

Back to the Future?

Räumtechnologie im Kontext aktueller Forschung

C. Zachert, M. Gerneth, M. Meurer, T. Bergs

ZUSAMMENFASSUNG Die Räumbearbeitung ist die Schlüsseltechnologie zur Fertigung der sicherheitskritischen Verbindung zwischen Turbinenscheibe und Schaufel. Die Vorteile wie hohe Prozessstabilität, geometrische Genauigkeiten und Produktivität stehen den hohen Werkzeugkosten und der geringen Flexibilität als Nachteile der Technologie gegenüber. Optimierungen des Räumprozesses können werkzeugseitig über prozessspezifische Geometrien oder Werkzeugsubstrate erfolgen. Prozessseitig bietet der Einsatz von Prozessüberwachungssystemen sowie der Einsatz von maßgeschneidertem Räumöl weiteres Potenzial.

Broaching in the context of current research

ABSTRACT Broaching is a key technology for manufacturing the safety-critical connection between turbine disk and blade. While offering, for instance, high process stability, geometric accuracy and productivity, these advantages are offset by high tool costs and low flexibility. However, the broaching process can be optimized using process-specific geometries or tool substrates. Further potential lies in the use of process monitoring systems and customized broaching oil.

STICHWÖRTER

Entwicklung, Luft-/Raumfahrt, Fertigungstechnik

1 Einleitung

Das Räumverfahren wird aufgrund seines hohen Zeitspannvolumens sowie der hohen Geometriegeauigkeit für Anwendungen wie die formschlüssige Verbindung zwischen Turbinenschaufel und Turbinenscheibe eingesetzt. Allerdings birgt das Verfahren prozessbedingte Besonderheiten. So ist die Werkzeugauslegung, -herstellung und -bereitstellung aufwendig und kostenintensiv. Grund dafür ist, dass mit Ausnahme der Schnittgeschwindigkeit alle Prozessparameter durch die Werkzeuggeometrie festgelegt sind. Zudem ist ein Werkzeugprofil explizit für eine Werkstückgeometrie ausgelegt, sodass ein Umarbeiten im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit nicht praktikabel ist. Diese Faktoren erfordern eine gute Organisation von Nachschliff, Austausch und Bevorratung von Räumwerkzeugen, um die Ausfallzeiten zu minimieren. Des Weiteren sind im Anschluss an die Räumbearbeitung Entgratprozesse und eine Kantenverrundung erforderlich. [1]

Durch die aufwendige Werkzeugauslegung rentiert sich das Räumverfahren insbesondere in der Serienfertigung von Bauteilen mit hohen Anforderungen an Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität. Ein Beispiel für ein solches Produkt sind die Turbinenscheiben eines Flugzeugtriebwerks aus schwer zerspanbaren Nickelbasiswerkstoffen. Die Profilmuten werden mit Schneidstoffen aus HSS (Hochleistungsschnellarbeitsstahl) geräumt. Zur Erhöhung der Standzeit wird der Einsatz von Hartmetall als Schneidstoff untersucht, wobei dieser sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht in der industriellen Fertigung durchgesetzt hat. Die weite-

ren Hintergründe zu den Potenzialen und Herausforderungen neuartiger Schneidsubstrate werden im dritten Kapitel betrachtet.

Alternative Fertigungsverfahren zum Herstellen der Profilgeometrie sind sowohl das Fräsen als auch abtragende Fertigungsverfahren. Im Vergleich zum Räumen sind die Kosten pro Nut beim Fräsen etwa vier Mal so hoch, während die Produktivität deutlich geringer ist [2]. Weitere Nachteile sind eine geringe Werkzeugstandzeit sowie Geometriegeauigkeit [3]. Die Kosten pro Nut liegen für das Räumen mit HSS, das elektrochemische Abtragen, das Drahterodieren und das elektrochemische Drahtschneiden auf einem ähnlichen Niveau [1]. Auch wenn beim Drahterodieren die nötige Oberflächenrauheit für die Ansprüche in der Luftfahrt erreicht werden kann, ist die Rauheit im Vergleich zum Räumen höher [4]. Zum Erreichen dieser Rauheiten sind beim Drahterodieren drei Schnitte, bestehend aus einem Haupt- und zwei Nachschnitten nötig [5]. Die Linienabweichung über die Werkstückhöhe ist beim elektrochemischen Drahtschneiden signifikant [6].

Auch beim Räumen bestehen noch Optimierungspotenziale, auf die im Verlauf des Beitrags eingegangen wird. Zum einen in der Optimierung der Geometrie und der Wahl des Schneidsubstrates und zum anderen in der Prozessüberwachung und der Wahl des Räumöls. Die offenen Forschungsfelder bieten das Potenzial, die Räumbearbeitung auch für die nächsten Jahrzehnte als Schlüsseltechnologie zur Profilmutfertigung zu befähigen. Gegenüber alternativen Prozessrouten können so ökonomische und ökologische Vorteile geschaffen werden, sodass auch die Fertigung am Standort Deutschland langfristig gesichert ist.

