



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

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 Geometrieerfassung 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 Bauteilschwerpunktes 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	Messpunkt Komponente in Richtung der Verzahnungsachse
M		Modulation projizierter Streifenmuster
M_G	kg	Masse eines Geometrieelements
$M_{KMG-SPS}$		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

FORMELZEICHEN

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

$\Delta\omega$	mm	Winkeldifferenz
ξ	°	Wälzwinkel

1 Einleitung

Hochleistungsbauteile wie Zahnräder, Ritzelwellen und Kurbelwellen aus dem Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen gelten in der Automobilindustrie als Standardbauteile und werden in hohen Stückzahlen hergestellt. Diese Werkstücke werden bisher überwiegend auf Grundlage spanender Verfahren gefertigt. In den letzten Jahren gewinnen auf der endkonturnahen Warmmassivumformung basierende Verfahren zur Fertigung von hochbelastbaren Komponenten aus dem Fahrzeugbau immer mehr an Bedeutung. Die aus einer solchen Prozesskette hervorgehenden präzisionsgeschmiedeten Bauteile lassen sich aufgrund von Material- und Energieeinsparungen wirtschaftlicher herstellen und weisen zudem bessere werkstofftechnische Eigenschaften auf als spanend gefertigte Werkstücke [Jüt99, Beh06]. Die Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Hochleistungsbauteilen besteht aus wenigen hochkomplexen integrierten Prozessschritten, zu deren Kontrolle insbesondere die Bauteilgeometrie als Regelgröße herangezogen wird. Um zu prüfen, ob die Bauteilgeometrie den Anforderungen genügt, ist eine prozessbegleitende Messtechnik mit entsprechender Genauigkeit erforderlich. Mit Hilfe der eingesetzten Messtechnik wird die Detektion prozessbedingter Geometrieabweichungen auf Basis eines Soll-Ist-Vergleichs ermöglicht. Die Minimierung der Geometrieabweichungen geschieht anschließend durch gezielte Korrekturen der prozessbestimmenden Parameter.

Präzisionsgeschmiedete Bauteile weisen die für umformtechnisch hergestellte Bauteile typischen Geometrieabweichungen auf. Durch den Verschleiß des Schmiedegesenks treten zufällig über die gesamte Bauteilgeometrie verteilte Fehlstellen auf, die sehr individuell ausgeformt sein können. Zudem entstehen durch thermische Effekte bei der Wärmebehandlung Härteverzüge, die zu systematischen Geometrieabweichungen führen. Des Weiteren können Schwankungen bei der Rohteiltemperatur Aufmaßschwankungen beim geschmiedeten Bauteil hervorrufen. Insbesondere zur Detektion der individuellen Geometrieabweichungen ist eine umfassende Geometrieprüfung sämtlicher Funktionsflächen des präzisionsgeschmiedeten Bauteils notwendig. Eine solche Prüfung kann mit der konventionellen taktilen Messtechnik aufgrund der hohen Messzeiten und der geringen Ortsauflösung nicht wirtschaftlich erfolgen.

Aufgrund ihrer kurzen Messzeiten und der hohen Informationsdichte gewinnen optische Messverfahren zur Formerfassung in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Mit Hilfe der Streifenprojektionstechnik lassen sich beispielsweise 10^6 Messpunkte in wenigen

Sekunden erfassen. Das Messverfahren zeichnet sich neben der geringen Messzeit insbesondere durch die hohe laterale Auflösung aus. Mit Hilfe der Streifenprojektionstechnik können z. B. die Funktionsflächen der oben angesprochenen Hochleistungsbauteile flächenhaft erfasst und ausgewertet werden. Neben der Streifenprojektionstechnik kann auch die Schattenprojektionstechnik für eine Geometrieprüfung komplexer Bauteile herangezogen werden. Die Schattenprojektionstechnik zeichnet sich durch eine schnelle Erfassung von Werkstückkonturen aus, die zur Prüfung von Form-, Maß- und Lageparametern der Geometrielemente des gemessenen Bauteils genutzt werden können. Optische Messverfahren besitzen aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften ein großes Potential für eine wirtschaftliche Geometrieprüfung hochbelasteter Bauteile aus der Automobilindustrie.

Optische Messverfahren finden mit der prozessbegleitenden Prüfung der Zwischenprodukte der Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Hochleistungsbauteilen einen idealen Anwendungsfall. Die präzisionsgeschmiedeten Zwischenprodukte besitzen eine diffus streuende Oberfläche, die somit leicht für eine Vielzahl von optischen Messverfahren zur Formerfassung messbar ist. Zudem sind die Genauigkeitsanforderungen bei der Prüfung der Zwischenprodukte deutlich geringer als bei der Prüfung der Fertigteile.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

Kapitel 2: Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Grundlagen des Präzisionsschmiedens als endkonturnahes Warmmassivumformverfahren vorgestellt. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen präzisionsschmiedetechnischer Prozessketten gegenüber spanenden Fertigungsverfahren werden insbesondere die Eigenschaften präzisionsgeschmiedeter Bauteile und die Einschränkungen des Präzisionsschmiedens erläutert. Abschließend werden beispielhaft einige Prozessketten zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen betrachtet.

Kapitel 3: Problemdefinition

Dieses Kapitel befasst sich mit der Definition der wissenschaftlichen Fragestellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt. Aus der wissenschaftlichen Fragestellung ergibt sich die Zielsetzung der Arbeit.

Kapitel 4: Optische Methoden zur Formerfassung

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Messbarkeit technischer Oberflächen mit optischer Messtechnik eingegangen. Anschließend werden einige potentiell zur Lösung der in Kapitel 3 formulierten Fragestellung geeignete optische Methoden zur Formerfassung vorgestellt. Diese Vorstellung beinhaltet neben theoretischen Grundlagen auch einige Anwendungsbeispiele.

Kapitel 5: Auswahl der Sensorik

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Auswahl der optischen Sensorik zur Bearbeitung der in Kapitel 3 definierten wissenschaftlichen Problemstellung begründet.

Kapitel 6: Flächenhafte Geometrieprüfung von Zahnrädern

Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise zur flächenhaften Geometrieprüfung von Zahnrädern mittels Streifenprojektion. Neben den theoretischen Grundlagen der Evolventenverzahnung werden im Rahmen des Kapitels der Aufbau der verwendeten Messeinrichtung, Methoden zur Erfassung der Verzahnungsgeometrie sowie verschiedene Auswerteverfahren vorgestellt.

Kapitel 7: Flächenhafte Geometrieprüfung von Ritzelwellen

Der Systemaufbau zur flächenhaften Geometrieprüfung von Ritzelwellen sowie die zur Geometrieprüfung verwendeten Mess- und Auswerteverfahren bilden den Mittelpunkt dieses Kapitels.

Kapitel 8: Geometrieprüfung von Kurbelwellen im Multisensorsystem

Im Anschluss an die Beschreibung des zur Geometrieprüfung von Kurbelwellen eingesetzten optischen Multisensorsystems auf Basis eines Schattenprojektionssystems und einer Streifenprojektionseinheit, befasst sich dieses Kapitel mit der Vorstellung der für die verschiedenen Sensoren eingesetzten Messmethoden. Die Auswertemethoden beinhalten neben den Verfahren zur Abweichungsanalyse auch erste Ansätze für eine volumetrische Analyse der gemessenen Kurbelwelle.

2 Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile

Deutschland verfügt im europäischen Vergleich über eine sehr ausgeprägte Umformindustrie, in der rund 31.000 Mitarbeiter in ca. 250 Betrieben beschäftigt sind. Der Industriezweig weist eine typische mittelständische Branchenstruktur auf; in mehr als 77% der Betriebe arbeiten weniger als 200 Beschäftigte. Das Produktionsvolumen der deutschen Massivumformindustrie betrug im Jahr 2006 etwa 1,9 Millionen Tonnen, was im europäischen Vergleich mit einem Marktanteil von 47% den Spitzenplatz bedeutet (siehe Abbildung 1). Der Bereich der Gesenkschmiedeteile nimmt hierbei mit einem Produktionsvolumen von ca. 1,317 Millionen Tonnen den größten Stellenwert ein [Eur07].

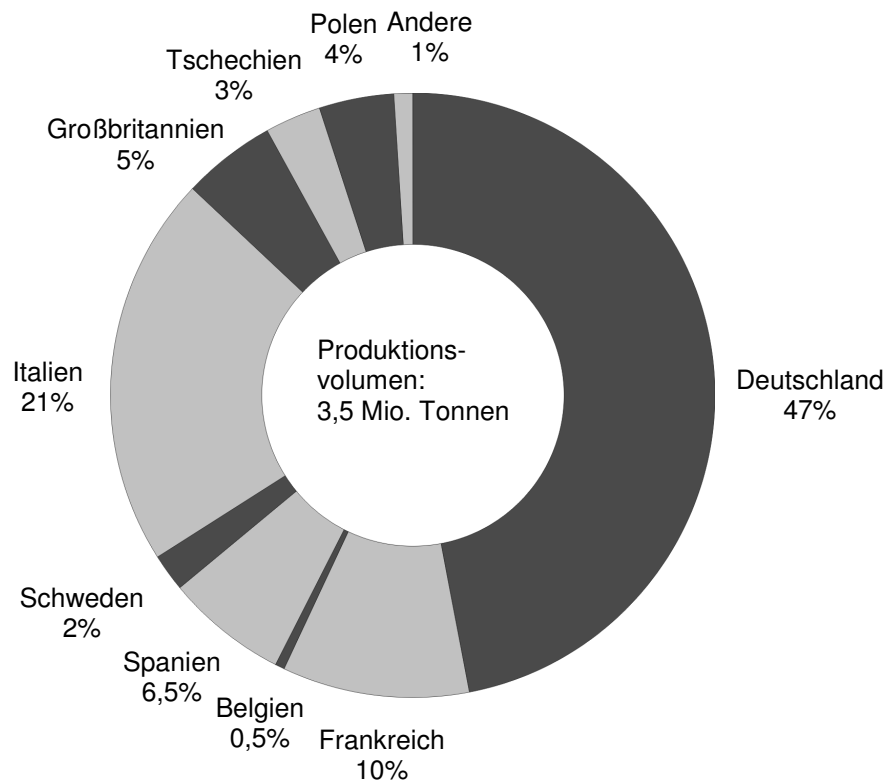


Abbildung 1: Marktanteile an der Massivumformindustrie im europäischen Vergleich [Eur07]

Bei der Massivumformbranche handelt es sich um eine Zulieferindustrie, die stark von der wirtschaftlichen Entwicklung ihrer Abnehmerindustrien abhängig ist. Die Automobilindustrie stellte im Jahr 2002 mit einem Anteil von 48,5% des Produktionsvolumens den größten Abnehmer dar. Weitere 34,5% der Produktion wurden an die Industrien des Maschinen- und Anlagenbaus geliefert [Ben04].

Durch Massivumformverfahren gefertigte Bauteile weisen, im Vergleich zu spanend hergestellten oder gegossenen Bauteilen, oftmals höhere Zähigkeitswerte und eine bessere Schwingfestigkeit auf [Lie95]. Dies liegt in den vorteilhaften werkstofftechnischen Eigenschaften von Schmiedeteilen, wie beispielsweise dem typischen homogenen und sehr feinkörnigen Gefüge, der Porenfreiheit und dem beanspruchungsgerechten Faserverlauf, begründet [Doe07, Bac03].

Der steigende Kostendruck durch den internationalen Wettbewerb weckt insbesondere bei der Automobilindustrie den Bedarf an kostengünstigen aber gleichzeitig auch qualitativ hochwertigen Bauteilen. Aufgrund ihrer positiven Eigenschaften werden daher in den letzten Jahren vermehrt Schmiedeteile von der Automobilindustrie eingesetzt. In erster Linie werden hoch belastete Bauteile, die konventionell vornehmlich durch einen Gießprozess oder spanend hergestellt werden, wie beispielsweise Kurbelwellen und Pleuel von Dieselfahrzeugen, durch geschmiedete Bauteile substituiert [Har04].

Im Hinblick auf die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Schmiedeindustrie wächst der Bedarf nach einer Optimierung der Fertigungsverfahren zur Realisierung einer wirtschaftlichen schmiedetechnischen Prozesskette. Speziell das Präzisionsschmieden, das der gratfreien endkonturnahen Warmmassivumformung zuzuordnen ist, zeichnet sich durch ein hohes Optimierungspotential aus [N1]. Die Qualifizierung des Präzisionsschmiedens zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen, beispielsweise für den Einsatz im Fahrzeugbau, ist derzeit Gegenstand des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs (SFB) 489 an der Leibniz Universität Hannover.

2.1 Präzisionsschmieden

Beim Präzisionsschmieden handelt es sich um ein so genanntes Near-Net-Shape Verfahren, bei dem endkonturnahe Halbfertigteile mit einem sehr geringen Bearbeitungsaufmaß durch eine gratfreie und hochpräzise Warmmassivumformung hergestellt werden [Doe07]. Das Präzisionsschmieden erlaubt die Fertigung von Werkstücken mit zum Teil einbaufertigen Funktionsflächen und einer Genauigkeit, die sonst nur durch spanende Herstellungsverfahren erreicht werden kann [Lan88]. Lediglich bei Bauteilen mit sehr geringen Fertigungstoleranzen, wie beispielsweise Laufverzahnungen, ist eine abschließende Hartfeinbearbeitung der Funktionsflächen notwendig. Präzisionsschmieden erfolgt im geschlossenen Gesenk ohne eine definierte Gratbahn. Hieraus folgt, dass es keine

Überlaufmöglichkeit für überschüssiges Material gibt, so dass für eine prozesssichere Fertigung eine sehr geringe Toleranz beim Rohteilvolumen bzw. bei der Rohteilmasse zu wählen ist. Ein zu geringes Rohteilvolumen äußert sich in einer unvollständigen Gravurfüllung bei der Umformung, die Geometrie des herzustellenden Bauteils wird nicht komplett ausgefüllt. Ein zu hohes Rohteilvolumen führt zu einem erhöhten Gesenkinnendruck, der sich sehr nachteilig auf den Verschleiß der Umformwerkzeuge auswirkt [Beh06].

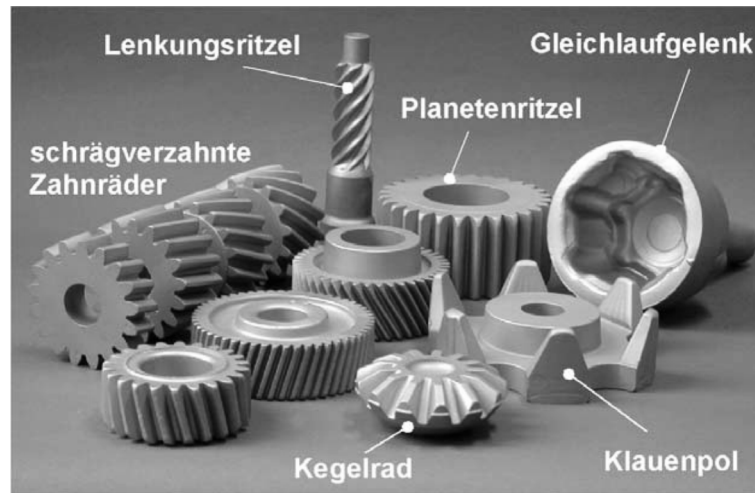


Abbildung 2: Beispiele für präzisionsgeschmiedete Bauteile [Beh06]; © Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Präzisionsgeschmiedeten Bauteilen steht ein sehr breites Anwendungsspektrum offen. Aufgrund ihrer vorteilhaften technischen Eigenschaften werden sie jedoch häufig in Bereichen eingesetzt, in denen eine hohe Dauerfestigkeit gefragt ist. Vielfach finden sie, wie die in Abbildung 2 dargestellten Bauteile, Anwendung als Komponenten des Antriebsstrangs oder des Fahrwerks bei der Fahrzeugherstellung.

2.2 Einsparpotential gegenüber spanenden Herstellungsverfahren

Durch die umformende Herstellung endkonturnaher Halbfertigteile beim Präzisionsschmieden, kann die bei konventionellen Fertigungsverfahren übliche spanende Weichbearbeitung der Werkstücke vollständig substituiert werden. Gegebenenfalls ist lediglich eine abschließende Hartfeinbearbeitung notwendig. Alleine hierdurch ergibt sich bereits ein Einsparpotential von bis zu 50% der Rohteilmasse bei der Herstellung von Zahnrädern [Jüt99]. Zudem kann die Durchlaufzeit durch die entfallende spanende Weichbearbeitung um bis zu 40% verkürzt werden [Beh06].

Auf der Grundlage des geringen Bearbeitungsaufmaßes an den Funktionsflächen präzisionsgeschmiedeter Bauteile, welches in der Regel nur etwa 0,1 - 0,2 mm beträgt, bietet sich die Möglichkeit der Nutzung der Schmiedewärme für nachfolgende Prozessschritte. Hiervon kann insbesondere der Wärmebehandlungsprozess profitieren. Durch eine Wärmebehandlung der Bauteile direkt im Anschluss an den Schmiedeprozess unter Ausnutzung der Schmiedewärme, kann die zeit- und energieintensive Wiedererwärmung der Bauteile für das Härten eingespart werden. Zudem ist eine Pufferlagerung vor der Wärmebehandlung nicht mehr erforderlich. Diese Vorgehensweise wird in der Literatur häufig als Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung bezeichnet [Bac03]. Die Durchlaufzeit kann durch die integrierte Wärmebehandlung zusätzlich um bis zu 17% verkürzt werden [Jüt99].

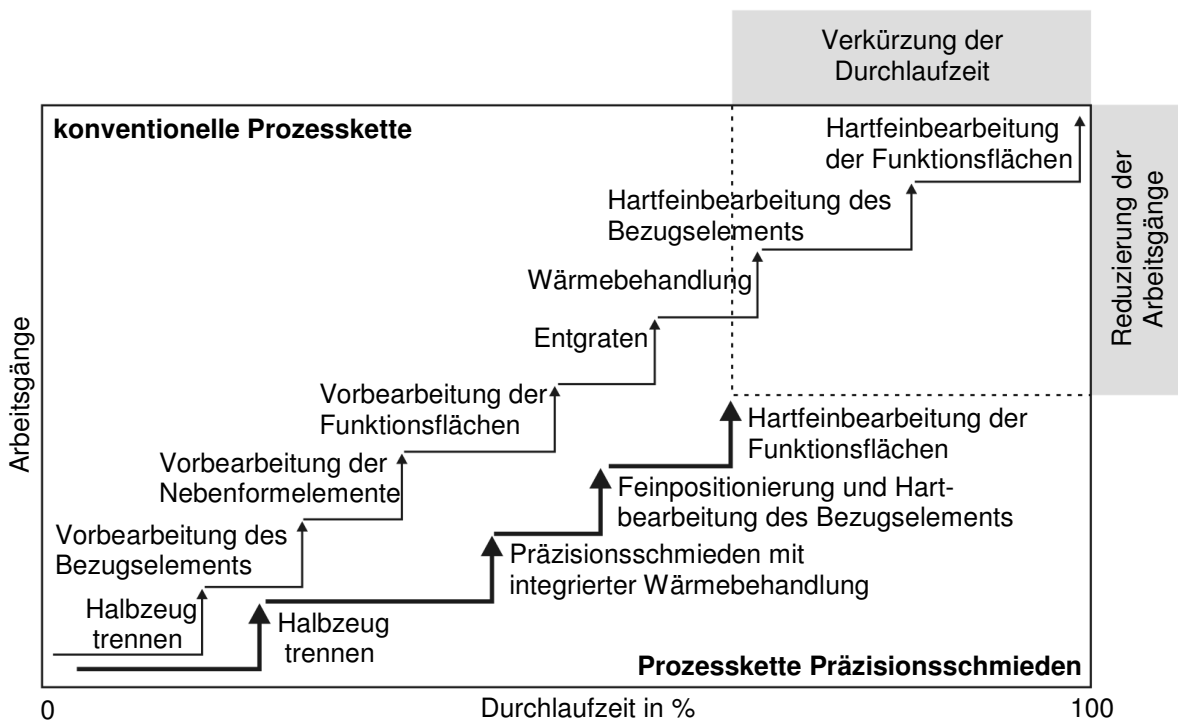


Abbildung 3: Verkürzung der Prozesskette durch Präzisionsschmieden [Bac03]

Der Einsatz des Präzisionsschmiedens erlaubt, wie in Abbildung 3 dargestellt, eine drastische Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen im Vergleich zu konventionellen spanenden Fertigungsverfahren. Auf Grundlage der kürzeren Durchlaufzeit, der effizienteren Materialausnutzung und der Energieeinsparung durch den Verzicht auf eine spanende Weichbearbeitung und auf die Wiedererwärmung der Bauteile vor

dem Härten, ergibt sich ein Einsparpotential bei den Herstellungskosten von bis zu 30% gegenüber der spanenden Fertigung [Jüt99].

2.3 Eigenschaften präzisionsgeschmiedeter Bauteile

Präzisionsgeschmiedete Bauteile weisen gegenüber spanend hergestellten oder gegossenen Bauteilen erhebliche technische Vorteile auf. Bei der Umformung mit integrierter Wärmebehandlung entsteht durch die Rekristallisation ein sehr homogenes und feinkörniges Gefüge. Auch eventuell im Rohmaterial vorhandene Inhomogenitäten werden durch die Massivumformung weitestgehend ausgeglichen. Zudem bildet sich durch den Werkstofffluss während der Umformung ein an die Werkzeugkontur angepasster, ununterbrochener und somit beanspruchungsgerechter Faserverlauf aus [Ado02, Bac03, Dit02].

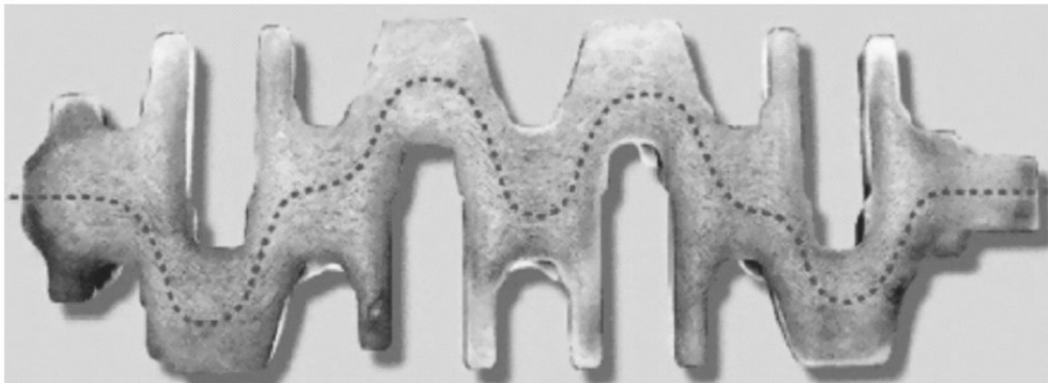


Abbildung 4: Beanspruchungsgerechter Faserverlauf bei einer durch Warmmassivumformung hergestellten Kurbelwelle [Haa06]

Sowohl das feinkörnige Gefüge als auch der Faserverlauf wirken sich positiv auf die dynamischen Festigkeitseigenschaften des Werkstückes aus. Bei der Herstellung von Zahnrädern durch Präzisionsschmieden kann somit beispielsweise die Zahnfußfestigkeit, verglichen mit spanend gefertigten Zahnrädern, um bis zu 25% gesteigert werden [Bac03, Dit02, Doe95]. Durch diese Verbesserung der Festigkeitseigenschaften, können oftmals sehr viel kleinere und leichtere geschmiedete Bauteile bei gleichen Anforderungen eingesetzt werden, als dies bei entsprechenden konventionell gefertigten Bauteilen möglich wäre. Dieser Sachverhalt kommt insbesondere der Forderung der Automobilindustrie nach einer Reduzierung von Baugröße und Bauteilmasse bei hochbeanspruchten Komponenten aus dem Antriebsstrang, wie z. B. Zahnräder oder Kurbelwellen, entgegen [Köh04].

2.4 Einschränkungen beim Präzisionsschmieden

Die Grundvoraussetzung für das Präzisionsschmieden ist eine exakte Prozessführung sowie die Einhaltung der bestimmenden Prozessparameter, wie beispielsweise [Beh06]:

- Rohteilmasse
- Rohteiltemperatur
- Werkzeugtemperatur
- Stößelgeschwindigkeit
- Druckberührzeit
- Umformkraft

Insbesondere das Rohteilvolumen ist beim Präzisionsschmieden einer sehr engen Toleranz unterworfen. Da durch die Umformung im geschlossenen Gesenk keine Überlaufmöglichkeit für überschüssiges Material vorgesehen ist, führt ein zu großes Rohteilvolumen zu einem erhöhten Gesenkinnendruck, durch den das Gesenk einem stärkeren Verschleiß ausgesetzt wird oder sogar beschädigt werden kann. Zudem besteht die Möglichkeit, dass das Gesenk aufgrund des überschüssigen Materials nicht vollständig geschlossen werden kann. Dies führt in der Regel zu Maßabweichungen und zu einem Grat am geschmiedeten Bauteil (siehe Abbildung 5). Eine zu geringe Rohteilmasse führt zu einer Unterfüllung des Gesenkes, das Bauteil wird nicht komplett ausgeformt.

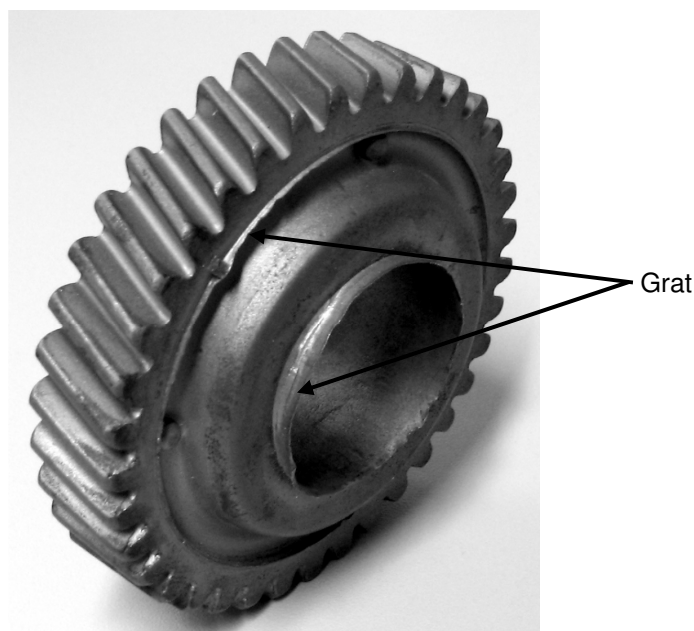


Abbildung 5: Präzisionsgeschmiedetes Zahnrad mit ungewolltem Grat

Auch die Rohteiltemperatur vor der Umformung ist sehr eng toleriert. Eine zu hohe Rohteiltemperatur senkt zwar die für den Schmiedeprozess notwendige Umformkraft. Allerdings unterliegen zu heiße Rohteile auch einer erhöhten Volumenausdehnung, die während des Schmiedevorganges zu einer Überfüllung des Gesenkes, und somit zu einem ungewollten Grat führen kann. Dies hat zur Folge, dass das Bauteil nach dem Schmieden, trotz einer vollständigen Ausformung, ein um den Gratanteil verringertes Volumen aufweist.

Während der Umformung sind die Gesenke beim Präzisionsschmieden einer starken thermischen Belastung durch die hohen Rohteiltemperaturen von bis zu 1250°C und die großen Kontaktdrücke ausgesetzt. Die stark ansteigenden Temperaturen der Gesenkoberfläche gegen Ende der Umformung sind ausschlaggebend für die Gesenkstandzeit [Doe03, Beh06]. Auf Grund von Anlasseffekten und der starken mechanischen Beanspruchung kommt es insbesondere in Bereichen des Gesenkes, die einen erhöhten Widerstand gegen den Werkstofffluss aufweisen, zu verstärktem Verschleiß in Form von Materialabtrag, Rissbildung und mechanischer Verformung (siehe Abbildung 6).

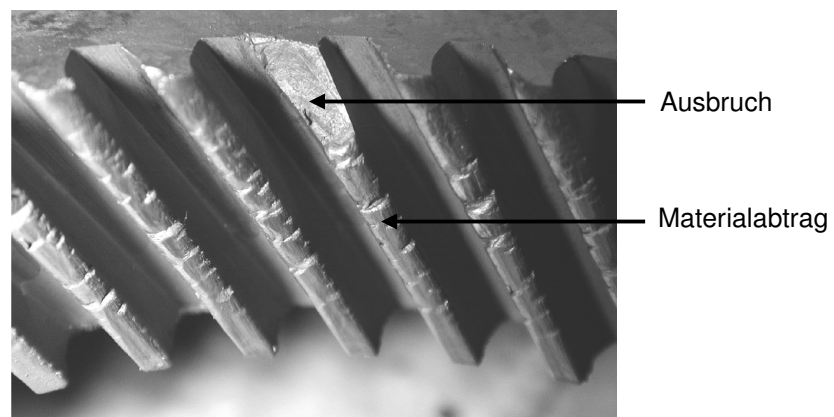


Abbildung 6: Verschleiß an einem Gesenk zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern;
© Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Durch die Verwendung einer angepassten Stößelkinematik lassen sich die Druckberührzeiten beim Präzisionsschmieden, die ein wichtiger Einflussparameter für die Temperaturen an der Gesenkoberfläche sind, um bis zu 67% verringern. Als direkte Folge der verkürzten Druckberührzeiten kann die Gesenkoberflächentemperatur während der Umformung von ca. 780°C auf ca. 440°C gesenkt werden [Doe03, Beh06].

2.5 Beispiele für präzisionsschmiedetechnische Prozessketten

An der Leibniz Universität Hannover befasst sich der von der DFG geförderte SFB 489 mit der Entwicklung und Realisierung einer innovativen „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ [Bac03, Bac05b]. Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten steht, neben der Entwicklung und Qualifikation neuer Technologien, die ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette unter technologischen und logistischen Gesichtspunkten. Durch Untersuchung der Wechselwirkungen der einzelnen Teilprozesse untereinander sollen bisher nicht erkannte Optimierungspotentiale offengelegt werden.

Zur Darstellung der Prozesskette Präzisionsschmieden wurden die rotationssymmetrischen Demonstratorbauteile Zahnrad und Ritzelwelle, sowie als nicht rotationssymmetrische Bauteile die Langteile Ein- und Zweizylinderkurbelwelle ausgewählt. Bei diesen Bauteilen handelt es sich um Hochleistungsbauteile aus dem Bereich des Motoren-, Triebwerks- und Getriebebaus. Zur Herstellung eines jeden dieser Bauteile ist die Entwicklung einer eigenen Prozesskette mit werkstückspezifischen Teilprozessen notwendig. Diese Prozessketten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

2.5.1 Zahnrad

Der in Abbildung 7 dargestellte Aufbau einer Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Zahnradern gleicht der bereits in Abbildung 3 vorgestellten allgemeinen präzisionsschmiedetechnischen Prozesskette.

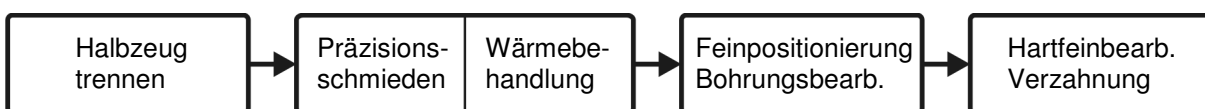


Abbildung 7: Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder

Nach dem Trennen und dem Erwärmen des Halbzeugs wird es dem Präzisionsschmiedeprozess mit integrierter Wärmebehandlung zugeführt. Während der Umformung werden Verzahnung und Bohrung simultan in das Bauteil eingebracht. Durch die hohen thermischen und mechanischen Belastungen kann es zu Lageabweichungen zwischen dem Untergesenk, durch welches die Verzahnung ausgeformt wird, und dem für das Einbringen der Bohrung verantwortlichen Obergesenk kommen. Aus diesem Grund ist es, anders als bei der spanenden Zahnradfertigung, nicht möglich die Bohrung als Primärbezug

zum Schleifen der Verzahnung heranzuziehen [Gra96, Jag98, Lan02]. Dieses Problem wird durch eine aufmaßorientierte Feinpositionierung im nachfolgenden Prozessschritt gelöst. Das Zahnrad wird, auf Grundlage von Geometrieinformationen, die durch eine vorhergehende messtechnische Erfassung eines Stirnschnittes der Verzahnung bereitgestellt werden, so durch eine Feinpositioniervorrichtung zweidimensional ausgerichtet, dass durch einen Hartdrehprozess die Bohrung in der Form nachbearbeitet werden kann, dass sie konzentrisch zur Verzahnung verläuft [Haa05, Den06]. Diese nachbearbeitete Bohrung kann anschließend als Bezug zur abschließenden Hartfeinbearbeitung der Verzahnung genutzt werden.

2.5.2 Ritzelwelle

Die in Abbildung 8 dargestellte Prozesskette zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten Ritzelwellen gleicht prinzipiell der in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten Prozesskette zur Zahnradfertigung.

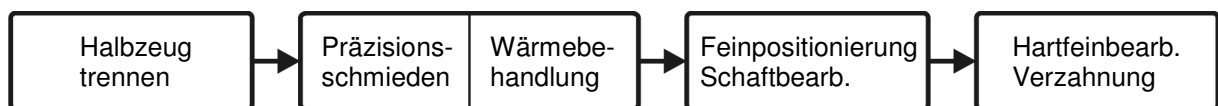


Abbildung 8: Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Ritzelwellen

Auch beim Präzisionsschmieden von Ritzelwellen werden Verzahnung und Schaft, der als Primärbezug für nachfolgende Prozessschritte bei konventionellen Prozessketten benötigt wird, simultan ausgeformt. Durch den Schmiedeprozess und die integrierte Wärmebehandlung kann es zu thermisch bedingten Verzügen kommen, die bewirken, dass die Achsen von Verzahnung und Schaft nicht übereinstimmen. Um den Schaft, wie bei der konventionellen Ritzelwellenherstellung, als Bezug für die abschließende Hartfeinbearbeitung nutzen zu können, ist, analog zur Prozesskette zur Zahnradfertigung, wieder ein Feinpositionierschritt notwendig. Aufgrund der Bauteillänge reicht jedoch eine zweidimensionale Ausrichtung des Werkstücks nicht mehr aus. Zur Berücksichtigung des Taumels muss die Ritzelwelle mit Hilfe einer Feinpositioniervorrichtung mit vier Freiheitsgraden so ausgerichtet werden, dass der Schaft in der Form durch Hartdrehen nachbearbeitet werden kann, dass seine Achse mit der Verzahnungsachse übereinstimmt [Den07]. Die zur Feinpositionierung benötigten Geometrieinformationen werden durch die Auswertung mehrerer linienhafter Messschnitte auf Verzahnung und Schaft zur Verfügung gestellt [Gil08, Gil08b].

2.5.3 Kurbelwelle

Die im Rahmen des SFB 489 betrachtete Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Kurbelwellen (siehe Abbildung 9) weist einen entscheidenden Unterschied zu den in 2.5.1 und 2.5.2 vorgestellten Prozessketten zur Zahnrad- und Ritzelwellenfertigung auf. Während die Prozessschritte „Halbzeug trennen“ und „Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung“ auch bei den bereits angesprochenen Prozessketten auftreten, bildet die „unwuchtorientierte Feinpositionierung“ zusammen mit der „Hartfeinbearbeitung der Lagersitze“ bei der Kurbelwellenfertigung einen weiteren integrierten Prozessschritt.



Abbildung 9: Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Kurbelwellen

Bei der konventionellen Kurbelwellenfertigung stellt die Minimierung der Unwucht einen sehr langwierigen und kostenintensiven Prozessschritt dar. Durch eine abwechselnde mechanische Unwuchtanalyse und einen gezielten Materialabtrag durch Einbringen von Bohrungen in die Kurbelwangen wird meist erst nach einigen Iterationen ein akzeptabler Wert für die Unwucht erreicht [Schn07].

In der im Rahmen des SFB 489 aufgebauten präzisionsschmiedetechnischen Prozesskette soll das konventionelle Verfahren zur Minimierung der Unwucht durch einen integrierten Prozess, bestehend aus einer geometrischen Unwuchtanalyse, einer auf den Geometriedaten basierenden unwuchtorientierten Feinpositionierung und der Hartfeinbearbeitung der Lagersitze des Bauteils, substituiert werden. Zur Unwuchtanalyse wird die Kurbelwelle einer optischen Geometrieprüfung innerhalb der Schleifmaschine unterzogen [Käs07]. Auf Grundlage der Resultate einer auf den Messergebnissen basierenden geometrischen Unwuchtanalyse wird das Bauteil anschließend, im Rahmen der durch das Bearbeitungsaufmaß vorgegebenen Grenzen, so feinpositioniert, dass die Unwucht durch die abschließende Hartfeinbearbeitung der Lagersitze minimiert wird [Haa06]. Durch diese Vorgehensweise wird eine weitere Verkürzung der Prozesskette, und somit eine Senkung der Durchlaufzeit ermöglicht.

3 Problemdefinition

Wie bereits im Abschnitt 2.5 angesprochen, wird im Rahmen des SFB 489 eine Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Hochleistungsbauteilen aufgebaut. Bei diesen Bauteilen handelt es sich vornehmlich um hoch belastbare Komponenten des Antriebsstrangs von Automobilen. Präzisionsschmiedetechnische Prozessketten zeichnen sich durch wenige, aber dafür hoch integrierte und sehr komplexe Fertigungsschritte aus. Als Beispiel sei an dieser Stelle der Prozessschritt „Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung“ genannt, der die Ausformung und das Härten der endkonturnahen Zwischenprodukte in sich vereint. Um eine solche Prozesskette kontrollieren zu können, ist eine umfassende und prozessbegleitende Geometrieprüfung der Zwischenprodukte insbesondere nach den formgebenden Prozessschritten zwingend erforderlich.

3.1 Ausgangssituation

Die Geometrie präzisionsgeschmiedeter Bauteile kann durch vielfältige Ursachen von der vorgesehenen Sollgeometrie abweichen. Eine typische Abweichungsursache stellt der Verschleiß der Schmiedegesenke dar (siehe Abbildung 6). Durch die hohen thermischen und mechanischen Belastungen während des Schmiedeprozesses kann es zu kleinen, zufällig verteilten Materialausbrüchen an den formgebenden Elementen des Gesenkes kommen. Diese Materialausbrüche führen während der Umformung zu ebenfalls zufällig verteilten und lokal begrenzten Fehlstellen auf der Werkstückoberfläche mit einer sehr individuellen Ausprägung.

Eine weitere häufige Abweichungsursache sind Schwankungen beim Rohteilvolumen, bzw. bei der Rohteiltemperatur, die aufgrund der Wärmeausdehnung einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf das Rohteilvolumen hat. Ist das Rohteilvolumen zu groß, kann es zur Bildung eines ungewollten Grades am Werkstück kommen, der das überschüssige Rohmaterial enthält. Zudem besteht die Möglichkeit, dass es aufgrund eines unvollständigen Schließens des Gesenkes zu Formabweichungen kommt. Ist das Rohteilvolumen zu klein, wird das Werkstück im Extremfall nicht vollständig ausgeformt. In der Regel kommt es in diesem Fall jedoch meist nur zu Schwankungen des für die abschließende Hartfeinbearbeitung vorgehaltenen Bearbeitungsaufmaßes. Solange sich die vorgesehene Sollgeometrie des Bauteils trotz der Aufmaßschwankungen noch realisieren lässt, kann das Bauteil an die nachfolgenden Prozessschritte weitergegeben werden.

Während der Wärmebehandlung werden die gerade aus dem Schmiedegesenk entnommenen Bauteile mit einem Wasser-Luft-Gemisch in einem Sprayfeld abgeschreckt [Bac05]. Durch eine fehlerhafte Wahl der Sprayfeldparameter oder den Ausfall von Spraydüsen kann es zu stark ausgeprägten Eigenspannungen im Werkstück kommen. Durch diese Eigenspannungen kann es zu Härteverzügen kommen, die insbesondere bei der Fertigung länglicher Bauteile wie Ritzel- und Kurbelwellen, einen negativen Effekt im Hinblick auf die Durchführung der weiteren Prozessschritte haben kann.

Präzisionsgeschmiedete Bauteile verfügen aufgrund der Abformung im Schmiedegesenk über so genannte optisch raue Oberflächen, an denen einfallendes Licht diffus gestreut wird. Häufig befinden sich noch Zunderrückstände auf den Werkstückoberflächen, die dem Bauteil oftmals eine inhomogene dunkle Färbung geben. Nach der Beseitigung der Zunderrückstände sind die Bauteile sehr gut für eine Vielzahl von optischen Messtechniken zur Formerfassung zugänglich (siehe Kapitel 4).

3.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Datengewinnungs-, Mess- und Auswertemethoden zur umfassenden Geometrieprüfung von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen. Neben der Auswahl und dem Aufbau geeigneter Sensorsysteme steht insbesondere die Quantifizierung und Visualisierung der Abweichungsdaten im Mittelpunkt. Diese Methoden müssen speziell auf die besonderen Abweichungscharakteristika der präzisionsgeschmiedeten Messobjekte ausgelegt sein.

3.2.1 Entwicklung von Mess- und Auswertemethoden

Im Hinblick auf die Sicherstellung der Endbearbeitbarkeit der Werkstücke muss gewährleistet sein, dass auf den Funktionsflächen ein ausreichendes Aufmaß für die spanende Hartfeinbearbeitung vorhanden ist. Um dies zu prüfen, ist es notwendig die vollständigen Funktionsflächen, auf denen sich durch den Schmiedeprozess individuelle und zufällig verteilte Geometriefehler sowie vom Rohteilvolumen abhängige Aufmaßschwankungen befinden können, mit hoher Punktdichte flächenhaft zu erfassen.

Zur Bestimmung von Form-, Maß- und Lageparametern der einzelnen Geometrielemente präzisionsgeschmiedeter Bauteile ist eine Erfassung der gesamten Bauteilgeometrie notwendig. Die Auswertung dieser Parameter kann, zusätzlich zu einer Bewertung der Geometrieabweichungen, wertvolle Hinweise auf eventuell vorhandene

Härteverzüge liefern. Die Anforderungen an die Messpunktdichte sind bei dieser Messaufgabe deutlich geringer als bei der Untersuchung der Funktionsflächen.

Zur gezielten Analyse von Härteverzügen ist es notwendig die Geometrie der präzisionsgeschmiedeten Bauteile vor und nach der Wärmebehandlung zu erfassen. Um die Referenzmessung vor der Wärmebehandlung durchführen zu können, muss die Prozesskette für zu untersuchenden Bauteile direkt nach dem Schmiedeprozess unterbrochen werden. Im Anschluss an die Referenzmessungen werden die Bauteile wieder erhitzt und der Wärmebehandlung im Sprayfeld zugeführt, um nach der Abkühlung nochmals gemessen zu werden. Durch eine Einpassung der nach der Wärmebehandlung erfassten Messdaten auf die zuvor aufgenommenen Referenzdaten und eine Berechnung der Abweichungen, lassen sich Aussagen über Art und Ausprägung der Härteverzüge treffen.

Bei der Fertigung von Kurbelwellen stellen die Bestimmung und die Beseitigung der Unwucht einen erheblichen Zeit- und Kostenfaktor dar. Es sollen Methoden zur Erfassung von Geometriebereichen präzisionsgeschmiedeter Kurbelwellenrohlinge, die maßgeblich zur Unwucht beitragen, erarbeitet werden. Steht diese Geometrieinformation zur Verfügung, kann aus ihr die für das jeweilige Rohteil resultierende Unwucht berechnet werden. Auf Grundlage dieser geometrischen Unwuchtanalyse kann einerseits festgestellt werden, ob die Unwucht beim untersuchten Bauteil durch Materialabtrag an den Nebenformelementen minimierbar ist, andererseits kann auch angegeben werden, an welcher Stelle der Materialabtrag erfolgen muss.

3.2.2 Aufbau eines Messsystems zur prozessbegleitenden Geometrieprüfung

Zur Durchführung der oben angesprochenen Messaufgaben ist der Aufbau eines Messsystems zur prozessbegleitenden Geometrieprüfung präzisionsgeschmiedeter Bauteile notwendig. Mit Hilfe des Messsystems soll sowohl eine schnelle flächenhafte Aufnahme der Funktionsflächen der Messobjekte, als auch eine Erfassung der gesamten Bauteilgeometrie im Hinblick auf eine Bestimmung von Form-, Maß- und Lageparametern ermöglicht werden. Zudem soll das Messsystem für den Einsatz im fertigungsnahen Umfeld geeignet sein, es muss sich folglich robust gegenüber Temperatureinflüssen und eventuell durch Werkzeugmaschinen induzierten Schwingungen verhalten.

4 Optische Methoden zur Formerfassung

Optische Verfahren zur Geometrieerfassung basieren auf einer weglängenproportionalen Kodierung des Messlichtes, welche zur Ermittlung der Abstandsinformation zwischen Messobjekt und Sensor herangezogen wird. Durch die Dekodierung der Abstandsinformation mit Hilfe einer Kalibrierfunktion kann die Entfernung zwischen Messobjekt und Sensoreinheit berechnet werden. Zur Kodierung der Abstandsinformation stehen folgende fünf Möglichkeiten zur Verfügung [Pfe98]:

1. Lichtlaufzeit
2. Geometrie der Sensoranordnung
3. Polarisierung des Messlichtes
4. Intensität des Messlichtes
5. Phasenbeziehung

In Abhängigkeit vom zugrunde liegenden Messprinzip lassen sich optische Messverfahren in drei Gruppen einteilen. In

Abbildung 10 sind die unterschiedlichen Messverfahren in Abhängigkeit vom Messbereich und der erreichbaren relativen Auflösung dargestellt. Die Klassifizierung dieser optischen Messverfahren gliedert sich in [Sch97, Sch99]:

- Laufzeitverfahren, bei denen die Abstandserfassung auf einer präzisen Messung der Lichtlaufzeit oder der Phase des Messlichtsignals basiert,
- Interferometrie, bei der neben der Lichtintensität auch die Phase des von der Messobjektoberfläche zurückgestreuten Lichtes zur Abstandsberechnung herangezogen wird,
- Geometrisch-optische Verfahren, bei denen durch gezielte Beleuchtung und Abbildung des von der Objektoberfläche zurückgestreuten Lichtes auf einen definiert zur Lichtquelle orientierten lichtempfindlichen Detektor auf den Abstand zwischen Sensor und Messpunkt geschlossen werden kann.

