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

Oberflächenqualitätskontrolle mit winkelaufgelöstem Streulichtmessverfahren

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

Dipl.-Phys. Alexander Leis

geboren am 7. Dezember 1970 in Omsk

2011

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

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Poll

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer

Tag der Promotion: 11. April 2011

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

Alexander Leis

Oberflächenqualitätskontrolle mit winkelaufgelöstem Streulichtmessverfahren

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

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

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

Copyright Shaker Verlag 2011
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0165-5
ISSN 1615-7184

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Die auf der winkelaufgelösten Streulichtmessmethode basierenden Sensoren (kurz Streulichtsensoren) haben ein großes Potential bei industriellen Anwendungen, da mit ihnen mit hoher Robustheit berührungslose und schnelle Messungen durchgeführt werden können. In dieser Arbeit werden die Eigenschaften der Streulichtsensoren hinsichtlich ihres Einsatzes in der Fertigung - prozessbegleitende Bearbeitungsqualitätskontrolle technischer Oberflächen - untersucht.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde ein Multisensorsystem zur Erfassung stochastischer Oberflächenunvollkommenheiten auf den Gegenlaufflächen von Radialwellendichtringen entwickelt. Um die Form und Welligkeit des Werkstücks zu erfassen, wurde ein Streulichtsensor in das Multisensorsystem eingesetzt. Die Detektierbarkeit von Oberflächenunvollkommenheiten (Dellen und Kratzer) mit dem Streulichtsensor wird in dieser Arbeit untersucht. Ferner wird die gezielte Verwendung der Streulichtkenngrößen zur Detektion von Verschleißspuren, Oberflächendefekten oder der Form erklärt.

Zudem wird die Erfassung periodischer Oberflächenstrukturen, deren Periodenlängen kürzer als der Messfleckdurchmesser des Streulichtsensors ist, untersucht. Hierzu werden sowohl ein numerisches Modell als auch die experimentellen Messergebnisse in der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

Darüber hinaus wird eine neue Methode zur Messdatenauswertung vorgestellt. Die neue Methode berücksichtigt nicht nur den gerichteten (spekularen) sondern auch den diffusen Anteil des Streulichtes. Die neue Methode ermöglicht neben der Charakterisierung hochglänzender Oberflächen auch eine Analyse von Oberflächen, die eine gemischte Lichtstreuung aufweisen. Im Vergleich zu der vom VDA (Verband der Automobilindustrie) empfohlenen Methode ist die neue Auswertungsmethode robuster und genauer. Darüber hinaus lassen sich die Oberflächenparameter unterschiedlicher Ordnungen durch die neuen Streulichtkennwerte besser erfassen.

Schlagwörter:

Winkelaufgelöste Streulichtmethode, Streulichtsensor, Oberflächenrauheit, Multisensorsystem, Radialwellendichtringe.

Abstract

Sensors based on the angle resolved scattering method (short: scattered light sensors) have a great potential for industrial applications due to both non-contact and fast measurements and their robustness. In this work, applications of scattered light sensors in quality control of technical surfaces during the production process are investigated.

As part of a research project, a multi-sensor system for the detection of stochastic surface imperfections was developed. A scattered light sensor is used in a multi-sensor system to measure the form and waviness of the work piece. The sensor's ability to detect surface imperfections (dents and scratches) was investigated in this work. The characterization of form, waviness and roughness as well as the detection of the worn areas and surface imperfections is possible based on different scattering parameters.

Detection of periodic surface structures with period lengths shorter than the spot diameter of the scattered light sensor is examined here. For this purpose both a numerical model and the experimental results are presented.

A new analysis method for the scattered light distribution is presented in this work. The new method not only considers the specular but also the diffusely scattered light. These new scattering parameters are more robust and more accurate compared to those of the VDA (Association of the Automotive Industry) recommended method. In addition, the surface parameters of different orders can be analyzed more closely by the new scattering parameters.

