



Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

REM–Topografiemessungen an mikro– und nanostrukturierten Oberflächen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor–Ingenieur

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.–Math. Taras Vynnyk

geboren am 16. Mai 1977, in Lviv



Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier
Institut für Mess- und Regelungstechnik
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Seume
Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik
- Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. habil. P. Nyhuis
Institut für Fabrikanlagen und Logistik

Tag der Promotion: 10.11.2009

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

Taras Vynnyk

**REM-Topografiemessungen an mikro- und
nanostrukturierten Oberflächen**

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2009

Umschlag:

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

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9062-7

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover.

Dem Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier, gilt mein großer Dank für die wissenschaftliche Förderung sowie für die Übernahme des 1. Referats. Bedanken möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Seume, Leiter des Instituts für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, für die Übernahme des 2. Referats. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Nyhuis, Leiter des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik, danke ich sehr für die Übernahme des Vorsitzes.

Mein herzlicher Dank geht an alle Mitarbeiter des Instituts für das angenehme Arbeitsklima und für die Hilfsbereitschaft.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für die Anregung zur Wissenschaft und insbesondere bei meiner Frau Lena für ihre Unterstützung, Geduld und ihr Verständnis bedanken.

Hannover, November 2009

Taras Vynnyk

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell der Signalentstehung in einem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit zwei gegenüberliegenden Everhart-Thornley-Detektoren vorgestellt. Auf Basis des Modells wird eine verbesserte photometrische Auswertemethode entwickelt, die aus REM-Aufnahmen eine Oberflächentopografie mit einer lateralen Auflösung von bis zu 20 nm rekonstruieren kann. Im Gegensatz zur klassischen photometrischen Methode, der eine Lambertsche Winkelverteilung der Emissionselektronen sowie die sekansförmige Abhängigkeit der Emissionsausbeute zugrunde liegen, werden diese Anforderungen in der verbesserten Methode abgeschafft. Darüber hinaus ermöglicht das vorgestellte Verfahren eine 3D-Rekonstruktion von Oberflächen unabhängig von den Emissionseigenschaften verschiedener Materialien. Hierfür wird eine robuste numerische 3D-Integration entwickelt, die auf die Fourieranalyse zurückgreift und den Einfluss der Störanteile eliminiert.

Zur Validierung des entwickelten Modells hinsichtlich der Genauigkeit der rekonstruierten Oberfläche und der Auflösungsgrenze werden verschiedene technische Oberflächen gemessen und untersucht. Zum Vergleich werden sowohl optische als auch taktile Messverfahren (Rasterkraftmikroskop - AFM) herangezogen. Darüber hinaus wird beispielhaft eine Genauigkeitssteigerung durch die Fusion von REM- und optisch gewonnenen Messdaten vorgestellt.

Zur Charakterisierung von Messdatensätzen mit periodischen Strukturen werden zwei Methoden vorgestellt, die auf der Fourier- bzw. Splineapproximation basieren.

Stichworte: Rasterelektronenmikroskop, Photometrische Methode, „Shape from Shading“, Sekundärelektronen, Rückstreuelektronen, Fourier 3D-Integration

Abstract

In this paper a mathematical model of signal occurrence in a scanning electron microscope (SEM) with 2 oppositely positioned Everhart-Thornley detectors is presented. Based on this model an improved photometric method was developed that allows measuring a surface topography with a lateral resolution of 20 nm. In comparison to the classic photometric method the efficiency of the detector system is taken into account and the requirements of the cosine Lambert's law for the angle distribution of emitted electrons as well as secant-shaped dependency of the emission's coefficient on the inclination angle are suppressed. Furthermore, the presented method provides a 3D-reconstruction of the surface independent from the emission properties of different materials. For this purpose a robust 3D-integration was developed to which the Fourier analysis was applied to eliminate the influence of noise components.

The developed model was tested on different measurement objects and analysed with regard to accuracy and resolution limits. For comparison optical measuring method and atomic force microscope (AFM) measuring method were applied. In addition an improvement of the accuracy using an example of the fusion of SEM- and optically measured data is shown.