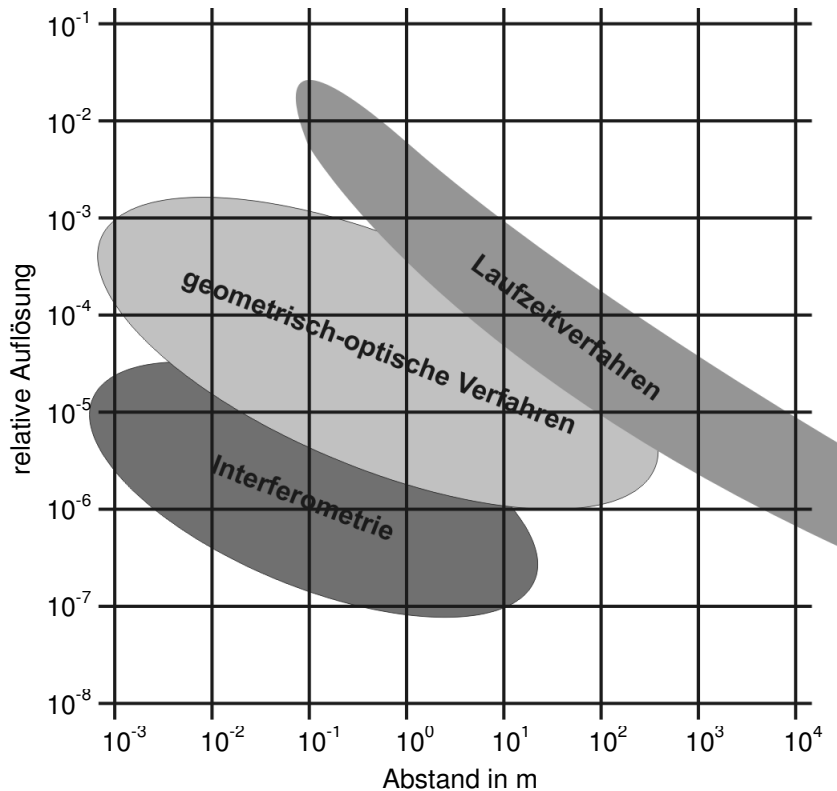


Abbildung 10: Relative Auflösung von Verfahren der optischen Formerfassung [Sch97, Sch99]

Ein wesentlicher Vorteil optischer Verfahren liegt in der vollständigen mechanischen Entkopplung von Sensor und Messobjekt, die eine berührungslose und somit rückwirkungsfreie Antastung der Oberfläche des Messobjektes gewährleistet. Zudem zeichnet sich die optische Messtechnik durch eine hohe Messgeschwindigkeit, die Messzeit wird praktisch nur durch die Auswertelektronik und die Auswertesoftware beschränkt, und die Möglichkeit zur flächenhaften bzw. parallelen Messdatenaufnahme aus. Mit Hilfe der Streifenprojektionstechnik ist zum Beispiel die parallele Aufnahme von $\sim 10^6$ Messpunkten in einer Einzelmessung möglich. Die hohe Flexibilität bei der Strahlführung durch optische Komponenten, wie beispielsweise Strahlteiler oder Lichtleitersysteme, und bei der Weiterverarbeitung und Auswertung der Messdaten aufgrund ihrer digitalen Bereitstellung, heben die optischen von den taktilen Messverfahren ab. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Leistungsfähigkeit optischer Messtechniken maßgeblich von den optischen Eigenschaften der Oberfläche des Messobjektes abhängt (siehe Abschnitt 4.1).

Optische Messsysteme lassen sich allgemein in 1D-, 2D-, 2½D- und 3D-Systeme einteilen [Gev06, Zac03]:

- Bei 1D-Messsystemen handelt es sich um Punktsensoren. Zur Erfassung der Geometrie eines flächenhaft ausgedehnten Objektes ist es notwendig den Sensor mit Hilfe einer Aktorik zu positionieren, was sich negativ auf die Messgeschwindigkeit auswirkt. Zur Messunsicherheit des Sensors muss hierbei zusätzlich die Unsicherheit der Aktorik beim Anfahren der Messposition berücksichtigt werden.
- 2D-Messsysteme oder Liniensensoren ermöglichen eine linienhafte Abstandsmessung in einem Messschnitt. Für eine flächenhafte Erfassung einer Werkstückoberfläche ist auch hier der Einsatz einer Aktorik zur Positionierung des Sensors notwendig.
- 2½D-Messsysteme sind ortsfeste Flächensensoren mit denen die Topographie der Messobjektoberfläche erfasst werden kann. Zusätzliche mechanische Führungen, die eine Positionierung des Messsystems relativ zum Messobjekt ermöglichen, sind nicht erforderlich. Hinterschnittbereiche in der Werkstückgeometrie sind mit dem ortsfesten Sensorsystem allerdings nicht messbar.
- Bei 3D-Messsystemen handelt es sich um relativ zum Messobjekt positionierbare 2½D-Sensoren. Die Positionierung erfolgt häufig durch Linearachssysteme oder Dreh-Schwenkeinrichtungen. Mit 3D-Messsystemen ist auch eine Messung von Hinterschnittbereichen in der Werkstückgeometrie möglich.

4.1 Messbarkeit technischer Oberflächen

Die Messbarkeit technischer Oberflächen ist stark vom eingesetzten Messprinzip und den optischen Eigenschaften der zu messenden Oberfläche abhängig. Während sich beispielsweise optisch glatte Oberflächen durch interferometrische Methoden erfassen lassen, sind diese jedoch nur sehr eingeschränkt für eine Messung mit Triangulationsverfahren geeignet. Insbesondere aktive Triangulationsverfahren, wie z. B. die Streifenprojektion, benötigen optisch raue Oberflächen, die sich durch eine diffuse Reflexion des einfallenden Lichtes auszeichnen. Im Folgenden soll kurz auf die optischen Eigenschaften technischer Oberflächen und ihre Messbarkeit mit optischen Methoden zur Formerfassung eingegangen werden.

4.1.1 Transparente Objekte

Transparente Objekte sind für elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Spektralbereich durchlässig; einfallendes Licht kann das Objekt bei einer lediglich leichten Abschwächung durch Absorptionseffekte passieren. Trifft das Licht schräg zur Oberflächennormalen auf die Objektoberfläche, wird ein Teil des Lichtes an der Grenzfläche in Abhängigkeit vom Einfallswinkel gemäß dem Brechungsgesetz nach Snellius gebrochen. Ein weiterer Teil des Lichtes wird an der Oberfläche reflektiert. Überschreitet der Einfallswinkel einen kritischen Wert, wird das Licht nicht mehr gebrochen, sondern annähernd vollständig an der Objektoberfläche reflektiert. Dieser Effekt ist als Totalreflexion bekannt [Vog99].

Die Oberflächen transparenter Objekte, beispielsweise aus Glas oder transparenten Kunststoffen, lassen sich nicht durch optische Methoden erfassen.

4.1.2 Volumenstreuende Objekte

Volumenstreuende Objekte zeichnen sich durch eine diffuse Reflexion des einfallenden Lichtes im Inneren des Körpers aus. Beispiele für volumenstreuende Objekte sind Gegenstände aus Glaskeramiken oder Zerodur, welches häufig bei der Herstellung von Referenzkörpern zur taktilen Antastung mit Koordinatenmessgeräten verwendet wird. Aufgrund der Mehrdeutigkeiten, die durch die Reflexion des Lichtes aus dem Objektinneren hervorgerufen werden, sind die Oberflächen volumenstreuender Objekte nicht optisch erfassbar.

4.1.3 Lichtundurchlässige Objekte

Bei lichtundurchlässigen Objekten dominieren die Effekte der Absorption und der Reflexion an der Objektoberfläche. Einfallendes Licht kann diese Objekte aufgrund der genannten Effekte nicht passieren.

Spekulare Reflexion

Die so genannte spekulare Reflexion tritt bei Objekten mit optisch glatten Oberflächen auf. Die Voraussetzung für spekulare Reflexionen ist, dass die Höhe h_0 der Unebenheiten auf der Objektoberfläche kleiner ist als die Wellenlänge λ des eingestrahnten Lichtes. Konkret gilt nach [Mau04]:

$$h_0 = 0,687 \cdot \lambda, \quad (4.1)$$

mit:

h_0 : Unebenheit der Objektoberfläche als Differenz des minimalen und maximalen Höhenwertes,

λ : Wellenlänge des einfallenden Lichtes.

Abgesehen von Absorptionseffekten, wird einfallendes Licht durch die spekulare Reflexion an der Oberfläche des Objektes zu annähernd 100% gespiegelt. Der Ausfallswinkel des reflektierten Lichtes ist gleich dem Einfallswinkel (siehe Abbildung 11). Beispiele für Objekte mit einer spekulär reflektierenden Oberfläche sind Spiegel und Bauteile mit feinbearbeiteten bzw. geschliffenen Oberflächen.

Diffuse Reflexion

Findet diffuse Reflexion statt, wird das einfallende Licht nahezu unabhängig vom Einfallswinkel reflektiert. Ideal diffus reflektierende Oberflächen werden als Lambertsche Oberflächen bezeichnet. Sie erscheinen unabhängig von der Beobachtungsrichtung gleich hell. Die Intensität I_r des reflektierten Lichtes hängt, dem Lambertschen Kosinusetz folgend, lediglich von der Intensität I_0 des eingestrahnten Lichtes und dem Kosinus des Winkels α zwischen der Beobachtungsrichtung und der Oberflächennormalen ab [Vog99]:

$$I_r = I_0 \cdot \cos(\alpha), \quad (4.2)$$

mit:

I_0 : Intensität des einfallenden Lichtes,

I_r : Intensität des reflektierten Lichtes,

α : Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Oberflächennormalen.

Ein hoher Anteil an diffuser Reflexion tritt beispielsweise bei Objekten mit mikrostrukturierten oder gestrahlten Oberflächen auf. Auch bei geschmiedeten Bauteilen dominiert die diffuse Reflexion.

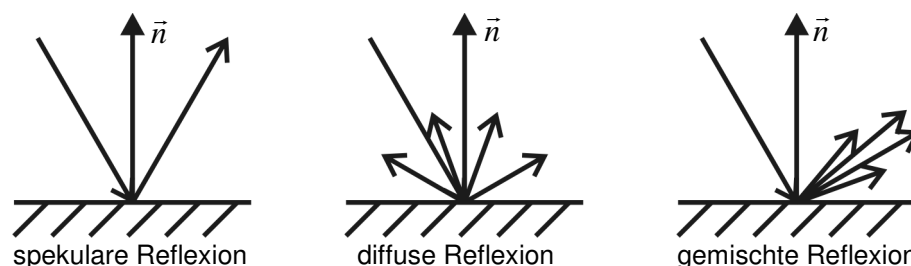


Abbildung 11: Verschiedene Formen der Reflexion einfallenden Lichtes an einer Oberfläche

Gemischte Reflexion

In der Praxis tritt, wie in Abbildung 11 dargestellt, an den Oberflächen industriell gefertigter Bauteile meist eine Mischung aus spekularer und diffuser Reflexion auf. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 12 am Beispiel zweier zylindrischer Proben mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften dargestellt. Bei Probe (a) überwiegt der Anteil der spekularen Reflexion. Probe (b) verfügt über eine aufgeraute Oberfläche, folglich überwiegt hier der Anteil der diffusen Reflexion. Das Auftreten der gemischten Reflexion hat zur Folge, dass auch bei Objekten mit rauen Oberflächen, wie sie beispielsweise präzisionsgeschmiedete Bauteile aufweisen, stellenweise gerichtete Reflexionen auftreten können, die zu so genannten Glanzlichtern (siehe Abbildung 12 (a)) führen können. Durch Glanzlichter kann es bei einer optischen Messung der Oberfläche eines Objektes zu einer lokalen Übersättigung der optoelektronischen Detektorelemente kommen, was zur Folge hat, dass Geometriebereiche, in denen Glanzlichter auftreten, nicht oder nur fehlerhaft erfasst werden können.

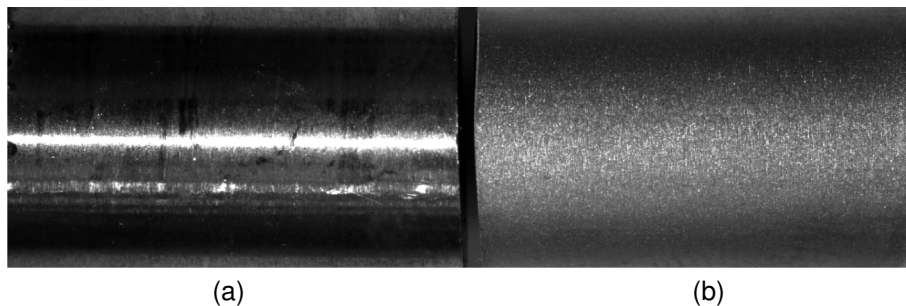


Abbildung 12: Zylindrische Proben mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften

4.2 Lichtlaufzeitverfahren

Lichtlaufzeitverfahren basieren auf der Messung der Zeitdifferenz zwischen dem Aussenden eines Messlichtpulses und dem Empfangen des reflektierten Signals. Bei diesem Messprinzip wird ausgenutzt, dass sich die Lichtgeschwindigkeit c in einem homogenen Medium konstant verhält. Da die Weglänge d zwischen Messsystem und der Oberfläche des Messobjekts zweimal durchlaufen wird, gilt:

$$d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t, \quad (4.3)$$

mit:

d : Weglänge zwischen Messsystem und Messobjekt,

c : Lichtgeschwindigkeit ($c_{Luft} \approx 3 \cdot 10^8$ m/s),

Δt : Zeitdifferenz zwischen Aussenden und Empfangen des Messlichtsignals.

Die Fähigkeit für Nahbereichsmessungen bei den Lichtlaufzeitverfahren wird durch die bisher unzureichende zeitliche Auflösung der optoelektronischen Detektorsysteme stark eingeschränkt. Aus diesem Grund liegt das Hauptanwendungsgebiet auf Messungen im Bereich mittlerer bis großer Weglängen, also im Bereich einiger Meter bis Kilometer. Durch Einkoppeln des auszusendenden Messlichtpulses in ein scannendes Spiegelsystem lässt sich der Funktionsumfang eines Lichtlaufzeitsensors um die flächenhafte Erfassung ausgedehnter Strukturen erweitern.

Eine weit verbreitete Variante der Lichtlaufzeitmessverfahren ist das Laserradar. Bei dieser Methode wird statt kurzer Messlichtpulse eine periodisch modulierte Laserlichtquelle eingesetzt. Durch die Ermittlung der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen emittierter und detektierter Strahlung kann auf den Abstand d zwischen Messsystem und Messobjekt geschlossen werden. Der Abstand d lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$d = \frac{c}{f} \left(\frac{\Delta\varphi}{2} + \frac{n}{2} \right), \quad (4.4)$$

mit:

d : Weglänge zwischen Messsystem und Messobjekt,

c : Lichtgeschwindigkeit ($c_{Luft} \approx 3 \cdot 10^8$ m/s),

f : Modulationsfrequenz der Laserlichtquelle,

$\Delta\varphi$: Phasendifferenz zwischen emittierten und empfangenen Messlichtsignal,

n : Ordnung der Phasenverschiebung.

Der Messbereich beim Laserradar wird durch die Tatsache eingeschränkt, dass die Lösung zur Berechnung des Abstandes d bei einer Phasendifferenz von $\Delta\varphi \geq 2\pi$ nicht mehr eindeutig ist. Hieraus folgt zudem, dass der Messbereich direkt durch die Modulationsfrequenz f vorgegeben wird. Bei modernen Laserradarsystemen werden diese Einschränkungen durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Modulationsfrequenzen entscheidend verringert.

4.3 Interferometrische Verfahren

Interferometrische Messverfahren basieren auf der Nutzung des Interferenzverhaltens von Lichtwellen zur Messung von Weglängen. Bei der klassischen Interferometrie wird das

Licht einer kohärenten Lichtquelle zunächst in zwei Teilstrahlen, einen Messstrahl und einen Referenzstrahl aufgespalten. Der an der Oberfläche des Messobjektes reflektierte Messstrahl wird auf einem Detektor mit dem Referenzstrahl überlagert. Das auf dem Detektor entstehende Interferenzsignal hängt direkt von der Weglängendifferenz von Mess- und Referenzstrahl ab und kann zur Bestimmung von Abstandsänderungen oder auch für direkte Abstandsmessungen genutzt werden.

Interferometrische Messverfahren zeichnen sich im Vergleich mit Lichtlaufzeitverfahren und geometrisch-optischen Verfahren durch eine sehr hohe Auflösung aus [Wol03]. Eine wesentliche Einschränkung für den Einsatz interferometrischer Verfahren liegt darin, dass nur Objektoberflächen erfasst werden können, deren Rauheit klein gegenüber der Wellenlänge des verwendeten Messlichtes ist [Möh92]. Dies hat zur Folge, dass nur optisch sehr glatte Oberflächen mit Hilfe der klassischen Interferometrie messbar sind (siehe Abschnitt 4.1).

4.3.1 Distanzinterferometrie

Die Distanzinterferometrie ist ein klassisches interferometrisches 1D-Messverfahren zur Längen- bzw. Abstandsmessung. Ein typisches Beispiel ist das in Abbildung 13 gezeigte Michelson-Interferometer. Der vom Laser ausgehende Lichtstrahl wird an einem Strahlteiler in den Mess- und den Referenzstrahl aufgespalten. Beide Strahlen werden nach dem zweimaligen Durchlaufen der Strecken s_1 und s_2 auf einem Detektor überlagert. In Abhängigkeit von der relativen Phasenlage der Strahlen zueinander schwankt die am Detektor festgestellte Lichtintensität zwischen einem Maximalwert (konstruktive Interferenz) und einer annähernd vollständigen Auslöschung (destruktive Interferenz). Die Abstandsinformation ist in der Phasenlage des Interferenzsignals enthalten.

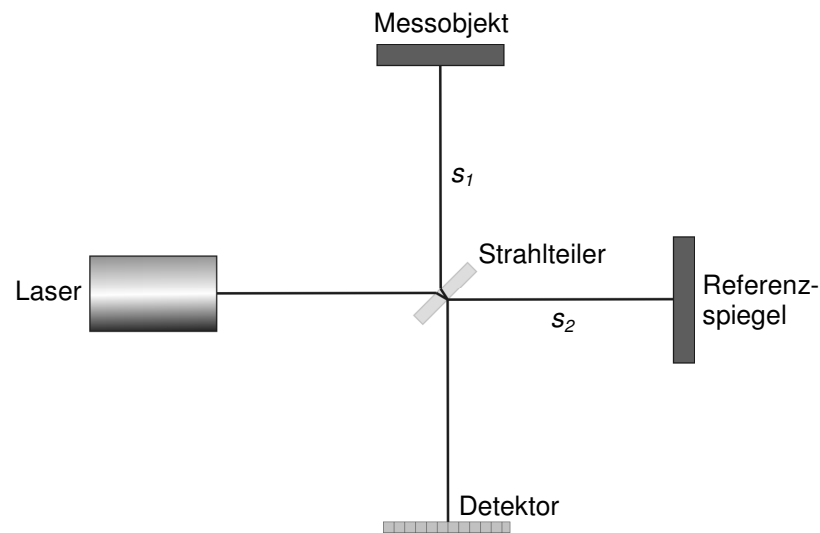


Abbildung 13: Aufbau eines Michelson-Interferometers [Mic81]

4.3.2 Weißlichtinterferometrie

Bei der Weißlichtinterferometrie wird anstatt des in der klassischen Interferometrie verwendeten monochromatischen Lichtes das Licht einer Weißlichtquelle eingesetzt, dessen extrem kurze Kohärenzlänge gezielt für das Messverfahren ausgenutzt wird. Das Interferenzsignal bei der Weißlichtinterferometrie bietet den Vorteil, dass bei identischen Weglängen von Mess- und Referenzstrahl nur ein einziges eindeutiges Maximum auftritt. Moderne Weißlichtinterferometer verfügen über CCD-Sensorarrays, deren einzelne Pixel jeweils als eigenständige Detektoren betrachtet werden können. Auf diese Weise wird die parallele Messung einer großen Anzahl von Objektpunkten ermöglicht.

Für eine Abstandsmessung wird die Weglänge zwischen Objektiv und Messobjekt mit Hilfe einer Piezoeinheit hochgenau variiert. In einer Vielzahl von definierten Positionen der Piezoeinheit wird nun die Intensität der einzelnen Pixel der Detektoreinheit erfasst. Zeigt ein Pixel eine maximale Lichtintensität, dann ist für dieses Pixel die Weglänge von Mess- und Referenzstrahl identisch. Durch die Betrachtung der Intensitätsmaxima aller Pixel in Abhängigkeit von der Position der Piezoeinheit lassen sich detaillierte Informationen über die Oberflächentopographie des Messobjektes im betrachteten Messfeld gewinnen.

4.3.3 Formprüfinterferometrie

Das grundlegende Funktionsprinzip eines Formprüfinterferometers gleicht dem eines klassischen Distanzinterferometers. Zur Durchführung einer Messung wird das durch eine Laserlichtquelle erzeugte Licht zunächst aufgeweitet, bevor es durch einen Strahlteiler in

einen Mess- und einen Referenzstrahl aufgeteilt wird. Der Referenzstrahl wird auf einen Referenzkörper gestrahlt, dessen Geometrie der Sollgeometrie des zu prüfenden Bauteils entspricht. Der Messstrahl wird auf die Oberfläche des Messobjektes gerichtet. Nach der Reflexion von der Oberfläche des Referenzkörpers bzw. des Messobjektes werden beide Strahlen auf einem CCD-Sensorarray überlagert. Aus der Differenz der optischen Weglängen zwischen Referenz- und Objektoberfläche ergeben sich Interferenzmuster (Interferogramme) auf der Sensorfläche, die Aufschluss über die Formabweichung des Messobjekts geben. Ein Hell-Dunkel-Übergang im Interferenzmuster entspricht hierbei einem optischen Weglängenunterschied von einer halben Wellenlänge des verwendeten Lichts. Das Messverfahren wird üblicherweise zur Prüfung von planen, sphärischen oder leicht-asphärischen Bauteilen eingesetzt.

4.4 Konoskopische Holographie

Das Funktionsprinzip eines so genannten konoskopischen Sensors basiert, wie in Abbildung 14 dargestellt, auf dem Strahlengang und den wellenoptischen Eigenschaften des eingesetzten monochromatischen Messlichts. Der wesentliche Vorteil eines konoskopischen Sensors liegt in der Ausbreitung des ausgesendeten Messlichtes und des vom Objekt zur Detektionseinheit zurück gestreuten Lichts entlang einer gemeinsamen optischen Achse. Damit lassen sich im Gegensatz zu anderen optischen Verfahren, wie beispielsweise den Triangulationsverfahren, die einen definierten Winkel zwischen Lichtquelle und Detektionseinheit voraussetzen, auch sehr steile Bereiche erfassen, wie sie insbesondere bei Zahnrädern und an Kurbelwangen auftreten. Der maximale Winkel der Oberflächennormalen des Messobjekts zur optischen Achse des Messsystems ist mit $\pm 85^\circ$ spezifiziert [NN01].

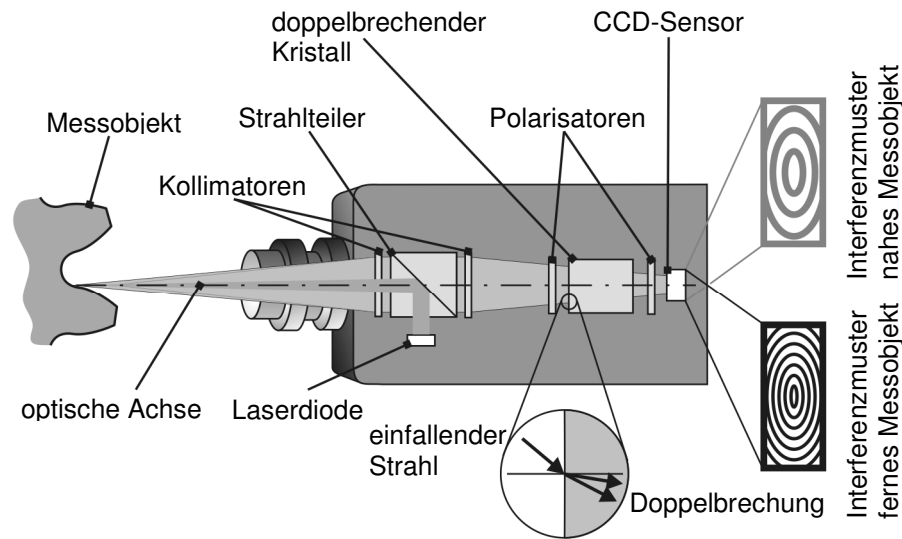


Abbildung 14: Aufbau und Funktionsweise eines konoskopischen Sensors [NN01, Haa06b]

Bei einem konoskopischen Sensor wird ein durch eine Laserdiode erzeugter Lichtstrahl mit Hilfe eines Strahlteilers und eines Linsensystems auf die Oberfläche des Messobjekts projiziert. Das zurückgestreute Licht trifft nach Durchlaufen eines Kollimators und eines Polarisators in einem von der Entfernung zum Messobjekt abhängigen Winkel auf einen doppelbrechenden Kristall. Dieser besitzt unterschiedliche Brechungsindizes für unterschiedliche Polarisationsrichtungen des Lichts. Je nach Polarisationsrichtung wird der einfallende Strahl durch den doppelbrechenden Kristall in einen ordentlichen und außerordentlichen Strahl gebrochen. Die beiden Strahlen weisen aufgrund der Doppelbrechung einen vom Einfallswinkel und somit von der Entfernung zum Messobjekt abhängigen Gangunterschied auf. Werden die beiden Strahlen nun nach Passieren eines weiteren Polarisators zur Kontrastverbesserung auf einem CCD-Sensor zur Interferenz gebracht, bildet sich dort eine von diesem Gangunterschied abhängige Interferenzfigur aus konzentrischen Ringen aus. Je näher sich das Messobjekt am Sensor befindet, desto größer wird der Abstand zwischen den Ringen des Interferenzmusters. Wird der Abstand erhöht, liegen die Ringe des Interferenzmusters näher aneinander. Mit Hilfe einer Fouriertransformation wird die Frequenz der periodischen Ringstruktur auf dem CCD-Sensor analysiert. Über eine Weglängenkalibrierung kann jeder Frequenz der Ringstruktur ein Wert für den Abstand vom Messobjekt zum Detektor zugeordnet werden.

Der Messbereich, die Genauigkeit, die Standardunsicherheit und der Arbeitsabstand von konoskopischen Sensoren hängen stark vom jeweils eingesetzten Linsensystem ab. Der Messbereich liegt typischerweise zwischen 1,8 bis 17,5 mm.

4.5 Triangulationsverfahren

Geometrische Messverfahren zur Abstandsbestimmung nach dem Triangulationsprinzip wurden bereits in der Antike von Thales von Milet zur Höhenbestimmung der Pyramiden und zur Abstandsberechnung zwischen Schiffen eingesetzt. Seit dem 19. Jahrhundert gehören Triangulationsverfahren zu den Standardmessverfahren bei der Landvermessung [NN59]. Im industriellen Bereich fanden die Triangulationsverfahren erst mit der Verbreitung optoelektronischer Sensorik und der Lasertechnik in den neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts Anwendung [Pfe93]. Die folgenden Absätze geben einen kurzen Überblick über die wichtigsten in der Industrie eingesetzten Varianten der Triangulation.

4.5.1 Lasertriangulation

Bei der Lasertriangulation wird mit Hilfe eines Lasers ein Lichtpunkt auf die Oberfläche des zu messenden Objektes projiziert. Das von der Objektoberfläche in Detektorrichtung zurück gestreute Licht wird über eine Aufnahmeoptik auf einen CCD-Zeilensensor abgebildet, der zur Einhaltung der Scheimpflugbedingung gegenüber der Abbildungsoptik verkippt angeordnet ist [Her05]. Eine Änderung des Abstandes Δd bewirkt einen lateralen Versatz $\Delta d'$ des auf den CCD-Zeilensensor abgebildeten Lichtpunktes. Aus der Geometrie der Sensoranordnung, dem Triangulationswinkel β zwischen Beleuchtungs- und Detektionsrichtung sowie der Position des Lichtpunktes auf dem Detektor lässt sich der Abstand d von Sensor und Objektpunkt berechnen bzw. triangulieren. Abbildung 15 beschreibt das Messprinzip der Lasertriangulation für den Fall einer zur Objektoberfläche senkrechten Beobachtung.

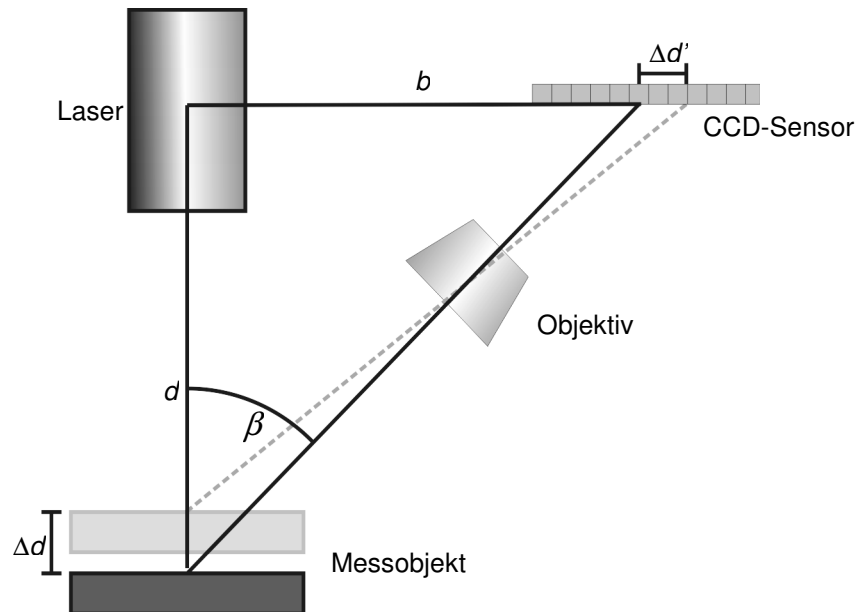


Abbildung 15: Funktionsprinzip eines Lasertriangulationsensors

Für diesen Fall gilt für die Weglänge d zwischen Messsystem und Messobjekt:

$$d = \frac{b}{\tan(\beta)} \quad (4.5)$$

mit:

d : Weglänge zwischen Messsystem und Messobjekt,

b : Abstand zwischen Lichtquelle und Detektorelement,

β : Triangulationswinkel zwischen Beleuchtungs- und Detektionsrichtung.

Die Auflösung eines Triangulationsensors hängt entscheidend vom Triangulationswinkel β ab. Aus Abbildung 15 lässt sich folgender Zusammenhang entnehmen:

$$\Delta d' \sim \Delta d \sin(\beta) \quad (4.6)$$

mit:

Δd : Änderung der Weglänge zwischen Messsystem und Messobjekt,

$\Delta d'$: lateraler Versatz des auf dem CCD-Zeilensensor abgebildeten Lichtpunktes,

β : Triangulationswinkel zwischen Beleuchtungs- und Detektionsrichtung.

Aus Gleichung (4.6) geht hervor, dass die Auflösung bei Triangulationsverfahren bei einem Winkel von $\beta = 90^\circ$ maximal ist, während sie sich bei kleineren Triangulationswinkeln verringert, bis schließlich im Grenzfall für $\beta \rightarrow 0$ keine Höheninformation mehr erfassbar ist. Bei einem großen Winkel β besteht allerdings die

Einschränkung, dass größere Objektbereiche abgeschattet werden, und somit nicht für die Messung zugänglich sind.

4.5.2 Lichtschnittverfahren

Das Lichtschnittverfahren ist eine Erweiterung der Lasertriangulation [Bre93, Wol92]. Beim Lichtschnittverfahren wird anstelle eines einzelnen Lichtpunktes ein Lichtstreifen mit scharfer Hell-Dunkel-Grenze auf das Messobjekt projiziert. Dieser Lichtstreifen schneidet das Messobjekt entlang einer Profillinie. Der von der Messobjektoberfläche reflektierte Lichtschnitt wird über eine Aufnahmeoptik auf eine CCD-Detektorfläche abgebildet. Mit Hilfe von Gleichung (4.5) kann der aufgenommene Lichtschnitt für jede Zeile des flächenhaften Detektors ausgewertet werden.

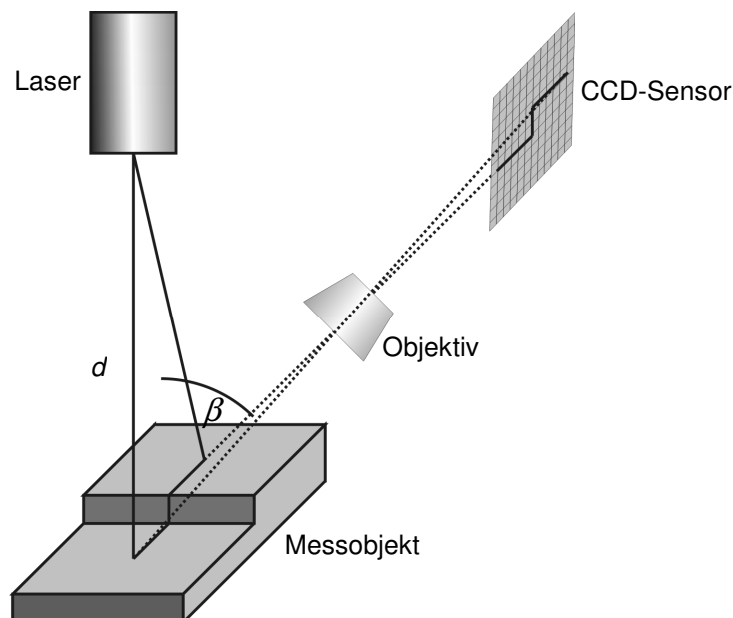


Abbildung 16: Funktionsprinzip des Lichtschnittverfahrens

4.5.3 Photogrammetrie

Bei der Photogrammetrie handelt es sich um ein passives Triangulationsverfahren. Das zu messende Objekt wird aus unterschiedlichen bekannten Positionen und Richtungen gleichzeitig oder nacheinander von einer oder mehreren CCD-Kameras erfasst. Zur Berechnung der Objektgeometrie müssen die korrespondierenden Bildinhalte aus den Aufnahmen der verschiedenen Kameras identifiziert werden. Das Auffinden homologer Bildpunkte geschieht häufig durch eine subpixelgenaue Detektion von auf dem Messobjekt vorhandenen nichtperiodischen Strukturen, wie beispielsweise Kanten, Bohrungen oder auch

Referenzmarken. Eine weitere Möglichkeit bieten Ansätze der Grauwertkorrelation, bei der nicht die homologen Bildpunkte der verschiedenen Kameraansichten identifiziert werden, sondern die von den Kameras aufgenommenen Grauwertfolgen der Objektoberfläche ausgewertet werden [Zac03]. Mit Hilfe der bekannten Positionen und Blickrichtungen (äußere Orientierung) und der abbildungsrelevanten Parameter (innere Orientierung) der eingesetzten Kameras lassen sich die 3D-Koordinaten der Objektoberfläche triangulieren.

Die Photogrammetrie wird sowohl im makroskopischen als auch im mikroskopischen Bereich angewendet. Typische Einsatzgebiete sind die Auswertung von Satelliten- und Luftaufnahmen, die Erfassung von großflächigen Strukturen, wie beispielsweise von Gebäudefassaden oder von Blechformteilen, sowie die Auswertung von stereoskopischen Licht- oder Rasterelektronenmikroskopaufnahmen. Ein einschränkendes Merkmal für den Einsatz der Photogrammetrie ist das im Vergleich zu den aktiven Triangulationsverfahren geringe vertikale Auflösungsvermögen.

4.6 Streifenprojektion

Bei der Streifenprojektion handelt es sich um ein aktives Triangulationsverfahren, bei dem sich auch ausgedehnte Objekte, die über eine so genannte optisch raue Oberfläche verfügen, in kurzer Zeit mit einer sehr hohen lateralen und vertikalen Auflösung messen lassen. Dieses wird, im Gegensatz zur herkömmlichen Triangulationstechnik, die sich auf die Projektion eines Lichtpunktes oder eines Lichtschnittes beschränkt, durch die Projektion verschiedener Sequenzen paralleler Streifenmuster auf die zu messende Oberfläche erreicht.

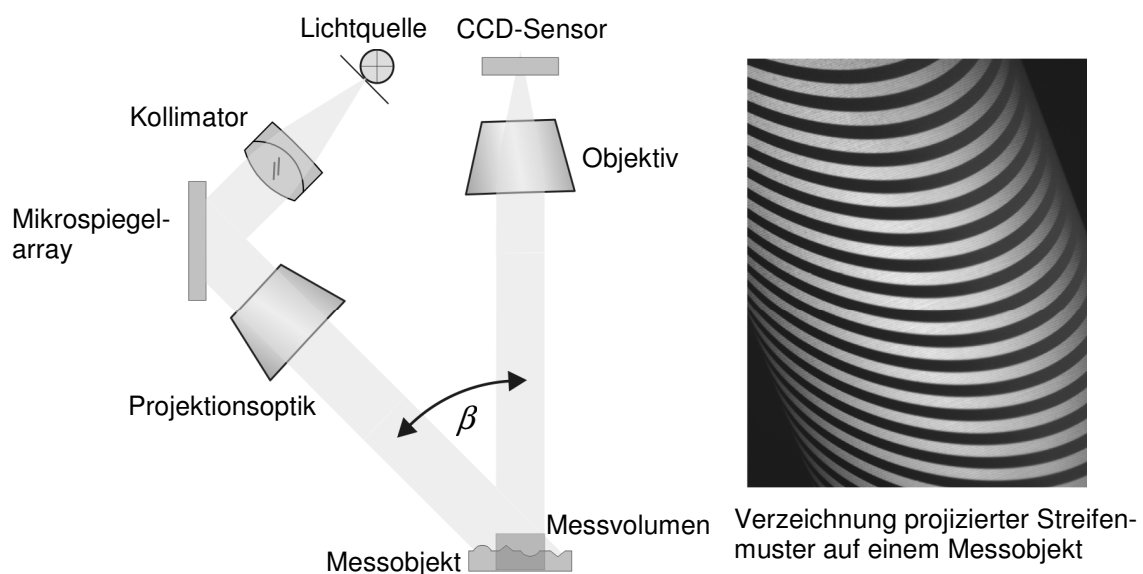


Abbildung 17: Aufbau und Funktionsweise eines Streifenprojektionssystems

4.6.1 Aufbau und Funktionsweise

Der prinzipielle Aufbau eines modernen Streifenprojektionssystems ist in Abbildung 17 gezeigt. Das Licht einer Weißlichtquelle wird durch ein Linsensystem parallelisiert und auf eine Fläche mit einzeln ansteuerbaren Mikrospiegeln gestrahlt. Jeder einzelne Mikrospiegel lässt sich elektrostatisch in zwei Positionen kippen [Mon95, Hor95]. In der ersten Position wird das auf ihn gestrahlte Licht durch die Projektionsoptik als einzelner Lichtpunkt auf das Messobjekt abgebildet. In der zweiten Position wird das Licht auf einen Absorber gestrahlt. Hierdurch wird sichergestellt, dass in diesem Fall kein Licht des Spiegels in die Projektionsoptik gelangt. Durch eine zeitliche Pulsweitenmodulation bei der Ansteuerung der Mikrospiegel lässt sich die Intensität der projizierten Lichtpunkte auf der Oberfläche des Messobjektes für das menschliche Auge bzw. für optoelektronische Detektorsysteme variieren. Standardmäßig können so bis zu 256 Lichtintensitäten erzeugt werden.

Mit Hilfe des Mikrospiegelarrays werden Streifenmuster, die sich aus den Lichtpunkten der einzelnen Mikrospiegel zusammensetzen, über eine Projektionsoptik unter dem definierten Triangulationswinkel β auf die Oberfläche des zu messenden Objektes abgebildet. Auf der Oberfläche wird das Streifenmuster in Abhängigkeit von der Form des Messobjektes verzerrt (siehe Abbildung 17). Die deformierten Streifenmuster werden anschließend über ein telezentrisches Objektiv auf die Sensorfläche einer CCD-Kamera abgebildet. Der 3D-Messeffekt ergibt sich aus der Auslenkung der projizierten parallelen Streifenmuster auf der gekrümmten Objektoberfläche.

4.6.2 Phase-Shift-Verfahren

Beim so genannten Phase-Shift-Verfahren werden parallele äquidistante Streifenmuster mit einer nahezu \cos^2 -förmigen Intensitätsverteilung I_n auf die Oberfläche des Messobjektes projiziert (siehe Abbildung 18). Die Intensitätsverteilung I_n kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$I_n(x, y) = I_U(x, y) + M(x, y) \cdot \cos(\phi(x, y) + \Delta\phi_n), \quad n = (1, 2, \dots, N) \quad (4.7)$$

mit:

- I_n : Intensität des auf die Oberfläche des Messobjektes projizierten Messlichts,
- I_U : Intensität des von der Objektoberfläche in den Detektor gestreuten Umgebungslichts,
- M : Modulation der projizierten Streifenmuster,

$\phi(x,y)$: Phasenlage der projizierten Streifenmuster.

Während der Messung werden die Streifenmuster in ihrer Phasenlage $\phi(x,y)$ variiert. In der Praxis wird häufig eine Sequenz aus $N=4$ Streifenmustern mit einem Phasenunterschied von jeweils $\Delta\phi = \pi/4$ verwendet, jedoch sind zur Erhöhung der Messsicherheit auch längere Phase-Shift-Sequenzen denkbar. Aufgrund ihrer \cos^2 -förmigen Intensitätsverteilung können die projizierten Streifenmuster als Interferogramme aufgefasst und unter Verwendung von Algorithmen zur Phasenanalyse, wie sie in der Interferometrie zur Anwendung kommen, ausgewertet werden [Schm95]. Ein einfacher Algorithmus zur Bestimmung der Phase ϕ , der auf $N=4$ Messungen basiert, ist in der folgenden Gleichung gegeben:

$$\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \bmod(2\pi) \quad (4.8)$$

Hierdurch wird eine schnelle und subpixelgenaue Bestimmung der Positionen der auf die Detektorfläche abgebildeten Streifen ermöglicht. Somit können durch den Einsatz des Phase-Shift-Verfahrens erheblich höhere Profilauflösungen und Messgenauigkeiten erreicht werden, als dies mit den herkömmlichen Triangulationsverfahren möglich ist. Das Phase-Shift-Verfahren liefert allerdings nur in einem eingeschränkten Höhenbereich eindeutige Ergebnisse. Übersteigt die Auslenkung der projizierten Streifen durch Variation der Höhenkoordinate der Messobjektoberfläche die Auslenkung, die ein Streifen bei einer Phasenverschiebung von $\Delta\phi = 2\pi$ erfahren würde, lassen sich die Oberflächenkoordinaten des Messobjektes nicht mehr eindeutig berechnen. Das gleiche Problem tritt bei der Messung von Oberflächen mit Unstetigkeitsstellen auf, wie sie beispielsweise als Absätze oder Stufen bei industriell gefertigten Bauteilen vorkommen.

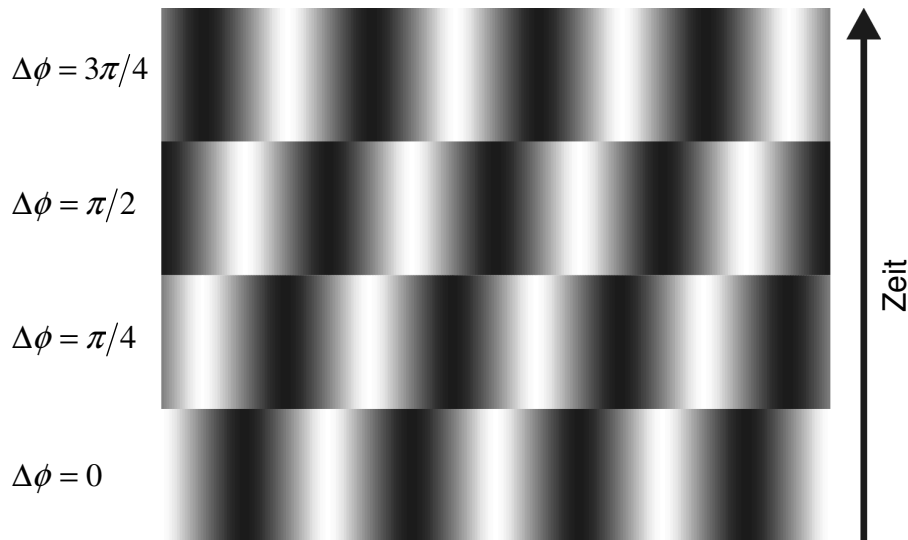


Abbildung 18: Sequenz \cos^2 -förmiger Streifen für das Phase-Shift-Verfahren

4.6.3 Graycode-Verfahren

Um die Eindeutigkeit bei der Auswertung der Höheninformation zu gewährleisten werden zusätzlich zu den Phase-Shift-Sequenzen so genannte Graycode-Sequenzen projiziert [Str96, Mal92, Bre93]. Beim Graycode handelt es sich um einen Binärkode, bei dem sich zwei benachbarte Zustände durch genau ein Bit in ihrer Bitfolge unterscheiden (siehe Abbildung 19). Der Graycode bietet den Vorteil, dass sich bei einer fehlerhaften Dekodierung eines einzelnen Bits der Bitfolge der benachbarte Zustand als Ergebnis ergibt. Bei einer konventionellen binären Kodierung kann die Abweichung durch eine fehlerhafte Erkennung eines einzelnen Bits erheblich größer sein.

Bei der Projektion einer Streifensequenz nach dem Graycode-Verfahren besitzt jeder Streifen, bzw. jede Lichtebene, eine eindeutige Folge von Hell-Dunkel-Übergängen. Hierdurch wird ein ortsfester Punkt der Messobjektoberfläche, der sich innerhalb des Messvolumens befindet, mit einer eindeutigen Hell-Dunkel-Sequenz beleuchtet. Auf Grundlage dieser Sequenzen kann jedem mit der Kamera erfassten Objektpunkt die vom Projektor erzeugte Lichtebene zugeordnet werden, durch die die jeweilige Sequenz auf der Objektoberfläche hervorgerufen wurde. Nach erfolgter Zuordnung der projizierten Lichtebenen zu den aufgenommenen Objektpunkten erfolgt die Berechnung der Höheninformation analog zum bereits angesprochenen Lichtschnittverfahren (siehe 4.5).

