

Alexander Johann Bagh

# Auslegung PVD-beschichteter Stirnräder





# Auslegung PVD-beschichteter Stirnräder

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Alexander Johann Bagh

## **Berichter:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter W. Gold

Tag der mündlichen Prüfung: 18. November 2014





# ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

**Alexander Johann Bagh**

Auslegung PVD-beschichteter Stirnräder

**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 3/2015



**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Alexander Johann Bagh:

Auslegung PVD-beschichteter Stirnräder

1. Auflage, 2015

Apprimus Verlag, Aachen, 2015  
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien  
an der RWTH Aachen  
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen  
Internet: [www.apprimus-verlag.de](http://www.apprimus-verlag.de), E-Mail: [info@apprimus-verlag.de](mailto:info@apprimus-verlag.de)

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-300-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

# Vorwort

## *Preamble*

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher für die wohlwollende Förderung und Betreuung meiner Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter W. Gold danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats, einhergehend mit einer Reihe von interessanten und lehrreichen Fachdiskussionen. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder gilt mein Dank für den Vorsitz bei meiner mündlichen Doktor-Prüfung.

Für die finanzielle Unterstützung meines Forschungsvorhabens bedanke ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) sowie dem WZL-Getriebekreis. Für die professionelle Zusammenarbeit im Bereich der Oberflächentechnik gilt mein besonderer Dank den Firmen Oerlikon Balzers und Osro.

Aus dem Kreis der Mitarbeiter der Abteilung Getriebetechnik des WZL danke ich allen herzlich, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang die Herren Markus Brumm, Christof Gorgels und Christoph Löpenhaus, deren Unterstützung für diese Arbeit von wesentlicher Bedeutung war. Aus der Forschungsgruppe Getriebeuntersuchung gilt mein Dank den Herren Jürgen Krause, Ed Winkler und Peter Reinhard, ohne sie wären zahlreiche Prüfstandsversuche nicht möglich gewesen. Für die Fertigung der eingesetzten Prüfverzahnungen danke ich den Herren Lothar Emonts, Erwin Janas und Thomas-Martin Palowski. Frau Brigitte Niederbach und den Herren Thomas Fischer und Bernd Krüger bin ich für die Unterstützung bei metrologischen und metallografischen Untersuchungen zu besonderem Dank verpflichtet. Bei der Erarbeitung simulativer Forschungsergebnisse habe ich weitreichende Unterstützung aus der Forschungsgruppe Getriebeberechnung und Fertigungssimulation erhalten, für die ich stellvertretend den Herren Christian Carl und Rainer Stephan danke. Herrn Rene Greschert danke ich für die gründliche und kritische Durchsicht meiner Arbeit. Meinen studentischen Hilfskräften und Studien-, Projekt- sowie Masterarbeitern danke ich für ihre unermüdliche Mitarbeit im Büro und im Prüffeld und alle eingebrachten Erkenntnisse, Beobachtungen und Diskussionen. Hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang die Herren Philip Konowalczyk, Rafał Frijschtatzky, Daniel Heußen und Alexander Krödel.

Meinen lieben Eltern und Geschwistern danke ich für ihre großzügige Unterstützung und ihren treuen Zuspruch. Mein größter Dank gilt jedoch meiner geliebten Frau Lea, die diesen Weg mit mir gegangen ist und mir stets mit Rat und Tat und sehr viel Nachsicht zur Seite stand.

