
Potenziale hybrider Zerspanungsprozesse

Dipl.-Ing. Carsten Hochmuth

Archivierungsgaben

Innovationsseminar Zerspanung & Messtechnik
Chemnitz, 01.09.2016

Potenzziale hybrider Zerspanungsprozesse

Gliederung

1 Bauteil- und Werkstofftrends

2 Hybride Prozesse

2.1 Charakteristik

2.2 Technologien und Applikation

2.2.1 Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

2.2.2 Medienüberlagerte Bearbeitung

2.2.3 Achsüberlagerte Bearbeitung

3 Zusammenfassung und Fazit

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Bauteil- und Werkstofftrends

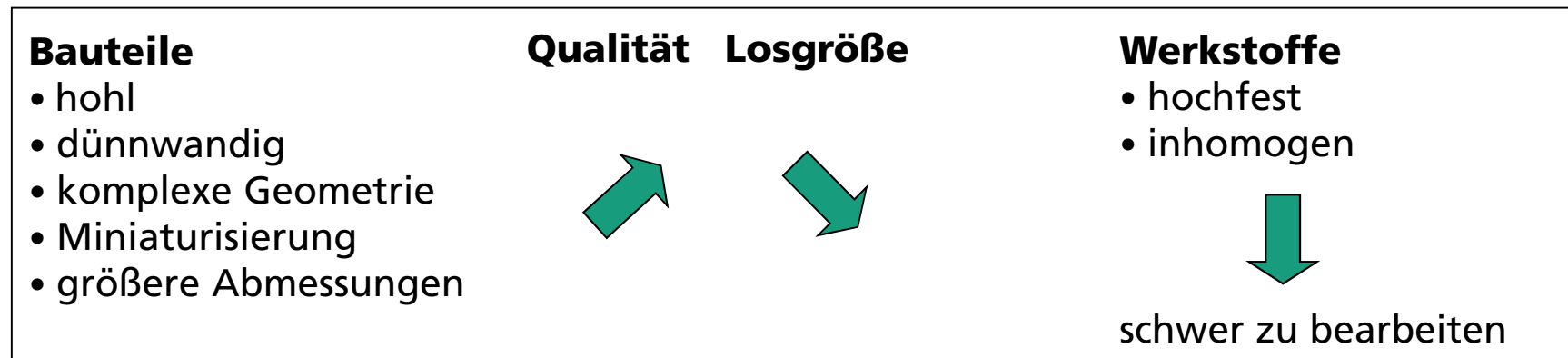
IWU-Analysen

Branchen

- Automobil
- Luftfahrt
- Energie
- Werkzeugbau
- Medizintechnik

Merkmale

- Geometrie
- Qualität
- Baugröße
- Werkstoffe



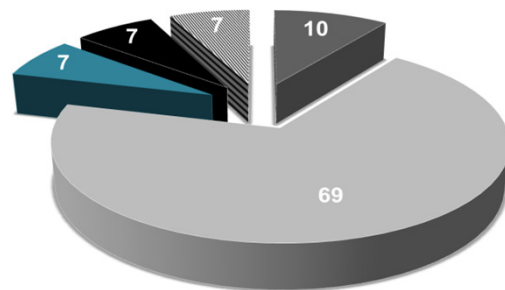
Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Bauteil- und Werkstofftrends

Luftfahrtindustrie



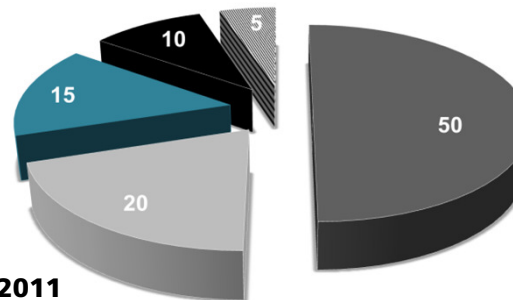
Boeing 777



1995



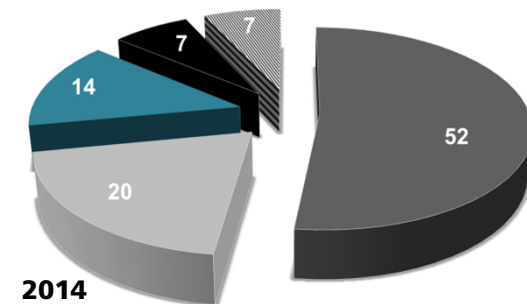
Boeing 787



2011



A350



2014

Quelle: Boeing, Airbus

Verfünffachung des Einsatzes von Verbundwerkstoffen

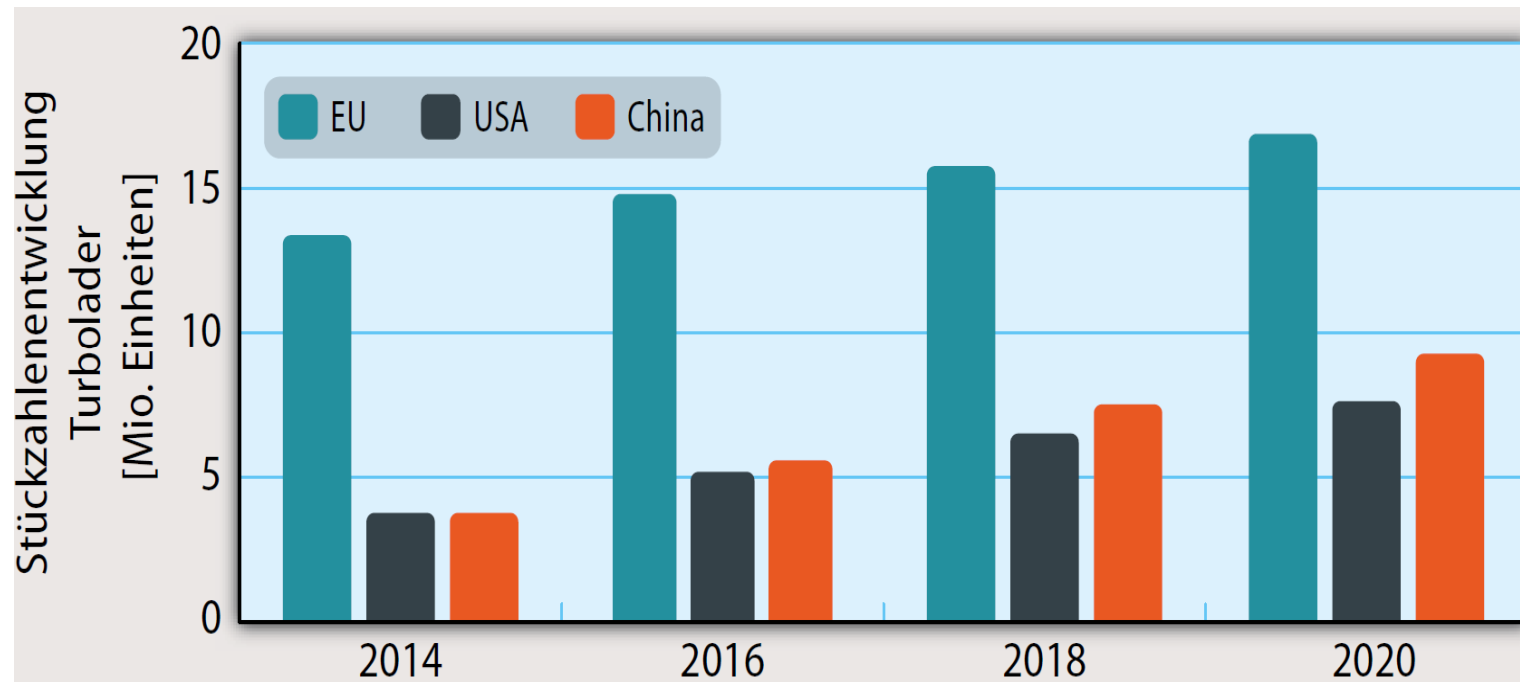
Verdopplung des Einsatzes von Titanlegierungen

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Bauteil- und Werkstofftrends

Fahrzeugindustrie - Turbolader

- bei Dieselmotoren seit ca. 20 Jahren Standard (gleichbleibende Produktionszahlen)
- ➔ bei Ottomotoren wird ein **immenser Anstieg der Produktionszahlen** erwartet
- ➔ Ausbau der Produktionskapazitäten



Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Bauteil- und Werkstofftrends

Fahrzeugindustrie - Turbolader

- bei Ottomotoren aktuell 1050 bis 1100 °C
=>Tendenz steigend
- **Einsatz hitzebeständiger Stahlgusslegierungen**
 - GX40CrNiSi22-10 (1.4826) – 0,4%C, 2%Si, 22%Cr, 10%Ni
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C – **15 W/(mK)**
 - GX40CrNiSi25-12 (1.4837) - 0,4%C, 2%Si, 25%Cr, 12,5%Ni
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C – **12,5 W/(mK)**
 - GX40NiCrSiNb38-19 (1.4849) – 0,4%C, 2%Si, 19%Cr, 38%Ni, 1,5%Nb
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C – **9 W/(mK)**
- austenitische Matrix, **zähe Nickelphase, hochharte Chrom- und Niobkarbide**



Quelle: Amtek Küpper

➡ **Herausforderung für die Zerspanung: schwer spanbare Werkstoffe**

- Geringe Wärmeleitfähigkeit
- **Hoher** mechanischer und thermischer **Werkzeugverschleiß**
- **Schlechtes Spanbruchverhalten**
- **Geringe Zeitspanvolumina**

Potenzziale hybrider Zerspanungsprozesse

Gliederung

1 Bauteil- und Werkstofftrends

2 Hybride Prozesse

2.1 Charakteristik

2.2 Technologien und Applikation

2.2.1 Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

2.2.2 Medienüberlagerte Bearbeitung

2.2.3 Achsüberlagerte Bearbeitung

3 Zusammenfassung und Fazit

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Charakteristik

Als hybride Prozesse werden Kombinationen zusätzlicher Energieformen in konventionelle, bereits existierende Bearbeitungsabläufe definiert.

