



Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Universität Karlsruhe (TH)

Hrsg.:  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung  
beim Hochleistungsfertigungsverfahren  
Wälzschälen**

Band 132

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5621-0

ISBN-13: 978-3-8322-5621-0

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

## Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer



# **Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälén**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften**  
von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Dipl.-Ing. Andreas Bechle  
aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung:	21. Juni 2006
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmidt
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke



## Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner knapp viereinhalbjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik der Universität Karlsruhe (TH).

An dieser Stelle möchte ich der Institutsleitung, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmidt sowie Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Hartmut Weule für die Möglichkeit zur Promotion und der entgegen gebrachten fachlichen sowie persönlichen Unterstützung und Förderung meinen Dank aussprechen. Mein aufrichtiger Dank gilt vor allem meinem Doktorvater Herr Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmidt für die Übernahme des Hauptreferats, die langjährige gute und harmonische Zusammenarbeit sowie das mir ausgesprochene Vertrauen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke bedanke ich mich für das entgegengebrachte Interesse an der wissenschaftlichen Arbeit, der konstruktiven inhaltlichen Kritik und für die Übernahme des Korreferats.

Allen Mitarbeitern des Instituts, insbesondere meinen Gruppenkollegen der Fertigungstechnologie sowie den zahlreichen Hiwis und Studenten möchte ich für die langjährige Unterstützung danken. An dieser Stelle möchte ich mich ebenfalls bei den Firmen Balzers Verschleißschutz, Daimler Chrysler, Emuge Franken, Index-Werke, Liebherr Verzahnentechnik, SEW Eurodrive, Siemens und Zeiss für die Zusammenarbeit, die Unterstützung und das mir entgegen gebrachte Vertrauen bedanken.

Meinen Eltern danke ich für den Zuspruch und die Förderung meines beruflichen Werdegangs. Der größte Dank gilt meiner Frau Ute, die mit ihrer Geduld, ihrem Verständnis und ihrer vorbehaltlosen Unterstützung einen maßgeblichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat.

Karlsruhe, im Juli 2006

Andreas Bechle

---

## Summary

### **A contribution for the process-sure development of the high-performance Cutting Process Skiving**

At all times the production science is signed by manufacturing technologies, which is conducted on the limit of their capacity. By the incipient globalization of the last ten years an increasing cost pressure on the manufacturing domains has commenced. Therefore innovative and capable technologies are demanded with the possibilities to complete or in some areas even to substitute existing and established manufacturing technologies. As a continuous cutting technology skiving offers the making of rotational symmetric and periodic structures. Through this periodic structures like gears can be produced by a roll-of-technology. In comparison to other well known gearing processes the skiving process has the highest productivity and flexibility. This is caused by the possibility to manufacture both inside and outside gears which are usually manufactured by hobbing and by general shaping methods.

This work for the first time should make a contribution to develop the skiving process for gearing inside and outside contours in a process sure way. Therefore in a first step basic investigations were made by analogical tests to identify the process optimal cutting material and to select the most convenient coating. In a further step both the Macro- and the Micro geometry of the skiving tool were optimized. Afterwards the results of the basic investigations were analyzed in form of "best-of" experiments by a reference work piece with an outside and an inside gearing contour. Finally the results were investigated and evaluated concerning the process costs and the process stability.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>4</b>
2.1 Das Wälzschälverfahren .....	4
2.1.1 Parameter des Wälzschälverfahrens .....	6
2.1.2 Werkzeugenngößen .....	11
2.1.3 Spanflächenversatz .....	12
2.1.4 Frei- und Spanwinkelsituation bei Verwendung von zylindrischen Werkzeugen .....	13
2.2 Stand der Erkenntnisse beim Wälzschälen .....	14
2.2.1 Anwendung .....	15
2.2.2 Forschung .....	16
2.3 Schneidstoffe .....	19
2.4 Beschichtungen .....	23
2.5 Werkzeugherstellung .....	26
2.6 Werkzeugverschleiß .....	28
2.7 Entstehung von Verzahnungsabweichungen .....	34
2.8 Prozessfähigkeit.....	42
2.9 Zusammenfassung Stand der Technik.....	43
<b>3 Methodischer Ansatz zur prozesssicheren Entwicklung des Wälzschälverfahrens .....</b>	<b>45</b>
<b>4 Versuchsaufbau.....</b>	<b>48</b>
4.1 Maschine.....	48
4.2 Kraftmessplattform.....	50
4.3 Einzahnversuchsträger .....	52
4.4 Verzahnungsmessung .....	53
<b>5 Werkzeugauslegung Referenzbauteile - Außen- und Innenverzahnung .....</b>	<b>55</b>
5.1 Außenverzahnung .....	55
5.2 Variation Spanwinkel .....	59

