



Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

Einsatzpotential und Anwendung spektralanalytischer Auswerteverfahren zur schnellen Zahnradprüfung

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation
von

M.Sc. Dipl.-Ing. (BA) Achim Pahlke

geboren am 04. Juni 1982 in Essen

2011

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. B. Denkena
Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach

Tag der Promotion: 16. August 2011

Berichte aus dem Institut für Mess- und Regelungstechnik der
Leibniz Universität Hannover

Achim Pahlke

**Einsatzpotential und Anwendung spektral-
analytischer Auswerteverfahren zur schnellen
Zahnradprüfung**

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2011

Umschlag:

Das Hintergrundbild zeigt eine Kollage vom Institutsgebäude an der Leibniz Universität Hannover aus verschiedenen Zeitepochen. Gestaltung: K. Salfeld

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 978-3-8440-0404-5

ISSN 1615-7184

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

DANKSAGUNG

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover. Teile dieser Dissertation sind Ergebnisse des Teilprojekts T4 „Adaptronische Feinpositionierung in Spannfuttern für Werkzeugmaschinen“ des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ zugrunde gelegt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier, Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover, danke ich für die wissenschaftliche Förderung sowie für die Übernahme des 1. Referats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Denkena, Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des 2. Referats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. F.-W. Bach, Leiter des Instituts für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Meinen Kollegen am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die hervorragende Zusammenarbeit und die vielfältige Unterstützung.

Hannover, August 2011

Achim Pahlke

KURZFASSUNG

Innerhalb des Transferforschungsprojekts „Adaptronische Feinpositioniervorrichtung in Spannfütern für Werkzeugmaschinen“, Teil des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Hochleistungsbauteilen“ an der *Leibniz Universität Hannover*, führen Härteverzüge von Nockenwellen-Zahnradern zu Lageabweichungen (Exzentrern) bei der Erstaufspannung.

Die entwickelte optische Messeinrichtung verwendet eine Messdatensynchronisation mit einem inkrementellen Winkelgeber zur winkeläquidistanten Aufnahme eines Stirnschnitts sowie eine spektralanalytische Datenverarbeitung zur taktzeitgerechten Charakterisierung der Verzahnung. Damit wird erstmals eine Auswertung des gemessenen Stirnschnitts über das Spektrum zur Verzahnungsprüfung eingeführt.

Zur Berechnung des für die Exzenterkorrektur erforderlichen Vektors können sowohl Haupt- als auch Nebenformelemente der Verzahnung extrahiert und über das Spektrum ausgewertet werden. Die Umsetzung des Korrekturvektors erfolgt als zweidimensionale Ausrichtung mittels eines Feinpositionierspannfutters direkt in der Werkzeugmaschine.

Der für die Sicherstellung der Maßhaltigkeit und Endbearbeitbarkeit der Verzahnung notwendige Prozess zur Korrektur des Exzentrers wird dabei als „Adaptronische Feinpositionierung“ bezeichnet.

Die Gültigkeit der Methoden zur Messdatenerfassung und digitalen -verarbeitung wird anhand einer Fehlerabschätzung sowie durch Simulationen, Reproduktionsmessungen und taktilen Referenzmessungen nachgewiesen.

Schlagworte:

Adaptronische Feinpositionierung,
optische Zahnradmesstechnik, digitale Signalverarbeitung

ABSTRACT

Within the transfer research project “Adaptronic precision positioning system in chucks for machine tools”, which is part of the researched innovative precision forging process-chain at the *Leibniz Universität Hannover*, hardening distortions of camshaft gearwheels lead to displacements (eccentricities) of the clamped gearwheels. The designed correction process of the eccentricity is called “adaptronic precision positioning technology”.

The chosen synchronization of the laser distance sensor and incremental rotary encoder leads to an angle equidistant measurement of the gear’s traverse profile. This enables the use of innovative digital algorithms for the computation of the (position) correction. Moreover, several geometry variations can be detected within short computational times. Thus, the spectral analytic processing of the traverse profile of the gearwheel is introduced for the first time in order to determine the position correction and geometry variations. The fast measurement system and algorithms are designed to fulfill the requirement of short cycle times in automotive manufacturing.