Prinzip	Prozessvarianten	Anwendungsmotivation
Schwingungs- überlagerte Bearbeitung	• Bohren • Drehen • Schleifen	Verbesserung des Spanbruchs
	• EDM • ECM	Verbesserung Qualität, Produktivität
Medien- überlagerte Bearbeitung	• Hochdruckkühlung	Verbesserung des Spanbruchs
	• kryogene Kühlung	Erhöhung des Zeitspan- volumens
Laser- unterstützte Bearbeitung	• Drehen	Verbesserung der Zerspanbarkeit
	• Fräsen	
Achs- überlagerte Bearbeitung	• Scherenkinematik • EDM	Dynamikerhöhung im Werkzeug- und Formenbau
	• Unrundbearbeitung durch adaptives Formhonen und Feinbohren	Verbesserung der Betriebseigenschaften von Motoren

Ziele

- Erhöhung Qualität und Produktivität
- Verbesserung Spanbildung
- Senkung thermomechanische Werkzeugbelastung

=> **Verschiebung bestehender technologischer Verfahrensgrenzen**

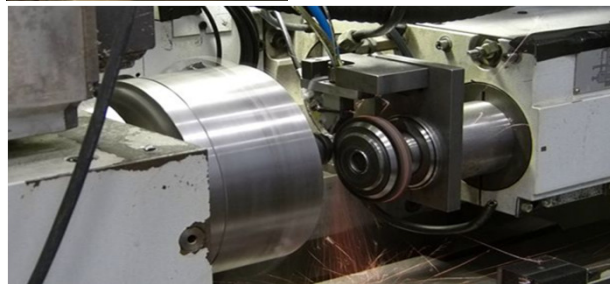
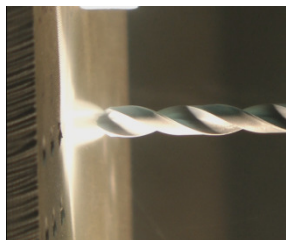
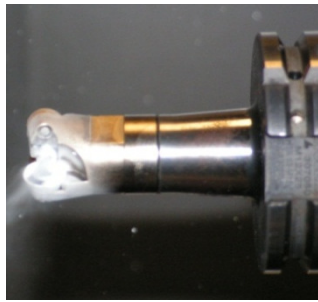
IWU-Kompetenz hybrider Bearbeitungsprozesse

Potenziäle hybrider Zerspanungsprozesse

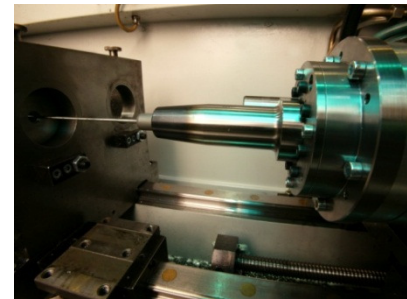
Charakteristik

Anwendungsbeispiele

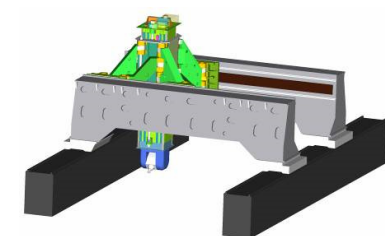
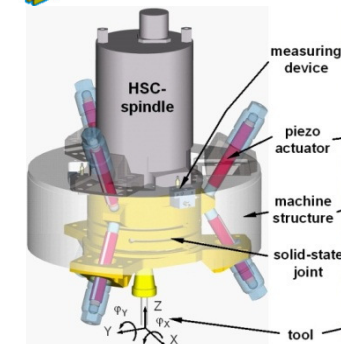
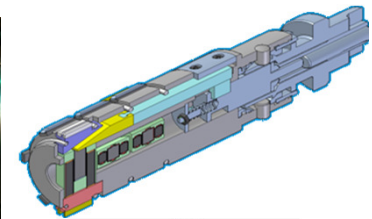
Medienüberlagerte Bearbeitung
Kryogene Kühlung



Schwingungsüberlagerte Bearbeitung



Achsüberlagerte Bearbeitung



Archivierungsangaben

Potenzziale hybrider Zerspanungsprozesse

Gliederung

1 Bauteil- und Werkstofftrends

2 Hybride Prozesse

2.1 Charakteristik

2.2 Technologien und Applikation

2.2.1 Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

2.2.2 Medienüberlagerte Bearbeitung

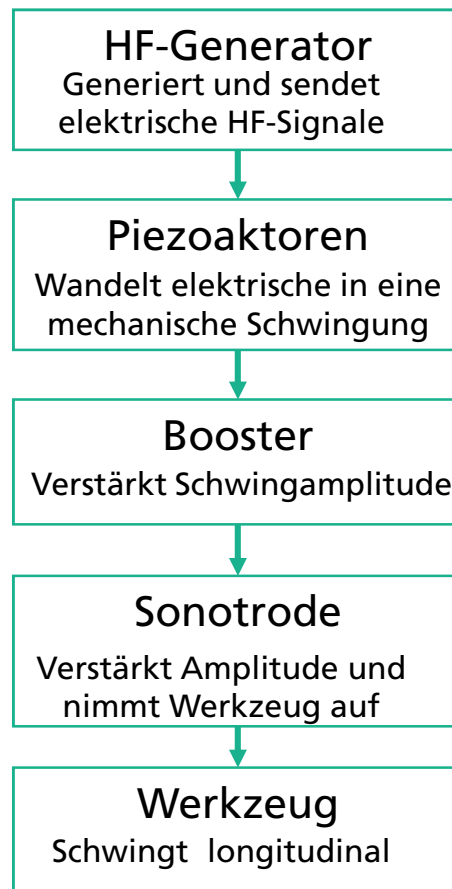
2.2.3 Achsüberlagerte Bearbeitung

3 Zusammenfassung und Fazit

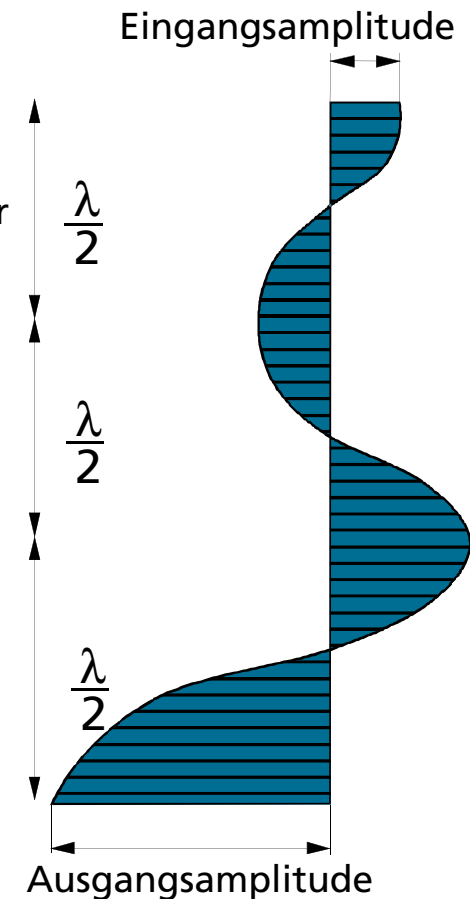
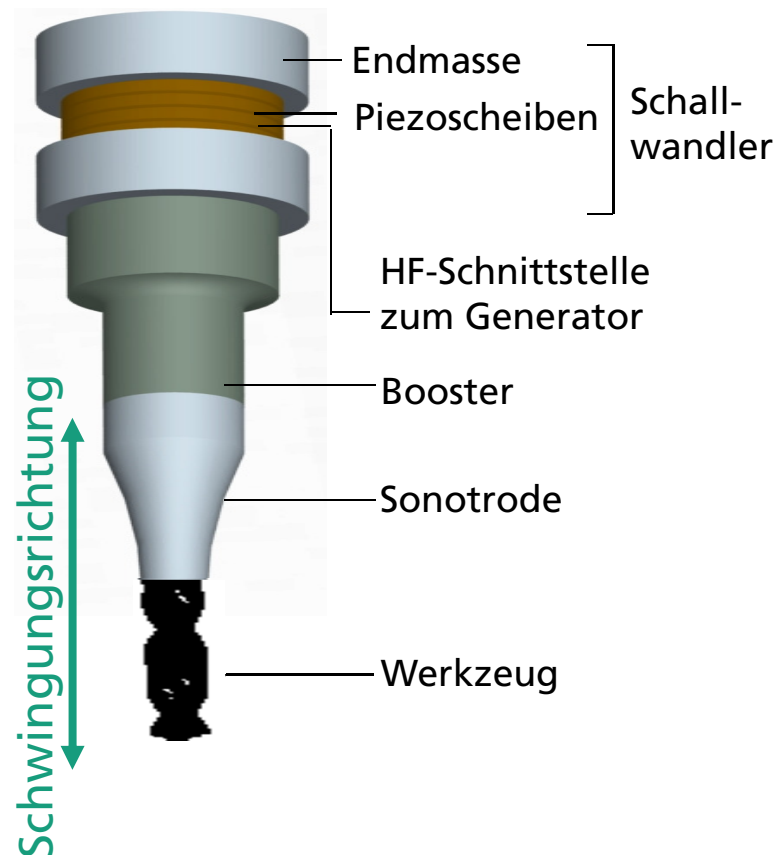
Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

