Bereiche können durch Stabilitätskarten ermittelt werden, in denen die Stabilitätsgrenzen in Abhängigkeit der Schnitttiefe  $a_p$  und der Spindeldrehzahl  $n$  dargestellt werden (Abbildung 4). Ratterschwingungen treten hier erst beim Überschreiten einer kritischen Schnitttiefe  $a_{p,krit}$  auf, unterhalb derer ein Prozess stabil in allen Drehzahlbereichen arbeitet. Entspricht die Schwingfrequenz zwischen Werkzeug und Werkstück einem ganzzahligen Vielfachen der Zahnengriffsfrequenz des Werkzeugs, so tritt keine Spanungsdickenmodulation auf und es existieren auch oberhalb der kritischen Schnitttiefe  $a_{p,krit}$  stabile Bereiche [7].

Herausforderungen bei der HPC-Bearbeitung

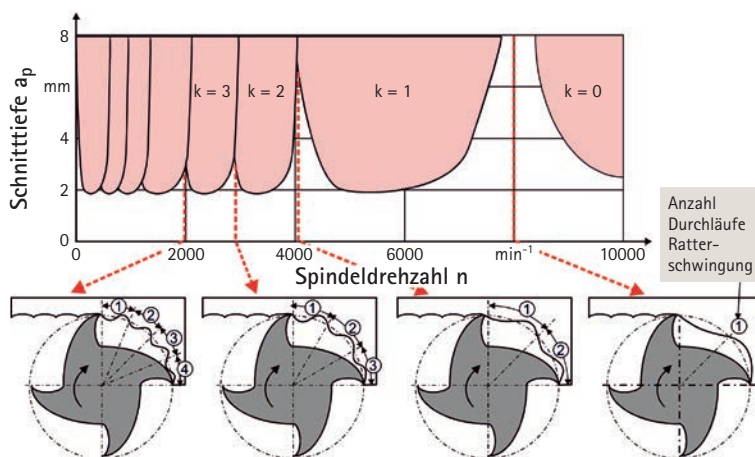


Abbildung 4: Stabilitätskarte beim Schaftfräsen [7]

Ein instabiler Prozess führt zu abnehmenden Bauteilqualitäten, erhöhtem Werkzeugverschleiß sowie Belastungen der Spindel und der Werkzeugaufnahme [7]. Möglichkeiten zur Verbesserung der Prozessdämpfung und somit zur Vermeidung des Ratterns bieten gefaste Werkzeuge. Freiflächenfasen mit geeigneten, prozessabhängigen Kombinationen aus Fasenlänge und Fasenwinkel erhöhen die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück, wodurch der Prozess gedämpft wird [8]. Darüber hinaus kann die Prozessstabilität durch eine Aufteilung des Spanquerschnitts durch Spanteiler oder Kordelprofile und die Ungleichteilung von Schaftfräswerkzeugen positiv beeinflusst werden. Im Vergleich zu gleichgeteilten Werkzeugen zeigen ungleichgeteilte und schrappverzahnte Schaftfräser in hohen Drehzahlenbereichen eine

