

# **Auslegungsmethodik zur Optimierung des Einsatzverhaltens von Beveloidverzahnungen**

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

vorgelegt von

Tobias Röhlingshöfer

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter W. Gold

Tag der mündlichen Prüfung: 5. März 2012



# Berichte aus der Produktionstechnik

**Tobias Röthlingshöfer**

---

## **Auslegungsmethodik zur Optimierung des Einsatzverhaltens von Beveloidverzahnungen**

---

Herausgeber:

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Dipl.-Wirt. Ing. W. Eversheim

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

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Prof. h. c. mult. T. Pfeifer

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

Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. E. h. M. Weck

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt

---

Band 3/2012  
Shaker Verlag

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1020-6

ISSN 0943-1756

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 Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, für die mir immer gewährte freundliche und konstruktive Unterstützung, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter W. Gold danke ich für das grosse Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates. Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Kneer gilt der Dank für die Übernahme des Vorsitzes bei meiner Promotionsprüfung.

Bei den Firmen der Arbeitsgruppe Beveloid des WZL Getriebekreises bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und die fortwährende Unterstützung. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Thyssen und Herrn Dipl.-Ing. D. Nobs von der Reishauer AG sowie bei Herrn Dipl.-Ing. W. Winter von Getrag. Ihre fachliche Unterstützung und ihr Beitrag zu meinen Versuchen haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Getriebeabteilung, insbesondere bei den Kolleginnen und Kollegen der Gruppe „Getriebeberechnung und Fertigungssimulation“ für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die spannenden Diskussionen. Vor allem bedanke ich mich bei Frau I. Gerlofsma. Ohne sie wäre die programmtechnische Umsetzung meiner Arbeiten nicht möglich gewesen. Bei den Herren J. Hofschroer, C. Wuthe, L. Kirchart und F. Springer bedanke ich mich für die Erstellung der Benutzeroberflächen, welche die Programme erst für den normalen Nutzer anwendbar machen. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. J. Henser, Frau Dipl.-Ing. A. Garth und Herrn cand.-Ing. M. Köster für die vielfältige Unterstützung im Rahmen der Fertigstellung meiner Arbeit. Für die Unterstützung bei den Versuchen am Institut danke ich allen Kollegen der Gruppe „Getriebeuntersuchung“ herzlich. Ohne ihren fachlichen und tatkräftigen Beitrag wären die Untersuchungen nicht möglich gewesen. Meinen studentischen Hilfskräften sowie Studien- und Diplomarbeitern danke ich herzlich für ihren unermüdlichen Einsatz bei der Umsetzung meiner Gedanken und Ideen sowie für die interessanten Diskussionen. Im Rahmen dieser Arbeit sind insbesondere die Herren Dipl.-Ing. F. Hübner, cand. B.Sc. G. Philippen, cand. B.Sc. M. Wenzel und cand. Ing. U. Runtemund hervorzuheben. Für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Anmerkungen danke ich meinem Vater sowie den Herren Dipl.-Ing. C. Rasim, Dipl.-Ing. J. Henser, Dr.-Ing. M. Brumm und Dr.-Ing. C. Gorgels.

Abschliessend danke ich meinen Eltern und Schwiegereltern, dass Sie während meiner Studien- und Promotionszeit immer für mich da waren und an meinen Erfolg geglaubt haben. Der grösste Dank gilt meiner Frau Lisa und meinem Sohn Philipp. Ohne ihre Unterstützung, Geduld und Nachsicht, vor allem bei diversen Nacht- und Wochenendschichten am Institut, wäre diese Arbeit nicht durchführbar gewesen.

Zürich, im April 2012





# Inhaltsverzeichnis

## Content

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik in Forschung und Industrie</b> .....	<b>5</b>
2.1	Geometrie und Auslegung von Beveloids .....	5
2.2	Herstellung und Herstellsimulation von Beveloids .....	14
2.3	Analyse des Einsatzverhaltens von Beveloids .....	18
2.4	Zahnkontaktanalyse von Stirn- und Kegelrädern .....	20
2.5	Fazit des Stands der Technik .....	25
<b>3</b>	<b>Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise</b> .....	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Vorgehen und Module der Methode zur Auslegung und Optimierung des Verhaltens von Beveloids</b> .....	<b>29</b>
4.1	Berechnung und Optimierung der Basisgrößen .....	30
4.2	Ermittlung der Beveloidgeometrie .....	30
4.3	Ermittlung des Einsatzverhaltens .....	31
<b>5</b>	<b>Simulation der Herstellung von Beveloids</b> .....	<b>33</b>
5.1	Simulationsablauf .....	33
5.2	Vergleich und Analyse der realisierten Kinematiken .....	46
5.2.1	Ermittlung der Abstände zu einer idealen Solltopografie .....	46
5.2.2	Analyse der Kinematiken .....	47
5.3	Verifikation der simulierten Zahnflanken .....	50
5.3.1	Topografische Vermessung von Beveloidradflanken .....	50
5.3.2	Ergebnisvergleich .....	52
5.4	Fazit zur Herstellungssimulation von Beveloids .....	59
<b>6</b>	<b>Simulation des Einsatzverhaltens von Beveloids</b> .....	<b>61</b>
6.1	Vorgehen zur Zahnkontaktanalyse .....	61
6.2	Analyse des Einflusses unterschiedlicher Modifikationen auf das Einsatzverhalten von Beveloids .....	65
6.2.1	Versuchsradpaarung .....	66
6.2.2	Untersuchungen des lastfreien Verhaltens .....	67
6.2.3	Untersuchung des Verhaltens unter Last .....	78
6.3	Fazit der Simulation des Einsatzverhaltens .....	86
<b>7</b>	<b>Umsetzung der Methode zur Auslegung und Optimierung des Einsatzverhaltens von Beveloids</b> .....	<b>88</b>
7.1	Festlegung der Vorgabegrößen und des Auslegungszieles .....	88
7.2	Vorauslegung der Beveloidparameter .....	89
7.3	Optimierung des Kontaktes einer Radpaarung mit Beveloid .....	92