In dieser Arbeit werden unterschiedliche aktuelle und zukünftige Entwicklungsrichtungen für die Räumtechnologie vorgestellt. Neben der kurzfristigen Optimierung des bestehenden Werkzeugkonzeptes durch Anpassung der Geometrie bieten neuartige Substrate wie Hartmetallwerkzeuge eine signifikante Erhöhung der Produktivität durch Steigerung der Schnittgeschwindigkeit. Eine Steigerung der Prozesssicherheit wird durch die Implementierung von Prozessüberwachungssystemen wie die indirekte Kraftmessung über das Motordrehmoment erzielt. So können während der Bearbeitung Informationen über den Werkzeugzustand ermittelt werden. Bei Schädigungen wird der Prozess gestoppt. Sollte das Werkzeug nach der berechneten Standzeit unterhalb der Verschleißmarkenbreite liegen, kann das Werkzeug möglicherweise erneut eingesetzt werden und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses gesteigert werden. Darüber hinaus bestehen weitere Stellgrößen wie die Eigenschaften des Räumöls zur Steigerung der Werkzeugstandzeit, die in zukünftigen Entwicklungen die Wirtschaftlichkeit der Räumtechnologie garantieren.

2 Optimierung der Werkzeuggeometrie

Als Ausgangspunkt zur Konstruktion von Räumwerkzeugen dient die Norm DIN 1416, welche die Gestaltung von Schneidzahn und Spankammer festlegt [7]. Bedingt durch die Funktionsweise des Räumverfahrens sind die Span- und Freiwinkel sowie die Schneidkantenverrundung und die Spanungsdicke durch die Werkzeuggeometrie festgelegt. Lediglich die Schnittgeschwindigkeit lässt sich nach der Fertigung des Räumwerkzeuges noch variieren. Die Optimierung der Werkzeuggeometrie ist somit elementar, um einen sicheren Prozess, eine hohe Oberflächengenauigkeit und Maßhaltigkeit zu gewährleisten. Auch die Minimierung des Verschleißes, sowie die Maximierung der Produktivität sind Ziele dieser Optimierung [8]. Infolgedessen wurden die Einflüsse der Werkzeuggeometrie auf den Räumprozess bereits vielfältig untersucht. Auch die Kombination aus Werkstoff und Werkzeugsubstrat ist für die Optimierung der Geometrie relevant.

Für das Räumen mit HSS-Werkzeugen untersuchte *Seelbach* die Einflüsse der Prozessparameter Spanwinkel, Freiwinkel, Spanungsdicke und Schnittgeschwindigkeit. Im Detail wurden die Auswirkungen auf die Schnitt- und die Schnittnormalkräfte sowie die elastischen thermischen und mechanischen Verformungen mit dem Ziel der Prädiktion der Maßhaltigkeit von Profilnuten betrachtet. Eine höhere Spanungsdicke korreliert mit höheren Schnittnormalkräften, die wiederum zu einer größeren elastischen Werkstückverformung führen. Dieser Effekt wurde mit fallendem Spanwinkel verstärkt. Im Hinblick auf die thermische Belastung während des Räumprozesses konnte eine steigende thermisch bedingte Werkstückverformung durch eine zunehmende Spanungsdicke, Zähnezah und Schnittgeschwindigkeit empirisch

belegt werden. Demgegenüber steht ein höheres Zeitspanvolumen durch größere Spanungsdicken und somit eine verbesserte Produktivität, sodass eine Balance zwischen Produktivität und Oberflächenmaßhaltigkeit gefunden werden muss. Außerdem wurden die Abdrängungen des Werkstücks durch den Ein- und Austritt der Schneiden untersucht, die sich auf die Ebenheit der geräumten Oberfläche auswirken. Diese Profilabweichung steigt mit fallendem Spanwinkel an. [9]

Für das Schrappen mit Hartmetallräumwerkzeugen identifizierte *Vogtel* Spannungswinkel und Werkzeugsubstrat als maßgebliche Faktoren für die Standzeioptimierung. Im Gegensatz zu Werkzeugen aus HSS zeigten seine Untersuchungen, dass ein negativer Spanwinkel zu bevorzugen ist. Für die Schlichtbearbeitung wurde die Schneidkantenverrundung als maßgeblicher geometrischer Faktor identifiziert, wobei mit sinkendem Radius eine Abnahme der Schnittkräfte und somit eine Verlängerung der Standzeit erreicht werden konnte. [10]

Die Spannungsdicke hat maßgeblichen Einfluss auf den Verschleiß und die Zerspankräfte [11]. Für das Räumen mit Hartmetallwerkzeugen stellte *Seimann* ein Gestaltungsmodell sowohl für den Schrapp- als auch den Schlichtprozess auf [12]. Durch den Einsatz dieses Modells kann das frühzeitige Ausbrechen von Schneidkanten im Räumprozess vermieden werden. Während beim Schlichten auch verschleißfestere Hartmetallsubstrate verwendet werden können, erfordern das Semischlichten und Schrappen den Einsatz von zäheren Hartmetallsubstraten [12].

