



Trends in der Zerspanung – Ganzheitliche Prozessoptimierung

Prof. Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried Expertentreff Hahn & Kolb Ludwigsburg 9.10.2019





Gliederung

- Trends in der Zerspanung früher und heute
 Theoretische Prozessoptimierung
- 3. Potenziale aus der ganzheitlichen Betrachtung
- 4. Prozessintegration und Hybridisierung
- 5. Vom Prozess zur Schneide
- 6. Aus der Wissenschaft für zukünftige Prozesse
- 7. Fazit und Zusammenfassung





Gliederung

- 1. Trends in der Zerspanung früher und heute
- 2. Theoretische Prozessoptimierung
- 3. Potenziale aus der ganzheitlichen Betrachtung
- 4. Prozessintegration und Hybridisierung
- 5. Vom Prozess zur Schneide
- 6. Aus der Wissenschaft für zukünftige Prozesse
- 7. Fazit und Zusammenfassung

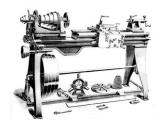




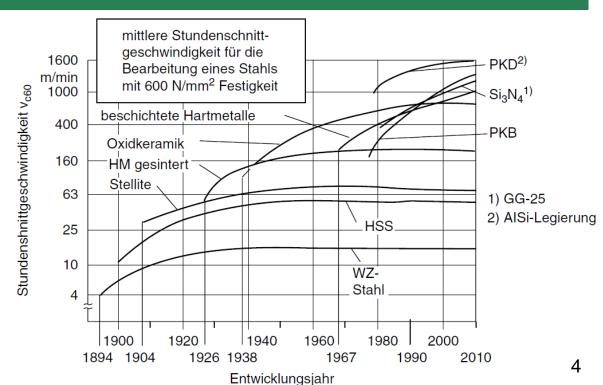
Entwicklung der Schneidstoffe

"An der Schneide des Drehstahls entscheidet sich die Dividende des Unternehmens" Georg Schlesinger um 1900

- Die Entwicklung der Zerspantechnik ist daher unmittelbar mit der Entwicklung der Schneidstoffe verknüpft.
- Daraus ergeben sich neue Herausforderungen bezogen auf die Kinematik und die Maschine
- Hartmetalle (Carbide)
- Schneidkeramik
- Diamant
- Bornitrid



Drehbank mit Fußantrieb 1900





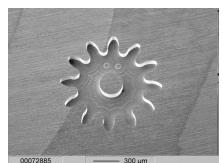


Tops und Flops der letzten 15 Jahre

Zerspanungstrends in den letzten 15 Jahren	Markt- durch- dringung	Markt- bedeutung	Zukunfts- potenzial
Simultane 5-Achsbearbeitung	++	++	++
HSC- Bearbeitung	+	+	+/0
Stab- und Parallelkinematiken	-	-	-
Trockenbearbeitung/ MMS	0	+	++
Linearmotoren	0/+	0/+	0
Prozessintegration/Hybridmaschinen	+	++	++
Mikrosystemtechnik/Mikrobearbeitung	+	+/0	+









Quelle: www.fertigung.de





Der Fertigungsphilosophie im Wandel der Zeit

Früher

Starre System

Sondermaschinen für Spezialaufgaben

Fertigungsprozesse sind Know How der Anwender

Differenzierung durch Technologieschwerpunkte

Heute

Flexible Maschinen

Breite Einsetzbarkeit von Spezialprozessen

Prozesse werden mit der Maschine bzw. den Werkzeugen gekauft

Differenzierung durch Schnelligkeit, Flexibilität bei hoher Qualität

Produktlebenszyklen verkürzen sich stetig Variantenanzahl nimmt zu Technologien von der Stange sind käuflich





Zukunftsorientierte Ausrichtung mithilfe technologischer Trends (VDW)

Hochleistungsprozesse

Die Steigerung von Produktivität und Bauteilqualität erfordert die kontinuierliche Weiterentwicklung von Fertigungsprozessen und Anlagen, insbesondere für neue Werkstoffe für Werkzeuge und Bauteile. Hierzu gehören Hartfeinbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide, Trockenbearbeitung, Minimalmengenschmierung usw.

Industrie 4.0

Industrie 4.0 steht als Überbegriff für die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung in der Produktion. Im Vordergrund stehen dabei durchgängige Prozessketten, bei denen der realen Welt weitestgehend eine parallele digitale Abbildung an die Seite gestellt wird, z. B. um Abläufe effizienter zu machen oder dezentral zu steuern.

Mikrobearbeitung

Bearbeitungsverfahren zum Erzeugen miniaturisierter Werkstücke, zum Teil mit Geometrieabmessungen im Mikrometer- und Oberflächen im Nanometerbereich.

Laser-Strahlquellen

Höhere Leistungsklassen, Miniaturisierung, Flexibilitätssteigerung durch neuartige Strahlführungen, Diodenlaser, Scheibenlaser, Faserlaser, EUV-Laser.

Laser-Anlagen

Schneidsysteme mit höchster Prozessdynamik, kompakte und gut integrierbare Markier und Beschriftungssysteme, innovative Lösungen für das Schweißen, Mikro- und (Ultra-) Kurzpulsbearbeitung.





