

# Praktische Verifikation einer kraftmodellbasierten Zerspan-simulation für die simultane 5-Achs-Fräsbearbeitung

Dr.-Ing. Seok Won Lee, Dipl.-Ing. Frank Arnold

## 1 Einleitung

In einer vorherigen Veröffentlichung /Lee-11/ wurden die theoretischen Grundlagen der Entwicklung eines virtuellen Zerspanprozessmodells beim simultan 5-achsigen Fräsen dargelegt. Diese Arbeiten entstanden im Zuge der Bearbeitung des Förderprojektes „OptiMill-5ax“. Das Ziel des Projektes ist die softwaretechnische Entwicklung der prozessmodellbasierten Bearbeitungssimulation mit Optimierung des NC-Codes für das simultane 5-Achs-Fräsen im Rahmen der virtuellen Fertigung. Mit Hilfe eines weiterentwickelten NC-Simulationskerns (NCSK) wird ein nach dem Stand der Technik neuer Ansatz für das Prozessmodell durch die Ableitung des aktuellen Spanvolumens pro Zahn aus den realen Eingriffsverhältnissen für gängige Werkzeugtypen vorgestellt.

Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist es, die theoretisch gewonnen Erkenntnisse in Abgleich mit experimentell bestimmten realen Kraftwerten zu bringen und somit die zugehörigen Konstanten der Kraftkomponenten zu bestimmen und diese anhand der ermittelten Werte zu experimentell zu bestätigen.

Anhand des Abgleichs der gemessenen Verläufe der Kraftkomponenten, mit den durch ein entwickeltes Hilfsprogramm generierten theoretischen Kraftwerten, soll durch die Variation der Schnittparameter die Bestimmung der Schnittkraftkonstanten realisiert werden.

## 2 Planung der Versuche

Zunächst sind, ausgehend von den im Zuge der Bearbeitung des Forschungsprojektes entstandenen Ergebnissen, die für die durchzuführenden Experimente wesentliche beeinflussende Parameter wie folgt anzugeben:

- Werkzeugradius  $r$
- Werkzeugdrallwinkel  $\lambda$
- Schneidkantenradius  $r_n$
- Zahnvorschub  $f_z$
- Schnitttiefe  $a_p$
- Arbeitseingriff  $a_e$

Bei den Einflussgrößen auf die Schnittwerte kann man zwischen Prozess- und Werkzeugparametern unterscheiden. Die Prozessparameter stellen dabei  $a_p$ ,  $a_e$  und  $f_z$  dar, welche direkt im NC-Programm angepasst werden können. Die Werkzeugparameter stellen dabei  $\lambda$ ,  $r$  und  $r_n$  dar. Diese sind an das verwendete Werkzeug gebunden.

Eine weitere mittelbare variable Größe ist die Schnitttiefe  $a_p$ . Die Versuche werden mit konstanter Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  durchgeführt.

Entsprechend den Abmessungen der Werkstücke und der Bearbeitungsanforderung werden zwei Typen Schafffräser und Kugelkopffräser, die häufig für die Schupp- und Schlichtbearbeitung verwendet werden, in den Versuchen benutzt. Zum Einsatz

kommen Schafffräser (SF) und Kugelkopffräser (KKF) der Fa. Hoffmann Garant /Hoff-10/ als Vollhartmetall-Ausführung.

### 3 Aufbau des Versuchstands

Die Zerspankräfte werden anhand einer Kraft-Messplattform aufgezeichnet. Diese ist nach bestimmten Kriterien auszuwählen und für die Messungen in Betrieb zu nehmen. Aufgrund des begrenzten Bearbeitungsbereichs entsprechend des Arbeitsraumes der Fräsmaschine, des auswertbaren Kraftmessbereiches und in Hinblick auf den Einsatz des Gerätes für weitere Projektaufgaben (Möglichkeit der Drehmomentenmessung in X-, Y- und Z-Achsrichtung) wurde das Mehrkomponenten Dynamometer Kistler Typ 9129AA ausgewählt. Die Gesamtmesskette ist in Abbildung 1 dargestellt.

