



Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

Optische Geometrieprüfung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile

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

Dipl.-Phys. Markus Kästner

geboren am 18. Oktober 1975 in Hannover

2008

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

Tag der Promotion: 21. Juli 2008

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

Markus Kästner

**Optische Geometrieprüfung
präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile**

Shaker Verlag
Aachen 2010

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., 2008

Umschlag:

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

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9443-4

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

KURZFASSUNG

Im Rahmen der an der Leibniz Universität Hannover erforschten „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ kommt es durch die umformende Fertigung hochbeanspruchter Komponenten aus dem Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen zu individuellen und zufällig über die Werkstückoberfläche verteilten Geometriefehlern und Aufmaßschwankungen. Zudem bewirken thermisch induzierte Eigenspannungen bei der Wärmebehandlung präzisionsgeschmiedeter Bauteile Härteverzüge, die insbesondere bei Langteilen zu systematischen Geometrieabweichungen führen.

Für eine schnelle und fertigungsnahe Geometrieprüfung der Funktionsflächen dieser Werkstücke wird die Streifenprojektion als bildgebendes Triangulationsverfahren eingesetzt. Durch die Rekombination der flächenhaft erfassten Messdaten zu einem Geometriemodell der Funktionsflächen, wird eine umfassende Abweichungsanalyse auf Grundlage eines Soll-Ist-Vergleichs ermöglicht. Die Charakterisierung der Geometrieinformationen gibt Aufschluss über die Art und Ausprägung der Abweichungen und liefert somit die Ist-Daten zur Prozessregelung. Auf diese Weise können beispielsweise der Verschleiß der Umformwerkzeuge oder Formfehler infolge der integrierten Wärmebehandlung detektiert werden.

Bei der Geometrieprüfung von Kurbelwellen wird zusätzlich zur Streifenprojektionseinheit ein Schattenprojektionssystem zur Aufnahme von Werkstückkonturen eingesetzt. Auf Basis einer Werkstückeinhüllenden, die sich aus einer Vielzahl von Werkstückkonturen zusammensetzt, wird eine Prüfung von Form-, Maß- und Lageparametern der einzelnen Kurbelwellengeometrieelemente durchgeführt. Durch eine Fusion der flächenhaft erfassten Messdaten des Streifenprojektionssensors mit der Werkstückeinhüllenden, wird eine volumetrische Analyse der untersuchten Kurbelwelle ermöglicht, mit deren Hilfe Aussagen bezüglich der Unwucht des Bauteils getroffen werden können.

Schlagworte:

Koordinatenmesstechnik, Verzahnungsmesstechnik, Streifenprojektion, Schattenprojektion, Volumetrie, Präzisionsschmieden

ABSTRACT

Within the scope of the „process-chain for the manufacture of precision-forged high-performance parts“, which is being researched at the Leibniz University of Hannover, the reshaping production of highly stressed components of the drive chain of automobiles results in individual and randomly distributed deviations and variations of the material allowance. Furthermore, thermally induced internal strains during the heat treatment of precision forged parts cause distortions, which particularly result in form deviations of long parts.

For a fast and production-related geometry inspection of the functional surfaces of these parts, fringe projection is used as an imaging triangulation technique. By means of the recombination of the areal measurement-data to form a complete model of the functional surfaces, an analysis of the geometric errors is made possible, based on a nominal/actual value comparison. The analysis of the geometric data gives information about characteristics of the deviations and provides the actual data for process control. By this means the wear of the forming tools or form deviations caused by the heat treatment can be detected.

For the geometry inspection of crank shafts a contour projection system is employed in addition to the fringe projection sensor for the acquisition of the outline of the work piece. Based on an envelope of the work piece, which consists of a multiplicity of work piece outlines, an analysis of shape-, dimension- and position-parameters is carried out. By means of a fusion of the areal measurement-data of the fringe projection sensor with the envelope of the work piece, a volumetric analysis of the crank shaft is made possible. Thus the unbalance of the work piece can be calculated.

