

HYBRIDE BEARBEITUNGSPROZESSE IN DER ZERSPANUNGSTECHNIK



SCHWINGUNGSÜBERLAGERTE BEARBEITUNG

Hybride Bearbeitungsverfahren

Prinzip	Prozessvarianten	Anwendungsmotivation
Schwingungsüberlagerte Bearbeitung	Bohren	Verbesserung des Spanbruchs
	Drehen	
	Schleifen	Verbesserung Qualität, Produktivität
	EDM	
Medienüberlagerte Bearbeitung	ECM	Verbesserung des Spanbruchs
	Hochdruck-	
	Kühlung	Erhöhung des Zeitspanvolumens
	Kryogene	
Achsenüberlagerte Bearbeitung	Kühlung	Dynamikerhöhung im Werkzeug- und Formenbau
	Scherenkinematik	
	Unrundbearbeitung durch adaptives Formhonen und Formbohren	Verbesserung der Betriebseigenschaften von Motoren

Die Herausforderungen an die Zerspanspannungstechnik steigen, nicht zuletzt durch die Verwendung neuer, hochfester Werkstoffe. Mithilfe hybrider Prozesse lassen sich durch die Kombination zusätzlicher Energieformen in konventionelle, bereits existierende Bearbeitungsabläufe bestehende technologische Verfahrensgrenzen verschieben. In der obigen Übersicht zu hybriden Verfahren sind die in dieser Broschüre vorgestellten Prozesse hervorgehoben.

Eine Möglichkeit der schwingungsüberlagerten Zerspanspannung ist die Anregung des Werkzeugs mit Ultraschallschwingungen sowohl in axialer (Longitudinalschwingungen) als auch

- 1 *Werkzeugaufnahme mit integriertem Piezoaktor*
- 2 *Präzise elektrochemische Bearbeitung*

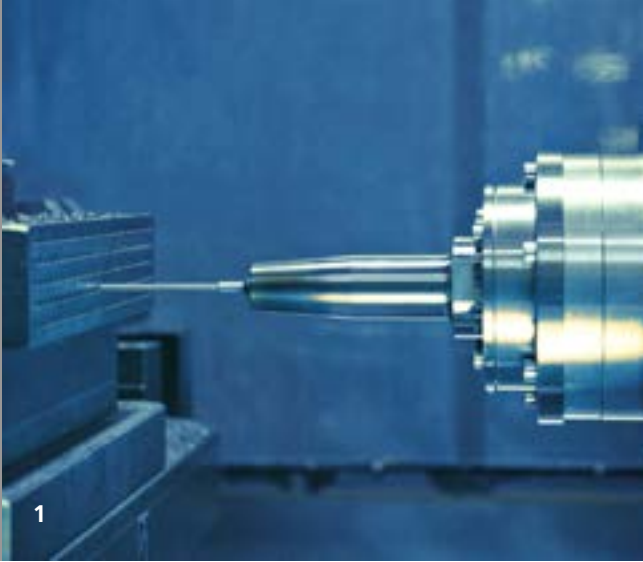
in Umfangsrichtung (Torsionsschwingungen). Neben eigenentwickelten Aktoren kommen am Fraunhofer IWU auch kommerziell erhältliche Schwingungsaktoren auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum zum Einsatz.

Ziel der Ultraschallüberlagerung sind bei Verfahren mit geometrisch bestimmter und unbestimmter Werkzeugschneide die Verbesserung der Spanbildung und -abfuhr und damit eine Steigerung der Prozesssicherheit und Produktivität. Eine Erhöhung der Qualität und Produktivität lässt sich mit der elektrochemischen Präzisionsbearbeitung erreichen.

