

Verzahnungsanregung im Antriebsstrang

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Joachim Hesse

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Jacobs

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Februar 2011

Berichte aus der Produktionstechnik

Joachim Hesse

Verzahnungsanregung im Antriebsstrang

Herausgeber:

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

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. 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 1/2011
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, 2011)

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9987-3

ISSN 0943-1756

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Preamble

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, dem Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, für die freundliche Unterstützung und Förderung dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs, dem Leiter des Instituts für Maschinenelemente und -gestaltung, danke ich für die eingehende Durchsicht des Manuskripts und die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Karl Schomburg danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein wesentlicher Teil meiner Forschungsarbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und den WZL-Getriebekreis gefördert. Besonders bedanke ich mich bei den Firmen Getrag Ford Transmissions und Tedrive für die Unterstützung meiner Arbeit und die konstruktive und freundliche Zusammenarbeit.

Weiterhin bin ich allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls, der Getriebeabteilung und insbesondere der Forschungsgruppe „Getriebeuntersuchungen“ verbunden, die mich durch Ihre tatkräftige Unterstützung und die ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützten. Besonders bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Alexander Liberson, Herrn Peter Becker und Herrn Thomas Schreiber für die Entwicklung des Getriebeprüfstands, der die Basis für die Ergebnisse meiner Arbeit bildet. Herrn Jürgen Krause, Herrn Peter Reinhart und Herrn Egon Winkler danke ich für ihren außergewöhnlichen Arbeitseinsatz beim Aufbau und der Instandhaltung meiner Prüfeinrichtungen. Herrn Dipl.-Ing. Rainer Stephan, Herrn Lothar Emonts und Herrn Erwin Janas danke ich für Ihre Hilfe bei der Auslegung und Fertigung der Versuchsverzahnungen.

Darüber hinaus danke ich meinen ehemaligen Studien- und Diplomarbeitern. Hervorheben möchte ich meine ehemaligen studentischen Hilfskräften Herrn Dipl.-Ing. Matthias Brockmann, Herrn Dipl.-Ing. Martin Hellmann, Herrn Dipl.-Ing. Federico Quesada und Herrn Dipl.-Ing. Matthias Wohlleb. Bei Ihnen bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und ihren stets beispiellosen Einsatz.

Ein großer Dank gilt meinen langjährigen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Markus Brumm, Herrn Dipl.-Ing. Christof Gorgels und Herrn Dipl.-Ing. Rolf Schalaster für die konstruktiven Ratschläge und die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, die meinen beruflichen Werdgang ermöglichen und mich stets nach besten Kräften unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	5
2.1	Getriebegeräusche	5
2.2	Anregungsmechanismen im Zahneingriff	7
2.2.1	Parameteranregung	8
2.2.2	Stoßanregung	9
2.2.3	Weganregung	10
2.3	Methoden zur Optimierung des Anregungsverhaltens von Verzahnungen ohne Berücksichtigung des Getriebes	12
2.3.1	Verzahnungsmessung und Zahnkontaktanalyse	12
2.3.2	Ein- und Zweiflankenwälzprüfung	13
2.3.3	Betriebswälzprüfung – Dynamische Laufprüfung am Radsatz	17
2.4	Methoden zur Optimierung des Anregungsverhaltens von Verzahnungen im Gesamtsystem Getriebe	21
2.4.1	Konventionelle Geräuschprüfung von Getrieben	21
2.4.2	Simulation des dynamischen Verhaltens von Getrieben	22
2.4.3	Drehschwingungsmessung am Antriebsstrang	24
2.5	Fazit	28
3	Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	29
4	Methode zur durchgängigen Messung der Anregung durch Verzahnungen in Getrieben	31
4.1	Vorstellung des Prüflings	31
4.2	Vorstellung des Prüfstands und Ableitung von Anforderungen an die Prüftechnik	33
4.3	Entwicklung eines universellen Messsystems zur Erfassung des Anregungsverhaltens durch Verzahnungen und Integration in das Gesamtkonzept des Getriebeprüfstands	35
4.3.1	Anforderungen an das Messsystem	36
4.3.2	Konzept des Messsystems	37
4.3.3	Anbindung der Messsysteme an die Prüfaufbauten	39
4.3.4	Übertragungsverhalten der Zwischenelemente	47
4.4	Fazit	50
5	Anwendung der Methode auf ein mehrstufiges Stirnradgetriebe	51
5.1	Laufverhalten der Stirnradsätze	51
5.1.1	Auslegung von Flankenmodifikationen	51
5.1.2	Gegenüberstellung von Kennwerten aus Simulation und experimenteller Laufprüfung am Radsatz	56