Finally, the characterization of the measured dataset with periodical structures based on the Fourier and spline approximation is presented.

Keywords: Scanning Electron Microscope, photometric method, shape from shading, secondary electrons, backscattered electrons, Fourier 3D-Integration

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Existierende Methoden für die Oberflächenerfassung	3
2.1	Taktile Messungen.....	3
2.2	Erfassung der Oberfläche mittels optischer Methoden	5
2.2.1	Weißlichtinterferometer.....	5
2.2.2	Konfokales Mikroskop.....	6
2.2.3	Numerische Apertur und deren Einfluss auf die Qualität der Messung	7
2.3	REM – Auswertung.....	11
2.3.1	REM Aufbau.....	11
2.3.2	Photogrammetrische Auswertung REM - Aufnahmen.....	13
2.3.3	Analyse des Detektorsignals von regulären Strukturen	14
2.3.4	Klassische photometrische Methode.....	16
2.3.5	Nachteile der klassischen photometrischen Methode	17
3	Theoretische Betrachtung der verbesserten photometrischen Methode.....	19
3.1	Untersuchung von sekundären und Rückstreuelektronen	19
3.1.1	Streuprozesse	19
3.1.2	Elektronenreichweite und Definition von SE- und Rückstreuelektronen.....	20
3.1.3	Totale Emissionsausbeute, Winkel- und Energieverteilung	21
3.1.4	Empirische Formeln zur Berechnung von Emissionskoeffizienten.....	23
3.1.5	Empirische Formeln zur Berechnung von Winkelverteilungen.....	28
3.1.6	Resultierende Parameterauswahl	32
3.2	Photometrische Methode	33
3.2.1	Rekonstruktion von konvexen Oberflächen.....	34
3.2.2	Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Detektoren und der nicht Lambertschen Emissionsverteilung	38
3.2.3	Rekonstruktion von beliebigen Oberflächen	48
3.2.4	Festlegung der Systemparameter	51
3.2.5	Zeiteffektive Berechnung der Horizontkurve	56
3.2.6	Numerische Integration.....	63
4	Experimenteller Aufbau und die Messergebnisse	75
4.1	Experimentelle Aspekte bei der Oberflächenerfassung mit dem Rasterelektronenmikroskop	75