Ein Modell zur mathematischen Optimierung der Geometrie häufig genutzter Innenräumwerkzeugen mit dem Ziel der Maximierung der Produktivität wurde von *Hosseini* aufgestellt [13]. Auch *Vogtel* entwickelte einen Algorithmus zum Werkzeugdesign für das Räumen von Nutprofilen. Ziel war die Maximierung der Spanungsdicke unter Einhaltung von Grenzen für die Schnittkräfte [14]. Während *Vogtel* sich auf die mechanische Belastung zur Optimierung beschränkte, verwendete *Özli* ein thermo-mechanisches Kraftmodell für das Räumwerkzeugdesign [15].

3 Neuartige Werkzeugsubstrate

Nach aktuellem Stand der Technik werden Räumwerkzeuge aus dem Schnellarbeitsstahl „Rex T15 PM“ gefertigt, siehe **Bild 1**, links [16].

Es handelt sich um eine Schrappwerkzeug mit 20 Zähnen und gerader Schneide. Das Substrat mit hoher Zähigkeit verhindert das Ausbrechen der Schneide, führt aber zu fortschreitendem abrasivem Verschleiß auf der Freifläche. Um die Warmhärte zu erhöhen, wird das Substrat thermisch behandelt. Aufgrund des HSS-Substrats ist die Schnittgeschwindigkeit begrenzt auf circa $v_c = 6 \text{ m/min}$, da eine höhere Schnittgeschwindigkeit zu erhöhter thermischer Belastung und somit zu verstärktem Verschleiß führt.

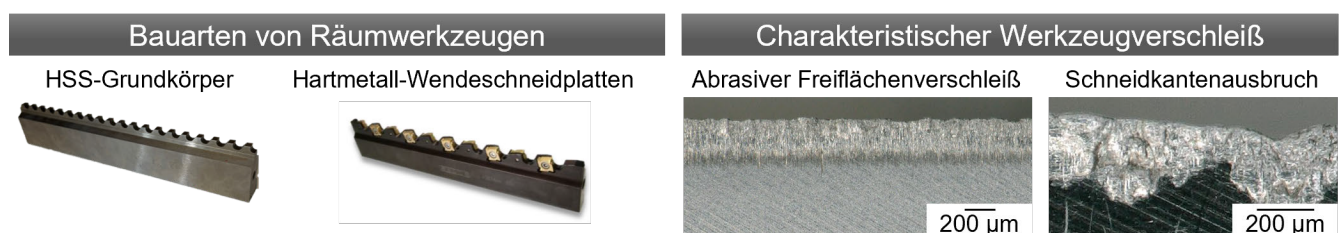


Bild 1 Übersicht über unterschiedliche Bauarten von Räumwerkzeugen sowie typischen Werkzeugverschleiß. Foto: HoFePro Abschlussbericht; MTI

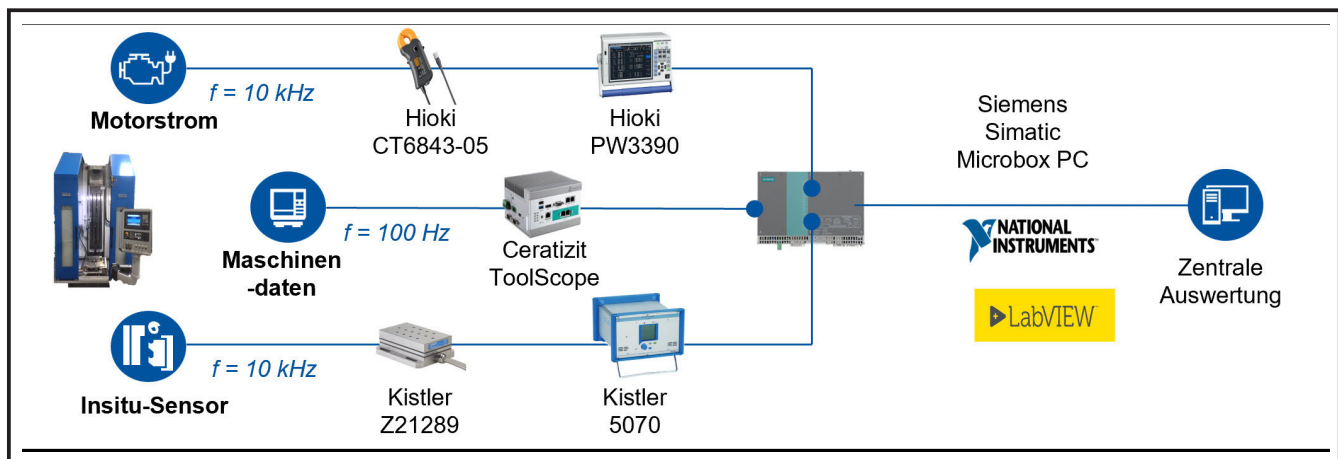


Bild 2 Prozessüberwachungssysteme zur Bewertung des Werkzeugverschleißzustandes. Grafik: MTI

ren würde [17]. Zukünftig können Veränderungen des Substrats sowie Optimierungen der thermischen Behandlung zu weiteren Standzeiterhöhungen führen. Eine Beschichtung des Werkzeugs zur Erhöhung der thermischen Beständigkeit ist aktuell nicht möglich, da die Schicht aufgrund der hohen mechanischen Belastungen bereits beim ersten Einsatz entfernt wird. Zudem muss die Beschichtung bei jedem Nachschleifprozess erneuert werden [18].