Keywords:

coordinate measuring technology, gear measurement, fringe projection, contour projection, volumetric analysis, precision-forging

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	v
ABSTRACT	vii
INHALTSVERZEICHNIS	xi
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	xv
FORMELZEICHEN	xvii
1 Einleitung	1
2 Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile.....	5
2.1 Präzisionsschmieden	6
2.2 Einsparpotential gegenüber spanenden Herstellungsverfahren	7
2.3 Eigenschaften präzisionsgeschmiedeter Bauteile	9
2.4 Einschränkungen beim Präzisionsschmieden	10
2.5 Beispiele für präzisionsschmiedetechnische Prozessketten	12
2.5.1 Zahnrad	12
2.5.2 Ritzelwelle.....	13
2.5.3 Kurbelwelle	14
3 Problemdefinition	15
3.1 Ausgangssituation	15
3.2 Zielsetzung	16
3.2.1 Entwicklung von Mess- und Auswertemethoden	16
3.2.2 Aufbau eines Messsystems zur prozessbegleitenden Geometrieprüfung	17
4 Optische Methoden zur Formerfassung.....	19
4.1 Messbarkeit technischer Oberflächen	21
4.1.1 Transparente Objekte	22
4.1.2 Volumenstreuende Objekte.....	22
4.1.3 Lichtundurchlässige Objekte.....	22
4.2 Lichtlaufzeitverfahren	24
4.3 Interferometrische Verfahren	25
4.3.1 Distanzinterferometrie.....	26
4.3.2 Weißlichtinterferometrie	27
4.3.3 Formprüfinterferometrie	27
4.4 Konoskopische Holographie	28
4.5 Triangulationsverfahren	30
4.5.1 Lasertriangulation	30
4.5.2 Lichtschnittverfahren	32
4.5.3 Photogrammetrie	32
4.6 Streifenprojektion.....	33

4.6.1	Aufbau und Funktionsweise	34
4.6.2	Phase-Shift-Verfahren	34
4.6.3	Graycode-Verfahren	36
4.6.4	Anwendungsbereiche	37
4.7	Schattenprojektion	38
5	Auswahl der Sensorik	41
5.1	Erfassung der Funktionsflächen	42
5.2	Bestimmung von Form-, Maß- und Lageparametern	42
5.3	Volumetrische Untersuchungen an Kurbelwellen	43
6	Flächenhafte Geometrieprüfung von Zahnrädern	45
6.1	Mathematische Beschreibung von Evolventenverzahnungen	46
6.1.1	Die ebene Evolvente	46
6.1.2	Evolventenflächen von Grad- und Schrägverzahnungen	48
6.2	Systemaufbau zur flächenhaften Geometrieprüfung von Zahnrädern	50
6.2.1	Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems	51
6.2.2	Beschreibung der verwendeten Drehachse	52
6.2.3	Spezifikation der Linearachse	53
6.3	Erfassung der Verzahnungsgeometrie	53
6.4	Bestimmung der Drehachse	55
6.5	Erstellung eines Geometriemodells der gemessenen Verzahnung	56
6.5.1	Messdatenvorverarbeitung	57
6.5.2	Rekombination der Verzahnungsgeometrie	60
6.6	Abweichungsanalyse	62
6.6.1	Einpassung der Funktionsflächen auf die Referenzgeometrie	63
6.6.2	Visualisierung der Verzahnungsabweichungen	66
6.6.3	Quantifizierung der Abweichungen	73
6.7	Verzugsuntersuchungen an präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern	73
6.7.1	Entstehung von Härteverzügen	74
6.7.2	Methoden zur Charakterisierung von Härteverzügen an Zahnrädern	75
7	Flächenhafte Geometrieprüfung von Ritzelwellen	81
7.1	Systemaufbau zur flächenhaften Erfassung von Ritzelwellen	82
7.1.1	Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems	83
7.1.2	Beschreibung der verwendeten Drehachse	84
7.1.3	Beschreibung des Koordinatenmessgerätes	84
7.2	Flächenhafte Erfassung der Funktionsflächen von Ritzelwellen	85
7.2.1	Koordinatensystemabgleich	85
7.2.2	Messablauf	88
7.3	Auswertung der Messdaten	89
7.3.1	Rekombination der Messdatensätze	89
7.3.2	Festlegung der Bauteilachse	90
7.3.3	Geometrieprüfung des Lagersitzes	90
7.3.4	Geometrieprüfung der Verzahnung	92
7.3.5	Betrachtung des gesamten Bauteils	92
7.3.6	Quantifizierung der Abweichungen	94