4.1.1	Ausgleich der Detektorverstärkungen	76
4.1.2	Einfluss des Magnetfeldes	78
4.1.3	Zeitliche Änderung der Detektorsignale	80
4.1.4	Ortsabhängige Empfindlichkeit von Detektoren	82
4.1.5	Erfassung von größeren Oberflächen	84
4.1.6	Azimutale Ausrichtung des Detektorsystems.....	87
4.2	Messablauf und Ergebnisse.....	90
4.2.1	Kugel	91
4.2.2	Ribletstrukturen	93
4.2.3	Holografisches Beugungsgitter	95
4.3	Kombinierte Auswertemethode	97
4.3.1	Datenanpassung.....	98
4.3.2	Datenverschmelzung	99
5	Charakterisierung der Messergebnisse.....	101
5.1	Anpassung des Profils mit der Fourier-Reihe	102
5.2	Anpassung des Profils mit B-Splines.....	105
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	109
7	Literaturverzeichnis.....	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Morphologische Filterwirkung einer Tastnadel an Strukturen	3
Abbildung 2: Links: taktile Messung an einer Rillenstruktur. Rechts: taktile Messung an derselben Oberfläche, die jedoch abgeformt wurde. Die verwendete Tastnadel hat einen Radius von 5 μm	4
Abbildung 3: Funktionsprinzip eines Weißlichtinterferometers	5
Abbildung 4: Funktionsprinzip eines konfokalen Mikroskops	6
Abbildung 5: Abhängigkeit zwischen dem Öffnungswinkel des Objektivs und der NA.....	7
Abbildung 6: Problem der direkten Lichtreflexion an geneigten Flächen	7
Abbildung 7: Rückstreuung des Lichts an Oberflächen mit verschiedener Rauheit.....	8
Abbildung 8: Intensitätsverteilung des Schnittverlaufs durch den Bilderstack für unterschiedlich hergestellte Proben	9
Abbildung 9: Fehlerhafte Interpolation der Fehlstellen. Links - REM - Aufnahme der lackierten Oberfläche, rechts - optisch aufgenommene und interpolierte Oberfläche	9
Abbildung 10: Funktionsprinzip des Rasterelektronenmikroskops	11
Abbildung 11: Intensitätsverteilung des Primärelektronenstrahls.....	12
Abbildung 12: Typische REM - Aufnahme. Die Flanken sind heller als die horizontalen Bereiche	12
Abbildung 13: Abhängigkeit der totalen Elektronenausbeute vom Neigungswinkel	12
Abbildung 14: Schematisches Prinzip der photogrammetrischen Rekonstruktion	13
Abbildung 15: REM - Aufnahmen mit unterschiedlichem Neigungswinkel. Die Pfeile kennzeichnen gleiche Topografiepunkte, deren Ähnlichkeit insbesondere im rechten Bild nicht mehr zu erkennen ist.....	14
Abbildung 16: Das Strukturprofil und die entsprechende Modellfunktion	15
Abbildung 17: 2-Detektorsystem	16
Abbildung 18: Abschattungseffekte bei konkaven Profilen (links) und das Rekonstruktionsschema (rechts).....	17
Abbildung 19: Ablenkung von emittierten Elektronen durch den Einfluss des elektrischen Sammelfeldes und mehrfache Ionisation.	18
Abbildung 20: Emission von Elektronen durch Ionisierung	21
Abbildung 21: Die Energieverteilung der gesamten Emissionsausbeute	22
Abbildung 22: Experimentell ermittelte E_{max} -Werte und die Regressionsgerade	24

Abbildung 23: Abhängigkeit des Rückstreuoeffizienten von der Primärenergie und von dem Neigungswinkel der Probe	25
Abbildung 24: Emissionsausbeute als Funktion der Primärenergie	27
Abbildung 25: Energie- und Winkelverteilung von sekundären Elektronen. Die Energieverteilung (links) ist auf den maximalen Wert normiert. Die Winkelverteilung (rechts) hängt nur von dem Winkel ψ zwischen der Austrittsrichtung und dem Oberflächennormal ab.....	28
Abbildung 26: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Lambertschen und quantenmechanischen Verteilungen	29
Abbildung 27: Quantenmechanische Verteilung und die Approximationsverteilung (links), die Soll-Ist-Differenz der beiden Verteilungen (rechts)	30
Abbildung 28: Winkelverteilung von Rückstreuelektronen in Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Probe	31
Abbildung 29: Normalisierte Energie als Funktion der Ordnungszahl.....	32
Abbildung 30: Energiespektrum der Rückstreuelektronen.....	32
Abbildung 31: Winkelverteilungen der totalen Emissionsausbeute	33
Abbildung 32: Emission im globalen (links) und lokalen (rechts) Koordinatensystem	35
Abbildung 33: Berechnung des Grenzemissionswinkels	37
Abbildung 34: Feldverteilung in einem 2D-Schnitt durch die Probenkammer	39
Abbildung 35: Detektionsverhalten bei unterschiedlichen Elektronenbahnen (links) und korrespondierende Detektionsmatrix (rechts).....	40
Abbildung 36: Detektionsmatrizen für Emissionselektronen mit der kinetischen	41
Abbildung 37: Zonenaufteilung für emittierte Elektronen	42
Abbildung 38: Elektronenfluss durch elementare Fläche.....	42
Abbildung 39: Berechnung des nicht registrierten Anteils für eine beliebige Oberfläche	49
Abbildung 40: Detektorsignale und experimentell ermittelte Signalrelationen.....	52
Abbildung 41: Bestimmung der Position von der Kalibrierkugel	54
Abbildung 42: Ergebnis der Modellanpassung bei der Approximationswinkelverteilung.....	56
Abbildung 43: Berechnung des minimalen Steigungswinkels	57
Abbildung 44: Interpolation in den Zwischenstellen.....	58
Abbildung 45: Berechnung der Horizontkurve auf mehreren Rechnern	60
Abbildung 46: Zeitliche Entwicklung von GPU und CPU	60
Abbildung 47: Architektur von einer CPU (links) und voneiner GPU (rechts).....	61