Im Gegensatz zu HSS-Werkzeugen ermöglichen Hartmetall-Werkzeuge Schnittgeschwindigkeiten von bis zu $v_c = 36 \text{ m/min}$ [10]. Je nach Prozess können die Hartmetall-Werkzeuge als Wendeschneidplatten auf einem Werkzeugträger, als Multi-Edge-Insert (MEI) in einem Trägerwerkzeug oder als Vollhartmetallwerkzeug ausgeführt werden (siehe Bild 1, links) mit 10 Wendeschneidplatten als Zähne. Insbesondere durch den Einsatz von Wendeschneidplatten-Werkzeugen wird das Nachschleifen der Werkzeuge durch das Wechseln der Wendeschneidplatten ersetzt. Je nach Bearbeitungsoperation werden die Wendeschneidplatten parallel zur Freifläche (Top Mounted) oder parallel zur Spanfläche (Side Mounted) eingesetzt. Ein Nachteil der Hartmetall-Werkzeuge sind stochastische Schneidenausbrüche, die über die Schneide verteilt auftreten (siehe Bild 1, rechts). Aufgrund der dadurch veränderten Werkzeuggeometrie und der freiwerdenden Hartmetallpartikel ist der Einsatz zur Fertigung von sicherheitskritischen Bauteilen nach aktuellem Stand der Technik nicht möglich. Eine Erhöhung der Zähigkeit und eine Anpassung der Werkzeuggeometrie könnten die Ausbrüche verhindern [19].

In Arbeiten von Seimann wurde hierzu bereits der Einfluss der Eckengeometrie untersucht. Als Ergebnis wurde ein prädiktives Gestaltungsmodell entwickelt, das die Auslegung von Hartmetall-Werkzeugen vereinfacht. Zudem wurden Hartmetalle mit unterschiedlichen Zähigkeiten untersucht. Diese beeinflussen maßgeblich die Auftretswahrscheinlichkeit und den Zeitpunkt der Ausbrüche. Für den zukünftigen Einzug in die Serienfertigung sind zum aktuellen Stand der Technik weitere Untersuchungen zur Wahl von Substrat und Werkzeuggeometrie nötig. Zudem müssen die Wirkmechanismen der stochastisch auftretenden Schneidkantenausbrüche identifiziert und verhindert werden. [12]

Langfristig kann die Substitution von HSS-Werkzeugen durch Hartmetall-Werkzeuge bei gleichzeitiger Steigerung der Schnittgeschwindigkeit zu einer um 300 % höheren Produktivität führen und somit die Wirtschaftlichkeit der Räumbearbeitung weiter

erhöhen. Kurzfristig ermöglichen Prozessüberwachungssysteme einen prozesssicheren Einsatz von Hartmetall-Werkzeugen.

4 Prozessüberwachung

Bei anderen Zerspanprozessen mit geometrisch bestimmter Schneide, wie Bohren, Drehen oder Fräsen, sind Prozessüberwachungssysteme bereits Standard in der industriellen Anwendung. Sowohl Werkzeugverschleiß als auch Prozessinformationen wie die Geometriegenauigkeit durch Werkzeugabdrängung oder die Oberflächenrauheit während der Bearbeitung können prozesssicher überwacht werden [20]. Dadurch ist es möglich, den Prozess zu stoppen und Fehlteile zu verhindern. Man unterscheidet zwischen direkten und indirekten Prozessüberwachungssystemen [21]. Direkte Systeme überwachen die betrachtete Größe unmittelbar, beispielsweise die Zerspankraft. Indirekte Systeme messen eine Hilfsgröße und können dann mithilfe von Prozesswissen auf die relevante Größe schließen. Ein Beispiel ist der Motorstrom, der bei zunehmender Belastung durch Werkzeugverschleiß ebenfalls ansteigt [22].

In den Forschungsarbeiten kamen sowohl indirekte als auch direkte Prozessüberwachungssysteme zum Einsatz. Die direkte Kraftmessung erfolgte über eine piezoelektrische Kraftmessplattform, die sich direkt unterhalb des Teiltisches befand. So konnten alle Kräfte, die durch den Zerspanprozess auf das Bauteil wirken, dreidimensional und hochauflösend ($f = 10 \text{ kHz}$) erfasst werden. Aufgrund der hohen Kosten und der Reduzierung der Steifigkeit durch die Funktion der Kraftmessplattform ist ein Einsatz in der Serienfertigung jedoch ausgeschlossen. Dennoch wird die direkte Kraftmessung zu Forschungszwecken als Referenz zur Einordnung der indirekten Kraftgrößen genutzt [23]. Zur indirekten Kraftmessung werden das Drehmoment beziehungsweise der Motorstrom gemessen. Bei einem Gleichstrommotor besteht ein linearer Zusammenhang zwischen diesen Größen. In vorgelagerten Forschungsarbeiten wurde ein Zusammenhang zwischen Zerspankraft und Drehmoment sowie zwischen Werkzeugverschleiß und Drehmoment hergeleitet [24]. Wie in Bild 2 dargestellt, kann das Drehmoment über maschineninterne Daten mit einem Toolscope-System ausgelesen werden [25].