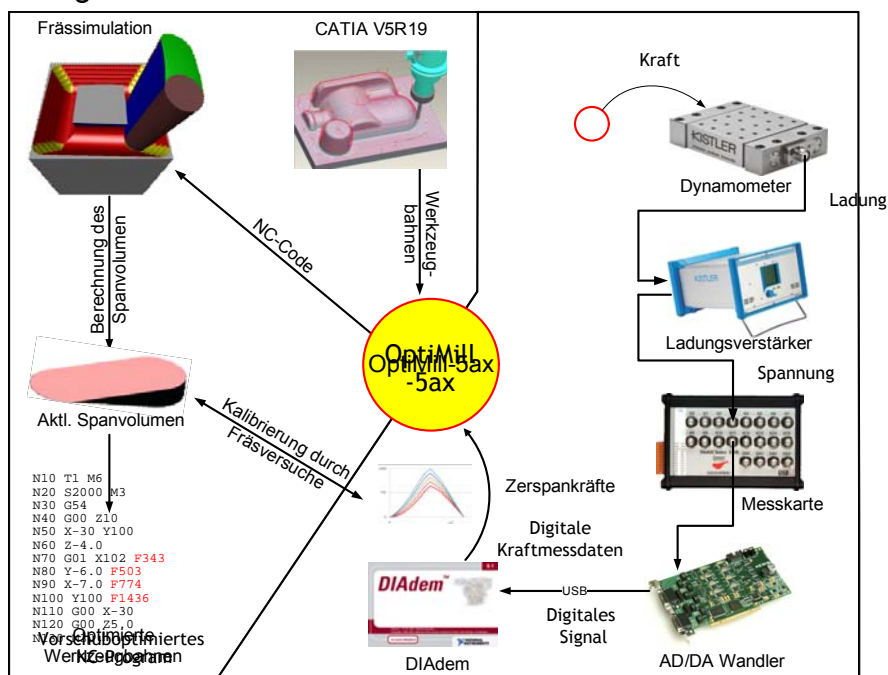


Abb. 1: Aufbau des Versuchsaufbaus

### 4 Ermittlung der Schnittkraftkoeffizienten

Durch die experimentellen Versuchsergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse, sollen nun nachfolgend die Konstanten der radialen, axialen und tangentialen spez. Schnittkräfte ( $k_{rc}$ ;  $k_{ac}$ ;  $k_{tc}$ ) und der radialen, axialen und tangentialen Schneidkantenparameter ( $k_{re}$ ;  $k_{ae}$ ;  $k_{te}$ ) bestimmt werden. Hierfür werden die Betrachtungen für den linearen empirischen Kraftansatz für den Einsatz von gedrahten Schafffräs Werkzeugen herangezogen. Die Bestimmung der Schnittkraftkoeffizienten aus den Messergebnissen ist nur möglich, wenn der Ansatz formeltechnisch auf die arithmetischen Kraftkomponentenmittelwerte umgestellt wird. Die ausgearbeiteten Formeln beziehen sich auf die konkreten Kraftwerte.

Zur Ermittlung der Variablen wurde ein Hilfsprogramm entwickelt in dem das in den theoretischen Vorarbeiten entwickelte Zerspankraftmodell softwaretechnisch umgesetzt wurde. Im Programm wurde eine entsprechende Eingabemaske für die folgenden Parameter berücksichtigt:

- Gleichlauf/Gegenlauf
- Spindeldrehzahl  $n$  in 1/min
- Zahnvorschub  $f_z$  in mm
- Werkzeugradius in mm
- Schnitttiefe  $a_p$  in mm
- Arbeitseingriff  $a_e$  in mm
- Werkzeugdrallwinkel  $\lambda$  in Grad

Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Vergleich zwischen experimentellen und simulierten Kräften beim Kugelkopffräser. Hier zu sehen sind die Kraftverläufe während der dreimaligen Umdrehungen des zweischneidigen  $\Phi 5$ -Kugelkopffräasers, der über  $30^\circ$ -Drall verfügt und  $11\mu\text{m}$  Rundlauffehler hat. Darüber hinaus verfügt das Werkzeug über  $5^\circ$  Frei- und  $26,65^\circ$  Spanwinkel sowie die Schneidkantenrundung von  $7,96\mu\text{m}$ . Abgesehen von der Differenz an den Spitzen kann man eine relativ gute Formübereinstimmung zwischen simulierten und tatsächlichen Kräften während der Perioden beobachten.