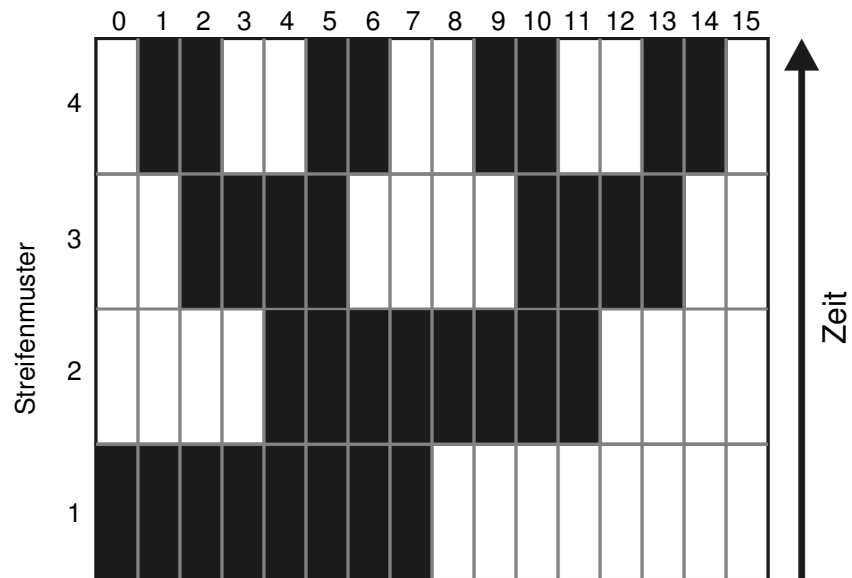


Abbildung 19: Streifensequenz nach den Graycode-Verfahren

4.6.4 Anwendungsbereiche

Moderne Streifenprojektionssysteme werden in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten eingesetzt. Ein wichtiges Beispiel ist in diesem Zusammenhang das häufig in der Industrie eingesetzte Reverse Engineering [Häu97, Schö98]. Bei diesem Verfahren wird ein Designmodell eines oftmals prototypischen Bauteils mittels Streifenprojektion gemessen. Der hieraus resultierende 3D-Datensatz wird anschließend an ein CAD-System weitergegeben, mit dessen Hilfe die Pläne zur Fertigung von dem Designmodell nachempfundenen Bauteilen erstellt werden.

In der Industrie werden Streifenprojektionssysteme zur schnellen und flächenhaften Geometrieprüfung komplexer, in Massenproduktion hergestellter Bauteile eingesetzt. Mit Hilfe der dreidimensionalen Geometrieinformationen können Fehler im Fertigungsablauf schnell aufgedeckt werden, wodurch zeitnah geeignete Korrekturen durchgeführt werden können.

Streifenprojektionssysteme werden auch im Bereich der Medizin eingesetzt. Ein Anwendungsgebiet ist in diesem Zusammenhang die Untersuchung des Heilungsverlaufs von Wunden. Mit Hilfe der Streifenprojektion wird das Volumen der Wunde zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Auf Grundlage der Volumeninformation können quantitative Aussagen über den Heilungsverlauf der Wunde getroffen werden. Auch im Bereich der plastischen- und wiederherstellenden Chirurgie werden Streifenprojektionssysteme eingesetzt. Die durch eine Messung des betreffenden Körperbereichs erlangten 3D-Informationen können

beispielsweise zur Planung von Operationen herangezogen werden. Zudem wird eine Bewertung des Operationserfolges durch einen Vergleich der Messdaten vor und nach der Operation ermöglicht.

4.7 Schattenprojektion

Bei der Schattenprojektionstechnik wird das Messobjekt, wie in Abbildung 20 gezeigt, von einer Seite telezentrisch mit dem Messlicht beleuchtet. Hierbei handelt es sich oft um das monochromatische Licht einer Laserlichtquelle, welches durch die Projektionsoptik zu einem parallelen Strahlenbündel aufgeweitet wird. Trifft das Messlicht auf das Messobjekt, wird das Strahlenbündel durch den Schattenwurf des Objektes unterbrochen. Der projizierte Schatten des Messobjektes wird auf der Detektorseite von einem mit einer ebenfalls telezentrischen Optik ausgestatteten CCD-Zeilensensor erfasst.

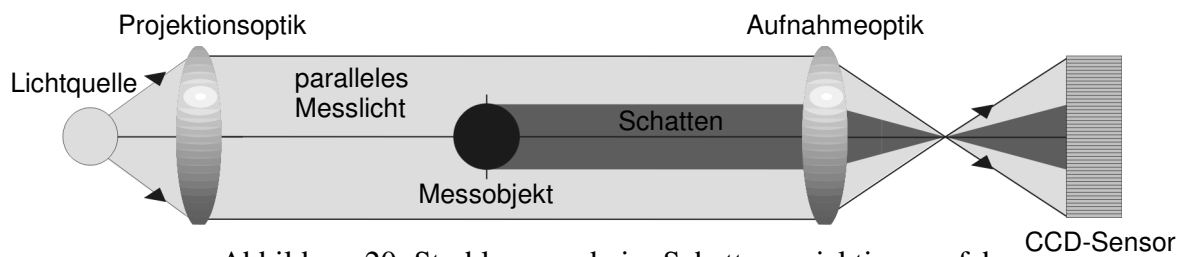


Abbildung 20: Strahlengang beim Schattenprojektionsverfahren

Zur Berechnung der Ausdehnung des auf den CCD-Sensor projizierten Schattens des Messobjektes ist eine genaue Bestimmung der Schattengrenzen notwendig. Hierzu werden die Grauwerte der Hell-Dunkel-Übergänge des Messobjektschattens mit Hilfe von Subpixelmethoden ausgewertet. Dies geschieht durch Interpolation der diskreten Grauwerte der CCD-Pixel an der Schattengrenze mit einer Polynomfunktion (siehe Abbildung 21). Unterschreitet der interpolierte Grauwertverlauf eine zuvor festgelegte Digitalisierungsschwelle, befindet sich die Schattengrenze an dieser Position. Die Ausdehnung des Messobjektschattens lässt sich durch Bestimmung der Differenz der Positionen der Schattengrenzen auf dem CCD-Sensor berechnen. Mit Hilfe einer Kalibrierfunktion kann auf Grundlage der Ausdehnung des Messobjektschattens auf die tatsächliche Ausdehnung des Messobjektes geschlossen werden.

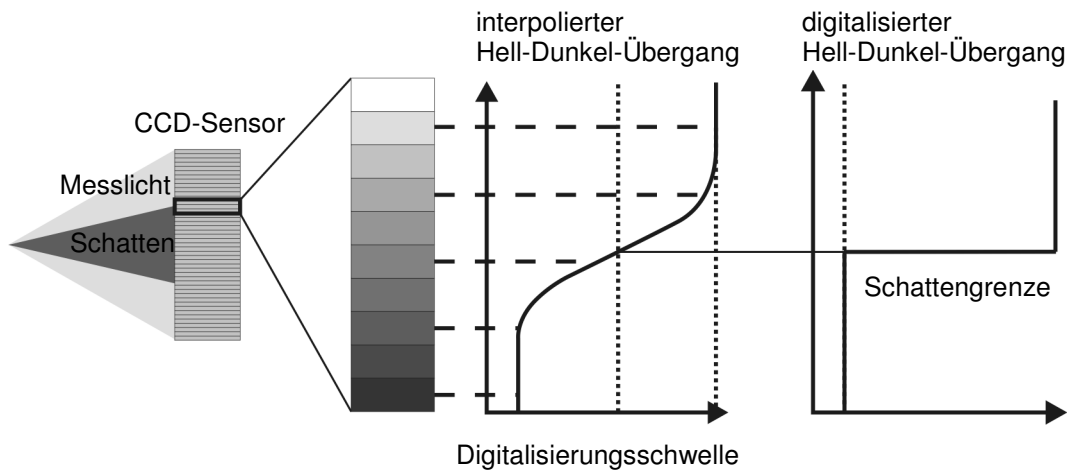


Abbildung 21: Subpixelgenaue Kantendetektion beim Schattenprojektionsverfahren

Ein häufiges Einsatzgebiet der Schattenprojektionstechnik ist die Erfassung von Werkstückkonturen. Hierzu wird, wie in Abbildung 22 dargestellt, die Sensoreinheit, bestehend aus einem Projektions- und einem Detektormodul, entlang der Achse des zu messenden Bauteils bewegt. Während der Bewegung werden, in Abhängigkeit von der Position der Sensoreinheit, eine Vielzahl von Schattenprojektionsmessungen durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Sensorposition lassen sich die Messdaten zu einer vollständigen Werkstückkontur zusammenfügen.

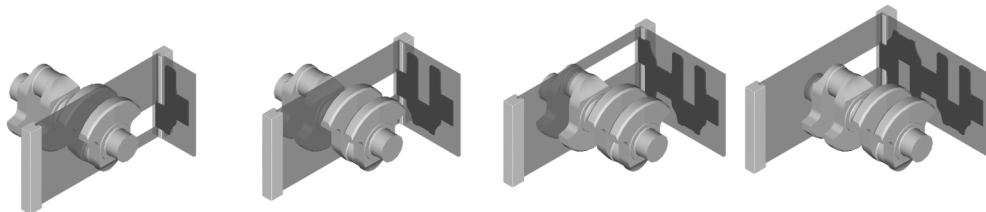


Abbildung 22: Konturerfassung mittels Schattenprojektion [Käs07]

5 Auswahl der Sensorik

Präzisionsgeschmiedete Bauteile weisen für das Fertigungsverfahren typische Geometriefehler, wie beispielsweise Aufmaßschwankungen oder Formfehler auf (siehe Abschnitt 3.1). Diese Fehlstellen sind im Gegensatz zu Geometriefehlern bei spanend hergestellten Werkstücken sehr individuell ausgeprägt und können mit vertretbarem Aufwand nicht sicher durch konventionelle taktile Messverfahren detektiert werden. Insbesondere eine hochpräzise taktile Geometrieprüfung mit Koordinatenmessgeräten ist aufgrund der zu geringen Geschwindigkeit zur prozessbegleitenden Prüfung endkonturnah geschmiedeter Bauteile ungeeignet. Auch aufgrund der im Vergleich zur Fertigteilprüfung geringeren Genauigkeitsanforderungen, bieten optische Methoden zur Formerfassung eine Lösung dieses Problems (siehe Kapitel 4).

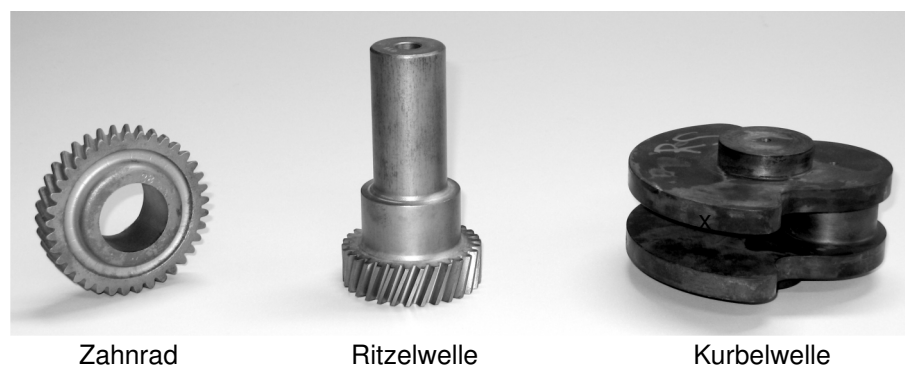


Abbildung 23: Beispielbauteile des SFB 489

Im Rahmen des SFB 489 werden Zahnräder, Ritzelwellen und Kurbelwellen hergestellt (siehe Abbildung 23), welche unterschiedliche Anforderungen an die Sensorik, die Messstrategie und die Messdatenauswertung stellen. Die Geometrieprüfung von Zahnrädern beschränkt sich auf eine flächenhafte Erfassung der Verzahnung als Funktionselement. Eine Ritzelwelle besitzt, zusätzlich zur Verzahnung, einen Lagersitz als Funktionselement, der ebenfalls flächenhaft erfasst werden muss. Eine schnelle Erfassung der Ritzelwellengeometrie zur Prüfung von Form-, Maß- und Lageparametern der einzelnen Geometrieelemente, insbesondere auch im Hinblick auf eine Untersuchung von Härteverzügen, kann durch die Aufnahme von Werkstückkonturen erfolgen. Zusätzlich zur Erfassung der Funktionsflächen und der Untersuchung von Härteverzügen, wird bei der Geometrieprüfung von Kurbelwellen eine auf den Geometrieinformationen basierende Unwuchtanalyse durchgeführt. Hierzu ist

eine möglichst genaue Kenntnis der Werkstückgeometrie erforderlich. Diese kann durch die Aufnahme einer Vielzahl von Werkstückkonturen in definierten Winkelpositionen, und einer anschließenden Rekombination der Konturen zu einer Einhüllenden des Werkstücks erlangt werden.

5.1 Erfassung der Funktionsflächen

Zur Geometrieprüfung der Funktionsflächen präzisionsgeschmiedeter Bauteile wird ein optisches Messverfahren benötigt, das sich durch eine schnelle und flächenhafte Geometrieerfassung mit hoher Punktdichte auszeichnet. Im Hinblick auf einen prozessbegleitenden Einsatz an der Fertigungslinie muss sich das Messsystem robust gegenüber Temperatureinflüssen und durch Werkzeugmaschinen induzierten Schwingungen verhalten. Aufgrund ihrer diffus streuenden Oberflächen eignen sich präzisionsgeschmiedete Bauteile besonders für den Einsatz der Streifenprojektionstechnik als hochgenaues flächenhaftes 3D-Messverfahren. Zur lückenlosen Erfassung der Verzahnungen von Zahnrädern und Ritzelwellen und der Lagersitze von Ritzel- und Kurbelwellen sind, je nach Messvolumen des Streifenprojektionssensors, mehrere Messungen in unterschiedlichen äquidistanten Winkelpositionen, die durch eine motorische Rotationsachse eingestellt werden können, notwendig. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich die einzelnen Messdatensätze leicht überlagern. Zur vollständigen Erfassung der Hublager von Kurbelwellen ist eine hochgenaue Nachführung des Streifenprojektionssensors in Abhängigkeit von der Winkelposition notwendig.

5.2 Bestimmung von Form-, Maß- und Lageparametern

Die Bestimmung von Form-, Maß- und Lageparametern der Geometrieelemente präzisionsgeschmiedeter Bauteile soll, wie in Abbildung 24 gezeigt, auf Grundlage von Längskonturen des Werkstücks geschehen. Zur schnellen prozessbegleitenden Aufnahme der Werkstückkonturen wird ein optisches Messsystem benötigt, welches sich robust gegen eventuelle äußere Einflüsse an der Fertigungslinie verhält. Aufgrund der hohen Messgeschwindigkeit und Genauigkeit, sowie der Robustheit, werden diese Anforderungen von auf der Schattenprojektionstechnik basierenden Messsystemen erfüllt. Zur schnellen Bestimmung von Form und Maß ausgewählter Geometrieelemente präzisionsgeschmiedeter Bauteile kann die Werkstückkontur zunächst in wenigen definierten Winkelpositionen mit dem Schattenprojektionssystem erfasst werden. Auf diese Weise können sehr schnell Maße

wie Lagersitzdurchmesser und Lagersitzbreite erfasst werden. Zudem wird eine Prüfung der Rechtwinkligkeit zwischen Kurbelwangen und Drehachse bei Kurbelwellen ermöglicht. Diese Informationen können zur Beurteilung von eventuell vorhandenen Härteverzügen herangezogen werden.

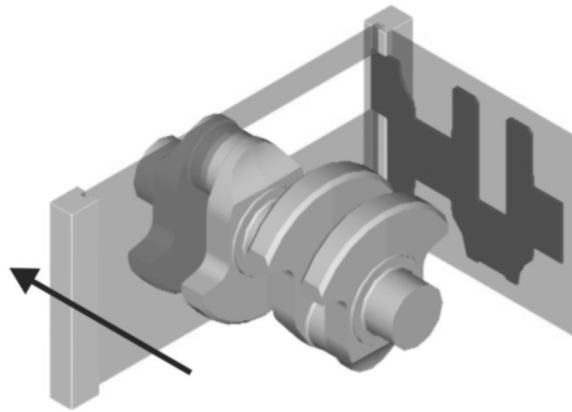


Abbildung 24: Aufnahme einer Längskontur einer Kurbelwelle mit der Schattenprojektionstechnik [Käs07]

5.3 Volumetrische Untersuchungen an Kurbelwellen

Zur Durchführung der volumetrischen Untersuchungen an Kurbelwellen bietet sich der Einsatz eines Multisensorsystems, bestehend aus einem Streifen- und einem Schattenprojektionssensor an. Eine annähernd vollständige Erfassung der Geometrie von Kurbelwellen, mit Ausnahme der Hinterschnittbereiche an den Kurbelwangen, kann schnell und mit hoher Genauigkeit mit der Schattenprojektionstechnik durchgeführt werden. Zur Geometrieerfassung von präzisionsgeschmiedeten Kurbelwellen ist es notwendig eine große Anzahl an Werkstückkonturen ($\sim 10^3$) des Messobjekts in unterschiedlichen definierten Winkelpositionen entlang der Rotationsachse der Kurbelwelle, also in Längsrichtung aufzunehmen.

Da insbesondere die Hublager von Kurbelwellen einen großen Einfluss auf die Unwucht haben, sollen die zuvor mittels Streifenprojektion erfassten Messdaten der Kurbelwellenlagersitze mit den durch Schattenprojektion erfassten Geometriedaten fusioniert werden. Auf Grundlage der fusionierten Messdaten lässt sich das Werkstückvolumen, welches die Grundlage zur geometrischen Unwuchtanalyse bildet, berechnen.

6 Flächenhafte Geometrieprüfung von Zahnrädern

Aufgrund der komplexen Geometrie stellt die flächenhafte Erfassung einer Verzahnung hohe Anforderungen an die optische Messtechnik. Insbesondere die Erfassung der Zahnflanken, also der Funktionsflächen eines Zahnrades, gestaltet sich aufgrund ihrer unterschiedlichen und teilweise starken Neigung bezogen auf die optische Achse des Streifenprojektionssensors problematisch. Die Ursache dieser Problematik liegt in dem direkten Einfluss der Neigung der zu messenden Oberfläche auf die Messunsicherheit eines Triangulationssensors begründet [Möh92]. Um eine vollständige Erfassung der Verzahnungsgeometrie zu gewährleisten, müssen Abschattungseffekte ausgeschlossen werden. Hierzu ist es notwendig, die Projektionsrichtung des eingesetzten Streifenprojektionssensors orthogonal zum Normalschnitt der Verzahnung zu wählen. Weist die zu messende Verzahnung einen hohen Anteil an spekularer Reflexion auf, können so genannte Mehrfachreflexionen zwischen zwei benachbarten Zahnflanken auftreten. Hierbei werden Teile der Streifenmuster, die auf eine der beiden Zahnflanken projiziert werden, auf die benachbarte Zahnflanke gespiegelt. Werden diese gespiegelten Streifenmuster vom Detektor erfasst, führt dies zu einer fehlerhaften Triangulation der Höhenkoordinaten der Werkstückoberfläche an dieser Position.

Bei einer Geometrieprüfung von präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern ist zu beachten, dass die Bohrung aufgrund von Lageabweichungen zwischen Unter- und Obergesenk während des Schmiedeprozesses in der Regel nicht konzentrisch zur Verzahnung angeordnet ist (siehe Abschnitt 2.5.1). Die Bohrung ist somit weder als Bezug für die nachfolgenden Prozessschritte noch als Bezug für eine funktionsorientierte Geometrieprüfung geeignet. Zur Beurteilung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder wird daher ein fertigungsorientiertes Bezugssystem auf Grundlage der Verzahnungsachse verwendet.

Präzisionsgeschmiedete Zahnräder weisen für das Fertigungsverfahren typische Geometrieabweichungen auf. Durch die thermischen Effekte während der Wärmebehandlung werden Eigenspannungen in das Bauteil eingebracht, die zu Härteverzügen führen [Bar04]. Diese Härteverzüge zeigen sich als systematische Abweichungen auf der gesamten Verzahnung als Teilungsfehler und in Form von Schrägungswinkelabweichungen [Käs05]. Zusätzlich zu den systematischen Abweichungen treten durch den Verschleiß des Schmiedegesenks zufällig über die gesamte Verzahnung verteilte Fehlstellen auf, die sehr individuell ausgeprägt sind. An hoch belasteten Bereichen des Gesenks, wie beispielsweise

der Bereich, der für die Ausformung des Zahnfußes verantwortlich ist, kann es zu Kantenverrundungen kommen, die sich nach dem Umformvorgang auch auf der Verzahnung zeigen. Insbesondere durch das Auftreten dieser zufällig verteilten Geometrieabweichungen wird eine vollständige Erfassung und Beurteilung der Verzahnung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder inklusive der Zahnkopf- und Zahnfußbereiche notwendig.

6.1 Mathematische Beschreibung von Evolventenverzahnungen

Die Geometrie einer modernen Evolventenverzahnung basiert auf der mathematisch eindeutig beschreibbaren Evolvente. Die Konstruktion einer Evolvente und die zur Beschreibung notwendigen Größen sind in Abbildung 25 dargestellt und werden im Folgenden besprochen.

6.1.1 Die ebene Evolvente

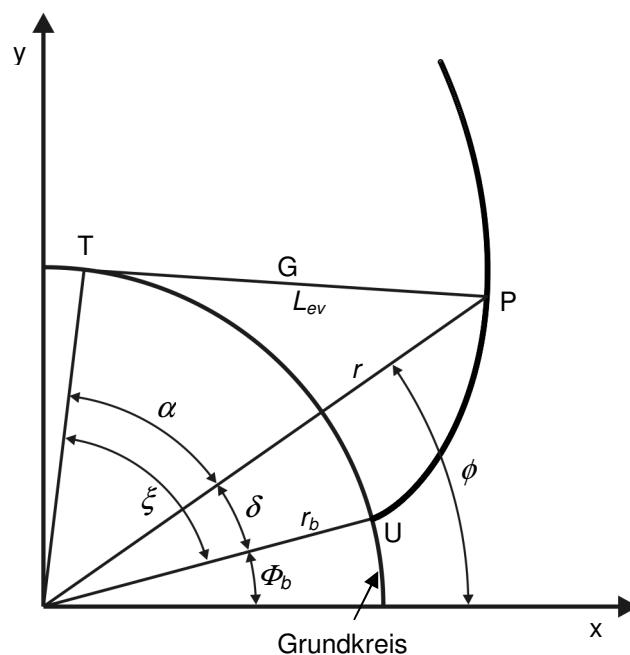


Abbildung 25: Konstruktion einer Evolvente [Lot05]

Anschaulich lässt sich eine Evolvente als Abwicklungskurve eines um den Grundkreis gewickelten Fadens erklären. Der Faden wird vom Grundkreis am Ursprung U aufgenommen und schlupffrei und unter Spannung vom Grundkreis abgewickelt. Die Strecke L_{ev} ist eine Teilmenge der tangential zum Grundkreis verlaufenden Gerade G und stellt den abgewickelten Faden dar. Das lose Ende des Fadens befindet sich im Punkt P, der während

der Abwicklung die Evolvente beschreibt. Hieraus folgt direkt, dass die Länge der Strecke $\overline{TP} = L_{ev}$ gleich der Länge des Kreisbogens \overline{UT} sein muss. Für die so genannte Wälzlänge der Evolvente folgt also:

$$L_{ev} = r_b \cdot \xi = r_b \cdot \tan(\alpha), \quad (6.1)$$

mit:

L_{ev} : Wälzlänge der Evolvente,

r_b : Grundkreisradius,

ξ : Wälzwinkel,

α : Winkelparameter für die Evolventenfunktion.

Unter Verwendung von Polarkoordinaten gilt somit für Punkt P, der sich auf der Evolvente bewegt:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r_b}{\cos(\alpha)}, \\ \varphi &= \Phi_b + \text{inv}(\alpha), \end{aligned} \quad (6.2)$$

mit:

Φ_b : Polarwinkel zum Ursprung U der Evolvente,

und der Evolventenfunktion:

$$\text{inv}(\alpha) = \tan(\alpha) - \alpha. \quad (6.3)$$

Die Evolvente ist allein durch die Vorgabe der Konstanten r_b und Φ_b und durch den Winkelparameter α vollständig festgelegt.

Aus den in Gleichung (6.2) angegebenen Polarkoordinaten ergibt sich für den Punkt P auf der Evolvente in kartesischen Koordinaten [Lot05]:

$$\begin{aligned} x(\alpha, r_b, \Phi_b) &= \frac{r_b}{\cos(\alpha)} \cdot \cos(\Phi_b + \text{inv}(\alpha)), \\ y(\alpha, r_b, \Phi_b) &= \frac{r_b}{\cos(\alpha)} \cdot \sin(\Phi_b + \text{inv}(\alpha)). \end{aligned} \quad (6.4)$$

Zur Festlegung der Orientierung der Evolvente wird der Evolventenorientierungsparameter EO eingeführt. Für EO gilt:

$$EO = \begin{cases} +1, & \text{für positive Orientierung} \\ -1, & \text{für negative Orientierung.} \end{cases} \quad (6.5)$$

Für Gleichung 6.4 ergibt sich mit dem Parameter EO :

$$\begin{aligned} x(\alpha, r_b, \Phi_b) &= \frac{r_b}{\cos(\alpha)} \cdot \cos(\Phi_b + EO \cdot \text{inv}(\alpha)), \\ y(\alpha, r_b, \Phi_b) &= \frac{r_b}{\cos(\alpha)} \cdot \sin(\Phi_b + EO \cdot \text{inv}(\alpha)). \end{aligned} \quad (6.6)$$

Wird für den Parameter EO ein positives Vorzeichen gewählt, beschreibt Gleichung (6.6) eine Evolvente, die durch Abwicklung eines Fadens in mathematisch positiver Richtung vom Grundkreis entsteht. Bei einem negativen Vorzeichen ist die Evolvente in mathematisch negativer Richtung orientiert. Mit Hilfe von Gleichung (6.6) lassen sich rechte Zahnflanken ($EO = +1$) und linke Zahnflanken ($EO = -1$) in einer Ebene modellieren. In Vektorschreibweise ergibt sich:

$$\vec{P}(\alpha, r_b, \Phi_b) = \frac{r_b}{\cos(\alpha)} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\Phi_b + EO \cdot \text{inv}(\alpha)) \\ \sin(\Phi_b + EO \cdot \text{inv}(\alpha)) \end{pmatrix}. \quad (6.7)$$

6.1.2 Evolventenflächen von Grad- und Schrägverzahnungen

Die zur Modellierung der Zahnflanken einer Gradverzahnung notwendigen Evolventenflächen können auf Grundlage der in Gleichung (6.7) angegebenen Evolventengleichung erzeugt werden. Durch Einführung des Parameters τ lässt sich ein Punkt auf der Evolventenfläche wie folgt beschreiben:

$$\vec{P}(\alpha, r_b, \Phi_b, \tau) = \frac{r_b}{\cos(\alpha)} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\Phi_b + EO \cdot \text{inv}(\alpha)) \\ \sin(\Phi_b + EO \cdot \text{inv}(\alpha)) \\ \tau \end{pmatrix}. \quad (6.8)$$

Für den Parameter τ gilt:

$$0 \leq \tau \leq b, \quad (6.9)$$

wobei b die Breite der Verzahnung angibt.

In Abbildung 26(a) sind jeweils eine durch Gleichung (6.8) beschriebene linke und rechte Evolventenfläche einer Gradverzahnung dargestellt. Der Ursprung der Evolventenflächen wird durch eine zur Achse des Grundzylinders parallele Strecke gebildet. Anschaulich betrachtet entsteht die Evolventenfläche durch Abwicklung eines Bandes mit der Breite dieser Strecke vom Grundzylinder.

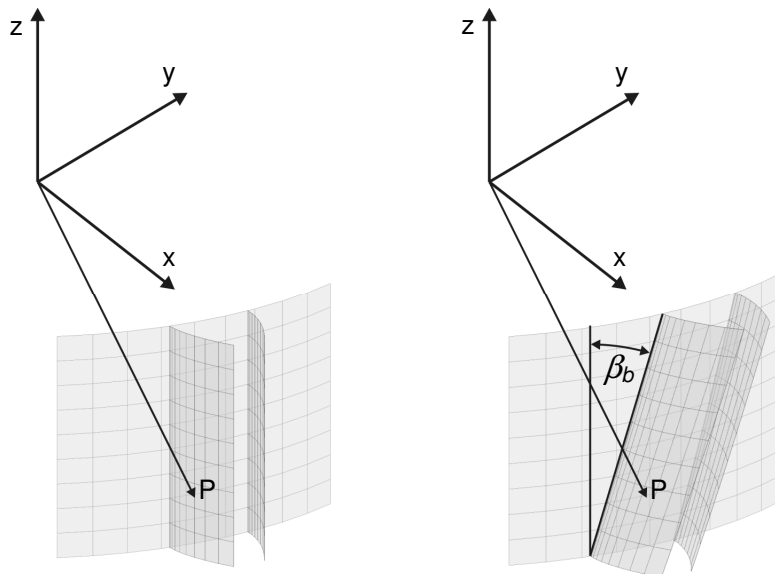


Abbildung 26: Evolventenflächen einer Grad- und einer Schrägverzahnung

(a)

(b)

Zur mathematischen Beschreibung der Evolventenflächen einer Schrägverzahnung ist es notwendig die in Abbildung 27 dargestellte Winkelverschiebung des Evolventenursprungs in Abhängigkeit von der Zahnbreite b zu betrachten.

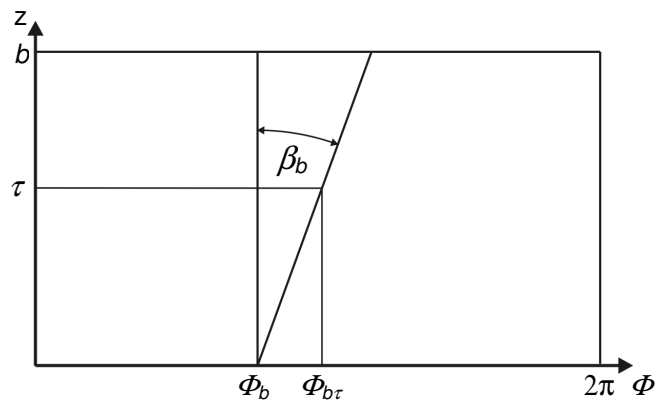


Abbildung 27: Winkelverschiebung des Evolventenursprungs bei Schrägverzahnungen

Bei der Evolventenfläche einer Schrägverzahnung ändert sich der Polarwinkel Φ_b zum Ursprung der Evolvente linear mit der z -Koordinate und proportional zum Tangens des Grundschrägungswinkels β_b . Statt des Winkels Φ_b wird bei der Betrachtung von Schrägverzahnungen der Winkel $\Phi_{b\tau}$ verwendet:

$$\Phi_{b\tau} = \Phi_b + \frac{\tan(\beta_b)}{r_b} \cdot \tau. \quad (6.10)$$

Für einen Punkt auf der Evolventenfläche einer Schrägverzahnung ergibt sich somit:

$$\vec{P}(\alpha, r_b, \Phi_{b\tau}, \tau) = \frac{r_b}{\cos(\alpha)} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\Phi_{b\tau} + EO \cdot \text{inv}(\alpha)) \\ \sin(\Phi_{b\tau} + EO \cdot \text{inv}(\alpha)) \\ \tau \end{pmatrix}. \quad (6.11)$$

In Abbildung 26(b) sind jeweils eine durch Gleichung (6.11) beschriebene linke und rechte Evolventenfläche einer Schrägverzahnung dargestellt. Der Ursprung der Evolventenflächen wird durch eine zur Achse des Grundzylinders um den Grundschrägungswinkel β_b verkippte Strecke gebildet.

6.2 Systemaufbau zur flächenhaften Geometrieprüfung von Zahnrädern

Zur flächenhaften Erfassung der Verzahnung von präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern wurde ein fertigungsnahes Messsystem auf Basis eines Streifenprojektionssensors entwickelt und aufgebaut. Zugunsten eines technologisch einfachen und mechanisch robusten Aufbaus wurde hierbei, im Vergleich zum Versuchsaufbau zur flächenhaften Messung der Funktionsflächen bei Ritzelwellen (siehe Abbildung 48), bewusst auf die hohe Flexibilität bei der Positionierung des Sensors durch die Achsen eines Koordinatenmessgeräts verzichtet.

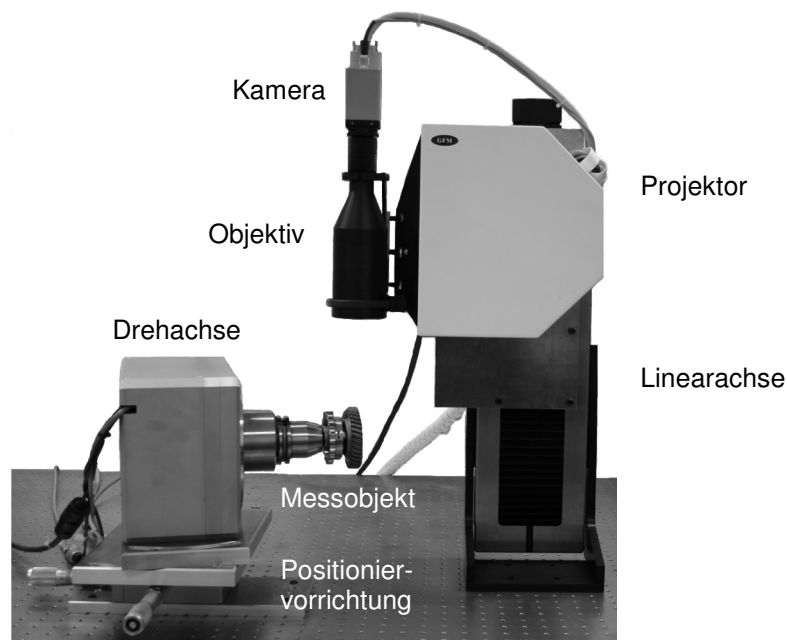


Abbildung 28: Fertigungsnahes Zahnradmesssystem [Käs05b]

Der aktuelle Aufbau der Messeinrichtung ist in Abbildung 28 dargestellt. Zur optischen und flächenhaften Erfassung der Verzahnungsgeometrie wird ein Streifenprojektionssystem der Fa. GF Messtechnik GmbH eingesetzt, durch das eine Erfassung von ca. 10^6 Messpunkten in einer Belichtungssequenz ermöglicht wird. Das Messsystem verfügt über einen lichtstarken digitalen Mikrospiegelprojektor (DMD - Digital Micromirror Device) zur strukturierten Beleuchtung des Messobjekts. Der Streifenprojektionssensor ist an einer Linearachse der Fa. Newport angebracht, wodurch eine hochgenaue Positionierung des Sensors in vertikaler Richtung ermöglicht wird. Zur rotatorischen Positionierung des Zahnrades im Messvolumen wird eine luftgelagerte Präzisionsdrehachse der Fa. LT Ultra-Precision Technology GmbH verwendet.

6.2.1 Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems

Das eingesetzte Streifenprojektionssystem besteht im wesentlichen aus einer CCD-Kamera (Adimec 1000m) und einem Projektor, mit dem die für den Messvorgang notwendigen Streifenmuster auf die Werkstückoberfläche projiziert werden.

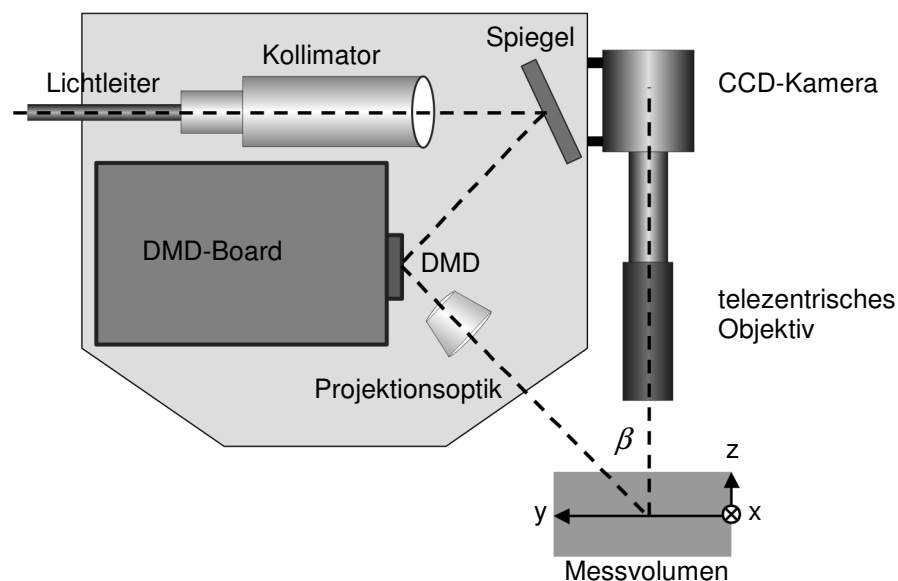


Abbildung 29: Schematischer Aufbau des verwendeten Streifenprojektionssensors [Fra00]

Das Kernstück des Projektors ist ein digitales Mikrospiegel-Array (DMD), welches aus 1024×768 Einzelspiegeln besteht. Durch eine gezielte Ansteuerung der einzelnen Mikrospiegel können nahezu beliebige Intensitätsmuster im Videotakt mit 25 Bildern pro Sekunde mit einer Auflösung von 8 Bit erzeugt werden. Das benötigte Licht wird von einer

Kaltlichtquelle über einen Lichtleiter in den Sensor eingekoppelt. Es existieren somit keine unnötigen Wärmequellen im Sensorkopf, wodurch die thermische Stabilität gewährleistet ist.

Die Kamera verfügt über einen CCD-Chip mit 1004 x 1004 Pixeln und ist entsprechend dem Triangulationswinkel von 45° zum Projektor angeordnet. Für die Aufnahme der auf das Messobjekt projizierten Streifensequenzen wird ein telezentrisches Objektiv verwendet. Hierdurch wird sichergestellt, dass perspektivische Verzerrungen durch Veränderung des Abstandes zum Messobjekt bei der Aufnahme der Streifenmuster vermieden werden. Weiterhin ist die optische Verzeichnung, die durch minimale Fehler in der Optik hervorgerufen wird, über den gesamten Tiefenmessbereich als konstant anzunehmen. Entsprechend der Pixelanzahl der Kamera ist mit dem Gesamtsystem die Aufnahme von über 1 Mio. Geometriepunkten mit einer Belichtungssequenz möglich. Mit anschließender Geometriedatenberechnung ergibt sich so eine Messzeit von ca. 6 Sekunden.

Für die Erfassung der im SFB 489 behandelten Verzahnungsgeometrien steht ein telezentrisches Objektiv mit einem Messfeld von 40 mm x 40 mm zur Verfügung. Durch ein Mehrebenenkalibrierverfahren wird ein vertikaler Messbereich von ca. ± 9 mm mit dem System erreicht.

6.2.2 Beschreibung der verwendeten Drehachse

Die verwendete hochpräzise Drehachse ist für das Messverfahren von zentraler Bedeutung. Sie dient zur hochgenauen rotatorischen Positionierung des Zahnrades im Messvolumen des Streifenprojektionssensors. Die Drehachse ist zur Positionierung des Werkstücks relativ zum Sensor auf einer schwenkbaren Positioniereinrichtung montiert. Einerseits kann hierdurch das Werkstück lateral im Messvolumen positioniert werden, andererseits können mit Hilfe der Schwenkeinrichtung abgeschattete Bereiche bei der Messung von schrägverzahnten Zahnrädern minimiert werden.

Die verwendete Drehachse ist luftgelagert, verfügt über einen Servoantrieb und besitzt einen hochauflösenden inkrementalen Drehgeber mit einer Auflösung von 0,4''. Es wird hiermit eine Positionierunsicherheit von $\pm 3,6''$ erreicht. Die Rundlaufgenauigkeit ist mit $< 0,5 \mu\text{m}$ spezifiziert. Für die zu untersuchenden Zahnräder, die über einen Teilkreisradius von ca. 40 mm verfügen, ergibt sich somit ein maximaler Fehler durch die Drehachse von ca. 1,4 μm . Diese Unsicherheit ist im Hinblick auf die Messaufgabe vernachlässigbar und trägt nicht wesentlich zur Messunsicherheit des Gesamtsystems bei.

6.2.3 Spezifikation der Linearachse

Zur vertikalen Positionierung des Streifenprojektionssensors wird eine hochpräzise Linearachse mit integriertem Maßstabsystem der Fa. Newport eingesetzt. Mit Hilfe der Linearachse kann der vertikale Abstand zwischen Sensor und Messobjekt genau eingestellt werden, wodurch eine optimale Ausnutzung des Messvolumens ermöglicht wird. Zudem bildet diese Möglichkeit zur hochgenauen vertikalen Positionierung die Grundlage für eine erweiterte vertikale Kalibrierung des Messvolumens des Streifenprojektionssensors.

Die Linearachse verfügt über einen Servoantrieb und ist mit einem Winkelencoder ausgestattet, durch den eine Auflösung von $0,1 \mu\text{m}$ erreicht wird. Die Positionierunsicherheit ist mit $\pm 1,5 \mu\text{m}$ angegeben. Der Verfahrbereich der Linearachse beträgt 250 mm.

6.3 Erfassung der Verzahnungsgeometrie

Die Messunsicherheit von bildgebenden Triangulationssensoren verhält sich proportional zur Messfelddiagonalen [Koc98]. Daher bietet es sich an, zur Geometrieerfassung ein möglichst kleines Messfeld zu verwenden. Bei präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern mit einem Modul von $m = 2$, einer Zahnbreite von $b = 15 \text{ mm}$ und einer Zähnezahl von $z = 37$, wie sie als Beispielbauteile zur Darstellung der Prozesskette im Rahmen des SFB 489 hergestellt werden, hat sich eine Messfeldgröße von $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ bewährt [Mee05, Käs05b]. Mit dieser Messfeldgröße lassen sich allerdings nur Teilbereiche der Verzahnung erfassen. Dieses Problem lässt sich durch eine rotatorische Positionierung des zu messenden Zahnrades mit Hilfe der Präzisionsdrehachse im Messvolumen des Sensors lösen. Auf diese Weise sind alle Geometriebereiche der Verzahnung für die Messung zugänglich.

Vor Beginn der Messungen wird das Zahnrad so gespannt, dass eine Zahnücke in Richtung der optischen Achse des Streifenprojektionssensors ausgerichtet ist. Zur vollständigen Aufnahme der Verzahnungsgeometrie ist eine Aufnahmenanzahl gleich der Zähnezahl des jeweiligen Zahnrades sinnvoll. Das Zahnrad wird zwischen zwei Belichtungssequenzen automatisiert mit Hilfe der Präzisionsdrehachse um den Teilungswinkel gedreht. Durch diese so genannte teilungsbezogene Messdatenerfassung werden einige Geometriebereiche redundant erfasst [Mee05]. Auf Grundlage dieser Redundanz können insbesondere Bereiche mit großen Steigungen bezogen auf die optische Achse des Sensors, die maßgeblich zur Messunsicherheit beitragen, aus den Einzelmessungen

eliminiert werden. Gerade diese Bereiche sind in den benachbarten Aufnahmen unter optisch günstigeren Bedingungen enthalten.

Wie bereits in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, ist die Präzisionsdrehachse auf einer manuellen Schwenkeinrichtung montiert. Hierdurch kann das Zahnrad in Abhängigkeit vom Schrägungswinkel β so im Messvolumen positioniert werden, dass die Projektion der Streifensequenzen, wie in Abbildung 30 gezeigt, orthogonal zum Normalschnitt durchgeführt werden kann. Auf diese Weise wird eine Abschattung relevanter Geometriebereiche vermieden.

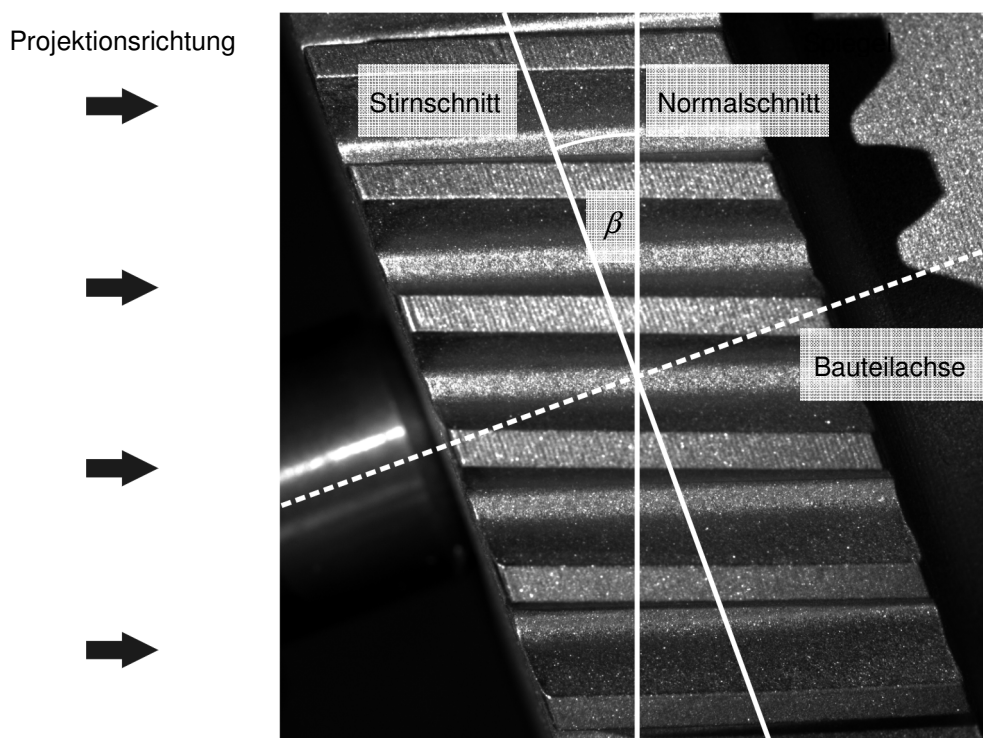


Abbildung 30: Positionierung eines schrägverzahnten Zahnrades im Messvolumen des Streifenprojektionssensors

Die Erfassung der Einzelansichten erfolgt mit dem Streifenprojektionssensor durch die Projektion einer Gray-Code-Sequenz zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten gefolgt von einer Phase-Shift-Sequenz zur Optimierung der lateralen Auflösung. Aus der Deformation und der Phasenlage der projizierten Streifen lassen sich die Geometriekoordinaten ermitteln (siehe Kapitel 4.6).