Zukunftsorientierte Ausrichtung mithilfe technologischer Trends (VDW)

Komplettbearbeitung/Prozesskettenverkürzung

Integration verschiedener Bearbeitungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Verzahnen, Schleifen in einer Maschine zur Fertigbearbeitung des Werkstückes.

Rekonfigurierbare Fertigungssysteme

Stückzahl- und Technologieflexibilität bezüglich neuer Teilespektren zur lebensdaueroptimierten Nutzung investitionsintensiver Anlagen.

Direktantriebe

Linear- und Torquemotoren mit hoher Dynamik und einfachem Aufbau zur unmittelbaren Erzeugung linearer und rotatorischer Bewegungen.

Additive Fertigung

Fertigung von Bauteilen aus u. a. metallischen oder Kunststoff-Werkstoffen durch gezielte Schaffung von lokalem Stoffzusammenhalt, mit den Zielen, entweder bei hoher Flexibilität komplexe Geometrien für Funktionsbauteile zu realisieren (generative Fertigung) oder schnell Ansichts- oder Funktionsmuster zu erhalten (3D-Druck/Rapid Prototyping).

Hybride Prozesse

Unterstützung von Bearbeitungsprozessen durch Zusatzenergie, z. B. Ultraschall oder Laser, sowie additive Prozesse.





Zukunftsorientierte Ausrichtung mithilfe technologischer Trends (VDW)

Faserverbundwerkstoffe

Bearbeitungsverfahren für Faserverbundwerkstoffe zur Realisierung von Leichtbaupotenzialen.

Steuerungen

Innovative Steuerungen halten mit den wachsenden Anforderungen Schritt. Dezentralisierung, Vernetzung, Ferndiagnose über Internet, Fehlererkennung bis zur Ebene der Feldgeräte (z. B. Sensoren, Aktoren) kennzeichnen die zukünftigen Herausforderungen

Durchgängige CAX-Verfahrensketten

Leistungsstarke CAD-CAM-Kopplungen sowie die entsprechende Anbindung an die CNC sind die Voraussetzungen für durchgängige Verfahrensketten von digitalen Produktmodelldaten bis zum fertigen Bauteil.

Simulation/Virtual Reality/Augmented Reality

Leistungsfähige Werkzeuge und Rechnerunterstützung helfen Konstrukteuren und Entwicklern bei der Schaffung genauer und wirtschaftlicher Fertigungssysteme sowie der Planung leistungsfähiger Produktionsprozesse für die Zukunft.

Energie- und Ressourceneffizienz

Energie- und ressourceneffiziente Werkzeugmaschinen dienen als Grundlage für ökologisch verbesserte Produkte.





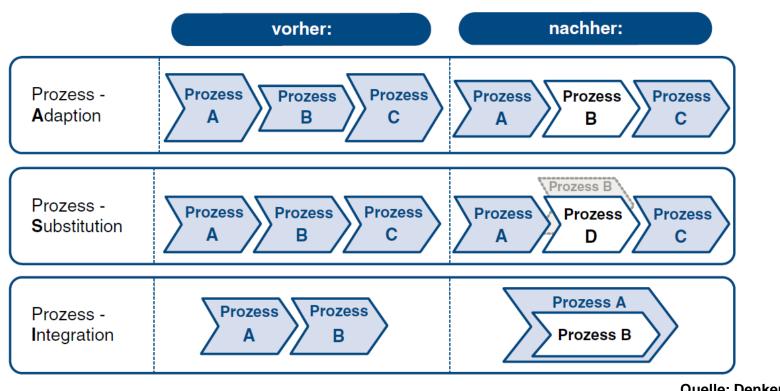
Gliederung

- 1. Trends in der Zerspanung früher und heute
- 2. Theoretische Prozessoptimierung
- 3. Potenziale aus der ganzheitlichen Betrachtung
- 4. Prozessintegration und Hybridisierung
- 5. Vom Prozess zur Schneide
- 6. Aus der Wissenschaft für zukünftige Prozesse
- 7. Fazit und Zusammenfassung





Theoretische Prozessoptimierung



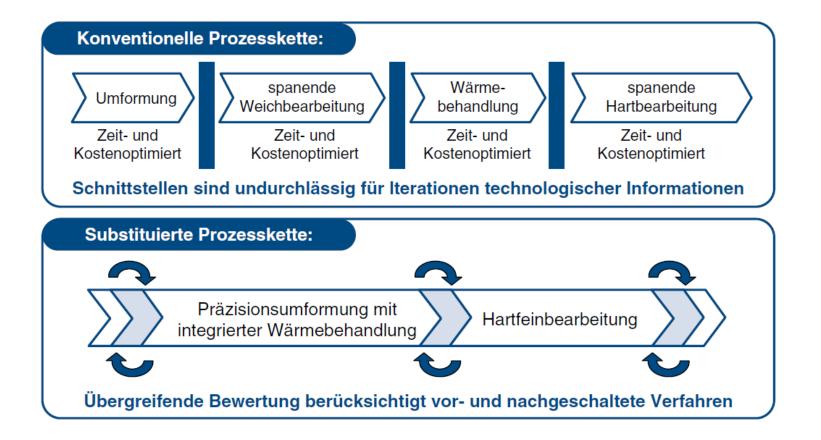
Quelle: Denkena

Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit durch angepasste Produktionsprozesse bzw. Zerspanstrategien





