

# **Prozessoptimierung des dreifunktionalachsigen HSC-FräSENS zur Sicherung der Formgenauigkeit am Beispiel der Bearbeitung von Graphit**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik  
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

## **D I S S E R T A T I O N**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Reso Alijew

geboren am 20. April 1968 in Ponitschala/Georgien

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Hentschel, Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Künanz, Dresden  
Dr.-Ing. K.-H. Zehe, Medingen

Freiberg, den 05. Januar 2001

Berichte aus der Fertigungstechnik

**Reso Alijew**

**Prozessoptimierung des dreifunktionalachsigen  
HSC-FräSENS zur Sicherung der Formgenauigkeit  
am Beispiel der Bearbeitung von Graphit**

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Alijew, Reso:*

Prozessoptimierung des dreifunktionalachsigen HSC-FräSENS  
zur Sicherung der Formgenauigkeit am Beispiel der Bearbeitung  
von Graphit/Reso Alijew.

Aachen: Shaker, 2001

(Berichte aus der Fertigungstechnik)

Zugl.: Freiberg, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-8595-X

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen  
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8595-X

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort des Herausgebers

Das dreifunktionalachsige Hochgeschwindigkeitsfräsen hat sich in der industriellen Praxis etabliert. Es gehört mit seinem Potential zu den „Faktor 2“ – Technologien mit deren Anwendung in den kommenden Jahren ein Produktivitätssprung in der Teilefertigung und bedeutende Durchlaufzeitverkürzungen verbunden sein werden. In der Natur des Verfahrens liegt, das neben den höheren Drehzahlen und der damit bedingten Schnittgeschwindigkeit besonders die Vorschubgeschwindigkeiten und der damit verbundenen Achsbeschleunigungen erhöht werden können. Durch physikalische Gesetzmäßigkeiten und deren technische Nutzungsmöglichkeit bedingt, führt das aber auch zu dem Effekt, dass mit der Drehzahlerhöhung geringere, nutzbare Schnittleistungen und zulässige Schnittkräfte zur Verfügung stehen. Damit ist aber das HSC-Fräsen ein ideales Verfahren zur Finishbearbeitung von Flächen beliebiger Form und hoher Genauigkeit durch Schlichtfräsen. Die Spanungskräfte sind hier aufgrund des geringen Aufmaßes relativ klein und die Bearbeitungsgenauigkeit wird durch das dichte Aneinanderlegen der Fräsbahnen des Kugelkopffräasers, d.h. lange Vorschubwege, erreicht. Aufgrund dieser Tatsache wird das HSC-Fräsen besonders im Werkzeug- und Formenbau angewendet. Die Fertigung ist hier gekennzeichnet durch einen noch hohen Anteil manueller Arbeit z.B. bei der Finishbearbeitung von Flächen, die man mit Hilfe des HSC-FräSENS weitgehend abbauen könnte, wenn man das Genauigkeitsproblem der zu fertigenden gekrümmten Flächen in den Griff bekäme.

Die Bearbeitungsgenauigkeit der Flächen hängt von folgenden Faktoren ab :

- Der Genauigkeit der Flächenbeschreibung als Grundlage der NC – Bahnengenerierung.
- Der Genauigkeit der Bahnerzeugung in den Bewegungsachsen durch Abstimmung der Steuerung mit den mechanischen Eigenschaften der Maschine.
- Den statischen und dynamischen Steifigkeiten des Werkstückes, der Werkzeuge, der Spannmittel und der Maschine ( WSWW ).
- Der Zerspanungsfähigkeit des Werkstoffes, der realen Aufmaße, des Schnittregimes des Werkzeuges ( Bearbeitungsmodus ) und der herzustellenden Fläche.