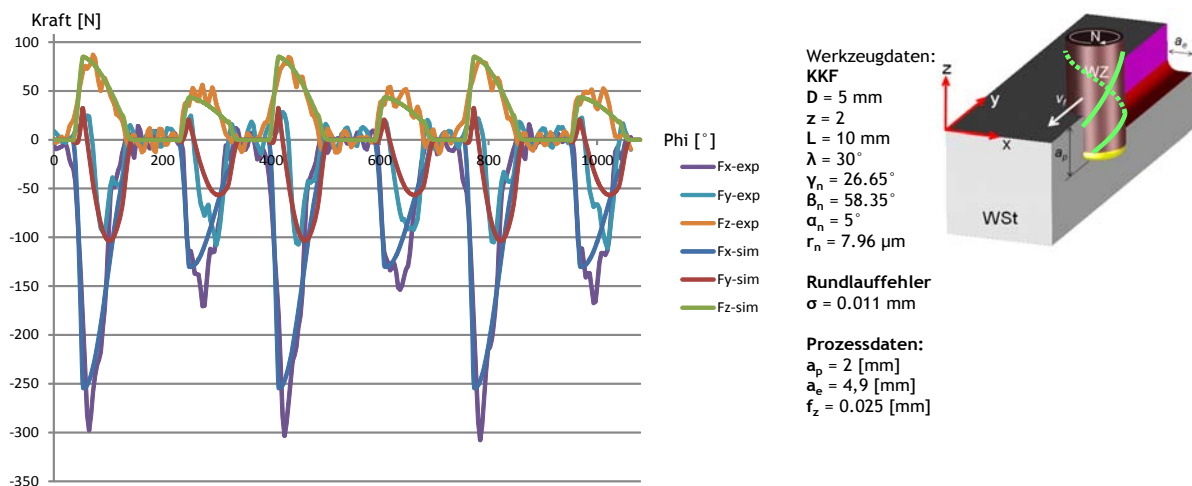


Abb. 2: Vergleich der Zerspankräfte für Kugelkopffräser

Im allgemein zeigen die Kraftdarstellungen sehr gute Übereinstimmung zwischen dem experimentell erfasste Kraftsignalen und dem Zerspankraftmodell für Schaffräser und Kugelkopffräser an. Das Zerspankraftmodell wird mit diesen überprüften spezifischen Schnittkraftkoeffizienten für SF und KKF nachfolgend zur Optimierung der Trajektoriegeschwindigkeit herangezogen.

## 5 Optimierung der Trajektoriegeschwindigkeit

Im diesen Abschnitt werden die Maßnahmen und Ergebnisse zur Optimierung der Trajektoriegeschwindigkeit mit Hilfe der SpZ-Berechnung sowie dem Zerspankraftmodell präsentiert.

Die im Projekt ausgewählte Methode zur Vorschubgeschwindigkeitsoptimierung basiert auf der Restriktion Werkzeugdurchbiegung. In der weiteren Entwicklung können zusätzlich andere schnittkraftabhängige technische Grenzen das Modell schrittweise qualifizieren. Die Vorschuboptimierung am Beispiel der ausgewählten Restriktion ist im Rahmen des Projektes zur Demonstration der Methode gut handhabbar und vom Aufwand her praktikabel realisierbar. Ziel ist die Vermeidung großer Schwankungen bei den Zerspankräften.

### 5.1 Optimierungsstrategie: zulässige Werkzeugdurchbiegung

Um den statischen Fall der Biegung zu berechnen, wurde ein Biegemodell definiert. Für einseitig eingespannte Standardwerkzeuge ist das Balkenmodell passend. Der Schafffräser wird als Balken mit zylindrischem Querschnitt angenähert. Das Werkzeug ist an der Maschinenspindel eingespannt und seine Spitze hängt frei.

Die Relation zwischen dem Vorschub pro Zahn ( $f_z$ ), der von der Vorschubgeschwindigkeit ( $v_f = z \cdot n \cdot f_z$ ) im NC-Programm abgeleitet wird, und dem angepassten Vorschub pro Zahn ( $f_{z,opt}$ ), der die konstanten Zerspankräfte erlaubt, soll klar herausgestellt werden.