The correction of the position again is carried out using a built-in mechatronic precision positioning chuck inside the machine tool. Having estimated the errors of the measuring system, the validity of the acquisition and the processing of the measured data is proved by the means of simulations, reproducibility measurements and tactile reference measurements.

In the manufacturing operation, the in-line precision positioning system – consisting of the optical measuring system, the digital data processing algorithms and the mechatronic chuck – enables the optimal finishing of the tothing. The sufficient accuracy of the precision positioning process is confirmed by a final tactile quality check.

Keywords:

adaptronic precision positioning,
optical gearwheel measurement, digital signal processing

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Problemdefinition	2
2.1	Ausgangssituation.....	3
2.2	Zielsetzung	5
3	Stand der Wissenschaft und Technik	8
3.1	Verzahnungsmess- und Prüftechnik	8
3.1.1	Grundbegriffe der Verzahnungstechnik.....	9
3.1.2	Taktile Mess- und Prüftechnik	11
3.1.3	Optische Mess- und Prüftechnik.....	24
3.2	Geometrische Auswertemethoden	31
3.2.1	Hüll-Einpassung.....	34
3.2.2	Pferch-Einpassung.....	36
3.2.3	L_1 -Einpassung	37
3.2.4	L_2 -Einpassung	38
3.2.5	L_{∞} -Einpassung	40
3.2.6	Anwendungen in der Verzahnungsmesstechnik	42
3.3	Digitale Signalanalyse.....	44
3.3.1	Fourierreihen und Fouriertransformation.....	44
3.3.2	Goertzel-Algorithmus	52
3.3.3	Anwendungen in der Verzahnungsmesstechnik	55
4	Systemaufbau	57
4.1	Konoskopischer Sensor	57
4.2	Messdatensynchronisation	61
4.3	Fertigungsintegriertes Feinpositioniersystem	63
4.3.1	Feinpositionierspannfutter	64
4.4	Benutzerschnittstelle.....	67
5	Spektralanalytische Zahnradauswertung.....	69
5.1	Messdatenaufnahme und -vorverarbeitung	69

5.2	Messdatenverarbeitung	72
5.2.1	Simulationen	72
5.2.2	Referenzmessungen	79
5.3	Detektion von Exzenterfehlern	87
5.4	Detektion von Verzugsfehlern	100
5.5	Detektion von Verzahnungsfehlern	104
5.6	Detektion von Taumelfehlern	112
6	Gültigkeit der Methoden.....	117
6.1	Fehlerabschätzung.....	119
6.1.1	Abstand	121
6.1.2	Winkel.....	123
7	Einsatz in der Zahnradfertigung.....	126
7.1	Feinpositionierung von Nockenwellen-Zahnradern	126
7.2	Grenzen der Feinpositionierung	128
8	Zusammenfassung	130
9	Schrifttum.....	133

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Nockenwellen-Zahnrad mit Verzahnungsdaten	2
Abb. 2: Prozesskette des Nockenwellen-Zahnrad	2
Abb. 3: Aufspannen der Verzahnung an den Zahnflanken [34]	3
Abb. 4: Schematischer Ablauf der adaptiven Feinpositionierung [34]	5
Abb. 5: Begriffe einer Stirnradverzahnung [119]	9
Abb. 6: Unterscheidung verschiedener Verzahnungsfehler [103].....	10
Abb. 7: Messung der Zahnweite ($k = 3$) [119]	12
Abb. 8: Radiales Einkugelmaß [119].....	14
Abb. 9: Diametrales Zweikugelmaß [119]	16
Abb. 10: Schema der Einflanken-Wälzprüfung [34, 119]	17
Abb. 11: Schema der Zweiflanken-Wälzprüfung [34, 119]	18
Abb. 12: Schema des Wälzscannens [80].....	19
Abb. 13: Koordinatenmessgerät (Portalbauweise) mit Drehtisch	20
Abb. 14: Koordinatenmessgerät mit Laserinterferometer [31]	21
Abb. 15: Funktionsprinzip des taktil-optischen Tasters [67, 68]	22
Abb. 16: Taktiler Zahnradmessgerät mit Drehtisch	23
Abb. 17: Triangulations- und Lichtschnittverfahren [72, 75].....	26
Abb. 18: Streifenprojektionsmessung eines Zahnrad [62].....	28
Abb. 19: Maß-, Form- und Lageabweichung am Beispiel einer Welle [28].....	31
Abb. 20: Iterative Minimumsuche [98].....	34
Abb. 21: Hüllkreis [45].....	35
Abb. 22: Pferchkreis [45].....	36
Abb. 23: L_1 -Kreis [34].....	37
Abb. 24: L_2 -Kreis [45].....	39
Abb. 25: L_∞ -Ausgleichskreis [45]	41
Abb. 26: Fourier-Approximation eines Rechtecksignals [113]	45
Abb. 27: Butterfly-Signalfußplan [82].....	52
Abb. 28: Blockschaltbild Goertzel-Algorithmus [82]	54