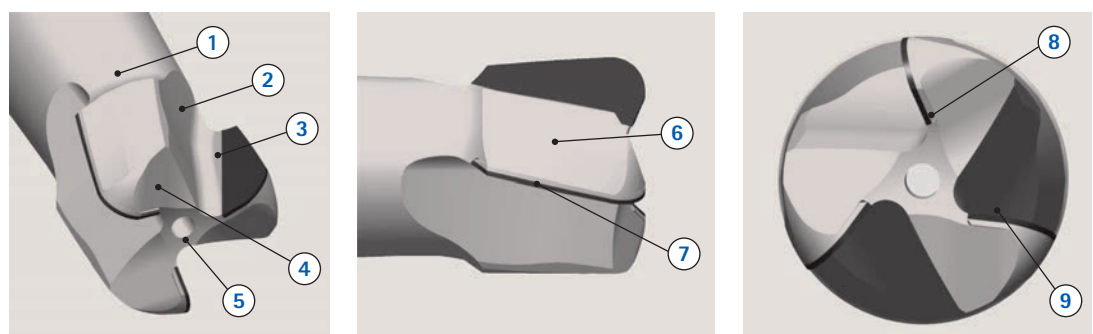
deutlich höhere Prozessstabilität [9]. Die Schrappverzahnung führt jedoch auch zu einer Reduzierung der sich im Eingriff befindlichen Schneidlänge, so dass lokal erhöhte Spanungsdicken zu Ausbrüchen der Werkzeugschneide führen können [10]. Die Schwingungsneigung des Werkzeugs kann zudem über eine Erhöhung des Zahnvorschubs  $f_z$  aufgrund einer hierdurch resultierenden höheren Verspannung des Systems reduziert werden [7]. Hohe Schnittgeschwindigkeiten verringern des Weiteren die Gratbildung bei der Fräsbearbeitung von Aluminium. Dies ist maßgeblich auf die kleineren Scherwinkel sowie die erhöhten Temperaturen und Dehnraten zurückzuführen [11]. Zudem kann über die Auswahl der Prozesseinstellgrößen die Gratbildung mit Schaftfräsern deutlich reduziert werden.

## Lösungen und Optimierungen bei der HPC-Bearbeitung von Aluminium

### Lösungen und Optimierungen bei der HPC-Bearbeitung von Aluminium

Zur Ausnutzung des vollen Potenzials der für die Volumenzerspänung von Aluminium eingesetzten Maschinen sind hierfür angepasste Werkzeuge erforderlich. Neben der Wahl des geeigneten Schneidstoffs sind Optimierungen der Werkzeugmakro- und -mikrogeometrie, des Plattensitzes, des Werkzeugkörpers, der Spanräume, der Werkzeugspannung und der Beschichtung erforderlich. Eine Erhöhung der Schneidenanzahl erhöht bei gleichbleibendem Zahnvorschub zwar das Zeitspanvolumen (siehe Gl. 1), reduziert jedoch den verfügbaren Spanraum pro Schneide. Zu kleine Spanräume infolge größerer Zähnezahlen führen zu einem erschwerten Spanabtransport. Weiterhin sollte bei der Gestaltung des Spanraums auf große, offene Kammern und das Vermeiden von den Spanfluss hemmenden Ecken und Kanten geachtet werden. Bei Drehzahlen von  $n = 30.000 \text{ min}^{-1}$  werden pro Schneide in der Sekunde 500 Späne erzeugt, so dass deren Abfuhr einen wichtigen Faktor hinsichtlich der Prozesssicherheit der eingesetzten Werkzeuge darstellt. Darüber hinaus wird durch einen gesicherten Spantransport ein Verkratzen der Bauteilwandungen verhindert. Die Zähnezahl beeinflusst zudem die Rundlaufgenauigkeit der Werkzeuge, da drei- und mehrschneidige Werkzeuge aufgrund der Symmetrie kein Deviationsmoment und im Vergleich zu zweiseidigen Werkzeugen meist größere Flächenmomente aufweisen. Verformungen treten so stets in beiden Raumrichtungen auf und fallen betragsmäßig geringer als bei Zweiseidern aus [14]. Diese Maximierung der Trägheitsmomente um die Hauptachsen der Werkzeuge kann die Stabilität des Fräsprozesses weiter erhöhen [14].

