

## **Titel**

# **Walzenstirnfräser mit neuartiger Flankengestalt**

IGF-Nr.: 19654 N

---

## **Forschungseinrichtungen**

Forschungseinrichtung: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)



Ansprechpartner beim Institut:

M. Sc. Arnd Heckemeyer  
0511 / 762 5207  
heckemeyer@ifw.uni-hannover.de

---

## **Danksagungen**

Das IGF-Vorhaben 19654 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Ausgangssituation

Ein wesentliches Maß für die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Schrupperspanung ist das Zeitspanvolumen, zu dessen Maximierung die Hochleistungszerspanung (HPC) zum Einsatz kommt [Wert04]. Als Werkzeuge werden neben Vollhartmetallfräsern vor allem Walzenstirnfräser mit spiralförmig angeordneten rechteckigen Wendeschneidplatten (WSP) eingesetzt [Wert04]. Typische Anwendungsfälle sind die Bearbeitung von großen Stahlbauteilen, beispielsweise Komponenten für Dieselmotoren und Schiffsmotoren [Hobo10], von Lagerschalen im Anlagenbau [Sche09] oder von Gussgehäusen für Windkraftanlagen [Fink09]. Zudem wird die HPC-Bearbeitung bei der Schruppbearbeitung von Integralbauteilen aus Titanlegierungen in der Luftfahrtindustrie angewendet [Schm12]. Bei Walzenstirnfräsern mit Durchmessern bis 80 mm treten Zerspankräfte bis 50 kN und Schnittmomente bis 1.000 Nm auf [Heuw14, Lang15]. Diese hohe mechanische Belastung ist aufgrund der begrenzten Steifigkeit und Festigkeit von Werkzeug und Werkzeugmaschine die wesentliche Verfahrensgrenze für die weitere Erhöhung der Produktivität [Denk11]. Dies stellt gerade für KMUs als Endanwender einen Wettbewerbsnachteil dar, weil für den effizienten Betrieb der heute üblichen Walzenstirnfräser leistungsstarke und damit teure Werkzeugmaschinen notwendig sind. Aufgrund seiner hohen Leistungsfähigkeit stellt der Walzenstirnfräser jedoch ein wichtiges Instrument zur Sicherung des Hochlohn-Produktionsstandorts Deutschland dar.

Eine Möglichkeit, die Produktivität von Walzenstirnfräsern bei gegebener Maschinenleistung deutlich zu erhöhen, besteht in der Variation der Flankengestalt der Werkzeuge. Werden runde Wendeschneidplatten anstelle der heute verwendeten rechteckigen eingesetzt, können die radialen Kräfte reduziert und ein erhöhter Kraftanteil in axialer Richtung, in der das System Werkzeug/Hauptspindel die maximale Steifigkeit besitzt, eingeleitet werden (Abbildung 1).