Prinzip eines Ultraschallschwingensystems



Archivierungsangaben

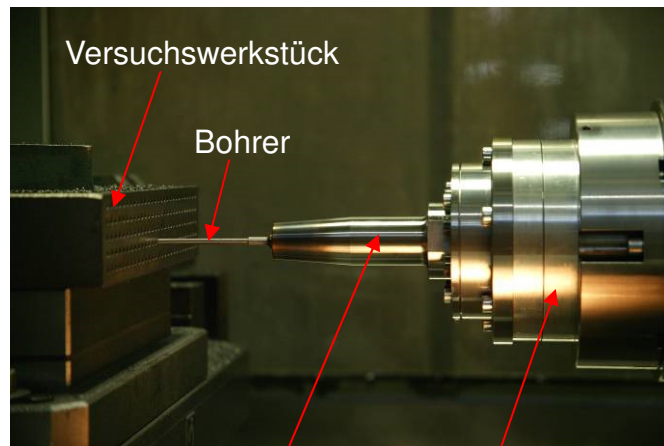


Quelle: IPT

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

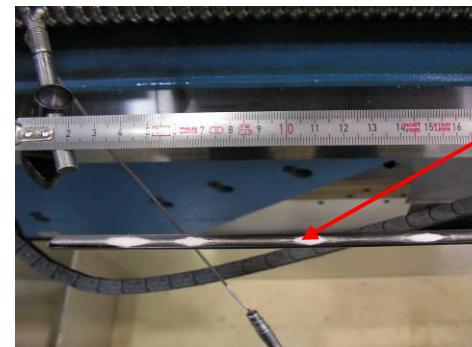
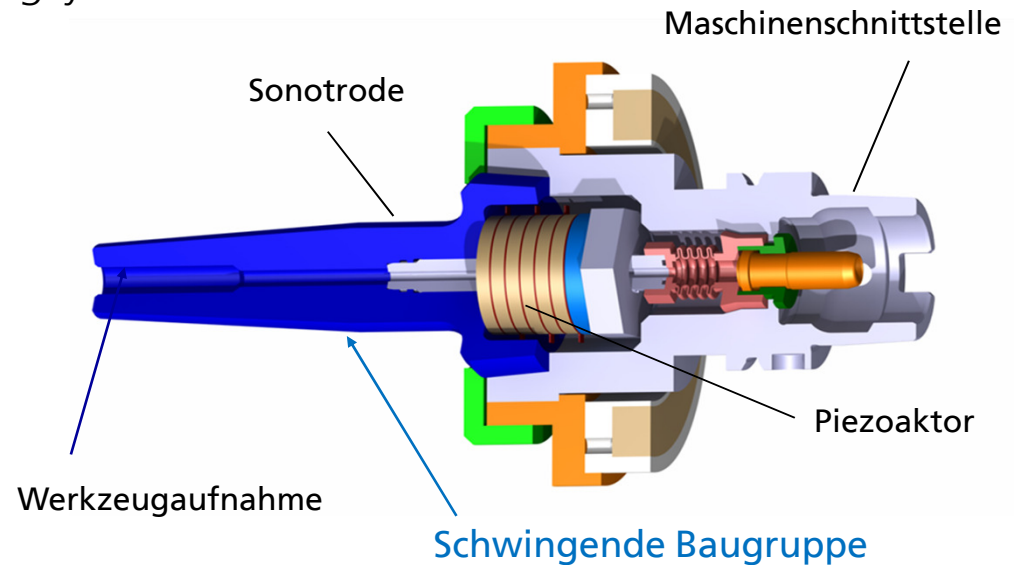
Technologien und Applikation - Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

Umsetzung eines Ultraschallschwingensystems



Berührungslose
Energieübertragung

Werkzeugaufnahme mit
integriertem Wandler



Schwingungsknoten
durch Ultraschall

Frequenzbereich: 20 bis 35 kHz

Schwingamplituden: 8 ... 10 μm

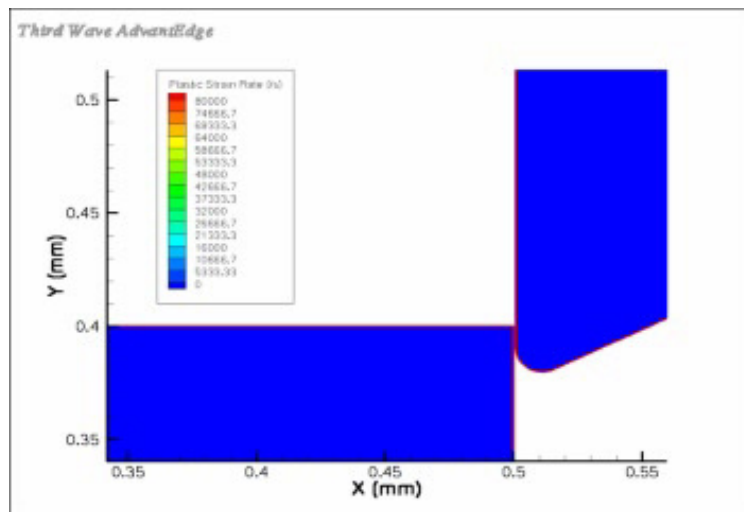
Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

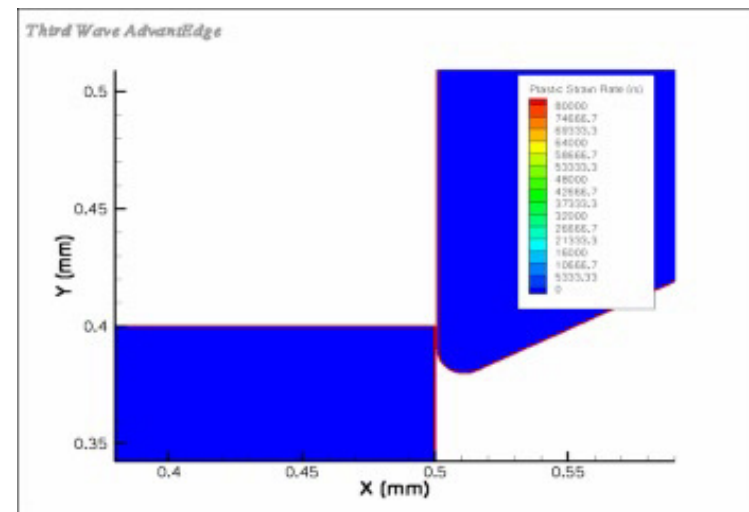
Wirkmechanismen bei axialer US-Schwingungsüberlagerung

Spannungen

konventionell



25 kHz, Schwingamplitude 8 μm

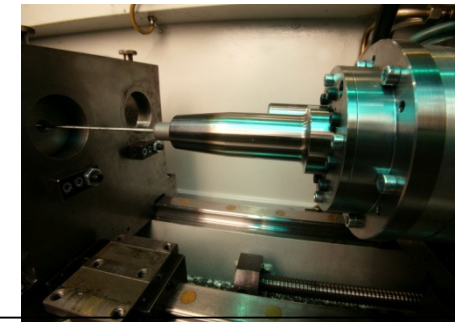
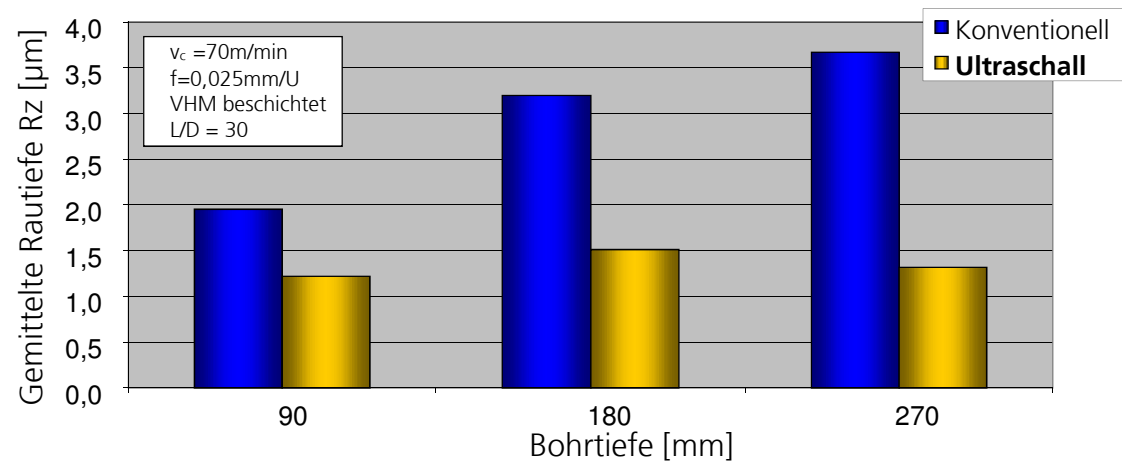


Archivierungsangaben

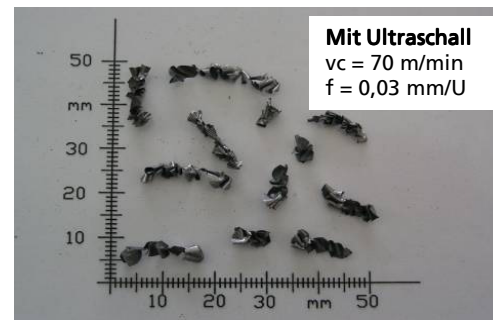
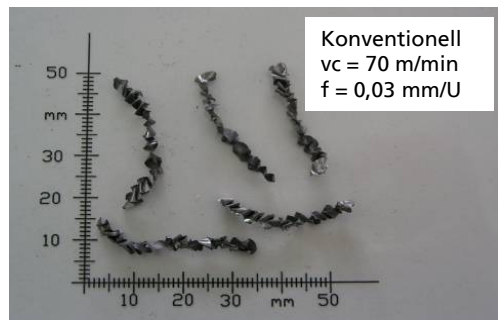
Potenziäle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Schwingungsüberlagerte Bearbeitung
Tieflochbohren

