

# Geometrisch bestimmte Trockenbearbeitung von gehärteten Großverzahnungen

Der Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität  
Magdeburg zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**  
**(Dr.-Ing.)**

am 30.06.2014 vorgelegte Dissertation  
von Dipl.-Ing. Matthias Töfke



Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und  
Qualitätssicherung Magdeburg

Band 39

**Matthias Töfke**

**Geometrisch bestimmte Trockenbearbeitung  
von gehärteten Großverzahnungen**

Shaker Verlag  
Aachen 2015

**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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3489-9

ISSN 1863-0936

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

Die vorliegende Dissertation entstand parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit in den Jahren 2010 bis 2014.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Bernhard Karpuschewski danke ich, dass er mir die Promotion als Externer ermöglicht hat. Durch seine Unterstützung und seine konstruktiven Anregungen hat er maßgeblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Weiterhin danke ich ihm für die Übernahme des Hauptreferates.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote für die Übernahme des Koreferates und der schnellen und unkomplizierten Abwicklung des Promotionsverfahrens.

Mein besonderer Dank gilt all jenen, die mich bei den Untersuchungen und bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben. Bei der Firma ThyssenKrupp Rothe Erde sind dies Herr Dr.-Ing Wilfried Spintig, der mir die Rahmenbedingungen zur Erstellung einer berufsbegleitenden Promotion ermöglichte und jederzeit mit Rat zur Seite stand und Herr Bernd Stakemeier, der mir stets den Freiraum zu Verfügung stellte, welchen ich für die Dissertation benötigte.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht haben und einer ganz besonderen Frau in meinem Leben für Ihre Unterstützung, das Verständnis und die Bereitschaft, mit vielem bis zum Abschluss der Promotion zu warten.

Lippstadt, 2014

Matthias Töfke

## Kurzfassung

Verzahnte Großwälzlager haben im Schwermaschinenbau vielfältige Einsatzbereiche, die sich hinsichtlich ihrer Anforderungen stark unterscheiden können. Moderne Windenergieanlagen wären ohne Großwälzlager nicht denkbar. In diesen Anlagen zur Stromerzeugung werden die Wälzlager zur Blattverstellung oder zur Nachführung der Anlage in den Wind eingesetzt. Der Trend in der Windindustrie geht in Richtung immer leistungsfähigerer Anlagen in der sogenannten Multimegawattklasse (oberhalb 5 MW). Ein weiteres spezielles Anwendungsfeld für Großwälzlager ist der Einsatz in Tunnelvortriebsmaschinen als Antrieb für das Bohrschild.

Die Einsatzbedingungen stellen gerade an die Verzahnungen der Wälzlager sehr hohe Ansprüche hinsichtlich der zu übertragenden Kräfte und der erforderlichen Lebensdauer. Aus diesem Grund ist ein Härten der Verzahnungen notwendig, um den Anforderungen gerecht zu werden.

Prozessbedingte Verzüge der Werkstücke und hohe geforderte Verzahnungsqualitäten verlangen eine Hartbearbeitung der Zahnflanken. Insbesondere bei großen Zahnrädern (bis zu 10.000 mm Durchmesser) bieten Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide einen wirtschaftlichen und technischen Vorteil in der Trockenbearbeitung von gehärteten Verzahnungen.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von modernen Schneidstoffen wie Ultrafeinstkornhartmetall und PCBN unter praktischen Fertigungsbedingungen untersucht sowie der thermische Einfluss auf die Zahnflanke analysiert. Ziel ist die Optimierung der Fertigung, um dem wirtschaftlichen Druck des Marktes zur Kostenreduktion zu begegnen.

## Abstract

Slewing bearings with gears can be found in a wide area of applications in machine construction that have various requirements. Modern wind turbines are not possible to be constructed without slewing bearings. In this energy generating machines bearings are used to pitch the blades or to track the machine into the wind. Within the wind industry the trend is leading towards multi-megawatt class machines (above 5 MW). Another field of application for slewing bearings is the use in tunnel drilling machines for driving the drilling head.

The operational conditions put up high requirements for the gears regarding the transmission of power and the necessary life time. A hardening of the gears is unavoidable to meet these demands.

Due to process caused distortions of the workpieces and in order to meet high gear quality standards a hard machining of the gear flanks is needed. Especially for big gears (up to 10.000 mm diameter) processing methods that use well defined cutting edges offer an economical and technical advantage in the dry cutting of hardened gears.

In this present work the use of modern cutting materials like ultra-fine grained carbide and PCBN is investigated under practical production conditions. The thermal influence on the gear flank is analyzed. The target is to optimize the production in order to counter the market pressure regarding cost reduction.