Beispiel einer substituierten Prozesskette

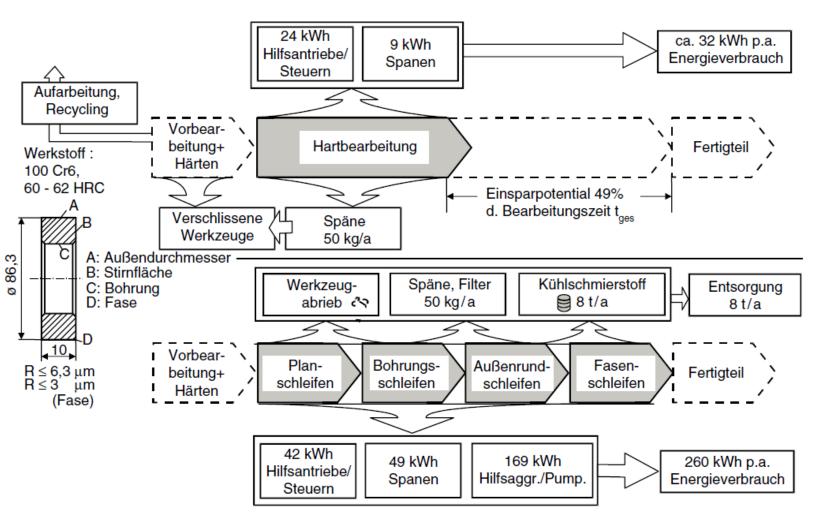


Quelle: Denkena





Vergleich Hartdrehen und Schleifen Energie- und Stoffströme



(nach H.-G. Wobker)





Gliederung

- 1. Trends in der Zerspanung früher und heute
- 2. Theoretische Prozessoptimierung
- 3. Potenziale aus der ganzheitlichen Betrachtung
- 4. Prozessintegration und Hybridisierung
- 5. Vom Prozess zur Schneide
- 6. Aus der Wissenschaft für zukünftige Prozesse
- 7. Fazit und Zusammenfassung





Ganzheitlicher Prozessbetrachtung für die Zerspanung



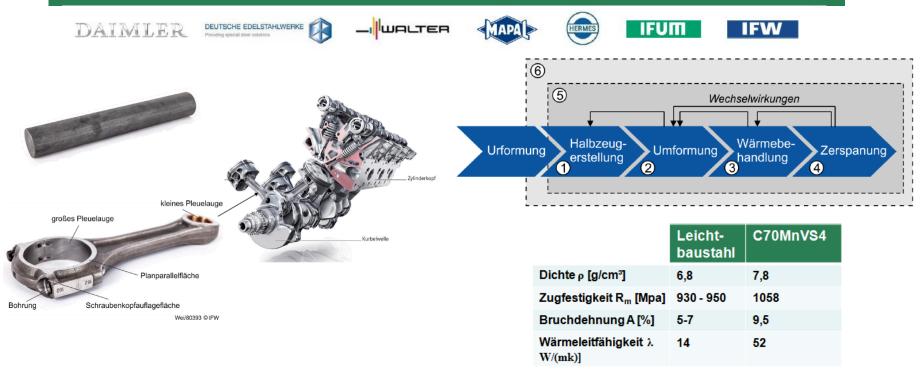
Durch den ganzheitlichen Ansatz kann ein wirtschaftlicher und technisch realisierbarer Fertigungsprozess abgebildet werden





Beispielprojekt IPROM (BmbF Projekt)

Innovative Prozesskette zur Massivteilfertigung aus einem neuartigen Leichtbaustahl (IPROM)



Notwendige Innovationen und Wechselwirkungen erfordern fakultätsübergreifendes und durchgehendes Konsortium zur Umsetzung der Produktionstechnik für das hochfeste Leichtbaupleuel





Prozessintegration Beispiel Zylinderbohrungsbeschichtung

Aus Effizienzgründen (Abgas, Aufladung, Leichtbau) werden Zylinderlaufflächen mit Laufschichten versehen







Thermisches Beschichten von Zylinderbohrungen Prozesskette

Vorbearbeitung

Rough

Machining

Feinbohren

Fine Boring

Mechanisches Aufrauhen

Mechanical Roughening Beschichten

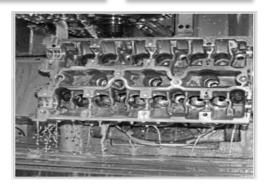
Coating

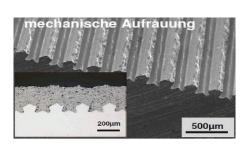
Fertigbearbeitung

Finish Machining

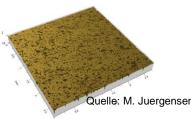
Feinbohren + Honen

Fine Boring + Honing









Fläche APS beschichtet und gehont

- Jeder einzelne Prozessschritt erfordert spezifisches Know-how
- · Zusammenspiel einzelner Prozesse muss exakt aufeinander abgestimmt sein

Nur die intelligente Verknüpfung führt zu einem qualitativ hochwertigem und wirtschaftlichem Prozess