---

7.3.1	Erzeugung einer konjugierten Verzahnung .....	92
7.3.2	Optimierung einer Beveloidverzahnung mittels einer konjugierten Verzahnung .....	96
7.3.3	Optimierung der Verzahnungskorrektur .....	100
7.3.4	Lastberechnung unter Berücksichtigung der Fertigungseinflüsse	104
7.4	Fazit der Umsetzung der Methode .....	108
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>109</b>
8.1	Zusammenfassung.....	109
8.2	Ausblick.....	110
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>114</b>

# Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

## Formula Symbols and Abbreviations

### Latainische Formelzeichen

$\vec{e}$		Evolvertenvektor
$\vec{N}$		Normalenvektor
$\vec{v}$	m/s	Relativgeschwindigkeit
a	mm	Achsversetzung
a		Indikator rechtssteigende/ linkssteigende Schnecke
b	mm	Zahnbreite
$b_{\text{gem}}$	mm	Gemeinsame Zahnbreite
$C_{\alpha}$	$\mu\text{m}$	Höhenballigkeit
$C_{\beta}$	$\mu\text{m}$	Breitenballigkeit
d	mm	Teilkreisdurchmesser
$D_1$	mm	Abstand zum Achskreuzungspunkt, Rad1
$D_2$	mm	Abstand zum Achskreuzungspunkt, Rad2
$d_a$	mm	Kopfkreisdurchmesser
$d_b$	mm	Grundkreisdurchmesser
$d_{bL}$	mm	Grundkreisdurchmesser, links
$d_{bR}$	mm	Grundkreisdurchmesser, rechts
$d_w$	mm	Wälzkreisdurchmesser
$f_{H\beta}$	$\mu\text{m}$	Flankenlinienwinkelabweichung
$f_z$		Zahneingriffsordnung
h	mm	Zahnhöhe
$h^*$		Zahnhöhenfaktor
$h'$	mm	Fertigungszustellung
$h_a$	mm	Kopfhöhe
$h_a^*$		Kopfhöhenfaktor
$h_{aP}$	mm	Kopfhöhe des Bezugsprofils
$h_{aP0}$	mm	Kopfhöhe des Werkzeuges
$h_f$	mm	Fußhöhe
$h_f^*$		Fußhöhenfaktor

$h_{Ff}$	mm	Fußformhöhe
$h_{Ff}^*$		Fußformhöhenfaktor
$h_{FfP}$	mm	Fußformhöhe des Bezugsprofils
$h_{fKP0}$	mm	Fußknickehöhe des Werkzeuges
$h_{fP}$	mm	Fußhöhe des Bezugsprofils
$h_{fP0}$	mm	Fußhöhe des Werkzeuges
$h_P$	mm	Zahnhöhe des Bezugsprofils
$h_{P0}$	mm	Zahnhöhe des Werkzeuges
$h_{prP0}$	mm	Protuberanzzahnhöhe des Werkzeuges
$l$	mm	Laufkoordinate entlang der Zahnbreite
$M_{ab}$	Nm	Abtriebsmoment
$m_n$	mm	Normalmodul
$m_{n1}$	mm	Normalmodul Stirnseite 1
$m_{n2}$	mm	Normalmodul Stirnseite 2
$m_t$	mm	Stirnmodul
$n_{an}$	U/min	Antriebsdrehzahl
$n_{WST}$	U/min	Werkstückumdrehungen
$n_{WZG}$	U/min	Werkzeugumdrehungen
$q$		Indikator der Kegelspitzenausrichtung
$r$	mm	Teilkreisradius
$s$	mm	Zahndicke am Teilkreis
$s_a$	mm	Kopfzahndicke
$s_{a, \text{grenz}}$	mm	Spitzgrenze
$s_y$	mm	Zahndicke am y-Kreis
$v_{ax}$	mm/U <sub>WST</sub>	Werkzeuggeschwindigkeit im Achsschnitt
$v_n$	mm/U <sub>WST</sub>	Werkzeuggeschwindigkeit im Normalschnitt
$v_t$	mm/U <sub>WST</sub>	Werkzeuggeschwindigkeit im Stirnschnitt
$v_z$	mm/U <sub>WST</sub>	z-Komponente der Werkzeuggeschwindigkeit
$x$	mm	Profilverschiebung
$x^*$		Profilverschiebungsfaktor
$x_{bez}$	mm	Profilverschiebung in der Bezugsebene
$x^*_{bez}$		Profilverschiebungsfaktor in der Bezugsebene