Beeinflussung der Oberflächenrauheit und des Spanbruchs



Technologische Parameter
Werkstoff: X39CrMoV5-3
Amplitude: 8 µm
Frequenz: 20 kHz



Effekte

- Reduzierung der Oberflächenrauheit
- Verkürzung der Spanlänge

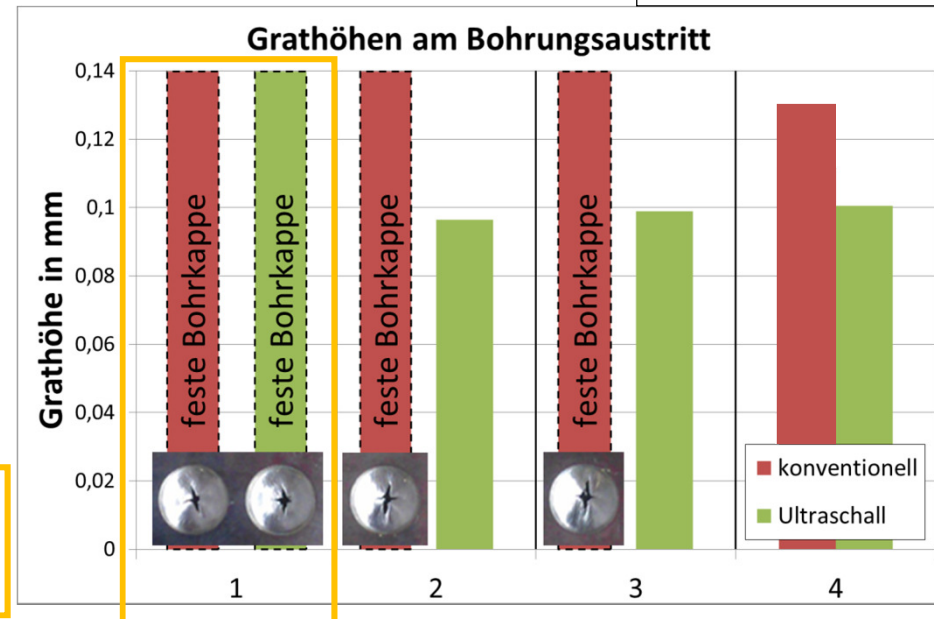
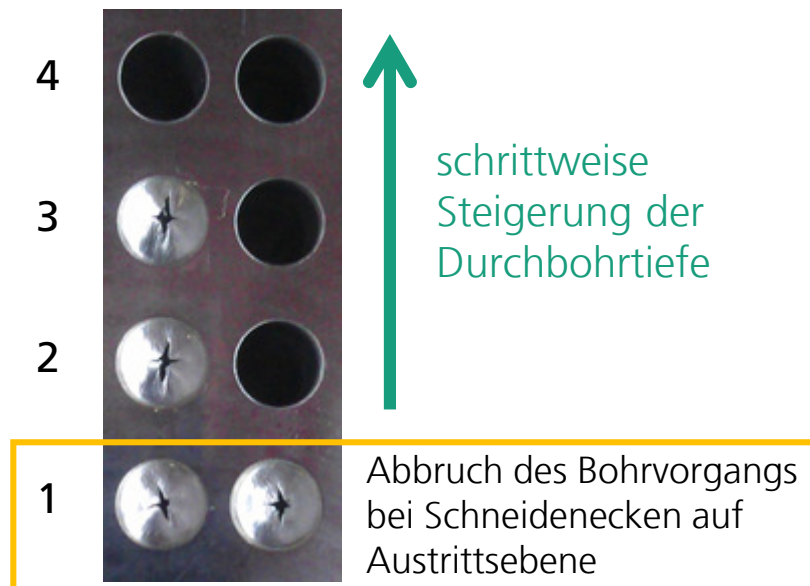
Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

Bohren

Beeinflussung des Grates

Ohne US Mit US



Effekte

- Veränderung des Reibkontakts zwischen WZ und WST - Reduzierung der Kräfte
- früheres Ablösen von Bohrkappen
- Verringerung der maximalen Grathöhe
- ➔ **Verbesserung** der Gratsituation am **Bohrungsaustritt**

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

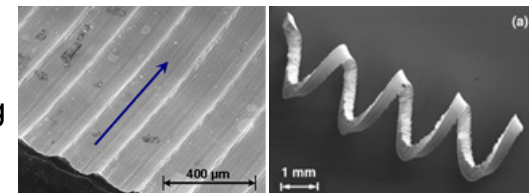
Technologien und Applikation - Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

Ausbohren

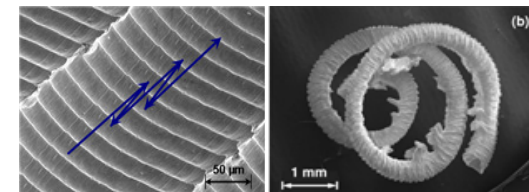
Beeinflussung der Spanbildung und Oberflächengüte



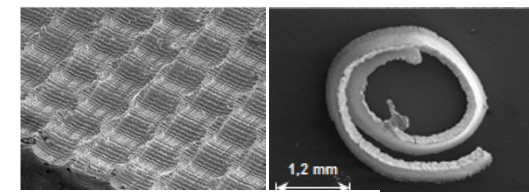
ohne
Ultraschallschwingung



Mit US-Schwingung in
Schnittrichtung



Mit überlagerten
US-Schwingrichtungen



Oberfläche und Spanbruch
ohne und mit Schwingungsüberlagerung

Effekte

- Verbesserter Spanbruch
- Erhöhung der Prozesssicherheit
- Realisierung definierter Oberflächenstrukturen

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

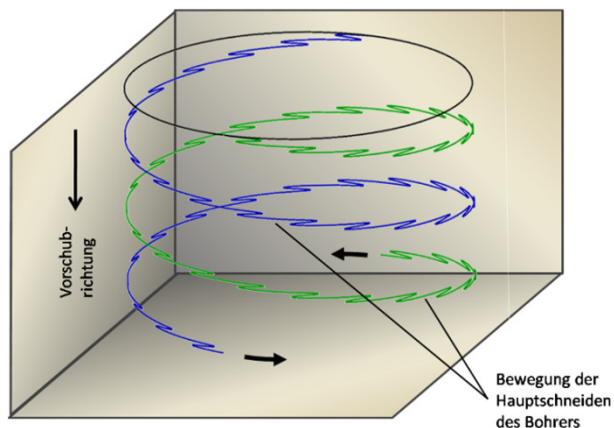
Technologien und Applikation - Schwingungsüberlagerte Bearbeitung
CFK-Bearbeitung

Problemstellung

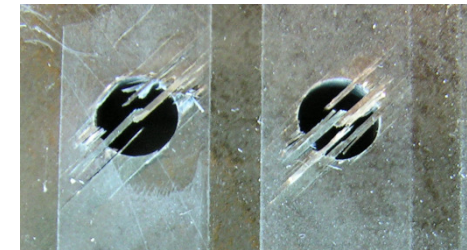
- Bearbeitung faserverstärkter Kunststoffe
 - ⇒ hochfeste, abrasive Fasern
 - ⇒ vergleichsweise weiche, aber adhäsive Matrix

neuartiger Forschungsansatz

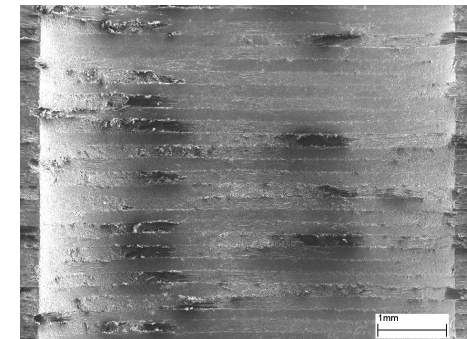
- Schwingungsüberlagerung in Schnittrichtung
 - ⇒ Zielverfahren: Bohren und Fräsen



Relativbewegung der
Schneide beim Bohren



Faserüberstände und
Delamination am
Bohrungsaustritt



Schädigung und Faserausrisse
an Bohrungswand

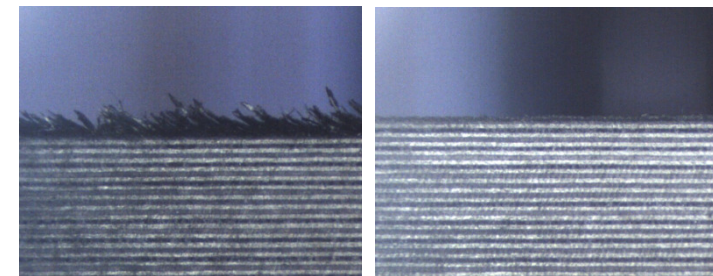
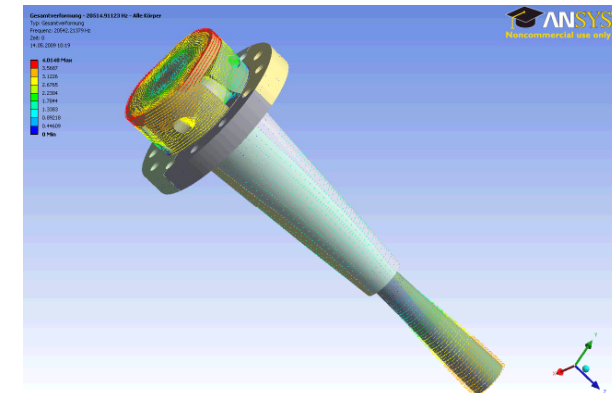
Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