Keywords:

Angle resolved scattering method, scattered light sensor, multi-sensor system, surface roughness, radial shaft seal rings.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung ... III

Abstract ... IV

1 **Einleitung** ... 1

2 **Zielsetzung** ... 3

3 **Stand der Technik** ... 4

3.1 Oberflächenmesstechnik ... 4

3.1.1 Taktile Messtechnik zur Erfassung der Form und Topographie ... 6

3.1.2 Optische Messtechnik zur Erfassung technischer Oberflächen ... 9

3.1.3 Physikalische Grenze für die Anwendung optischer Messmethoden ... 12

3.1.4 Fresnelsche Reflexion an glatten metallischen Oberflächen ... 16

3.1.5 Modellierung von Lichtstreuung an der rauen Oberflächen ... 18

3.2 Messdatenauswertung zur Charakterisierung technischer Oberflächen ... 20

3.2.1 Klassische profilorientierte 2D-Tastschnittverfahren ... 20

3.2.2 Übergang auf die neuartigen 3D-Oberflächenparameter ... 30

3.2.3 Einpassverfahren ... 37

3.3 Koordinatenmessgerät (KMG) ... 37

4 **Übersicht optischer Messverfahren** ... 39

4.1 Weißlichtinterferometer ... 39

4.2 Konfokales Weißlichtmikroskop ... 42

4.3 Konfokal chromatischer Sensor ... 44

4.4 Streulichtsensor ... 49

4.4.1 Kenngrößen zur Beschreibung von Streuwinkelverteilungskurven ... 51

4.4.2 Formrekonstruktion mithilfe des *M*-Wertes ... 53

4.4.3 Technische Parameter des Streulichtsensors „OS 500“ ... 54

5 **Formmessung und Detektion stochastischer Strukturen** ... 56

5.1 Stochastische Oberflächenbeschädigungen aus der Praxis ... 56

5.2 Nachbildung stochastischer Strukturen ... 58
5.2.1 Dellen ... 59
5.2.2 Kratzer ... 59
5.3 Entwicklung eines Multisensorsystems zur Erfassung stochastischer Strukturen ... 61
5.3.1 Ausrüstung des Koordinatenmessgerätes mit Sensoren ... 63
5.3.2 Kommunikationsschema ... 63
5.3.3 Messverlauf ... 64
5.3.4 Oberflächenmessung mit dem Streulichtsensor ... 65
5.3.5 Topographierekonstruktion aus den *M*-Werten des Streulichtsensors ... 66
5.3.6 Spurendetektion durch die Gesamtintensität des Streulichtsensors ... 69
5.3.7 Detektion von Defekten mit der Varianz der Streuwinkelverteilung A_q ... 70
5.3.8 Erfassung der Mikrotopographie mit einem chromatischen Sensor ... 72
6 **Welligkeits- und Rauheitscharakterisierung** ... 76
6.1 Einfluss periodischer Strukturen auf die Streulichtverteilungskurven ... 76
6.1.1 Aufbau eines nummerischen Modells ... 77
6.1.2 Experimentelle Messungen der Lichtstreuung an periodischen Oberflächen ... 83
6.2 Charakterisierung stochastischer Rauheit ... 96
6.3 Praktische Anwendung ... 104
7 **Zusammenfassung und Ausblick** ... 109
8 **Literaturverzeichnis** ... 111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Schema eines eingebauten Radialwellendichtrings. 2

Abbildung 3.1. Aufnahme einer im Einstich geschliffene Oberfläche 5

Abbildung 3.2: Rauheitsmessung auf AlSi-Zylinderlaufbahn 6

Abbildung 3.3: Erfassung der Oberflächentopographie durch das Tastschnittverfahren. 6

Abbildung 3.4: Morphologische Auswirkung der Tastnadel. 7

Abbildung 3.5: Aufnahme einer Tastnadelspitze mit einem Rasterelektronmikroskop 7

Abbildung 3.6: Berechnete Beugungsmuster an einer kreisförmigen Blende 13

Abbildung 3.7: Beugungsmuster zweier Punkte an einer kreisförmigen Blende 14

Abbildung 3.8: Rayleigh-Kriterium einer glatten Oberfläche. 15

Abbildung 3.9: Reflektion des Lichtes an einer idealen glatten Oberfläche. 17

Abbildung 3.10: Reflexionskoeffizienten R_{TM} und R_{TE} für eine glatte Stahloberfläche. 17

Abbildung 3.11: Lichtstreuung an einer rauen Oberfläche. 19

Abbildung 3.12: Übertragungscharakteristik für das Rauheits- und Welligkeitsprofil. 23