7.4	Verzugsuntersuchungen an Ritzelwellen	95
8	Geometrieprüfung von Kurbelwellen im Multisensorsystem	99
8.1	Systemaufbau	100
8.1.1	Beschreibung des optischen Wellenmesssystems	102
8.1.2	Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems	104
8.1.3	Beschreibung des Vier-Achs-Positioniersystems	104
8.2	Geometrieerfassung von Kurbelwellen mittels Multisensortechnik	106
8.2.1	Koordinatensystemabgleich	107
8.2.2	Flächenhafte Erfassung der Funktionsflächen von Kurbelwellen	108
8.2.3	Erfassung einer Werkstückeinhüllenden	110
8.3	Abweichungsanalyse	111
8.3.1	Rekombination der Messdaten	111
8.3.2	Flächenhafte Geometrieprüfung der Lagersitze	115
8.3.3	Auswertung der Werkstückeinhüllenden	117
8.3.4	Fusion der Messdaten	118
8.3.5	CAD-Vergleich	119
8.4	Volumetrische Untersuchungen an Kurbelwellen	121
8.4.1	Substitution der Hinterschnittbereiche der Kurbelwangen	121
8.4.2	Approximation des Werkstückvolumens und der Werkstückmasse	123
8.4.3	Bestimmung des Bauteilschwerpunkts und Unwuchtberechnung	125
8.4.4	Volumetrische Analyse einer Einzylinderkurbelwelle	128
9	Zusammenfassung	131
	LITERATUR	135
	WISSENSCHAFTLICHER WERDEGANG	145

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Marktanteile an der Massivumformindustrie im europäischen Vergleich	5
Abbildung 2: Beispiele für präzisionsgeschmiedete Bauteile	7
Abbildung 3: Verkürzung der Prozesskette durch Präzisionsschmieden	8
Abbildung 4: Beanspruchungsgerechter Faserverlauf bei einer Kurbelwelle	9
Abbildung 5: Präzisionsgeschmiedetes Zahnrad mit ungewolltem Grat	10
Abbildung 6: Verschleiß an einem Gesenk zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern	11
Abbildung 7: Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder	12
Abbildung 8: Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Ritzelwellen.....	13
Abbildung 9: Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Kurbelwellen	14
Abbildung 10: Relative Auflösung von Verfahren der optischen Formerfassung	20
Abbildung 11: Reflexion einfallenden Lichtes an einer Oberfläche	23
Abbildung 12: Zylindrische Proben mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften.....	24
Abbildung 13: Aufbau eines Michelson-Interferometers.....	27
Abbildung 14: Aufbau und Funktionsweise eines konoskopischen Sensors	29
Abbildung 15: Funktionsprinzip eines Lasertriangulationssensors.....	31
Abbildung 16: Funktionsprinzip des Lichtschnittverfahrens	32
Abbildung 17: Aufbau und Funktionsweise eines Streifenprojektionssystems	33
Abbildung 18: Sequenz $\cos^2$ -förmiger Streifen für das Phase-Shift-Verfahren.....	36
Abbildung 19: Streifensequenz nach den Graycode-Verfahren	37
Abbildung 20: Strahlengang beim Schattenprojektionsverfahren.....	38
Abbildung 21: Subpixelgenaue Kantendetektion beim Schattenprojektionsverfahren	39
Abbildung 22: Konturerfassung mittels Schattenprojektion	39
Abbildung 23: Beispielbauteile des SFB 489.....	41
Abbildung 24: Aufnahme einer Kurbelwellenlängskontur mittels Schattenprojektion	43
Abbildung 25: Konstruktion einer Evolvente.....	46
Abbildung 26: Evolventenflächen einer Grad- und einer Schrägverzahnung.....	49
Abbildung 27: Winkelverschiebung des Evolventenursprungs bei Schrägverzahnungen	49
Abbildung 28: Fertigungsnahes Zahnradmesssystem	50
Abbildung 29: Schematischer Aufbau des verwendeten Streifenprojektionssensors	51
Abbildung 30: Positionierung eines Zahnrades im Messvolumen	54
Abbildung 31: Bestimmungsgrößen eines Zylinders	56
Abbildung 32: Maskierung irrelevanter Geometriebereiche bei einer Verzahnungsmessung.....	57
Abbildung 33: Messdatenvorverarbeitung bei der optischen Verzahnungsmessung.....	59
Abbildung 34: Rekombination einer Verzahnungsgeometrie aus 37 Einzeldatensätzen	62
Abbildung 35: Farbcodierte 2D-Darstellung der Abweichungen zweier Zahnflanken.....	67
Abbildung 36: 2D-Darstellung der Abweichungen aller linken Evolventenflächen.....	68
Abbildung 37: 3D-Darstellung der Abweichungen eines Zahnrades	69
Abbildung 38: CAD-Modell der Verzahnung des im SFB 489 geschmiedeten Zahnrades.....	70
Abbildung 39: Darstellung der polygonisierten Zahnradmessdaten	71
Abbildung 40: Messdaten und Referenzgeometrie vor und nach der Einpassung	71
Abbildung 41: Farbcodiertes 3D-Differenzbild in verschiedenen Ansichten	72
Abbildung 42: Darstellung der Geometrieabweichungen entlang eines Stirnschnittes	73
Abbildung 43: Abkühlung eines Zahnrades im Sprayfeld durch ein Zweiphasenspray	74
Abbildung 44: Härteverzüge bei der Wärmebehandlung von Zahnrädern.....	76
Abbildung 45: Vergleich der Profillinienabweichungen zweier gehärteter Zahnräder.....	77
Abbildung 46: Vergleich der Abweichungen vom mittleren Fuß- und Kopfkreisradius	78