Bei der Herstellung von Flächen an Ur-, Umform- oder Erodierwerkzeugen sind die Faktoren a) – c) weitgehend durch die Investitionen in die Fertigungstechnik vorgegeben, so dass zum Fertigungszeitpunkt nur der Faktor d), d.h. die Bearbeitungsfolge, die Modi, die Schnittwerte und die zugehörigen Werkzeuge als wählbare Freiheitsgrade vorliegen. Das ist genau der Bereich in dem das Erfahrungswissen der Maschinenbediener und werkstattnahen Programmierer dominiert und man bei der Lösung von Bearbeitungsaufgaben einige hundert Prozent Unterschied in der Bearbeitungszeit beobachten kann. Ein wesentlicher Gesichtspunkt dabei ist das Beachten der

Beziehung von Vor- ( Schrupp- ) und Finish- ( Schlicht- ) bearbeiten der Flächen. Das Schruppen wird typischer Weise mit einem hohen Zeitspannvolumen gestaltet. Das führt beim Ebenenschruppen zu einem großen, gestuften Aufmaß an der Teilekontur. Auf den Flächen wird nun, falls das Aufmaß zu groß ist, eine Vorschlichtstufe eingeschoben. Das Schlichten wird nun so gestaltet, dass nach Möglichkeit eine manuelle Nacharbeit nicht notwendig wird. Das ist aufgrund der hohen Flächenleistung genau das Anwendungsfeld des HSC – Fräsens. Bekannt ist nun, dass das gestufte Aufmaß nach dem Schruppen in die Finishfläche „vererbt“ wird, d.h. als Formfehler ( Welligkeit ) wiedergefunden werden kann. Ist die Aufmaßstufung entsprechend klein, so ist die „Technologische Vererbung“ nicht mehr bedeutsam.

Diesem Zusammenhang – der weitgehenden Vermeidung der „vererbten“ Welligkeit auf die Finishfläche bei Minimierung der Gesamtbearbeitungszeit ( Schruppen und Schlichten ) – widmet sich das Anliegen der Arbeit. Es wurden folgende Lösungen erarbeitet :

- Verfahren zur Detektion der Vererbung auf gekrümmten Flächen und deren quantitativen Beschreibung;
- Ein Restriktionsmodell zur Beschreibung zulässiger Arbeitswerte beim Schlichten am Beispiel des Graphitfräsens;
- Eine Methode zur Ermittlung des Restriktionsmodells zur Berücksichtigung der Stufenhöhe und der Werkzeugparameter auf der Basis der Statistischen Versuchsplanung;
- Ein Prozessoptimierungsmodell und eine Methode zur Gesamtzeitbestimmung von Schruppen – Vorschlichten – Schlichten.

Die Lösungen wurden am Beispiel des Graphitfräsens demonstriert. Graphit wird hauptsächlich für Erodierwerkzeuge eingesetzt und weist keine besonderen Schwierigkeiten bei der Bearbeitung auf. Die auftretenden Spanungskräfte sind klein und in diesem Sinne ist der Werkstoff als relativ unempfindlich für die „technologische Vererbung“ gegenüber Stahl oder Gußeisen einzuschätzen. Eine Übertragung auf solche Bearbeitungsfälle scheint problemlos möglich zu sein.

Nicht unerwähnt bleiben sollte, dass der Promovent, Herr Reso Alijew, als Promotionsstudent des Landes Sachsens diese Arbeit angefertigt hat. Seine Arbeit ist ein gutes Beispiel dafür, wie die gebotenen Möglichkeiten der Qualifizierung in Deutschland für Ausländer produktiv für die Wissenschafts- und Technikentwicklung genutzt werden können. Zudem ist er der erste aserbaidschanische Diplomingenieur, der in Deutschland promoviert.

Prof. Dr.– Ing. habil. Bertram Hentschel

Freiberg, im Januar 2001

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertationsarbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Mechanik und Maschinenelemente der TU Bergakademie Freiberg.

Dem Leiter des Lehrstuhles für Konstruktions- und Fertigungstechnik Prof. Dr.-Ing. habil. B. Hentschel danke ich für die Ermöglichung der Durchführung dieser Arbeit, für seine Anregungen und Gesprächsbereitschaft sowie die mir gegebene wissenschaftliche Freiheit.