Alexander Raß



# Inhaltsverzeichnis

## Content

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b> .....	<b>3</b>
2.1	Wälzbeanspruchung metallischer Oberflächen .....	3
2.2	Wälzbeanspruchung PVD-beschichteter Oberflächen .....	10
2.3	Der unbeschichtete Zahnflankenkontakt .....	16
2.4	Der PVD-beschichtete Zahnflankenkontakt .....	19
2.5	Auslegung PVD-beschichteter Stirnräder .....	23
2.6	Fazit .....	26
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise</b> .....	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Forschungsmethodik, Prüfverfahren und Bauteile</b> .....	<b>29</b>
4.1	Forschungsmethodik .....	29
4.2	Tribologische Strukturelemente .....	30
4.3	Der Rollenkontakt als Zahnflanken-Analogieversuch .....	34
4.4	Der Zahnflankenkontakt im Verspannungsprüfstand .....	37
4.5	Theoretische Analyse des Zahnflankenkontakts .....	40
<b>5</b>	<b>Verschleiß und Schadensbildung im PVD-beschichteten Wälzkontakt</b> .....	<b>47</b>
5.1	PVD-Beschichtung der Rollenprüfkörper .....	47
5.2	Reibarbeit und Verschleiß im Rollenkontakt .....	52
5.3	Einlaufverhalten und Oberflächenermüdung im Rollenkontakt .....	59
5.4	PVD-Beschichtung der Prüfzahnäder .....	66
5.5	Verschleiß und Schadensbildung im Zahnflankenkontakt .....	69
5.6	Fazit .....	75
<b>6</b>	<b>Methode zur Auslegung PVD-beschichteter Stirnräder</b> .....	<b>77</b>
6.1	Definition von Betriebspunkten im Rollentest .....	78
6.2	Durchführung und Auswertung der Verschleißuntersuchungen .....	80
6.3	Ansatz und Vorgehensweise bei der Modellbildung .....	87
6.4	Fazit .....	92
<b>7</b>	<b>Verifizierung der Verschleißvorhersage</b> .....	<b>93</b>
7.1	Qualitative Erprobung des Verschleißmodells .....	93
7.2	Ansatz zur Verifizierung der Verschleißvorhersage .....	94
7.3	Variation der Mikrogeometrie .....	100
7.4	Variation der Oberflächenendbearbeitung .....	108
7.5	Fazit .....	112
<b>8</b>	<b>Validierung der Methode</b> .....	<b>115</b>
8.1	Auslegung einer beschichteten Stirnradverzahnung .....	115
8.2	Einfluss der Beschichtung auf die Grübchenträgfähigkeit .....	120

---

8.3	Schadens- und Beanspruchungsanalyse .....	123
8.4	Fazit .....	127
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>129</b>
9.1	Zusammenfassung.....	129
9.2	Ausblick.....	132
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>139</b>
<b>11</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>149</b>
11.1	Ritzel Prüfverzahnung Z2 (FZG-C <sub>mod</sub> ).....	149
11.2	Rad Prüfverzahnung Z2 (FZG-C <sub>mod</sub> ) .....	150

## Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

### Formula Symbols and Abbreviations

$a$	mm	Randabstand
$a_A$	mm	Achsabstand
$a_H$	mm	Halbe Kontaktlänge nach Hertz
$a_V$	$\mu\text{m}$	Faktor der Verschleißfunktion
$A_V$	$\text{mm}^2$	Planimetrische Verschleißfläche
$b$	mm	Verzahnungsbreite
$b_H$	mm	Halbe Kontaktbreite nach Hertz
$b_m$	mm	Messflächenbreite
$b_V$	m	Verschleißbreite
$BG_{KGS}$	%	Bedeckungsgrad des KGS-Prozesses
$c_V$	$\mu\text{m}$	Summand der Verschleißfunktion
$C_a$	$\mu\text{m}$	Kopfrücknahme
CHD	mm	Einsatzhärtetiefe
$C_i$	$\mu\text{m}$	Konstanten der Verschleißfunktion
$C_\beta$	$\mu\text{m}$	Breitenballigkeit
$d_a$	mm	Kopfkreisdurchmesser
$d_b$	mm	Grundkreisdurchmesser
$d_{Ca}$	mm	Durchmesser Beginn Kopfrücknahme
$d_{Ff}$	mm	Fußformkreisdurchmesser
$d_{\text{Korn}}$	mm	Strahlgutdurchmesser
$d_{Na}$	mm	Nutzkreisdurchmesser am Kopf
$d_{Nf}$	mm	Nutzkreisdurchmesser am Fuß
$d_S$	$\mu\text{m}$	Schichtdicke
$d_T$	mm	Tastkugeldurchmesser
$d_w$	mm	Wälzkreisdurchmesser
$E$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Elastizitätsmodul
$E'$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Ersatzelastizitätsmodul
$f_{fm}$	$\mu\text{m}$	Profilformabweichung
$f_{H\alpha}$	$\mu\text{m}$	Profilwinkelabweichung