Abb. 29: Funktionsprinzip des konoskopischen Sensors [71]	58
Abb. 30: Schema der digitalen Messdatenerfassung	61
Abb. 31: Synchronisation Trigger-Signal und Inkremental-Winkelgeber	62
Abb. 32: Werkzeugmaschine <i>Gildemeister CTX420</i> am <i>IFW</i>	63
Abb. 33: Einmessen der x/y -Richtung	66
Abb. 34: Benutzerschnittstelle <i>PiMPS</i>	68
Abb. 35: Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung.....	70
Abb. 36: Winkeläquidistante Messpunkteverteilung	70
Abb. 37: Spektrum verschiedener Zylinderschnitte	74
Abb. 38: Streudiagramm mit Normalverteilungen	76
Abb. 39: Rayleighverteilung mit Berechnungsformeln	77
Abb. 40: Linearitätskennlinie der Exzenterdetektion	78
Abb. 41: Formtester <i>MFU-7</i> und konoskopischer Sensor	79
Abb. 42: Standardabweichungen von Zylindernormalmessungen.....	81
Abb. 43: Messung und Simulation eines Zylinderschnitts	81
Abb. 44: Lehrzahnräder Typ A der Firma <i>Frenco</i>	82
Abb. 45: Lehrzahnräder Typ B der Firma <i>Frenco</i>	83
Abb. 46: Normierte Amplituden der Lehrzahnräder vom Typ A	84
Abb. 47: Normierte Amplituden der Lehrzahnräder vom Typ B	85
Abb. 48: Gemessener und rekonstruierter Stirnschnitt	86
Abb. 49: Normierte Amplituden der Stirnschnitte	86
Abb. 50: Erste Segmentierung einer relativen Zahnradmessung.....	89
Abb. 51: Exzenterdetektion mittels erster Oberwelle	94
Abb. 52: Vergleich unterschiedlicher Exzenterdetektionen	96
Abb. 53: Ergebnisse der Fußkreisauswertung	98
Abb. 54: Standardabweichungen und Messdauer	98
Abb. 55: Vergleich der verzugsrelevanten Amplituden	101
Abb. 56: Normiertes Spektrum bei Änderung der Spannkraft	102
Abb. 57: Normiertes Spektrum im gespannten Zustand	103
Abb. 58: Gleichanteile der Zahnperioden	107
Abb. 59: Ergebnisse der ersten Frequenz der Zahnperioden	108

Abb. 60: Ergebnisse der zweiten Frequenz der Zahnperioden	109
Abb. 61: Realanteile der zweiten Frequenz der Zahnperioden	109
Abb. 62: Ergebnisse der dritten Frequenz der Zahnperioden	110
Abb. 63: Messung eines verkippten Zylinders	113
Abb. 64: Normierte Amplituden eines verkippten Zylinders	114
Abb. 65: Amplituden eines verkippten und exzenterbehafteten Zylinders	115
Abb. 66: Optische Eigenschaften technischer Oberflächen [39]	117
Abb. 67: Unsicherheiten eines Messpunkts	120
Abb. 68: Neigung des konoskopischen Sensors [34]	121
Abb. 69: Messdatenaufnahme bei Neigungsfehler	122
Abb. 70: Zeitdiagramm des konoskopischen Sensors [71]	124
Abb. 71: Integration des Feinpositionierungssystems	127