Alternativ kann der Motorstrom direkt im Schaltschrank gemessen und umgerechnet werden. Der Vorteil der direkten Messung mittels Hall-Sensorik ist die erhöhte Abtastrate von

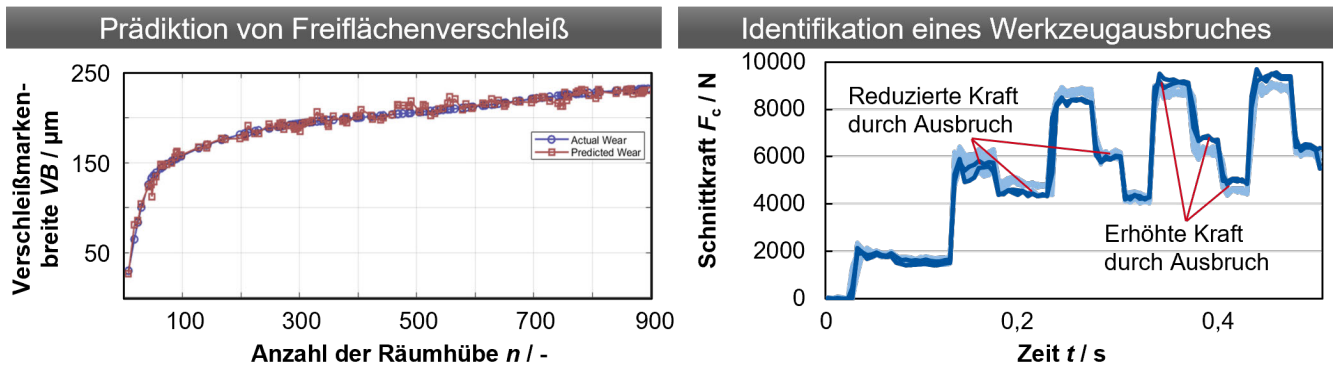


Bild 3 Bewertung des Werkzeugzustandes durch indirekte Prozessüberwachungssysteme. Grafik: MTI

$f = 10 \text{ kHz}$. Dadurch können Abweichungen im Prozess detailliert betrachtet werden.

Der aktuelle Stand der Forschung ermöglicht die Vorhersage des Freiflächenverschleißes anhand des Drehmoments (**Bild 3**).

Hierzu wurden auf Basis empirischer Untersuchungen zur Verschleißkurve eines Räumwerkzeugs Verschleißaufnahmen mit einem digitalen Auflichtmikroskop erstellt. Zusätzlich wurden für jeden Hub die Prozessdaten erfasst. Mithilfe einer nachgelagerten Datenaufbereitung und Feature-Extraktion konnte ein Machine-Learning-Modell trainiert werden, das den Werkzeugverschleiß mit einem neuen Datensatz und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99098$ berechnet hat.

Trotz der bereits hohen Genauigkeit kann diese durch eine Erweiterung der Trainingsdaten um weitere Geometrievariationen sowie prozess- und maschinenbedingte Schwankungen weiter erhöht werden. Ein weiteres Beispiel für Prozessüberwachung ist die Dokumentation von Werkzeugausbrüchen. Da eine optische Überwachung der Werkzeugschneiden aufgrund von Räumöl und Spananhaftungen zum aktuellen Stand der Technik nicht prozesssicher möglich ist, wurde eine indirekte Verschleißmessung über die Kraft durchgeführt. In diesem Fall stellt jede Messung die Referenz zur nachfolgenden Messung. Somit können Prozessabweichungen außerhalb der prozessbedingten Schwankungen nach einem Hub identifiziert und der Prozess gestoppt werden. Wie in Bild 3, rechts, zu sehen, kam es bei Schneide 2 und Schneide 3 zu Ausbrüchen, die sich in einer reduzierten Kraft widerspiegeln. Dies ist durch die reduzierte lokale Spannungsdicke im Bereich des Ausbruchs zu erklären. Die darauffolgende Schneide wies eine erhöhte Kraft auf, da hier eine erhöhte lokale Spannungsdicke auftrat. Durch diese Detektion können Ausbrüche zwar nicht verhindert werden, der Prozess kann aber beim Austreten gestoppt werden. Das Werkstück und das Werkzeug können gewechselt werden, wodurch weiterer Ausschuss vermieden wird. Zusätzlich erfolgt durch die angewandten Prozessüberwachungssysteme eine fortlaufende Dokumentation der Prozessparameter. Dies führt im Bereich der Luftfahrt zu einer durchgängigen Transparenz der Prozessroute.