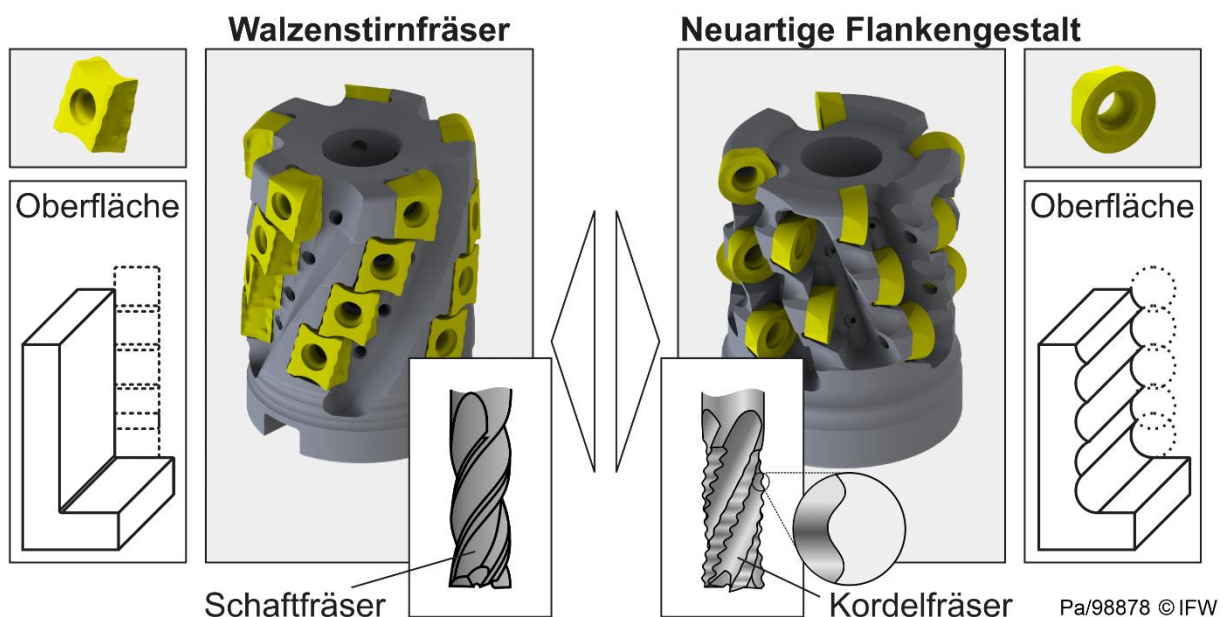


Abbildung 1: Referenzwerkzeug und neuartige Flankengestalt

Der neuartige Ansatz überträgt somit die prinzipielle Wirkungsweise von Hochvorschubfräsern oder auch kordelverzahnten Schafffräsern auf Walzenstirnfräser [Koca13]. Der scheinbare Nachteil der Fertigung einer unebenen Werkstückflanke beim Fräsen mit runden Wendeschneidplatten ist hierbei akzeptabel, da in der Regel ohnehin nachfolgende Schlichtoperationen eingesetzt werden.

Eine wesentliche Herausforderung des Vorhabens bestand in der gezielten Auslegung der neuen Werkzeuge. Die Auslegung der Werkzeugmakrogeometrie ist zurzeit erfahrungsbasiert und erfolgt maßgeblich in einem zeit- und kostenintensiven iterativen Prozess [Fisc04, Bush12]. Insbesondere bei dem Einsatz einer nicht rechteckigen Flankengestalt ergeben sich zusätzliche Herausforderungen. So weist die Werkzeuggeometrie eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden auf (Krümmung der Schneidkante, axialer/radialer Versatz der WSP, Zahnteilung, etc.). Aus der Werkzeuggeometrie ergeben sich durch den sichelförmigen Spanungsquerschnitt komplexe Eingriffsbedingungen, die im Gegensatz zum rechteckigen Spanungsquerschnitt nicht durch analytische Gleichungen beschrieben werden können. Zudem sind die Wirkzusammenhänge zwischen der Werkzeuggeometrie, den Eingriffsbedingungen und dem Einsatzverhalten nicht hinreichend bekannt.

Aus den genannten Herausforderungen resultiert ein hoher experimenteller Aufwand für die Auslegung des vorgeschlagenen, neuartigen Werkzeugtyps. Speziell für KMU in der Werkzeugentwicklung stellt dies wegen der hohen Kosten einen wesentlichen Hinderungsgrund für die weitere Verbreitung dieses Werkzeugtyps dar. Ebenso stehen Endanwender vor einer Kosten- und Aufwandshürde, das volle Potenzial dieses Werkzeugtyps erfolgreich einzusetzen. Die stetige Innovation im Bereich der Produktionstechnik ist jedoch für die Sicherung des Produktionsstandorts Deutschland von grundlegender Bedeutung.

Um den experimentellen Aufwand zu reduzieren und somit die Entwicklungskosten zu senken, wurden die empirischen Untersuchungen der Wirkzusammenhänge des neuartigen Werkzeugtyps gezielt durch Simulationen unterstützt. Hier existiert mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) ein leistungsfähiger Ansatz, um die Spannungen und Temperaturen zu berechnen und somit Aussagen über die Prozesskräfte, die Werkzeugbelastung und die Spanbildung zu erhalten [Zabe10, Denk11]. Insbesondere beim Fräsen (dreidimensionale Formänderung) mit großen Schnitttiefen dauert die Berechnung einer Werkzeugumdrehung mehrere Tage, sodass die FEM für die Auslegung von Walzenstirnfräsern nur teilweise geeignet ist [Matt08, Denk11]. Die Berechnung der Prozesskräfte und -leistungen ist mit empirischen Modellen auf Basis eines geometrischen Materialabtrags [Alti01] mit geringerem Rechenaufwand möglich. Eingesetzt wird dieses Verfahren bereits zur Optimierung der Prozesseinstellgrößen hinsichtlich der Werkzeugabdrängung, maximalen Prozesskräften und Prozessstabilität [Matt08, Alti14, Alti15, Saff10, Bier10]. Es ist somit möglich, mittels geometrischer Abtragssimulation Aussagen über das Einsatzverhalten von Walzenstirnfräsern mit alternativer Flankengestalt zu erhalten. Hierfür werden jedoch geeignete Kraftmodelle benötigt, welche die Prozesskraftanteile in Abhängigkeit des Spanungsquerschnitts und der Position der Wendeschneidplatten vorhersagen.