---

5.3	Innenverzahnung .....	61
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen durch Analogieversuche .....</b>	<b>66</b>
6.1	Prozessauslegung durch Simulation .....	68
6.2	Verifizierung Analogieversuche .....	72
6.3	Analyse Werkzeugmaterial .....	73
6.4	Kopfrundung .....	93
6.5	Schneidkantenmodifizierung und Variation der Beschichtung .....	94
6.6	Zusammenfassung Analogieversuche .....	100
<b>7</b>	<b>Verifizierung der Erkenntnisse .....</b>	<b>102</b>
7.1	Referenzbauteil Außenverzahnung .....	102
7.1.1	Werkzeug und Prozessparameter .....	102
7.1.2	Prozesskühlung .....	103
7.1.3	Standweguntersuchung Minimalmengenschmierung / Öl .....	110
7.1.4	Verifizierung Spanwinkel .....	111
7.1.5	Auswertung Werkzeug- und Werkstückqualität .....	113
7.1.6	Variation Zähnezahilverhältnis .....	117
7.1.7	Verschleißbeurteilung .....	121
7.1.8	Kraftmessung .....	123
7.2	Innenverzahnung .....	126
7.2.1	Werkzeug und Prozessparameter .....	126
7.2.2	Auswertung Werkzeugqualität .....	127
7.2.3	Variation der Werkstückspannung und Auswertung Werkstückqualität .....	128
7.2.4	Verschleißbeurteilung und Standweguntersuchung ....	137
7.3	Zusammenfassung Verifizierung .....	139
<b>8</b>	<b>Prozessfähigkeit und -kosten .....</b>	<b>141</b>
8.1	Prozessfähigkeit .....	141
8.2	Prozesskostenrechnung .....	143
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>147</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>151</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung (lateinisch)	Bedeutung	Einheit
$A$	Achsabstand	mm
$AF$	auslaufende Flanke	
$b$	Breite	mm
$d$	Durchmesser	mm
$d_a$	Kopfkreisdurchmesser	mm
$d_0$	Teilkreisdurchmesser Werkzeug	mm
$e$	Lückenweite, Exzentrizität, Spanflächenversatz	mm
$EF$	einlaufende Flanke	
$F$	Kraft	N
$F_\alpha$	Profilgesamtabweichung	$\mu\text{m}$
$F_\beta$	Flankenliniengesamtabweichung	$\mu\text{m}$
$f_\alpha$	Profilformabweichung	$\mu\text{m}$
$f_\beta$	Flankenlinienformabweichung	$\mu\text{m}$
$f_{H\alpha}$	Profilwinkelabweichung	$\mu\text{m}$
$f_{H\beta}$	Flankenlinienwinkelabweichung	$\mu\text{m}$
$F_p$	Teilungsgesamtabweichung	$\mu\text{m}$
$f_p$	Teilungseinzelabweichung	$\mu\text{m}$
$F_{pz}$	Teilungssummenabweichung	$\mu\text{m}$
$F_r$	Rundlaufabweichung	$\mu\text{m}$
$h$	Spanungsdicke, Zahnhöhe	mm
$i$	Übersetzung	
$k_c$	spezifische Schnittkraft	N/mm
$m_n$	Normalmodul	mm
$n$	Drehzahl	1/min
$r$	Radius	mm
$R_m$	Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$R_p$	Teilungsschwankung	$\mu\text{m}$
$R_z$	Gemittelte Rauhtiefe	$\mu\text{m}$
$s$	Vorschub	mm/WSU
$SPV$	Spanflächenversatz	mm
$SKV$	Schneidkantenversatz	mm
$T$	Temperatur	°C
$t$	Zeit	min
$t_h$	Hauptzeit	min
$v$	Geschwindigkeit	mm/WSU, m/min
$VB$	Verschleißmarkenbreite	mm
$WS$	Werkstück	
$WSU$	Werkstückumdrehung	
$WZ$	Werkzeug	
$x$	Profilverschiebungsfaktor	
$z$	Zähnezahl	

Formelzeichen (griechisch)	Bedeutung	Einheit
$\alpha$	Freiwinkel	Grad
$\alpha_n$	Normaleneingriffswinkel	Grad
$\beta$	Schrägungswinkel, Keilwinkel	Grad
$\gamma$	Spanwinkel	Grad
$\Delta$	Differenz~	
$\varepsilon$	Überdeckung	
$\varphi$	Drehwinkel	Grad
$\lambda$	Neigungswinkel	Grad
$\Sigma$	Achskreuzwinkel	Grad

Indizes	Bedeutung	Einheit
$0$	Werkzeug	
$2$	Werkstück	
$ax$	axial	
$c$	Schnitt~	
$d$	Differential~	
$eff$	effektiv	
$ges$	Gesamt~	
$K$	Kopf	
$konstr$	konstruktiv	
$n$	normal	
$rad$	radial	
$u$	Umfangs~	
$x, y, z$	kartesische Koordinaten	