

Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bruno Vargas

**Wälzschälern mit kleinen Achskreuzwinkeln**  
Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 254



Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Bruno Vargas

**Wälzschälern mit kleinen Achskreuzwinkeln**  
Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 254



## **Wälzschälern mit kleinen Achskreuzwinkeln Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene  
**Dissertation**  
von

Bruno Rossi de Meneses Vargas  
aus Belo Horizonte (Brasilien)

Tag der mündlichen Prüfung: 10. März 2022

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard  
Karpuschewski

### **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, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8676-8

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 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, indem 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) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 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

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die langjährige Zusammenarbeit, die fachliche und überfachliche Betreuung, die persönliche Unterstützung und Förderung bedanken.

Prof. h. c. Dr. h. c. Dr. h. c. Bernhard Karpuschewski danke ich herzlich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Auch möchte ich dem Arbeitskreis Fertigungstechnik der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA) und der Arbeitsgruppe des Vorhabens FVA661III für die Unterstützung und den kontinuierlichen Austausch danken. Stellvertretend für die Unternehmen, mit denen ich im Rahmen dieses Projekts in engerer Kooperation gearbeitet habe, möchte ich Herrn Bernhard Winter und Herrn Dr.-Ing. Christoph Ruhs (SEW Eurodrive), Herrn Ulrich Krasa (Liebherr-Aerospace Lindenberg), Herrn Dr.-Ing. Oliver Winkel und Herrn Janus Siegfried (Liebherr-Verzahntechnik), Herrn Stefan Dirrichs (Klingelberg), Herrn Jürgen Kreschel (Gleason), Herrn Dr.-Ing. Achim Raab (Daimler), Herrn Dr.-Ing. Herman Yakaria (ZF), Herrn Heinz Ueberacker (Stöber Antriebstechnik) und Herrn Werner Hoffman (Wittenstein) für das Interesse sowie die wertvollen Inputs danken.

Auch möchte ich allen Mitarbeitern des wbk danken. Stellvertretend für die diversen Bereiche des Instituts danke ich Frau Karin Fuchs (Sekretariat), Frau Dorothea Danner (SCPFC), Frau Margit Scheidt (SC-IT), Herrn Michael Heinz, Herrn Klaus Simon, Herrn Thomas Hildenbrand, Herrn Harald Frank und Herrn Friedbert Mathes (SC-T), Herrn Ralf Dorsner und Herrn Benjamin Stober (Werkstatt Ehrenhof).

Bei Herrn Dr.-Ing. Markus Klaiber möchte ich mich herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit im Rahmen der Vorlesung „Verzahntechnik“ sowie die wertvollen Diskussionen zu diesem faszinierenden Thema bedanken.

Ein ganz besonderer Dank geht an Dr.-Ing. Frederik Zanger, Oberingenieur des Bereiches Fertigungs- und Werkstofftechnik (FWT). Die zahlreichen Diskussionen über die verschiedensten Themen waren für meine berufliche und persönliche Weiterentwicklung entscheidend. Danke!

Des Weiteren gilt ein großer Dank allen Kollegen meiner sehr geschätzten FWT. Herrn Jan Klose möchte ich herzlich für die hervorragende Teamleitung sowie die tolle, intensive, produktive und spannende Zusammenarbeit danken. Meinen lieben Kollegen Matthias Zapf und Andreas Hilligardt möchte ich meinen herzlichen Dank für den fachlichen und persönlichen Austausch sowie die tollste Zeit aussprechen. Stellvertretend alle anderen FWTler danke ich Manuela und Patrick Neuenfeldt für die tolle Zeit sowie das häufige Brainstorming über die verschiedensten Themen, das mir einen umfangreichen Wissensaufbau in allen Bereichen der Fertigungs- und Werkstofftechnik ermöglichte.

Vor allem möchte ich meiner geliebten Familie danken! João Paulo und Cecília, meinem lieben Bruder und meiner wunderschönen Nichte. Raimundo, meinem Vater, der unabhängig von der Entfernung immer anwesend in meinem Leben ist. Silvana, meiner Mutter, meiner besten Freundin, meinem größten Vorbild. Renzo, meinem Schutzengel, und Clara, meiner Begleiterin und dem Maskottchen der FWT. Mein ehrlichster Dank und grenzenlose Liebe!

Neewiller-près-Lauterbourg, Dezember 2021

Bruno Rossi de Meneses Vargas

## Abstract

Gear components often have interference contours, which hinder their fabrication by gear skiving due to the required tool overrun. By reducing the axis crossing angle, however, it is possible to minimize the overrun and increase the process flexibility. In order to fabricate components, which are typically fabricated by the high flexible but less productive gear shaping, by gear skiving, the axis crossing angle must be reduced from its typical range between 15 and 30° to only 5 to 15°. However, this leads to unfavorable cutting conditions and increases tool wear. Hence, the process feasibility is limited by the tool life, which represents a challenge even to small and medium scale production.