---

## Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, das Zeitspanvolumen von Walzenstirnfräsern bei der Bearbeitung von Ti-6Al-4V und 42CrMo4 bei gleicher Spindelleistung und Standzeit um mindestens 30 % zu steigern.

Um dieses Ziel zu erreichen, war die Erarbeitung von mehreren Teilzielen erforderlich: Das erste Teilziel war die Verfügbarkeit einer umfassenden Datenbasis über das Einsatzverhalten von Walzenstirnfräsern. Diese experimentell ermittelte Datenbasis wurde zur Kalibrierung von Kraft-, Material- und Reibmodellen verwendet und diente als Referenz, um das Potential alternativer Flankengeometrien aufzuzeigen. Mit dem zweiten Teilziel sind die signifikanten Einflüsse der Werkzeuggeometrie (Einstellwinkel, Drallwinkel, etc.) auf die Werkzeugbelastung und die Spanformung identifiziert und quantifiziert worden. Dazu wurde mit der zuvor ermittelten Datenbasis ein Simulationsmodell erstellt, mittels dessen die Werkzeugbelastungen und die Spanformung bei beliebigen Walzenstirnfräsern innerhalb der Modellgrenzen berechnet werden konnten. Das dritte Teilziel war die Kenntnis einer Werkzeuggeometrie, die zu einer signifikanten Reduzierung des Drehmoments und der Radialkraft unter Gewährleistung der Prozesssicherheit führt. Das vierte Teilziel war die Steigerung der Produktivität gegenüber konventionellen Walzenstirnfräsern bei konstanter Spindelleistung.

---

## Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden Referenzuntersuchungen mit konventionellen Walzenstirnfräsern durchgeführt. Dabei wurde die maximale Radialkraft, wie in Abbildung 2 dargestellt, als wesentliche Prozessgrenze identifiziert.