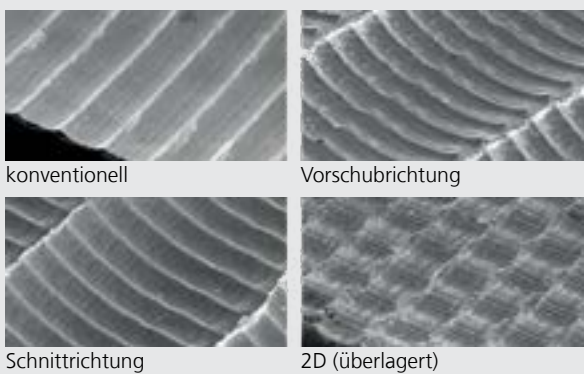
Ultraschallunterstütztes Bohren

Bei der Herstellung tiefer Bohrungen treten mit zunehmender Bohrtiefe immer wieder Probleme hinsichtlich langer, schlecht brechender Späne auf, die zu einer hohen Werkzeugbeanspruchung und einer geringen Prozesssicherheit führen. Die Überlagerung von Ultraschallschwingungen beim Tieflochbohren auch unter den erschwerten Bedingungen einer Minimalmengenschmierung ermöglicht einen verbesserten Prozessablauf. Neben nachweislich kürzeren Spänen und einem daraus resultierenden leichteren Abtransport der Späne aus tiefen Bohrungen werden geringere Bearbeitungskräfte benötigt sowie höhere Zeitspanvolumina und größere Werkzeugstandzeiten erreicht. Wird der Tieflochbohrer mithilfe von Piezoaktoren angeregt, werden an der Werkzeugschneide Schwingungsamplituden im Mikrometerbereich mit Arbeitsfrequenzen zwischen 20 und 30 kHz erzeugt. Insbesondere bei der Bearbeitung von höherfesten und schwer spanbaren Werkstoffen, wie sie derzeit verstärkt Anwendung finden, kann dieses Verfahren effektiv eingesetzt werden.

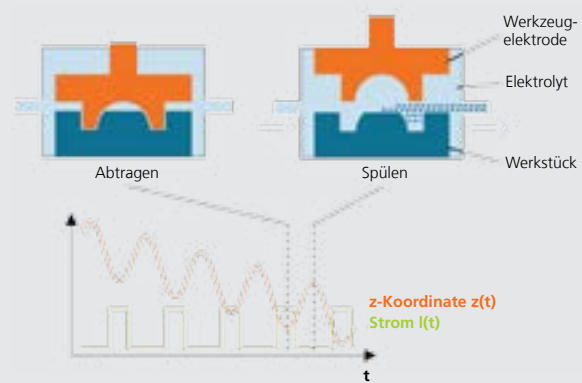
Die zielgerichtete Weiterentwicklung und Optimierung der Aktortechnik hinsichtlich Schwingungsrichtung und erreichbarer Schwingungsamplituden sowie eine auf die jeweilige Bearbeitungsaufgabe abgestimmte Verfahrensentwicklung bieten weitere Potenziale.



Strukturen auf der Werkstückoberfläche



Prinzip des elektrochemischen Abtragens



Ultraschallunterstütztes Drehen

Beim Drehen ist die Überlagerung des Zerspanungsprozesses mit Ultraschallschwingungen in verschiedene Richtungen möglich. Das Werkzeug kann sowohl in Vorschub- als auch in Schnittrichtung zum Schwingen angeregt werden. Auch eine Kombination beider Schwingrichtungen ist realisierbar. Dabei entstehen neben kurz gebrochenen Spänen charakteristische Strukturen auf der Werkstückoberfläche. Über technologische Parameter, wie Schwingfrequenz, Schwingamplitude, Schnittgeschwindigkeit und Vorschub, werden diese gezielt eingestellt. Ohne einen zusätzlichen Prozessschritt kann somit das tribologische Verhalten durch gezielte Veränderung der Oberflächenstruktur beeinflusst werden.

Elektrochemische Präzisionsbearbeitung

Steigende Anforderungen an Präzision, zunehmende Materialvielfalt und der Anspruch, wirtschaftliche und gleichzeitig ressourceneffiziente Verfahren zu entwickeln, sind aktuelle Herausforderungen in der Fertigung von Metallbauteilen. Das elektrochemische Abtragen (Electrochemical Machining, ECM) erfüllt diese Anforderungen.