Als Schneidstoff für die Hochleistungsbearbeitung von Aluminium eignen sich Hartmetall und insbesondere polykristalliner Diamant (PKD). Als PKD-Schneidstoffe werden dabei Feinkorn-Sorten mit hoher Kantenstabilität eingesetzt. Ein optimales Einsatzverhalten zeigen PKD-Schafffräser mit positiven radialen Spanwinkeln von  $4^\circ$  an der Stirnseite und maximal  $20^\circ$  am Umfang der Werkzeuge sowie großen Achswinkeln (auch Drall- oder Neigungswinkel genannt). Die maximale Größe des Spanwinkels wird dabei durch die Stabilität des Schneidkeils begrenzt, da eine weitere Erhöhung des Spanwinkels zu kleinen Keilwinkeln und somit zu einer kritischen Schwächung des PKD-Schneidkeils führt. Die Biegesteifigkeit des Werkzeugs kann durch eine konische Ausföhrung des Schaftes (siehe Abbildung 6) mit einer Verjüngung und somit mehr Freiraum für die Spanabfuhr hinter den PKD-Schneiden („Bottleneck“, siehe Abbildung 5) erhöht werden. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Biegesteifigkeit bieten breite Schneidensitze zur Erhöhung des Trägheitsmoments des Werkzeugkörpers. Mit einfachen und glatten Formen der Spanräume und der Neben- und Hauptfreifläche sowie mit Plattensitzen ohne Überstand der PKD-Schneide kann eine Behinderung bei der Abfuhr der entstehenden Späne minimiert werden. Die Optimierungsmöglichkeiten von PKD-Fräsern sind in Abbildung 5 dargestellt.



- ① „Bottleneck“: Freiraum für Späne
- ② Optimierte Spanraumform
- ③ Eingebetteter PKD ohne Überstände
- ④ Einfache und glatte Form der Nebenfrefläche
- ⑤ Konkave Grundkörperform im Zentrum für beste Kühlmittelverteilung
- ⑥ Maximale Zahnrückbreite
- ⑦ Max. Achswinkel in Abhängigkeit vom radialen Spanwinkel
- ⑧ Optimierte Plattensitze
- ⑨ Radialer Spanwinkel von  $4^\circ$  (Stirn) bis max  $20^\circ$  (Umfang)

Abbildung 5: Optimierungen am PKD-Fräser; Quelle: MAPAL

Im Hartmetallbereich werden verschleißfeste Feinstkorn-Substrate eingesetzt, die aufgrund ihrer hohen Biegebruchfestigkeit robust gegenüber Vibrationen, Biegespannungen, Schlagbeanspruchungen und Schneidkantenausbrüchen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten sind. Auch hier führen konische Schäfte sowie Radien am Schaftübergang zur Verringerung der Kerbwirkung und zu höheren Steifigkeiten der Werkzeugkörper (Abbildung 6). Vorteil der Hartmetallwerkzeuge ist ein großer Drallwinkel  $> 40^\circ$ , aus dem ein sich überschneidender Ein- und Austritt aufeinander folgender Werkzeugschneiden

resultiert. Hierdurch können ein impulsartiger Übergang der auftretenden Prozesskraftschwankungen und hieraus resultierende Schwingungen vermieden werden. Die höchste Prozessstabilität wird beim axial gleichförmigen Fräsen erreicht [7]. Abgerundete Formen der Haupt- und Nebenfleiflächen verbessern bei Vollhartmetallfräsern (VHM-Fräser) ebenfalls die Spanabfuhr. Im Vergleich zu PKD-Werkzeugen kann bei VHM-Fräsern aufgrund der größeren geometrischen Freiheiten durch den Entfall von gelöteten Schneiden die Kühlung über die Nebenfleiflächen der einzelnen Zähne erfolgen.