Abbildung 3.13: Gewichtsfunktion des Profilfilters. 24

Abbildung 3.14: Übertragungscharakteristik der langwelligen Profilkomponente. 25

Abbildung 3.15: Gemessenes Profil einer zylinderförmigen Probe 26

Abbildung 3.16: Primärprofil aus dem Messdatensatz 26

Abbildung 3.17: Rauheitsprofile für das Primärprofil 27

Abbildung 3.18: Auswertungskette zur Charakterisierung der Oberflächentopographie. 31

Abbildung 3.19: Zusammenhang zwischen *S*-Filter, *L*-Filter und *F*-Operator 32

Abbildung 3.20: Gemessene Oberfläche und eine eingepasste Fläche 33

Abbildung 3.21: Primäroberfläche und die Differenzoberfläche 33

Abbildung 3.22: Rauheitskenngrößen für die 3D-Oberflächenmesstechnik 36

Abbildung 3.23: Koordinatenmessgerät „Mahr OMS 553 HA“ 37

Abbildung 4.1: Schema eines Weißlichtinterferometers mit Mirau-Objektiv. 40

Abbildung 4.2: Weißlichtinterferometer „Veeco Wyko NT1100“. 41

Abbildung 4.3: Konfokales Weißlichtmikroskop „µSurf“ der Firma „NanoFocus“. 42

Abbildung 4.4: Messprinzip des konfokalen Weißlichtmikroskops. 43

Abbildung 4.5: Funktionsprinzip des konfokal chromatischen Sensors. 44

Abbildung 4.6: Messkopf-Schema eines chromatischen Sensors mit der GRIN-Linse. 45

Abbildung 4.7: Intensitätsverteilung für drei unterschiedliche Wellenlängen in Abhängigkeit vom Abstand zum Messobjekt. 46

Abbildung 4.8: Versuchsstand Kraftmessung mit einem chromatischen Sensor. 47

Abbildung 4.9: Abstandsänderungen zur Membran durch unterschiedliche Gewichte. 48

Abbildung 4.10: Schematische Darstellung von Lichtstreuung an einer Oberfläche. 49

Abbildung 4.11: Funktionsprinzip des Streulichtsensors 50

Abbildung 4.12: Verteilungskurve des Streulichtes 53

Abbildung 4.13: Zusammenhang zwischen dem Verkippungswinkel der Oberfläche und dem *M*-Wert. 54

Abbildung 5.1: Beispiel einer Oberflächenunvollkommenheit aus der Praxis 57

Abbildung 5.2: Einpassung einer idealen Ellipse an die Delle 58

Abbildung 5.3: Vorrichtung zur mechanischen Kratzererzeugung 60

Abbildung 5.4: Programmierbares Schrittmotorsteuerungsgerät „Phytron“ 60

Abbildung 5.5: Übersicht über das Multisensorsystem 63

Abbildung 5.6: Platzierung der Sensoren auf dem KMG „Mahr OMS 553 HA“. 63

Abbildung 5.7: Kommunikationsschema des Multisensorsystems 64

Abbildung 5.8: Darstellung einer zylindrischen Oberfläche als eine Ebene 66

Abbildung 5.9: Die typische Messung bei mittlerer Lage der Streuwinkelverteilung einer Laufzapfen-Oberfläche 67

Abbildung 5.10: Die rekonstruierte Topographie der Oberfläche 68

Abbildung 5.11: Rekonstruierte Topographie nach der Filterung 69

Abbildung 5.12: Gesamtintensität (*I*-Wert) einer Oberfläche. 70

Abbildung 5.13: Lokalisierung eines Kratzers bzw. einer RWDR-Spur durch den Kennwert A_q des Streulichtsensors. 71

Abbildung 5.14: Varianz der Streuwinkelverteilung A_q einer Oberfläche 71

Abbildung 5.15: Messung einer Delle mit einem chromatischen Sensor 73

Abbildung 5.16: Messung eines Kratzers mit einem chromatischen Sensor 74

Abbildung 5.17: Referenzmessung eines Kratzers 75

Abbildung 6.1: Drallstrukturen auf einer geschliffenen Welle (Abbildung aus [18]). 76