Beim elektrochemischen Abtragen wird ein anodisch gepoltes Werkstück in einem elektrisch leitenden Medium (Elektrolyt) aufgelöst. Das präzise elektrochemische Abtragen (PECM) ist ein hybrides Fertigungsverfahren mit Schwingungsüberlagerung und stellt eine Weiterentwicklung des elektrochemischen Senkens dar. Dabei wird der Einsenkbewegung der Werkzeugelektrode eine mechanische Oszillation überlagert, die mit den Strompulsen der Spannungsquelle synchronisiert ist. Dies ermöglicht eine deutlich verbesserte Lokalisierung des Abtrags und damit eine Steigerung der Präzision im Vergleich zum konventionellen elektrochemischen Senken. Es sind Oberflächenrauheiten bis $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ und Einsenkgeschwindigkeiten bis 1 mm/min erreichbar.

Da die Werkzeugelektrode keinem prozessbedingten Verschleiß unterliegt, wird PECM für die Serienfertigung von Metallbauteilen eingesetzt. Mechanische Eigenschaften des Werkstoffs, wie Härte und Zähigkeit, haben keinen Einfluss auf den Abtragprozess. PECM eignet sich deshalb besonders für die Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffen, zum Beispiel Nickelbasislegierungen im Flugzeugturbinenbau. Weitere Anwendungsgebiete sind der Werkzeugbau und die Medizintechnik.

MEDIENÜBERLAGERTE BEARBEITUNG

Hochdruckkühlung

Beim Ein- und Abstechen, aber auch bei weiteren Drehprozessen sowie beim Bohren von langspanenden Werkstoffen werden zunehmend hohe Drücke angewendet. Der Einsatz einer Hochdruckkühlung zielt auf eine Verbesserung des Spanbruchverhaltens und der Kühlung in der Bearbeitungszone ab.

Die gebräuchlichste Anwendung der Hochdruckkühlung ist die direkte Zufuhr des Kühlschmierstoffstrahls zwischen Span und Spanfläche des Werkzeugs. Die Hochdruck-Spanflächen-spülung bringt zwei entscheidende Vorteile mit sich – einen verbesserten Spanbruch und höhere Bearbeitungsparameter.

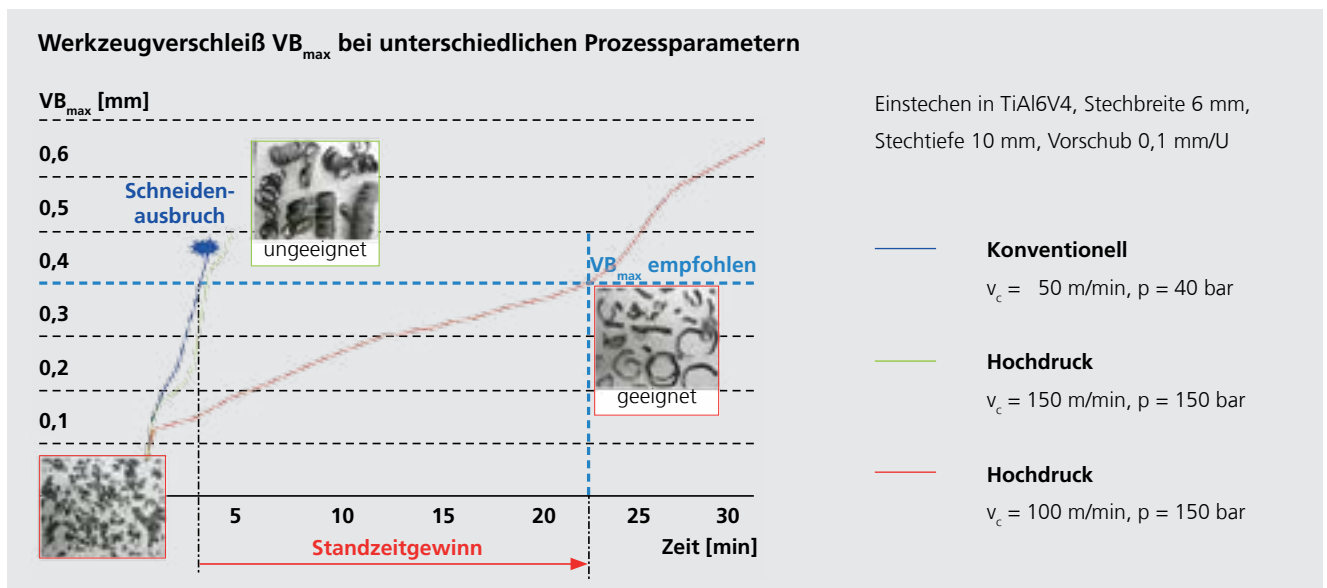
Durch den Druck, den der Kühlschmierstoff auf den Span ausübt, wird der Spankrümmungsradius verkleinert. Bei Überschreiten der Bruchdehnung bricht der Span in kleine Stücke. So lassen sich die Späne aus der Wirkzone leicht entfernen. Eine Beschädigung der Schneide und der erzeugten Werkstückoberfläche durch lange, unkontrollierte Späne kann somit vermieden werden und eine Fertigung der Bauteile prozesssicher und ohne kostspielige Unterbrechungen erfolgen. Der