Dem Leiter des Lehrstuhles für Abtrenntechnik/Lasertechnik an der TU Dresden Prof. Dr.-Ing. habil. K. Künanz, danke ich für sein Interesse an der Arbeit und der bereitwilligen Übernahme der Durchsicht und des Koreferates.

Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. K.-H. Zehe, Geschäftsführer der Firma "Proforma" in Medingen, für die Übernahme des Koreferates und Durchsicht der Arbeit.

Die Erstellung dieses Werkes wäre ohne die tatkräftige Unterstützung vieler KollegInnen und MitarbeiterInnen nicht möglich gewesen. Besonders herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Freunden und Kollegen Dipl.-Ing. W. Dietz und Dipl.-Ing. D. Gantner für ihren fachlichen und menschlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Für die technische Hilfe bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen möchte ich darüber hinaus Herrn Dipl.-Ing. S. Sziedat, Dipl.-Ing. K. Friedersdorf und Dipl.-Ing. K. Davydov danken.

Für die Durchsicht des Manuskripts gilt mein Dank den Kolleginnen Frau Dipl.-Math. H. Engelhardt, Frau Dipl.-Des. C. Drichel und Frau Dipl.-Ing. G. Sohr.

Dank schulde ich zudem meinen Freunden Prof. Dr. M. Efendiev und Frau Dr. V. Bertman, die mich mit finanziellen Beihilfen in schwierigen Phasen meiner Tätigkeit maßgeblich unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich zum Schluß meiner Frau Sümrüd und meinem Sohn Orchan danken, ohne deren Verständnis und Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Reso Alijew

Freiberg, im Januar 2001

*Meiner Frau  
mit großer Liebe*

## Inhaltsverzeichnis

<b>Formelverzeichnis, Abkürzungen</b> .....	IV
<b>1. Einleitung</b> .....	1
<b>2. Stand der Erkenntnisse</b> .....	3
2.1 HSC-Fräsen von gekrümmten Flächen .....	3
2.2 Sicherung der Bearbeitungsqualität und -genauigkeit beim HSC-Fräsen .....	6
2.2.1 System und - Prozesskenngrößen .....	6
2.2.2 Einfluss der Werkzeugmaschine .....	7
2.2.3 Einfluss des Werkzeuges .....	10
2.2.4 Werkstoffseitige Einflüsse .....	13
2.2.5 Einfluss von Verfahrensparametern .....	14
2.2.6 Technologische Vererbung .....	18
2.3 Strategien zur Erhöhung der Bearbeitungsgenauigkeit beim HSC-Fräsen von gekrümmten Oberflächen .....	20
<b>3. Zielsetzung und Aufgabenstellung</b> .....	24
<b>4. Methode zur Quantifizierung der vererbungsbedingten Fehler</b> .....	26
4.1 Vererbung der Vorbearbeitung auf die Endbearbeitung .....	26
4.2 Gestaltabweichungen einer technischen Oberfläche .....	29
4.3 Fourieranalyse der funktionalen Beschreibung der Profilabweichungen .....	29
<b>5. Berechnungsmodell der Schnittkraft beim dreiachsigen HSC-Fräsen</b> .....	42
5.1 Bestimmung der Schnittkraft .....	42
5.2 Zerspankraftmessungen .....	50
5.3 Einfluss des Anstellwinkels auf die Zerspankraftkomponenten .....	54