5 Räumöl und weiteres Optimierungspotenzial

Neben der Variation des Werkzeugsubstrats und dem Einsatz von Prozessüberwachungssystemen zur Steigerung der Prozesssicherheit gibt es weitere Stellschrauben, um die Werkzeugstandzeit in der Räumbearbeitung zu erhöhen und somit die Wirt-

schaftlichkeit zu steigern. Ein Beispiel ist die Optimierung des eingesetzten Räumöls [26]. Aufgrund der notwendigen Zertifizierung bedeutet jede Prozessumstellung einen hohen wirtschaftlichen Aufwand. Untersuchungen haben das Potenzial gezeigt, durch den Einsatz maßgeschneiderten Räumöls die Werkzeugstandzeit zu erhöhen und die Zerspankraft zu reduzieren. Konkret wurden neben dem aktuell häufig eingesetzten Öl „Castrol Variocut B9“ als Referenz jeweils ein Räumöl mit erhöhter und ein Räumöl mit reduzierter Viskosität eingesetzt [27]. Zusätzlich wurden die Additive Phosphor und Schwefel eingesetzt. **Bild 4**, links, zeigt die Entwicklung der Verschleißmarkenbreite über die Werkzeugeinsatzdauer von $t_c = 20 \text{ m}$ bei der Zerspanung des Werkstoffs „Inconel 718 DA“.

Deutlich zu sehen ist die reduzierte Verschleißmarkenbreite bei zunehmender Viskosität im Vergleich zur Referenz. Eine Erhöhung der Phosphor- und Schwefelanteile führte zu keiner signifikanten Verbesserung der Verschleißentwicklung. Parallel zum Werkzeugverschleiß wurden die Schnitt- und Schnittnormalkraft gemessen. In Bild 4, rechts, sind die Schnitt- und Schnittnormalkraft beim letzten Hub mit dem Referenzöl und dem Räumöl mit erhöhter Viskosität dargestellt. Analog zum Freiflächenverschleiß ergab die Erhöhung der Viskosität eine Reduzierung der Zerspankraft. Eine anschließende Signifikanzanalyse zur Bewertung aller Werkzeugschneiden ergab eine Verbesserung in Form einer Reduzierung des Werkzeugverschleißes um 11 % durch die erhöhte Viskosität im Vergleich zum Referenzöl. Durch weitere Untersuchungen von prozessspezifischen Additiven und Viskositätsanpassungen ist eine Steigerung dieses Ergebnisses nicht ausgeschlossen.

Neben der Optimierung der Räumölspezifikation gibt es zahlreiche weitere Möglichkeiten, um die Werkzeugstandzeit zu erhöhen. Grundlage hierfür ist ein umfassendes Prozessverständnis, das detaillierte Informationen über die thermischen und mechanischen Einflüsse im Prozess liefert. Durch die mangelnde Zugänglichkeit im realen Prozess ist eine thermografische Untersuchung nur mit einseitig gebundenem Schnitt im Rahmen eines Analogieversuchs möglich. Zudem führt das eingesetzte Räumöl aufgrund von Reflexion zu Messabweichungen. Grund ist neben der starken Reflexion durch die glatte Öloberfläche auch die Veränderung des Brechungsindex. Dies führt zu Fehlsignalen und Positionsfehlern am Sensor. Alternativ zu empirischen Untersuchungen kann der Prozess analog zu Dreh- oder Fräsprozessen modelliert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Prozessparameterbereiche in der Schnittgeschwindigkeit ist eine Übertragbarkeit jedoch nicht gegeben. Daher müssen in zukünftigen Untersuchungen

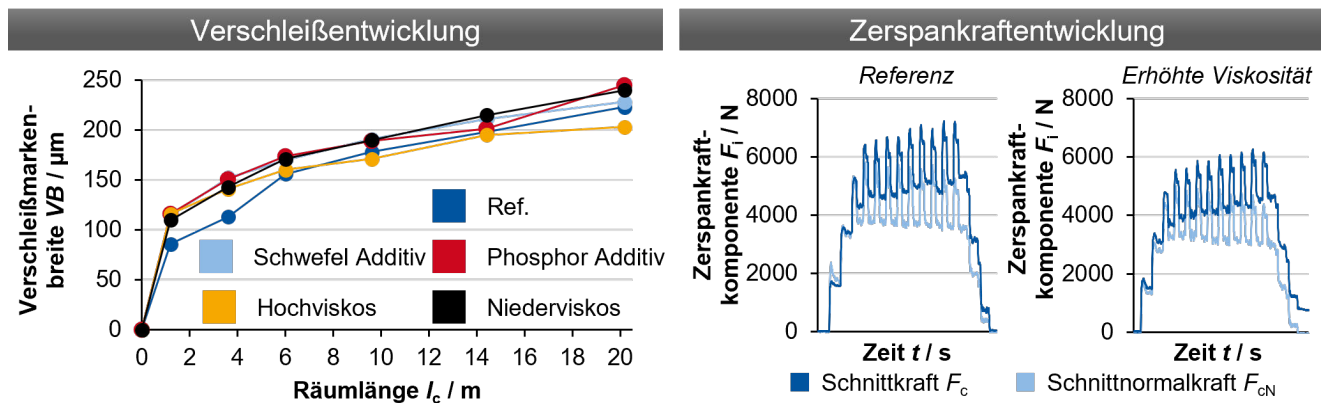


Bild 4 Einfluss der Räumleigenschaften auf den Werkzeugverschleiß und die Zerspankraft. Grafik: [26], MTI

Modelle in Kombination mit empirischen Untersuchungen entwickelt werden. Mit diesem Grundlagenwissen kann der Prozess weiter optimiert und die Werkzeugstandzeit erhöht werden.