Hochdruckstrahl wirkt ergänzend zur Schneidengeometrie als zusätzlicher Spanbrecher. Zudem kommt es zu einer Verkürzung der Kontaktlänge zwischen Werkzeugschneide und Span, was zu einer Verringerung der Zerspankräfte sowie der thermischen Werkzeugbelastung führt.

Alternativ kann der Hochdruckstrahl auch zwischen die Werkzeugfreifläche und die bereits bearbeitete Werkstückoberfläche gerichtet werden. Das Kühlmittel erreicht die Schneidkante wesentlich besser, kann das Werkzeug intensiver kühlen und sorgt so für einen reduzierten Freiflächenverschleiß. Diese Variante hat eher einen Kühlungseffekt als Einfluss auf den Spanbruch.

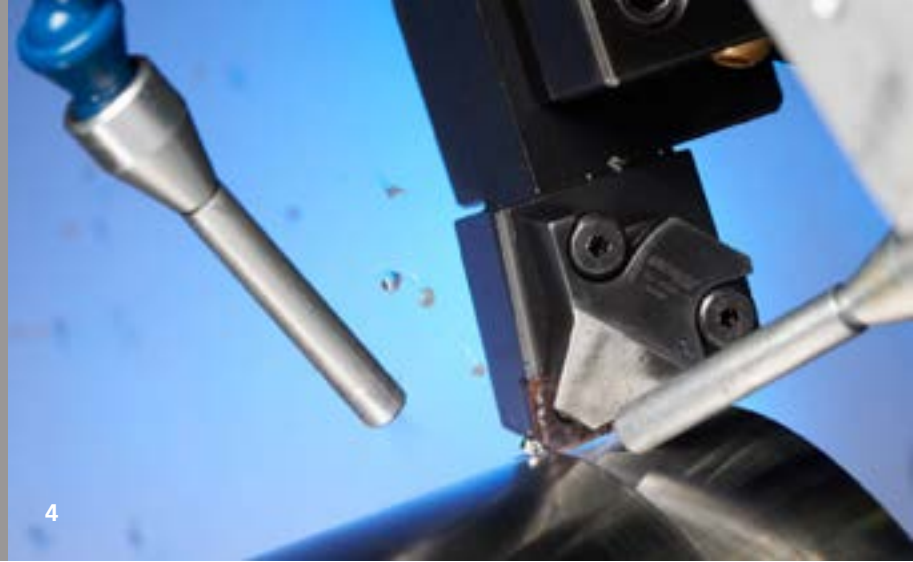
Die gezielte Einbringung von Kühlschmierstoff unter hohem Druck erbringt nachweislich folgende Effekte:

- verbesserter Spanbruch und Spankontrolle
- erhöhte Schnittgeschwindigkeiten und Zeitspanvolumina
- deutlich erhöhte Werkzeugstandzeiten (um Faktor 7)
- drastische Verkürzung der Bearbeitungszeiten
- höhere Produktivität





3



4

Die Steigerung der Produktivität bewirkt Einsparungen beim Energiebedarf. Einen wesentlichen Kostenfaktor stellen dabei die Grundlast der Werkzeugmaschine und die Bereitstellung des Kühlschmiermittels unter Hochdruck dar. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeiten durch den Einsatz einer Hochdruckkühlung und somit eine Steigerung des Zeitspanvolumens ermöglichen die Senkung des spezifischen Energiebedarfs, d.h. des Verhältnisses von eingesetzter Energie zu abgespanntem Werkstoffvolumen.

Mithilfe der Strömungssimulation können die Anordnung und Form der Austrittsdüsen optimiert und die Erkenntnisse bei der Lösung individueller Problemstellungen berücksichtigt werden.

Kryogene Kühlung

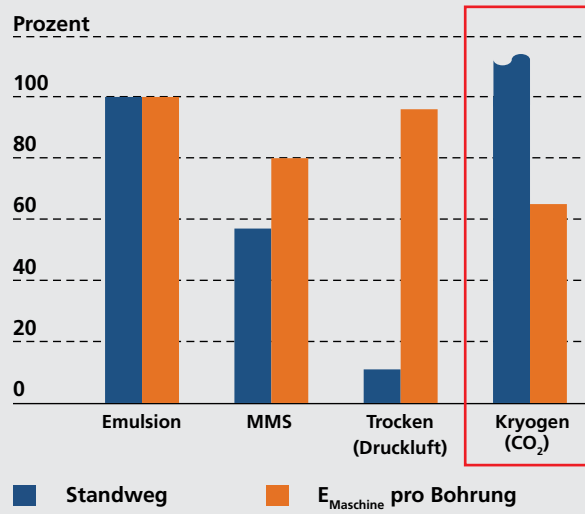
Eine Alternative zur Hochdruckkühlung bietet die Prozesskühlung mit kryogenen Medien, wie flüssigem Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid. Die kryogene Prozesskühlung kombiniert die Vorteile der Trockenbearbeitung mit einer ausreichenden Werkzeugkühlung. Verfahrenspotenziale der kryogenen Kühlung sind:

- gezielte Kühlung der Prozesszone
- reduzierter thermisch bedingter Werkzeugverschleiß
- rückstandsfreie Kühlung und damit Möglichkeit der Trockenbearbeitung
- Einsatz produktiverer technologischer Parameter und damit Steigerung des Zeitspanvolumens
- Einsparung gesundheits- und umweltschädlicher Kühlschmierstoffe

Bei der Kühlung mit flüssigem Kohlenstoffdioxid (CO_2) werden dessen thermodynamische Eigenschaften bei unterschiedlichen Druckverhältnissen genutzt. Das unter Druck stehende flüssige CO_2 wird bei Raumtemperatur bis an die Kühlkanalöffnung des Werkzeugs gebracht. Erst beim Austritt aus dem Werkzeug kommt es infolge des Druckabfalls zu einer Expansion verbunden mit einer Phasenumwandlung zu festem und gasförmigem Kohlenstoffdioxid. Dabei kühlt das Medium

Standweg und Energiebedarf beim Bohren

($Q = 2,03 \text{ cm}^3/\text{s}$, EN-GJL 250)



auf bis zu $-78 \text{ }^\circ\text{C}$ ab. Anschließend sublimiert der feste Anteil rückstandsfrei. Aufgrund dieser Eigenschaften lässt sich die kryogene Kühlung mit CO_2 relativ unkompliziert in bestehende Systeme integrieren.