Abbildung 47: Geometrieelemente einer Ritzelwelle.....	81
Abbildung 48: Systemaufbau zur flächenhaften Geometrierfassung von Ritzelwellen	83
Abbildung 49: Multisensor Koordinatenmessgerät Werth VCIP 3D	84
Abbildung 50: Messung an einer Referenzkugel mit einem Streifenprojektionssystem	86
Abbildung 51: Abweichungen des Lagersitzes einer Ritzelwelle von der Zylinderform	91
Abbildung 52: Darstellung der Abweichungen der Verzahnung einer Ritzelwelle.....	92
Abbildung 53: Abweichungen des Lagersitzes und der Verzahnung	93
Abbildung 54: Definition der Zylindrizität nach DIN ISO 1101	94
Abbildung 55: Definition der Koaxialität nach DIN ISO 1101	95
Abbildung 56: Polygonmodell der Funktionsflächen einer Ritzelwelle	96
Abbildung 57: Farbcodierte Darstellung der Härteverzüge bei einer Ritzelwelle.....	96
Abbildung 58: Geometrieelemente von Kurbelwellen	99
Abbildung 59: Schattenprojektionssystem mit Aufnahmekonstruktion	101
Abbildung 60: Schattenprojektionssystem mit Vier-Achs-Positioniersystem.....	101
Abbildung 61: Optisches Wellenmesssystem Hommel Opticline AMV923V	102
Abbildung 62: Schattenprojektionseinheit des Wellenmesssystems	103
Abbildung 63: Positioniersystem bestehend aus drei Linearachsen	104
Abbildung 64: Adapterplatten zur Befestigung von Sensoren.....	106
Abbildung 65: Zylindernormal mit Referenzkugeln.....	108
Abbildung 66: Aufnahme einer Rotationskontur mit Hilfe der Schattenprojektionstechnik.	109
Abbildung 67: Flächenhafte Erfassung des unteren Hublagers eines Kurbelwellenmodells	110
Abbildung 68: Teilkonturen einer Einzylinderkurbelwelle	111
Abbildung 69: Rekombinierte flächenhafte Lagersitzmessdaten	112
Abbildung 70: Konturrohdaten einer Kurbelwellenmessung	113
Abbildung 71: Vorverarbeitete Konturdaten einer Kurbelwellenmessung.....	114
Abbildung 72: Rekombination der vorverarbeiteten Konturmessdaten	115
Abbildung 73: 2D-Darstellung der Abweichungen der Lagersitze	116
Abbildung 74: 3D-Darstellung der Geometrieabweichungen an den Lagersitzen	117
Abbildung 75: Fusionierte Messdaten einer Kurbelwellenmessung.....	119
Abbildung 76: Einpassung der fusionierten Messdaten auf ein CAD-Model	120
Abbildung 77: Farbcodierte Darstellung der Abweichungen der fusionierten Messdaten	121
Abbildung 78: Vergleich der erfassbaren Kurbelwangenkontur mit der Tatsächlichen.....	122
Abbildung 79: Auffüllen des Hinterschnittbereichs der Kurbelwangenmessdaten	123
Abbildung 80: 3D-Darstellung der Differenz von Soll- und Istbauteilschwerpunkt	127