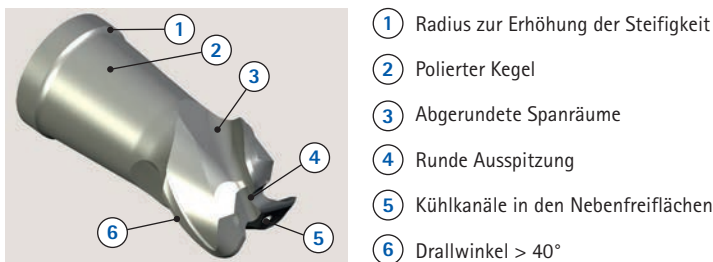


Abbildung 6: Optimierung am VHM-Fräser; Quelle: MAPAL

Spanleitstufen zur gezielten Beeinflussung der Spanform und der Spanablafrichtung können die Schnittkräfte und die Wärmeabgabe des Spans an den Werkzeugkörper weiter reduzieren. Zur Verringerung der Adhäsion bei der Aluminiumbearbeitung mit VHM-Fräsern werden die Oberflächenqualitäten der Werkzeuge durch Polieren und Beschichten erhöht. Für Hartmetallwerkzeuge können bei der Volumenzerspannung von Aluminium ebenfalls verschleißmindernde Beschichtungen eingesetzt werden. Insbesondere bei der Aluminiumbearbeitung haben sich hier wasserstofffreie amorphe Kohlenstoffschichten wie ta-C etabliert, die eine gute thermische Stabilität mit einer gleichzeitig hohen Verschleißfestigkeit aufgrund der hohen Härte vereinen.

Die HPC-Bearbeitung von Aluminium-Strukturbauteilen mit Schaftfräsern erfolgt überwiegend im Gleichlaufräsen. Hierdurch werden mögliche Hinterschneidungen aufgrund der beim Gegenlaufräsen nicht auszuschließenden Umkehr von Betrag und Richtung der Vorschubnormal-

kraft  $F_{FN}$  vermieden. Zudem muss beim Gegenlaufräsen die sogenannte Mindestspannungsdicke beim Werkzeugeintritt überwunden werden, die zu Beginn des Zahneingriffs eine sehr geringe Spannungsdicke zur Folge hat. Die hieraus resultierende Kaltverfestigung während der Werkstoffverdichtung erhöht im Vergleich zum Gleichlaufräsen die Zerspankräfte und den Verschleiß [12, 13].

Insbesondere bei dünnwandigen Strukturen führt die HPC-Bearbeitung zu Bauteilverzug aufgrund der eingebrachten Eigenspannungen, der durch die Bauteilspannung und die Prozessstrategie kompensiert werden kann. Hierdurch können Bauteilverzug, werkstückseitige Vibrationen und daraus resultierende Begrenzungen der Schnittparameter verringert werden. Aufgrund der hohen Komplexität ist eine analytische Berechnung der optimalen, bauteilspezifischen Bearbeitungsstrategie und Spannsituation bisher nicht möglich. Daher sind hier Erfahrungswerte oder ein Umspannen der Werkstücke erforderlich (Abbildung 7).

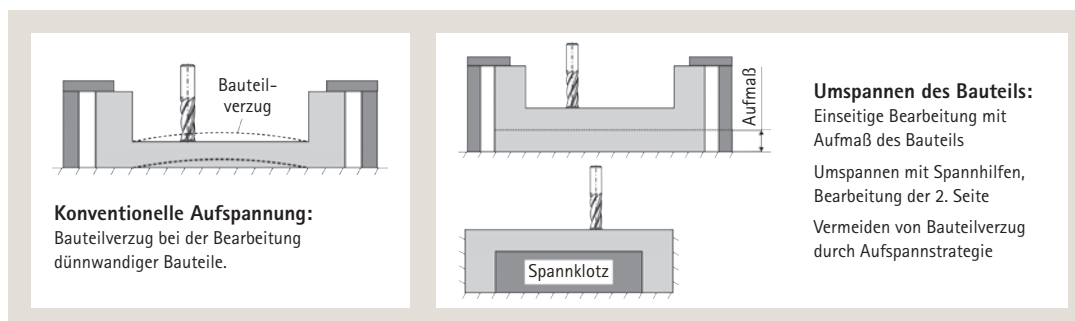


Abbildung 7: Optimierung der Aufspannung zur Vermeidung von Bauteilverzug

### Lösungen und Optimierungen bei der HPC-Bearbeitung von Aluminium

Des Weiteren kann eine Verminderung der ausnutzbaren Maschinenleistung aufgrund von Belastungsspitzen an der Spindel bei der HPC-Bearbeitung durch kreisbogenförmige Anschnitte und Austritte des Werkzeugs sowie durch ruckminimierte Achsbewegungen vermieden werden. Hierdurch werden stoßartige Belastungen der Werkzeugschneiden und der Werkzeugmaschine unterbunden. Aus den geringeren Belastungen resultiert zudem eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge [13].