CFK-Bearbeitung – Entwicklung Torsionsschwinger

Erwartete Effekte

- stark alternierende Schnittgeschwindigkeit mit Schnittunterbrechung
➔ verbessertes Trennen der Fasern
- geringere Bearbeitungskräfte
➔ verringerte Tendenz zum Ausweichen der Fasern
➔ Reduzierung des abrasiven Verschleißes am Werkzeug
- Verminderung der Reibung
➔ Vermeidung von Werkstoffanhaftungen am Werkzeug
- Verbesserung von Bearbeitungsergebnis und Prozesssicherheit



Qualität der Schnittkante beim Besäumen von CFK

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Archivierungsangaben



Potenzziale hybrider Zerspanungsprozesse

Gliederung

1 Bauteil- und Werkstofftrends

2 Hybride Prozesse

2.1 Charakteristik

2.2 Technologien und Applikation

2.2.1 Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

2.2.2 Medienüberlagerte Bearbeitung

2.2.3 Achsüberlagerte Bearbeitung

3 Zusammenfassung und Fazit

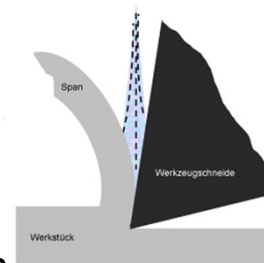
Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Medienüberlagerte Bearbeitung

Alternative Kühlkonzepte

Herausforderung

- Thermomechanische **Werkzeugbelastung** ↑↑
>700 °C bei Titan, Nickelbasislegierungen, ...
- **Prozesssicherheit** ↓
Spanbruchprobleme bei Titan, bleifreien Bronzen, ...

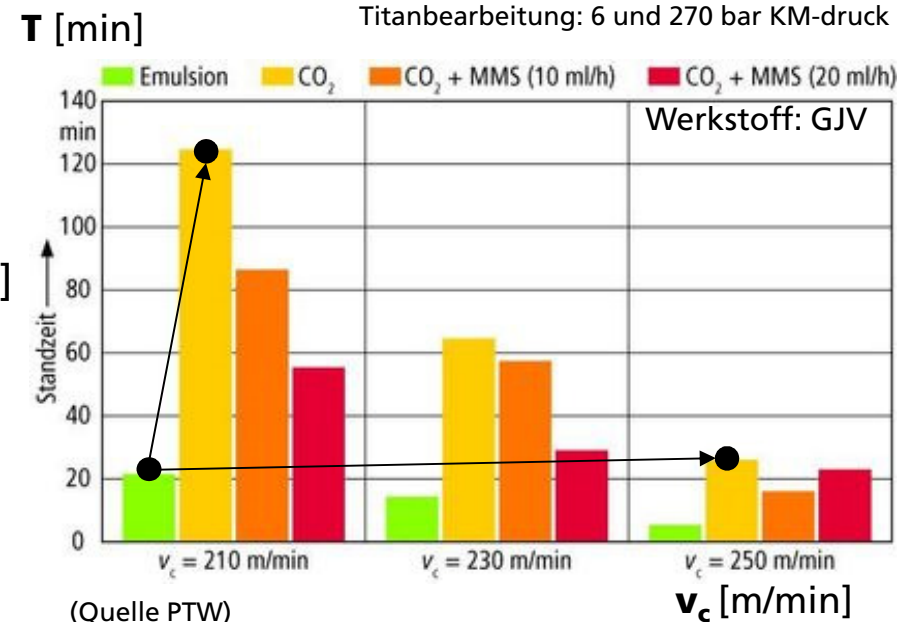


Lösungsansatz

- Kühlmittel**hochdruck**
80 ... 270 bar
- **Tieftemperatur**
Einsatz von Kryogenen [**-196 ... -78 °C**]
(Stickstoff, Kohlenstoffdioxid)

Ergebnisse

- **Werkzeugstandzeit T**
- **Schnittgeschwindigkeit v_c**
- **Spanbruchverhalten**

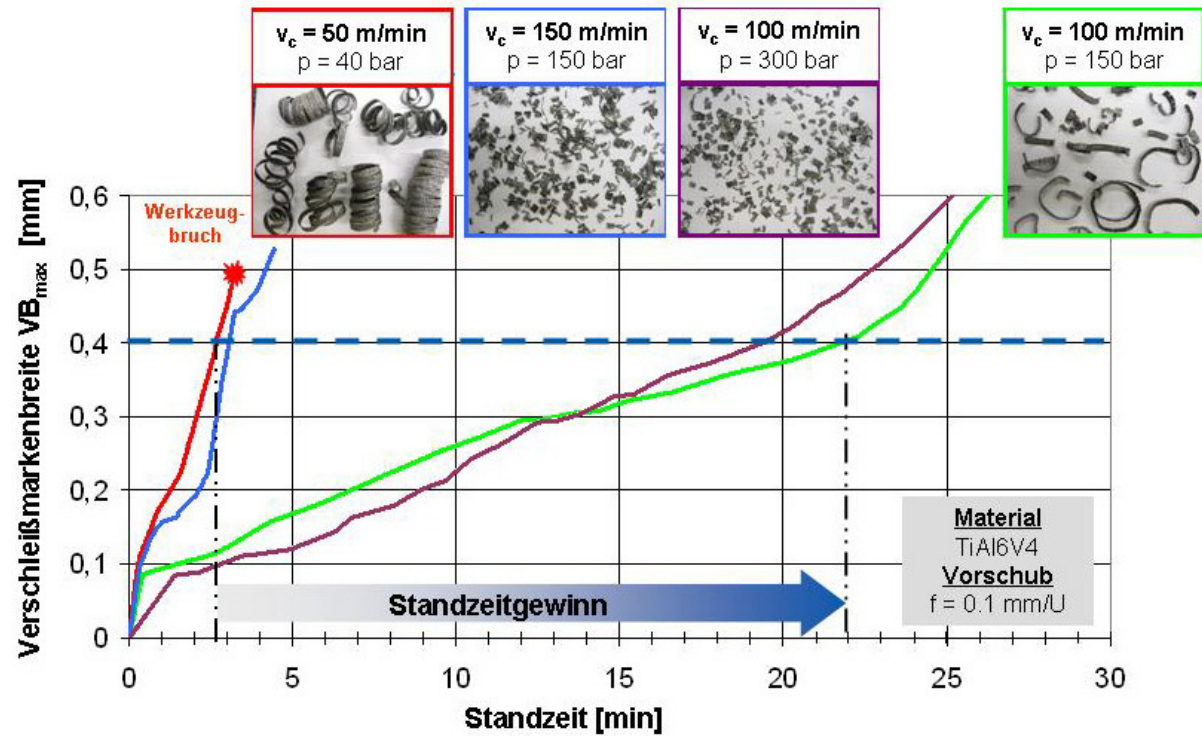
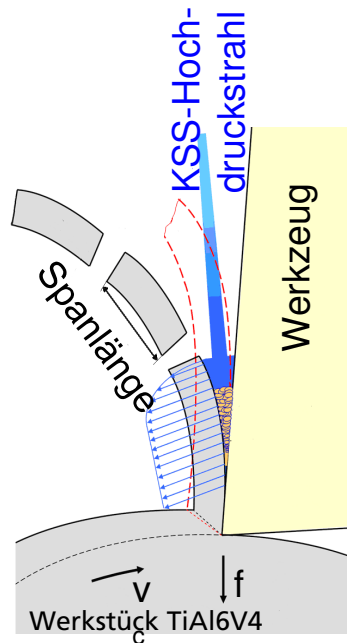


Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Medienüberlagerte Bearbeitung

Hochdruckkühlung – Einstechdrehen

Werkzeugstandzeit und Spanlänge



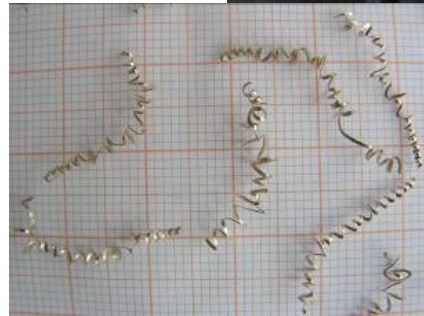
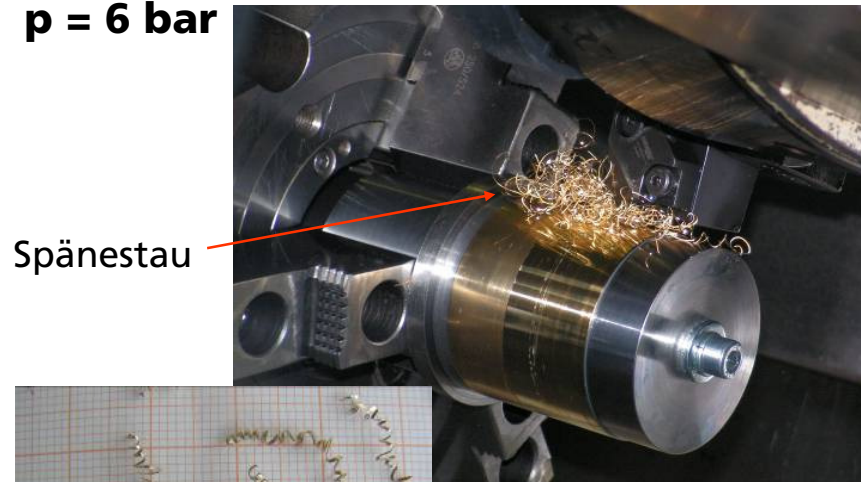
Effekte