Technische Herausforderungen

 Thermisches Beschichten möglichst früh in der Produktionskette ausführen

Vermeidung von teurer Maskierung

 Möglichst gute Oberfläche und Geometrie nach Beschichten

Reduzierung von Beschichtungszeit und Aufwand für die Fertigbearbeitung

 Alle Schruppbearbeitungen möglichst vor dem Beschichten ausführen



Reduzierung von Spannungseinflüssen

Zur Wahrung der Toleranzen:
 Vorbearbeitung enthält Aufrauen und Bearbeitung von Flächen/Bohrungen, gleichmäßige Schichtdicke



Wiederfinden der Bohrung zur Fertigbearbeitung

Quelle: MAG





Anlage für eine Prozesskette



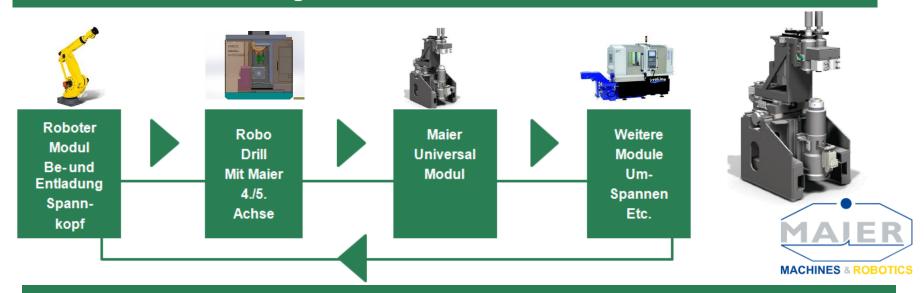
Diese Prozesskette basiert auf einer geschickten Prozessintegration, Hybride Prozesse und Prozesskettenverkürzung





Rekonfigurierbare Fertigungssysteme zur Komplettbearbeitung

Integration verschiedener Bearbeitungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Verzahnen, Schleifen in geschicktes System zur Fertigbearbeitung des Werkstückes bei Stückzahl- und Technologieflexibilität zur lebensdaueroptimierten Nutzung investitionsintensiver Anlagen.



Hocheffiziente automatisierte modulare Fertigungslinie

- Doppelspindelmaschine mit prozessangepasster Achsanordnung zur Linienintegration
- Komplettbearbeitung
- Hybride Bearbeitung



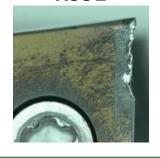


Das vernachlässigte 5te Werkzeug KÜHLSCHMIERUNG

Oftmals vernachlässigt und als lästiges Übel betrachtet wird die Kühlstrategie und der Kühlschmierstoff. Dabei hat das Kühlschmiersystem erheblichen Einfluss auf das Prozessverhalten und die Prozesssicherheit.

Verschleißverhalten bei unterschiedlichen Schmierstoffen (nach Blaser)

KSS1



KSS2



KSS3



WZ:

 $a_e = 3.0 \text{ mm}$

 $a_p = 3.0 \text{ mm}$

 $v_c = 80 \, \text{m/}_{min}$

 $f_z = 0.1 \text{ mm}$

KSS = verschiedene

MMS Anlage + MMS Medium = MMS Schwerzerspanung







Minimalmengenschmierung ist eine wirtschaftliche Alternative zur Vollstrahlkühlung und zeigt erstaunlich gute Ergebnisse bei hochfesten Werkstoffen

Das Kühlschmiersystem ist ein Material- und Werkzeugabhängiges System und verlangt eine professionelle Auslegung.





Ganzheitliche Betrachtung zur Umsetzung der MMS Technologie



Bei erfolgreichen Umsetzungen werden alle Themen gleichzeitig und gleichberechtigt angegangen werden



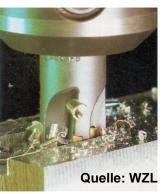


Zukünftige Kühlschmierkonzepte in der spanenden Fertigung

Konventionelle (Kühl-) Verfahren



Nassbearbeitung



Trockenbearbeitung



Minimalmengenkühlschmierung (MMS)

Innovatives Kühlverfahren



Kryogene Kühlung

Innovationsgrad

Quelle: WZL Quelle: MAG

Prof. Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried





Gliederung

- 1. Trends in der Zerspanung früher und heute
- 2. Theoretische Prozessoptimierung
- 3. Potenziale aus der ganzheitlichen Betrachtung
- 4. Prozessintegration und Hybridisierung
- 5. Vom Prozess zur Schneide
- 6. Aus der Wissenschaft für zukünftige Prozesse
- 7. Fazit und Zusammenfassung

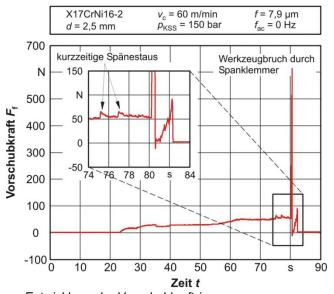


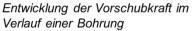


Hybride Prozesse für korrosionsbeständiger Werkstoffe

Tiefbohren von X17CrNi16-2 (geglüht)

Chirurgische Instrumente und Werkzeuge mit hohen Ansprüchen an Korrosionsbeständigkeit und mechanischen Eigenschaften aus martensitischen Stählen verhalten sich in der Bearbeitung bzw Spanbildung negativ.