FORMELZEICHEN

Die Bedeutung mehrfach verwendeter Formelzeichen erschließt sich aus dem Kontext.

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a_{ev}	mm	orthogonaler Abstand eines Messpunktes zur Sollevolvente
b	mm	Abstand zwischen Lichtquelle und Detektor
	mm	Breite der Verzahnung
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
C		Randkurve
d	mm	Weglänge zwischen Messsystem und Messobjekt
Δd	mm	Weglängenunterschied
e	mm	Abstand des Bauteilschwerpunkts von der Drehachse
EO		Evolventenorientierungsparameter
f	1/s	Modulationsfrequenz
F	mm ²	Fläche
h_0	mm	Unebenheit der Objektoberfläche
hub	mm	Exzentrizität des Hublagers
I_0		Intensität des einfallenden Lichtes
I_n		Intensität des projizierten Messlichtes
I_U		Intensität des Umgebungslichtes
I_r		Intensität des reflektierten Lichtes
L_{ev}	mm	Wälzlänge der Evolvente
m_z	mm	Messpunktkomponente in Richtung der Verzahnungsachse
M		Modulation projizierter Streifenmuster
M_G	kg	Masse eines Geometrielements
$M_{KMG-SPS}$		Transformationsmatrix von KMG-Koordinaten in Koordinaten des Streifenprojektionssensors
$M_{SPS-KMG}$		Transformationsmatrix von Koordinaten des Streifenprojektionssensors in KMG-Koordinaten
n		Ordnung der Phasenverschiebung
N		Anzahl der Messungen
P		Messpunkt
r	mm	Radiuskoordinate

r_a	mm	Kopfkreisradius
r_b	mm	Grundkreisradius
r_{ex}	mm	radiale Komponente der Hublagerkonturdaten
r_f	mm	Fusskreisradius
r_{hub}	mm	um die Hublagerexzentrizität verschobene Hublagerkonturdaten
r_{zyl}	mm	Zylinderradius
S	mm	Schwerpunktkoordinaten
S_G	mm	Schwerpunktkoordinaten eines Geometrieelements
t	s	Zeit
Δt	s	Zeitdifferenz
U	g mm	Unwucht
V	mm ³	Volumen
V_G	mm ³	Volumen eines Geometrieelements
x	mm	Koordinate
y	mm	Koordinate
z	mm	Koordinate

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	°	Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Oberflächennormalen
α_m	°	Profilwinkel zum Messpunkt
	°	Winkelparameter
β	°	Triangulationswinkel
	°	Schrägungswinkel
β_b	°	Grundschrägungswinkel
φ	°	Phasenlage projizierter Streifenmuster
$\Delta\varphi$	°	Phasendifferenz
Φ_b	°	Polarwinkel zum Evolventenursprung
$\Phi_{b\tau}$	°	Polarwinkel zum Evolventenursprung in Abhängigkeit von der Verzahnungsbreite
λ	nm	Lichtwellenlänge
ρ	kg/mm ³	Dichte
τ	mm	Verzahnungsbreitenparameter

$\Delta\varphi$	mm	Winkeldifferenz
ξ	°	Wälzwinkel