The main objectives of the present work are the identification of the process technical limits and the feasibility analysis of gear skiving with reduced axis crossing angles. In order to achieve these goals and to answer the identified research deficiencies, the process was investigated to its full extent.

In the theoretical investigation, the process kinematics were firstly modelled using the penetration volume method. Then the relationships between the local effective cutting parameters and the most relevant process and tool parameters were examined in depth. Subsequently, a three-dimensional skiving model for comprehensive process design and practical applications was developed. This model allows determining the cutting conditions extreme values with high accuracy and low programming effort.

The experimental investigation began with analogy tests on an external gear of 16MnCr5 with single-toothed tools of PM-HSS. The influences of various process parameters were systematically investigated for axis crossing angles between 5 and 15°. The results were then validated against real tests on a demonstrator component using solid tools. Afterwards, the influence of workpiece material on the process limits was shown through experiments on 30CD12 using solid tools of the same cutting material. Finally, tests were carried out on 16MnCr5 with single toothed carbide tools, which proved the potential of this cutting material for gear skiving with reduced axis crossing angles and permitted identifying the cutting material dependence of the process limits.

The process limits were then evaluated, followed by the definition of guidelines for skiving processes with reduced axis crossing angles. Subsequently, a feasibility analysis was exemplified for a demonstrator component from the aerospace sector. Hereby, the influences of axis crossing angle and number of teeth on the main process time and expected tool life were investigated using the novel parameter-based process preliminary design. The results were then compared with real processes, which successfully replaced the shaping process in the production of the demonstrator component at the industry partner with significant time and quality gains.

Together with the extensive theoretical and experimental investigations, the discussed process design possibilities enable the implementation of skiving processes with axis crossing angles smaller than 15° in the practice. The results in this work show the challenging cutting conditions but offer, at the same time, the extended fundamentals for the preliminary process design. This enable gear manufacturers to evaluate which geared components with interference contours can be efficiently manufactured by gear skiving, reducing their dependence on specialized tool and machine tool manufacturers.



## Kurzfassung

Getriebebauteile weisen oft Störkonturen in Form von Wellenschultern auf, die die Verzahnungsbearbeitung durch das Wälzschälens aufgrund des Werkzeugauslaufes einschränken. Durch die Reduktion des Achskreuzwinkels kann dessen Auslauf gekürzt und somit die Verfahrensflexibilität erhöht werden. Um das Bauteilspektrum des Wälzschälverfahrens zu erweitern und mit dem Wälzstoßen konkurrieren zu können, muss der Achskreuzwinkel vom typischen Bereich zwischen 15 und 30° auf lediglich 5 bis 15° reduziert werden. Diese Verringerung führt jedoch zu ungünstigen Eingriffsbedingungen und erhöhtem Werkzeugverschleiß. Der Prozessrealisierbarkeit steht die Standmenge entgegen, welche selbst Klein- und Mittelserienanwendungen erschwert.

Hauptziele der vorliegenden Arbeit sind die Ermittlung der technischen Prozessgrenzen und die Umsetzbarkeitsanalyse des Wälzschälens mit kleinen Achskreuzwinkeln. Um diese Ziele zu erreichen und die identifizierten Forschungsdefizite zu beseitigen, wurde das Verfahren im vollen Umfang untersucht.

Im Rahmen der theoretischen Untersuchung wurde zunächst die Prozesskinematik modelliert und die Zusammenhänge zwischen den lokalen effektiven Zerspanungskenngrößen und den wichtigsten Prozess- und Werkzeugparametern ausführlich untersucht. Anschließend wurde ein praxisorientiertes Prozessmodell für die Wälzschälvorauslegung entwickelt. Dieses Modell ermöglicht die Ermittlung der Kenngrößenextremwerte mit hoher Genauigkeit und geringem Programmieraufwand.

In der experimentellen Untersuchung wurden zunächst Versuche an einer Außenverzahnung aus 16MnCr5 mit Einzahn-Werkzeugen aus PM-HSS durchgeführt. Dabei wurden die Einflüsse verschiedener Prozessparameter für Achskreuzwinkel zwischen 5 und 15° systematisch untersucht. Die Erkenntnisse wurden anhand von Realversuchen an einem Demonstratorbauteil mit Vollwerkzeug validiert. Anschließend erfolgte der Materialwechsel auf vorvergütetes 30CD12, welcher die Werkstoffabhängigkeit der Prozessgrenze bewies. In der Folge wurden Versuche an 16MnCr5 mit Einzahn-Werkzeugen aus Hartmetall durchgeführt, welche sein Potenzial für kleine Achskreuzwinkel beziehungsweise die Schneidstoffabhängigkeit der Prozessgrenze aufzeigten.