6.4 Bestimmung der Drehachse

Zur Erstellung eines Geometriemodells der gemessenen Verzahnung und als Grundlage zur Messdatenauswertung ist eine genaue Kenntnis der Lage und der Richtung der Drehachse notwendig, um die das Zahnrad während der Messung gedreht wird. Diese Information muss im Koordinatensystem des Sensors bereitgestellt werden. Die Bestimmung der Drehachse erfolgt durch Messungen an einem Zylindernormal [Mee06, Käs05c]. Da der Streifenprojektionssensor während der Drehachsbestimmung und der anschließenden Verzahnungsmessung ortsfest bleibt, muss der Radius r_{zyl} des Zylindernormals so gewählt werden, dass sich seine Mantelfläche im Messvolumen des Sensors befindet. Für den Radius r_{zyl} gilt demnach:

$$r_f < r_{\text{zyl}} < r_a, \quad (6.12)$$

mit:

r_f : Fußkreisradius der zu messenden Verzahnung,

r_a : Kopfkreisradius der zu messenden Verzahnung.

Im Verlauf der Messungen wird das Normal nach dem Prinzip der Umschlagsmessung in eine Anzahl von N Winkelpositionen, die mit Hilfe der Präzisionsdrehachse angefahren werden, positioniert. Die Winkelpositionen sind äquidistant über den Vollkreis verteilt, so dass gilt:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{N}; \quad N = 8 \dots 16, \text{ gerade} \quad (6.13)$$

mit:

$\Delta\omega$: Winkeldifferenz zwischen zwei Messungen,

N : Anzahl der Messungen bzw. Winkelpositionen.

Für die Anzahl N der Messungen hat sich ein gerader Wert zwischen 8 und 16 bewährt. In jeder der N Winkelpositionen wird die Oberfläche des Zylindernormals mit dem Streifenprojektionssensor aufgenommen. Auf die so erfassten Zylindermessdaten werden anschließend Zylinder als Ersatzgeometrieelemente nach der Methode der kleinsten Abstandsquadratsumme eingepasst und die in Abbildung 31 dargestellten Bestimmungsgrößen der Ersatzzylinder ermittelt. Die wichtigsten Bestimmungsgrößen der Ersatzzylinder sind der Ortsvektor zur Zylinderachse \vec{O}_{zyl} , der Richtungsvektor der

Zylinderachse \vec{R}_{zyl} und der Zylinderradius r_{zyl} . Die Achse eines Ersatzzylinders lässt sich wie folgt darstellen:

$$\vec{A}_{zyl} = \vec{O}_{zyl} + n \cdot \vec{R}_{zyl} \quad (6.14)$$

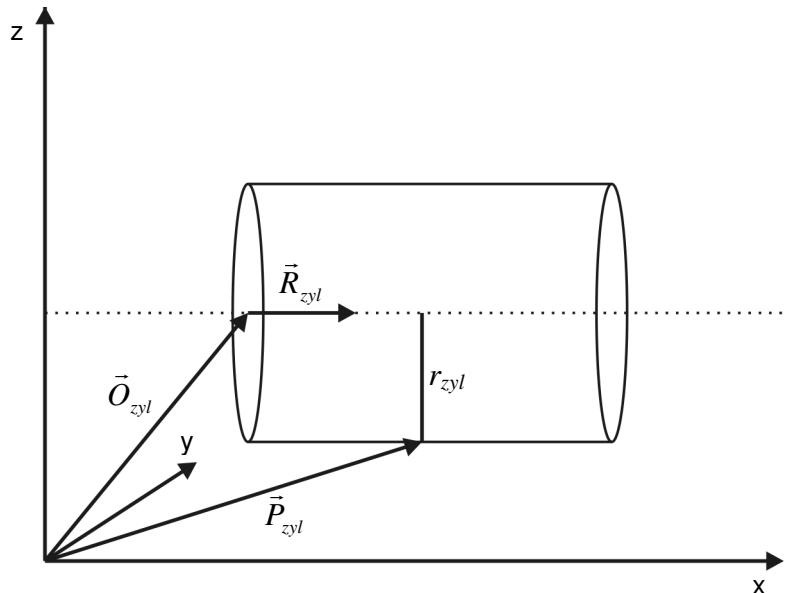


Abbildung 31: Bestimmungsgrößen eines Zylinders

Im Anschluss an die Einpassung wird die Drehachse als Mittelwert aus den Ersatzzylinderachsen berechnet:

$$\vec{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{A}_{zyl,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\vec{O}_{zyl,i} + n \cdot \vec{R}_{zyl,i}) \quad (6.15)$$

Da es bei einer geraden Anzahl von Messungen nach Gleichung (6.13) zu jedem Messdatensatz einen weiteren Messdatensatz gibt, der diesem um π gegenüberliegt, kompensieren sich nach dem Prinzip der Umschlagsmessung eventuelle Fehler in Form von Exzenter oder Taumel bei der Einspannung des Zylindernormals.

6.5 Erstellung eines Geometriemodells der gemessenen Verzahnung

Bei der Betrachtung der einzelnen Rohdatensätze, welche bei der teilungsbezogenen Erfassung der Verzahnungsgeometrie entstanden sind, fällt auf, dass kein Einzeldatensatz die Geometrieinformationen einer vollständigen Zahnflanke enthält (siehe Abbildung 33(d)). Ein einzelner Datensatz ist also nicht auswertbar. Für eine umfassende Prüfung der

Verzahnungsgeometrie ist somit eine Rekombination der einzelnen Datensätze zu einem vollständigen Geometriemodell der gemessenen Verzahnung notwendig. Zudem sind in den Einzelmessungen nicht relevante Geometriebereiche (z. B. der Bund der Verzahnung), Ausreißer, einzeln liegende Messpunkte sowie Bereiche mit großen Steigungen, die nur mit großer Messunsicherheit zu erfassen sind, enthalten. Im Folgenden werden Methoden zur Vorverarbeitung der Messdaten sowie zur Rekombination der Verzahnungsgeometrie aus den Einzelmessungen vorgestellt.

6.5.1 Messdatenvorverarbeitung

Ein Einzeldatensatz bei der Verzahnungsmessung mittels Streifenprojektion umfasst ca. 10^6 Messpunkte und enthält neben der Verzahnungsgeometrie häufig noch weitere, für die Verzahnungsauswertung irrelevante Geometriebereiche des Zahnrades oder der Spannvorrichtung, sowie den Hintergrundbereich. Die Messdaten liegen in Form einer Matrix vor, deren Dimension identisch ist mit der Dimension der Sensorelementmatrix des Streifenprojektionssensors. Jedes Element dieser Matrix enthält die Höheninformation eines Messpunktes. Abbildung 32(a) zeigt eine farbcodierte Darstellung einer solchen Messdatenmatrix. Zur Eliminierung der irrelevanten Geometriebereiche wird eine Binärmaske verwendet, durch die jedes Element der Messwertematrix, das nicht zur auszuwertenden Geometrie gehört, als NaN (Not a Number [N2]) gekennzeichnet wird (siehe Abbildung 32(b)).

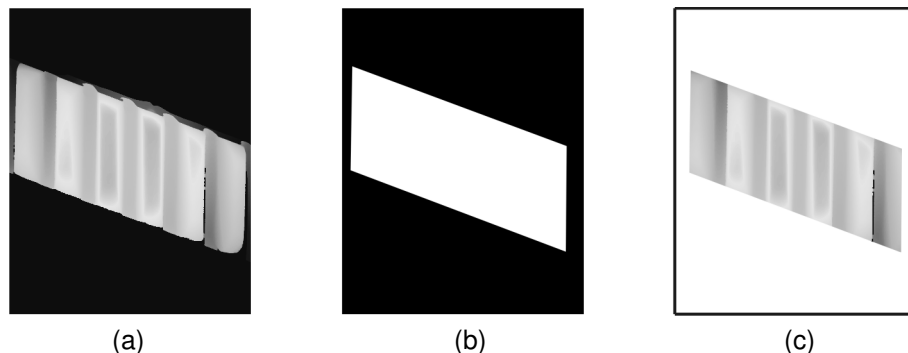


Abbildung 32: Binäre Maskierung irrelevanter Geometriebereiche bei einer Verzahnungsmessung

Die auf diese Weise gekennzeichneten Werte lassen sich leicht aus den Messdatensätzen entfernen. Abbildung 32 (c) zeigt eine farbcodierte Darstellung der

Messdatenmatrix aus Abbildung 32 (a) nach der binären Maskierung. Eine 3D-Ansicht der maskierten Messdaten ist in Abbildung 33 (b) dargestellt. Da Streifenprojektionssensor und Zahnrad während einer Messung nicht lateral zueinander bewegt werden, kann eine einmal definierte Binärmaske für alle Messdatensätze einer Verzahnungsmessung verwendet werden. Solange gleichartige Verzahnungen gemessen werden, und Sensor und Spannvorrichtung nicht relativ zueinander bewegt werden, ist die Binärmaske auch für weitere Verzahnungsmessungen gültig.

Im zweiten Schritt der Messdatenvorverarbeitung werden Ausreißer und Bereiche mit großen Steigungen relativ zur optischen Achse der Detektorseite des Streifenprojektionssensors mit Hilfe eines Gradientenfilters aus den Messdatensätzen entfernt. Die Höheninformation der Messdatenmatrix kann als eine diskrete Funktion $z(x,y)$ aufgefasst werden, wobei x und y in diesem Fall für die zum Zeilen- bzw. Spaltenindex der Matrix gehörenden Koordinaten stehen. Der Gradient einer solchen Funktion zweier Variablen ist wie folgt definiert:

$$\nabla z(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \end{pmatrix}. \quad (6.16)$$

Für eine diskrete Funktion ergibt sich der Gradient zu:

$$\nabla z(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{z(x + \Delta x, y) - z(x, y)}{\Delta x} \\ \frac{z(x, y + \Delta y) - z(x, y)}{\Delta y} \end{pmatrix}. \quad (6.17)$$

Der Betrag des Gradienten kann als ein lokales Maß für die Steilheit der gemessenen Oberfläche herangezogen werden:

$$|\nabla z(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{z(x + \Delta x, y) - z(x, y)}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{z(x, y + \Delta y) - z(x, y)}{\Delta y}\right)^2}. \quad (6.18)$$

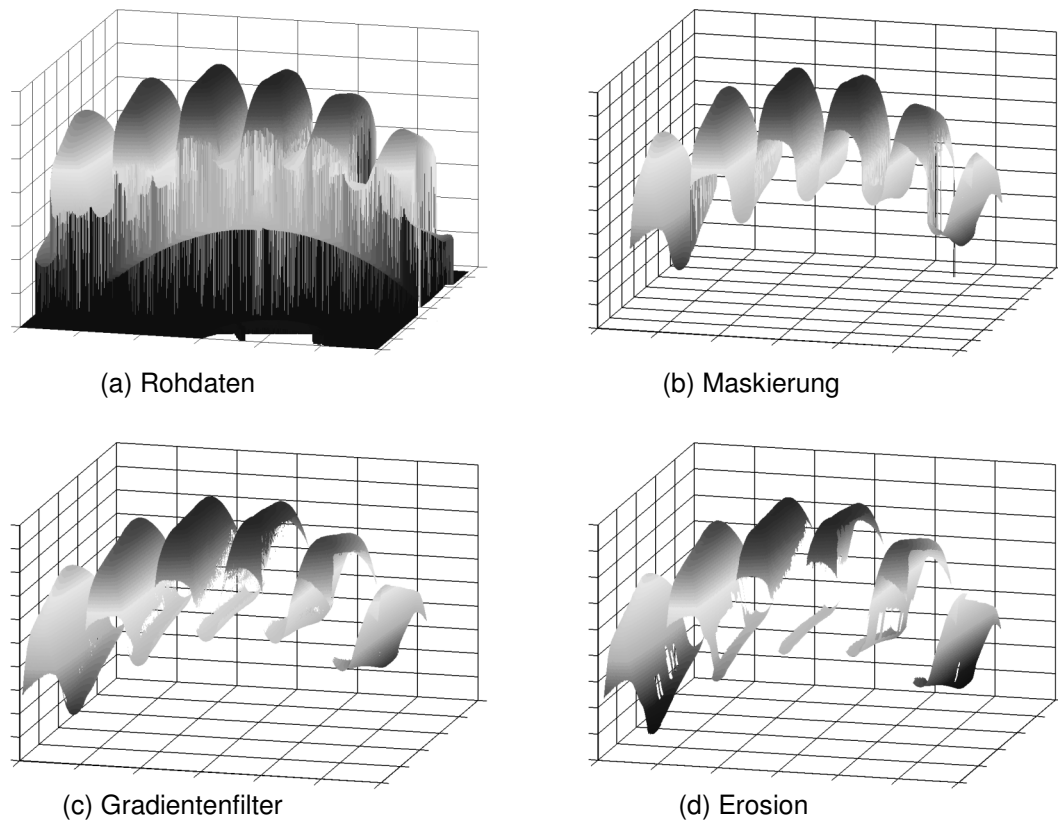


Abbildung 33: Vorverarbeitung der Messdaten bei der Verzahnungsmessung mittels Streifenprojektion

Geometriepunkte, bei denen ein vorher festgelegter Grenzwert für den Betrag des Gradienten (siehe Gleichung (6.18)) überschritten wird, werden ebenfalls aus den Messdatensätzen entfernt. Ein Messdatensatz nach Anwendung der binären Maskierung und des Gradientenfilters ist in Abbildung 33 (c) dargestellt.

Im dritten Schritt der Messdatenvorverarbeitung werden vereinzelt liegende Messpunkte gelöscht. Diese Messpunkte können beispielsweise durch Digitalisierungseffekte auftreten oder nach Anwendung der binären Maskierung bzw. des Gradientenfilters übrig bleiben. Die Identifikation vereinzelt liegender Messpunkte geschieht durch Anwendung des in der Bildverarbeitung oft verwendeten Erosionsverfahrens [Dou93]. Zur Erosion der Verzahnungsmessdaten werden in der Regel 3x3- oder 4x4-Nachbarschaftbereiche verwendet. Das bedeutet, jeder Messpunkt, dessen Umgebung von 3x3 bzw. 4x4 Messpunkten nicht vollständig mit gültigen Messwerten besetzt ist, wird als Randpunkt oder vereinzelt liegender Messpunkt markiert und aus dem Messdatensatz gelöscht. Abbildung 33 (d) zeigt einen Messdatensatz nach Anwendung der binären Maskierung, des Gradientenfilters und des Erosionsverfahrens.

6.5.2 Rekombination der Verzahnungsgeometrie

Eine Einzelmessung enthält, wie bereits erwähnt, die Geometrieinformationen mehrerer unvollständig gemessener Zähne der Verzahnung und kann nicht direkt ausgewertet werden. Die Zahnflanken, sowie die Kopf- und Fußbereiche werden erst durch die Rekombination der Einzeldatensätze zur Gesamtgeometrie der gemessenen Verzahnung vervollständigt. Die Erzeugung der Gesamtgeometrie erfolgt durch rein geometrische Transformationen der Messpunkte. Es werden weder rechenintensive Matching-Operationen noch Registrierungen der Einzeldatensätze durchgeführt. Die Basis dieses Ansatzes bildet eine genaue Kenntnis der Drehachse, um welche die Verzahnung während der Messung gedreht wird. Die Drehachse dient als vorläufige Verzahnungsachse des rekombinierten Zahnrades. Die Methoden zur Bestimmung der Drehachse, die außerhalb des eigentlichen Messvolumens des Streifenprojektionssensors liegt, werden in Abschnitt 6.4 besprochen.

Der erste Schritt der Messdatenrekombination besteht in der Transformation der einzelnen Messdatensätze in ein gemeinsames vorläufiges Werkstückkoordinatensystem, welches auf Basis der am Zylindernormal eingemessenen Drehachse des Messsystems aufgebaut wird. Der normierte Richtungsvektor \vec{R}_{zyl} der Drehachse bildet den Einheitsvektor \vec{e}_z des vorläufigen Werkstückkoordinatensystems, dessen Ursprung \vec{U} durch den Durchstoßpunkt der Drehachse durch die xy-Ebene des Sensorkoordinatensystems gegeben ist:

$$\vec{e}_z = \frac{1}{|\vec{R}_{zyl}|} \begin{pmatrix} R_{zyl,x} \\ R_{zyl,y} \\ R_{zyl,z} \end{pmatrix}. \quad (6.19)$$

Der Einheitsvektor \vec{e}_x wird so gewählt, dass er in der xy-Ebene des Sensorkoordinatensystems liegt und orthogonal zum Einheitsvektor \vec{e}_z ist. In Sensorkoordinaten ergibt sich für \vec{e}_x :

$$\vec{e}_x = \begin{pmatrix} e_{x,y} \\ -e_{x,x} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6.20)$$

Der Einheitsvektor \vec{e}_y ergibt sich aus dem Kreuzprodukt der Einheitsvektoren \vec{e}_x und \vec{e}_z :

$$\vec{e}_y = \vec{e}_x \times \vec{e}_z. \quad (6.21)$$

Durch diese Festlegung der Lage und Richtung der drei Koordinatenachsen und des Ursprungs ist das vorläufige Werkstückkoordinatensystem vollständig definiert.

Zur Transformation der einzelnen Messdatensätze in das vorläufige Werkstückkoordinatensystem, und somit zur Rekombination der Gesamtgeometrie der gemessenen Verzahnung, sind prinzipiell drei Schritte notwendig [Mee05]:

- Translation der Messpunkte \vec{m}_i in den Ursprung \vec{U} des vorläufigen Werkstückkoordinatensystems:

$$\vec{m}'_i = \vec{m}_i - \vec{U}. \quad (6.22)$$

- Rotation in die Orthogonalbasis des vorläufigen Werkstückkoordinatensystems. Die hierzu notwendige Rotationsmatrix ergibt sich direkt aus den Komponenten der Basisvektoren des vorläufigen Werkstückkoordinatensystems:

$$\vec{m}''_i = (\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z) \cdot \vec{m}'_i = \begin{pmatrix} e_{x,x} & e_{y,x} & e_{z,x} \\ e_{x,y} & e_{y,y} & e_{z,y} \\ e_{x,z} & e_{y,z} & e_{z,z} \end{pmatrix} \cdot \vec{m}'_i. \quad (6.23)$$

- Rotation der Messdaten um den Einheitsvektor \vec{e}_z um den Drehwinkel ω des Drehgebers der Präzisionsdrehachse bei der Aufnahme des jeweiligen Datensatzes:

$$\vec{m}'''_i = \begin{pmatrix} \cos(\omega) & -\sin(\omega) & 0 \\ \sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \vec{m}''_i. \quad (6.24)$$

Abbildung 34 veranschaulicht den Vorgang der Gesamtgeometrieerzeugung am Beispiel eines schrägverzahnten Zahnrades mit 37 Zähnen. Nach der Vorverarbeitung der Rohdaten reduziert sich die Anzahl der Messpunkte auf ca. $4,2 \cdot 10^5$ pro Einzelmessung. Die rekombinierte Gesamtgeometrie der im SFB 489 verwendeten Verzahnung besteht aus ca. $15,5 \cdot 10^6$ Messpunkten.

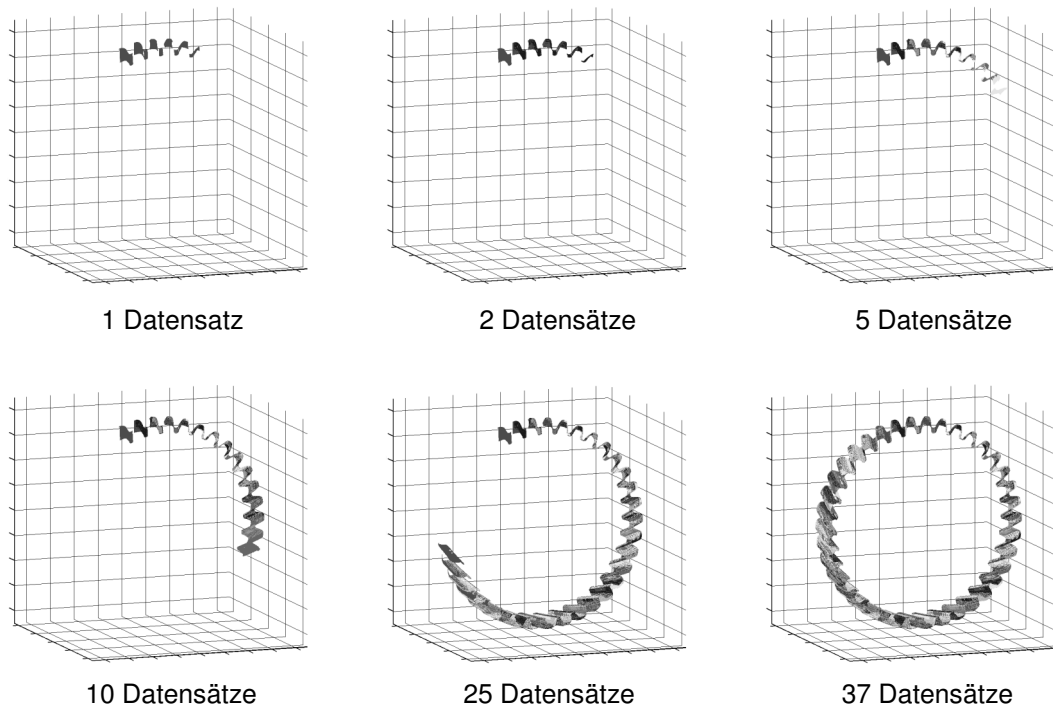


Abbildung 34: Rekombination einer Verzahnungsgeometrie aus 37 Einzeldatensätzen

6.6 Abweichungsanalyse

Auf Grundlage der in Abschnitt 6.5 beschriebenen Methoden zur Erstellung eines Geometriemodells aus den Messdaten, wird die vollständige Geometrie der gemessenen Verzahnung für die Auswertung bereitgestellt. Diese flächenhafte Datenbasis ermöglicht insbesondere eine umfassende Geometrieprüfung der Funktionsflächen präzisionsgeschmiedeter Zahnräder. Einerseits kann eine qualitative Beurteilung durch Visualisierung der Abweichungen auf den Evolventenflächen erfolgen. Andererseits stellen die in [Mee05] definierten Kenngrößen zur flächenhaften Abweichungsanalyse der Funktionsflächen von Zahnrädern eine Basis zur Quantifizierung der Verzahnungsabweichungen dar. Auf diese Weise können die für das Präzisionsschmieden typischen individuellen und systematischen Verzahnungsabweichungen (siehe Abschnitt 3) sichtbar gemacht und quantifiziert werden. Zusätzlich zu den Messdaten der Evolventenflächen stehen auch die Geometrieinformationen der Zahnkopf- und Fußbereiche zur Verfügung, die beispielsweise durch einen Vergleich mit der in einem CAD-Modell enthaltenen Sollgeometrie der Verzahnung ausgewertet werden können.

Ergänzend zur flächenhaften Auswertung besteht die Möglichkeit der Bestimmung von konventionellen und genormten Bestimmungsgrößen, die durch Extraktion der

entsprechenden linienhaften Geometrieinformationen aus dem Gesamtdatensatz gewonnen werden können.

6.6.1 Einpassung der Funktionsflächen auf die Referenzgeometrie

Zur Durchführung einer flächenhaften Abweichungsanalyse der Funktionsflächen der gemessenen Verzahnung müssen zunächst die Evolventenflächen aus dem Gesamtmessdatensatz extrahiert werden. Diese Extraktion kann leicht anhand der Bestimmungsgrößen der Verzahnung durchgeführt werden. Die Zahnkopf- und Zahnfußbereiche können beispielsweise durch Ausblendung aller Messpunkte, die unterhalb des Fußformkreisradius r_{ff} bzw. oberhalb des Kopfformkreisesradius r_{fa} , liegen eliminiert werden. Die Evolventenflächen lassen sich anschließend auf Grundlage der zusätzlichen Bestimmungsgrößen Zähnezahl z , Schrägungswinkel β und Zahnbreite b extrahieren.

Grundlage für eine Bestimmung der flächenhaften Geometrieabweichungen bildet eine rechnerische Einpassung der auf die Evolventenflächen reduzierten gemessenen Verzahnungsgeometrie auf die Referenzgeometrie. Die Referenzgeometrie der Verzahnung lässt sich auf Basis der in Abschnitt 6.1 vorgestellten mathematischen Zusammenhänge der Zahnradparameter als numerisches Modell erstellen. Zur Durchführung der Einpassung ist es notwendig die orthogonalen Abstände der Messpunkte auf den gemessenen Evolventenflächen zu den Evolventenflächen der Referenzgeometrie zu berechnen. Der orthogonale Abstand a_{ev} eines Messpunktes zu einer Evolventenfläche berechnet sich wie folgt [Lot05]:

$$a_{ev} = EO \cdot m_z \cdot \sin(\beta_b) + r_b \cdot \cos(\beta_b) \cdot (\Phi_b - \vartheta_m + EO \cdot \text{inv}(\alpha_m)), \quad (6.25)$$

mit:

a_{ev} : orthogonaler Abstand eines Messpunktes zur Sollevolventenfläche,

m_z : Komponente des Messpunktes in Richtung der Verzahnungsachse,

ϑ_m : Polarwinkel zum Messpunkt \vec{m} in Zylinderkoordinaten,

α_m : Profilwinkel zum Messpunkt \vec{m} .

Für den Profilwinkel des zum Messpunkt gehörigen Lotfußpunkts auf der Sollevolventenfläche gilt:

$$\alpha_{soll} = \arctan\left(\frac{(L_{ev} - a_{ev})}{r_b}\right). \quad (6.26)$$

Die Koordinaten des Lotfußpunktes auf der Sollevoventenfläche ergeben sich durch Einsetzen von m_z und α_{soll} in Gleichung (6.8):

$$\vec{P}_{soll}(\alpha_{soll}, r_b, \Phi_b, m_z) = \frac{r_b}{\cos(\alpha_{soll})} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\Phi_b + EO \cdot \text{inv}(\alpha_{soll})) \\ \sin(\Phi_b + EO \cdot \text{inv}(\alpha_{soll})) \\ m_z \end{pmatrix}. \quad (6.27)$$

Die Abweichungsvektoren \vec{a} , die für die numerische Einpassung der Messpunkte auf die Sollgeometrie benötigt werden, ergeben sich wie folgt:

$$\vec{a} = \vec{m} - \vec{P}_{soll}. \quad (6.28)$$

Durch die numerische Einpassung werden die Messdaten in ein von der Sollgeometrie aufgespanntes Werkstückkoordinatensystem transformiert. Dieses „neue“ Werkstückkoordinatensystem löst das mit Hilfe der eingemessenen Drehachse definierte vorläufige Werkstückkoordinatensystem ab, und bildet die Grundlage für die Analyse der Verzahnungsabweichungen. Das Einpassverfahren basiert auf der Minimierung einer Zielfunktion der quadratischen orthogonalen Abstände der Messpunkte von den Sollevoventenflächen. Durch dieses so genannte Einpassverfahren nach Gauß werden die gemessenen Geometriedaten nach dem Mittelwert ihrer Abweichungen relativ zur Sollgeometrie ausgerichtet. Das für die Einpassung zu lösende Optimierungsproblem lautet:

$$f_{ziel} = \sum_i |\vec{a}_{i,ev}|^2 \rightarrow \min \quad (6.29)$$

Das in Gleichung (6.29) formulierte Optimierungsproblem kann durch einen iterativen zweistufigen Algorithmus zur Verringerung der Abstandsquadratsumme gelöst werden [Kro98]. Der erste Schritt einer Iteration dieses Algorithmus besteht aus der Minimierung der Zielfunktion auf Grundlage einer Translation der Messdaten. Im zweiten Schritt einer Iteration wird die Zielfunktion durch eine Rotation der Messdaten minimiert. Im Folgenden werden beide Schritte dieses Algorithmus kurz vorgestellt:

1) translatorischer Schritt:

In diesem Schritt findet eine translatorische Ausrichtung der Messpunkte, dem Einpasskriterium nach Gauß folgend, nach dem Mittelwert ihrer Abweichungen von der Sollgeometrie statt. Der für die Einpassung benötigte Translationsvektor \vec{t} berechnet sich wie folgt:

$$\vec{t} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\vec{a}_{i,ev}|. \quad (6.30)$$

2) rotatorischer Schritt:

In diesem Schritt erfolgt die Minimierung der Abstandskadratsumme der durch den Translationsvektor \vec{t} verschobenen Messpunkte \vec{m} durch Rotation um die Eulerwinkel ϕ_x , ϕ_y , und ϕ_z . Da der Gradient der Zielfunktion in ihrem Minimum gleich dem Nullvektor ist, wird das Minimum der Zielfunktion bei einer Rotation dann erreicht, wenn die drei partiellen Abweichungen nach den Eulerwinkeln ϕ_x , ϕ_y , und ϕ_z gleich Null sind:

$$\frac{\partial}{\partial \vec{\phi}} = \sum_{i=1}^n |\vec{a}_{i,ev}|^2 = \vec{0}. \quad (6.31)$$

Durch geometrische Betrachtungen wurde in [Kro98] gezeigt, dass gilt:

$$\frac{\partial}{\partial \vec{\phi}} = \sum_{i=1}^n |\vec{a}_{i,ev}|^2 = \vec{0} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n \vec{m}_i \times \vec{a}_{i,ev} = \vec{0}. \quad (6.32)$$

Die rechte Summe aus Gleichung (6.32) liefert die mit dem Betragsquadrat der Messpunkte \vec{m} multiplizierten Komponenten des Rotationswinkels $\vec{\phi}$, um den die Messpunkte zur Minimierung der Abstandskadratsumme aus Gleichung (6.29) gedreht werden müssen. Nach einer Normierung mit dem Betragsquadrat der Messpunkte ergibt sich für $\vec{\phi}$:

$$\vec{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{m}_i \times \vec{a}_{i,ev}}{\sum_{i=1}^n |\vec{m}_i|^2}. \quad (6.33)$$

Als Drehpunkt wird während der Einpassung der Nullpunkt des durch die Sollgeometrie aufgespannten Werkstückkoordinatensystems verwendet.

Das beschriebene Einpassverfahren konvergiert meist bereits nach wenigen Iterationen. Nach jedem einzelnen Schritt einer Iteration ist es notwendig die Abweichungsdaten neu zu berechnen und die Messpunkte entsprechend Gleichung (6.30) bzw. Gleichung (6.33) zu transformieren. Als Abbruchkriterium werden sehr kleine Translationen \vec{t} bzw. sehr kleine Rotationen $\vec{\phi}$ angenommen.

6.6.2 Visualisierung der Verzahnungsabweichungen

Im Hinblick auf eine schnelle qualitative Auswertung der Abweichungen an den Funktionsflächen präzisionsgeschmiedeter Zahnräder, ist die Entwicklung von aussagekräftigen Visualisierungsmethoden von besonderem Interesse. Durch eine bildhafte Darstellung der Geometrieabweichungen an den Evolventenflächen lässt sich schnell ein Eindruck von den Abweichungscharakteristiken gewinnen. Auf diese Weise können insbesondere die für das Präzisionsschmieden typischen systematischen und individuellen Abweichungen detektiert werden.

Eine Möglichkeit zur Visualisierung stellt die in Abbildung 35 vorgestellte bildhafte 2D-Darstellung der Abweichungen an Zahnflanken dar. Hierzu ist es zunächst notwendig die Abweichungen der Einzelmesspunkte bezogen auf die Sollevolvente nach Gleichung (6.25) zu ermitteln. Anschließend werden die Abweichungsdaten durch Interpolation in ein äquidistantes Punktraster überführt. Die Darstellung der Abweichungen geschieht farbcodiert in Abhängigkeit von der Zahnbreite und dem Wälzweg.

Hierbei ist zu beachten, dass die Darstellung der Abweichungen über den Wälzweg ein verzerrtes Bild der Abweichungen liefert. Da die den Messpunkten zugeordneten Punkte auf der Evolvente nicht linear vom radialen Abstand zur Drehachse abhängen, werden die Abweichungen besonders im Zahnfußbereich stark gestreckt. Durch diesen Effekt wird der Zahnfußbereich deutlich hervorgehoben, wodurch der Gesamteindruck von der Lage und der Verteilung der Abweichungen auf der Evolventenfläche visuell verfälscht wird. Dieses Problem tritt allerdings auch bei einer genormten Darstellung von Profillinienschrieben auf. Die 2D-Darstellung der Abweichungen orientiert sich also an der genormten Darstellungsform, wodurch Probleme bei der Interpretation vermieden werden.

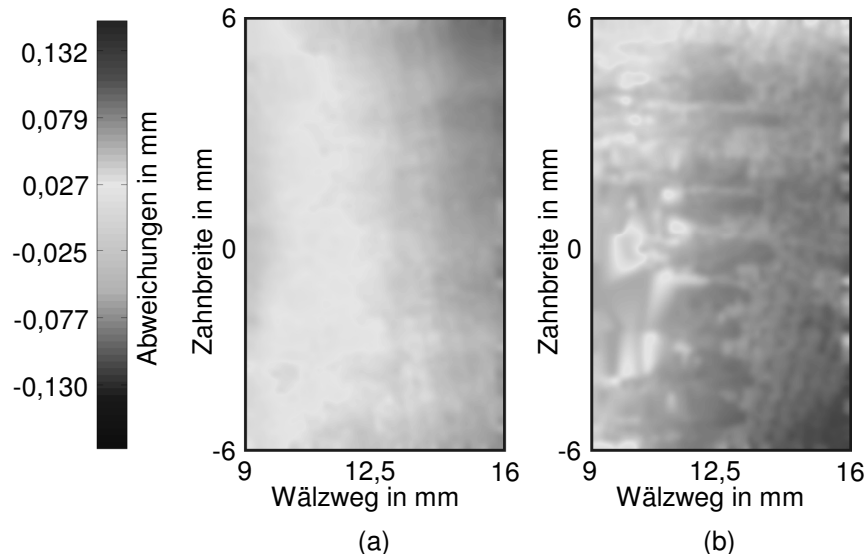


Abbildung 35: Farbcodierte 2D-Darstellung der Abweichungen zweier Zahnflanken mit systematischen (a) und individuellen (b) Abweichungen

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 35 ein direkter Vergleich von Messungen an zwei Zahnflanken desselben Zahnrades dargestellt. Abbildung 35 (a) zeigt farbcodiert die Geometrieabweichungen an einer Zahnflanke, die einen systematischen Profilwinkelfehler aufweist. Das Abweichungsbild in Abbildung 35 (b) zeigt eine Zahnflanke, auf der die für das Präzisionsschmieden typischen individuellen Geometriefehler dominieren. Diese Darstellungsform ist für eine schnelle visuelle Beurteilung der Abweichungen optimal geeignet und veranschaulicht die Zahnflankentopographie.

In einer Zusammenfassung der Abweichungsbilder aller linken bzw. rechten Flanken der gemessenen Verzahnung zu einem so genannten Abweichungsatlas [Mee05] lassen sich entsprechend Abbildung 36 sowohl individuelle Fehler als auch systematische Abweichungsmuster erkennen. Darüber hinaus können durch das Auftragen der absoluten Abweichungen zur Sollevolvente aus den Abweichungsbildern einer Verzahnung auch indirekt Informationen über die Zahndicke und über Teilungsfehler entnommen werden.

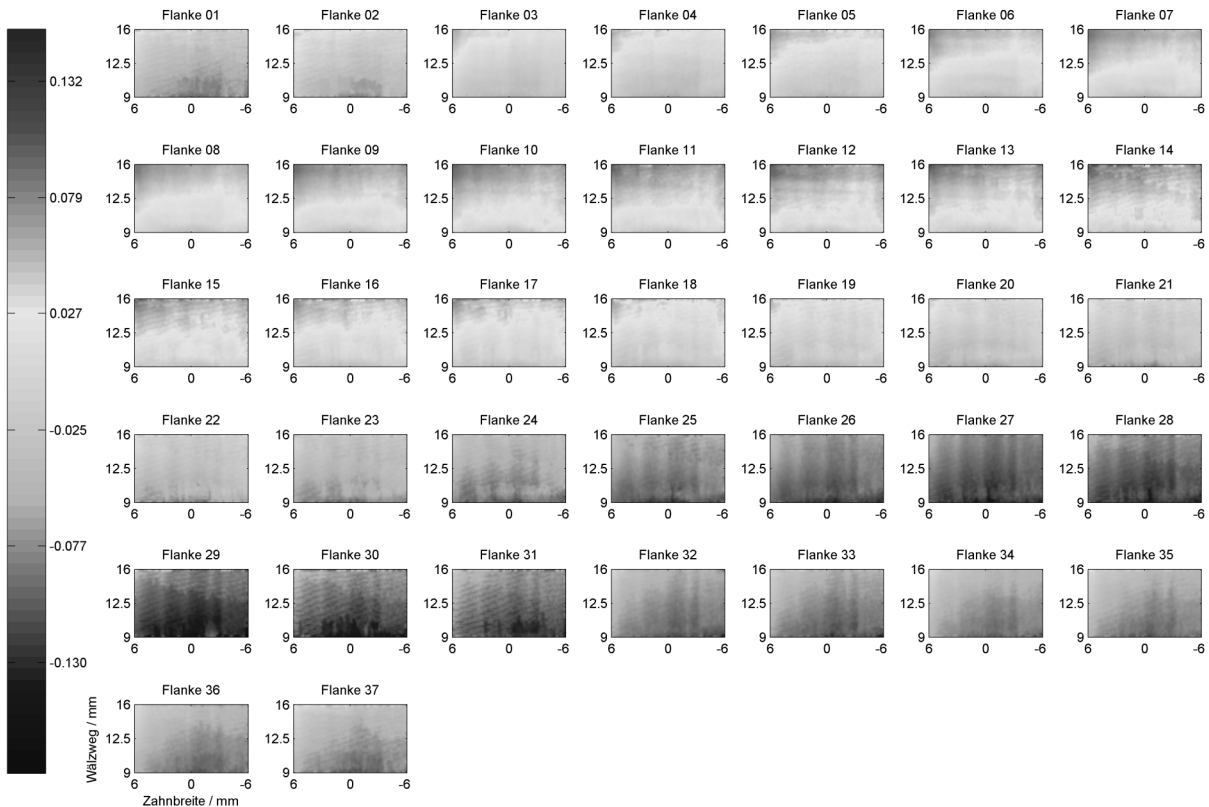


Abbildung 36: Farbcodierte 2D-Darstellung der Abweichungen aller linken Evolventenflächen eines präzisionsgeschmiedeten Zahnrades

Abbildung 36 zeigt ein typisches Beispiel für einen Abweichungsatlas. Hier sind für ein präzisionsgeschmiedetes Zahnrad alle Abweichungsbilder der linken Flanken dargestellt. Über jedem Bild ist die Nummer des entsprechenden Zahnes angegeben. Bei der Betrachtung des Abweichungsatlas fällt auf, dass bei den Flanken 5-18 die Abweichungen in positiver Richtung überwiegen, während bei den Flanken 24-37 die Abweichungen in negativer Richtung dominieren. Dieses systematische Verhalten ist auf eine Wärmebehandlung mit ungeeigneten Sprayfeldparametern und die damit verbundenen Härteverzüge zurückzuführen. Die Abweichungsbilder lassen eine weitere Systematik erkennen. Im unteren Teil der Flankenflächen ist an fast allen Zähnen eine Einwölbung mit einer Tiefe von ca. 30 μm zu erkennen, wo hingegen im oberen Teil der Flanken häufig mehr Material vorhanden ist. Dies führt zu einer geringen Profilwinkelabweichung, Flankenwinkelabweichungen sind nicht zu erkennen.

In Abbildung 37 ist ein dreidimensionales Geometriemodell der zu untersuchenden Verzahnung dargestellt. Eine farbcodierte 3D-Darstellung der Abweichungen an den

Funktionsflächen liefert einen schnellen und intuitiven Überblick über die Abweichungen an sämtlichen Zahnflanken des Zahnrades.

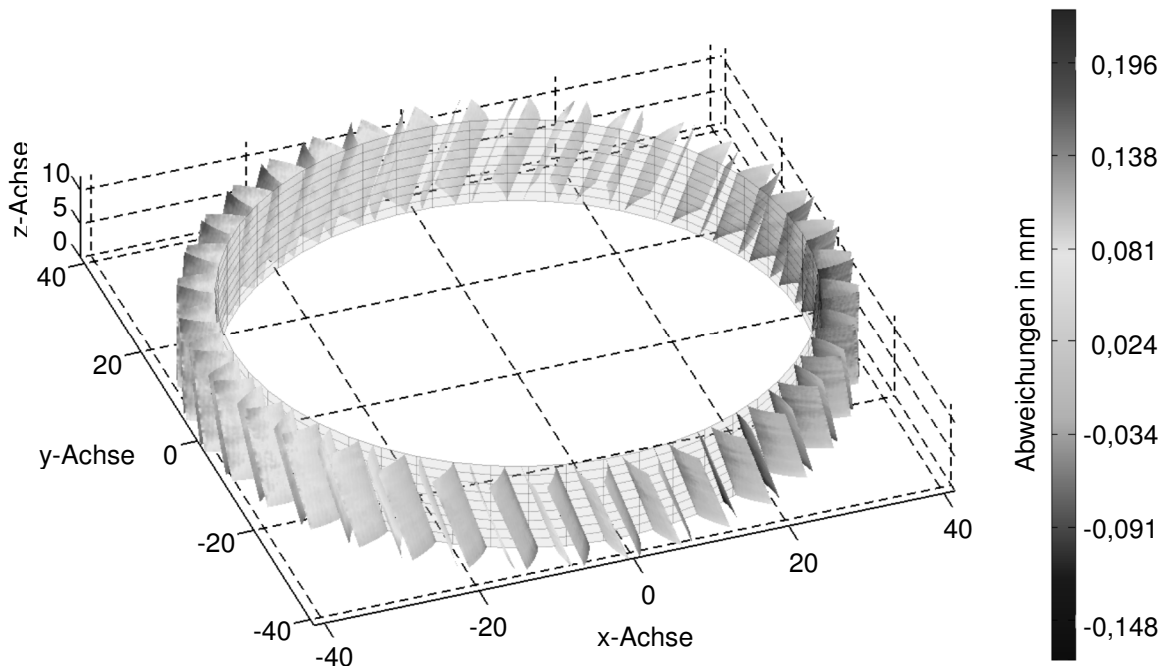


Abbildung 37: Farbcodierte 3D-Darstellung der Abweichungen auf den Funktionsflächen eines präzisionsgeschmiedeten Zahnrades

Allerdings sind die Abweichungsbilder bei dieser Art der Darstellung nicht vollständig einsehbar. Die Zusammenfassung der Abweichungsbilder zu einem Abweichungsatlas ist wesentlich übersichtlicher als die Darstellung der Abweichungen direkt auf der Verzahnungsgeometrie, und erlaubt, nach der Erstellung, eine detaillierte Analyse der Funktionsflächen ohne den Einsatz eines Rechners. Die Darstellung der Abweichungen in Form eines statischen Geometriemodells der gemessenen Verzahnung nach Abbildung 37 ist also nur als Ergänzung zum Abweichungsatlas sinnvoll.

Eine Möglichkeit zur Abweichungsanalyse an der gesamten Verzahnung inklusive der Zahnkopf- und Zahnfußbereiche bietet ein auf dem Computer Aided Design (CAD)-Modell der gemessenen Verzahnung basierender Soll-Ist-Vergleich. Hierzu ist zunächst die Erstellung eines CAD-Modells der zu untersuchenden Verzahnung notwendig. Abbildung 38 zeigt ein CAD-Modell der Verzahnung des im SFB 489 hergestellten Zahnrades.



Abbildung 38: CAD-Modell der Verzahnung des im SFB 489 geschmiedeten Zahnrades

Zur Durchführung des Soll-Ist-Vergleichs wird das Softwarepaket Polyworks der Fa. Innovmetric verwendet. Um sowohl die Messdaten, als auch die durch das CAD-Modell gegebenen Referenzdaten mit dem Softwarepaket verarbeiten zu können, ist es notwendig die Mess- und Referenzdaten in ein Polygonmodell der Verzahnung umzuwandeln. Die Referenzdaten, die in Form eines CAD-Flächenmodells vorliegen, lassen sich sehr einfach mit dem Polyworksmodul IMInspect importieren und als Polygonmodell speichern. Die in Form einer 3D-Punktwolke vorliegenden Messdaten müssen mit Hilfe des Polyworksmoduls IMMerge in einem aufwendigen Mehrschrittverfahren polygonisiert werden. In Abbildung 39 sind Ausschnitte eines Polygonmodells der Messdaten als Drahtmodell (a) und als Flächenmodell (b) dargestellt.

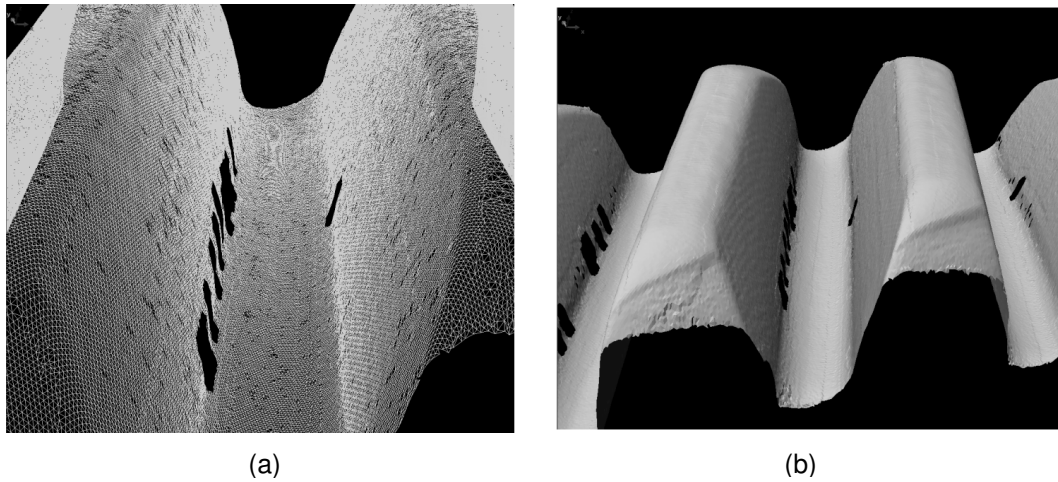


Abbildung 39: Darstellung der polygonisierten Zahnradmessdaten als Drahtmodell (a) und als Flächenmodell (b)

Um eine Berechnung der Geometrieabweichungen zu ermöglichen, muss das Polygonmodell der gemessenen Verzahnung auf das Polygonmodell der Referenzgeometrie eingepasst werden. Die Einpassung wird mit dem Polyworksmodul IMInspect durchgeführt und geschieht iterativ auf Grundlage der Minimierung der zur Oberfläche des Referenzmodells orthogonalen Abstände der Messpunkte nach der L_2 -Norm.