### 5.2 Optimierungsmethode

Das in den theoretischen Vorbetrachtungen definierte Prozessmodell kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$F = b \cdot (k_f \cdot f_z \cdot \sin \Phi + k_r \cdot r_n) = A \cdot f_z + C \text{ oder } A \cdot f_z = F - C. \quad (1)$$

Ziel der Optimierung ist es, den maximalen Wert des Vorschubes pro Zahn ( $f_z$ ) zu berechnen, so dass die Werkzeugdurchbiegung stets innerhalb eines bestimmten Toleranzbereiches bleibt. Die Beziehung zwischen dem vorgegebenen  $f_z$  und dem optimierten Vorschub pro Zahn ( $f_{z,opt}$ ) muss eine Funktion anhand der zulässigen Werkzeugdurchbiegung ( $B_{Tol}$ ) und der aktuellen Werkzeugdurchbiegung ( $B$ ) sein.

### 5.3 Testwerkstücke

Als erster Test wird das Fräsen von Nuten ausgewählt, um mit einer uniaxialen Werkzeugbewegung das Zerspankraftmodell zunächst grundlegend und schnell zu überprüfen. Die Frässimulation und das Zerspankraftmodell wurden in C++ und MATLAB realisiert /Lee-12a, Lee-12b/. Während der Frässimulation wird das SpZ berechnet, wovon die Spannungsdicke  $h$  abgeleitet wird und die Werkzeugdurchbiegung wird in Bezug auf die maximale Kraft berechnet. Im Ergebnis der durchgeführten Fräsversuche mit Aufnahme der Prozesskräfte wurde eine

Reduzierung der Zerspankräfte durch eine Begrenzung der Werkzeugdurchbiegung nachgewiesen.

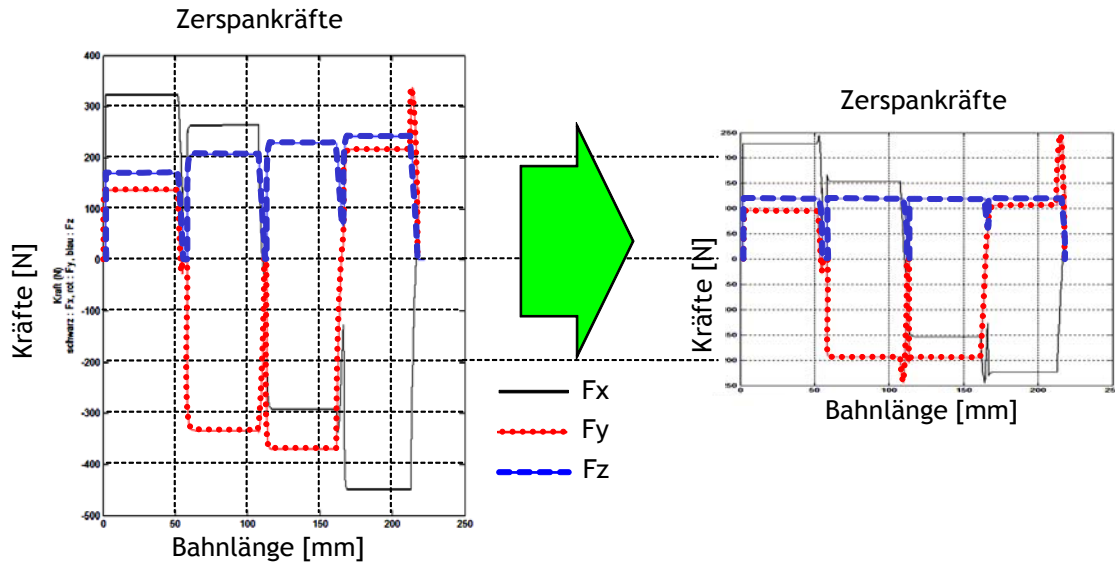
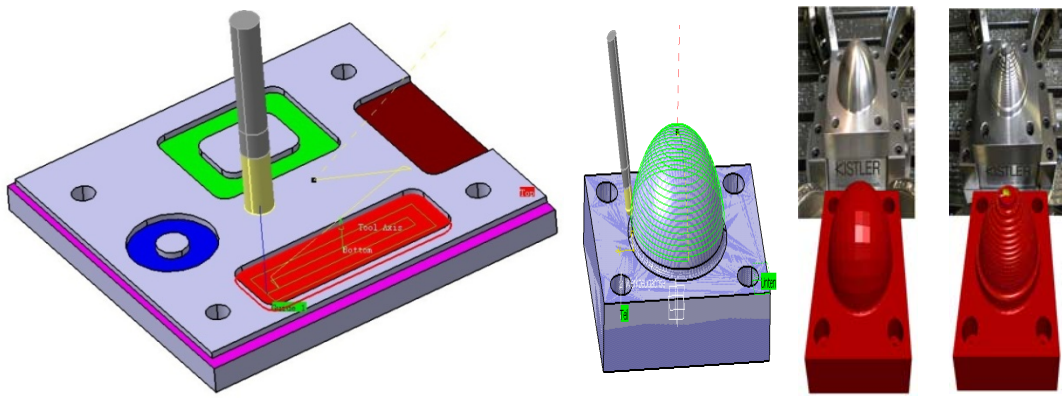