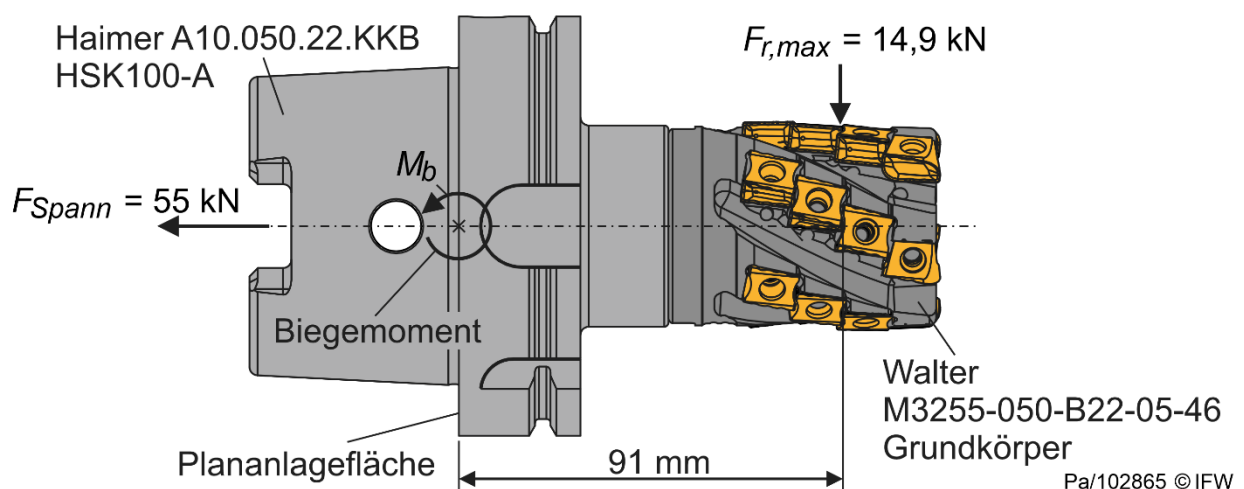


Abbildung 2: Radialkraft und Biegemoment des Referenzprozesses

Ausgehend von der Plananlagefläche der ausgewählten HSK-Aufnahme A10.050.22.KKB der Firma Haimer ergibt sich ein Abstand von 91 mm zur Mitte der Werkzeugschneiden. Unter der Annahme, dass die Radialkraft idealisiert in der Mitte der Schneiden angreift, ergibt sich ein Biegemoment um die Plananlagefläche von  $M_b = 1.356 \text{ Nm}$ . Um das maximal zulässige Grenzbiegemoment zu bestimmen, wurde die Spannkraft  $F_{\text{spann}}$  mit einem Spannkraftprüfer zu  $F_{\text{spann}} = 55 \text{ kN}$  gemessen. Hieraus resultiert nach Weck ein maximal zulässiges Grenzbiegemoment von  $M_{b,\text{grenz}} = 1.400 \text{ Nm}$  [Weck06]. Die maximale Radialkraft ist somit die prozesslimitierende Größe, da 97 % des zulässigen Biegemoments bereits erreicht sind.

Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte ein Kraftmodell kalibriert werden, mit dem die Prozesskräfte in Abhängigkeit des Spanungsquerschnitts berechnet werden können. Die Herausforderung bestand im Folgenden in der Bestimmung der Eingriffsbedingungen für beliebige Flankengeometrien bei Verwendung runder Wendeschneidplatten. Zu diesem Zweck wurde eine Materialabtragssimulation mit einem Dixelmodell nach Abbildung 3 erstellt.

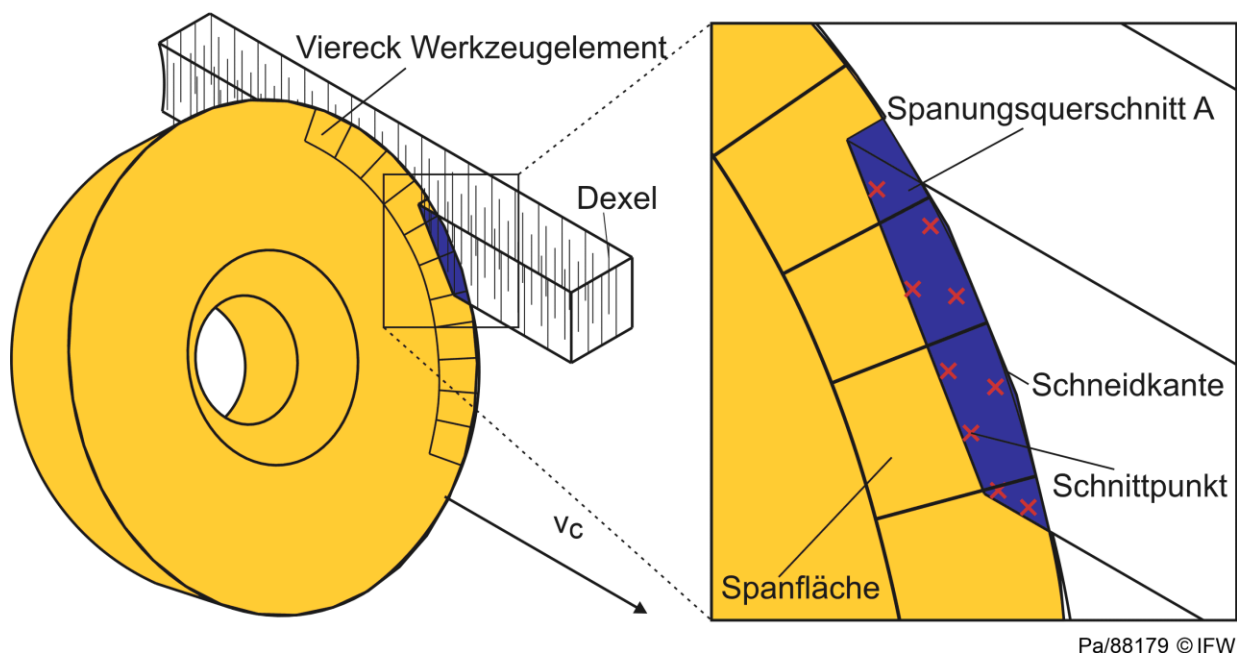


Abbildung 3: Berechnung der Eingriffsbedingungen mit dem Dixelmodell

Mit diesem Modell können in kurzer Zeit Fräsprozesse mit mehreren Tausend Werkzeuggeometrien berechnet und die hinsichtlich der maximalen Radialkraft optimale Anordnung der Wendeschneidplatten bestimmt werden. Basierend auf den in der Optimierung ermittelten Werkzeugparametern wurde ein Grundkörper konstruiert, der in Abbildung 4 dargestellt ist.