6 Fazit und zukünftige Herausforderungen

Abschließend ist zu sagen, dass das Räumverfahren für sicherheitskritische Bauteile mit hohen Anforderungen an die Geometrie- und Randzoneigenschaften prädestiniert und somit für die Serienfertigung Stand der Technik ist. Im Bereich der Geometrie wurden bereits durch ausführliche Forschung sowohl für das Räumen mit HSS- als auch mit Hartmetall-Werkzeugen große Fortschritte in der Optimierung zur Steigerung der Produktivität und Garantie der Prozesssicherheit unter Einhaltung der Randbedingungen gemacht. Nach aktuellem Stand der Technik ist die Verwendung von Hartmetall als Schneidsubstrat aufgrund von stochastischen Ausbrüchen der Schneidkante noch nicht prozesssicher in der Fertigung von sicherheitskritischen Bauteilen einsetzbar. Die bis dato erfolgte Forschung konzentrierte sich auf die Optimierung der Geometrie und die Wahl des Hartmetallsubstrates zur prozesssicheren Anwendung der Technik, ist jedoch noch nicht am Ziel. Der aktuelle Stand der Forschung bei der Prozessüberwachung im Räumen erlaubt die Vorhersage des Freiflächenverschleißes anhand des Maschinendrehmoments und ermöglicht zudem das automatische Stoppen des Prozesses, etwa bei Ausbrüchen der Schneidkante, aufgrund der dabei auftretenden Veränderungen im Kraftsignal. Auch die Wahl des richtigen Räumöls kann den Werkzeugverschleiß um bis zu 11 % reduzieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Bereich der Räumbearbeitung bereits umfangreiche Forschung zur Prozessoptimierung und Produktivitätssteigerung vorliegt. Für die Serienfertigung ist das Räumverfahren die aktuelle Schlüsseltechnologie. Durch kontinuierliche Forschung vor allem in Bezug auf die Verwendung von Hartmetall als Schneidsubstrat, was eine Produktivitätssteigerung um bis zu 300 % ermöglicht, kann in Zukunft die Produktivität dieses Verfahrens weiter gesteigert und der Vorsprung gegenüber konkurrierenden Technologien der Fertigung erhalten und sogar ausgebaut werden. Dies ist auch in Bezug auf die immer weiter steigende Priorisierung von Nachhaltigkeit von Vorteil, da eine höhere Produktivität zu einem höheren Output bei gleichbleibendem Einsatz von Ressourcen führt.

Damit sich diese Prognose erfüllt, gilt es die Herausforderung der stochastischen Schneidkantenausbrüche von Hartmetallwerkzeugen zu lösen. Die größten Nachteile des Räumens bleiben die

hohen Investitionen, zum einen für die Werkzeugmaschine und zum anderen für die Werkzeuge, sowie die geringe Flexibilität beim Einsatz eines Werkzeugs, da dieses für eine Geometrie jeweils spezifisch gefertigt wird. Zudem wachsen auch in der Fertigung im Zuge der Nachhaltigkeit die Herausforderungen durch die hohen Anforderungen an immer filigraner werdende Geometrien. Daraus leitet sich ein Bedarf an kontinuierlicher Optimierung des Fertigungsprozesses ab, um die Konkurrenzfähigkeit vom Räumen im Vergleich mit alternativen Fertigungsverfahren zu erhalten. Die bisher erzielten Fortschritte in der Verschleißerkennung und die weiteren zu erwartenden Verbesserungen in diesem Bereich erlauben eine Maximierung der Werkzeugstandzeit und dementsprechend eine Steigerung von Produktivität und Nachhaltigkeit.