Im Fokus der Forschungsarbeiten am Fraunhofer IWU stehen:

- Untersuchung des Wärmeübergangs in der Schnittzone
- Entwicklung geeigneter Werkzeuge
- Verfahrensentwicklung
- Ermittlung des Einflusses auf Maschinenkomponenten und deren Adaption
- Strömungsuntersuchungen auf einem Spindelversuchsstand
- Entwicklung ganzheitlicher Sicherheitskonzepte
- Integration von Schmiermedien in den kryogenen Kühlprozess
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

3 Einsatz der kryogenen Kühlung beim Fräsen von Umformwerkzeugen

4 Aerosol-Trockenschmierung mit CO_2 -Kühlung beim Drehen

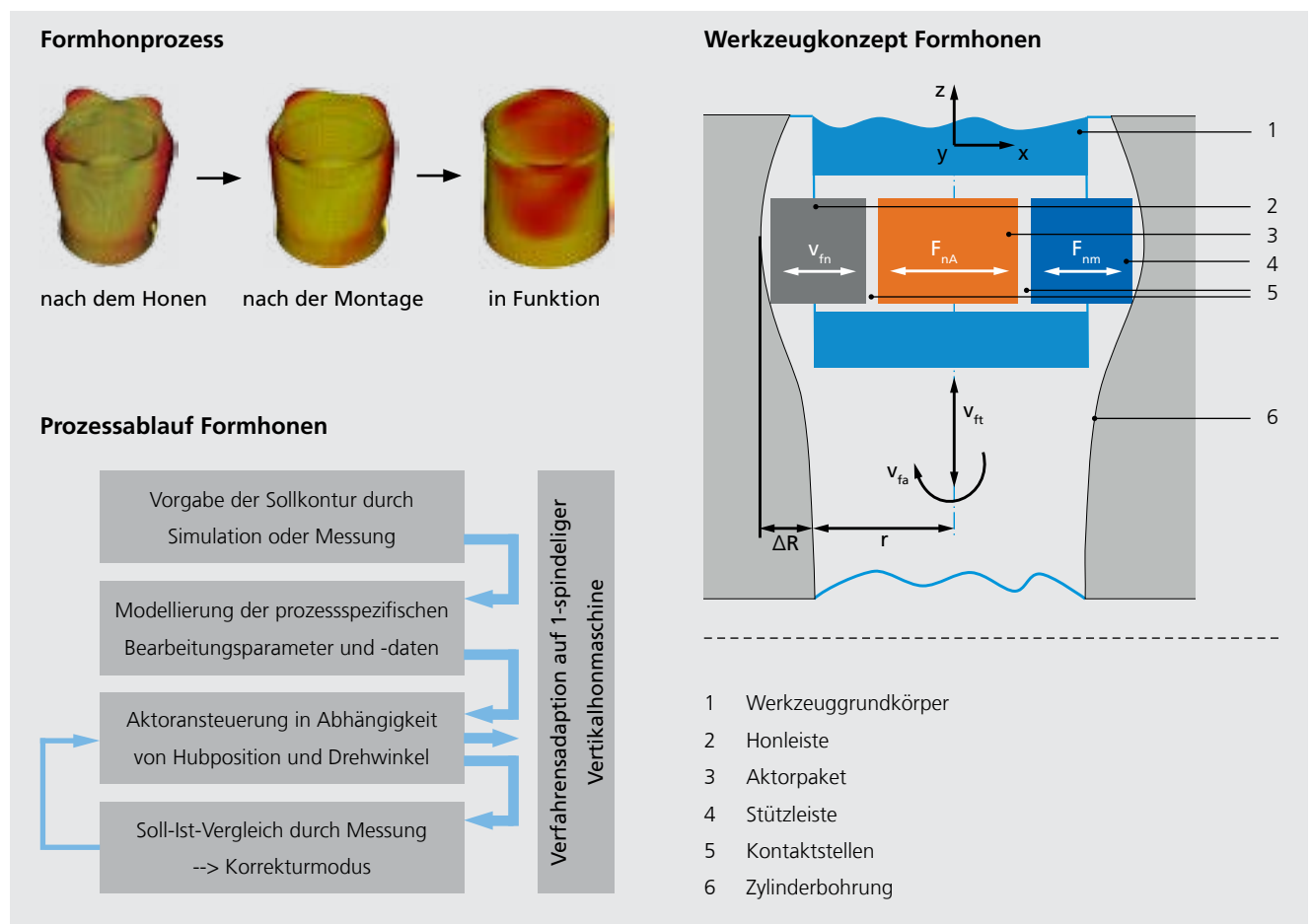
ACHSÜBERLAGERTE BEARBEITUNG

Die achsüberlagerte Bearbeitung ist ein verfahrenstechnischer Ansatz, um sowohl fertigungs- als auch funktionsbedingte Bohrungsverzüge durch präventive Unrundbearbeitung zu kompensieren. Bei Verbrennungsmotoren haben Zylinderformabweichungen entscheidenden Einfluss auf das tribologische System Kolben, Kolbenring und Zylinderlaufbahn. Der Reibungsanteil der Kolbengruppe kann ca. die Hälfte der gesamten