Abb. 3: Durchbiegungsmodell des Werkzeuges ( $F_x, F_y$ : Kraft in X-,Y-Richtung)

Für weitere Tests wurden Werkstücke für die 2,5D-Bearbeitung und die 3D-Bearbeitung ausgewählt und bearbeitet bei gleichzeitiger Aufnahme der entstehenden Kräfte.



(a) Werkstück 2,5D-Bearbeitung

(b) Werkstück 3D-Bearbeitung

Abb. 4: Testwerkstücke

Die Kraft wird nicht allein in X- oder Y-Richtung verglichen, sondern die resultierende Kraft in X- und Y-Richtung, welche sich nach folgender Gleichung berechnen lässt:

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \tag{2}$$

## 5.4 Auswertung der Fräsversuche

Abbildung 5 zeigt die Verläufe der resultierenden Kraft  $F_{xy}$  am Beispiel der 3D-Bearbeitung. Die Kraft in der Werkzeugachsrichtung ist vernachlässigt da diese keinen relevanten Einfluss auf die Werkzeugabbeugung hat.

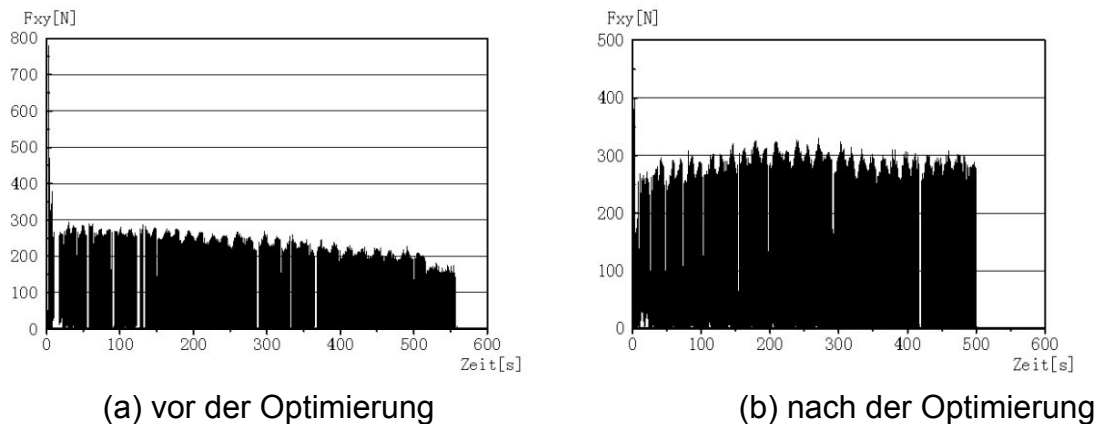


Abb. 5: Vergleich von  $F_{xy}$  zwischen originalen und optimierten Daten für Halbkugel

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kräfte im originalen Prozess immer kleiner werden und dagegen in der optimierten Situation fast konstant bleiben. Außerdem ist die Bearbeitungszeit im optimierten Prozess kürzer als die im originalen Prozess. Daher wird das Ziel der Vorschuboptimierung des Bearbeitungsprozesses bei der 2,5D- und 3D-Bearbeitung erreicht.

Der Test für das simultane 5-Achs-Fräsen, welches das ursprüngliche Anliegen ist, wird in den weiteren Ausführungen als Demonstrator näher erläutert.

## 6 Gestaltung des Mensch-Maschine-Interface (MMI)

Die Benutzeroberfläche der im Rahmen des Projektvorhabens entwickelten „OptiMill-5ax“-Software zeigt Abb. 6. Das entwickelte MMI steht zentral für das gesamte Projekt.