- Höhere Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe
- Verbesserte Werkzeugstandzeiten
- kontrollierter Spanbruch (Spanlänge)

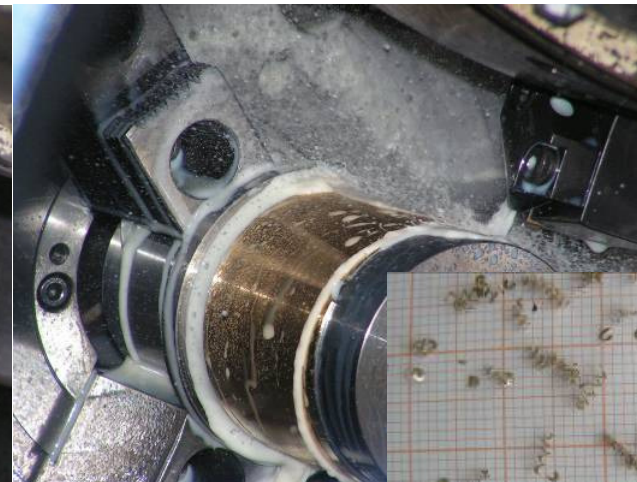
Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Medienüberlagerte Bearbeitung
Hochdruckkühlung - Drehen gesinterter Bronze

p = 6 bar



p = 260 bar



Effekte

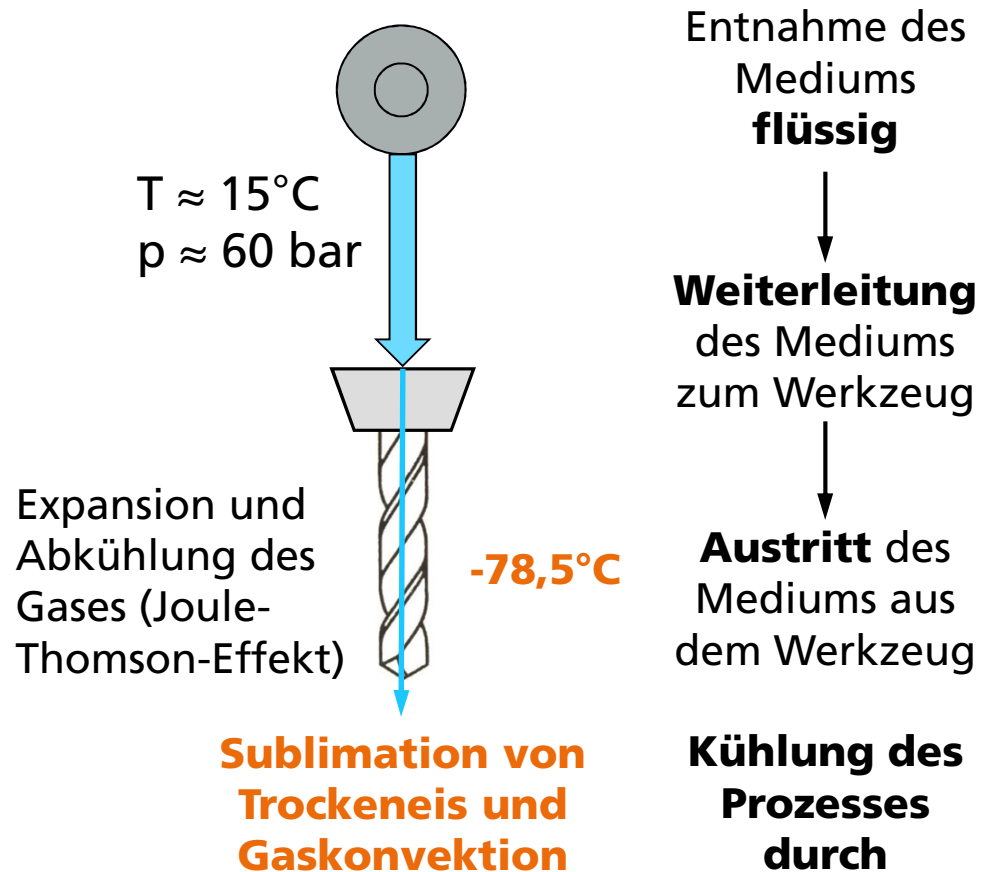
- hervorragende Spankontrolle (optimaler Spanbruch)
- erhöhte Schnittgeschwindigkeit und Produktivität
- Reduzierung des Werkzeugverschleißes
- sehr gute Kühl- und Spülwirkung

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

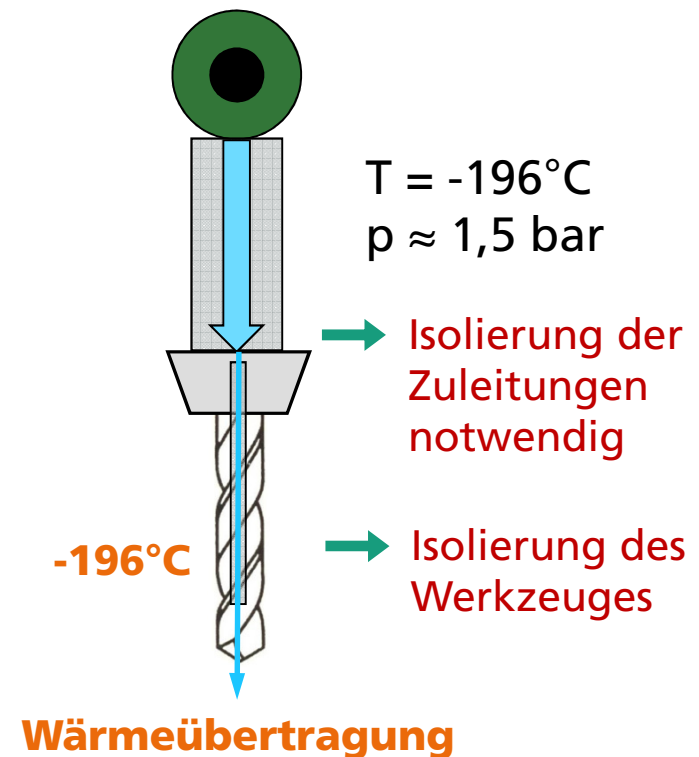
Technologien und Applikation - Medienüberlagerte Bearbeitung

Kryogene Kühlung - Arten und Wirkprinzipien

Kohlendioxid-Kühlung (CO₂)



Stickstoff-Kühlung (LN₂)



Potenzziale hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Medienüberlagerte Bearbeitung

Kryogene Kühlung - Arten und Wirkprinzipien

Kohlendioxid-Kühlung (CO₂)

- Temperaturen von **bis zu -78,5 °C**
- Vergleichsweise **einfache Handhabung** und **Integration in Werkzeugmaschinen**
- **Keine Isolation** von Zuleitungen erforderlich
- **Keine Sonderwerkzeuge** notwendig
- Erzeugung **tiefer Temperaturen erst am Werkzeugaustritt**

Stickstoff-Kühlung (LN₂)

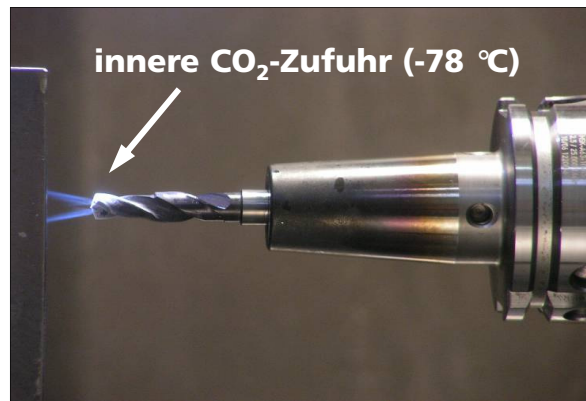
- Temperaturen von **bis zu -196 °C**
- **Isolation von Zuleitungen und Maschinenkomponenten** erforderlich
- **Sonderwerkzeuge** mit isolierter Zuführung
- **Lange Anlaufzeiten des Kühlsystems**, da Zuleitungen erst herunter gekühlt werden müssen

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

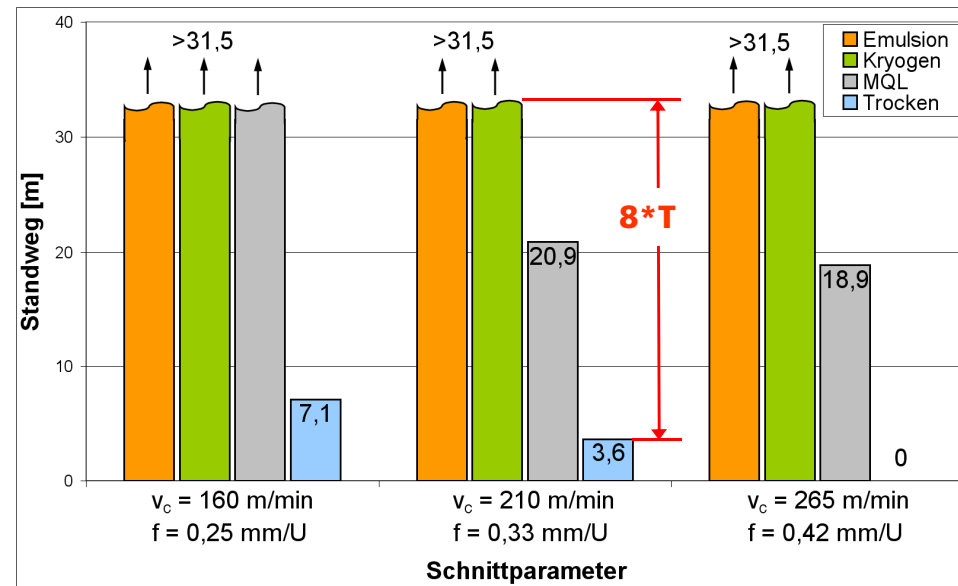
Technologien und Applikation - Medienüberlagerte Bearbeitung