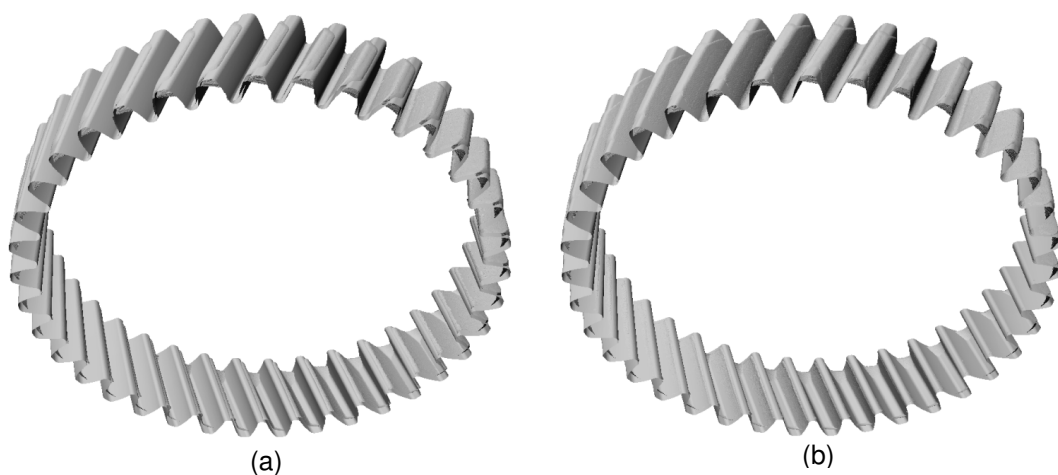


Abbildung 40: Messdaten und Referenzgeometrie vor (a) und nach der Einpassung (b)

Die Berechnung der Abweichungen geschieht durch Berechnung der orthogonalen Abstände der Polygone des Messdatenmodells zur Referenzgeometrie. Zur Beurteilung der flächenhaften Verzahnungsmessdaten werden die auf diese Weise bestimmten Abweichungsinformationen mit Hilfe des Polyworksmoduls IMInspect in Form eines

dreidimensionalen Differenzbildes (siehe Abbildung 41) interaktiv dargestellt. Das Differenzbild kann frei im Raum gedreht werden, zudem können interessante Geometriebereiche mit Hilfe einer Zoom-Funktion näher betrachtet werden. Die in Abbildung 41 gezeigte Falschfarbendarstellung des Differenzbildes erlaubt eine erste qualitative Einschätzung der Verzahnungsabweichungen.

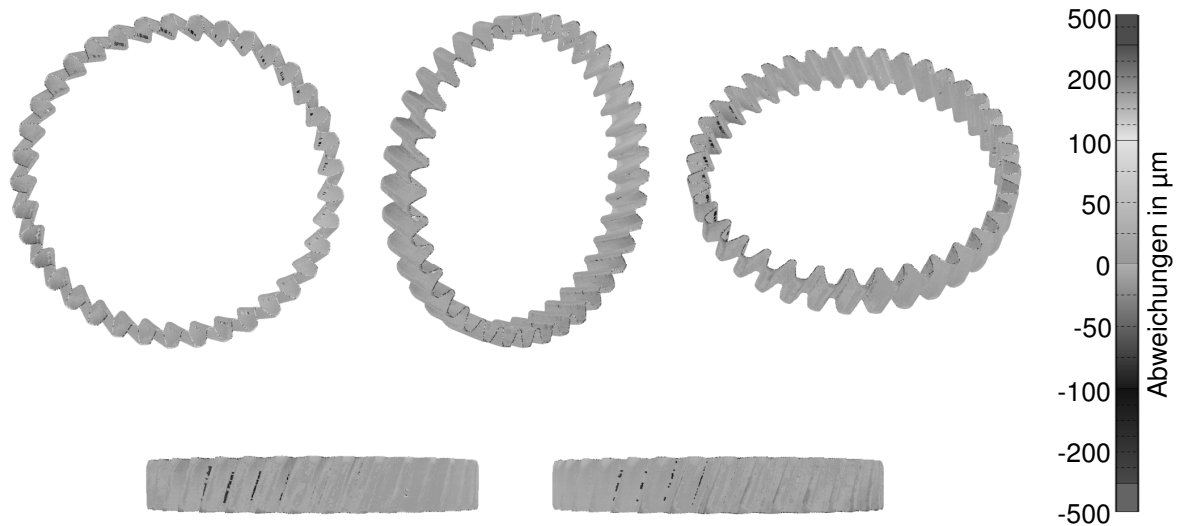


Abbildung 41: Farbcodiertes 3D-Differenzbild in verschiedenen Ansichten als Ergebnis eines CAD-basierten Soll-Ist-Vergleichs

Diese Art der Visualisierung bietet einen schnellen Überblick über die gesamte Verzahnung. Insbesondere können durch dieses Verfahren auch die Zahnkopf- und Zahnfußbereiche beurteilt werden, die aufgrund von Gesenkverschleiß oder eines zu geringen Rohteilvolumens anfällig für Geometrieabweichungen sind. Zur Durchführung dieser Art der Auswertung ist jedoch ein leistungsfähiger Auswerterechner mit moderner 3D-Graphikkarte notwendig.

Eine weitere Möglichkeit zur Visualisierung der Abweichungen ist die in Abbildung 42 gezeigte Stirnschnittdarstellung. Die Abweichungen von der Sollgeometrie sind in diesem Fall farbcodiert entlang des Stirnschnittes aufgetragen. Diese Darstellungsvariante erlaubt insbesondere eine schnelle Detektion systematischer Abweichungen, wie Teilungsfehler, Zahndickenabweichungen und Abweichungen der Kopf- bzw. Fußkreisradien. Schrägungswinkel bzw. Flankenwinkelabweichungen lassen sich durch die Betrachtung

weiterer Stirnschnitte, welche an verschiedenen Positionen über die Zahnbreite verteilt sind, erkennen.

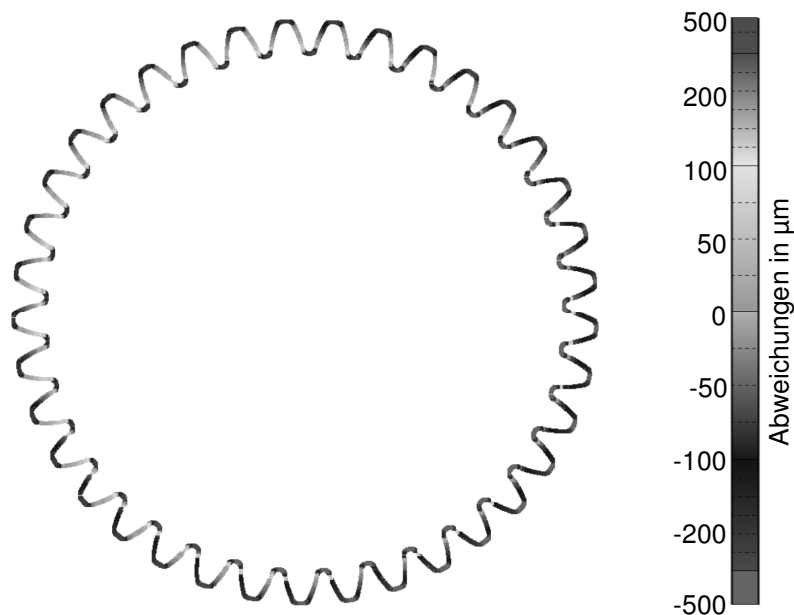


Abbildung 42: Darstellung der Geometrieabweichungen entlang eines Stirnschnittes

Der in Abbildung 42 dargestellte farbcodierte Stirnschnitt zeigt ein sehr homogenes Abweichungsbild. An sämtlichen Zahnflanken tritt ein leichtes Untermaß auf, während sämtliche Zahnkopf- und Zahnfußbereiche oberhalb der Sollkontur liegen.

6.6.3 Quantifizierung der Abweichungen

Für eine objektive Beschreibung der flächenhaften Verzahnungsabweichungen werden Verfahren zur Quantifizierung dieser Abweichungen auf Basis von Kenngrößen benötigt. Angelehnt an die bestehenden Kenngrößen zur linienhaften Abweichungsanalyse wurden in [Wen01, Mee05] vier flächenbezogene Kenngrößen definiert. Diese Kenngrößen beziehen sich auf flächenhafte Form- und Gesamtabweichungen, die in Profil- und in Flankenrichtung auftreten. Die angesprochenen Kenngrößen sollen hier nicht weiter betrachtet werden. Für weiterführende Informationen sei auf die oben genannten Quellen verwiesen.

6.7 Verzugsuntersuchungen an präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern

Um präzisionsgeschmiedete Zahnräder direkt aus der Schmiedewärme zu härten, wird am Institut für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover der Einsatz einer Zweiphasenspraykühlung (Wasser-Luft) untersucht [Bac03b, Käs05, Kra08]. Das Sprayfeld,

das zur integrierten Wärmebehandlung der im SFB 489 präzisionsgeschmiedeten Zahnräder zum Einsatz kommt, besteht aus neun kreisförmig angeordneten Zweistoffdüsen (siehe Abbildung 43). Im Zentrum befindet sich das Zahnrad, welches von einem Dreibackengreifer fixiert wird. Dieser Greifer ist auf einem Schrittmotor befestigt, so dass eine Schwenkbewegung während des Abschreckens durchgeführt werden kann, um auftretende Inhomogenitäten des Sprays auszugleichen. Das Abschrecken ist durch Prozessparameter gekennzeichnet wie z. B. Wasserdruck, Luftdruck, Düsenart und Düsenabstand.



Abbildung 43: Abkühlung eines präzisionsgeschmiedeten Zahnrades im Sprayfeld durch ein Zweiphasenspray [Käs05, Kra08]

6.7.1 Entstehung von Härteverzügen

Beim Härten von Werkstücken aus Stahlwerkstoffen ergeben sich bei hohen Abkühlgeschwindigkeiten große Temperaturunterschiede zwischen der Oberfläche und der Kernzone des Werkstücks. Der durch die Abkühlung der Werkstückoberfläche induzierte Schrumpfungsprozess wird durch den wärmeren Kernbereich behindert. Hierdurch entstehen im Oberflächenbereich Zugeigenspannungen, die in der Regel durch eine plastische Verformung des warmen Kernbereiches abgebaut werden [Bar04]. Das weitere Erkalten des Werkstücks führt zu einer Abkühlung und einem damit verbundenen Schrumpfen des Kernbereichs, welches wiederum durch den bereits erkalteten Oberflächenbereich behindert

wird. Dies führt zu Druckeigenspannungen im Oberflächenbereich und zu Zugeigenspannungen im Kernbereich.

Die durch die Abkühlung bewirkte Verformung des Kernbereichs und die nach Abschluss des Härtevorgangs verbleibenden Eigenspannungen führen zu einer Formänderung des gehärteten Werkstücks. Diese Formänderungen werden auch als Härteverzüge bezeichnet.

6.7.2 Methoden zur Charakterisierung von Härteverzügen an Zahnrädern

Zur Bestimmung und Charakterisierung der durch die Härteverzüge bedingten Geometrieabweichungen stehen eine Reihe von Auswerteverfahren zur Verfügung. Zur Durchführung der Verzugsuntersuchungen ist es zunächst notwendig, die Geometrie des zu untersuchenden Zahnrades vor und nach der Wärmebehandlung mit Hilfe des Streifenprojektionssensors zu erfassen. Um Informationen über eine eventuelle Geometrieänderung durch die Wärmebehandlung zu erhalten, müssen die auf diese Weise gewonnenen Geometriedaten miteinander verglichen werden. Für diesen Vergleich werden die Geometriedaten vor und nach der Wärmebehandlung mit Hilfe des Softwarepakets Polyworks in Polygonmodelle umgewandelt. Mit dem Polyworksmodul IMInspect werden die beiden Polygonmodelle aufeinander eingepasst, wobei das Polygonmodell, welches die Geometriedaten vor der Wärmebehandlung repräsentiert, als Referenz herangezogen wird. Die Berechnung der Differenz der Polygonmodelle geschieht orthogonal zur Oberfläche des Referenzmodells. Die Ergebnisse dieser Abweichungsberechnung geben Aufschluss über die während der Wärmebehandlung entstandenen Geometrieänderungen des Werkstücks.

Für eine erste qualitative Bewertung bietet sich die Visualisierung der Abweichungen in Form eines farbcodierten dreidimensionalen Differenzbildes an (siehe Abbildung 44). Auf diese Weise können die durch die Wärmebehandlung induzierten vornehmlich systematischen Geometrieabweichungen schnell und sicher erkannt werden. Anhand der Verteilung und Ausprägung der Abweichungen auf der Verzahnung können zudem bereits Rückschlüsse auf die Ursachen der Härteverzüge gezogen werden. Nimmt das Zahnrad nach der Wärmebehandlung eine im Vergleich zum ungehärteten Bauteil ovale Form an, deutet dies auf eine inhomogene Beaufschlagung des Zahnrades mit dem Zweiphasenspray über den Umfang der Verzahnung hin. Dieser Effekt kann beispielsweise durch den Ausfall einer Sprayfelddüse hervorgerufen werden.

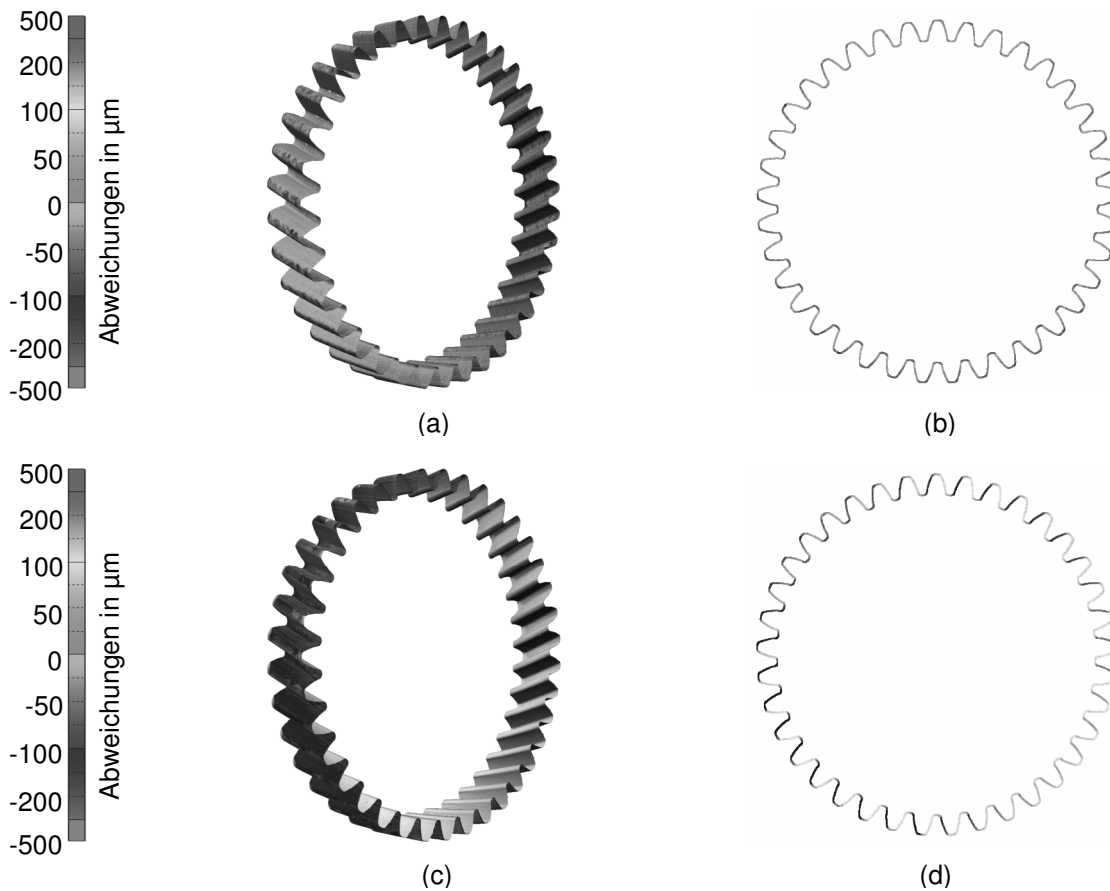


Abbildung 44: Härteverzüge bei einem mit Zweiphasenspray (a, b) und einem konventionell wärmebehandelten präzisionsgeschmiedeten Zahnrad (c, d)

Die Abbildung 44 (a) und (b) zeigen die Geometrieänderungen eines im Sprayfeld gehärteten Zahnrades in Form eines dreidimensionalen Differenzbildes und eines farbcodierten Stirnschnittes. Das Zahnrad weist einen geringen und sehr homogenen Verzug auf. Die maximalen Geometrieabweichungen betragen etwa $75 \mu\text{m}$. In den Abbildung 44 (c) und (d) sind die Härteverzüge eines konventionell einsatzgehärteten präzisionsgeschmiedeten Zahnrades dargestellt. Die Geometrieänderungen dieses Zahnrades sind, verglichen mit dem im Sprayfeld gehärteten Zahnrad, sehr inhomogen über die Verzahnung verteilt und vom Betrag her deutlich ausgeprägter. Die maximale Abweichung von der vor dem Härten bestimmten Referenzgeometrie beträgt etwa $125 \mu\text{m}$.

In den Abbildung 44 (b) und (d) werden die Geometrieänderungen der untersuchten Verzahnungen entlang eines Stirnschnitts gezeigt. Durch diese Form der Darstellung lassen sich insbesondere systematische Abweichungen leichter und intuitiver Erkennen, als bei den in den Abbildung 44 (a) und (c) gezeigten 3D-Darstellungen. Auch hier wird deutlich, dass

die Geometrieabweichungen bei dem konventionell gehärteten Zahnrad sehr viel stärker ausgeprägt sind, als bei dem im Sprayfeld Gehärteten.

Eine Möglichkeit zur Quantifizierung der Härteverzüge bietet eine an die taktile Verzahnungsmesstechnik angelehnte Analyse der Abweichungen entlang der Profil- und Flankenlinien. Neben den Profil- und Flankenlinienabweichungen können mit diesem Verfahren insbesondere Teilungsfehler detektiert werden, welche Aufschluss über die Lageabweichungen der einzelnen Zähne des Zahnrades geben.

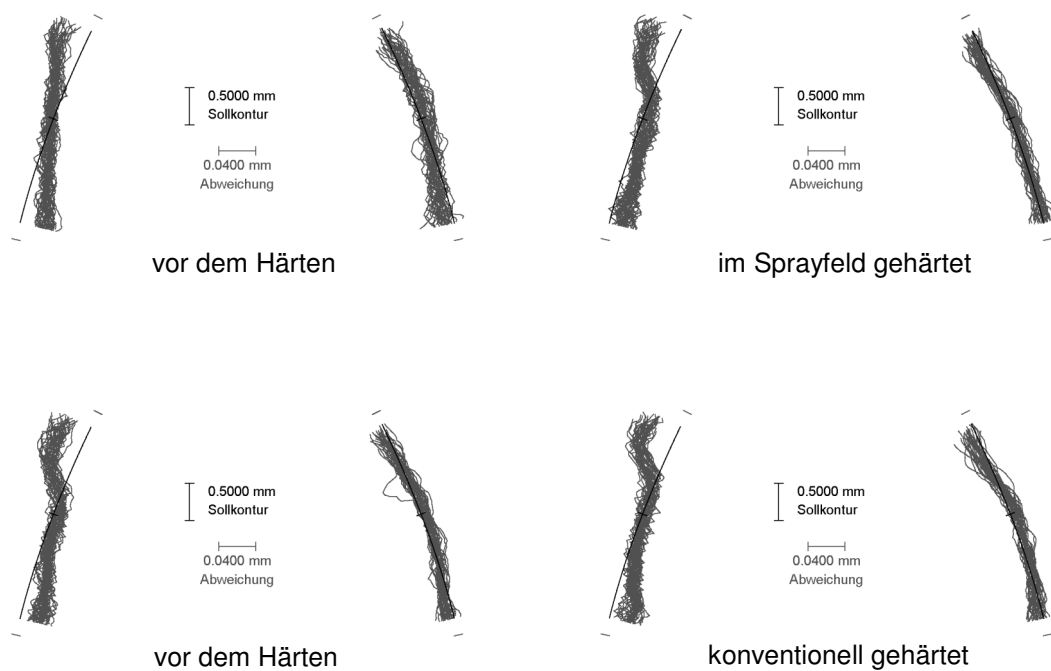


Abbildung 45: Vergleich der Profillinienabweichungen eines im Sprayfeld (oben) und eines konventionell (unten) gehärteten Zahnrades vor und nach dem Härten

Der obere Teil von Abbildung 45 zeigt die Abweichungen eines präzisionsgeschmiedeten Zahnrades von der Profillinie vor und nach dem Härten im Sprayfeld. In der Gegenüberstellung ist zu erkennen, dass sich nach dem Härten an allen linken Flanken der Verzahnung Abweichungen in Form eines „Knickes“ im oberen Drittel der Profillinie gebildet haben. Die rechten Flanken zeigen keine ausgeprägte Veränderung durch die Wärmebehandlung. Insgesamt ist zu beobachten, dass die Zahnbreite im unteren Bereich der Zahnflanke um ca. 30 μm zunimmt. Im unteren Teil der Abbildung 45 sind die Abweichungen eines konventionell gehärteten präzisionsgeschmiedeten Zahnrades von der

Profillinie dargestellt. In diesem Fall sind keine signifikanten Veränderungen der Profillinienabweichungen durch den Härteprozess zu erkennen.

Das zweite Verfahren befasst sich mit der Auswertung der Rundheit des Zahnrades bezogen auf die Zahnkopf- bzw. Zahnfußbereiche. Zur Durchführung der Auswertung werden die entsprechenden Geometriebereiche zunächst aus den flächenhaften Verzahnungsmessdaten extrahiert. Anschließend werden die Kopf- bzw. Fußkreisradien für jeden Zahn einzeln berechnet. Die Ergebnisse werden in Anlehnung an die DIN ISO 1101 [N3] graphisch dargestellt. Durch einen Vergleich der Ergebnisse der Rundheitsuntersuchungen an den Zahnradern vor und nach der Wärmebehandlung können die Änderungen der Kopf- und Fußkreisradien aufgrund der Härteverzüge erfasst werden.

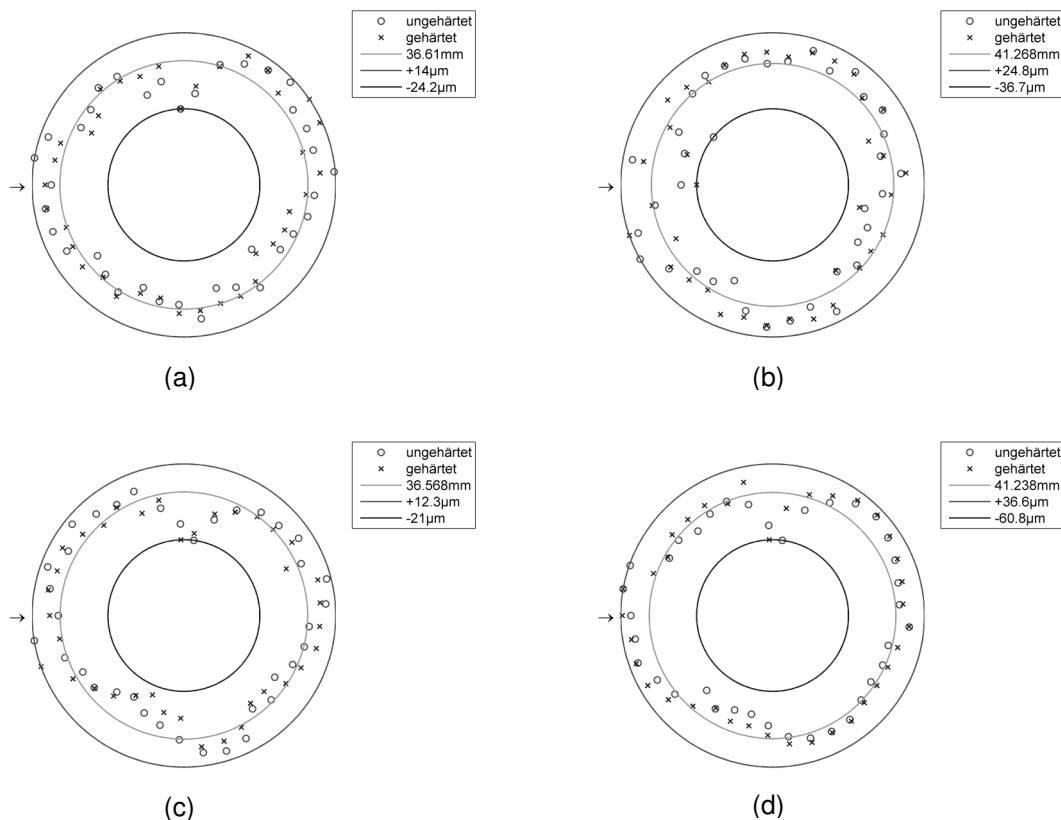


Abbildung 46: Vergleich der Abweichungen vom mittleren Fuß- und Kopfkreisradius eines im Sprayfeld (a, b) und eines konventionell (c, d) gehärteten präzisionsgeschmiedeten Zahnrades vor und nach dem Härten

In Abbildung 46 sind die Kopf- und Fußkreisradien eines im Sprayfeld und eines konventionell gehärteten Zahnrades dargestellt. Abbildung 46 (a) zeigt die Fußkreisradien

eines im Sprayfeld wärmebehandelten Zahnrades. Durch den Härteprozess kommt es nur zu sehr geringen Veränderungen der Fußkreisradien. Die maximale Differenz beträgt etwa $6\ \mu\text{m}$. Es fällt auf, dass insbesondere in den Bereichen rechts oben und links unten in Abbildung 46 (a) die Fußkreisradien nach dem Härten kleiner sind als die Radien vor dem Härten. In den übrigen Bereichen lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen. Die maximale Differenz der Kopfkreisradien in Abbildung 46 (b) beträgt etwa $5\ \mu\text{m}$. Hier lässt sich keine Systematik erkennen. Abbildung 46 (c) zeigt die Fußkreisradien eines konventionell einsatzgehärteten präzisionsgeschmiedeten Zahnrades. Auch hier kommt es nur zu sehr geringen Änderungen bei den Fußkreisradien. Die maximale Differenz beträgt etwa $4\ \mu\text{m}$. In diesem Fall folgen die Radiusänderungen einer Systematik. In den Bereichen links oben und links unten in Abbildung 46 (c) stellen sich nach dem Härten kleinere Fußkreisradien ein als vor dem Härten. In den übrigen Bereichen liegt ein entgegengesetztes Verhalten vor. Bei den in Abbildung 46 (d) betrachteten Kopfkreisradien des konventionell gehärteten Zahnrades, kommt es durch den Härteprozess zu deutlichen Radiusveränderungen. Die maximale Differenz beträgt hier etwa $39\ \mu\text{m}$. Auch hier folgen die Radiusdifferenzen einer Systematik. Mit wenigen Ausnahmen sind die Zahnkopfradien aller Zähne des Zahnrades nach dem Härten größer als vor dem Härten.

7 Flächenhafte Geometrieprüfung von Ritzelwellen

Bei Ritzelwellen handelt es sich, im Gegensatz zu den in Kapitel 6 betrachteten Zahnrädern, um so genannte Langteile. Die im Rahmen des SFB 489 präzisionsgeschmiedete Ritzelwelle weist die drei in Abbildung 47 angegebenen Hauptgeometrielemente Verzahnung, Wellenansatz und Wellenansatz mit Lagersitz auf. Der Lagersitz des langen Wellenansatzes stellt, zusätzlich zu den Evolventenflächen der Verzahnung, eine Funktionsfläche dar.

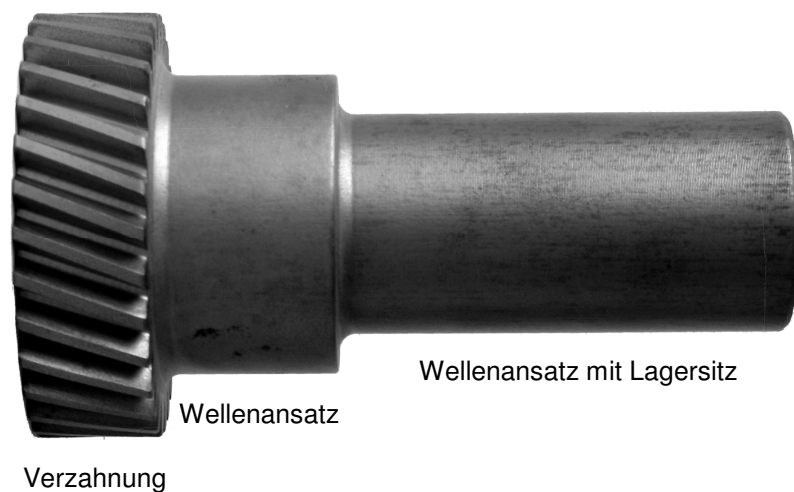


Abbildung 47: Geometrielemente einer Ritzelwelle

Bei der Geometrieprüfung von präzisionsgeschmiedeten Ritzelwellen ist zu beachten, dass Verzahnung und Schaft simultan ausgeformt werden. Durch den Schmiedeprozess mit integrierter Wärmebehandlung kann es aufgrund thermischer Effekte zu Verzügen kommen, die bewirken, dass die Achsen von Verzahnung und Schaft nicht übereinstimmen (siehe 2.5.2). Der Wellenschaft kann somit, analog zur Bohrung eines präzisionsgeschmiedeten Zahnrades, nicht als Primärbezug für die nachfolgenden Prozessschritte bzw. als Bezug für eine funktionsorientierte Geometrieprüfung verwendet werden. Für eine Geometrieprüfung präzisionsgeschmiedeter Ritzelwellen wird daher ein fertigungsorientiertes Bezugssystem auf Grundlage der Lagersitzachse gewählt.

Neben den für das Präzisionsschmieden typischen zufällig über die gesamte Bauteilgeometrie verteilten individuellen Geometrieabweichungen, weisen präzisionsgeschmiedete Ritzelwellen vor allem thermisch bedingte systematische

Abweichungen auf. Diese systematischen Abweichungen sind meist durch Härteverzüge bedingt und äußern sich in Form unterschiedlich orientierter Verzahnungs- bzw. Lagersitzachsen, sowie durch Teilungsfehler und Schrägungswinkelabweichungen auf der Verzahnung. Zur Erfassung dieser Geometrieabweichungen auf den Funktionsflächen ist, analog zur Geometrieprüfung von Zahnrädern (siehe Kapitel 6), eine vollständige Erfassung der Verzahnung und des Lagersitzes notwendig. Auf Grundlage dieser Geometrieinformationen lassen sich insbesondere auch Aussagen bezüglich der Koaxialität von Verzahnungs- und Lagersitzachse machen, die maßgeblich durch Härteverzüge beeinflusst wird.

Für eine umfassende Geometrieprüfung aller Funktionsflächen der Ritzelwelle sowie zur Visualisierung der Abweichungen bietet sich der bereits in Abschnitt 6.6.2 vorgestellte Vergleich der mittels Streifenprojektion erfassten Messdaten mit dem CAD-Modell der Ritzelwelle an.

7.1 Systemaufbau zur flächenhaften Erfassung von Ritzelwellen

Im Gegensatz zum Zahnrad verfügt eine Ritzelwelle neben der Verzahnung über einen Lagersitz als Funktionselement, das zur Abweichungsanalyse ebenfalls einer Geometrieprüfung unterzogen werden muss. Zur flächenhaften Erfassung der Funktionsflächen von präzisionsgeschmiedeten Ritzelwellen wird ein Messaufbau benötigt, der es ermöglicht, einen Streifenprojektionssensor hochgenau und flexibel entlang der Bauteilachse zu positionieren. Diese Positionieraufgabe kann durch den Einsatz der Präzisionsführungen eines Koordinatenmessgerätes (KMG) bewältigt werden.

Zur Geometrieprüfung präzisionsgeschmiedeter Ritzelwellen wurde folglich ein Messaufbau, bestehend aus einem Streifenprojektionssensor der Fa. GF Messtechnik GmbH, einer luftgelagerten Präzisionsdrehachse (siehe Abschnitt 6.2.2) und einer Spannvorrichtung für das Werkstück, in ein Koordinatenmessgerät der Fa. Werth Messtechnik GmbH integriert (siehe Abbildung 48). Dies ist ein entscheidender Unterschied zu dem in Abschnitt 6.2 vorgestellten fertigungsnahen Zahnradmesssystem, bei welchem nur eine Positionierung des Streifenprojektionssensors in z-Richtung notwendig ist.

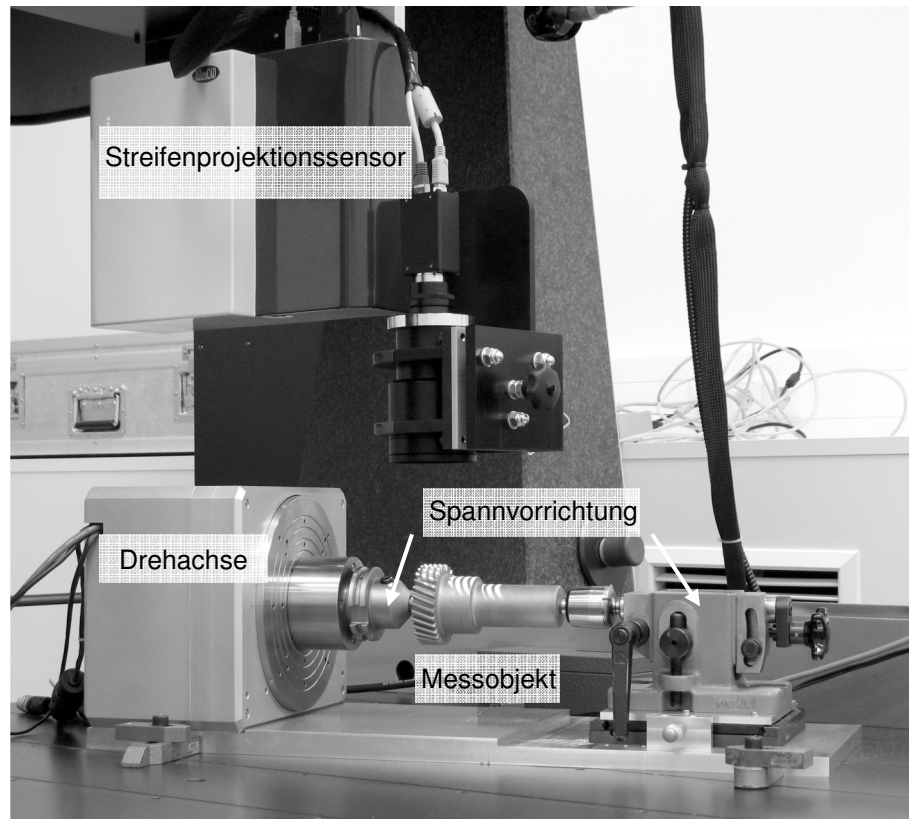


Abbildung 48: Systemaufbau zur flächenhaften Geometrieerfassung präzisionsgeschmiedeter Ritzelwellen

7.1.1 Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems

Das zur flächenhaften Geometrieprüfung der Funktionsflächen von Ritzelwellen eingesetzte Streifenprojektionssystem weist ähnliche Merkmale auf, wie das in das optische Zahnradmesssystem integrierte Streifenprojektionssystem (siehe Abschnitt 6.2.1).

Analog zum bereits vorgestellten Streifenprojektionssystem, verfügt auch das zur Ritzelwellenmessung verwendete Messsystem über ein digitales Mikrospiegel-Array mit 1024 x 768 Einzelspiegeln zur Erzeugung der Streifensequenzen. Das zur Messung benötigte Licht wird, zur Vermeidung von thermischen Effekten, ebenfalls von einer Kaltlichtquelle über einen Lichtleiter in die Projektionseinheit eingekoppelt.

Die auf das Messobjekt projizierten Streifensequenzen werden über ein telezentrisches Objektiv der Fa. Sill Optics GmbH & Co. KG auf die Detektorfläche einer CCD-Kamera vom Typ 641F der Fa. Basler AG abgebildet. Die Kamera verfügt über 1600 x 1200 Pixel. Die Messfeldgröße beträgt ca. 47,6 mm x 35,2 mm bei einem vertikalen Messbereich von ca. ± 9 mm. Durch Synchronisation der Projektion der Streifenmuster mit der Bilderfassung der

Kamera können Messzeiten von etwa 2 s für eine 3D-Aufnahme erreicht werden. Die Berechnung der Höheninformation ist stark von der Rechenleistung des verwendeten Computers abhängig und beträgt in diesem Fall etwa 6 s.

7.1.2 Beschreibung der verwendeten Drehachse

Die für die Ritzelwellenmessungen verwendete Drehachse entspricht der in Abschnitt 6.2.2 beschriebenen Drehachse, die im fertigungsnahen Zahnradmesssystem eingesetzt wird.

7.1.3 Beschreibung des Koordinatenmessgerätes

Der Messaufbau zur Ritzelwellenmessung ist in ein optotaktiles Koordinatenmessgerät vom Typ VC IP 3D der Fa. Werth Messtechnik GmbH integriert. Bei dem in Abbildung 49 dargestellten Messsystem handelt es sich um ein so genanntes Multisensor-Koordinatenmessgerät in Portal-Bauweise. Es verfügt über ein Messvolumen von 1000 mm x 1000 mm x 600 mm und ist standardmäßig mit einem messenden bzw. schaltenden Tastsystem und einem Videosensor mit Autofokusfunktion ausgestattet. Die Längenmessunsicherheit des Koordinatenmessgerätes beträgt $1,9 + L/350 \mu\text{m}$. Zur Aufnahme zusätzlicher Sensorik verfügt das Messsystem über eine zweite z-Pinole.



Abbildung 49: Multisensor Koordinatenmessgerät Werth VCIP 3D

7.2 Flächenhafte Erfassung der Funktionsflächen von Ritzelwellen

Für eine flächenhafte Erfassung der Funktionsflächen präzisionsgeschmiedeter Ritzelwellen ist es notwendig, den Zusammenhang der Koordinatensysteme von Streifenprojektionssensor und KMG zu bestimmen. Auf diese Weise wird die Positionierung des Sensors durch die Koordinatenachsen des KMG im mittels Streifenprojektion bestimmten vorläufigen Werkstückkoordinatensystem ermöglicht. Die Lagersitzoberfläche der Ritzelwelle wird in mehreren gleichmäßig über den Vollkreis verteilten Winkelpositionen erfasst, während die Erfassung der Verzahnungsoberfläche teilungsbezogen erfolgt (siehe Abschnitt 6.3).

7.2.1 Koordinatensystemabgleich

Um sowohl den Lagersitz als auch die Verzahnung einer Ritzelwelle mit dem in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Streifenprojektionssensor erfassen zu können, ist es notwendig den Sensor über dem jeweils zu messenden Geometrieelement zu positionieren. Die Positionierung des Streifenprojektionssensors geschieht entlang der Drehachse der zwischen Rotationsachse und Gegenhalter gespannten Ritzelwelle. Die Bestimmung der Drehachse der Ritzelwelle wird, analog zur Bestimmung der Drehachse eines Zylindernormals bei der Zahnradmessung (siehe Abschnitt 6.4), durch eine flächenhafte Erfassung der Oberfläche des Lagersitzes der Ritzelwelle mit dem Streifenprojektionssensor durchgeführt. Lage und Richtung der Drehachse sind zunächst nur im Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors bekannt, die Positionierung des Sensors entlang dieser Achse soll allerdings durch die Präzisionsführungen des KMG erfolgen. Zur Durchführung der Positionierung ist es somit notwendig den Zusammenhang der Koordinatensysteme von Streifenprojektionssensor und KMG zu bestimmen.

Der Abgleich der Koordinatensysteme von Streifenprojektionssensor und KMG geschieht anhand von Messungen an einer hochgenau gefertigten Referenzkugel mit diffus streuender Oberfläche (siehe Abbildung 50). Vor der Durchführung der Messungen wird der Streifenprojektionssensor durch ein iteratives Verfahren mit den KMG-Achsen so positioniert, dass sich der Mittelpunkt der Referenzkugel im Mittelpunkt des Messvolumens des Sensors befindet. Während der iterativen Positionierung des Sensors wird die Oberfläche der Referenzkugel zunächst flächenhaft erfasst. Auf die gewonnenen Messdaten wird

anschließend eine Kugel als Ersatzgeometrieelement auf Grundlage der Minimierung der Abstandsquadratsumme eingepasst. Anschließend wird der Differenzvektor des Mittelpunktes der eingepassten Kugel zum Mittelpunkt des Messvolumens des Streifenprojektionssensors berechnet. Im nächsten Schritt werden die Koordinatenachsen des KMG relativ, entsprechend dem negativen Differenzvektor, positioniert. Da zu diesem Zeitpunkt der Zusammenhang der Koordinatensysteme von Streifenprojektionssensor und KMG nicht exakt bekannt ist, stimmen Kugelmittelpunkt und Messfeldmittelpunkt nach der Positionierung in der Regel nicht überein. Jedoch wird deren Abstand durch die Positionierung meist deutlich verringert. Dieses Verfahren wird solange wiederholt, bis die Differenz des gemessenen Kugelmittelpunktes zum Mittelpunkt des Messvolumens kleiner als $1\ \mu\text{m}$ ist. Diese Position der Koordinatenachsen des KMG wird im Folgenden als Referenzposition zum Anfahren der für den Koordinatensystemabgleich nötigen weiteren Messpositionen herangezogen.

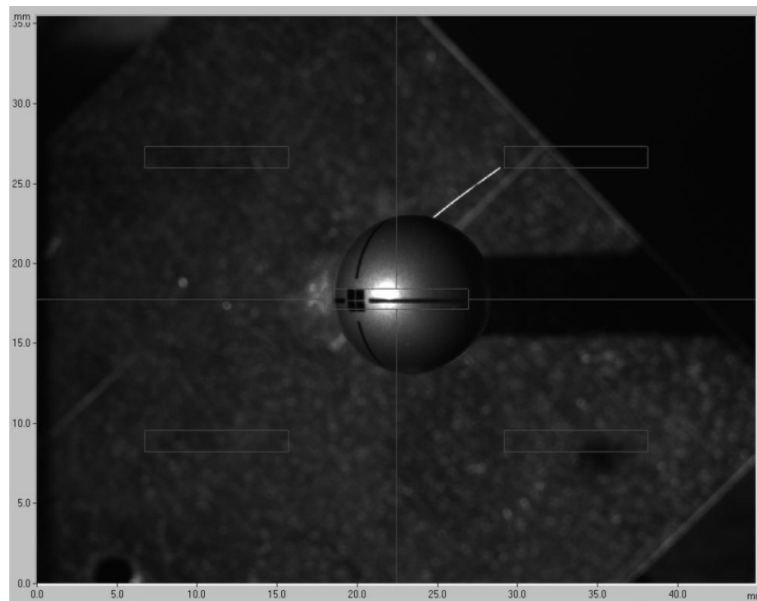


Abbildung 50: Messung an einer diffus streuenden Referenzkugel mit einem Streifenprojektionssystem

Ausgehend von der Referenzposition werden sechs Kugelmessungen in weiteren Messpositionen durchgeführt. Die Messpositionen werden so gewählt, dass sie sich jeweils durch Translation entlang einer einzigen KMG-Achse anfahren lassen und symmetrisch in positiver bzw. negativer Achsenrichtung zum Referenzpunkt orientiert sind. Bei der Auswahl der Messpositionen ist darauf zu achten, dass sich die erfassbare Oberfläche der Referenzkugel vollständig im Messvolumen des Streifenprojektionssensors befindet. Im

konkreten Fall wurde der Streifenprojektionssensor in die folgenden Positionen relativ zur Referenzposition entlang der Koordinatenachsen des KMG verfahren:

Messung	Position der Koordinatenachsen des KMG		
	x in mm	y in mm	z in mm
1	-12	0	0
2	12	0	0
3	0	-17	0
4	0	17	0
5	0	0	-3
6	0	0	3

Tabelle 1: relative Positionsänderungen der KMG-Koordinatenachsen bei der Bestimmung des Zusammenhangs der Koordinatensysteme von KMG und Streifenprojektionssensor

In jeder dieser sechs Messpositionen wird nach der Positionierung des Sensors eine Kugelmessung durchgeführt. Durch Einpassung einer Kugel als Ersatzgeometrieelement auf die Messdaten lässt sich zu jeder Messposition der Kugelmittelpunkt im Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors berechnen. Im nächsten Schritt werden die Vektoren berechnet, die die Kugelmittelpunkte der Messungen, die zu einer Sensorpositionierung entlang einer Koordinatenachse des KMG gehören, verbinden. Der Vektor, der zu einer Positionierung des Streifenprojektionssensors entlang der x-Achse des KMG gehört, berechnet sich aus der Differenz der Kugelmittelpunkte der Messungen 1 und 2 im Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors. Der zugehörige Einheitsvektor wird mit $\vec{e}_{x,KMG-SPS}$ bezeichnet. Die Vektoren zu einer Positionierung des Sensor entlang der y- bzw. z-Achse des KMG lassen sich analog berechnen. Die zugehörigen Einheitsvektoren sind $\vec{e}_{y,KMG-SPS}$ und $\vec{e}_{z,KMG-SPS}$. Mit Hilfe der genannten Einheitsvektoren lässt sich die Rotationsmatrix $M_{KMG-SPS}$ aufstellen, mit der sich Translationen im KMG-Koordinatensystem in das Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors umrechnen lassen. Für die Rotationsmatrix $M_{KMG-SPS}$ gilt:

$$M_{KMG-SPS} = \begin{pmatrix} e_{x,x,KMG-SPS} & e_{y,x,KMG-SPS} & e_{z,x,KMG-SPS} \\ e_{x,y,KMG-SPS} & e_{y,y,KMG-SPS} & e_{z,y,KMG-SPS} \\ e_{x,z,KMG-SPS} & e_{y,z,KMG-SPS} & e_{z,z,KMG-SPS} \end{pmatrix}. \quad (7.1)$$

Zur Umrechnung einer Translation im Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors in das Koordinatensystem des KMG wird die zu $M_{KMG-SPS}$ inverse Matrix $M_{SPS-KMG}$ benötigt. Mit Hilfe der Rotationsmatrix $M_{SPS-KMG}$ lässt sich die zur Messung beider Geometrielemente nötige Translation entlang der in Koordinaten des Streifenprojektionssensors bekannten Drehachse der Ritzelwelle in KMG-Koordinaten umrechnen.