$f_{H\beta}$	$\mu\text{m}$	Flankenlinienwinkelabweichung
$F_N$	N	Normalkraft
$F_R$	N	Reibkraft
$F_{\Delta,B}$	-	Erhöhungsfaktor Wälzfestigkeit durch Beschichtung
G	-	Elatizitätsparameter
$h_c$	m	Schmierfilmhöhe am Wälzkreis
$h_{\min}$	$\mu\text{m}$	Minimale Schmierfilmhöhe
$H_{\min}$	-	Bezogene minimale Schmierfilmhöhe
i	-	Übersetzungsverhältnis
$I_{KGS}$	mm A	Intensität des KGS-Prozesses
k	W/mK	Wärmeleitkoeffizient
$K_i$	-	Krafftaktoren
$l_m$	mm	Messstrecke
$L_c$	N	Kritische Last beim Ritztest
$l_{Ca}$	$\mu\text{m}$	Länge der Kopfrücknahme
$l_E$	$\mu\text{m}$	Kantenlänge FE-Element
$l_k$	mm	Kontaktlänge
$l_m$	mm	Messlänge
$l_V$	mm	Verschleißlänge
m	kg	Masse
$m_n$	mm	Normalmodul
M	Nm	Drehmoment
n	1/min	Drehzahl
n (Vektor)	-	Normalenvektor
$n_M$	1/min	Motordrehzahl
$n_P$	-	Polynomgrad
$N_E$	-	Lastwechselzahl Einlaufprozess
$N_G$	-	Grenzlastspielzahl
$N_L$	-	Lastwechselzahl
$N_{LS}$	-	Lastwechselzahl pro Laststufe
$N_{WS}$	-	Anzahl Wälzstellung pro Teilung (Simulation)



$p$	$\text{N/m}^2$	Druck
$p_H$	$\text{N/mm}^2$	Hertzsche Pressung
$p_{H,E}$	-	Hertzsche Pressung im Einlaufprozess
$P_A$	%	Ausfallwahrscheinlichkeit
$P_n$	W	Nennleistung
$P_R$	W	Reibleistung
$r$	mm	Radius
$r^*$	mm	Ersatzkrümmungsradius
$r_{\text{Tast}}$	$\mu\text{m}$	Tastspitzendurchmesser
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$R_a$	$\mu\text{m}$	Arithmetischer Mittenrauwert
$R_k$	$\mu\text{m}$	Kernrautiefe
$R_{pk}$	$\mu\text{m}$	Reduzierte Spitzenhöhe
$R_{vk}$	$\mu\text{m}$	Reduzierte Rieftiefe
$R_z$	$\mu\text{m}$	Mittlere Rautiefe
$s$	%	Schlupf
$s_g$	mm	Gleitweg
$S$	$\mu\text{m}$	Streuung Topografiemessung Zahnflanke
$S_F$	-	Zahnfußsicherheit
$S_H$	-	Grübchensicherheit
$S_{\text{ints}}$	-	Fress-Sicherheit Integraltemperaturverfahren
$t$	s	Zeit
$t_E$	min	Einlaufzeit
$t_k$	s	Kontaktdauer
$t_{LS}$	min	Prüfzeit pro Laststufe
$t_{\text{prüf}}$	s	Prüfdauer
$t_{\text{PVD}}$	h	Beschichtungsdauer
$t_V$	$\mu\text{m}$	Verschleißtiefe
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$T_M$	$^{\circ}\text{C}$	Massentemperatur
$T_{\text{PVD}}$	$^{\circ}\text{C}$	Beschichtungstemperatur
$T_{\lambda}$	-	Testbeiwert für Graufleckenberechnung