Knochenschraube und Schraubeneindreher

Bildnachweis: Medicon Instrumente

Quelle: ISW Stuttgart





Hybrider Prozess mit Ultraschallunterstützung

X17CrNi16-2

d = 2.5 mml = 50 mm $v_{\rm c} = 60 \text{ m/min}$ $f = 7.9 \text{ } \mu\text{m}$ $p_{\rm KSS}$ = 150 bar



 $s_0 = 0 \ \mu m \quad f_{ac} = 0 \ Hz$

Spanraumzahl *R* ≈ 20

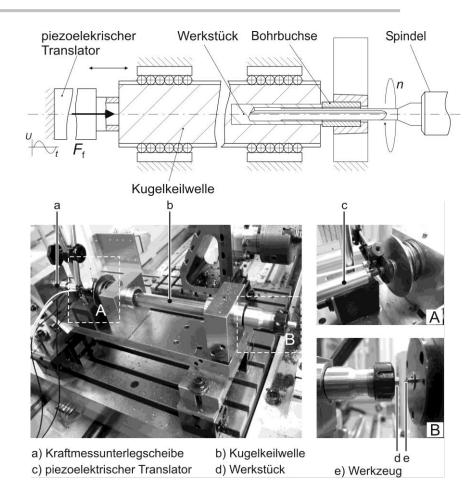
Mangelhafter Spantransport unter Gefahr von Spanklemmern



 $s_0 = 2 \mu m$ $f_{ac} = 500 \text{ Hz}$

Spanraumzahl R≈ 10

Guter Spantransport



Optimierte Späne verhindern Spanklemmer. Die Schnittkraft wird geringer. Standzeit und Schnittgeschwindigkeit können erhöht werden.

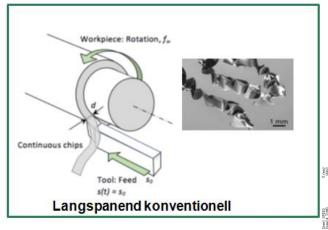
Quelle: ISW Stuttgart



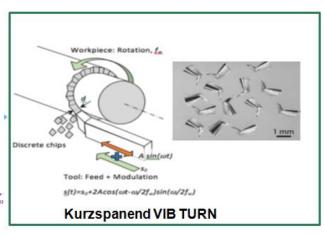


VIB TURN Ultraschallunterstütztes Zerspanen

Die Werkzeugschneide wird gezielt "abgehoben" aus dem Schnitt um ähnlich wie prinzipbedingt beim Fräsen einen unterbrochen Schnitt zu generieren. Damit entstehen auch bei langspanenden Werkzeuge kurze Spanstücke



Beeinflussung des Spanbruchs durch modulierte Schwingungen



- Durch modulierte Amplituden kann ein kontrollierter Spanbruch erzeugt werden.
- Der Span keine unbekannte Größe mehr, sondern individuell ohne Veränderung der Werkzeuggeometrie beeinflussbar.
- MALER MACHINES & ROBOTICS
- Die achsparallelen Amplituden verringern die Schnittkraft und dadurch die Belastung der Schneide.
- Gezielte Oberflächen Strukturierung





Gliederung

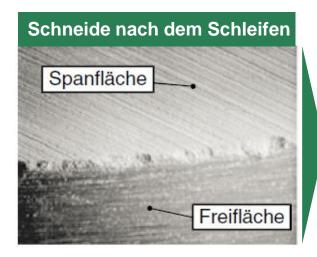
- 1. Trends in der Zerspanung früher und heute
- 2. Theoretische Prozessoptimierung
- 3. Potenziale aus der ganzheitlichen Betrachtung
- 4. Prozessintegration und Hybridisierung
- 5. Vom Prozess zur Schneide
- 6. Aus der Wissenschaft für zukünftige Prozesse
- 7. Fazit und Zusammenfassung

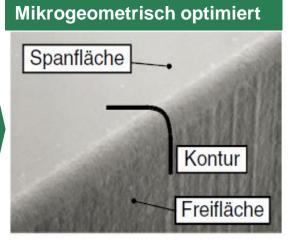


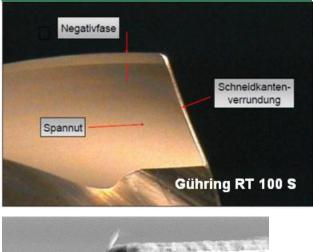


Von der Makrogeometrie zur Mikrogeometrie

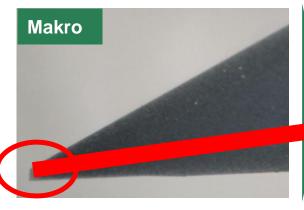
Die Betrachtung und Optimierung der Mikrogeometrie ermöglicht zusätzliches Potenzial zur Standzeiterhöhung und Qualitätsverbesserung