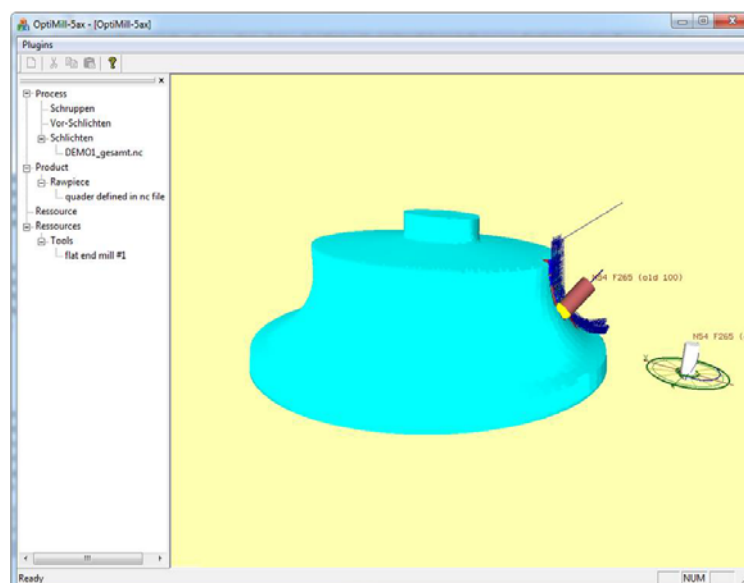
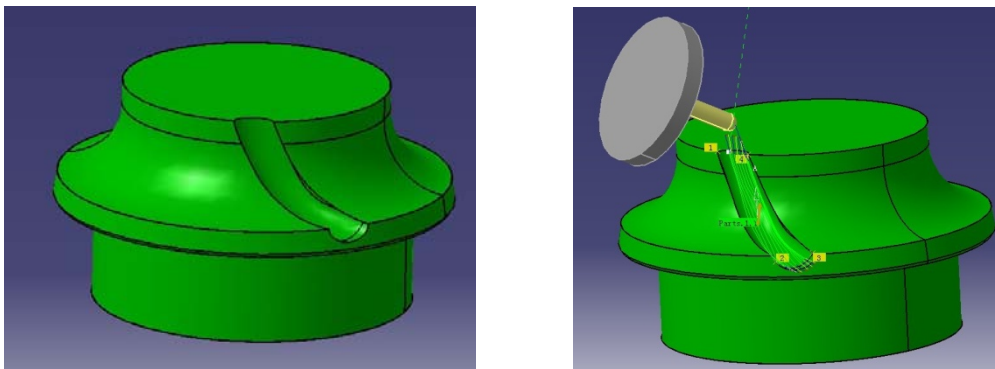


Abb. 6: Benutzungsoberfläche des Systems OptiMill-5ax

## 7 Demonstrator

Die Erprobung des erarbeiteten Optimierungssystems in der Anwendung der simultanen 5-Achs-Bearbeitung vorgesehen. Für den Test stand eine 5-Achs-Fräsmaschine zur Verfügung, welche neben den translatorischen Achsen über einen Schwenkkopf und einen Drehtisch als rotatorische Achsen verfügte.

Für die Bearbeitung wurde mit der CAD/CAM-Software CATIA V5 R19 ein Werkstück gewählt, welches über gekrümmte Flächen verfügt, damit bei der Bearbeitung dieses Teils alle 5 Achsen in einen funktionellen Zusammenhang stehen. Ein rotationssymmetrisches Teil wurde als Rohteil ausgewählt und eine gekrümmte Fläche wird entlang einer Leitkurve auf der Seite des Rohteils generiert. Auf dieser Fläche basierend wurde die Fräsbahn für das Fertigteil erzeugt.



(a) Fertigteil

(b) Fräsbahn am 5-Achs-Teil

Abb. 7: Konstruktion des 5-Achs-Teils

Bei der Bahngenerierung ist die Auswahl der Größe des Voreil- und des Kippwinkels besonders wichtig, da der Bearbeitungsraum relativ zum Werkzeug klein ist und ein ungeeigneter Voreil- und Kippwinkel zur Kollision vom Werkzeug und Werkstück führen kann. Der Werkzeugtyp ist ein Kugelfräser mit dem Durchmesser 5 mm.