Spannfutterkonzepte mit integrierter Dämpfung für Schaftwerkzeuge bieten weitere Möglichkeiten zur Verbesserung bei vibrationsanfälligen Prozessen wie der Fräsbearbeitung von dünnwandigen Aluminium-

Strukturbauteilen. Hierdurch kann auch bei sehr hohen Prozesseinstellgrößen eine stabile Bearbeitung gewährleistet werden. Die Anforderungen an das Spannfutter ergeben sich dabei aus dem Gesamtprozess. Insbesondere mit steigenden Temperaturen am Werkzeug verringert sich die Spannkraft von Schrumpffuttern (Abbildung 8) und es kann zu einem Herausziehen des Werkzeugs aufgrund von sinkenden Haltemomenten des Futters kommen. Eine hohe Thermoresistenz mit gleichbleibenden Rundlaufgenauigkeiten sowie hohen Wiederholgenauigkeiten und Wuchtgüten können die Prozesssicherheit und Leistungsfähigkeit bei der Volumenzerspannung steigern.

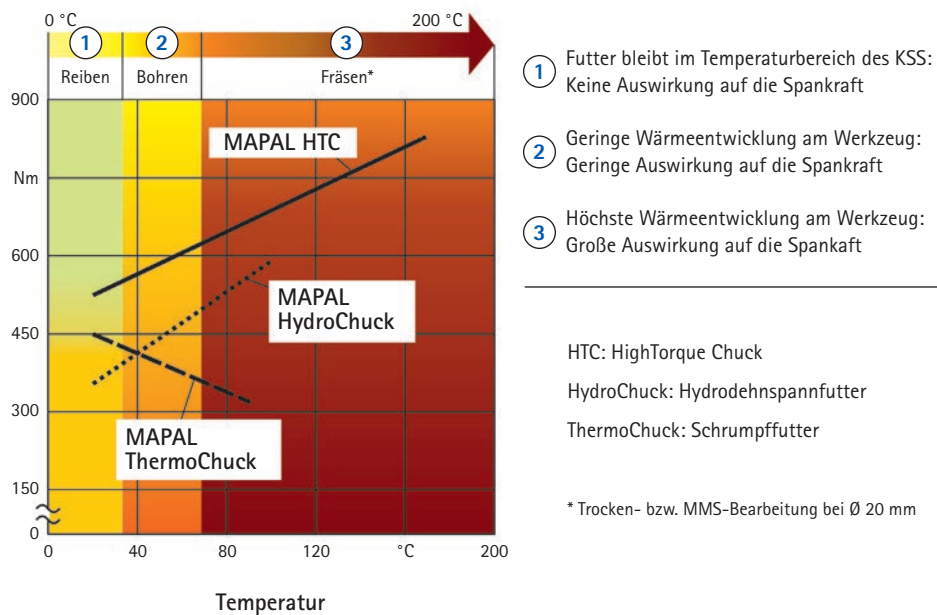


Abbildung 8: Spannfutterpotenzial; Quelle: MAPAL



# Ergebnisse

Das Volumenfräsen von Strukturbauteilen findet in der gesamten Luft- und Raumfahrtindustrie und in Teilen der Automobilindustrie insbesondere bei Aluminium- und Titanwerkstoffen sowie bei Stählen Anwendung. Begrenzt wird die HPC-Bearbeitung von Aluminium derzeit durch die Maschinenleistung und -dynamik sowie die Werkstückspannung und die Prozessstabilität. Bei der Bearbeitung von Titan sind Werkzeugmaschinen mit einem sehr hohen Drehmoment notwendig. Ist dieses ausreichend, sind derzeit die Werkzeuge prozesslimitierend. Aufgrund dieser Begrenzungen ist eine Steigerung des Zeitspanvolumens und der Produktivität von HPC-