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	III
Kurzfassung.....	IV
Abstract .....	V
Inhaltsverzeichnis .....	VI
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen .....	X
1 Einleitung .....	1
2 Stand der Technik.....	5
2.1 Hartbearbeitungsverfahren für Verzahnungen .....	5
2.2 Einzelteilformfräsen von Verzahnungen .....	7
2.3 Allgemeine Fräsbearbeitung als Analogie zum Einzelteilformfräsen .	10
2.4 Hartzerspanen.....	13
2.5 Schneidstoffe.....	22
2.5.1 Ultrafeinstkornhartmetall .....	22
2.5.1.1 Historische Entwicklung.....	22
2.5.1.2 Chemische Zusammensetzung .....	23
2.5.1.3 Eigenschaften.....	24
2.5.2 Polykristallines kubisches Bornitrid .....	27
2.5.2.1 Historische Entwicklung.....	27
2.5.2.2 Chemische Zusammensetzung .....	27
2.5.2.3 Einsatz.....	28
2.5.2.4 Eigenschaften .....	30
2.6 Randzonenbeeinflussung.....	32
2.6.1 Barkhausenrauschen .....	36
2.6.2 Nitalätzen .....	40
2.6.3 Röntgendiffraktometrie.....	42
3 Aufgabenstellung / Zielsetzung .....	45
VI	

4	Beschreibung des Ist-Zustandes.....	46
4.1	Standardwerkzeuge .....	46
4.1.1	Wendescheidplattenfräser .....	46
4.1.2	Schleiffräser .....	47
4.2	Verschleißverläufe der Standardwerkzeuge.....	50
5	Versuchsbeschreibung.....	52
5.1	Versuchswerkzeug .....	52
5.2	Voruntersuchungen .....	55
5.3	Schneidstoffe.....	56
5.3.1	Ultrafeinstkornhartmetall THM-U .....	56
5.3.2	PCBN .....	57
5.4	Werkzeugmaschine .....	58
5.5	Versuchsprogramm Hauptuntersuchungen .....	58
5.6	Messprogramm .....	60
5.6.1	Verschleißbestimmung.....	61
5.6.2	Schnittkraftermittlung .....	61
5.6.3	Temperaturmessung .....	61
5.6.4	Randzonenprüfung mittels Barkhausenrauschen.....	62
5.6.5	Metallografische Untersuchungen.....	63
5.6.6	Röntgendiffraktometrie .....	64
5.6.7	Mikrohärteverläufe .....	64
5.6.8	Rasterelektronenmikroskopie.....	64
6	Untersuchungsergebnisse .....	65
6.1	Vorversuche .....	65
6.2	Hauptuntersuchungen .....	67
6.2.1	Ultrafeinstkornhartmetall THM-U .....	68
6.2.1.1	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit.....	68
6.2.1.2	Zwischenbetrachtung .....	78

6.2.1.3	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit .....	79
6.2.1.4	Auswertung / Prozessfensterdefinition .....	90
6.2.2	PCBN .....	92
6.2.2.1	Versuche .....	94
6.2.2.2	Auswertung.....	101
6.3	Verifikation der technologischen Werte .....	102
6.4	Thermische Randzonenbeeinflussung .....	108
6.4.1	Fräsbrandprüfung mittels Barkhausenrauschen.....	108
6.4.1.1	Schleiffräser.....	109
6.4.1.2	Standard Wendeschneidplatten ISO P20 – P40.....	109
6.4.1.3	Ultrafeinstkornhartmetall THM-U .....	110
6.4.1.4	PCBN .....	112
6.4.2	Fräsbrandprüfung mittels Nitalätzung .....	113
6.4.3	Querschleiff.....	116
6.4.4	Eigenspannungsverläufe.....	118
6.4.4.1	Versuch VHM5, Umlauf 1, Lücke 1.....	119
6.4.4.2	Versuch VHM5, Umlauf 2, Lücke 1.....	120
6.4.4.3	Versuch VHM5, Umlauf 3, Lücke 1.....	121
6.4.4.4	Versuch VHM5, Umlauf 3, Lücke 120.....	122
6.4.4.5	Versuch VHM2, Umlauf 3, Lücke 120.....	123
6.4.4.6	Schleiffräser, Umlauf 2, Lücke 1.....	124
6.4.4.7	Wendeplattenfräser, Umlauf 1, Lücke 1 .....	124
6.4.5	Mikrohärtetiefenverläufe.....	125
6.4.6	Rasterelektronenmikroskopie.....	128
6.4.7	Auswertung .....	131
7	Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	135
7.1	Zeitberechnung .....	135

	7.2 Vergleich .....	141
8	Zusammenfassung / Ausblick .....	144
9	Literatur .....	148
10	Anhang .....	155
	10.1 Prüfprotokolle Barkhausenrauschen .....	155
	10.2 Werkzeugeingriffswinkel $\varphi$ .....	156
	10.3 Werkzeugeinstellwinkel $\kappa$ .....	157
	10.4 Anwendungsbereiche der Hartmetallsorten nach DIN ISO 513.....	158
	10.5 Datenblatt Heller Versuchsfräsmaschine PFH 12-1400G .....	159
	10.6 Datenblatt Liebherr Wälzfräsmaschine LC 4000 .....	160
	10.7 Datenblatt Barkhausensensor Mini GP .....	162