$X_E$	mm	Erzeugungsprofilverschiebung
$X^*_E$		Erzeugungsprofilverschiebungsfaktor
$X_{res,l}$	mm	Resultierende Profilverschiebung bei l
$X^*_{res,l}$		Resultierender Profilverschiebungsfaktor bei l
$X^*_{U,L}$		Unterschnittgrenze, links
$X^*_{U,R}$		Unterschnittgrenze, rechts
$X^*_{ZL}$		Grenzprofilverschiebungsfaktor, links
$X^*_{ZR}$		Grenzprofilverschiebungsfaktor, rechts
$Z$		Zähnezahl
$Z_0$		Gangzahl des Werkzeuges

### Griechische Formelzeichen

$\alpha_{atL}$	°	Stirnprofilwinkel am Kopf, links
$\alpha_{atR}$	°	Stirnprofilwinkel am Kopf, rechts
$\alpha_{KP0}$	°	Fußknickwinkel des Werkzeuges
$\alpha_n$	°	Normaleneingriffswinkel
$\alpha_{P0}$	°	Eingriffswinkel des Werkzeuges
$\alpha_{prP0}$	°	Protuberanzwinkel des Werkzeuges
$\alpha_{Pt}$	°	Stirnprofilwinkel des Bezugsprofils
$\alpha_{tL}$	°	Stirnprofilwinkel, links
$\alpha_{tR}$	°	Stirnprofilwinkel, rechts
$\beta$	°	Schrägungswinkel
$\beta'$	°	Fertigungsschrägungswinkel
$\beta_{aL}$	°	Schrägungswinkel am Kopf, links
$\beta_{aM}$	°	Mittlerer Kopfschrägungswinkel
$\beta_{aR}$	°	Schrägungswinkel am Kopf, rechts
$\beta_L$	°	Schrägungswinkel, links
$\beta_P$	°	Schrägungswinkel des Bezugsprofils
$\beta_R$	°	Schrägungswinkel, rechts
$\gamma_{P0}$	°	Schneckensteigung des Werkzeuges
$\delta$	°	Kegelwinkel
$\bar{\delta}$	°	Verlagerungswinkel des Arbeitspunktes

$\Delta y$	$\mu\text{m}$	Zustellung in y-Richtung
$\Delta\varphi$	$\mu\text{rad}$	Drehwinkelabweichung
$\eta$	$^\circ$	Steigungswinkel
$\eta'$	$^\circ$	Fertigungssteigungswinkel
$\Theta$	$^\circ$	Profilverschiebungswinkel
$\Theta'$	$^\circ$	Fertigungskonuswinkel
$\kappa$	$^\circ$	Einpasswinkel
$\lambda$	$^\circ$	Winkel zwischen Flächennormalen
$\xi$	$^\circ$	Evolventenwinkel
$\rho_{aP0}$	mm	Kopfrundungsradius des Werkzeuges
$\Sigma$	$^\circ$	Achskreuzwinkel
$\Phi$	$^\circ$	Kontakt Drehwinkel
$\omega$	U	Werkstückumdrehungen pro Simulationsschritt

### Abkürzungen

ALKAEOS	Allgemeine Zahnkontaktanalyse Software
BEM	Boundary-Elemente-Methode
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
FEM	Finite-Elemente-Methode
ISO	International Organization for Standardization
KIMoS	Klingelnberg Integrated Manufacturing of Spiral Bevel Gears
STIRAK	Stirnradkette
WKZ	Werkzeug
WST	Werkstück
WZL	Werkzeugmaschinenlabor
ZaKo3D	3D-Zahnkontaktanalyse

### Indizes

0	Am Werkzeug
a	Bezug auf den Zahnkopf

---

ab	Bezogen auf den Abtrieb
an	Bezogen auf den Antrieb
ax	Axialkomponente
bez	Bezug
f	Bezug auf den Zahnfuß
gem	Gemeinsam
l	An Zahnbreitenposition l
L	Linke Flanke
M	In Verzahnungsmitte
max	Maximal
min	Minimal
n	Im Normalschnitt
P	Am Bezugsprofil
R	Rechte Flanke
res	Resultierend
t	Im Stirnschnitt
U	Unterschnitt
y	Bezogen auf y-Durchmesser
zwge	Zwischengetriebe
$\alpha$	Bezug auf das Zahnprofil
$\beta$	Bezug auf die Zahnbreite