Prozessen vom zu zerspanenden Bauteil abhängig. Durch bauteilspezifische Anpassungen der Werkzeuge und der Prozesseinstellgrößen kann die Ausnutzung der verfügbaren Maschinenleistung und somit das Zeitspanvolumen gesteigert werden. Hierfür sind gezielte, spezifische Auslegungen der Geometrie der Werkzeugschneiden und der Werkzeugaufnahme erforderlich. Die hierdurch mögliche Erhöhung der Schnittparameter bis an die Maschinenleistungsgrenze kann bei der Fertigung von Aluminium-Strukturbauteilen das Zeitspanvolumen von  $Q_w = 7,8$  l/min auf  $Q_w = 10,4$  l/min bei voller Funktionalität des Bauteils steigern (Abbildung 9).

Ergebnisse



| Werkzeug            | n [min <sup>-1</sup> ] | a <sub>p</sub> [mm] | a <sub>e</sub> [mm] | v <sub>f</sub> [mm/min] | f <sub>z</sub> [mm] | Q <sub>w</sub> [l/min] |   |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|---|
| PKD, Ø 32 mm, z = 3 | 18.000                 | 9                   | 32                  | 17.280                  | 0,32                | 7,8                    | ✓ |
| PKD, Ø 32 mm, z = 3 | 29.000                 | 12                  | 32                  | 21.750                  | 0,25                | 8,4                    | ✓ |
| PKD, Ø 32 mm, z = 3 | 29.000                 | 12                  | 32                  | 27.000                  | 0,32                | 10,4                   | ✓ |

Abbildung 9: Volumenzerspanung von Aluminium; Quelle: iStock, MAPAL

Bei der Volumenzerspanung von Aluminium werden Schaftfräser, Wechselkopffräser und gelötete Monolithwerkzeuge eingesetzt (Abbildung 10). Gemeinsames Merkmal ist die Fähigkeit der Werkzeuge über eine Rampe axial in das Werkstück einzutauchen. Abhängig von der Ausführungsart, dem Durchmesser und der Stei-

figkeit der Werkzeuge können Schnittgeschwindigkeiten von bis zu v<sub>c</sub> = 4.500 m/min und Zahnvorschübe bis zu f<sub>z</sub> = 0,42 mm erreicht werden. Die Schnittwerte beim Volumenfräsen mit hohen Zerspanungsraten orientieren sich dabei an der verfügbaren Spindelleistung der Bearbeitungsmaschine sowie dem zu zerspanenden Werkstoff.

OptiMill®-Diamond-SPM  
OptiMill®-SPM



CPMill®-Diamond-SPM  
CPMill®-SPM



OptiMill®-Diamond-SPM  
HSK-A63



| Werkzeug                      | v <sub>c, max</sub> [m/min] | f <sub>z, max</sub> [mm] | a <sub>p, max</sub> [mm] | a <sub>e, max</sub> [mm] |
|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| OptiMill®-Diamond-SPM         | 3.000*                      | 0,32*                    | 0,5 xD                   | D                        |
| OptiMill®-SPM                 | 2.250*                      | 0,36*                    | 0,5 xD                   | D                        |
| CPMill®-Diamond-SPM           | 1.450*                      | 0,28*                    | 0,5 xD                   | D                        |
| CPMill®-SPM                   | 1.450*                      | 0,30*                    | 0,5 xD                   | D                        |
| OptiMill®-Diamond-SPM HSK-A63 | 4.500*                      | 0,30*                    | 0,3 xD                   | D                        |

\* Maximalwerte abhängig von: Werkzeug-Ø, Schnitttiefe, Ausführungsart (kurz, lang)

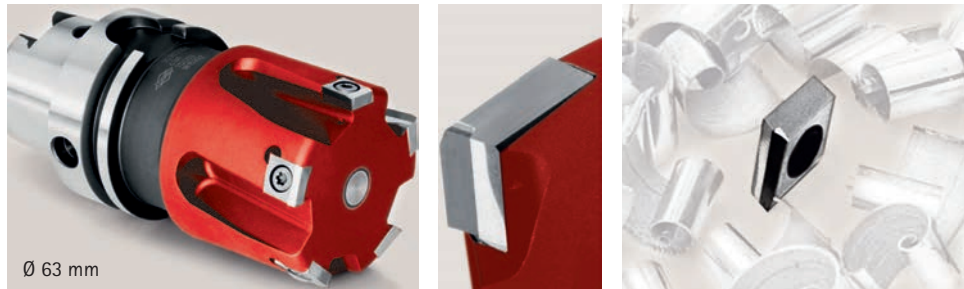
Abbildung 10: Werkzeuge für die Volumenzerspanung; Quelle: MAPAL