Nachdem der Nullpunkt in der Mitte auf der oberen Fläche des Rohteils gesetzt wird, kann durch die Methode „Isoparametric Machining“ von CATIA die Bearbeitungsbahn erzeugt werden (Abb. 7 (b)). Das somit generierte NC-Programm wurde mit der „OptiMill-5ax“-Software einer Vorschuboptimierung unterzogen.

Die für die Bearbeitung auf 5-Achs-Maschinen verwendeten NC-Programme sind beispielhaft in Abbildung 8 dargestellt.

```
(Herstellungsprogramm.1)
N1 S6000 T1 M6
N2 M3
N3 G01 A0 X-284.723 Y19.0949 Z157.805 B-59.341 C44.102 F300
N4 X-285.347 Y17.7817 Z153.021 B-59.341 C44.102 F300
N5 X-284.421 Y17.8232 Z154.069 B-59.016 C44.428 F300
N6 X-283.969 Y17.8117 Z154.482 B-58.854 C44.591 F300
N7 X-283.573 Y17.8425 Z154.968 B-58.718 C44.728 F300
N8 X-283.405 Y17.8665 Z155.201 B-58.662 C44.785 F300
.....
.....
N571 X-286.177 Y-17.6568 Z150.364 B-59.574 C-10.597 F300
N572 X-286.916 Y-15.9842 Z155.018 B-59.574 C-10.597 F300
N573 X-304.162 Y-15.9838 Z165.147 B-59.574 C-10.597 F300
N574 M9
N575 M5
N576 M30
```

(a) originales NC-Programm

```
(Herstellungsprogramm.1)
N1 S6000 T1 M6
N2 M3
N3 G01 A0 X-284.723 Y19.0949 Z157.805 B-59.341 C44.102 F300
N4 X-285.347 Y17.7817 Z153.021 B-59.341 C44.102 F300
N5 X-284.421 Y17.8232 Z154.069 B-59.016 C44.428 F984
N6 X-283.969 Y17.8117 Z154.482 B-58.854 C44.591 F564
N7 X-283.573 Y17.8425 Z154.968 B-58.718 C44.728 F1478
N8 X-283.405 Y17.8665 Z155.201 B-58.662 C44.785 F5000
.....
.....
N571 X-286.177 Y-17.6568 Z150.364 B-59.574 C-10.597 F879
N572 X-286.916 Y-15.9842 Z155.018 B-59.574 C-10.597 F299
N573 X-304.162 Y-15.9838 Z165.147 B-59.574 C-10.597 F300
N574 M9
N575 M5
N576 M30
```

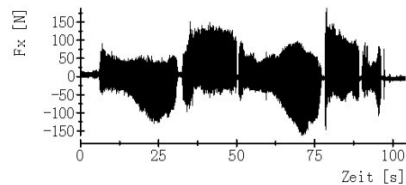
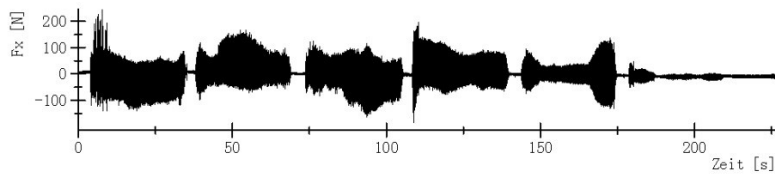
(b) vorschuboptimiertes NC-Programm

Abb. 8: Ausschnitt der NC-Programme für 5-Achs-Teil

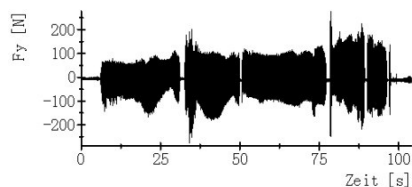
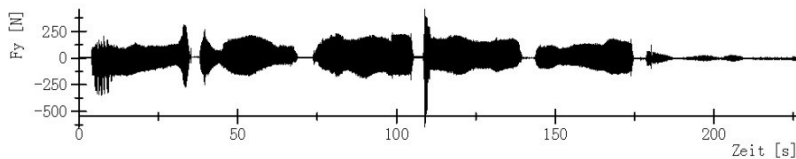
## Auswertung der Fräsversuche

Während der Bearbeitung des Werkstückes werden die Kräfte mit Hilfe der Messplattform gemessen und mittels der Software DIAdem /Diad-11/ aufgezeichnet.