7.2.2 Messablauf

Analog zur Vorgehensweise der in Abschnitt 6.3 beschriebenen Methoden zur Erfassung der Verzahnungsgeometrie, ist vor Beginn der Messungen die zwischen Drehachse und Gegenhalter gespannte Ritzelwelle so auszurichten, dass die Symmetrieebene zwischen zwei Zahnflanken einer Zahnücke ihrer Verzahnung näherungsweise parallel zur optischen Achse des Streifenprojektionssensors ist. Die Winkelposition der Drehachse wird, nach erfolgter Ausrichtung, als 0°-Position definiert. Zudem ist der Schrägungswinkel der Verzahnung zu berücksichtigen (siehe Abbildung 30).

Im nächsten Schritt wird der Streifenprojektionssensor so über dem Lagersitz der Ritzelwelle positioniert, dass die Lagersitzachse näherungsweise den Mittelpunkt des Messfeldes durchläuft. Der vertikale Abstand des Sensors zum Lagersitz ist so zu wählen, dass das Messvolumen in vertikaler Richtung optimal ausgenutzt wird. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, wird die Oberfläche des Lagersitzes in 8-16 äquidistant über den Vollkreis verteilten Winkelpositionen der Drehachse mit dem Streifenprojektionssensor erfasst. Nach erfolgter Messung werden die Bestimmungsparameter der Drehachse im Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors durch Einpassung eines Zylinders als Ersatzformelement auf sämtliche Messdatensätze berechnet. Die Bestimmung der Drehachseparameter geschieht analog zu der in Abschnitt 6.4 vorgestellten Vorgehensweise zur Drehachsbestimmung bei der Zahnradmessung.

Der Translationsvektor zur Positionierung des Streifenprojektionssensors in der Verzahnungsmessposition wird auf Basis der zuvor berechneten Drehachseparameter im Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors bestimmt. Der Translationsvektor enthält einen zur Drehachse parallelen Anteil, dessen Länge dem Abstand von Lagersitz und

Verzahnung entlang der Bauteilachse entspricht. Zudem ist ein Anteil in Richtung der z-Achse des Sensorkoordinatensystems enthalten, dessen Betrag gleich der Differenz von Lagersitzradius und Kopfkreisradius der Verzahnung ist. Zur Positionierung des Streifenprojektionssensors mit Hilfe der KMG-Achsen ist es zunächst erforderlich, den im Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors vorliegenden Translationsvektor mit Hilfe der Rotationsmatrix $M_{SPS-KMG}$ in KMG-Koordinaten zu überführen. Ist dies erfolgt, kann die Verzahnungsmessposition angefahren werden.

Zur Erfassung der Verzahnungsgeometrie wird zunächst die Ausgangswinkelposition 0° durch die Rotationsachse angefahren. Die Aufnahme der Oberfläche der Verzahnung geschieht teilungsbezogen, wie in Abschnitt 6.3 beschrieben.

7.3 Auswertung der Messdaten

Im Gegensatz zum Zahnrad handelt es sich bei einer Ritzelwelle um ein Langteil, welches zusätzlich zur Verzahnung einen Lagersitz als Funktionselement aufweist. Für eine umfassende Analyse der Abweichungen an den Funktionsflächen des Bauteils ist es also notwendig, nach erfolgter Messdatenrekombination, für die Oberfläche des Lagersitzes und der Verzahnung eine flächenhafte Abweichungsanalyse durchzuführen. Im Folgenden werden kurz Methoden zur Visualisierung und Quantifizierung der Abweichungen an den Funktionsflächen von Ritzelwellen vorgestellt. Hierbei werden die Lagersitz- und Verzahnungsmessdaten zunächst getrennt ausgewertet, bevor die Ritzelwelle als Ganzes betrachtet wird.

7.3.1 Rekombination der Messdatensätze

Vor der Rekombination der Messdatensätze zur Gesamtgeometrie der Funktionsflächen einer Ritzelwelle ist es notwendig die Messdaten entsprechend den in Abschnitt 6.5.1 vorgestellten Methoden vorzubereiten. Die Rekombination der Messdatensätze des Lagersitzes und der Verzahnung von Ritzelwellen geschieht anschließend analog zu der in Abschnitt 6.5.2 genannten Vorgehensweise zur Rekombination der Verzahnungsgeometrie. Auch hier besteht der erste Schritt der Messdatenrekombination in der Transformation der einzelnen Messdatensätze in ein gemeinsames vorläufiges Werkstückkoordinatensystem. Dieses Koordinatensystem basiert auf der anhand der Lagersitzmessdaten bestimmten Drehachse der Ritzelwelle während der Messung (siehe Abschnitt 7.2.2). Bei der Rekombination der Ritzelwellenmessdaten ist die Translation des Streifenprojektionssensors

zwischen Lagersitz- und Verzahnungsmessung zu beachten. Der Betrag dieser Translation ist bei der Transformation der Messdaten in das gemeinsame Werkstückkoordinatensystem zu berücksichtigen.

7.3.2 Festlegung der Bauteilachse

Wie bereits in Abschnitt 2.5.2 erwähnt, bildet der Lagersitz einer Ritzelwelle das Primärbezugselement für die spanende Endbearbeitung des Bauteils. Aus diesem Grund, und aufgrund der Tatsache, dass sich die Zylinderachse des Lagersitzes schnell und sehr sicher durch numerische Einpassverfahren bestimmen lässt, wird die Lagersitzachse im Folgenden als Bauteilachse festgelegt. Alternativ besteht die Möglichkeit die Verzahnungsachse als Bauteilachse zu wählen. Die hierzu notwendige Einpassung der Verzahnungsmessdaten auf eine Sollgeometrie ist allerdings numerisch sehr viel aufwendiger und zeitintensiver als eine Zylinderauswertung. Zudem weisen präzisionsgeschmiedete Verzahnungen aufgrund der erheblich anspruchsvolleren Umformoperation häufig stärker ausgeprägte Geometrieabweichungen auf, als präzisionsgeschmiedete Zylindersegmente. Dies hat zur Folge, dass eine auf der Verzahnungsachse basierende Bauteilachse aufgrund der Abweichungscharakteristiken nicht so sicher bestimmbar ist, wie eine Lagersitzachse.

7.3.3 Geometrieprüfung des Lagersitzes

Die Geometrieprüfung des Lagersitzes einer Ritzelwelle geschieht durch Analyse der Abweichungen von der Zylinderform. Zur Durchführung der Abweichungsanalyse wird zunächst ein Zylinder als Ersatzgeometrieelement mit veränderlichem Radius auf die rekombinierten Lagersitzmessdaten eingepasst. Die Zylindereinpassung geschieht auf Basis der Minimierung der Abstandsquadratsumme und liefert als Ergebnis, neben dem Ist-Zylinderradius, auch die Lage und Orientierung der Lagersitzachse im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem. Im Anschluss an die Einpassung werden die Abweichungen von der Sollgeometrie orthogonal zur Oberfläche des Ersatzzylinders berechnet.

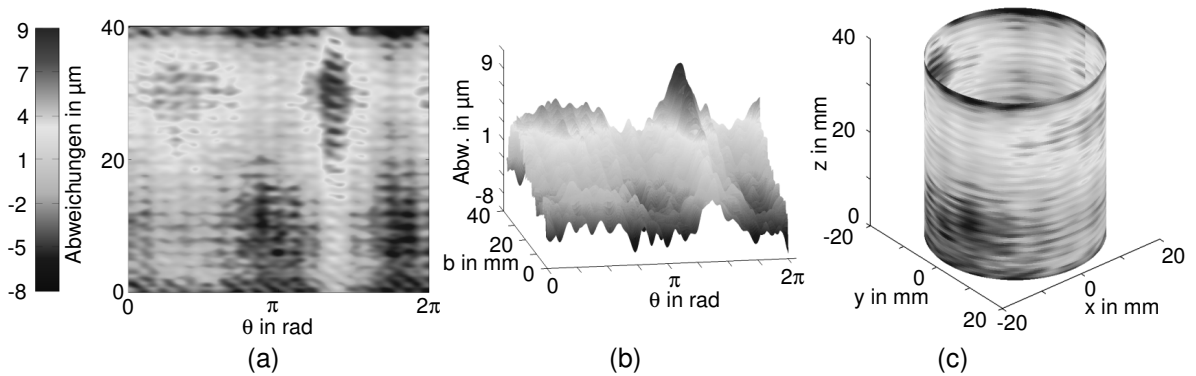


Abbildung 51: Abweichungen des Lagersitzes einer Ritzelwelle von der Zylinderform in drei Darstellungsvarianten

Abbildung 51 zeigt die Abweichungen eines Ritzelwellenlagersitzes von der Zylinderform in drei unterschiedlichen Darstellungsvarianten. In Abbildung 51 (a) werden die Abweichungen vom Ersatzzylinder zweidimensional dargestellt. Diese Form der Darstellung gibt einen schnellen Überblick über die Zylinderformabweichungen des gesamten Lagersitzes. Mit Hilfe der in Teilabbildung (b) gezeigten 3D-Darstellung können Abweichungscharakteristiken der Lagersitzoberfläche intuitiv erfasst und bewertet werden. Diese Darstellungsform verdeutlicht die betragsmäßigen Unterschiede in der Höhenkoordinate des Messobjektes besser als die farbcodierte 2D-Darstellung in Teilabbildung (a), ist aber weniger übersichtlich. In Abbildung 51 (c) sind die farbcodierten Zylinderformabweichungen auf der Mantelfläche eines Zylindermodells dargestellt. Diese so genannte Geometrieelementdarstellung ist ebenfalls leicht zu interpretieren. Ein Nachteil dieser Variante ist, dass sich die Abweichungen des gesamten Lagersitzes nicht in einer einzigen Ansicht darstellen lassen.

Die Ergebnisse der Lagersitzmessung, die in Abbildung 51 dargestellt sind, zeigen eine Zylinderformabweichung von $17 \mu\text{m}$, bezogen auf die gesamte Zylindermantelfläche des Lagersitzes. Die größten positiven Abweichungen ($\sim 10 \mu\text{m}$) von der Sollgeometrie treten im rechten oberen Bereich von Abbildung 51 (a) auf, während die größten negativen Abweichungen ($\sim 7 \mu\text{m}$) im mittleren und rechten unteren Bereich der Abbildung zu erkennen sind.

Die periodischen Strukturen, die in den drei Teilbildern der Abbildung 51 zu erkennen sind, haben ihre Ursache in einem geringfügigen Versatz der einzelnen rekombinierten Messdatensätze des Lagersitzes. Der Versatz der Messdaten ist bedingt durch die Unsicherheit bei der Bestimmung der Drehachse des Bauteils, und liegt in der Größenordnung

von 1 μm . Die periodischen Strukturen sind in der Regel bedeutend kleiner als die auf der Bauteiloberfläche vorliegenden Geometrieabweichungen und können bei der Messdatenauswertung vernachlässigt werden.

7.3.4 Geometrieprüfung der Verzahnung

Die Geometrieprüfung der Verzahnung einer Ritzelwelle geschieht analog zu der in Abschnitt 6.6 vorgestellten Geometrieprüfung der Verzahnung eines Zahnrades. Im Anschluss an die Rekombination der Verzahnungsgeometrie (siehe Abschnitt 7.3.1) werden die Evolventenflächen zunächst aus den Messdatensätzen extrahiert und anschließend numerisch auf ein Modell der Verzahnung eingepasst. Eine farbcodierte Darstellung der orthogonal zur Sollgeometrie berechneten Abweichungen an den Evolventenflächen ist in Abbildung 52 gezeigt.

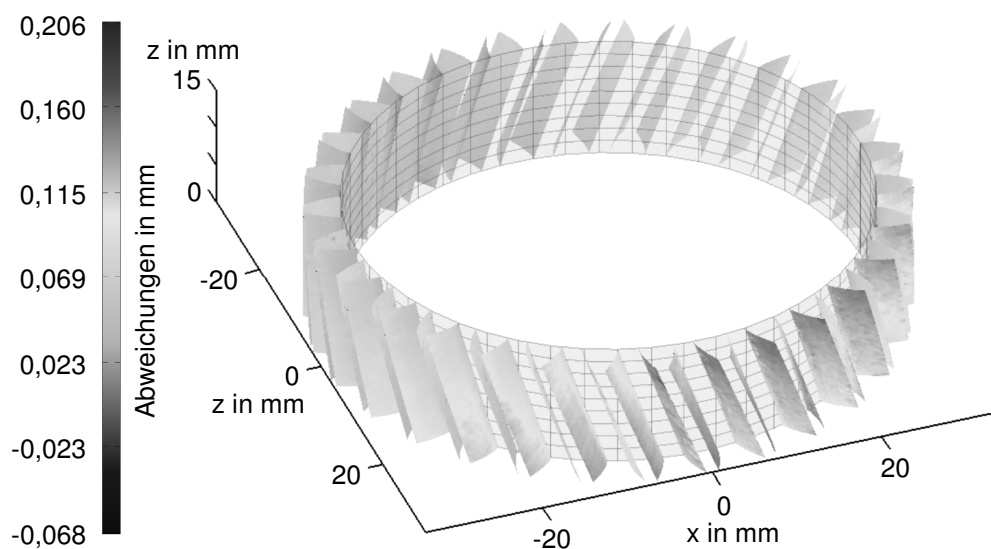


Abbildung 52: Farbocodierte Darstellung der Abweichungen der Verzahnung einer Ritzelwelle von der Sollgeometrie

7.3.5 Betrachtung des gesamten Bauteils

Neben einer getrennten Auswertung der Abweichungen an den Funktionselementen Lagersitz und Verzahnung, ist für eine umfassende Geometrieprüfung einer Ritzelwelle eine Betrachtung des Bauteils als Ganzes unumgänglich. Nur auf diese Weise ist es möglich, detaillierte Aussagen bezüglich der fertigungsbedingten Geometrieabweichungen des Bauteils

zu treffen, und gezielte Maßnahmen zur Korrektur der Parameter des Schmiedeprozesses bzw. der integrierten Wärmebehandlung abzuleiten. Bei der Geometrieprüfung des Gesamtbauteils steht insbesondere die Detektion von thermisch bedingten Verzügen im Vordergrund, die sich in der Regel durch eine Verkippung der Lagersitz- und Verzahnungsachse zueinander äußern. Da die Achse des Lagersitzes der Ritzelwelle als Bauteilachse definiert wird (siehe Abschnitt 7.3.2), wirkt sich eine Verkippung von Lagersitz und Verzahnungsachse bei der Geometrieprüfung des Gesamtbauteils direkt auf die Abweichungen der Verzahnung aus. Neben den eigentlichen Verzahnungsabweichungen, die durch Betrachtung der Verzahnung unabhängig von der Geometrie des Gesamtbauteils nach Abschnitt 7.3.4 bestimmt werden, sind auch die Abweichungen zu berücksichtigen, die sich durch die Verkippung der Verzahnungsachse relativ zur Bauteilachse ergeben.

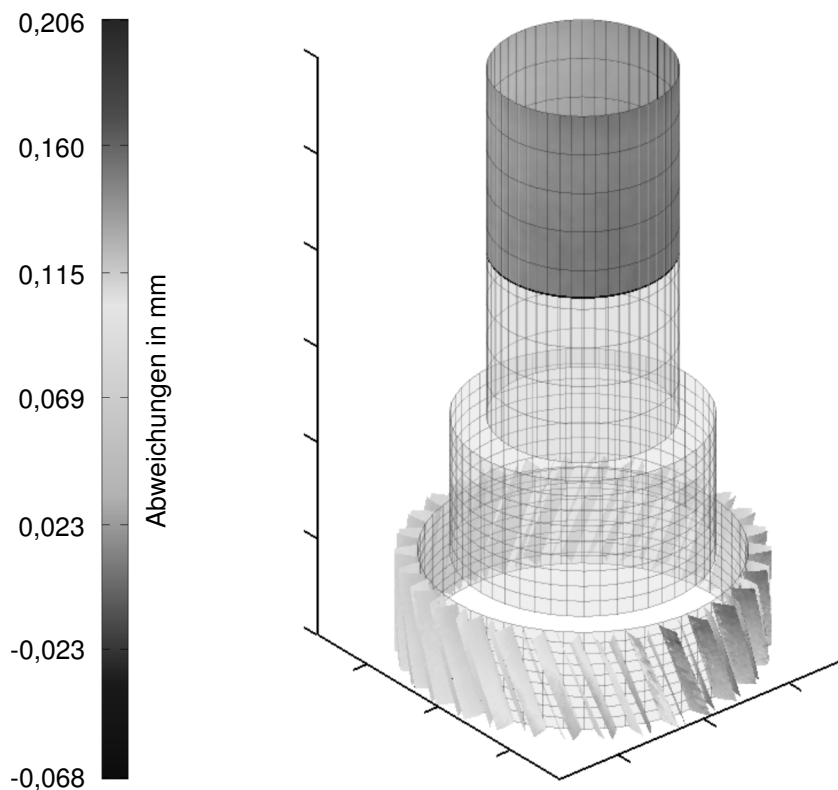


Abbildung 53: Farbcodierte Darstellung der Abweichungen des Lagersitzes und der Verzahnung auf einem Geometriemodell der Ritzelwelle

Abbildung 53 zeigt eine Darstellung der Abweichungen der Funktionsflächen einer Ritzelwelle von der Sollgeometrie des Gesamtbauteils. Die Abweichungen der Verzahnung sind unter Berücksichtigung der Verkippung der Verzahnungsachse zur Bauteilachse angegeben. Die Verzahnungsabweichungen sind sehr ungleichmäßig verteilt. Neben zufällig

verteilten individuellen Geometriefehlern treten deutliche systematische Abweichungen auf. Im vorderen linken Bereich sind an den linken und rechten Zahnflanken ausgeprägte positive Abweichungen zu erkennen. Im linken und im rechten Bereich überwiegen an den rechten Zahnflanken positive Abweichungen, während die linken Zahnflanken weitgehend der Sollgeometrie entsprechen. Im hinteren Teil verhält es sich umgekehrt. Die Abweichungen des Lagersitzes betragen nur wenige Mikrometer und sind sehr gleichmäßig über die Lagersitzoberfläche verteilt.

7.3.6 Quantifizierung der Abweichungen

Die Quantifizierung der Abweichungen einer Ritzelwelle von der Sollgeometrie wird einerseits getrennt für die Geometrielemente Lagersitz und Verzahnung durchgeführt. Andererseits ist es insbesondere für die Quantifizierung thermisch bedingter Verzüge notwendig, das Bauteil als Ganzes zu betrachten.

Die Geometrieinformationen einer Lagersitzmessung können durch Berechnung der Zylindrizität (siehe [N3]) und des Ist-Radius des Lagersitzes charakterisiert werden. Die Zylindrizität ist definiert als der Abstand t zweier koaxialer Zylinder, die die gemessene Mantelfläche eines zylindrischen Bauteils in radialer Richtung begrenzen (siehe Abbildung 54). Zur Berechnung der Zylindrizität ist es zunächst notwendig einen Zylinder als Ersatzformelement auf die Lagersitzmessdaten einzupassen. Die hierdurch bestimmte Zylinderachse wird als Achse der beiden, die Messdaten begrenzenden Zylinder herangezogen. Die Zylindereinpassung liefert zudem den Ist-Radius des Lagersitzes.

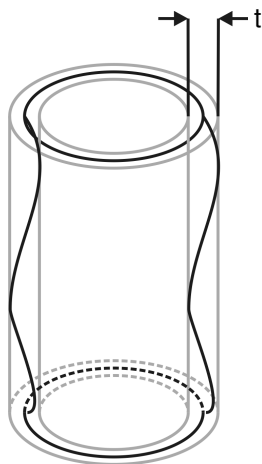


Abbildung 54: Definition der Zylindrizität nach DIN ISO 1101 [N3]

Zur Quantifizierung der Abweichungen der Ritzelwellenverzahnung werden, analog zur Geometrieprüfung eines Zahnrades (siehe Abschnitt 6.6.3), die bestehenden Kenngrößen zur linienhaften Abweichungsanalyse verwendet [Wen01, Mee05]. Mit Hilfe dieser Kenngrößen lassen sich flächenhafte Form- und Gesamtabweichungen bewerten, die in Profil- und in Flankenrichtung auftreten.

Durch thermische Effekte während des Schmiedeprozesses bzw. der integrierten Wärmebehandlung tritt in der Regel eine Verkippung der Achse der Ritzelwellenverzahnung im Bezug auf die als Bauteilachse definierte Lagersitzachse auf. Die Verkippung der Achsen der beiden Funktionselemente der Ritzelwelle kann durch die Berechnung der Koaxialität dieser Achsen quantifiziert werden [N3]. Die Koaxialität wird durch den Durchmesser t eines Zylinders definiert, dessen Achse mit der Bezugsachse, die in diesem Fall durch die Achse des Lagersitzes gegeben ist, übereinstimmt. Der Durchmesser t des Zylinders entspricht dem maximalen Abstand der Verzahnungsachse von der Lagersitzachse im Auswertebereich. Der Auswertebereich entspricht der Länge der Ritzelwelle. Die Definition der Koaxialität wird in Abbildung 55 veranschaulicht. Auf Grundlage der Berechnung der Koaxialität können Aussagen bezüglich der Ausprägung der Härteverzüge getroffen werden.

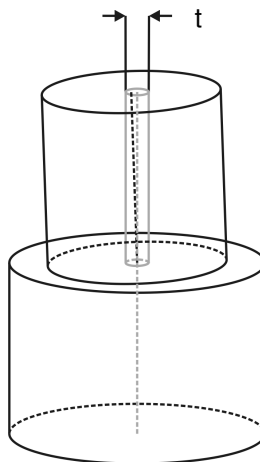


Abbildung 55: Definition der Koaxialität nach DIN ISO 1101 [N3]

7.4 Verzugsuntersuchungen an Ritzelwellen

Analog zu den in Abschnitt 6.7.2 vorgestellten Methoden zur Charakterisierung von Härteverzügen an Zahnrädern, ist es auch bei Verzugsuntersuchungen an Ritzelwellen notwendig, die Geometrie des zu untersuchenden Bauteils vor und nach der

Wärmebehandlung mit dem Streifenprojektionssensor zu erfassen. Die auf diese Weise erlangten Geometrieinformationen müssen für eine Berechnung der verzugsbedingten Geometrieänderungen miteinander verglichen werden. Um diesen Vergleich mit dem Polyworksmodul IMInspect durchführen zu können, ist es notwendig, die als Punktwolke vorliegenden Geometriedaten vor und nach der Wärmebehandlung in Polygonmodelle (siehe Abbildung 56) umzuwandeln.

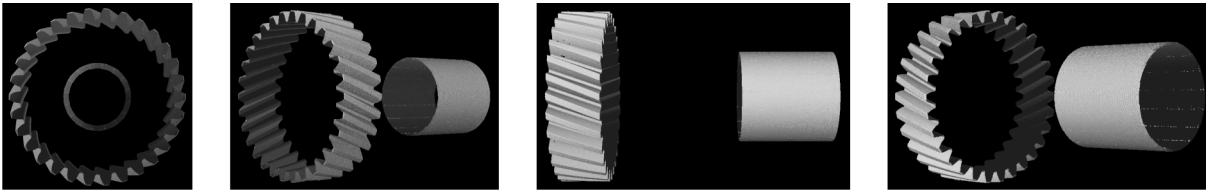


Abbildung 56: Polygonmodell der Funktionsflächen einer Ritzelwelle

Mit Hilfe des Polyworksmoduls IMInspect wird das Polygonmodell der Messdaten nach der Wärmebehandlung auf das Polygonmodell der Messdaten vor der Wärmebehandlung eingepasst, welches als Referenz betrachtet wird. Die Abweichungen der beiden Modelle voneinander werden anschließend orthogonal zur Oberfläche des Referenzmodells berechnet, und geben Aufschluss über die durch die Wärmebehandlung bedingten Verzüge.

Für eine qualitative Auswertung der Härteverzüge eignet sich insbesondere, analog zu den Verzugsuntersuchungen an Zahnrädern, eine farbcodierte 3D-Darstellung der Geometrieänderungen (siehe Abbildung 57). Hierdurch können die für Härteverzüge typischen systematischen Abweichungen schnell und sicher erkannt, sowie deren Ausprägung abgeschätzt und bewertet werden.

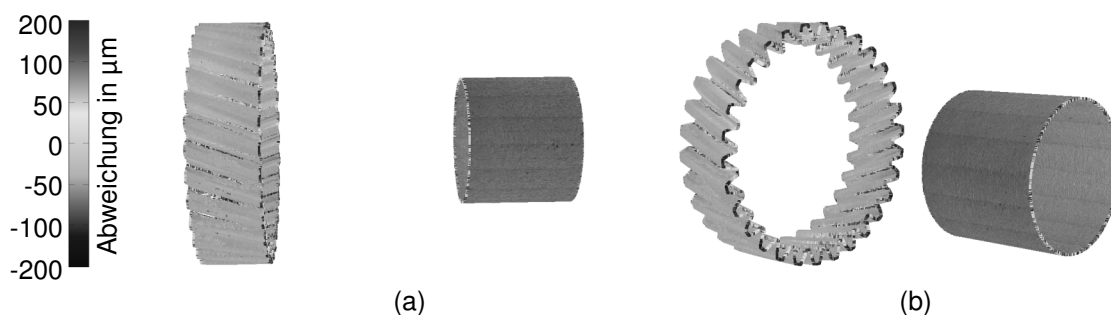


Abbildung 57: Farbcodierte Darstellung der Härteverzüge bei einer mit einem Zweiphasenspray wärmebehandelten Ritzelwelle

Abbildung 57 zeigt die verzugsbedingten Geometrieänderungen einer im Sprayfeld gehärteten Ritzelwelle in Form eines dreidimensionalen farbcodierten Geometriemodells. Die Verzahnung der Ritzelwelle weist einen homogenen und geringen Verzug auf. Auffällig ist eine geringe Schrägungswinkelabweichung. Im linken Teil der Verzahnung der Ritzelwelle in Teilabbildung (b) ist der Schrägungswinkel der gehärteten Verzahnung größer, im rechten Teil der Abbildung weist die gehärtete Verzahnung einen geringeren Schrägungswinkel auf, als die ungehärtete Referenz. Die maximalen Geometrieänderungen an der Verzahnung liegen in einem Bereich von ca. 75 μm . Zudem ist festzustellen, dass der Lagersitzradius der Ritzelwelle nach dem Härten etwa 30 μm geringer ist, als vor dem Härten.

Zur Quantifizierung der verzugsbedingten Abweichungen der Ritzelwellenverzahnung können die bereits in Abschnitt 6.7.2 vorgestellten Methoden zur Profillinienauswertung und zur Analyse der Kopf- und Fußkreisradiusänderungen verwendet werden. Die Härteverzüge des Lagersitzes lassen sich durch die in Abschnitt 7.3.6 angesprochene Bestimmung der Zylindrizität, sowie durch die Auswertung des Zylinderradius charakterisieren. Bei der Betrachtung der Verzüge des Gesamtbauteils eignet sich insbesondere die Auswertung der Koaxialität von Lagersitz und Verzahnungsachse der Ritzelwelle. Bei der Untersuchung der in Abbildung 57 dargestellten Ritzelwelle wurden die in Tabelle 2 angegebenen Kennwerte vor und nach dem Härten ermittelt. Es fällt auf, dass die Koaxialitätsabweichung von Lagersitz- und Verzahnungsachse durch den Härteprozess deutlich zunimmt, während die Abweichung des Lagersitzes von der Zylinderform geringer wird. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass der Lagersitzradius nach dem Härten einen kleineren Wert annimmt als vor dem Härten. Dieser Effekt lässt sich vermutlich auf Änderungen der Eigenspannungsverhältnisse im Bauteil durch die Wärmebehandlung zurückführen.

Kenngröße	ungehärtet	gehärtet
Lagersitzradius in mm	17,787	17,746
Zylindrizität in mm	0,024	0,017
Koaxialität in mm	0,089	0,123

Tabelle 2: Kennwerte zur Quantifizierung der Geometrieabweichungen des Lagersitzes einer Ritzelwelle vor und nach dem Härten

8 Geometrieprüfung von Kurbelwellen im Multisensorsystem

Im Rahmen der Forschungsarbeiten des SFB 489 wird die endkonturnahe Warmmassivumformung von Einzylinder- und Zweizylinderkurbelwellen als nicht-rotationssymmetrische Langteile untersucht. Die Hauptgeometrielemente dieser Bauteile sind die zylindrischen Haupt- und Hublagersitze, sowie die Kurbelwangen, die auf einem komplexen Konturzug aus Kreis- und Geradensegmenten basieren (siehe Abbildung 58). Die Oberflächen der Haupt- und Hublagersitze stellen die Funktionsflächen des Bauteils dar.

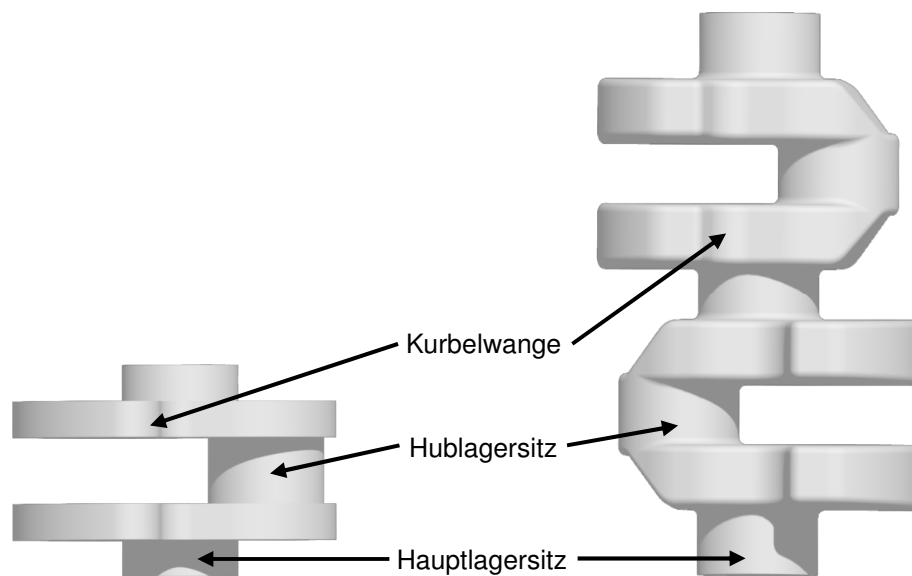


Abbildung 58: Geometrielemente von Kurbelwellen

Während der umformenden Herstellung der Kurbelwellen werden die Hauptlagersitze simultan ausgeformt. Durch thermische Effekte während der Umformung bzw. der integrierten Wärmebehandlung treten in der Regel Verzüge auf, die eine Verkipfung der Hauptlagerachsen gegeneinander bewirken. Aufgrund dieser Achsverkipfung können die Hauptlagersitze nicht als Bezugselemente zum Einbringen von auf der Bauteilachse befindlichen Zentrierbohrungen herangezogen werden. Auf Basis der äußeren Hauptlagersitze können somit nur vorläufige Zentrierbohrungen eingebracht werden, die nicht für eine funktionsorientierte Geometrieprüfung verwendet werden können. Die Geometrieprüfung der

umformend hergestellten Kurbelwellen geschieht daher auf Grundlagen eines fertigungsorientierten Bezugssystems, welches auf den vorläufigen Zentrierbohrungen basiert.

Aufgrund der umformenden Herstellung und der prozessintegrierten Wärmebehandlung der Kurbelwellen treten in der Regel thermisch bedingte systematische Abweichungen an den Lagersitzen und Kurbelwangen auf. Eine umfassende Analyse dieser verzugsbedingten Geometriefehler kann auf Grundlage einer Werkstückeinhüllenden durchgeführt werden. Die Einhüllende besteht aus einer Vielzahl von Werkstückkonturen, die mit Hilfe der Schattenprojektionstechnik in unterschiedlichen Winkelpositionen des Bauteils relativ zur Sensorik gemessen werden. Durch Auswertung der Einhüllenden können beispielsweise Aussagen bezüglich der Koaxialität der Haupt- und Hublagersitzachsen, sowie der Rechtwinkligkeit der Lagersitzachsen zu den Kurbelwangen getroffen werden.

Eine flächenhafte Geometrieprüfung der Funktionsflächen der Kurbelwellen wird durch eine vollständige Erfassung mittels Streifenprojektion ermöglicht. Zur Bestimmung und Visualisierung der Abweichungen von der Sollgeometrie wird ein Vergleich der flächenhaften Geometriedaten mit dem CAD-Modell der Kurbelwelle durchgeführt.

Zur Erfassung einer Werkstückeinhüllenden und zur flächenhaften Geometrieprüfung der Funktionsflächen von Kurbelwellen wird ein optisches Multisensorsystem auf Basis eines Schattenprojektionssystems und eines Streifenprojektionssensors eingesetzt.

8.1 Systemaufbau

Das auf der Schattenprojektionstechnik basierende Wellenmesssystem Hommel-Etamic AMV923V stellt das Kernstück des optische Multisensorsystem dar. In das Wellenmesssystem wurde ein Streifenprojektionssensor zur flächenhaften Erfassung der Haupt- und Hublagersitze von Kurbelwellen integriert. Um ein präzises Anfahren der jeweiligen Messpositionen mit dem Streifenprojektionssensor zu ermöglichen, wird ein Vier-Achs-Positioniersystem eingesetzt. Die Integration der zusätzlichen Komponenten in das Wellenmesssystem geschieht auf Basis einer stabilen Aufnahmekonstruktion aus hochgenau gefertigten Aluminiumplatten (siehe Abbildung 59). Die Aufnahmekonstruktion muss steif genug sein, um eine Verkippung des Streifenprojektionssensors durch die Momente, die aufgrund der Bewegung des Achssystems auftreten, zu verhindern.

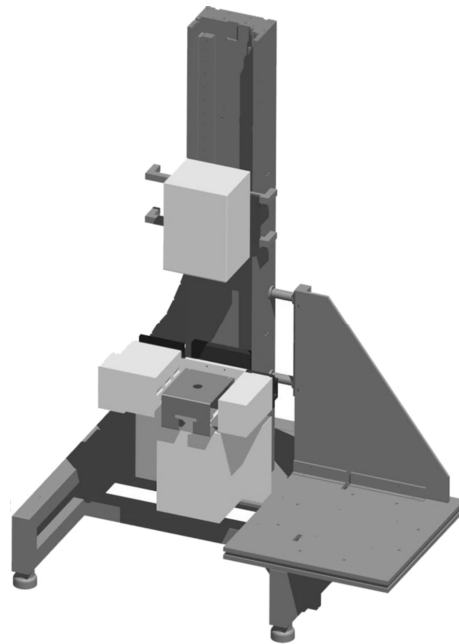


Abbildung 59: Schattenprojektionssystem und Aufnahmekonstruktion des Vier-Achs-Positioniersystems [Nam07]

Der Aufbau des Multisensorsystems inklusive des Vier-Achs-Positioniersystems wird in Abbildung 60 gezeigt.

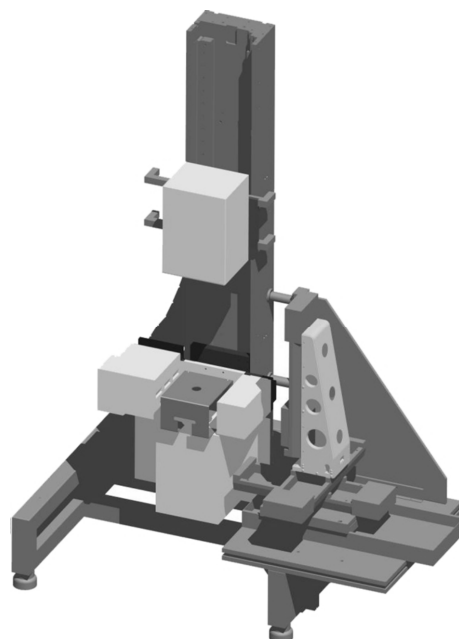


Abbildung 60: Schattenprojektionssystem mit Aufnahmekonstruktion und Vier-Achs-Positioniersystem [Nam07]

8.1.1 Beschreibung des optischen Wellenmesssystems

Das nach dem Schattenprojektionsprinzip (siehe Abschnitt 4.7) arbeitende Wellenmesssystem AMV923V der Fa. Hommel-Etamic GmbH stellt die Basis des optischen Multisensorsystems dar [NN07]. Mit Hilfe des Messsystems lassen sich innerhalb von wenigen Sekunden berührungslos Konturen des zu messenden Werkstücks in unterschiedlichen Winkelstellungen der integrierten Rotationsachse aufnehmen. In der Industrie übernimmt das optische Wellenmesssystem zunehmend die Messaufgaben taktiler Messsysteme bei der Geometrieprüfung eng tolerierter Bauteile wie Antriebs-, Nocken-, Gelenk- und Kurbelwellen. Mit dem Messsystem können Wellen mit einem Durchmesser von 0,2 mm bis 230 mm und einer Länge von bis zu 900 mm gemessen werden. Die Auflösung für Durchmesser- und Längenmessungen beträgt jeweils 0,5 μm . Die Winkelauflösung der Rotationsachse beträgt 0,0018°. Abbildung 61 zeigt das Wellenmesssystem mit Steuereinheit.

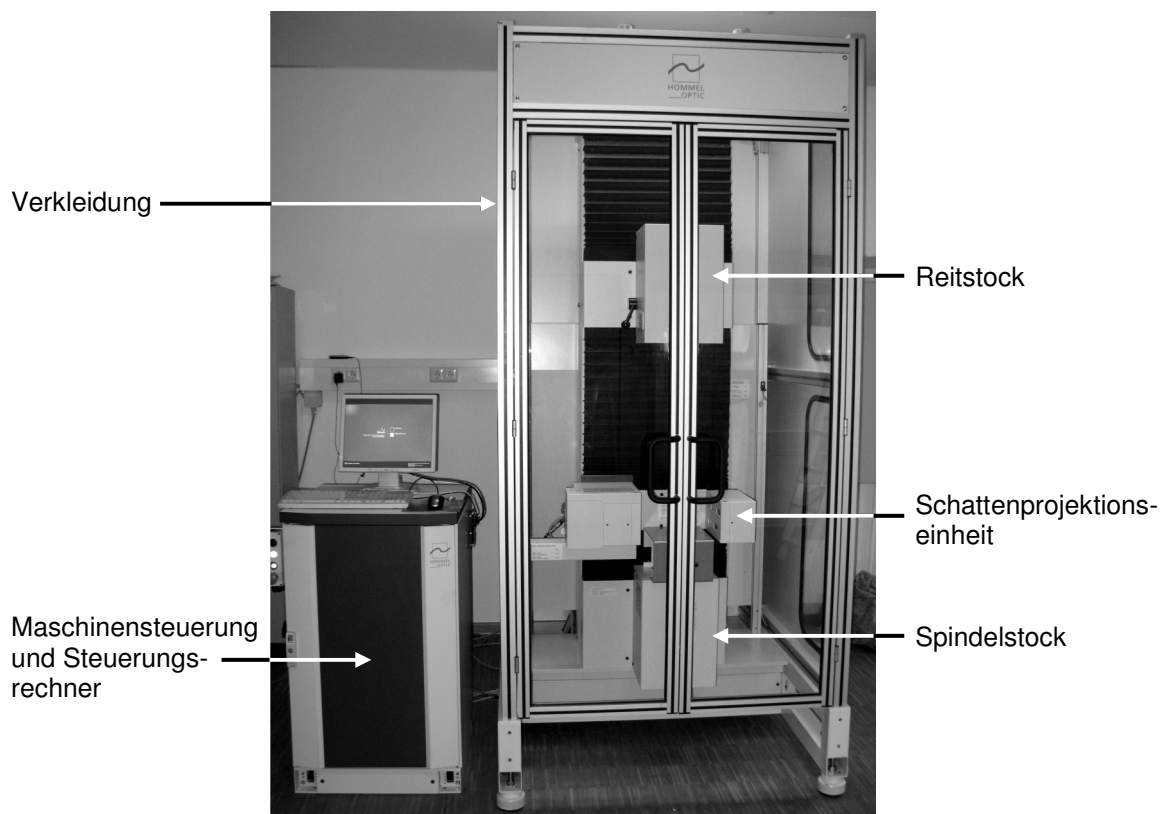


Abbildung 61: Optisches Wellenmesssystem Hommel Opticline AMV923V

Die Schattenprojektions-einheit des Wellenmesssystems besteht aus fünf gestaffelt in zwei Ebenen angeordneten LED-Lichtquellen (LED – Light Emittig Diode) auf der Beleuchtungsseite, und analog positionierten CCD-Sensoren auf der Detektorseite (siehe

Abbildung 62). Mit Hilfe der Lichtquellen wird infrarotes Licht über telezentrische Projektionsoptiken auf das zu messende Bauteil gestrahlt. Das Licht, das nicht durch das Bauteil abgeschattet wird, wird durch telezentrische Aufnahmeoptiken auf die CCD-Flächen der Detektoren abgebildet. Durch die Anordnung der Beleuchtungs- und Sensorelemente wird die Messung von Bauteilen mit einem Durchmesser von bis zu 230 mm ermöglicht. Der Einsatz mehrerer kleiner Schattenprojektionselemente ermöglicht den Verzicht auf große telezentrische Optiken, die im Vergleich zu kleineren Optiken sehr aufwändig und teuer herzustellen sind. An der Schattenprojektionseinheit des Wellenmesssystems ist zusätzlich ein taktils Tastsystem zur Aufnahme von Planläufen angebracht (Abbildung 62).

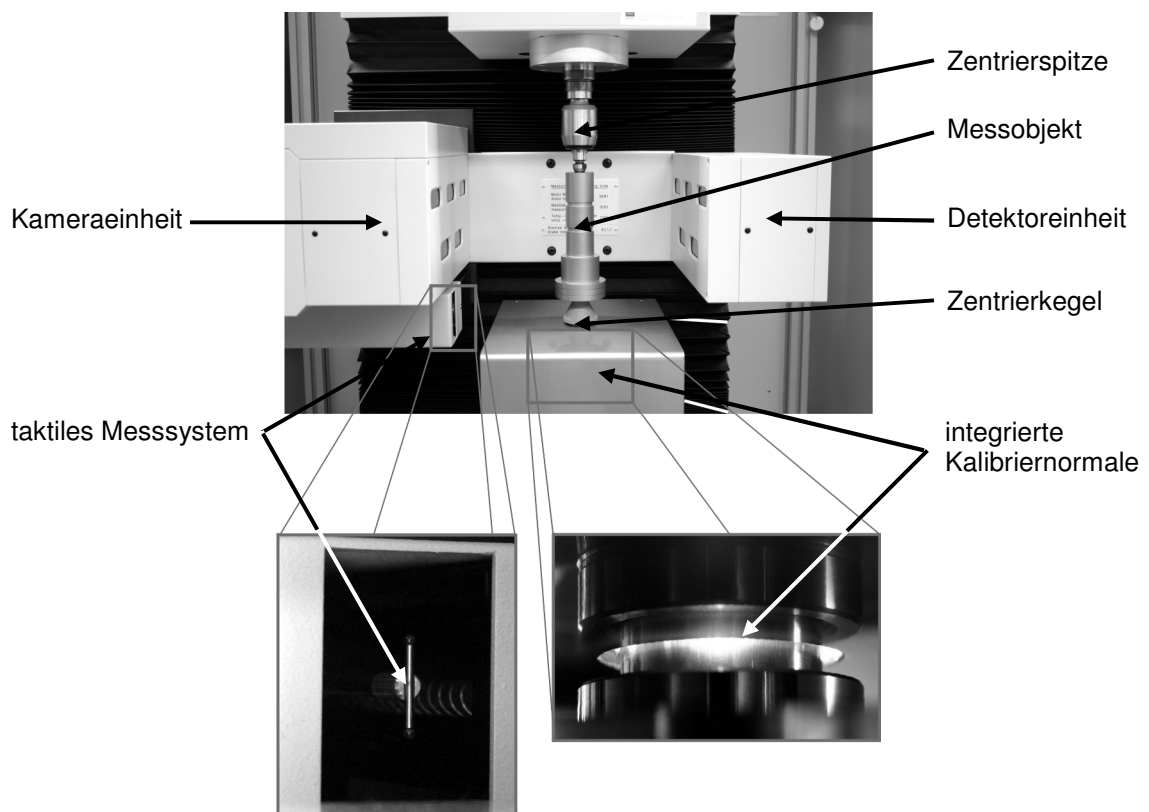


Abbildung 62: Schattenprojektionseinheit des Wellenmesssystems

Zur Konturerfassung wird das Messobjekt über den Zentrierkegel des Spindelstocks und eine mitlaufenden Zentrierspitze des Reitstocks gespannt. Der Zentrierkegel ist zur Vermeidung von Schlupf bei einer rotatorischen Beschleunigung des Bauteils mit einer Hartmetallbeschichtung versehen. Mit Hilfe der integrierten Kalibriernormale erfolgt in regelmäßigen Abständen eine Kalibrierung der Schattenprojektionseinheit. Auf diese Weise wird insbesondere eine Kompensation von Temperatureffekten erreicht.

8.1.2 Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems

Das zur flächenhaften Geometrieprüfung der Funktionsflächen von Kurbelwellen eingesetzte Streifenprojektionssystem ist identisch mit dem in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Streifenprojektionssystem zur Ritzelwellenmessung.

8.1.3 Beschreibung des Vier-Achs-Positioniersystems

Das für den Aufbau des Multisensorsystems verwendete Vier-Achs-Positioniersystem besteht aus drei orthogonal zueinander angeordneten Linearachsen der Fa. Newport Corporation sowie einer hochbelastbaren Positionierachse der Fa. RSF Elektronik GmbH. Abbildung 63 zeigt den Aufbau der drei orthogonal angeordneten Linearachsen.