## Ergebnisse

Hohe Aufmaße bei der Volumenzerspanung erfordern zudem häufig ein Vorschruppen („Roughing“) der Bauteile mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und Schnitttiefen zum Annähern an die Bauteilendkontur. Die hierbei zu erreichenden Zeitspanvolumina stellen hohe Anforderungen an die Steifigkeit der Werkzeuge sowie an die Leistung der Spindel und der Antriebe der Bearbeitungs-

maschine. Bei diesen Schrupp-Prozessen können Messerköpfe mit PKD-Wendeschneidplatten mit positiven Spanwinkeln eingesetzt werden (Abbildung 11). Die positiven Spanwinkel führen zu einem guten Spanfluss bei geringen Zerspankräften, so dass die benötigte Antriebsleistung im Prozess reduziert werden kann.

### ISO-Messerkopf mit PKD-Wendeschneidplatten zum Vorschruppen von Aluminium-Strukturbauteilen



- Schnittgeschwindigkeit bis zu  $v_c = 3.000$  m/min  
- Hohe Fräsleistung aufgrund hoher Steifigkeit

- Schnitttiefen bis zu  $a_p = 12$  mm  
- Tangentialtechnologie

Abbildung 11: Werkzeug für die Schruppbearbeitung von Aluminium; Quelle: MAPAL

## Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Zunahme des Luftverkehrs in den kommenden Jahren bei gleichzeitiger Reduzierung der Emissionen und der Kosten erhöht die Anforderungen an eine effiziente Fertigung mit hoher Bauteilqualität. Hierzu eignen sich Strukturbauteile in Integralbauweise. Diese meist dünnwandigen Bauteile werden zu einem großen Teil aus Aluminium aus dem Vollen mit Zerspanraten bis 95 % gefräst. Die hierbei verwendeten PKD- und VHM-Werkzeuge zeichnen sich durch hohe Steifigkeiten aufgrund abgerundeter Übergänge am Werkzeugschaft zur Vermeidung von Kerbwirkung sowie großen Drall- und Achswinkeln aus. Große Spanräume mit abgerundeten Flächen führen zu einer gesicherten Spanabfuhr und gewährleisten somit die Prozesssicherheit. Regenerativen Ratterschwingungen bei der Aluminiumbearbeitung wird durch Freiflächenfasen und Ungleichteilungen der Werkzeuge entgegengewirkt.

Begrenzt wird die Volumenzerspannung von Aluminium von der heute zur Verfügung stehenden Maschinenleistung. Hier bieten bauteil- und prozessspezifische Optimierungen der Werkzeuge hohes Potenzial. Die hierdurch möglichen Steigerungen der Prozesseinstellgrößen ermöglichen eine effiziente und produktive Fertigung. Die verfügbaren Maschinenkapazitäten können so weiter

ausgenutzt werden. Hieraus werden bei der Bearbeitung von Aluminium-Strukturbauteilen insbesondere mit PKD-Werkzeugen sehr hohe Zeitspanvolumina von über 10 l/min ermöglicht. Die Verbesserung der Werkzeuge allein kann jedoch nicht das volle Potenzial der Volumenzerspannung mit größter Wirtschaftlichkeit erreichen, da bei der HPC-Bearbeitung das Gesamtsystem des Prozesses entscheidend ist. Werkzeugseitige Verbesserungen erfordern gleichzeitig die Optimierung und volle Nutzung des Potenzials der Werkzeugmaschine und ihrer Antriebe, der Spindel, der Werkzeugspannung, der Kühlmittelversorgung und -auswahl, der Bauteilspannung sowie der Prozessstrategie. Erst mit einer ganzheitlichen Betrachtung des Fertigungsprozesses bei der Volumenzerspannung können bestmögliche und wirtschaftliche Lösungen zur Produktivitätssteigerung erreicht werden.