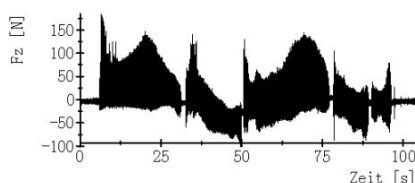
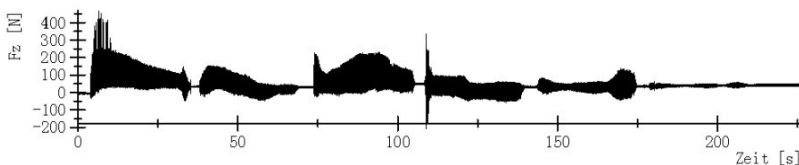
In Abb. 9 werden die obige Messkurve durch das originale NC-Programm und die untere durch das optimierte NC-Programm in X-,Y- und Z-Achsrichtung dargestellt. Aus diesen Darstellungen ist es ersichtlich, dass die Schwankung des Kraftsignals im originalen Prozess (-500N ~ +400N) um Faktor 2 größer als den in der optimierten Situation (-200N ~ +200N) ist. Außerdem ist die Bearbeitungszeit im optimierten Prozess deutlich um Faktor 2,5 (260 Sek. → 105 Sek.) kürzer als die im originalen Prozess. Damit wird das Ziel der Optimierung des Bearbeitungsprozesses erfolgreich demonstriert.



(a) Vergleich von Fx-Komponenten



(b) Vergleich von Fy-Komponenten



(c) Vergleich von Fz-Komponenten

Abb. 9: Vergleiche von Kräften zwischen originalen und optimierten Daten



## 8 Zusammenfassung

Zur Testung und Demonstration der Ergebnisse wurden unterschiedliche Varianten der Werkzeuggeometrie, Werkstückform, Bearbeitungsart u.a. erprobt. Der Demonstrator hat gezeigt, dass der Lösungsansatz prinzipiell geeignet und praktikabel nutzbar ist. Mit diesem neuen Optimierungspotenzial des Zerspanvorgangs lässt sich die Produktivität vieler kmU speziell im Bereich der Prozessplanung und in der eigentlichen Fertigung steigern. Ein Beispiel hierfür ist die mit Hilfe vom System „OptiMill-5ax“ - speziell bei der Anpassung und der Optimierung der Geschwindigkeit des Werkzeuges entlang der vom CAM-System erzeugten simultanen 5-Achs-Bearbeitungsbahnen - bereits mögliche Steigerung der Produktivität um bis zur 60% im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung. Diese ersten Ergebnisse mit dem Demonstrator können bereits in industrielle Anwendungen überführt werden.

Das Projekt OptiMill-5ax liefert einen Demonstrator dessen Komponenten industrielle Einsatzmöglichkeiten wie z.B. Komponenten zur Spannungsvolumenermittlung, Volumenaktualisierung und Vorschubgeschwindigkeitsoptimierung bieten. Der beschriebene Lösungsweg wurde durch praktische Fräsversuche auf seine Tauglichkeit am Institut und in der Industrie untersucht und vor projektbegleitenden Unternehmen erfolgreich demonstriert.

### Literatur

- /Diad-11/ Internetpräsenz auf <http://www.ni.com/diadem/d/> Stand: August 2011
- /Hoff-10/ Internetpräsenz auf <http://www.hoffmann-group.com>, Internetauftritt, Stand: 10/2010
- /Lee-10/ Lee, S. W.; Nestler, A.: Modeling of Cutting Force for Cylindrical Milling Cutter and Feed Rate Optimization Using Five-Axis Milling Simulation, Proceedings of 8th International Conference on High Speed Machining (HSM), pp.64-70, Metz, France, 08-10 December 2010. ISBN 978-2-9534170-2-9.
- /Lee-12a/ S. W. Lee, A. Nestler, Tool load balancing at simultaneous five-axis ball-end milling via the NC simulation kernel, 1st CIRP Conference on Virtual Machining and Production Technology (CIRP VMPT), 28 May - 1 June 2012, Montréal, Canada, (eingereicht)
- /Lee-12b/ S. W. Lee, A. Nestler, „Virtual Workpiece : Workpiece Representation for Material Removal Process“, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2012, Volume 58, Numbers 5-8, 443-463, DOI 10.1007/s00170-011-3431-2