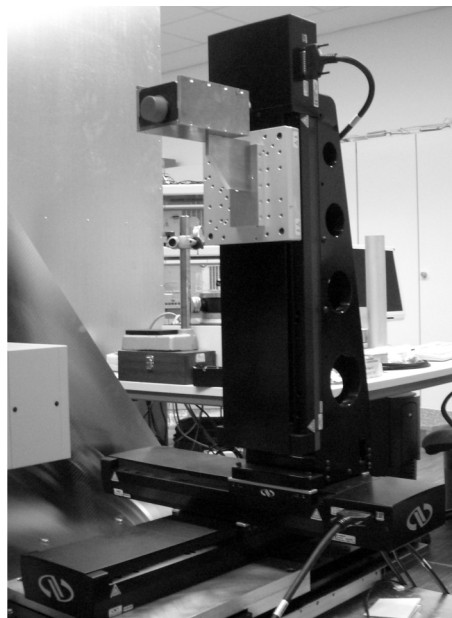


Abbildung 63: Positioniersystem bestehend aus drei Linearachsen der Fa. Newport Corporation

Die drei Linearachsen der Fa. Newport Corporation bilden ihrerseits ein Drei-Achs-Positioniersystem, mit dessen Hilfe der zur flächenhaften Erfassung der Kurbelwellenlagersitze benötigte Streifenprojektionssensor hochgenau im Messvolumen verfahren werden kann. Zur Positionierung des Sensors in der xy-Ebene werden zwei Positionierachsen des Typs M-IMS300PP eingesetzt, während für eine Positionierung in z-Richtung eine Positionierachse des Typs M-IMS300V verwendet wird, welche extra für vertikale Verstellwege und Lasten bis zu 100 N ausgelegt ist [NN05, NN05b, NN05c]. Die

vertikale Positionierachse wird mit Hilfe eines hochgenau gefertigten Montagewinkels auf der Positionierachse für die y-Richtung angebracht. Tabelle 3 zeigt die technischen Daten der Linearachsen des Drei-Achs-Positioniersystems.

Typ Positionierachse	M-IMS300PP		M-IMS300V	
Material	stranggepresstes Aluminium			
Führungen	zweireihige Kugelumlauf Führungen mit Kugelmutter			
Antriebsmechanismus	umkehrspielfreie Kugelumlaufspindel			
Steigung der Verstellschraube in mm	5		3	
Verstellbereich in mm	300		300	
	typisch	garantiert	typisch	garantiert
unidirektionale Wiederholgenauigkeit in μm	0,7	1,25	0,2	0,5
Umkehrfehler in μm	0,5	1,25	0,05	0,5
Genauigkeit entlang der Achse in μm	7	15	2,5	10

Tabelle 3: Technische Daten der Linearachsen des Drei-Achs-Positioniersystems [NN05, NN05b, NN05c]

Mit der hochbelastbaren Positionierachse kann das Drei-Achs-Positioniersystem mit dem Streifenprojektionssensor aus dem Bewegungsbereich der Schattenprojektionseinheit gefahren werden. Hierdurch wird einer Kollision der unterschiedlichen Sensoren im Messverlauf vorgebeugt. Die Positionierachse besitzt einen Linearmaßstab mit 80000 physikalischen Strichen auf 400 mm. Bei einer 50-fachen Interpolation ergibt sich daraus eine Auflösung von 0,1 μm für das Verfahren der unteren Positionierachse.

Zur reproduzierbaren Befestigung des Streifenprojektionssensors an der vertikal orientierten Linearachse des Drei-Achs-Positioniersystems, werden zwei Adapterplatten aus Aluminium verwendet (siehe Abbildung 64). Adapterplatte (a) wird an der Aufnahmevorrichtung der vertikalen Linearachse angebracht, während an Adapterplatte (b)

der Streifenprojektionssensor befestigt wird. Beide Adapterplatten verfügen über kreuzförmig angeordnete Messinginlays mit V-förmiger Nut. In die Nuten der Messinginlays von Adapterplatte (a) sind zudem Zentrierstifte eingearbeitet worden. Hierdurch wird eine hohe Wiederholgenauigkeit bei der Befestigung beider Adapterplatten aneinander gewährleistet.

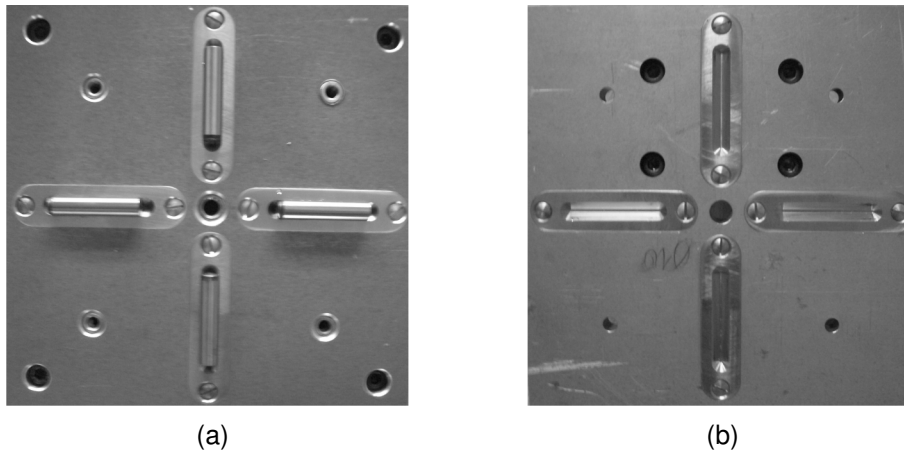


Abbildung 64: Adapterplatten zur Befestigung von Sensoren an der Positioniervorrichtung

8.2 Geometrieerfassung von Kurbelwellen mittels Multisensortechnik

Zur Geometrieerfassung von Kurbelwellen wird ein optisches Multisensorsystem, bestehend aus einem Schattenprojektionssensor und einer Streifenprojektionseinheit, eingesetzt. Der Streifenprojektionssensor ist an einer Positioniervorrichtung aus drei orthogonal zueinander stehenden Linearachsen angebracht, mit der er in die jeweilige Messposition gefahren wird. Um eine Positionierung des Streifenprojektionssensors im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem, welches auf der Drehachse des Schattenprojektionssystems aufgebaut ist zu ermöglichen, ist zunächst die Verkippung der Koordinatensysteme von Streifenprojektionssensor, Schattenprojektionssystem und Positioniersystem zu bestimmen.

Mit Hilfe der Streifenprojektionstechnik werden die Lagersitzoberflächen der zu messenden Kurbelwelle in mehreren gleichmäßig über den Vollkreis verteilten Winkelpositionen flächenhaft erfasst. Bei der Messung der Hublagersitze ist es notwendig den Streifenprojektionssensor dem Hublager mit Hilfe der Positioniervorrichtung auf einer Kreisbahn nachzuführen.

Die Schattenprojektionstechnik wird zur Aufnahme einer Werkstückeinhüllenden eingesetzt. Hierzu werden in einer Vielzahl von definierten Winkelpositionen Längskonturen des Werkstücks erfasst.

8.2.1 Koordinatensystemabgleich

Um sowohl die Haupt- als auch die Hublagersitze von Kurbelwellen mit dem Streifenprojektionssensor erfassen zu können, ist es notwendig den Sensor über dem jeweils zu messenden Geometrielement zu positionieren. Die Positionierung des Streifenprojektionssensors geschieht bei der Hauptlagermessung entlang der Drehachse des Wellenmesssystems. Zur Erfassung der Hublagersitze in verschiedenen Winkelpositionen der Rotationsachse muss der Streifenprojektionssensor dem Hublager nachgeführt werden. Die einzelnen Messpositionen befinden sich in diesem Fall auf einer Kreisbahn.

Um eine Positionierung des Streifenprojektionssensors im vorläufigen, an der Drehachse des Wellenmesssystems orientierten Werkstückkoordinatensystem zu ermöglichen, ist es notwendig, den Zusammenhang der Koordinatensysteme von Wellenmesssystem und Drei-Achs-Positioniersystem zu bestimmen. Zur Bestimmung dieses Zusammenhangs wird der am Positioniersystem befestigte Streifenprojektionssensor eingesetzt. Um den Streifenprojektionssensor für diese Aufgabe nutzen zu können, muss zunächst die Verkippung der Koordinatensysteme von Streifenprojektionssensor und Wellenmesssystem berechnet werden. Die Analyse der Verkippung dieser Koordinatensysteme wird durch die Erfassung der Drehachse eines im Wellenmesssystem gespannten Zylindernormals ermöglicht. Die Bestimmung der Drehachse des Zylindernormals erfolgt analog zur Bestimmung der Drehachse eines Zylindernormals bei der Zahnradmessung (siehe Abschnitt 6.4) durch eine flächenhafte Erfassung der Zylindermantelfläche mit dem Streifenprojektionssensor. Die Drehachse des Zylindernormals entspricht der z-Achse des Koordinatensystems des Streifenprojektionssensors.

Im Anschluss an die Berechnung der Verkippung der Koordinatensysteme von Streifenprojektionssensor und Wellenmesssystem kann die Bestimmung des Zusammenhangs der Koordinatensysteme von Wellenmesssystem und 3-Achs-Positioniersystem durchgeführt werden. Dies geschieht auf Grundlage von Messungen an einer Referenzkugel mit diffus streuender Oberfläche, die über einen Schaft mit Gewinde an einem Zylindernormal befestigt ist (siehe Abbildung 65). Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Zusammenhangs der

Koordinatensysteme ist analog zu der in Abschnitt 7.2.1 vorgestellten Methode zum Koordinatensystemabgleich.

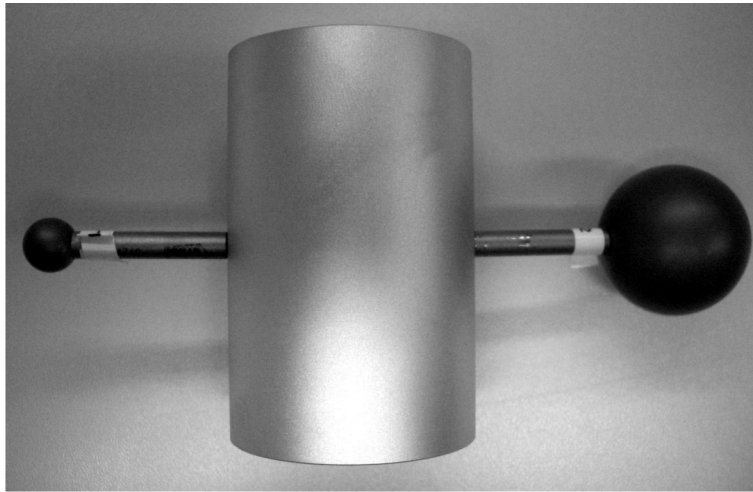


Abbildung 65: Zylindernormal mit Referenzkugeln

Auf Grundlage der durch die Kugelmessungen in verschiedenen Positionen der Linearachsen des Drei-Achs-Positioniersystems erhaltenen Einheitsvektoren wird eine Transformationsmatrix zur Umrechnung von Translationen im Koordinatensystem des Wellenmesssystems in das Koordinatensystem des Positioniersystems aufgestellt. Mit Hilfe dieser Transformationsmatrix lassen sich die Translationen zum Anfahren der Messpositionen des Streifenprojektionssensors, die sich anhand des CAD-Modells des Messobjekts im Koordinatensystem des Wellenmesssystems ergeben, in die Translationen umrechnen, die mit dem Positioniersystem durchgeführt werden müssen.

8.2.2 Flächenhafte Erfassung der Funktionsflächen von Kurbelwellen

Vor Beginn der Messungen ist es notwendig, die Kurbelwelle definiert im Koordinatensystem des Wellenmesssystems auszurichten. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde die Kurbelwelle stets so ausgerichtet, dass das (untere) Hublager in Richtung der y-Achse des Koordinatensystems des Wellenmesssystems zeigt. Hierzu wird mittels Schattenprojektion eine Rotationskontur des unteren Hublagers gemessen. Zur Aufnahme einer Rotationskontur wird die Schattenprojektionseinheit in eine feste Messposition entlang der Bauteilachse gefahren. Anschließend wird die Kontur des rotierenden Bauteils in Abhängigkeit von der Winkelposition der Drehachse erfasst. Die in den Messdaten der aufgenommenen Rotationskontur angegebene Winkelposition, die den

größten positiven Wert in y-Richtung aufweist, entspricht der Winkelposition, die zur Werkstückausrichtung mit Hilfe der Drehachse des Wellenmesssystems anzufahren ist. Diese Winkelposition wird im Folgenden als Ausgangswinkelposition bezeichnet.

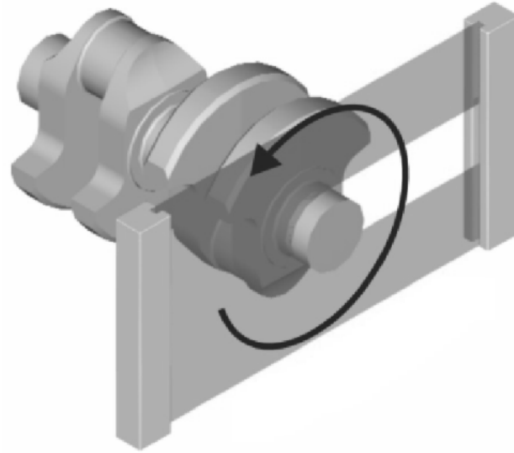


Abbildung 66: Aufnahme einer Rotationskontur mit Hilfe der Schattenprojektionstechnik

Die Vorgehensweise zur Messung eines einzelnen Hauptlagers einer Kurbelwelle ist analog zur in Abschnitt 7.2.2 beschriebenen Vorgehensweise zur Erfassung des Lagersitzes einer Ritzelwelle. Der Streifenprojektionssensor ist zunächst so über dem Lagersitz der Kurbelwelle zu positionieren, dass die Lagersitzachse näherungsweise den Mittelpunkt des Messvolumens des Streifenprojektionssensors bezogen auf die xy -Ebene durchläuft. Der vertikale Abstand von Sensor und Messobjekt ist so zu wählen, dass das Messvolumen in vertikaler Richtung optimal ausgenutzt wird. Die Erfassung der Oberfläche des Lagersitzes geschieht durch Messungen in 8-16 äquidistant über den Vollkreis verteilten Winkelpositionen der Drehachse des Wellenmesssystems. Nach erfolgter Messung wird die Kurbelwelle wieder in die Ausgangswinkelposition gedreht. Der Streifenprojektionssensor wird anschließend mit Hilfe der Positioniervorrichtung entlang der durch Messungen an einem Zylindernormal bestimmten Drehachse des Wellenmesssystems in die Messposition zur Aufnahme des zweiten Hauptlagersitzes bewegt. Die Messposition ergibt sich aus der technischen Zeichnung der Kurbelwelle. Auch hier wird die Geometrieerfassung in 8-16 äquidistanten Winkelpositionen durchgeführt. Für die Messung weiterer Hauptlagersitze wird analog vorgegangen.

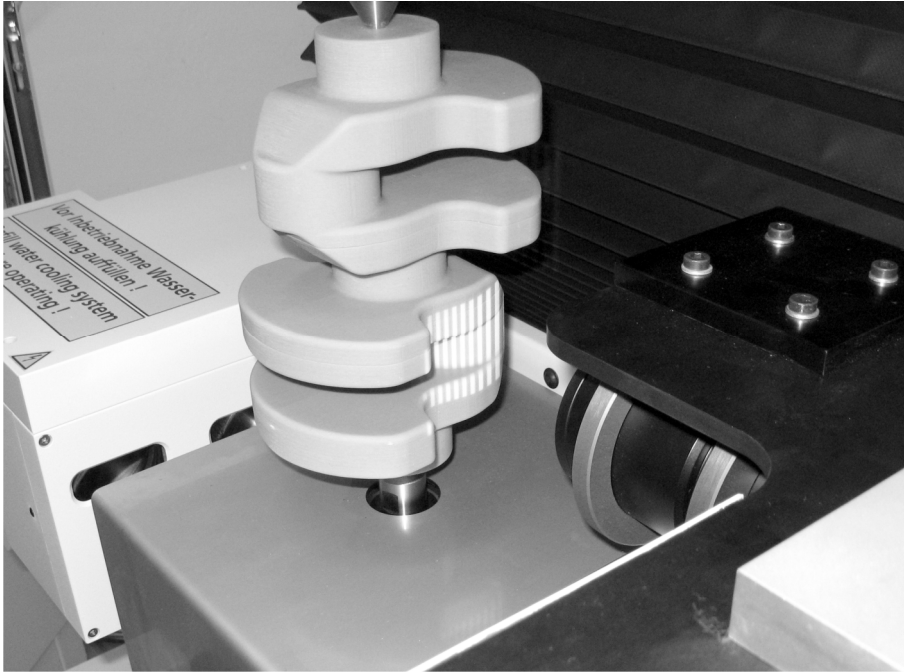


Abbildung 67: Flächenhafte Erfassung des unteren Hublagers eines Kurbelwellenmodells mittels Streifenprojektion

Zur Messung des ersten Hublagersitzes wird die Kurbelwelle zunächst in die Ausgangswinkelposition gedreht. Der Streifenprojektionssensor wird anschließend im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem der Kurbelwelle in die Messposition bewegt. Da die Hublager einer Kurbelwelle exzentrisch bezüglich der Bauteilachse angeordnet sind, ist es notwendig den Streifenprojektionssensor zur Geometrieerfassung dem Hublagersitz nachzuführen. Zu jeder der 8-16 Einzelmessungen, die in unterschiedlichen Winkelpositionen durchgeführt werden, muss der Streifenprojektionssensor im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem in die jeweilige Messposition verfahren werden. Zur Messung weiterer Hublagersitze wird die Kurbelwelle jeweils in die Ausgangswinkelposition gedreht. Die Geometrieerfassung geschieht analog zur Messung des ersten Hublagersitzes.

8.2.3 Erfassung einer Werkstückeinhüllenden

Mit Hilfe der Schattenprojektionseinheit können neben den bereits erwähnten Rotationskonturen auch Längskonturen des Werkstücks aufgenommen werden. Bei der Aufnahme einer Längskontur befindet sich die Kurbelwelle in einer festen Winkelposition, während die Schattenprojektionseinheit parallel zur Bauteilachse bewegt wird. Eine Längskontur besteht aus einer links- und einer rechtsseitigen Teilkontur, die sich, bezogen auf die Drehachse des Messsystems, um 180° gegenüber liegen (siehe Abbildung 68). Zur

Erfassung einer Werkstückeinhüllenden wird, beginnend bei der Ausgangswinkelposition, eine Vielzahl von Längskonturen der Kurbelwelle in äquidistanten Winkelpositionen der Drehachse des Wellenmesssystems aufgenommen. Aufgrund der gleichzeitigen Aufnahme zweier sich gegenüberliegender Teilkonturen, muss die Kurbelwelle zur Erfassung der Werkstückeinhüllenden lediglich in einem Winkelintervall von 180° gemessen werden.

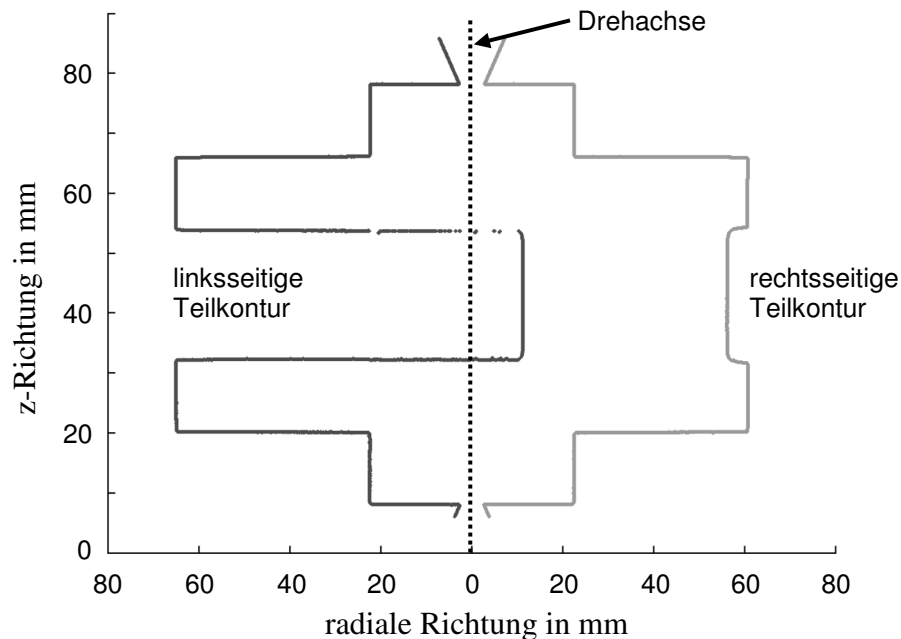


Abbildung 68: Mit Hilfe des Schattenprojektionssystems erfasste links- und rechtsseitige Teilkonturen einer Einzylinderkurbelwelle

8.3 Abweichungsanalyse

Im Rahmen dieses Teilkapitels werden Methoden zur Rekombination, Fusion, Abweichungsberechnung, Visualisierung und Quantifizierung der mittels Streifen- und Schattenprojektion erfassten Messdaten vorgestellt.

8.3.1 Rekombination der Messdaten

Vor der Rekombination der mittels Streifenprojektion flächenhaft erfassten Messdatensätze zur Gesamtgeometrie der Lagersitze einer Kurbelwelle werden die Messdaten entsprechend den in Abschnitt 6.5.1 vorgestellten Methoden bearbeitet. Die Rekombination der Messdatensätze der Haupt- und Hublagersitze geschieht anschließend analog zu der in Abschnitt 6.5.2 genannten Vorgehensweise zur Rekombination der Verzahnungsgeometrie.

Durch die Nachführung des Streifenprojektionssensors bei der Hublagermessung wird deren Exzentrizität im Bezug auf die Drehachse des Messsystems bei der Rekombination der Messdaten kompensiert. Dies hat zur Folge, dass Haupt- und Hublagersitze auf identische Weise rekombiniert werden können. Der erste Schritt der Messdatenrekombination besteht in der Transformation der einzelnen Messdatensätze in ein gemeinsames vorläufiges Werkstückkoordinatensystem. Dieses Koordinatensystem basiert auf der durch Messungen an einem Zylindernormal bestimmten Drehachse des Messsystems. Bei der Rekombination der Messdaten ist die Lage der einzelnen Lagersitze in der Ausgangswinkelposition zueinander zu beachten. Abbildung 69 zeigt die rekombinierten flächenhaften Lagersitzmessdaten einer Einzylinderkurbelwelle.

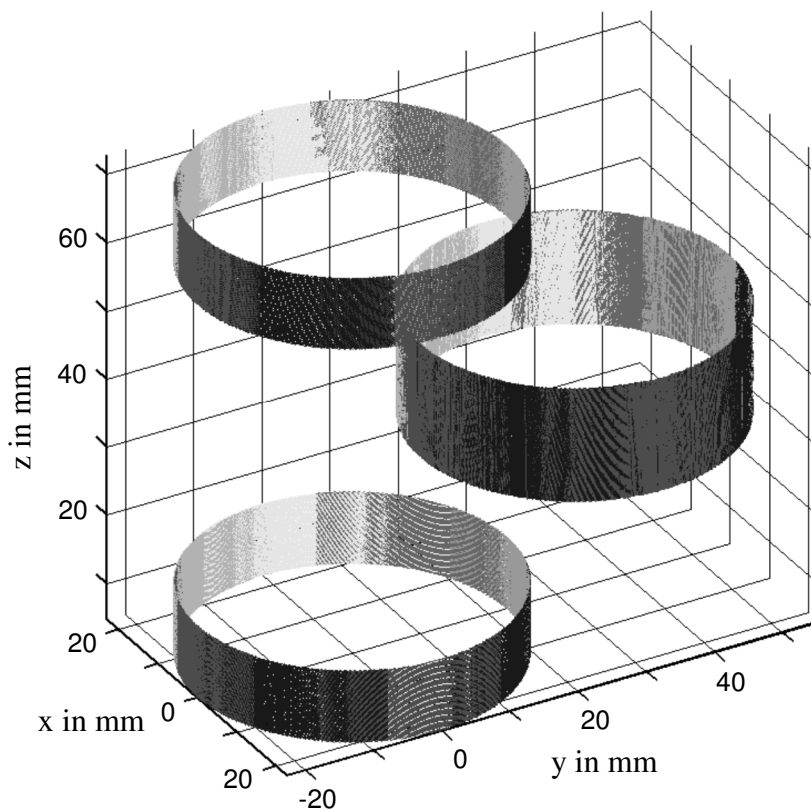


Abbildung 69: Rekombinierte flächenhafte Lagersitzmessdaten

Die mittels Schattenprojektion aufgenommenen Konturmessdaten bestehen aus einer Vielzahl von links- und rechtsseitigen Teilkonturen des Werkstücks (siehe Abbildung 68). Diese enthalten, wie in Abbildung 70 gezeigt, neben den Geometrieinformationen der Lagersitze und Teilen der Kurbelwangen, auch die Zentrierkegel sowie die als Fasen

ausgeführten Übergangsbereiche zwischen den Hauptgeometrieelementen. Ohne Berücksichtigung der Winkelstellung der Rotationsachse des Wellenmesssystems bei der jeweiligen Konturaufnahme, liegen sämtliche Werkstückkonturen zunächst in einer Ebene.

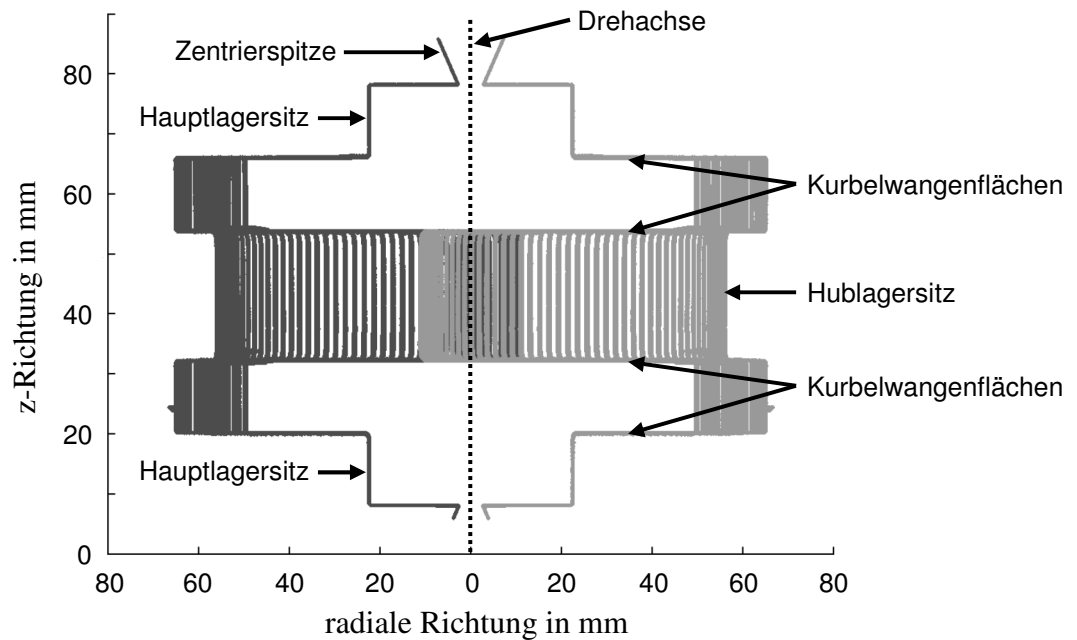


Abbildung 70: Unbearbeitete Konturrohdaten einer Kurbelwellenmessung mit dem Schattenprojektionssensor

Die Übergangsbereiche können aufgrund von Abschattungseffekten durch eine eventuelle Verkippung der Kurbelwangen im Bezug zur Drehachse, wie sie insbesondere durch thermisch bedingte Verzüge infolge der Wärmebehandlung hervorgerufen wird, nicht sicher erfasst werden. Daher werden vor der Messdatenauswertung sowohl die Übergangsbereiche als auch die Geometrieinformationen der Zentrierkegel aus den Messdatensätzen entfernt. Abbildung 71 zeigt die vorverarbeiteten Konturdaten einer Kurbelwellenmessung mit dem Schattenprojektionssensor.

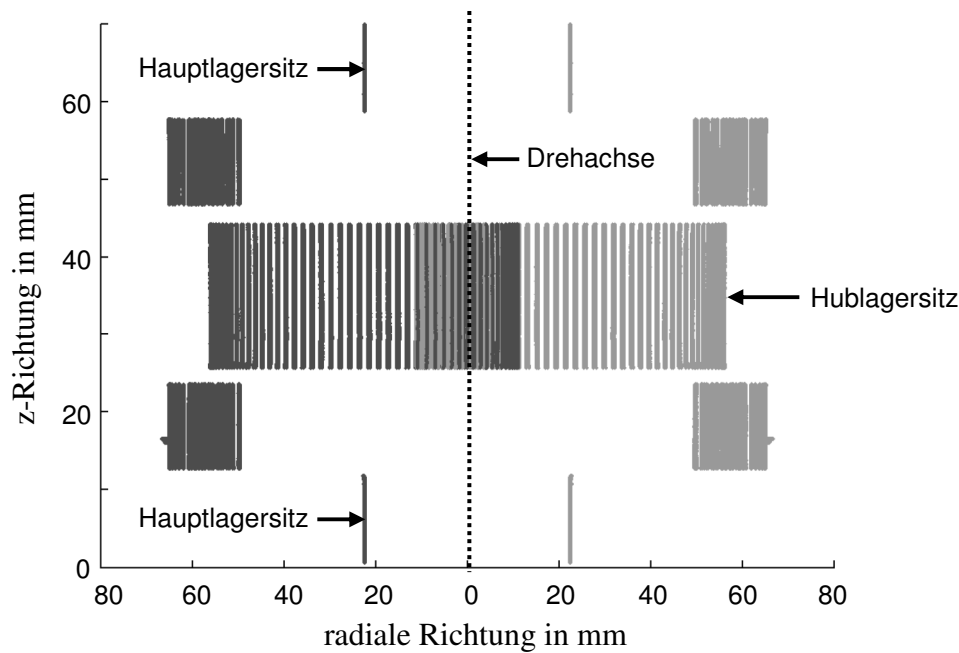


Abbildung 71: Vorverarbeitete Konturdaten einer Kurbelwellenmessung mit dem Schattenprojektionssensor

Im Anschluss an die Messdatenvorverarbeitung werden die einzelnen Werkstückkonturen, auf Basis der Winkelinformation der Rotationsachse während der Konturerfassung, zu einer Werkstückeinhüllenden rekombiniert. Wird die Winkelinformation zu der radialen- und vertikalen Koordinate der Konturdatensätze hinzugefügt, können diese als in Zylinderkoordinaten gegeben angesehen werden. Die zu den Hauptlagersitzen und den Kurbelwangen gehörenden Konturbereiche können somit sofort zu einer Einhüllenden des jeweiligen Geometrieelements rekombiniert werden. Bei der Rekombination der den Hublagersitzen zuzuordnenden Konturdaten müssen zunächst die radialen Komponenten um die winkelabhängige Exzentrizität des Hublagers in Richtung der Drehachse verschoben werden. Für die um die Hublagerexzentrizität verschobene radiale Komponente der Hublagerkonturdaten gilt:

$$r_{hub} = |r_{ex}| - hub \cdot \cos(\vartheta) \quad (8.1)$$

mit:

r_{hub} : um die Hublagerexzentrizität verschobene Hublagerkonturdaten,

r_{ex} : radiale Komponente der Hublagerkonturdaten,

hub : Exzentrizität des Hublagers,

ϑ : Polarwinkel.

Die Rekombination geschieht anschließend analog zur Rekombination der Hauptagersitze. Die Hublagersitzmessdaten werden im Anschluss an die Rekombination um die Hublagerexzentrizität in radialer Richtung verschoben.

Abbildung 72 zeigt die aus der Messdatenrekombination resultierende Einhüllende einer Einzylinderkurbelwelle aus verschiedenen Perspektiven. Bei der Betrachtung der Bilder (a) und (b) ist deutlich zu erkennen, dass die Hinterschnittbereiche der Kurbelwangen mit Hilfe der Schattenprojektionstechnik nicht erfasst werden können. Die Teilabbildungen (c) und (d) zeigen Seitenansichten der Werkstückeinhüllenden.

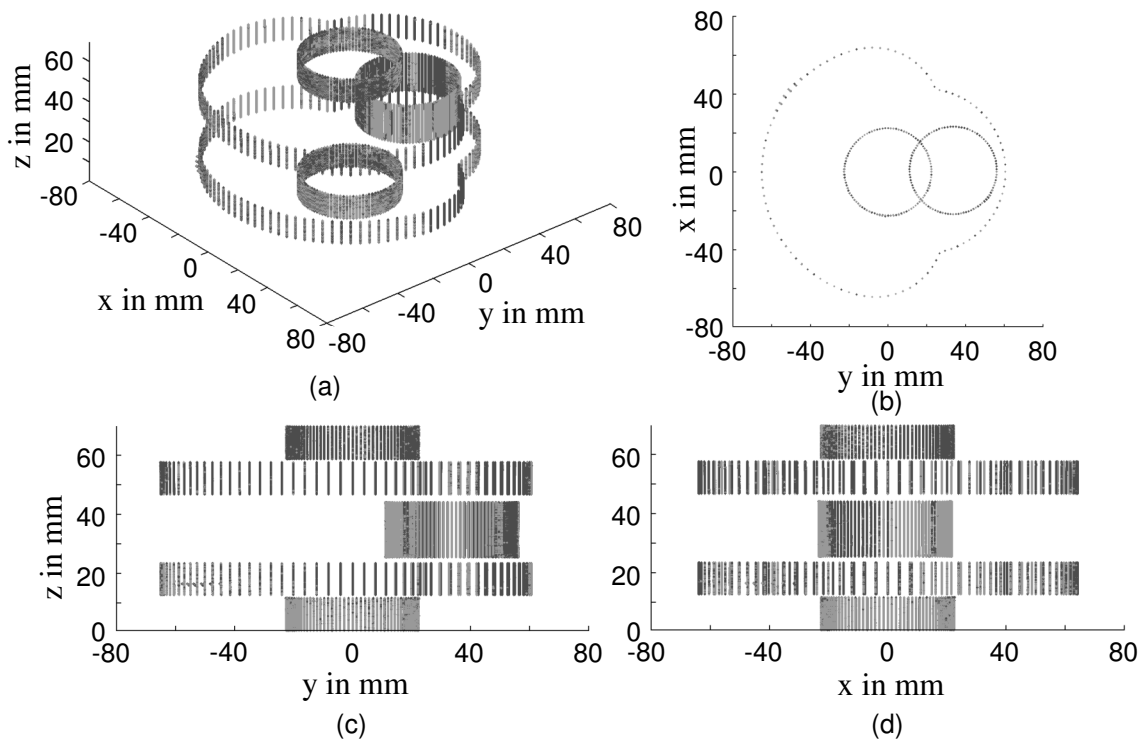


Abbildung 72: Rekombination der vorverarbeiteten Konturmessdaten zu einer Werkstückeinhüllenden

8.3.2 Flächenhafte Geometrieprüfung der Lagersitze

Die Geometrieprüfung der Lagersitze einer Kurbelwelle geschieht, analog zur Auswertung von Ritzelwellenlagersitzen (7.3.3), durch Analyse der Abweichungen von der Zylinderform. Die Berechnung der Abweichungen von der Zylinderform wird durch Einpassung von Zylindern als Ersatzgeometrieelemente mit veränderlichen Radien ermöglicht.

Auf diese Weise können auch die Lage der Kurbelwellenagersitze im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem sowie deren Ist-Radien bestimmt werden.

Abbildung 73 zeigt eine 2D-Darstellung der Abweichungen der einzelnen Kurbelwellenagersitze von der Zylinderform unter Berücksichtigung der Soll-Radien.

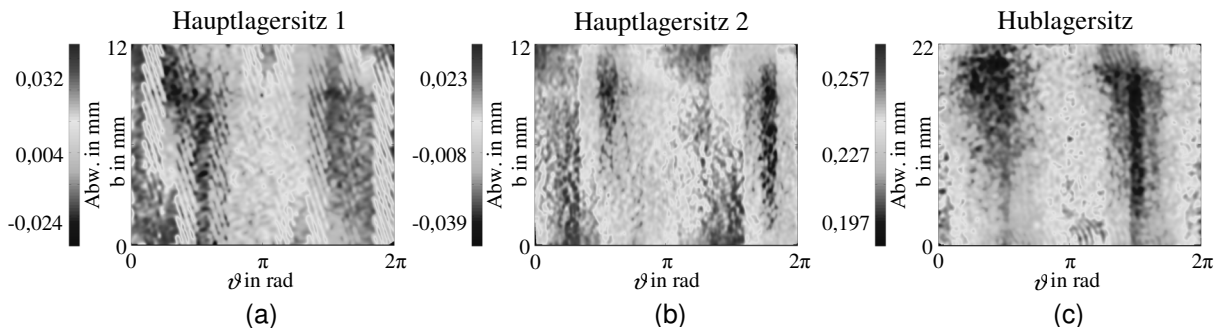


Abbildung 73: 2D-Darstellung der Abweichungen der Lagersitze einer Einzylinderkurbelwelle von der Zylinderform

Die Abweichungen von der Zylinderform weisen bei allen Lagersitzen sehr ähnliche Charakteristiken auf und betragen jeweils maximal etwa $60 \mu\text{m}$. Die Verteilung der Formabweichungen über den Polarwinkel ϑ und die Lagersitzbreite b zeigt bei allen Lagersitzen positive Abweichungen im Bereich von $\vartheta = 0$ bzw. $\vartheta = 2\pi$, und negative Abweichungen im Bereich von $\vartheta = \pi/2$ und $\vartheta = 3\pi/2$. Zudem fällt auf, dass der Hublagersitz (c) ein Aufmaß von etwa $230 \mu\text{m}$ besitzt, während der Radius der Hauptlagersitze (a, b) bis auf wenige Mikrometer dem Sollradius entspricht.

Abbildung 74 zeigt eine 3D-Darstellung der Geometrieabweichungen an den Lagersitzen von der Sollgeometrie der Kurbelwelle. Bei dieser Darstellung fließen, im Gegensatz zu der Darstellung in Abbildung 73, Geometrieabweichungen in Folge von Lagefehlern der Lagersitze mit in die Abweichungsberechnung ein. Zusätzlich zu den farbcodiert dargestellten Lagersitzen sind auch die Kurbelwangen der Einzylinderkurbelwelle dargestellt. Auf diese Weise lassen sich die Abweichungscharakteristiken in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie schnell und intuitiv erfassen.

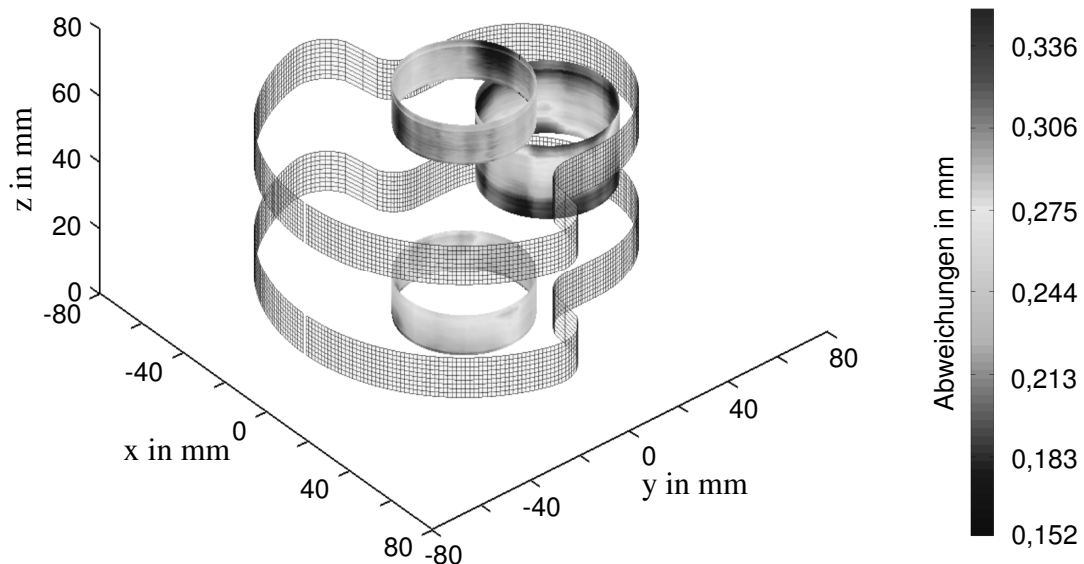


Abbildung 74: 3D-Darstellung der Geometrieabweichungen an den Lagersitzen einer Einzylinderkurbelwelle

Die in Abbildung 74 gezeigte farbcodierte 3D-Darstellung der Lagersitze beinhaltet neben den Formabweichungen auch die auf das Gesamtbauteil bezogenen Abweichungen von der Sollgeometrie. Dies wird insbesondere bei der Betrachtung des Hublagersitzes deutlich, der durch eine Verkipfung seiner Achse in x-Richtung signifikante systematische Abweichungen von seiner Sollgeometrie aufweist. Die Abweichungen an den Hublagersitzen korrespondieren mit den in Abbildung 73 zweidimensional dargestellten Abweichungen.

8.3.3 Auswertung der Werkstückeinhüllenden

Die mit Hilfe des Schattenprojektionssystems aufgenommene Werkstückeinhüllende der Kurbelwelle wird insbesondere zur Analyse von Form-, Maß- und Lageparametern der einzelnen Kurbelwellengeometrieelemente herangezogen. Zudem werden werkstückspezifische Kenngrößen wie die Lagersitzradien und die Exzentrizitäten der Hublager bestimmt.

Zur Bestimmung der Zylinderformabweichung, der Lagersitzradien und der Lagersitzachsen werden zunächst die den jeweiligen Lagersitzen entsprechenden Konturmessdaten aus der Werkstückeinhüllenden extrahiert. Anschließend wird ein Zylinder als Ersatzgeometrieelement auf Grundlage der Minimierung der Abstandsquadratsumme auf die Messdaten eingepasst. Die Bestimmungsparameter des Ersatzzylinders liefern die Daten bezüglich des Radius und der Achse des untersuchten Lagersitzes. Auf Grundlage dieser

Untersuchungen können anschließend die Zylindrizität des Lagersitzes sowie die Koaxialität der Lagersitzachsen zur Bauteilachse, wie in Abschnitt 7.3.6 vorgestellt, berechnet werden.

Insbesondere im Hinblick auf eine Untersuchung thermisch bedingter Verzüge durch den Schmiedeprozess mit integrierter Wärmebehandlung, wird eine Prüfung der Rechtwinkligkeit der Kurbelwangenflächen (siehe Abbildung 70) zur Bauteilachse durchgeführt. Hierzu werden zunächst die jeweils äußeren Kurbelwangenflächen der unteren und oberen Kurbelwange aus den Konturrohdaten extrahiert. Anschließend wird eine Ebene nach der Methode der Minimierung der Abstandsquadratsumme auf die Messdaten eingepasst. Die Prüfung der Rechtwinkligkeit der Kurbelwangen zur Bauteilachse geschieht auf Grundlage der Bestimmung des Normalenvektors zur eingepassten Ebene.

Die Kennwerte zur Charakterisierung der Geometrieabweichungen der untersuchten Einzylinderkurbelwelle sind in Tabelle 4 dargestellt.

Geometrieelement	Radius in mm	Zylindrizität in mm	Koaxialität in mm	Exzentrizität in mm	Rechtwinkligkeit in mm
Hauptlager unten	22,437	0,029	0,040	-	-
Hauptlager oben	22,419	0,016	0,051	-	-
Hublager	22,468	0,071	0,014	33,681	-
KW-Fläche unten	-	-	-	-	0,005
KW-Fläche oben	-	-	-	-	0,009

Tabelle 4: Kennwerte zur Charakterisierung der Geometrieabweichungen einer Einzylinderkurbelwelle

8.3.4 Fusion der Messdaten

Die Fusion der mittels Schatten- und Streifenprojektion erfassten Messdaten bildet die Grundlage für die nachfolgenden Auswerteverfahren. Die fusionierten Messdaten werden beispielsweise für eine umfassende Abweichungsanalyse mit einem CAD-Modell der zu untersuchenden Kurbelwelle verglichen (siehe Abschnitt 8.3.5). Zudem werden die fusionierten Kurbelwellenmessdaten für volumetrische Untersuchungen mit dem Ziel einer Unwuchtanalyse herangezogen (siehe Abschnitt 8.4).

Die Fusion der Messdaten von Schatten- und Streifenprojektionssensor wird durch eine Transformation in ein gemeinsames vorläufiges Werkstückkoordinatensystem auf Grundlage

des in Abschnitt 8.2.1 beschriebenen Koordinatensystemabgleichs durchgeführt. Das vorläufige Werkstückkoordinatensystem ist auf der Drehachse der Kurbelwelle, die während der Messung im Multisensorsystem mit der z-Achse des Koordinatensystems des Wellenmesssystems identisch ist, aufgebaut. Die weiteren Achsen des vorläufigen Werkstückkoordinatensystems orientieren sich ebenfalls an den Koordinatenachsen des Wellenmesssystems. Somit liegen die mittels Schattenprojektion erfassten Konturmessdaten direkt im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem vor. Mit Hilfe des Koordinatensystemabgleichs wird eine Bewegung des Streifenprojektionssensors im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem ermöglicht. Die Position des Streifenprojektionssensors im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem lässt sich durch die Linearachsen des Dreiachsenpositioniersystems hochpräzise einstellen. Die Lage der flächenhaften Streifenprojektionsmessdaten der Lagersitze im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem ist somit durch die Positionen der Achsen des Dreiachsenpositioniersystems eindeutig festgelegt.

Abbildung 75 zeigt die durch die Transformation in das vorläufige Werkstückkoordinatensystem fusionierten Messdaten von Schatten- und Streifenprojektionssensor. In der Abbildung ist deutlich der Unterschied zwischen den linienhaften Konturmessdaten des Schattenprojektionssensors und der flächenhaften Streifenprojektionsmessdaten zu erkennen.