Motorreibung betragen. Damit kommt der Reibungsreduzierung in diesem Bereich eine besondere Bedeutung zu. Die am Fraunhofer IWU entwickelten adaptronischen Fertigungsverfahren basieren auf einer einachsigen Bewegung beim Formhonen und mehrachsigen Bewegungen beim

Formbohren. Die ganzheitliche Verfahrensentwicklung umfasst Maschine, Werkzeug, Prozess und Messtechnik.

Formhonen

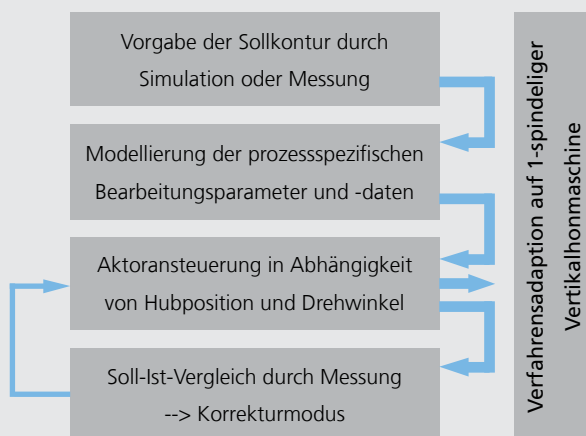
Das entwickelte adaptronische Formhonwerkzeug verfügt über einen Werkzeuggrundkörper mit adaptronischen Schneidgruppen, bestehend aus Piezoaktoren, Stützleiste und Schneidleiste. Durch die Auslenkung der Aktoren in Abhängigkeit von Hubposition und Drehwinkel erfolgt die Zustellung der Schneiden. Die Richtung der Aktorbewegung und Schneidenzustellung ist identisch und gewährleistet höchste Dynamik und minimale



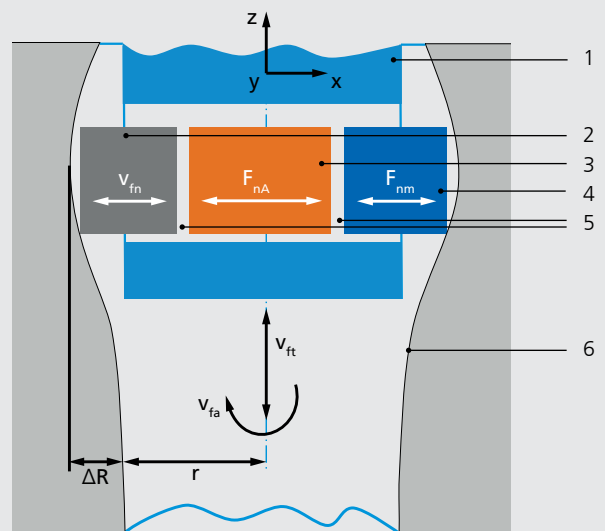
Formhonprozess



Prozessablauf Formhonen



Werkzeugkonzept Formhonen



- 1 Werkzeuggrundkörper
- 2 Honleiste
- 3 Aktorpaket
- 4 Stützleiste
- 5 Kontaktstellen
- 6 Zylinderbohrung