Der konstruierte Grundkörper wurde anschließend von der Walter AG gefertigt und, wie in Abbildung 4 dargestellt, unter den Prozessstellgrößen des Referenzprozesses eingesetzt. Die Untersuchungen zeigen, dass der Plattensitz eine ausreichende Festigkeit zur Aufnahme der Prozesskräfte hat. Zudem tritt kein Verklemmen von Spänen auf, sodass hinreichend Spanraum zur Verfügung steht.



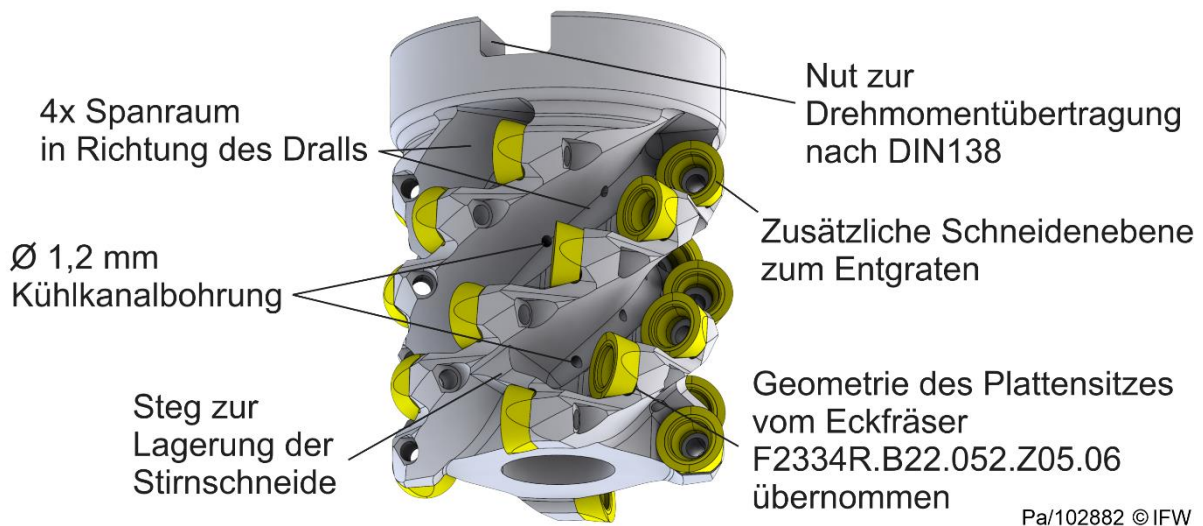


Abbildung 5: Konstruktion des Grundkörpers

Die in den Untersuchungen gemessenen Kräfte wurden mit den in der Simulation bestimmten Werten verglichen. Durch den gemessenen Maximalwert der Radialkraft von  $F_{r,max,exp} = 11,65 \text{ kN}$  wird die Simulation mit einem Maximalwert von  $F_{r,max,sim} = 11,60 \text{ kN}$  validiert. Mit der neuartigen Flankengeometrie kann die Radialkraft als wesentliche Prozessgrenze somit um 21 % signifikant reduziert werden.



<b>Prozess:</b>	<b>Einstellgrößen:</b>		
Stirn-Umfangsfräsen	Schnittgeschw. $v_c = 45 \text{ m/min}$	Schnitttiefe	$a_p = 40 \text{ mm}$
Ti-6Al-4V	Zahnvorschub $f_z = 0,15 \text{ mm}$	Schnittbreite	$a_e = 30 \text{ mm}$
			Pa/102881 © IFW

Abbildung 4: Experimentelle Untersuchungen

---

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen im Projekt haben ergeben, dass die resultierende Radialkraft eine wesentliche Prozessgrenze für die Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit von Walzenstirnfräsern darstellt.