Mögliche Steigerungen der Leistungsfähigkeit und Steifigkeit der Bearbeitungsmaschinen sowie die stetige Verbesserung der Schneidstoffe können in Zukunft die Produktivität bei der Volumenzerspannung von Aluminium weiter erhöhen. Zusätzliche Optimierungen der Spannung der Bauteile und der Werkzeuge können zudem die Prozessstabilität positiv beeinflussen und zu einer Steigerung des Zeitspanvolumens führen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Airbus Global Market Forecast 2007 - 2026, Airbus S.A.S, Dezember 2007
- [2] J. Leahy: Airbus Global Market Forecast 2015 - 2034.  
<http://www.airbus.com/company/market/forecast/>, 20.07.2015
- [3] H. K. Tönshoff, T. Friemuth, P. Andrae, R. Ben Amor: High-Speed or High-Performance Cutting - A Comparison of New Machining Technologies. Production Engineering Vol. VIII/1 (2002), S. 5-8
- [4] H. Tschätsch: Praxis der Zerspantechnik. 6. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2002
- [5] G. Zuber, U. Hänni: Hochleistungsspindeln machen das HSC-Fräsen produktiver. MM Maschinenmarkt online, 25.02.2008
- [6] E. Neugebauer: Im Wandel der Zeit. Werkzeuge, Juni 2008, S. 48 - 50
- [7] M. Groppe: Prozessauslegung für die Hochleistungsfräsbearbeitung von Aluminium-Strukturbauteilen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [8] V. Sellmeier, B. Denkena: High speed process damping in milling. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 5 (2012), S. 8 - 19
- [9] G. Stephan, J. Munoa, T. Insperger, M. Surico, D. Bachrathy, Z. Dombovari: Cylindrical milling tools: Comparative real case study for process stability. CIRP Annals - Manufacturing Technology 63 (2014), S. 385 - 388
- [10] B. Denkena, V. Sellmeier, T. Grove: Einfluss der Werkzeuggeometrie auf die Prozessstabilität beim Fräsen. Neue Fertigungstechnologien in der Luft- und Raumfahrt, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Hannover, 24.11.2009
- [11] U. Heisel, M. Schaal: Gratbildung beim Drehen mit Minimalmengenschmierung. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 98 (2008) S. 363 - 369
- [12] E. Pauksch, S. Holsten, M. Linß, F. Tikal: Zerspantechnik. 12. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden, 2008
- [13] F. Klocke, W. König: Fertigungsverfahren 1. 8. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2008
- [14] C. Kammer: Aluminium Taschenbuch 3. 17. Auflage, Beuth Verlag GmbH Berlin, 2014

Literaturverzeichnis

### Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

ist Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover.  
denkena@ifw.uni-hannover.de

### M.Sc. Björn Richter

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Zerspantechnik des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover.  
richter@ifw.uni-hannover.de

### Axel Fleischer

ist Senior Projektmanager bei der MAPAL Dr. Kress KG.  
axel.fleischer@de.mapal.com

## Impressum

### Herausgeber:

MAPAL Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG  
Postfach 1520 | 73405 Aalen  
Telefon 07361 585-0 | Telefax 07361 585-1029  
info@de.mapal.com | www.mapal.com

Verantwortlich für den Inhalt: Andreas Enzenbach  
© MAPAL Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG  
Nachdruck, auch auszugsweise, nur nach Genehmigung des Herausgebers.

Impressum



Bisher erschienen:

## TECHNOLOGIE REPORT

- 01 | Interpolationsdrehen
- 02 | Energieeffizienz
- 03 | Minimalmengenschmierung
- 04 | Trochoides Fräsen
- 05 | Thermische Spritzschichten
- 06 | Volumenfräsen