Kryogene Kühlung – Bohren

Werkzeugstandzeit



Bohren (Durchmesser 7,0 mm, Tiefe 35 mm) von EN-GJL 250, Abbruchkriterium Standweg 31,5 m



Effekte

- keine Unterschiede zwischen Emulsion und CO₂ feststellbar
- Realisierung einer effektiven Trockenbearbeitung
- Signifikante Standzeiterhöhung / Produktivitätssteigerung

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Medienüberlagerte Bearbeitung

Kryogene Kühlung – Bohren

Titan-CFK-Schichtverbund

Herausforderung

- Hohe Prozesstemperaturen bei der Titanzerspanung
 - Beschädigung des CFK
 - Zusetzen der Spannuten durch verbackenen CFK-Staub
- **Einsatz von ölhaltigen Kühlmitteln** aus Sicherheitsgründen **nicht möglich**

Effekte

- Störungsfreier Abtransport der CFK-Späne
- Vermeidung von glühend-heißen Titanspänen



Ohne
Kühlung



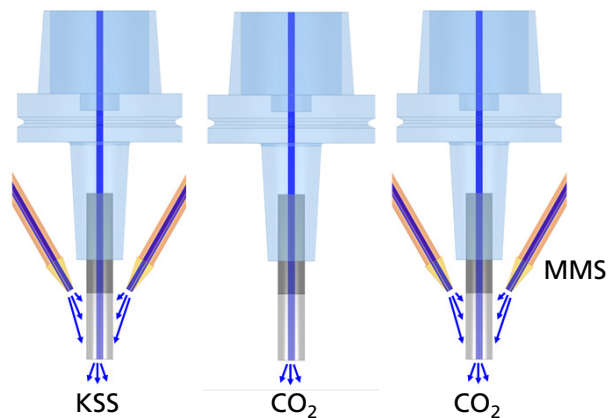
Mit CO₂-
Kühlung

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Medienüberlagerte Bearbeitung

Kryogene Kühlung – Fräsen

Werkzeugstandzeit



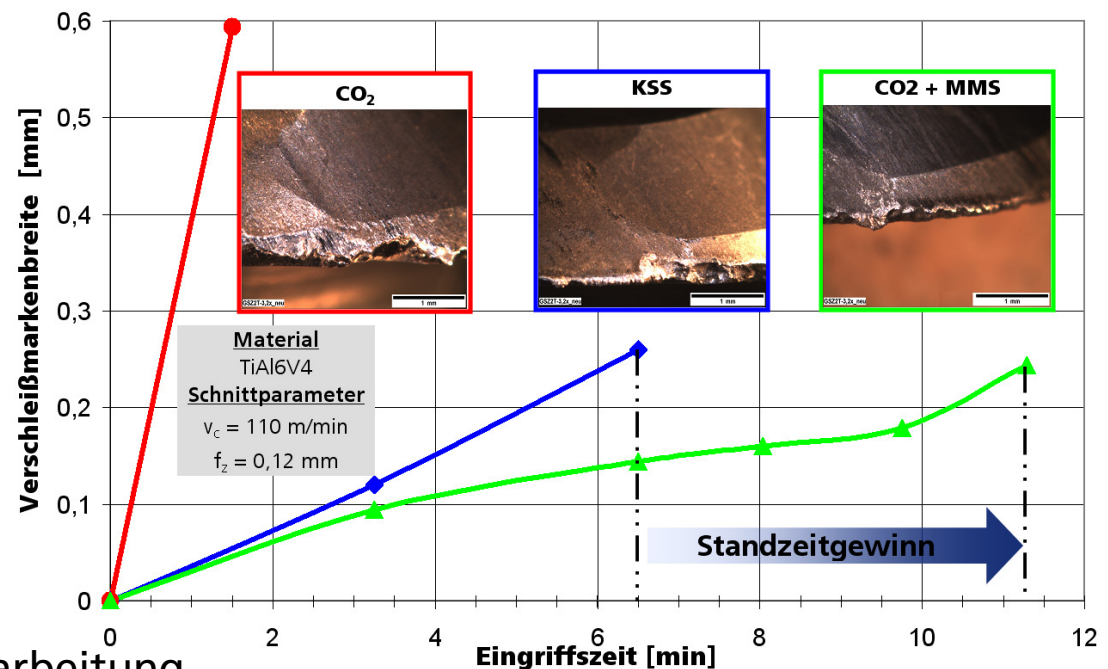
Fräsen (Durchmesser 16 mm, Zähne 4)

Effekte

- Erhöhung Standzeit
- Realisierung einer Trockenbearbeitung

Handlungsbedarf

- Prozessgestaltung
- Entwicklung CO₂-gerechter Werkzeuge und Werkzeugspanntechnik
- Integration Prozessschmierung



Potenzziale hybrider Zerspanungsprozesse

Gliederung

1 Bauteil- und Werkstofftrends

2 Hybride Prozesse

2.1 Charakteristik

2.2 Technologien und Applikation

2.2.1 Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

2.2.2 Medienüberlagerte Bearbeitung

2.2.3 Achsüberlagerte Bearbeitung

3 Zusammenfassung und Fazit

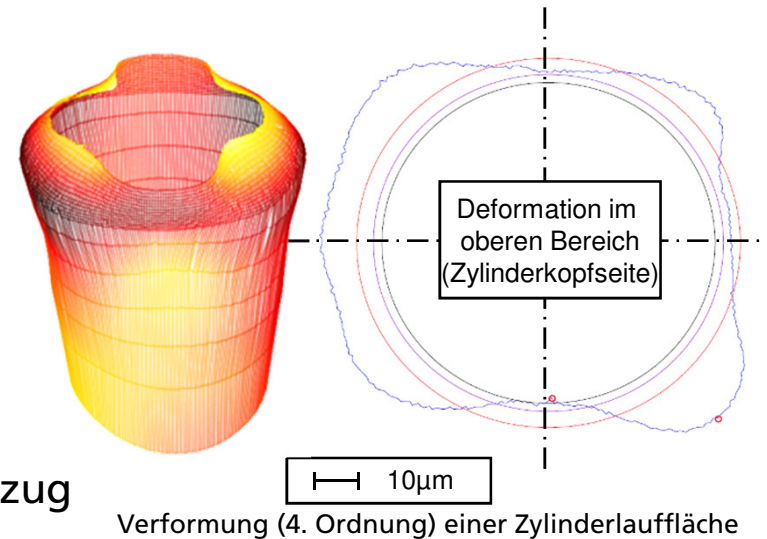
Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Achsüberlagerte Bearbeitung

Konzeption präventive Unrundbearbeitung

Herausforderung

- **Zylinderformabweichung beeinflusst** das **tribologische System** Kolben - Kolbenring – Zylinderlaufbahn
- **Ursachen der Zylinderformabweichung:**
statischer, quasistatischer und dynamischer Verzug
 $f=(\Delta T, \varepsilon, F_{\text{Gas}})$
- **70-80 % des ungewollten Ölverbrauchs** entstehen am Zylindersystem
- **Reibungsanteil** der Kolbengruppe kann **bis 50 % der Motorreibung** betragen



Entwicklungsziel **Minimierung der Zylinderformabweichung**
der Bohrungen im ZKG

Lösungsansatz Konstruktive Bauteilgestaltung
Präventive Unrundbearbeitung

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Achsüberlagerte Bearbeitung

Konzeption präventive Unrundbearbeitung

Fertigungstechnische Anforderung

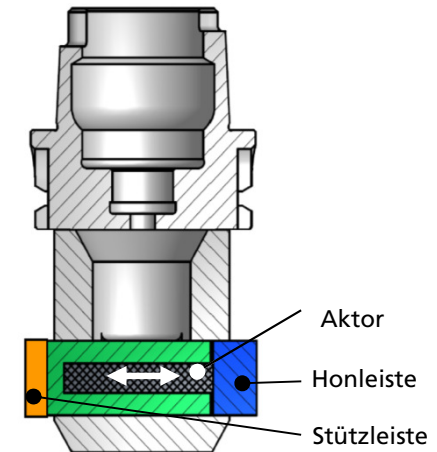
- Entwicklung von flexiblen und effektiven Feinbearbeitungsverfahren ($IT < 6$, $R_z < 3\mu m$)
- **Hochdynamische Relativbewegung** zwischen Werkzeug und Werkstück ($f > 50$ Hz, $s = 10 \dots 100 \mu m$)

Lösungsansatz

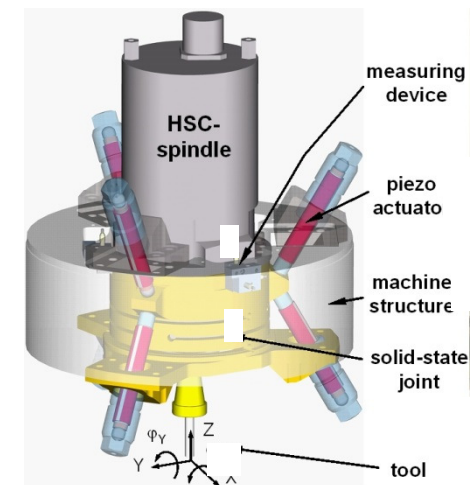
- Einachsige Bewegung (**adaptronische Werkzeuge**)
- Entwicklung Mehrachsige Bewegung (Magnetspindel, **sub-kinematic-System**)