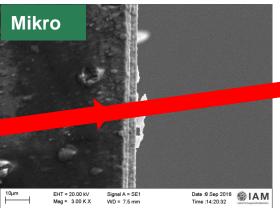


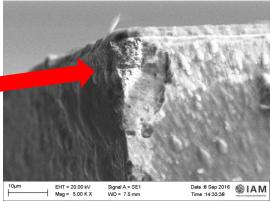




Mikrogeometrisch opt. Bohrer







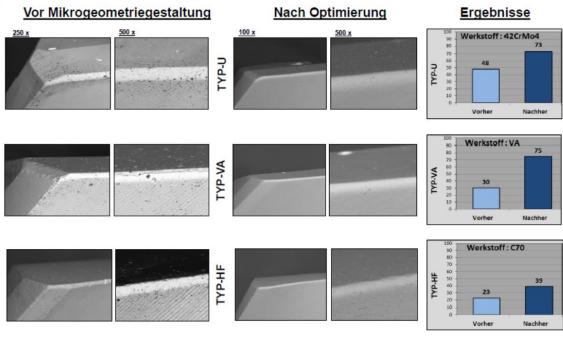
Prof. Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried





Beherrschung der Mikrogeometrie





GÜHRING

Verbesserte Oberflächen	→	Reibwiederstand reduziert
Stabile und glatte Schneidkanten	→	verbesserte Schichthaftung
Verringerung der Schnittkräfte	→	bessere Span- und Wärmeabfluss



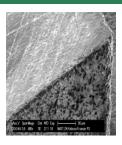


Hochleistungsprozesse Diamantschneidstoffe

Chemical Vapour Deposition Diamanten (CVD-D) Der Vorteil im Vergleich zu polykristallinem Diamant (PKD) ist die hohe Reinheit (99% Diamantanteil) der Diamantschicht und die daraus resultierende höhere Härte und Verschleißfestigkeit. Die Härte von CVD-D ist somit nahezu identisch mit der Härte von MKD, aber nicht anisotrop, d. h. nicht richtungsabhängig.



HM-Diamantbe schichtet



PKD



CVD-D, poliert

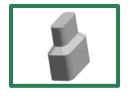








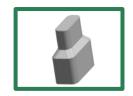




Bearbeitungszeit 13 Stunden







Bearbeitungszeit 8 % gegenüber konv. Fertigung



- Prozesszeiteinsparung bis zu 75% und mehr
- Komplettbearbeitung komplexer Konturen
- konventionelle Bearbeitungsmaschinen
- keine bzw. geringere Nachbearbeitung
- kein Abrichten / Schärfen der Schleifmitteln
- erreichbare Oberfläche R_z1





Gliederung

- 1. Trends in der Zerspanung früher und heute
- 2. Theoretische Prozessoptimierung
- 3. Potenziale aus der ganzheitlichen Betrachtung
- 4. Prozessintegration und Hybridisierung
- 5. Vom Prozess zur Schneide
- 6. Aus der Wissenschaft für zukünftige Prozesse
- 7. Fazit und Zusammenfassung

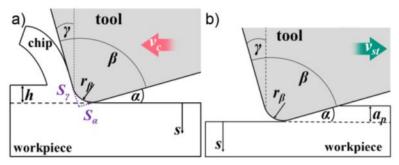




Hybride Fertigungsverfahren- Komplementärzerspanung

Gezieltes Surface Engineering durch die Kombination von Zerspanung und mechanischer Oberflächenbehandlung (WBK KIT Karlsruhe)

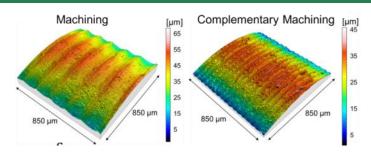
Prozessablauf



a) Zerspanung b) mechanische Oberflächenbehandlung [1]

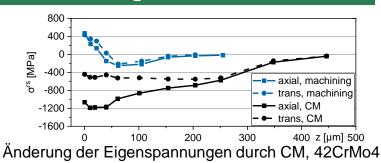
- Integration von mechanischer Oberflächenbehandlung in den Zerspanungsprozess.
- Kein Umspannen oder Werkzeugwechsel.
- Die Prozessstrategie ermöglicht die gezielte Einstellung von Randschichtzuständen, wie Rauheit, Eigenspannungen, Verfestigung und Mikrostruktur.

Beeinflussung der Oberflächengüte



Resultierende Rauheit durch CM, 42CrMo4 [1]

Beeinflussung der Randzone



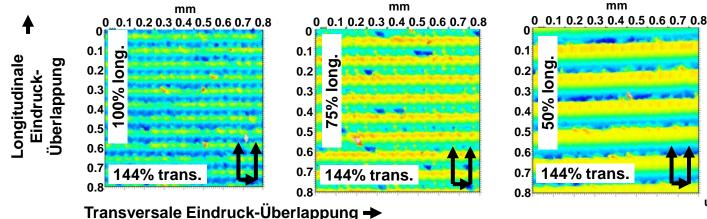
Quelle: wbk Karlsruhe

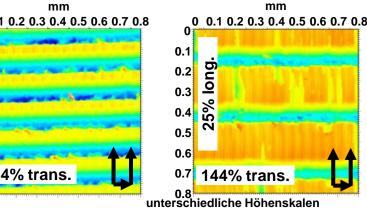




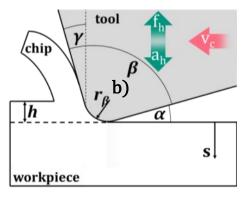
Hybride Fertigungsverfahren- Hämmerndes Drehen

Integration von maschinellem Oberflächenhämmern zur synchronisierten Oberflächenbehandlung im Zerspanprozess (WBK KIT Karlsruhe)



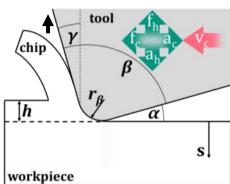


- Finishing und Texturierung in einem Prozessschritt.
- Beeinflussung von Randschichtzuständen, wie Rauheit, Eigenspannungszustand, Kaltverfestigung und Mikrostruktur.