Abbildung 48: CUDA Softwaremodell (links) und Hardwarearchitektur des GPUs (rechts).....	62
Abbildung 49: Integration des Rauschens	64
Abbildung 50: Fehlerhafte Rekonstruktion des Signals bei der Überschreitung der	65
Abbildung 51: Fehlerhafte Rekonstruktion von aperiodischen Profilen	70
Abbildung 52: Schematischer Ablauf der Periodisierung	71
Abbildung 53: Aufteilung in Subbereiche.....	72
Abbildung 54: Integration des normal verteilten Rauschens. Standardmethode (links), Fourier-Integration (mitte), Kombinationsverfahren (rechts)	73
Abbildung 55: DSM940 mit 2 um 180° versetzten ET-Detektoren	76
Abbildung 56: Aufbau des Everhardt-Thornley Detektors	77
Abbildung 57: Intensität als Funktion des Rotationswinkels um die z-Achse	78
Abbildung 58: Durch das Magnetfeld hervorgerufene virtuelle Änderung des Neigungswinkels	79
Abbildung 59: Positive Ladung der Probe bei der Bestrahlung mit niederenergetischen Elektronen.....	80
Abbildung 60: Zeitliche Änderung der mittleren Detektorintensität.....	81
Abbildung 61: Ermittlungsschema der Empfindlichkeitsfunktionen	82
Abbildung 62: Empfindlichkeiten des 2-Detektorsystems.....	83
Abbildung 63: Typische Aufnahmekonstellation.....	85
Abbildung 64: Stitching-Ergebnis für parallel ausgerichtete trapezförmige Strukturen	86
Abbildung 65: Stitching-Ergebnis für schrägausgerichtete trapezförmige Strukturen	86
Abbildung 66: Winkel zwischen dem Detektorsystem und der Abtastrichtung	87
Abbildung 67: Aufbau der Objektivlinse (links) und Verteilung der magnetischen Flussdichte entlang der optischen Achse (rechts).....	88
Abbildung 68: Abhängigkeit der Strukturwinkel vom Arbeitsabstand	88
Abbildung 69: Das lokale und globale Koordinatensystem	89
Abbildung 70: Vergleich der gemischten partiellen Ableitungen vor und nach der Drehwinkelkorrektur	90
Abbildung 71: 3D-Rekonstruktion einer Stahlkugel: 1 - Rekonstruktionsergebnis, 2 und 3 – markierte Diagonalprofile und korrespondierende Profile einer Idealkugel, 4 und 5 – Soll-Ist Differenz für markierte Profilschnitte und 6 - Gesamtabweichung von der idealen Kugel	92
Abbildung 72: Ermittelte Signalrelation k_x von der Stahlkugel	93

Abbildung 73: Ideales Ribletprofil	93
Abbildung 74: Rekonstruierte Ribletoberfläche und Vergleich mit dem Referenzmessdatensatz für ideale Ribletstrukturen	94
Abbildung 75: Rekonstruierte Ribletoberfläche und Vergleich mit dem Referenzmessdatensatz für geschliffene Ribletstrukturen	95
Abbildung 76: Messungen des holografischen Beugungsgitters mit dem konfokalen Mikroskop	96
Abbildung 77: Vergleich zwischen den REM- und AFM-Messergebnissen.....	97
Abbildung 78: Skizze zur Erläuterung der Profilentstehung (links) und Ermittlung der Phasenverschiebung als Funktion der Schnittnummer (rechts)	99
Abbildung 79: Abbott-Kurve und Gewichtskoeffizient $k(z)$	100
Abbildung 80: Ergebnisse der Messdatenfusion.....	100
Abbildung 81: Vermessung von Drallstrukturen. Der aufgenommene Messdatensatz (rechts) beinhaltet 2 Drallstrukturen: 4 Wellen/mm und 20 Wellen/mm.	101
Abbildung 82: Herstellung der approximierten Oberfläche	102
Abbildung 83: Auswirkung des Leakage-Effekts.....	103
Abbildung 84: Ermittlung der dominanten Welle.....	104