Letztendlich wurden die Prozessgrenzen diskutiert und Richtlinien zur Vorauslegung von Wälzschälprozessen mit kleinen Achskreuzwinkeln abgeleitet. In der Umsetzbarkeitsanalyse am Beispiel des Demonstratorbauteils wurden die Einflüsse von Achskreuzwinkel und Zähnezahl auf die Prozesshauptzeit und voraussichtliche Standmenge anhand der kenngrößenbasierten Prozessvorauslegung quantifiziert. Die Ergebnisse wurden dann mit Realprozessen verglichen, welche das Wälzstoßen bei der Fertigung des Demonstratorbauteils beim Industriepartner erfolgreich ersetzt haben.

Zusammen mit den Erkenntnissen aus den theoretischen und experimentellen Untersuchungen ermöglichen die diskutierten Auslegungsmöglichkeiten die Umsetzung des Wälzschälens mit Achskreuzwinkeln kleiner als 15° in der Praxis. Die erzielten Ergebnisse zeigen die Herausforderungen der anspruchsvollen Eingriffsbedingungen auf. Gleichzeitig bieten sie Ansatzpunkte für das enge Prozessfenster und ermöglichen den Anwendern eine Beurteilung, welche Verzahnungen mit Störkonturen durch das Wälzschälens wirtschaftlich bearbeitet werden können.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung und der Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Wälzschälen	11
2.2 Prozesskenngrößen	14
2.2.1 Schnittgeschwindigkeit	16
2.2.2 Spanungsdicke	17
2.2.3 Prozesswinkel	19
2.3 Prozessmodellierung	25
2.3.1 Zweidimensionale Berechnungsmodelle	25
2.3.2 Dreidimensionale Berechnungsmodelle	27
2.4 Wälzschälwerkzeuge	29
2.4.1 Werkzeugauslegung	30
2.4.2 Schneidstoffe	33
2.5 Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln	37
<b>3 Zielsetzung und Lösungsansatz</b>	<b>43</b>
3.1 Zielsetzung	43
3.2 Lösungsansatz	44
3.2.1 Theoretische Prozessuntersuchung	44
3.2.2 Experimentelle Prozessuntersuchung	45
3.2.3 Prozessgrenzen und Umsetzbarkeitsanalyse	46
<b>4 Theoretische Prozessuntersuchung</b>	<b>47</b>
4.1 Einzeleinflüsse der Werkzeug- und Prozessparameter	47
4.1.1 Modellaufbau	47
4.1.2 Untersuchung der Einzeleinflüsse mittels Durchdringungsrechnung	51
4.2 Berechnungsmodell zur Vorauslegung Wälzschälprozesse	67

4.2.1	Modellierung der Prozesskinematik	68
4.2.2	Bemerkung zu den Auslegungsstartwerten	70
4.2.3	Kollisionsberechnung	71
4.2.4	Analytische Schnittgeschwindigkeits- und Spanwinkelberechnung	73
4.2.5	Spanungsdickenberechnung	74
4.2.6	Hauptzeitberechnung	74
4.2.7	Validierung des Vorauslegungsmodells	75
<b>5</b>	<b>Experimentelle Prozessuntersuchung</b>	<b>82</b>
5.1	Versuchsplan, Versuchsaufbau und verwendete Messtechnik	82
5.1.1	Versuchsmaschine	85
5.1.2	Werkzeuguntersuchung	86
5.1.3	Bauteiluntersuchung	88
5.1.4	Versuchsbauteile und Versuchswerkzeuge	89
5.2	Einzahn-Analogieversuche mit PM-HSS-Werkzeugen	92
5.2.1	Vorversuche VR0	92
5.2.2	Analogieversuche VR1	96
5.3	Validierung am Demonstratorbauteil mit Vollwerkzeug	110
5.3.1	Werkzeuguntersuchung	112
5.3.2	Bauteiluntersuchung	118
5.4	Einzahn-Analogieversuche mit Hartmetall-Werkzeugen	122
<b>6</b>	<b>Umsetzung in der Praxis</b>	<b>128</b>
6.1	Prozessgrenze und Vorauslegung	128
6.1.1	Überprüfung der technischen Grenzen	129
6.1.2	Kenngößenbasierte Prozessvorauslegung	130
6.2	Umsetzbarkeitsanalyse für das Demonstratorbauteil	131
6.2.1	Kollisionsuntersuchung	132
6.2.2	Ermittlung der Prozessparameter	135
6.2.3	Prozesszeit und Standmenge	136
6.2.4	Bewertung	142
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>144</b>

**Literaturverzeichnis**

**I**

**Abbildungsverzeichnis**

**XI**

**Tabellenverzeichnis**

**XIX**