[4] Segebade et al. 2017

Quelle: wbk Karlsruhe

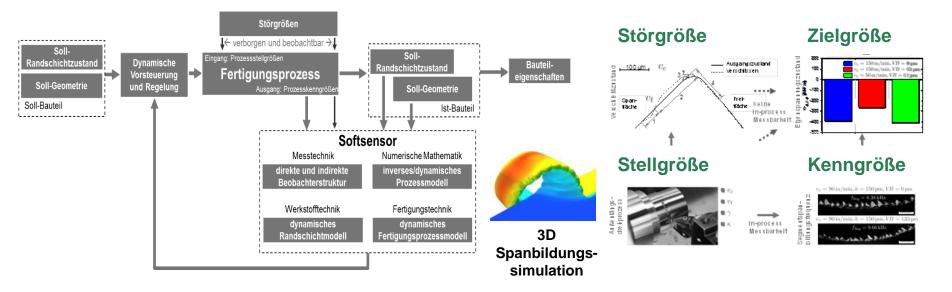






Prozessgestaltung durch Zusammenführung von Sensorik und Simulation

Messung von Randschichtzuständen bereits während der Fertigung, Verwenden von mechanismenorientiertem Prozesswissen zur Vorhersage des Randschichtzustands und Etablieren einer flexiblen Regelung.



Ziel: Vorgabe eines gewünschten Randzonenzustands, Störgrößen wie Toleranzen, Werkzeugverschleiß, Materialstreuungen werden ergebnisorientiert im Prozess ausgeregelt.

Quelle: wbk Karlsruhe

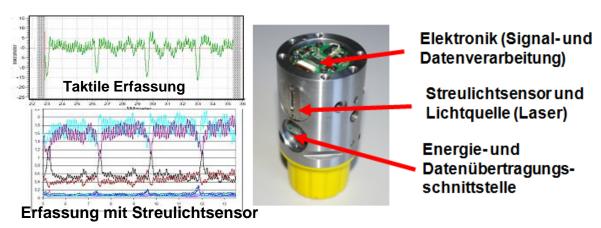




Sensorintegrierter Messkopf Vermessung in der Maschine

Beleuchtung der Oberfläche mit einem fokussierten Laserstrahl und Erfassung des reflektierten Streulichts mit einem optischen Sensor





- Integration eines Lasertriangulations-Messkopfes in eine Werkzeugmaschine
- schnelle Messung von Geometriekenngrößen an Bauteilen

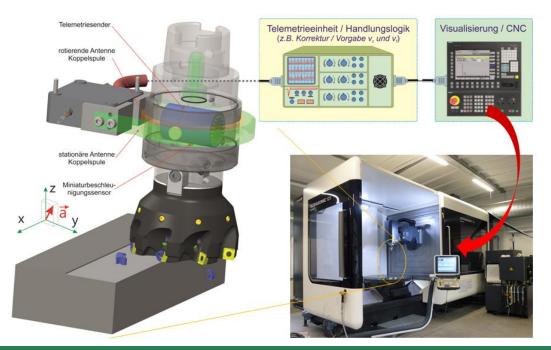
Quelle: GFE Schmalkalden





Schwingungsreduktion durch Einsatz sensorischer Werkzeuge

Sensorgestützte Prozessregelung bei der Hartzerspanung (DynaTool)



Quelle: GFE Schmalkalden

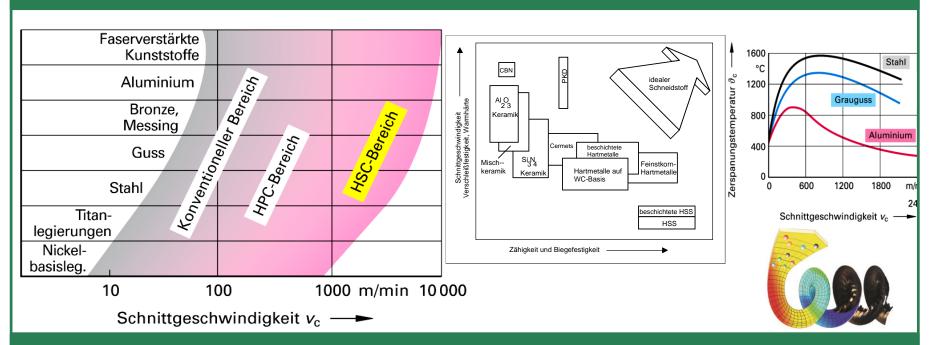
- Integration eines Sensor Aktorsystems in das rotierende Werkzeug
- Prozessregelung direkt an der Schneide (Schwingungsreduktion)





Prozesse der Zukunft

Zukünftige Prozesse HSC (High Speed Cutting) Bearbeitung mit sehr hohen Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten



Das Verständnis bezüglich der Vorgänge im Material und an der Schneide wird sich kontinuierlich erhöhen. Basis dafür sind auch die Möglichkeiten aus Industrie 4.0. Damit werden die simulativen Abbildungen realer und selbstverständlicher.