$u$	-	Zähnezahlverhältnis
$U$	-	Geschwindigkeitsparameter
$v_g$	m/s	Gleitgeschwindigkeit
$v_R$	m/s	Rollgeschwindigkeit
$v_\Sigma$	m/s	Summengeschwindigkeit
$V_{Öl}$	l	Ölvolumen
$V'_{Öl}$	l/min	Ölvolumenstrom
$V_v$	mm <sup>3</sup>	Verschleißvolumen
$w$	m/s	Tangentialgeschwindigkeit
$W$	-	Lastparameter
$W_{ij}$	°	Messwinkel in i-j-Ebene
$W_R$	J	Reibarbeit
$W_R$	J	Reibarbeit
$W_{R,\Sigma}$	J	Kumulierte Reibarbeit
$W_t$	µm	Wellentiefe
$W_t$	µm	Welligkeit
$W_{Tast}$	°	Tastspitzenwinkel
$x$	-	Profilverschiebungsfaktor
$y_{TS}$	°	Tastspitzenwinkel
$z$	-	Zähnezahl
$Z_i$	-	Faktoren Grübchentragfähigkeit
$\alpha_n$	°	Eingriffswinkel
$\alpha_p$	m <sup>2</sup> /N	Druckviskositätskoeffizient bei Massentemperatur
$\alpha_t$	1/K	Viskositätstemperaturkoeffizient
$\alpha_{wt}$	°	Betriebseingriffswinkel
$\beta$	°	Schrägungswinkel
$\Delta_{Exz}$	mm	Exzentrizität
$\Delta_\beta$	µm	Achsschränkungsbeitrag
$\Delta_\delta$	µm	Achsneigungsbeitrag
$\varepsilon$	-	Profilüberdeckung
$\zeta$	-	Spezifisches Gleiten

$\eta_0$	(kg·m)/s	Dynamische Ölviskosität bei Umgebungsdruck und Massentemperatur
$\Theta$	°C	Kontakttemperatur
$\lambda$	-	Spezifische Schmierfilmhöhe
$\lambda_c$	mm	Grenzwellenlänge
$\mu$	-	Reibungszahl
$\mu_{\text{lok}}$	-	Lokale Reibungszahl
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\rho^*_{\text{Reg}}$	N/mm	Bezogener Beanspruchungsparameter
$\rho_{\text{Ers}}$	mm	Ersatzkrümmungsradius
$\rho_{\text{Reg}}$	N/mm	Beanspruchungsparameter
$\rho_{\text{TS}}$	µm	Tastspitzenradius
$\sigma_{\text{ax}}$	N/mm <sup>2</sup>	Eigenspannung in axialer Richtung
$\sigma_{\text{H}}$	N/mm <sup>2</sup>	Hertzsche Flankenpressung
$\sigma_{\text{H0}}$	N/mm <sup>2</sup>	Flankenpressung am Wälzkreis
$\sigma_{\text{HG}}$	N/mm <sup>2</sup>	Grübchen-Grenzfestigkeit
$\sigma_{\text{Hlim}}$	N/mm <sup>2</sup>	Dauerfestigkeitswert für Flankenpressung
$\sigma_{\text{tang}}$	N/mm <sup>2</sup>	Eigenspannung in tangentialer Richtung
$\omega$	1/s	Winkelgeschwindigkeit

**Abkürzung****Beschreibung**


---

3D	Dreidimensional
a	Amorph
A	Eingriffsbeginn
AW	Anti-Wear
B	Innerer Einzeleingriffspunkt
BP	Betriebspunkt
C	Wälzpunkt
C <sub>mod</sub>	Modifizierte Prüfverzahnung Typ FZG-C
D	Äußerer Einzeleingriffspunkt
E	Eingriffsende