Prozessvoraussetzung

- Integration einer Prozessführung
- Entwicklung von Messkonzepten bzw. -strategien (**Bewertung der 3D-Kontur**)



Prinzip adaptronisches Honwerkzeug

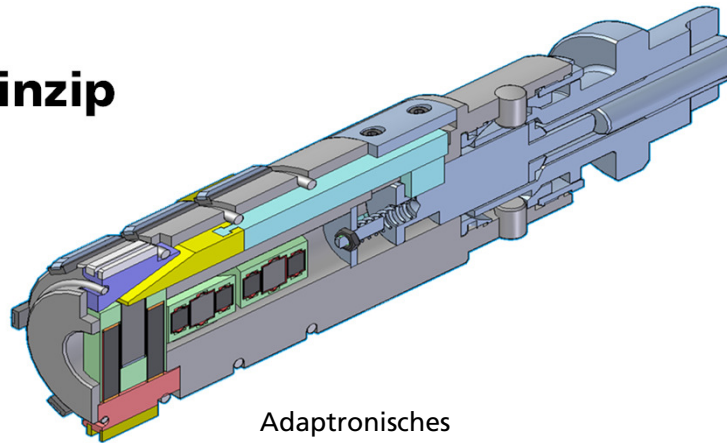


Prinzip einer Hexapod Subkinematik

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Achsüberlagerte Bearbeitung
Formhonen

Prinzip



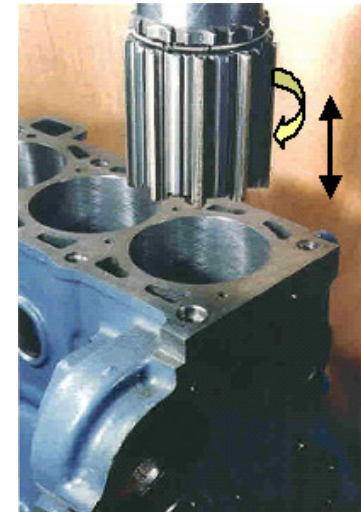
Adaptronisches
Formhonwerkzeug

Vorgabe der Sollkontur durch
Simulation oder Messung

Zerlegung des Prozesses in n
Teilschritte

Auslenkung der Aktoren in
Abhängigkeit von Hubposition
und Drehwinkel

Kontrolle des
Bearbeitungsergebnisses durch
Soll-Ist-Vergleich



Honprozess

Ergebnisse

- Hohes Zeitspanvolumen
 Q_w 5...10 mm³/mm²/min
- Formgenauigkeiten < +/- 3 µm
- Motorprüflauf erfolgreich – Ölverbrauch i.O.
(Ist: 29 g/h < Sollmax: 47 g/h)

Ziel

Wirtschaftlicher und
prozesssicherer **Großserienprozess**

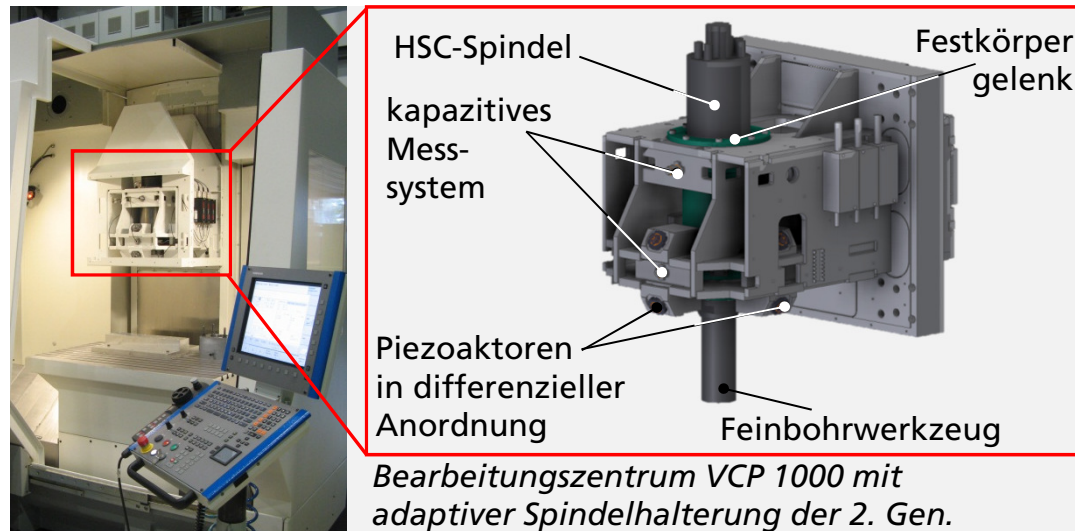


Vergleich Soll-Ist-Kontur

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Achsüberlagerte Bearbeitung
Formbohren

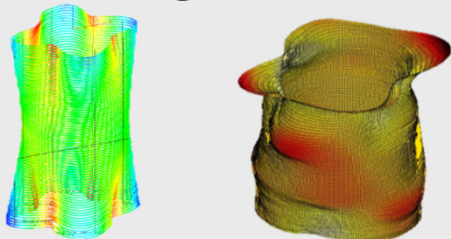
Aufbau und Funktion:



Prozessführung:

- gezielte Fertigung von kleeblattförmigen Testkonturen und Freiformzylinderflächen
- Radiale Auslenkung bis $\pm 60 \mu\text{m}$ bei Auslenkfrequenzen 170 .. 250 Hz
- Drehzahlen bis 6500 U/min

Prozessergebnisse:



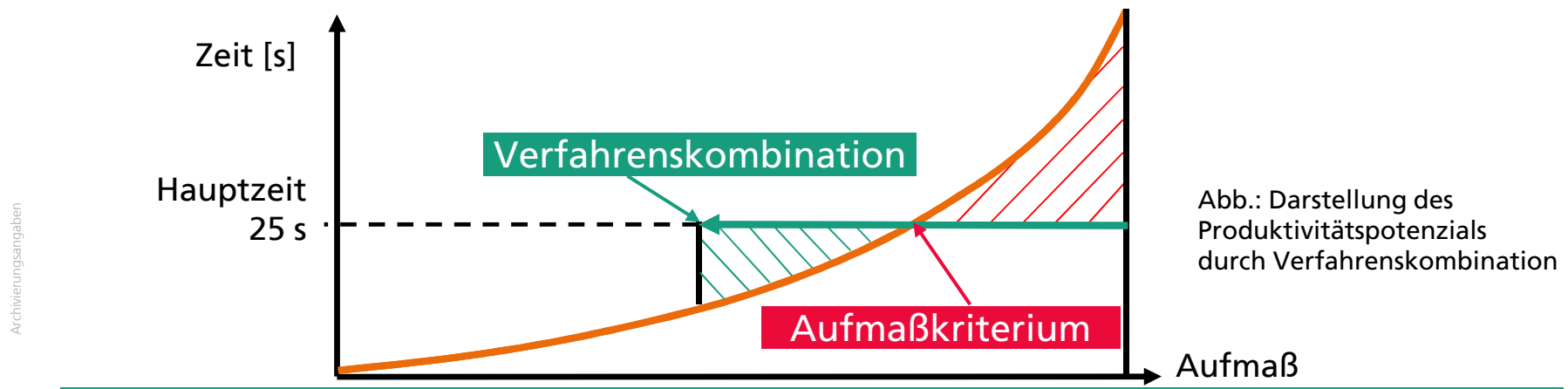
Freiformflächenbearbeitung an ZKG-Bohrungen

- Bearbeitungszeit < 30 sec
- hohe Wiederholgenauigkeit der Form
- Abweichung der Mantellinien < $6 \mu\text{m}$
- hohe Oberflächenqualitäten erzielbar $R_z < 2 \mu\text{m}$
- Optimierungspotenzial vorhanden

Potenzielle hybrider Zerspanungsprozesse

Technologien und Applikation - Achsüberlagerte Bearbeitung
Verfahrenskombination Formhonen - Formbohren

- Bearbeitungszeit Honen stark abhängig von radialer Unrundheit der Sollform
- Kompensation + Potenzial durch **Kombination Formbohren + Formhonen**
- Reduzierung des radiale Aufmaßes beim Formhonen
- Reduzierung der Bearbeitungszeit
- Konstante Schichtdicke bei Verschleißschichten



Potenzziale hybrider Zerspanungsprozesse

Gliederung

1 Bauteil- und Werkstoffrends

2 Hybride Prozesse

2.1 Charakteristik

2.2 Technologien und Applikation

2.2.1 Schwingungsüberlagerte Bearbeitung

2.2.2 Medienüberlagerte Bearbeitung

2.2.3 Achsüberlagerte Bearbeitung

3 Zusammenfassung und Fazit

Potenzziale hybrider Zerspanungsprozesse

Zusammenfassung und Fazit



- Hybride Zerspanungsprozesse können bestehende technologische Verfahrensgrenzen signifikant verschieben
- Erhöhung Qualität und Produktivität
- Verbesserung Span- und Gratbildung
- Senkung thermomechanische Werkzeugbelastung und somit Steigerung der Werkzeugstandzeit
- Im Fokus muss die ganzheitliche Betrachtung der Bearbeitungsaufgabe stehen (Maschine-Werkzeug-Prozess)
- Wir helfen Ihnen gern bei der Lösung Ihrer Aufgabenstellungen!

Kontaktaten:

Carsten Hochmuth
Reichenhainer Str. 88
09126 Chemnitz
Tel: 0371 / 5397 1811
carsten.hochmuth@iwu.fraunhofer.de