Gliederung

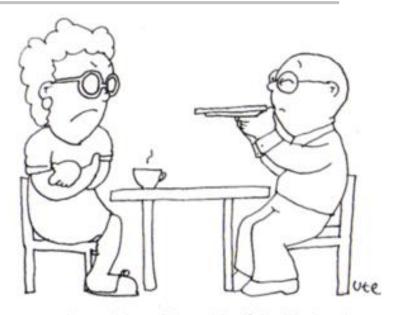
- 1. Trends in der Zerspanung früher und heute
- 2. Theoretische Prozessoptimierung
- 3. Potenziale aus der ganzheitlichen Betrachtung
- 4. Prozessintegration und Hybridisierung
- 5. Vom Prozess zur Schneide
- 6. Aus der Wissenschaft für zukünftige Prozesse
- 7. Fazit und Zusammenfassung





Zusammenfassung

- Prozessoptimierung und Prozessintegration bieten erhebliches wirtschaftliches Potenzial
- Die Optimierungsmöglichkeiten sind vielfältig, zukünftige Entwicklungen werden weiterhin Optimierungen zulassen
- Durch die ganzheitliche und übergeordntete Betrachtung lassen sich ungeahnte Potenziale schöpfen



So sehr er sich auch bemühte, Heinz Eberhard Konnte beim Blick über den Tellerrand wirklich nichts Neues entdecken...

Keine Prozess ist perfekt! → Ein Blick über den Tellerrand lohnt Besonders unter dem Aspekt neuer Entwicklungen im Bereich Schneidstoffe, Werkzeuganwendungen, Maschinensteuerung und Informationstechnologie sollten Prozesse ständig hinterfragt und neu durchdacht werden.





Die Ausarbeitung des Vortrags erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Hahn und Kolb und den Mitgliedern des Vereins Zukunftsorientierte Zerspanung





Prazisionsdrehteile GmbH & Co. KG Egerländer Straße 7 87724 Ottobeuren www.aberger.de



bielomatik Leuze GmbH & Co. KG Daimlerstraße 6-10 72639 Neuffen



GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden

Näherstiller Straße 10 98574 Schmalkalden www.gfe-net.de



Herderstraße 50-54 72458 Albstadt www.guehring.de



Kristen + Görmann KG Robert-Bosch-Straße 6 77871 Renchen www.kristen-goermann.de



Universität Kaiserslautern Gottlieb-Daimler Straße 42/466 67663 Kaiserslautern

www.fbk-ki.de



Bilz Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG Vogelsangstraße 8 73760 Ostfildern www.bilz.de



Bosch Group 97816 Lohr am Main www.boschrexroth.de

www.bielomatik.de



Hartmetall-Werkzeugfabrik Paul Horn GmbH Unter dem Holz 33-35 72072 Tübingen www.phom.de



Hoffmann Göppingen Qualitätswerkzeuge GmbH & Co. KG Ulmer Straße 70 73037 Göppingen www.hoffmann-group.com



Majer Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG Siemensstraße 10 78564 Wehingen www.maier-machines.de



mesa parts Mesa Parts GmbH Im Gewerbegebiet 1 79853 Lenzkirch Turning into Solutions. www.mesa-parts.com



Prazisionsbohrtechnik GmbH

Längenfeldstraße 4 72585 Riederich www.botek.de

DAIMLER Daimler AG

Mercedsstraße 137 70546 Stuttgart www.daimler.com



HPM Technologie GmbH Rudolf-Diesel-Straße 3 72525 Münsingen www.hpmtechnologie.de



Industrial Technologies (ITE) Hochschule Furtwangen Kronenstraße 16 78532 Tuttlingen www.hfu-campus-tuttlingen.de



Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut (NMI) an der Universität Tübingen Markwiesenstraße 55

www.nmi.de

72770 Reutlingen



Werkzeugmaschinen GmbH Seedorfer Straße 91 78713 Schrambergwww.sw-machines.de



DECKEL MAHO Pfronten CmhH DECKEL-MAHO-Straße 1

87459 Ptronten

www.dmgmori.com

() - DEUBLIN Deublin GmbH

Florenz-Allee 1 55129 Mainz www.deublin.eu



Produktionstechnik (wbk) Karlsruher Institut für Technologie Kaiserstraße 12 76131 Karlsruhe



Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) Universität Stuttgart Holzgartenstraße 17 70174 Stuttgart www.ifw.uni-stuttgart.de



SKF Lubrication Systems Germany GmbH Motzener Straße 35/37 www.skf.com/schmierung



W. Mauch Consulting & Engineering Max-Planck-Weg 2 www.mauch-consulting.de



Ernst Graf GmbH Rosenstraße 1 78661 Dietingen-Böhringen werkzeugsysteme de



FFG Europe & Americas Salacher Straße 93 73054 Eislingen/Fils www.mag-las.com



ISBE GmbH Bahnhofstraße 29 70372 Stuttgart www.isbe.de

www.wbk.kit.edu



Komet Group GmbH Zeppelinstraße 3 74354 Besigheim www.kometgroup.com



Walter AG Derendinger Straße 53 72072 Tübingen www.waiter-tools.com

Natürliche Personen Dr.-Ing. Jürgen Fronius Dr. Martin Herrmann Prof. Dr.-Ing. Tahghi Tawakoli