<b>6. Experimentelle Untersuchungen der vererbungsbedingten Einflüsse auf das Arbeitsergebnis beim HSC-Fräsen</b> .....	57
6.1 Versuchsaufbau und -durchführung .....	57
6.1.1 Versuchsparameter .....	57
6.1.2 Versuchs- und Messtechnik .....	57
6.1.3 Versuchsprogramm .....	60
6.2 Werkzeug- und maschinenbedingte Einflüsse auf die Gestaltabweichungen am Werkstück .....	60
6.2.1 Schwingungsverhalten des Systems Spindel-Werkzeug .....	60
6.2.2 Kinematische Ungenauigkeit der Maschine .....	63
6.2.3 Werkzeug .....	66
6.3 Einfluss der Verfahrensparameter auf die Bearbeitungsgenauigkeit .....	68
6.3.1 Festlegung der Randbedingungen .....	69
6.3.2 Versuchsplanung .....	74
6.3.3 Erstellung des Versuchsplanes .....	76
6.3.4 Versuchsdurchführung und -auswertung .....	78
6.3.5 Ergebnisse der Untersuchungen der Verfahrensparameter .....	80
6.3.6 Untersuchungen zur Übertragung des Genauigkeitsmodells .....	83
6.4 Einfluss des minimalen Aufmaßes auf die Vererbungsgröße .....	95
6.5 Einfluss des Werkzeugverschleißes auf die Vererbungsgröße .....	97
<b>7. Prozessoptimierung hinsichtlich der technologischen Vererbung</b> .....	99
7.1 Ausgangspunkt .....	99
7.2 Erstellen eines Optimierungsmodelles für das Schruppen .....	99
7.3 Erstellen eines Optimierungsmodelles für das Schlichten .....	103
7.4 Prozessoptimierung .....	106
7.5 Schnittaufteilung beim Schruppen .....	109
<b>8. Verifizierung der Methodik zur Verringerung der technologischen Vererbung am Werkstück</b> .....	112

---

8.1 Optimierung der Verfahrensparameter .....	112
8.2 Ergebnisse der Testwerkstückesbearbeitung .....	114
8.3 Weiterführende Arbeiten .....	118
<b>9. Zusammenfassung .....</b>	<b>120</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>134</b>

## Formelzeichen

Formelzeichen	Dimension	Bedeutung
$A$	$\text{mm}^2$	Spanungsquerschnitt
$A_{o'} \cdot A_{n'} \cdot B_{o'} \cdot B_n$	-	Fourierkoeffizienten
$A_{ges}$	$\text{mm}^2$	gesamte Werkstückoberfläche
$C$	$\text{N}/\mu\text{m}$	Steifigkeit
$D$	$\text{mm}$	Durchmesser des Fräasers
$E$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Elastizitätsmodul
$K$	-	Korrekturfaktor
$F_c$	$\text{N}$	Schnittkraft
$F_p$	$\text{N}$	Passivkraft
$F_f$	$\text{N}$	Vorschubkraft
$F_{exp}$	-	Ein berechneter Wert für die Adäquatheitsprüfung
$F_{Tab}$	-	Kritische Werte (Tabellenwert) für den $F$ -Test
$H_s$	$\text{mm}$	Stufenhöhe bzw. Schnitttiefe beim Schruppen
$I$	$\text{mm}^4$	Flächenträgheitsmoment
$R$	$\text{mm}$	Werkstücksradius
$R_1, R_2 \dots R_7$	-	Restriktionen
$R_m$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Zugfestigkeit
$R_{th}$	$\mu\text{m}$	theoretische Rauheit
$U$	-	Konfidenzintervall
$V_B$	$\text{mm}$	Verschleißmarkenbreite auf der Freiformfläche
$Z_i$	$\text{mm}$	Koordinaten der Messpunkten in vertikaler Richtung
$a$	$\text{mm}$	Abstand zwischen den Messpunkten
$a_e$	$\text{mm}$	Arbeitseingriff
$a_p$	$\text{mm}$	Schnitttiefe
$a_{p\_min}$	$\text{mm}$	minimales Aufmaß beim Schlichten
$b_0, b_1 \dots b_n$	-	Koeffizienten des Polynoms
$b, c$	$\text{mm}$	Abstände
$f_z$	$\text{mm}$	Zahnvorschub