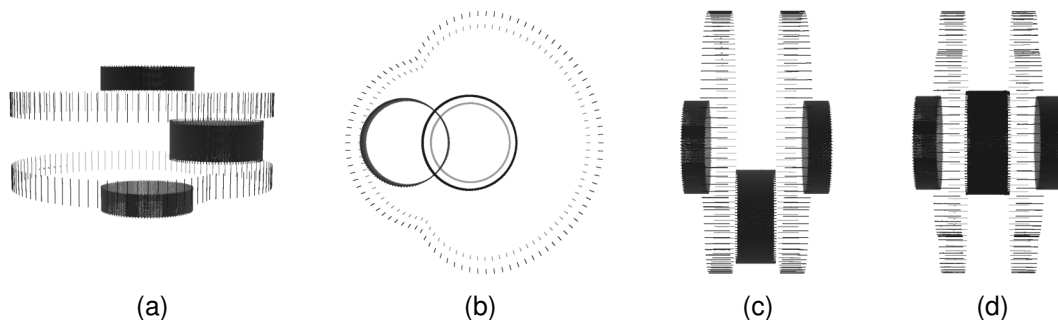


Abbildung 75: Fusionierte Schatten- und Streifenprojektionsmessdaten einer Kurbelwellenmessung

8.3.5 CAD-Vergleich

Eine Möglichkeit für eine umfassende Abweichungsanalyse der durch die fusionierten Messdaten (siehe Abschnitt 8.3.4) erfassten Geometriebereiche bietet ein auf dem CAD-

Modell der Kurbelwelle basierender Soll-Ist-Vergleich. Ein CAD-Modell der gemessenen Einzylinderkurbelwelle ist in Abbildung 58 dargestellt.

Der Soll-Ist-Vergleich wird mit dem Softwarepaket Polyworks auf Basis von Polygonmodellen der Referenzdaten des CAD-Modells und der fusionierten Messdaten durchgeführt. Um eine Berechnung der Geometrieabweichungen zu ermöglichen, wird das Polygonmodell der Kurbelwellenmessdaten auf das Polygonmodell der Referenzgeometrie eingepasst. Die Einpassung erfolgt nach dem Prinzip der Minimierung der Abstandsquadratsumme mit dem Polyworksmodul IMInspect. Abbildung 76 zeigt die auf das CAD-Modell eingepassten fusionierten Messdaten. Bei der Betrachtung von Teilabbildung (b) ist deutlich zu erkennen, dass die Hinterschnittbereiche der Kurbelwangen nicht mittels Schattenprojektion erfasst werden können. Diese Geometriebereiche können bei der Abweichungsanalyse nicht betrachtet werden.

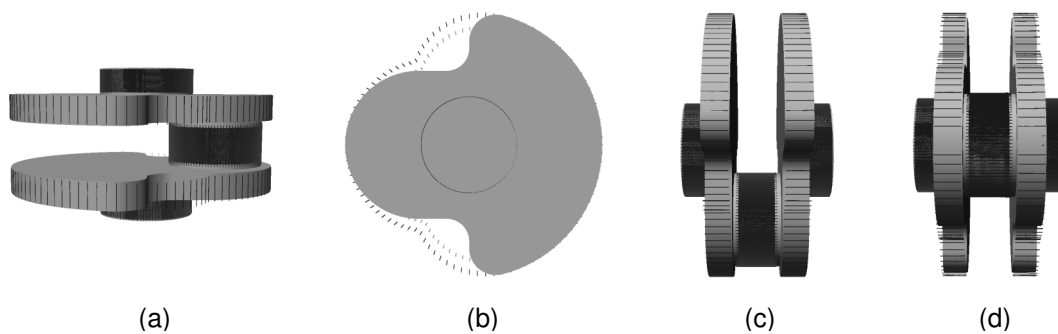


Abbildung 76: Einpassung der fusionierten Messdaten auf ein CAD-Modell der Einzylinderkurbelwelle

Grundlage der Abweichungsanalyse ist die Berechnung der orthogonalen Abstände der Polygone des Messdatenmodells zur Referenzgeometrie. Zur Beurteilung der Geometrieabweichungen werden die auf diese Weise bestimmten Abweichungsinformationen mit Hilfe des Polyworksmoduls IMInspect auf dem CAD-Modell der Kurbelwelle interaktiv dargestellt (siehe Abbildung 77). Das farbcodierte CAD-Modell kann frei im Raum gedreht werden. Mit Hilfe einer Zoom-Funktion können interessante Geometriebereiche näher betrachtet werden. Die in Abbildung 77 gezeigte Darstellung des farbcodierten CAD-Modells erlaubt eine erste qualitative Einschätzung der Abweichungen.

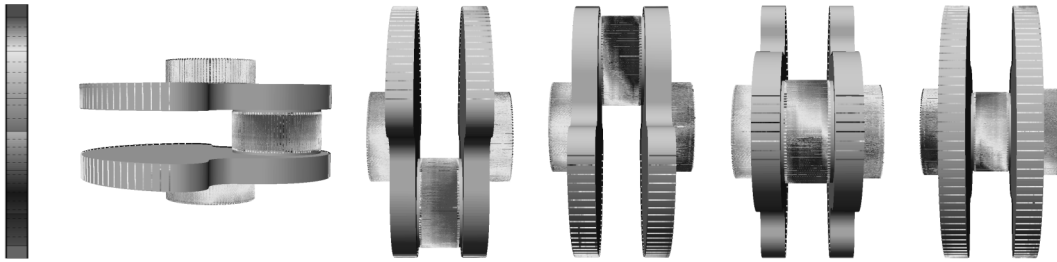


Abbildung 77: Farbcodierte Darstellung der Abweichungen der fusionierten Messdaten vom CAD-Modell

8.4 Volumetrische Untersuchungen an Kurbelwellen

Die Bestimmung und die Beseitigung der Unwucht stellt bei der Herstellung von Kurbelwellen einen erheblichen Zeit- und Kostenfaktor dar. Konventionelle Verfahren zur Unwuchtanalyse basieren auf einer mechanischen Unwuchtbestimmung [Schö05, Schn07, Sas91]. Die Kurbelwelle wird hierzu zwischen Zentrierspitzen im Unwuchtprüfstand gespannt und mit einer definierten Winkelgeschwindigkeit gedreht. Mit Hilfe von Kraftsensoren werden die Kräfte, die durch die Unwucht der rotierenden Kurbelwelle auf die Zentrierspitzen wirken, gemessen. Auf Grundlage dieser Messungen kann nun die Unwucht der Kurbelwelle berechnet werden. Liegt die Unwucht außerhalb des Toleranzbereichs wird in der Regel Material durch Einbringen von Bohrungen in die Kurbelwangen entfernt. Im Anschluss an die Massekorrektur der Kurbelwangen wird erneut eine mechanische Unwuchtanalyse durchgeführt. Sollte die Unwucht weiterhin außerhalb der vorgegebenen Toleranz liegen, wird eine weitere Massekorrektur an den Kurbelwangen durchgeführt. Dieser iterative Prozess wird so lange fortgesetzt, bis die Unwucht die Toleranzvorgabe erfüllt.

Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem eine Unwuchtanalyse auf Basis der mittels Schatten- und Streifenprojektion erfassten fusionierten Geometriedaten (siehe Abschnitt 8.3.4) der Kurbelwelle durchgeführt werden kann. Auf Basis dieser geometrischen Unwuchtanalyse kann festgestellt werden, ob die Unwucht beim untersuchten Bauteil durch Materialabtrag an den Kurbelwangen minimierbar ist. Zudem kann angegeben werden, an welcher Stelle der Materialabtrag zu erfolgen hat.

8.4.1 Substitution der Hinterschnittbereiche der Kurbelwangen

Die Schattenprojektionstechnik ist aufgrund des ihr zugrundeliegenden Messprinzips nicht zur Erfassung von Hinterschnittbereichen geeignet. Dies hat zur Folge, dass die

Hinterschnittbereiche der zu messenden Kurbelwellen nicht mit dem eingesetzten Wellenmesssystem aufgenommen werden können. Abbildung 78 zeigt einen Vergleich der Messdaten, die bei der Erfassung einer Kurbelwangenkontur mit dem Wellenmesssystem gewonnen wurden, mit der Sollkontur. Hierbei ist sofort zu erkennen, dass nur die Bereiche der Messdaten, die den konvex geformten Geometriebereichen der Kurbelwange zugeordnet sind, einen zur Sollkontur analogen Verlauf aufweisen. Im Bereich der Hinterschnitte ist eine deutliche Abweichung der Schattenprojektionsmessdaten von der Sollkontur zu erkennen.

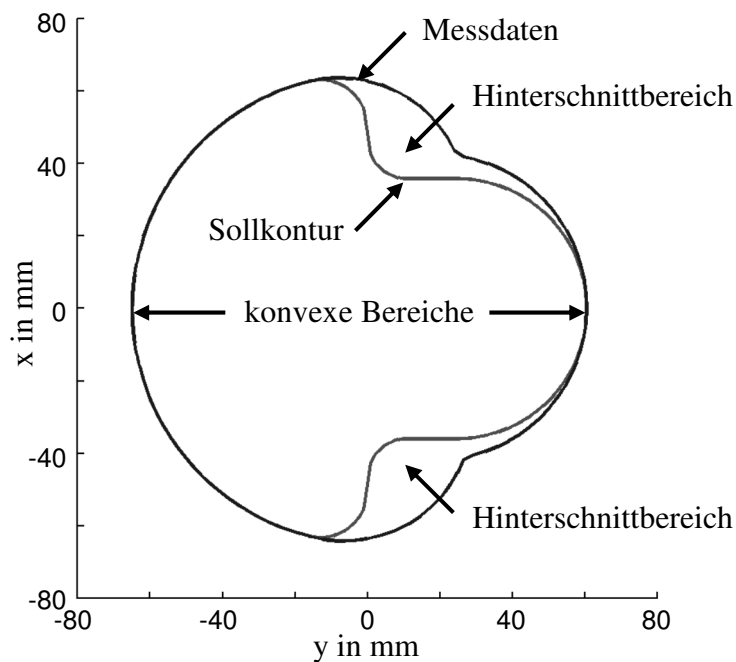


Abbildung 78: Vergleich der mittels Schattenprojektion erfassbaren Kurbelwangenkontur mit der tatsächlichen Kontur

Die Messdaten des Schattenprojektionssystems lassen sich somit nicht für eine Berechnung der Masseverteilung der Kurbelwelle, welche die Basis für eine Unwuchtanalyse darstellt, heranziehen. Aus diesem Grund werden die Hinterschnittbereiche, wie in Abbildung 79 dargestellt, aus den Messdaten extrahiert und durch die idealgeometrischen Daten der Sollkontur ersetzt. Abbildung 79 (a) zeigt die Kurbelwangenmessdaten des Schattenprojektionssystems. In Teilabbildung (b) wurden die Hinterschnittbereiche aus den Messdaten entfernt. Teilabbildung (c) zeigt die um die idealgeometrischen Konturdaten der Hinterschnittbereiche ergänzten Messdaten.

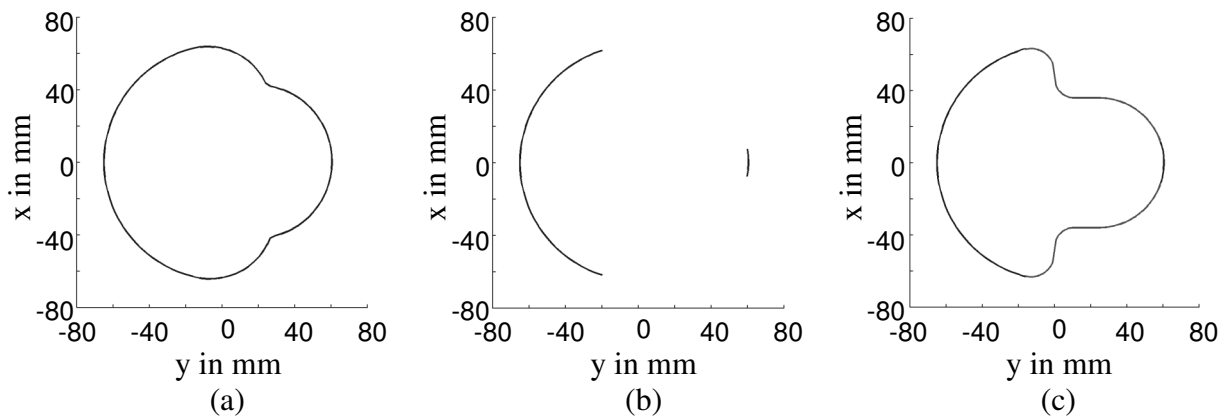


Abbildung 79: Auffüllen des Hinterschnittbereiches der Kurbelwangenmessdaten durch idealgeometrische Daten

Durch diese Vorgehensweise werden eventuelle Geometrieabweichungen in den Hinterschnittbereichen der Kurbelwangen, die einen Beitrag zur Unwucht der Kurbelwelle leisten können, außer Acht gelassen. Eine Lösung dieses Problems könnte eine zusätzliche flächenhafte Erfassung der Hinterschnittbereiche mit dem Streifenprojektionssensor darstellen.

8.4.2 Approximation des Werkstückvolumens und der Werkstückmasse

Zur Approximation des Werkstückvolumens werden die Geometrielemente Hauptlager, Hublager und Kurbelwangen getrennt betrachtet. Im ersten Schritt werden zunächst Konturen des jeweiligen Geometrieelements extrahiert. Die Konturen werden durch äquidistante und zur Bauteilachse orthogonale Querschnitte erzeugt, die die gesamte Höhe des jeweiligen Geometrieelements abdecken. Der vertikale Abstand Δz zwischen zwei benachbarten Konturen beträgt jeweils $100 \mu\text{m}$. Den Geometrieelementkonturen werden die Messpunkte, deren vertikaler Abstand vom jeweiligen Querschnitt weniger als $10 \mu\text{m}$ beträgt, zugeordnet.

Bevor die Volumenberechnung stattfinden kann, ist es notwendig, die Fläche der einzelnen Querschnitte zu berechnen, die durch die Messdaten eingeschlossen wird. Hierzu werden die zur Geometrieelementkontur gehörigen Messpunkte durch Anwendung von kubischen Splines interpoliert [Boo01]. Hierdurch ergibt sich die Splinefunktion $s(t) = (x(t), y(t))$, die eine analytische Beschreibung der Geometrieelementkontur des jeweiligen Querschnittes liefert. Durch ausführen des folgenden Integrals ergibt sich die durch die Messdaten eingeschlossene Fläche F :

$$F = \int_c y(t) \dot{x}(t) dt. \quad (8.2)$$

mit:

F : durch die Randkurve C eingeschlossene Fläche,

C : Randkurve C auf Basis der Geometrieelementkontur,

x, y : x - und y -Komponente der Splinefunktion s .

Zur Berechnung des Volumens V_G der einzelnen Geometrieelemente werden die durch die Messdaten eingeschlossenen Flächen der Querschnitte mit dem vertikalen Abstand Δz zum jeweils benachbarten Querschnitt multipliziert:

$$V_G = \sum_i F_i \cdot \Delta z_i \quad (8.3)$$

mit:

V_G : Volumen des betrachteten Geometrieelements,

F_i : Fläche der einzelnen Querschnitte des betrachteten Geometrieelements,

Δz_i : vertikale Abstände der einzelnen Querschnitte.

Die Masse M_G der Kurbelwellengeometrieelemente lässt sich durch Multiplikation der auf den Querschnitten basierenden Teilvolumina mit der Dichte ρ des verwendeten Werkstoffs berechnen. Hierbei wird eine homogene Dichte des Bauteils vorausgesetzt:

$$M_G = \sum_i \rho \cdot F_i \cdot \Delta z_i = \rho \cdot \sum_i V_i \quad (8.4)$$

mit:

M_G : Masse des betrachteten Geometrieelements,

ρ : Dichte des verwendeten Werkstoffs,

F_i : Fläche der einzelnen Querschnitte des betrachteten Geometrieelements,

Δz_i : vertikale Abstände der einzelnen Querschnitte,

V_i : Volumen der auf den einzelnen Querschnitten basierenden Volumenelemente.

Das Gesamtvolumen der betrachteten Kurbelwelle ergibt sich aus der Summe der Volumina $V_{g,i}$ der einzelnen Geometrieelemente:

$$V = \sum_i V_{G,i} \quad (8.5)$$

Die Masse des Gesamtbauteils kann durch Multiplikation des Gesamtvolumens V mit der Dichte ρ des verwendeten Werkstoffs berechnet werden.

8.4.3 Bestimmung des Bauteilschwerpunkts und Unwuchtberechnung

Für die Bestimmung des Bauteilschwerpunkts werden zunächst die Schwerpunkte der einzelnen Kurbelwellengeometrieelemente berechnet. Die Berechnung der Geometrieelementschwerpunkte basiert wiederum auf der Bestimmung der Flächenschwerpunkte der dem jeweiligen Geometrieelement zugeordneten Querschnitte. Die Koordinaten der Flächenschwerpunkte der Querschnitte in einer zur Bauteilachse orthogonalen Ebene lassen sich mit Hilfe der folgenden Gleichungen bestimmen:

$$\begin{aligned}
 S_x &= \frac{\int_C x(t)y(t)\dot{x}(t)dt}{\int_C y(t)\dot{x}(t)dt}, \\
 S_y &= \frac{\int_C y(t)y(t)\dot{x}(t)dt}{\int_C y(t)\dot{x}(t)dt} \\
 S_z &= \frac{z_i + z_{i+1}}{2}.
 \end{aligned} \tag{8.6}$$

mit:

- S_x : x-Koordinate des Schwerpunktes der durch die Kurve C eingeschlossenen Fläche,
- S_y : y-Koordinate des Schwerpunktes der durch die Kurve C eingeschlossenen Fläche,
- C : Randkurve C auf Basis der Geometrieelementkontur,
- x, y : x- und y-Komponente der Splinefunktion s ,
- z_i : z-Koordinate des betrachteten Querschnitts.

Als Grundlage zur Berechnung der Massenschwerpunkte S_G der Kurbelwellengeometrieelemente ist es notwendig, die Masse M_i der auf den Querschnittsflächen basierenden Teilvolumina V_i zu bestimmen. Es wird eine homogene Dichte ρ des Werkstücks angenommen:

$$M_i = \rho \cdot F_i \cdot \Delta z_i. \tag{8.7}$$

mit:

- M_i : Masse der auf den Querschnittsflächen basierenden Teilvolumina,
- ρ : Dichte des verwendeten Werkstoffs,
- F_i : Fläche der einzelnen Querschnitte des betrachteten Geometrieelements,
- Δz_i : vertikale Abstände der einzelnen Querschnitte.

Die Schwerpunkte S_G der einzelnen Geometrieelemente ergeben sich durch Berechnung der Mittelwerte der Schwerpunkte der zum jeweiligen Geometrieelement gehörigen Teilvolumina V_i mit der Masse M_i :

$$S_G = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n M_i \cdot (S_{x,i}, S_{y,i}, S_{z,i}) \right). \quad (8.8)$$

S_G : Koordinaten des Schwerpunkts des untersuchten Geometrieelements,

n : Anzahl der betrachteten Querschnittsflächen,

M_i : Masse der auf den Querschnittsflächen basierenden Teilvolumina,

S_x : x-Koordinate des Schwerpunktes der Querschnittsfläche,

S_y : y-Koordinate des Schwerpunktes der Querschnittsfläche,

S_z : z-Koordinate des Schwerpunktes der Querschnittsfläche,

x, y : x- und y-Komponente der Splinefunktion s .

Der Schwerpunkt der betrachteten Kurbelwelle ergibt sich aus dem Mittelwert der Schwerpunkte $S_{g,i}$ der einzelnen Geometrieelemente:

$$S = \sum_i S_{g,i}. \quad (8.9)$$

Abbildung 80 zeigt eine 3D-Darstellung der Differenz des Soll- und Istbauteilschwerpunkts bei einer nach dem oben vorgestellten Verfahren untersuchten Einzylinderkurbelwelle. Der Istbauteilschwerpunkt ist gegenüber seiner Sollposition auf der Bauteilachse, um etwa 2,25 mm in Richtung der Hublagergegengewichte verschoben. Aufgrund dieser Verschiebung des Schwerpunktes ist eine deutlich ausgeprägte Unwucht beim untersuchten Bauteil zu erwarten.

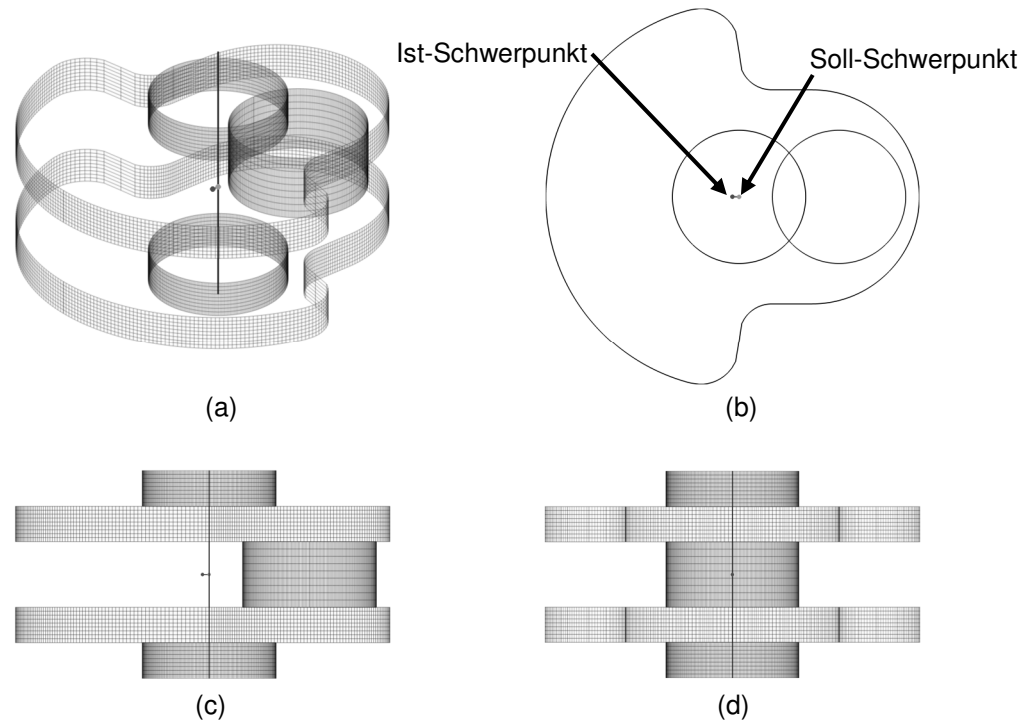


Abbildung 80: 3D-Darstellung der Differenz von Soll- und Istbauteilschwerpunkt

Auf Grundlage der Berechnung der Bauteilmasse und des Bauteilschwerpunkts können Aussagen bezüglich der Unwucht des Werkstücks getroffen werden [Schö05, Schn07, Sas91]. Die Unwucht ist ein Maß für die radiale Abweichung des Masseschwerpunktes eines rotierenden Bauteils von seiner Drehachse und wird in der Einheit g mm angegeben. Die Unwucht ergibt sich zu:

$$U = M \cdot e . \quad (8.10)$$

mit:

U : Unwucht des betrachteten Bauteils,

M : Bauteilmasse,

e : Abstand des Bauteilschwerpunktes von der Drehachse.

8.4.4 Volumetrische Analyse einer Einzylinderkurbelwelle

Im Folgenden werden in Tabelle 5 beispielhaft die Ergebnisse einer volumetrischen Analyse an einer Einzylinderkurbelwelle vorgestellt.

	Sollwerte	Istwerte
Gesamtvolumen	317749 mm ³	318308 mm ³
Volumen Hauptlager 1	18916 mm ³	18982 mm ³
Volumen Hauptlager 2	18916 mm ³	18940 mm ³
Volumen Hublager	34679 mm ³	34937 mm ³
Volumen Kurbelwange 1	122619 mm ³	122718 mm ³
Volumen Kurbelwange 2	122619 mm ³	122730 mm ³
Gesamtmasse	2494,331 g	2498,723 g
Masse Hauptlager 1	148,489 g	149,010 g
Masse Hauptlager 2	148,489 g	148,680 g
Masse Hublager	272,231 g	274,259 g
Masse Kurbelwange 1	962,560 g	963,343 g
Masse Kurbelwange 2	962,560 g	963,432 g
Unwuchtdifferenz in Vergleich zum Modell	-	46,86 g mm

Tabelle 5: Vergleich der Soll- und Istwerte für Masse, Volumen und Unwucht bei der volumetrischen Analyse einer Einzylinderkurbelwelle

Bei der Betrachtung der in Tabelle 5 angegebenen Ergebnisse der volumetrischen Analyse der Einzylinderkurbelwelle fällt auf, dass sämtliche Geometrielemente ein im Vergleich zum Sollwert größeres Volumen aufweisen. Die größte Abweichung vom Sollwert tritt beim Hublager der Kurbelwelle auf, dessen Volumen ca. 240 mm³ größer ist als das Sollvolumen. Unter Annahme einer homogenen und dem Sollbauteil entsprechenden Dichte ergeben sich aus den positiven Volumenabweichungen im Vergleich zum Sollwert größere Massen der Kurbelwellengeometrielemente. Die Gesamtmasse des untersuchten Bauteils ist ca. 4,39 g größer als die Sollmasse. Als weiteres Ergebnis der volumetrischen Analyse bleibt

festzuhalten, dass die Unwucht der gemessenen Kurbelwelle um 46,86 g mm größer ist als die Unwucht des Sollbauteils.

9 Zusammenfassung

Bei der Herstellung von hoch belastbaren Komponenten des Antriebsstrangs von Automobilen gewinnen die auf der endkonturnahen Warmmassivumformung basierenden Fertigungsverfahren wie das Präzisionsschmieden immer mehr an Bedeutung. Eine präzisionsschmiedetechnische Prozesskette zur Herstellung dieser Hochleistungsbauteile zeichnet sich durch wenige, aber dafür hoch integrierte und sehr komplexe Fertigungsschritte aus. Um eine solche Prozesskette kontrollieren zu können, ist eine umfassende und prozessbegleitende Geometrieprüfung der Zwischenprodukte insbesondere nach den formgebenden Prozessschritten zwingend erforderlich.

Präzisionsgeschmiedete Bauteile weisen aufgrund der umformenden Fertigung typische Geometriefehler, wie beispielsweise Aufmaßschwankungen oder Formfehler auf. Die Fehlstellen sind im Gegensatz zu den deterministischen Geometriefehlern bei spanend hergestellten Werkstücken sehr individuell ausgeprägt und können nicht sicher durch konventionelle taktile Messverfahren detektiert werden. Aufgrund der optischen Eigenschaften der Oberflächen präzisionsgeschmiedeter Bauteile und der im Vergleich zur Fertigteilprüfung geringeren Genauigkeitsanforderungen, bieten optische Methoden zur Formerfassung eine Lösung dieses Problems.

Am Beispiel der präzisionsgeschmiedeten Hochleistungsbauteile Zahnrad, Ritzelwelle und Kurbelwelle werden die Grundlagen für eine umfassende optische und prozessbegleitende Geometrieprüfung dieser Werkstücke erarbeitet. Hierbei stehen insbesondere die Auswahl der Sensorik sowie die Auslegung bauteilangepasster Mess- und Auswertemethoden im Mittelpunkt.

Zur Geometrieprüfung der Funktionsflächen von Zahnrädern und Ritzelwellen wird jeweils ein optisches Messsystem auf Basis eines Streifenprojektionssensors eingesetzt. Das Messsystem verfügt über eine Präzisionsdrehachse zur rotatorischen Positionierung des Bauteils im Messvolumen des Streifenprojektionssensors. Die Erfassung der Verzahnungsgeometrie mittels Streifenprojektion geschieht teilungsbezogen. Zusätzlich zur Verzahnung verfügt eine Ritzelwelle über einen Lagersitz als Funktionsfläche, der ebenfalls in äquidistanten Winkelpositionen mit dem Streifenprojektionssensor erfasst wird. Durch Kenntnis der Lage und Richtung der Drehachse des Messsystems im Koordinatensystem des Streifenprojektionssensors lassen sich die einzelnen Messdatensätze zu einem Gesamtgeometriemodell des gemessenen Bauteils rekombinieren. Im Anschluss an die

Vorverarbeitung der Messdaten wird das erfasste Geometriemodell auf ein ideales CAD-Modell des Bauteils eingepasst. Auf Grundlage der Abweichungen des gemessenen Bauteils von der Sollgeometrie kann eine umfassende Abweichungsanalyse durchgeführt werden. Durch Visualisierung der Geometrieabweichungen an den Funktionsflächen kann eine erste qualitative Bewertung erfolgen. Zur Quantifizierung können bei der Geometrieprüfung der Verzahnungen von Zahnrad und Ritzelwelle flächenbasierte Kenngrößen eingesetzt werden, die sich auf flächenhafte Form- und Gesamtabweichungen beziehen, welche in Profil- und Flankenrichtung auftreten. Die Quantifizierung der Geometrieabweichungen des Ritzelwellenlagersitzes geschieht durch Auswertung der Bestimmungsparameter eines auf die Messdaten eingepassten Ersatzzylinders.

Zur Charakterisierung der Härteverzüge, die bei Zahnrädern und Ritzelwellen aufgrund der Wärmebehandlung auftreten, stehen eine Reihe von Auswerteverfahren zur Verfügung. Für eine Verzugsanalyse werden die Funktionsflächen der zu untersuchenden Bauteile jeweils vor und nach der Wärmebehandlung flächenhaft erfasst. Durch einen numerischen Vergleich dieser Messdaten kann die Geometrieänderung des untersuchten Bauteils durch die Wärmebehandlung berechnet werden. Diese Geometrieänderung wird für eine qualitative Analyse auf einem CAD-Modell des Bauteils interaktiv dargestellt. Zudem stehen zur Quantifizierung der Härteverzüge an Verzahnungen und Lagersitzen eine Reihe von Auswerteverfahren zur Verfügung.

Zur Geometrieprüfung von Kurbelwellen wurde ein optisches Multisensorsystem, bestehend aus einem Schattenprojektionssystem und einem Streifenprojektionssensor, aufgebaut. Der Streifenprojektionssensor wird zur flächenhaften Erfassung der Lagersitze der Kurbelwellen eingesetzt. Auf Grundlage eines Abgleichs der Koordinatensysteme der beiden Messsysteme wird eine Bewegung des Streifenprojektionssensors im vorläufigen Werkstückkoordinatensystem ermöglicht, welches auf der Rotationsachse des Schattenprojektionssystems basiert. Auf diese Weise wird die Positionierung des Streifenprojektionssensors zur Erfassung der Kurbelwellenlagersitze ermöglicht. Der Koordinatensystemabgleich stellt eine notwendige Voraussetzung für die Hublagermessung dar, bei der der Streifenprojektionssensor dem Lagersitz auf einer Kreisbahn nachgeführt wird. Mit Hilfe der Schattenprojektionseinheit wird eine Einhüllende des Bauteils aufgenommen, die zur Prüfung von Form-, Maß- und Lageparametern der einzelnen Kurbelwellengeometrieelemente herangezogen wird. Die Fusion der Messdaten von Schatten- und Streifenprojektionssensor bildet die Grundlage für eine umfassende Abweichungsanalyse

der gemessenen Kurbelwelle. Die Abweichungsanalyse geschieht auf Basis einer Einpassung der fusionierten Messdaten auf ein CAD-Modell der Kurbelwelle. Die fusionierten Messdaten stellen zudem die Grundlage zur Durchführung einer volumetrischen Analyse des Bauteils dar. Hierdurch können einerseits die Volumina, und somit auch die Massen, der einzelnen Kurbelwellengeometrielemente bestimmt werden, andererseits wird die Berechnung ihrer Schwerpunkte im Bezug zur Bauteilachse ermöglicht. Mit Hilfe dieser Informationen kann eine rein geometrische Unwuchtanalyse der Kurbelwelle durchgeführt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte optische Sensorik zur Geometrieprüfung der Zwischenprodukte von präzisionsschmiedetechnischen Prozessketten geeignet ist. Zusammen mit den entwickelten Mess- und Auswertemethoden kann eine umfassende Abweichungsanalyse der Bauteile durchgeführt werden, auf deren Basis eine Kontrolle der formgebenden Schritte der Prozesskette erfolgen kann.

LITERATUR

Zitierte Literatur

- Ado02 Adolf, W. W.: *Windkraftenergie: Ohne geschmiedete Anlagenteile nicht denkbar*; Schmiede-Journal, 3/2002, S. 14-16, 2002
- Bac03 Bach, Fr.-W.; ea.: *Integrierte Prozessketten, eine Notwendigkeit zum Präzisionsschmieden*; utfscience, 2/2003, S. 1-8, 2003
- Bac03b Bach, Fr.-W.; M. van Well, K. Phillip, W. Reimche, M. Bernhard: *Härtung von Vergütungsstahl mit Sprühabschreckung*; Härtereitechnische Mitteilungen, 58, 2003
- Bac05 Bach, Fr.-W.; M. van Well, K. Phillip, W. Reimche, M. Bernhard: *Randzonenhärtung von Vergütungsstahl mit Sprühabschreckung*; Härtereitechnische Mitteilungen, 60, 2005
- Bac05b Bach, Fr.-W.; ea.: *Die Prozesskette Präzisionsschmieden*; Phi – Produktionstechnik Hannover informiert, 4/2005, 2005
- Bar04 Bargel, H.-J.: *Werkstoffkunde*; 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004
- Beh06 Behrens, B.-A., Dähndel, H., Schmidt, I.: *Präzisionsschmieden – aktueller Stand und Perspektiven*; 9. Umformtechnisches Kolloquium, 16.-17.02.2006, Darmstadt, S. 67-78
- Ben04 Benneker, H.: *Massivumformung in Deutschland: Daten, Fakten und Trends*; Schmiede Journal, 3/2007, S. 13-16, 2007
- Boo01 De Boor, C.: *A Practical Guide to Splines*; Springer-Verlag, 2001
- Bre93 Breuckmann, B.: *Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der Praxis*; Franzis Verlag, 1993
- Den06 Denkena, B.; Immel, J., Götz, T.: *Entwurfsprozess von Feinpositioniersystemen am Beispiel eines mechatronischen Drehspannfutters zur Ausrichtung präzisionsgeschmiedeter Bauteile*; 4. Paderborner Workshop "Entwurf mechatronischer Systeme", 30. - 31.

- März, Paderborn, S. 411-424, 2006
- Den07 Denkena, B.; Immel, J.: *Feinpositionierspannfutter mit 4 Freiheitsgraden – Anforderungen, Konstruktion und Optimierung*; wt Werkstattstechnik online, 11-12/2007, S. 890-894, 2007
- Dit02 Dittmann, J.: *Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von geschmiedeten Bauteilen*; Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2002
- Doe95 Doege, E.; Thalemann, J.; Westerkamp, C.: *Präzisionsschmieden von Zahnrädern*; wt Werkstattstechnik – Produktion und Management, 85, S. 85-89, 1995
- Doe03 Doege, E.; Silbernagle, C.; Dähndel, H.: *Innovative Ansätze in der Massivumformung, Marktchance Individualisierung*; Springer-Verlag, 2003
- Doe07 Doege, E.: *Handbuch der Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- Dou93 Dougherty, E. R.: *Mathematical morphology in image processing*; Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 1993
- Eur07 Euroforge Statistik: <http://www.euroforge.org>, Februar 2008
- Fra00 Frankowski, G.; Reißner, H.: *Schnelle optische 3D Messung von Funktionsflächen mit digitaler Streifenprojektion auf Mikrospiegelbasis*; 10. International Colloquium on Surfaces, 31.01.-02.02.2000, Chemnitz, 2000
- Gev06 Gevatter, H. J.; Grünhaupt, U. (Hrsg.): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*; Springer-Verlag, 2006
- Gil08 Gillhaus, R.; Kästner, M.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: *3D-data acquisition, processing and analysis of gear shaft measurements using optical sensors*; 8th International Science Conference “Coordinate Measuring Technique”, 30.03.-02.04.2008, Bielsko-Biala, Polen, 2008

- Gil08b Gillhaus, R.; Kästner, M.; Seewig, J., Reithmeier, E.: *Sensorintegration zur Feinpositionierung von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen*; VDI-Tagung „Sensoren und Messsysteme“, 11.-12.03.2008, Ludwigsburg, 2008
- Gra96 Gravel, G.: *Beurteilung abbildend hergestellter Stirnräder mit Hilfe der Koordinatenmesstechnik*; Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 1996
- Haa05 Haase, R.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: *Verbesserte Hartfeinbearbeitung von Zahnrädern*; wt Werkstattstechnik online, 6/2005, S. 447-452, 2005
- Haa06 Haase, R.; Kästner, M.; Immel, J.; Seewig, J.; Reithmeier, E.; Denkena, B.: *Kürzere Prozessketten durch Feinpositioniersysteme - Ein innovativer Lösungsansatz zur Substitution des Auswuchtens von Kurbelwellen*; wt Werkstattstechnik online, 5/2006, S. 252-256, 2006
- Haa06b Haase, R.: *Einrichtung zur schnellen Messung optisch kooperativer Zahnräder*; Dissertation, Leibniz Universität Hannover
- Har04 Hargreaves, B.: *Moving Market for forged Parts*; Metal Bulletin Monthly, Nr. 404, 8/2004, S. 33 ff
- Häu97 Häusler, G.; Karbacher, S.; Ritter, D.; Schönfeld, H.: *Reverse Engineering mit Hilfe optischer 3D-Sensoren*; GMA-Bericht, 30, S. 83-86, 1997
- Her05 Hering, E.; Martin, R.: *Photonik – Grundlagen, Technologie, Anwendung*; Springer-Verlag, 2005
- Hor95 Hornbeck, L. J.: *Digital Light Processing™ and MEMS: Timely Convergence for Bright Future*; Micromachining and Micro fabrication '95, Austin, Texas, USA, 1995
- Jag98 Jagodzinski, V.: *3D-Abweichungsanalyse zur Qualitätsbewertung in der Produktentwicklung*; Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 1998
- Jüt99 Jütte, F.: *Fließpressen von Verzahnungen mit hoher Genauigkeit ist eine Alternative zum Spanen*; Maschinenmarkt, 105, 1999s
- Käs05 Kästner, M.; Krause, C.; Seewig, J.; Reithmeier, E.; Bach, Fr.-W.: *Optische Verzugsmessung bei der integrierten Wärmebehandlung*

- präzisionsgeschmiedeter Bauteile*; 8. Werkstofftechnisches Kolloquium, 29.-30.09.2005, Chemnitz, Tagungsband, S. 358-365, 2005
- Käs05b Kästner, M.; Meeß, K.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: *Optische Geometrieerfassung von Zahnrädern*; VDI-Fachtagung „Verzahnungsmesstechnik“, 14.-15.06.2005, Stuttgart, VDI-Berichte 1880, S. 155-163, 2005
- Käs05c Kästner, M.; Meeß, K.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: *Calibration of an Optical 3D Triangulation Sensor for the Evaluation of Precision-Forged Gearwheels*; ISMTII, 06.-08.09.2005, Huddersfield, 2005
- Käs07 Kästner, M.; Gillhaus, R.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: *Optische Multisensortechnik zur Geometrieerfassung präzisionsgeschmiedeter Bauteile*; VDI-Tagung „Optische Messtechnik technischer Oberflächen in der Praxis“, 09.-10.10.2007, Hannover, VDI-Berichte 1996, 89-100, 2007
- Koc98 Koch, A.; Ruprecht, M.; Toedter, O.; Häusler, G.: *Optische Messtechnik an technischen Oberflächen*; Expert Verlag, 1998
- Köh04 Köhl, C.: *A change in outlook*; Metal Bulletin Monthly, 404, S. 30-31, 2004
- Kra08 Krause, Chr.; Hassel, T.; Frolov, I.; Gretzky, T.; Kästner, M.; Seewig, J.; Bormann, D.; Bach, Fr.-W.: *Randschichtvergüten von Zahnwellen mittels Wasser-Luft-Sprühkühlung*; Härterei-Technische Mitteilungen (HTM), 1/2008, S. 22-26, 2008
- Kro98 Kromke, A.: *Koordinatenmesstechnik zur Prüfung und Qualitätsbewertung von Freiformflächen*; Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 1998
- Lan88 Lange, K. (Hrsg.): *Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft*; Bd. 2: Massivumformung, 2. Aufl., Springer-Verlag, 1988
- Lan02 Lange, K. (Hrsg.): *Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft*; Bd. 1: Grundlagen, 2. Aufl. (limitierte Studienversion), Springer-Verlag, 2002
- Lie95 Liedke, D.: *Einsatzhärten*; 2. Aufl., Stahl-Informations-Zentrum,

- Merkblatt 452, 1995
- Lot05 Lotze, W.: *Zahnradmessung mit Koordinatenmessgeräten*; Eigenverlag, Dresden, 2005
- Mal92 Malz, R.: *Lichtstrukturen für die 3D-Messtechnik und Inspektion*; Dissertation, Universität Stuttgart, 1992
- Mau04 Mauser, W.: *Einführung in die Physik für Fernkundler*; Vorlesung, Institut für Geographie, Universität München, 2004
- Mee05 Meeß, K.: *Flächenhafte Messung optisch kooperativer Stirnräder am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Verzahnungen*; Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2005
- Mee06 Meeß, K.; Kästner, M.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: *Verringerung und Abschätzung der Messunsicherheit bei der optischen Verzahnungsmessung mit Streifenprojektionssystemen*; tm - Technisches Messen, 11/2006, S. 603-610, 2006
- Mic81 Michelson, A. A.: *The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Aether*; American Journal of Science, 22, S. 120-129, 1881
- Möh92 Möhrke, G.; Pfeifer, T.: *Studie: Optische Verfahren zur Zahnradmessung*; FVA Abschlussbericht, 374, 1992
- Mon95 Monk, D.; Gale, R.: *The Digital Micromirror Device for Projektion Display*; Microelectronic Engineering, 27, S. 489-493, 1995
- Nam07 Abo-Namous, O.: *Erweiterung einer Wellenmessmaschine um ein Dreiachs-Positioniersystem zur Integration zusätzlicher Sensorik*; Diplomarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2007
- NN01 NN: *Optimet – Non-Contact Dimensional Measurement*; Standard Version 2, Optimet Optical Metrology, 2001
- NN05 NN: *IMS Series – High-Performance Long-Travel Linear Stages*; Technische Dokumentation, Newport Corporation, 2005
- NN05b NN: *IMS-V Series – High-Load Vertical Linear Stages*; Technische

- Dokumentation, Newport Corporation, 2005
- NN05c NN: *ESP300 – 3 Axis Motion Controller/Driver*; Technische Dokumentation, Newport Corporation, 2005
- NN07 NN: *Maschinenakte – Hommel-Etamic 923V SN: 30014007*; Technische Dokumentation, Hommel-Etamic GmbH
- NN59 NN: *Die Triangulation von Thüringen: mit 6 Figurentafeln und 1 Karte*; Trigonometrische Abteilung des Königlich Preußischen Generalstabes, 1859
- Pfe93 Pfeifer, T.: *Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Größen in der Fertigung*; Expert Verlag, 1993
- Pfe98 Pfeifer, T.: *Fertigungsmesstechnik*; Oldenbourg Verlag, 1998
- Sas91 Sasiain, V.: *Kurbelwellen auswuchten und bearbeiten auf einer Transferstraße*; Werkstatt und Betrieb, 124, 1991
- Sch97 Schwarte, R.: *Überblick und Vergleich aktueller Verfahren der optischen Formerfassung*; GMA-Bericht, 30, S. 1-12, 1997
- Sch99 Schwarte, R.: *Ein Jahrzehnt 3D-Bilderfassung – Zielsetzungen, Fortschritte, Zukunftsperspektiven*; DGZfP-Bericht, 70, S. 25-42, 1999
- Schm95 Schmitt, J.; Creath, K.: *Extended averaging technique for derivation of error compensating algorithms in phase-shifting interferometry*; Applied Optics, 34, S. 3610-3619, 1995
- Schn07 Schneider, H.: *Auswuchttechnik*; 7. Aufl., Springer-Verlag, 2007
- Schö98 Schönfeld, H.; Häusler, G.; Karbacher, S.: *Reverse engineering using optical 3D sensors*; Three-dimensional image capture and applications, SPIE proceedings series, 3313, S. 115-125, 1998
- Schö05 Schönfeld, H.: *Das Wuchtzentrieren von Kurbelwellen – Verfahren, Fakten, Vorteile*; Firmenschrift; Schenck RoTec GmbH, 2005
- Str96 Strutz, T.; Riechmann, W.; Stahs, T.: *Tiefendatensatzgewinnung mit dem codierten Lichtansatz – Einsatzmöglichkeiten in der Automobilindustrie*;

- Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, 41, S. 245-259, 1996
- Vog99 Vogel, H.: Gerthsen – Physik; 20. Aufl., Springer-Verlag, 1999
- Wen01 Wengler, S.: *Zahnflankenmodifikationen – Toleranzen und Messunsicherheiten bei der Beurteilung von Abweichungen an modifizierten Zahnflanken*; FVA Abschlussbericht, 621, 2001
- Wol92 Wolf, H.: *Schnelle 3-dimensionale Bilderfassung mit dem codierten Lichtansatz*; VDI-Berichte 939, S. 393-398, 1992
- Wol03 Wolf, T.: *Streifenprojektionssystem zur Inspektion großflächiger Bauteile in der Formteil-Serienproduktion*; Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2003
- Zac03 Zacher, M.: *Integration eines optischen 3D-Sensors in ein Koordinatenmessgerät für die Digitalisierung komplexer Oberflächen*; Dissertation, RWTH Aachen, 2003

Richtlinien und Normen

- N1 DIN 8582: *Fertigungsverfahren Umformen — Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*; Deutsches Institut für Normung, Berlin, Köln, 2003
- N2 IEEE 754: *IEEE Standard for Binary Floating-Point Arithmetic for microprocessor systems (ANSI/IEEE Std 754-1985)*; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1985
- N3 DIN ISO 1101: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf*; Deutsches Institut für Normung, Berlin, Köln, 2005

WISSENSCHAFTLICHER WERDEGANG

Zur Person

Markus Kästner
geboren am 18. Oktober 1975 in Hannover

Schulbildung

1982 – 1986	Grundschule, Langenhagen
1986 – 1987	Orientierungsstufe, Langenhagen
1987 – 1995	Gymnasium, Gymnasium Langenhagen
1995	allgemeine Hochschulreife

Studium

1996 – 2003	Studium der Physik, Leibniz Universität Hannover
2003	Diplom-Physiker

Berufliche Tätigkeit

2003	wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Biophysik, Leibniz Universität Hannover
seit 2004	wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