Abbildung 6.2: Lichtreflexion an einer sinusförmigen metallischen Oberfläche. 78

Abbildung 6.3: Lichtintensitätsverteilung auf der Photodiodenzeile für unterschiedliche Amplitudenwerte *h* des Profils 80

Abbildung 6.4: Streulichtverteilung auf der Photodiodenzeile für unterschiedliche Profilperioden *D* der Oberflächen 81

Abbildung 6.5: Relativer Reflexionskoeffizient (R/R_0) und relative Breite der Streulichtverteilung (w/w_0) in Abhängigkeit von der Profilamplitude *h* für zwei unterschiedliche Periodenlängen *D* 82

Abbildung 6.6: Koeffizienten (R/R_0) und (w/w_0) in Abhängigkeit vom Parameter (h/D). 82

Abbildung 6.7: Intensitätsverteilung der Lichtstreuung an den Proben aus Tabelle 6.4 93

Abbildung 6.8: Einpassung einer Gaußfunktion auf die Messdaten 94

Abbildung 6.9: Vergleich gemessener Daten für die relative Breite der Streulichtverteilung (w/w_0) in Abhängigkeit des Koeffizienten (h/D) mit Daten, die mit Hilfe des numerischen Modells berechnet wurden 95

Abbildung 6.10: Gemessene Daten für den relativen Reflexionskoeffizienten (R/R_0) 96

Abbildung 6.11: Streulichtverteilungskurven für drei Proben 99

Abbildung 6.12: Einpassung der Modellfunktion *g2* auf die Messdaten der Probe 1 in *X*-Richtung. 100

Abbildung 6.13: Probezapfen und deren Oberfläche (Probe STST39 [34]). 104

Abbildung 6.14: Oberflächentopographie und deren Profile entlang und senkrecht zur *X*-Achse 105

Abbildung 6.15: Streulichtverteilungskurven: Die Diodenzeile erstreckt sich parallel zur *X*-Achse und senkrecht zur *X*-Achse. 106

Abbildung 6.16: Streulichtverteilungskurven an der zylinderförmigen Oberfläche bei variierendem Abstand ΔF (Probe STST40 [34]) 107

Abbildung 6.17: Streulichtverteilungskurven für unterschiedliche Abstände ΔF zur Oberfläche (Probe STST40 [34]) 108

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen

RWDR	Radialwellendichtring
DIN	Deutsche Institut für Normung
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
TE	transversale elektrische Polarisation
TM	transversale magnetische Polarisation
BRDF	bidirektionale Reflektanz-Verteilungsfunktion (engl. bidirectional reflectance distribution function
RMSE	Wurzel der mittleren quadratischen Fehler (engl.: root mean square error)
KMG	Koordinatenmessgerät

Formelzeichen

Die Bedeutung mehrfach verwendeter Formelzeichen erschließt sich aus dem Kontext.

I	Lichtintensität
k	Kreiswellenzahl
(φ_i, θ_i)	Azimut und Polarwinkel einfallendes Strahles
(φ_r, θ_r)	Azimut und Polarwinkel reflektierendes Strahles
(φ_s, θ_s)	Azimut und Polarwinkel gestreutes Strahles
λ	Lichtwellenlänge

h	Höhe des Profils
D	Periode des Profils
μ	relative Permeabilität
ε	relative Permittivität der Oberfläche
L_s	ausgehende in die Richtung (φ_s,θ_s) Strahldichte (Radiance)
E_i	aus der Richtung (φ_i,θ_i) einfallende Bestrahlungsstärke (Irradiance)
L_i	aus der Richtung (φ_i,θ_i) einfallende Strahldichte (Radiance)
λ_{co}	Grenzwellenlänge des Filters (englisch: cut off *co*)
P_a, R_a, W_a	Arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten (Primär-, Welligkeits- und Rauheitsprofile)
P_q, R_q, W_q	Quadratischer Mittelwert der Profilordinaten (Primär-, Welligkeits- und Rauheitsprofile)
l	Einzelmessstrecke (l= l_p, l_r oder l_w je nach Fall)
S_a	Mittlere arithmetische Höhe
n	Brechungsindex
A_q	Varianz der Streuwinkelverteilung
M	mittlere Lage der Streuwinkelverteilung
α	Verkippungswinkel der Oberfläche
R	Reflexionskoeffizient
w	Breite der Streulichtverteilungskurve