$h$	mm	Spanungsdicke
$h_m$	mm	mittlere Spanungsdicke
$h_i$	mm	Abweichung in der Messpunkte $i$
$h_j$	mm	Abweichung in der eingefügten Punkte $j$
$k_c$	N/mm <sup>2</sup>	spezifische Schnittkraft
$k_{cl}$	N/mm <sup>2</sup>	Hauptwert der spezifischen Schnittkraft nach Kronenberg
$k_{cl,1}$	N/mm <sup>2</sup>	Hauptwert der spezifischen Schnittkraft nach Victor/Kienzle
$l$	mm	Auskraglänge des Fräasers
$l/D$	-	Schlankheitsgrad des Fräasers
$l_j$	mm	Periodenlänge der vererbungsbedingten Abweichung
$m_{vor}$	-	Anzahl der vorhandenen Messpunkte je Stufe
$m_{ges}$	-	Anzahl der Messpunkte entlang der gesamten Fläche
$m_{red}$	-	zu reduzierenden Anzahl der Punkte
$n$	min <sup>-1</sup>	Drehzahl
$s^2$	-	Versuchsstreuung
$t_{\alpha,v}$	-	Kritische Werte für den $t$ -Test
$t_G$	min	Grundzeit
$x$	-	Stufenbezeichen der Einflussgröße in Planmatrix (-1, 0 oder +1)
$\Delta x$	mm	Abstand zwischen den eingefügten Punkten
$y$	µm	gemessene Welligkeit
$y_w$	µm	berechnete Welligkeit
$v_c$	m/min	Schnittgeschwindigkeit
$v_f$	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
$z$	-	Zähnezahl des Fräasers
$\beta$	°	Anstellwinkel des Werkzeuges bezüglich der Oberflächennormalen
$\beta_f$	°	Anstellwinkel in der Vorschubebene
$\beta_m$	°	quer zur Vorschubebene

$\gamma$	°	Spanwinkel
$\eta$	-	Schnittkraftverhältnis
$\theta$	°	Anstiegswinkel der Abweichung
$\lambda$	°	Neigungswinkel
$\lambda_c$	mm	Grenzwellenlänge
$\tau$	-	Durchmesser Verhältnis
$\kappa$	°	Einstellwinkel
$\varphi$	°	Drehwinkel des Fräasers
$\varphi_c$	°	Eingriffswinkel
$\varphi_e, \varphi_{e1}, \varphi_{e2}$	°	Eintrittswinkel der Schneide
$\varphi_a$	°	Austrittswinkel der Schneide

### Abkürzungen

<i>AC</i>	-	Adaptive Regelung
<i>CAD</i>	-	Computer Aided Design
<i>CAM</i>	-	Computer Aided Manufacturing
<i>CBN</i>	-	kubisches Bornitrid
<i>FG</i>	-	Freiheitsgrad
<i>GG</i>	-	Gegenlauf
<i>GL</i>	-	Gleichlauf
<i>HM</i>	-	Hartmetall
<i>HSS</i>	-	Schnellarbeitsstahl
<i>MQ</i>	-	Mittlere Quadratsumme
<i>NC</i>	-	Numerical Control
<i>PKD</i>	-	polykristalliner Diamant
<i>TS</i>	-	Tauchschnitt
<i>WSP</i>	-	Wendeschneidenplatten
<i>ZS</i>	-	Zihschnitt

**Indizes**

$\alpha$	-	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\gamma$	-	Spanwinkel
$v_1; v_2$	-	Freiheitsgrade für Versuchsfehler
$f$	-	Anstellung in der Vorschubebene
$f_n$	-	Anstellung quer zur Vorschubebene
$i$	-	laufende Nummer der eingefügten Punkte
$j$	-	laufende Nummer der Messpunkte
ber	-	berechnete Abweichung
ges	-	gesamt
exp	-	beim Bezugsfräser eingesetzte Parameter
opt	-	Optimalwert
max	-	Maximalwert
min	-	Minimalwert
schl	-	Schichten
schr	-	Schruppen
sp	-	Spanner
ver	-	Verschleiß
v	-	Schnittgeschwindigkeit
wst	-	Werkstück
wz	-	Werkzeug
wzm	-	Werkzeugmaschine