Um das Potential der Werkzeuge infolge des Einsatzes runder Wendeschneidplatten optimal zu nutzen, erfolgte eine Auslegung der Werkzeuggeometrie mittels geometrischer Materialabtragssimulationen. Die Berechnung der Prozesskräfte und Randbedingungen ergeben nichtlineare Zusammenhänge, die auf Basis von Erfahrungswissen nicht ermittelt werden können. Eine auf Erfahrung basierte Auslegung mit manueller Positionierung der Wendeschneidplatten ist somit nicht mehr zielführend. Es wurde schlussendlich gezeigt, dass durch den Einsatz der neuartigen Flankengestalt die Prozesskräfte reduziert und die Produktivität signifikant gesteigert werden kann.

Der hier entwickelte und vorgestellte Ansatz beschränkt sich dabei nicht nur auf Walzenstirnfräser mit runden Wendeschneidplatten, sondern kann auf beliebige Werkzeuggeometrien erweitert werden. Insbesondere für Sonderwerkzeuge wie z. B. Formfräser ergeben sich komplexe Eingriffsbedingungen, die mittels des Simulationsansatzes berechnet und zur Auslegung genutzt werden können.

---

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Sc. Arnd Heckemeyer unter 0511 / 762 5207.

## Literatur:

- [Alti01] Altintas, Y.; Engin, S.: Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part 2: inserted cutters, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, S. 2213-2231, 2001
- [Alti14] Altintas, Y.; Kersting, P.; Biermann, D.; Budak, E.; Denkena, B.; Lazoglu, I.: Virtual process systems for part machining operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63, S. 585–605, 2014
- [Alti15] Altintas, Y.; Surmann, T.; Böß, V.: Virtual High Performance Machining of Aerospace Parts, 6. Machining Innovations Conference, Hannover, S. 260-279, 2015
- [Bier10] Biermann, D., Kerstin, P., Surmann, T.: A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, S. 125-128, 2010
- [Bush12] Busch, M.: Werkzeugstudie 2012. *VDI-Z Special Werkzeuge*, 154, S. 18-20, 2012
- [Denk11] Denkena, B.,; Tönshoff, H. K.: *Spanen – Grundlagen*. Springer-Verlag, 2011
- [Fink09] Fink, M.: Werkzeuglösungen für High Performance Cutting. *VDI-Z Special Werkzeuge*, 151, S. 16-18, 2009
- [Fisc04] Fischer, C. E.; Mylavaram, N. K. R.: Design and Simulation of Cutting Tools, *CIRP High Performance Cutting Conference*, Aachen, S. 45-58, 2004
- [Heuw14] Heuwinkel, M.: Innovative Machining Strategies for Aerospace Components, 5. Machining Innovations Conference, Hannover, S. 150-169, 2014
- [Hobo10] Hobohm, M.: Die Solide: Wendeschneidplatte zur Schwerzerspannung im Dieselmotorenbau. *Werkstatt + Betrieb*, 11, S. 26-29, 2010
- [Lang15] Lange, M.: HPC of Aluminum and Titanium Aircraft Components – Challenges and Trends, 6. Machining Innovations Conference, Hannover, S. 4-15, 2015
- [Matt08] Mattes, A. M.: Zerspansimulationen für die Werkzeugkonstruktion und Prozessauslegung beim Fräsen. Dr.-Ing Dissertation, Technische Universität Berlin, 2008
- [Saff10] Saffar, R. Jalili; Razfar, M. R.: Simulation of end milling operation for predicting cutting forces to minimize tool deflection by genetic algorithm, *Machining Science and Technology*, 14, S. 81–101, 2010
- [Sche09] Schenk, W. D.: Walzenstirnfräser steigert Wirtschaftlichkeit und Qualität. *VDI-Z Special Werkzeuge*, 151, S. 22-23, 2009
- [Schm12] Schmidt, D.: Konzepte zum Abheben. *Werkstatt + Betrieb*, 3, S. 52-54, 2012
- [Weck06] Weck, M.: *Werkzeugmaschinen 5*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006
- [Wert04] Wertheim, R.; Goldberg, M.; Brenner, K.: Approaches to Maximization of Material Removal Rates. *CIRP High Performance Cutting Conference*, Aachen, S. 137–154, 2004
- [Zabe10] Zabel, A.: *Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen*, Habilitationsschrift, TU Dortmund, 2010