LITERATUR

- [1] Bergs, T.; Klocke, F.: *Fertigungsverfahren 3*. Heidelberg: Springer 2025, doi.org/10.1007/978-3-662-69390-2
- [2] Klocke, F.; Seimann, M.; Binder, M. et al.: Assessment of Different Technology Chains for Fir Tree Manufacturing: A Case Study. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Volume 6 (2018), doi.org/10.1115/GT2018-75190
- [3] Jianhua, Y.; Xun, L.; Wenshuo, Z. et al.: A Brief Review on the Status of Machining Technology of Fir-Tree slots on Aero-Engine Turbine Disk. *Advances in Mechanical Engineering* 14 (2022) 7, doi.org/10.1177/16878132221113420
- [4] Welling, D.: Results of Surface Integrity and Fatigue Study of Wire-EDM Compared to Broaching and Grinding for Demanding Jet Engine Components Made of Inconel 718. *Procedia CIRP* 13 (2014), pp. 339–344, doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.057
- [5] Welling, D.: *Wire EDM for the Manufacture of Fir Tree Slots in Nickel-Based Alloys for Jet Engine Components*. Aachen: Apprimus Verlag 2015
- [6] Herrig, T.; Oßwald, K.; Lochmahr, I. et al.: Geometrical Analysis of Wire Electrochemical Machining for the Manufacture of Turbine Disc Slots. *Procedia CIRP* 95 (2020), pp. 694–699, doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.163
- [7] Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 1416: :1971–11. *Räumwerkzeuge*. Berlin: Beuth Verlag 1971
- [8] Özelkan, E. C.; Öztürk, Ö.; Budak, E.: Optimization of Broaching Design. *Proceedings of the 2007 Industrial Engineering Research Conference*, 2007
- [9] Seelbach, T. M.: *Prädiktion der Maßhaltigkeit beim Räumen von Profilen*. Dissertation, RWTH Aachen University, 2023
- [10] Vogtel, P.: *Außenräumen von Nickelbasislegierungen mit Hartmetall-Werkzeugen*. Dissertation, RWTH Aachen University, 2015
- [11] Pöhls, M.: *Untersuchungen zum Räumen mit Feinstkornhartmetall und Cermet*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1999

- [12] Seimann, M.: Prädiktive Werkzeug- und Prozessauslegung für das Räumen von Nickelbasislegierungen mit Hartmetallwerkzeugen. Dissertation, RWTH Aachen University, 2019
- [13] Hosseini, A.; Kishawy, H. A.: On the Optimized Design of Broaching Tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 136 (2014) 1, doi.org/10.1115/1.4025415
- [14] Vogtel, P.; Klocke, F.; Lung, D. et al.: Automatic Broaching Tool Design by Technological and Geometrical Optimization. *Procedia CIRP* 33 (2015), pp. 496–501, doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.061
- [15] Özlü, E.; Ebrahimi Araghi, A.; Budak, E.: Broaching Tool Design Through Force Modelling and Process Simulation. *CIRP Annals* 69 (2020) 1, pp. 53–56, doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.035
- [16] Zapp Materials Engineering GmbH: Datenblatt Z-T15 PM. Stand: 2020. Internet: www.zapp.com/fileadmin/_documents/Downloads/materials/powder_metallurgic_tooling_steel/zapp/de/Z-T15%20PM_Datenblatt.pdf. Zugriff am 03.09.2025
- [17] Lang, H.: Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [18] Ni, J.; Tong, K.; Meng, Z.; Feng, K.: Force Model for Complex Profile Tool in Broaching Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 119 (2022), pp. 1153–1165, doi.org/10.1007/s00170-021-08329-z
- [19] Seimann, M.: Hochleistungsverfahren für die Herstellung von Profilmuten. Apprimus Verlag 2018
- [20] Tönshoff, H. K.; Inasaki, I.: *Sensors in Manufacturing*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH 2001
- [21] Aslan, D.; Altintas, Y.: Prediction of Cutting Forces in Five-Axis Milling Using Feed Drive Current Measurements. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 23 (2018) 2, pp. 833–844, doi.org/10.1109/TMECH.2018.2804859
- [22] Teti, R.; Jemielniak, K.; O'Donnell, G. O.; Dornfeld, D.: Advanced Monitoring of Machining Operations. *CIRP Annals* 59 (2010) 2, pp. 717–739, doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.010
- [23] Klocke, F.; Adams, O.; Auerbach, T. et al.: New Concepts of Force Measurement Systems for Specific Machining Processes in Aeronautic Industry. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9 (2015), pp. 31–38, , doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.01.006
- [24] Miura, K.; Seelbach, T.; Augspurger, T. et al.: Voltage- and Current-Measurement Based Force Estimation in Broaching Using Synchronous Motor Drive. *MIC Procedia* (2020), dx.doi.org/10.2139/ssrn.3724102
- [25] Ceratizit Group: Volle Prozesskontrolle mit ToolScope. Internet: cuttingtools.ceratizit.com/de/de/werkzeugloesungen/toolscope.htm. Zugriff am 04.09.2025
- [26] Zachert, C.; Meurer, M.; Bergs, T.: Influence of Broaching Oil Properties on the Tool Wear During Roughing Process. *MIC Procedia* (2025), doi.org/10.2139/ssrn.5147419
- [27] Castrol Limited: Product Data Variocut B9. Stand: 2022. Internet: [msdspds.castrol.com/bpglis/FusionPDS.nsf/Files/1CE7E96E2AC5DF85802587C0003A74D9/\\$File/wepp-c9v889.pdf](http://msdspds.castrol.com/bpglis/FusionPDS.nsf/Files/1CE7E96E2AC5DF85802587C0003A74D9/$File/wepp-c9v889.pdf). Zugriff am 04.09.2025

Christoph Zachert, M.Sc. 
c.zachert@mti.rwth-aachen.de

Moritz Gerneth, M.Sc.

Dr.-Ing. Markus Meurer 

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs 

Manufacturing Technology Institute MTI
der RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
www.mti.rwth-aachen.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)