5.2	Versuchsergebnisse am Schaltgetriebe.....	62
5.2.1	Bewertung der Kenngrößen Drehfehler und Drehbeschleunigung für die Messung der Anregung von Verzahnungen im Schaltgetriebe	62
5.2.2	Ergebnisse der Laufprüfungen und Modalanalyse.....	64
5.3	Fazit	75
6	Anregungs- und Geräuschverhalten flankenmodifizierter Kegelradsätze im Hinterachsgetriebe.....	77
6.1	Versuchsradsätze	78
6.2	Versuchsergebnisse am Kegelradsatz ohne getriebeseitige Störmechanismen	79
6.3	Versuchsergebnisse am Hinterachsgetriebe.....	81
6.3.1	Bewertung der Drehfehler- und Drehbeschleunigungsmessung für den Einsatz im automobilen Hinterachsgetriebe.....	82
6.3.2	Ergebnisse der Laufprüfung.....	84
6.4	Fazit	89
7	Wechselwirkungen zwischen den Zahnflankenmodifikationen und dem akustischen Verhalten des Gesamtsystems Antriebsstrang.....	91
7.1	Analyse des Drehübertragungsverhaltens im Antriebsstrang	91
7.2	Korrelationsanalysen zwischen den Ergebnissen der Untersuchungen an den Getrieben und am Antriebsstrang	101
7.2.1	Schaltgetriebe	101
7.2.2	Hinterachsgetriebe	106
7.3	Wechselwirkungen der Getriebe abhängig von der Anregung durch die Verzahnungen.....	108
7.4	Einfluss der Gelenkwelle auf akustische Wechselwirkungen der Getriebe	113
7.5	Fazit	116
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	119
8.1	Zusammenfassung.....	119
8.2	Ausblick.....	122
9	Literaturverzeichnis.....	127

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Lateinische Formelzeichen

a	mm	Achsabstand
A		Amplitude
b	mm	Zahnbreite
c	N/ μ m	Steifigkeit
c	N/ μ m	Einzelfedersteifigkeit
c_m	N/ μ m	Mittelwert der Gesamtzahnfedersteifigkeit
c_α	μ m	Betrag der Profilballigkeit
c_β	μ m	Betrag der Breitenballigkeit
c_γ	N/ μ m	spezifische mittlere Gesamtzahnfedersteifigkeit
C_A	μ m	Betrag der Kopfrücknahme
d	m	Abstand
d	mm	Durchmesser
d_{Na}	mm	Kopfnutkreisdurchmesser
f	Hz	Frequenz
$f_{p'}$	°	Achsneigung
$f_{p''}$	°	Achsschränkung
$f_{H\alpha}$	μ m	Profilwinkelabweichung
$f_{H\beta}$	μ m	Flankenlinienwinkelabweichung
$f_{HV\beta}$	μ m	Verschränkung
f_Z	Hz	Zahneingriffsfrequenz
f_{2Z}	Hz	Doppelte Zahneingriffsfrequenz
F_a	N	Zahnaxialkraft
F_N	N	Zahnnormalkraft
F_r	N	Zahnradialkraft
g_α	mm	Profileingriffsstrecke
$g_{\beta b}$	mm	Sprungeingriffsstrecke am Grundkreis
H	mm	Ritzleinbaumaß

i		Auf f bezogene Frequenz
i		Übersetzungsverhältnis
i		Zählindex
j		Zählindex
J	kgm ²	Trägheit
J	mm	Tellerradeinbaumaß
k	Nsm ⁻¹	Dämpfungskonstante
l	mm	Länge
L	dB	Pegel
m	mm	Modul
m _n	mm	Normalmodul
M	Nm	Drehmoment
n	min ⁻¹	Drehzahl
p _e	mm	Eingriffsteilung
P	W	Leistung
r _b	mm	Grundkreisradius
t	s	Zeit
U	V	Spannung
Ü	µm	Übermaß
V	mm	Achsversatz
x		Profilverschiebungsfaktor
z		Zähnezahl

Griechische Formelzeichen

α	°	Winkel
α	°	Eingriffswinkel
α _n	°	Normaleingriffswinkel
β	°	Schrägungswinkel
Δ		Differenz
Δ	µm	Abweichung
ΔC	N/mm ²	Wechselanteil der Gesamtfedersteifigkeit

Δf	Hz	Bandbreite
$\Delta\varphi$	rad	Wälzabweichung
$\Delta\varphi''$	rads^{-2}	Differenzdrehbeschleunigung
$\Delta\varphi_G$	μrad	Gelenkspiel
ε_α		Profilüberdeckungsgrad
ε_γ		Gesamtüberdeckungsgrad
φ	rad	Drehwinkel
φ''	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	Drehbeschleunigung
$\vartheta_{\text{Öl}}$	$^\circ\text{C}$	Öltemperatur
Σ	$^\circ$	Achskreuzwinkel
ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit

Abkürzungen und Indizes

A	A-bewertet
Ab	Abtrieb
An	Antrieb
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
B	Bremse
C	Konstant
CNC	Computerized Numerical Control
Diff.Drehbeschl.	Differenzdrehbeschleunigung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRESP	Drehschwingungssimulationsprogramm
DYLA	Programmssystem „Dynamische Lagerkräfte“
F	Festanforderung
FE	Finite Elemente
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
gem	gemittelt
ges	gesamt
G	Gang

HA	Hinterachse
HS	High Split
In	Eingang Hinterachsgetriebe
ICP	Integrated Circuit Piezo
ISO	International Organization for Standardization
W	Inkrementaler Winkelschrittgeber
Kfz	Kraftfahrzeug
KS	Körperschall
KW	Keilwelle
LS	Low Split
max	Maximum
min	Minimum
M	Motor
MKS	Mehrkörpersimulation
Nfz	Nutzfahrzeug
Ordn.	Ordnung
Pos.	Position
Q	Qualität
R	Rückwärtsgang
RS	Radsatz
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
V	Variante
VDI	Verein deutscher Ingenieure
VG	Vorgelegeverzahnung des Schaltgetriebes
W	Wunschanforderung
WZL	Werkzeugmaschinenlabor