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Technische Spezifikation des konoskopischen Sensors [71]	59
Tab. 2: Simulation –Zylinderschnitt mit Messrauschen.....	75
Tab. 3: Rayleigh-Verteilung des Exzenterfehlers	77
Tab. 4: Technische Spezifikation – Formtester MFU-7 [70]	80
Tab. 5: Parameter der Verzahnungen der Lehrzahnräder	83
Tab. 6: Vergleich verschiedener Exzenterdetektionsmethoden.....	97
Tab. 7: Vergleich der Amplituden aus Stirnschnitt und Zahnperioden	106
Tab. 8: Simulation – Zylinderschnitt mit Taumelfehler	115
Tab. 9: Effektive Unsicherheit des Winkels φ	125

FORMELZEICHEN

Die verwendeten Begriffe und Bestimmungsgrößen der Verzahnungsterminologie entstammen DIN 3960 [120]. Die Bedeutung mehrfach verwendeter Formelzeichen erschließt sich aus dem Kontext.

Die Angabe von Winkelgrößen ist in Winkelgrad (1°), -minuten ($1'$) oder -sekunden ($1''$), für eine numerische Datenverarbeitung ist gegebenenfalls eine Umrechnung in das Bogenmaß (rad) erforderlich.

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
<i>a</i>	mm	(Achs-) Abstand
	mm	Aufmaß (-parameter)
	mm	Halbachse (<i>x</i> -Richtung)
<i>A</i>		Bezug (primär)
<i>b</i>	mm	Breite
	mm	Halbachse (<i>y</i> -Richtung)
<i>B</i>		Bezug (sekundär)
<i>c</i>	mm	Kopfspiel
<i>c</i> *		Kopfspiel-Faktor
<i>d</i>	μm	Abstand
	mm	Durchmesser
<i>D</i>	mm	Durchmesser
<i>e</i>	mm	Versatz
<i>E</i>		Exzenter

Formelzeichen

f	Hz	Frequenz Zielfunktion
F		Fußpunkt
	N	Kraft
h	mm	Höhe
I		Interpolation
k		(diskrete) Frequenz Erweiterungsfaktor Messzähne-, -lückenzahl
l	mm	Länge
L		Norm
m	mm	Modul
M	mm	Maß Mittelpunkt
N		Messpunkteanzahl Normale
p	mm	Teilung Wahrscheinlichkeitsdichte
P		(Mess-) Punkt
q		Parameter
Q		Quadranten
r	mm	Radius
s	μm 1°	empirische Standardabweichung der Länge empirische Standardabweichung des Winkels
S		Striche (Inkrement)
T	s	Zeit, Periodendauer
T		Toleranz
w		Gewicht
W	mm 1°	Weite Winkel
x	mm mm mm	Koordinate Messpunkt Profilverschiebung Zählvariable

X		Fouriertransformierte
y	mm	Koordinate beliebiger Punkt der Evolvente (komplexe) Folge
z	mm	Koordinate Zähnezahl

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	1°	Eingriffswinkel
β	1°	Schrägungswinkel
γ	1°	Winkel
Δ		Differenz
ζ	1°	Winkel (Parameter)
η	1°	(Zahn-) Lücken-Halbwinkel
σ	μm	Standardabweichung
τ	1°	Teilungswinkel
φ	1°	(Rotations-) Winkel
ψ	1°	Zahndicken-Halbwinkel
ω	1°/s	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

Zeichen	Bedeutung
a	Kopf (-kreis)
b	Grund (-kreis)
d	diametral
E	Einpassung Exzenter Erfassungskoordinatensystem
f	Fuß (-kreis)
F	Form (-kreis)
i	Zählindex
k	Messzähne-, -lückenzahl
K	Kugel Kreis
M	Messkreis Messkugel Mittelpunkt Modellfunktion
max	maximal
min	minimal
n	Normalschnitt, -profil Zählindex Nyquist
p	Normindex
P	Bezugsprofil Positionierkoordinatensystem
r	radial
R	Rayleigh
S	Segment
t	Stirnschnitt, -profil
V	(Profil-) Verschiebung
W	Werkzeugmaschinenkoordinatensystem
z	Anzahl der Zähne