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen

REM	Rasterelektronenmikroskop
ET- Detektor	Everhardt-Thornley Detektor
BSE	Rückstreuetelektronen (eng. <u>b</u> ack <u>s</u> cattered <u>e</u> lectrons)
SE	Sekundäre Elektronen (eng. <u>s</u> ecundary <u>e</u> lectrons)
SE1	Sekundären Elektronen, die durch primäre Elektronen angeregt wurden
SE2	Sekundären Elektronen, die durch Rückstreuetelektronen angeregt wurden
SE3	Sekundäre Elektronen, die Kollision von Rückstreuetelektronen mit der Probenkammer entstehen
NA	Numerische Apertur
CPU	Hauptprozessor (eng. <u>C</u> entral <u>P</u> rocessing <u>U</u> nit)
GPU	Grafikprozessor (eng. <u>G</u> raphics <u>P</u> rocessing <u>U</u> nit)
ALU	Recheneinheit (eng. <u>A</u> rithmetic <u>L</u> ogic <u>U</u> nit)
CUDA	<u>C</u> ompute <u>U</u> nified <u>D</u> evice <u>A</u> rchitecture
DFT/FFT	Diskrete/Schnelle (eng. Discrete/Fast) Fouriertransformation

Formelzeichen

ψ, θ	Vertikaler Emissionswinkel (Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor des Emissionselektrons und dem Oberflächennormal in dem Emissionsort)
α, β, γ	Azimutaler Emissionswinkel (Winkel zwischen den Projektionen des Geschwindigkeitsvektor des Emissionselektrons und der X-Achse auf die tangentialen Ebene in dem Emissionsort)
η	Emissionsausbeute der Rückstreuetelektronen (Rückstreuoeffizient)
δ	Emissionsausbeute der sekundären Elektronen (SE-Koeffizient)
σ	Gesamt Emissionsausbeute
*	Faltungsoperator
$f_{\sigma}(E)$	Energieverteilung der gesamten Emissionsausbeute
$f_{\sigma}(\psi)$	Winkelverteilung der gesamten Emissionsausbeute
$f_{\eta}(E)$	Energieverteilung von Rückstreuetelektronen
$f_{\eta}(\psi)$	Winkelverteilung von Rückstreuetelektronen

$f_{\delta}(E)$	Energieverteilung von sekundären Elektronen
$f_{\delta}(\psi)$	Winkelverteilung von sekundären Elektronen
Ep	Primärelektronenenergie
Z	Ordnungszahl des Probenmaterials
φ	Einfallswinkel des Primärelektronenstrahls
We	Austrittsarbeit
$\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}$	Partielle Ableitungen der Oberflächenfunktion in X- und in Y- Richtung
ψ_x, ψ_y	Lokaler Neigungswinkel der Messprobe zu den X- und Y-Achsen
τ	Absorptionskoeffizient der Elektronenkanone
τ_{ob}	Absorptionskoeffizient der Messprobe
$\varphi_{min}(\alpha)$	Minimaler Emissionswinkel, bei dem Elektronen von der Oberfläche nicht absorbiert werden
[...]	ganzzahliger Anteil
$I_{1x}, I_{1y}, I_{2x}, I_{2y}$	Signale von den entlang der X-, Y-Achsen ausgerichteten Detektoren 1 und 2
k_1, k_2	Koeffizienten der Approximationswinkelverteilung