Übertragungsverluste. Der Prozessablauf erfolgt bearbeitungs- gesteuert über eine modellhafte Beschreibung der zu fertigen- den Form und der Zerspanverhältnisse. Die Kontrolle des Bear- beitungsergebnisses durch eine Formmessung dient sowohl der Bestimmung der Bearbeitungsqualität als auch der Ausgabe einer Korrekturmatrix zur Prozessregelung. Realisiert ist das Form- honen durch Adaption der systemrelevanten Hard- und Software auf einer konventionellen einspindeligen Vertikalhonmaschine.

Das Werkzeug bietet die Freiheitsgrade zum Erzeugen radialer Formabweichungen von bis zu 30 μm bezogen auf einen Boh- rungsdurchmesser von 81 mm. Im Bereich konstanter Eingriffs- bedingungen wurden Formgenauigkeiten von $\leq \pm 2 \mu\text{m}$ bei den geforderten Rauheitskennwerten erreicht. Unter Labor- bedingungen konnte nachgewiesen werden, dass sich durch Nutzung des maximalen Aktorikpotenzials die geforderte Produktivität für eine Serienfertigung darstellen lässt.

Formbohren

Beim Formbohren wird mithilfe einer adaptiven Spindelhalte- rung im Gegensatz zu herkömmlichen Bearbeitungsmaschinen die Motorspindel von einem Festkörpergelenk aufgenommen, mit dem zwei rotatorische Freiheitsgrade realisiert werden. Das Festkörpergelenk liegt im Kraftfluss von acht Piezoaktoren, mit denen die Verkippung der Spindel und damit eine Auslenkung der Werkzeugschneide erfolgt.

Die präventive Unrundbearbeitung von Zylinderlaufflächen erfordert eine mehrfache radiale Schneidenauslenkung pro Werkzeugumdrehung von bis zu 50 μm bei Drehzahlen bis zu 6 000 U/min. Dabei bestehen die technologischen Heraus- forderungen in der Beherrschung der auslenkungsbedingten unterschiedlichen Schneideneingriffsverhältnisse sowie der Entwicklung von frequenz- und drehzahlabhängigen An- steuerungskonzepten.

Unser Dienstleistungsangebot

Prozesskettenentwicklung

- Marktanalyse
- Prozesskettenuntersuchung
- Prozessoptimierung
- Kosten-Nutzen-Rechnung
- Entwicklung von Fertigungskonzepten
- Grob- und Feinplanung technologischer Verfahren
- Technologische Dimensionierung von Bearbeitungs- maschinen
- Empfehlungen zu Maschineninvestitionen

Entwicklung und Bewertung von Bearbeitungs- strategien

- Marktanalyse
- Machbarkeitsstudie
- Technologieentwicklung
- Erarbeitung von Verfahrenskennwerten
- Erarbeitung optimaler Bearbeitungsstrategien
- Benchmarking von CAD/CAM-Systemen

Qualitätssicherung

- Photogrammetrische Geometrieerfassung von Bauteilen und Werkzeugen
- Vermessen von Mikrobauteilen durch konfokale Mikroskopie und Streifenprojektion
- Maschinenvermessung durch Laser-Tracker
- Strukturanalyse mit Rasterelektronenmikroskop

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz

Telefon +49 371 5397-0
Fax +49 371 5397-1404
info@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

Abteilung Zerspanungstechnologie

Dipl.-Ing. Carsten Hochmuth
Telefon +49 371 5397-1811
Fax +49 371 5397-6-1811
carsten.hochmuth@iwu.fraunhofer.de

Titelbild: Fräswerkzeug mit innerer
CO₂-Schneestrahls-Kühlschmierung

© Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU 2021