



Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

Charakterisierung von Mikrostrukturen mit strukturorientierten
Rauheitskenngrößen und Identifikation funktionsrelevanter
Kenngrößen durch Reibwert-Korrelation

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

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Bretschneider
geboren am 30.12.1981 in Hannover

2010



Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

- 1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
Institut für Mess- und Regelungstechnik
- 2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll
Institut für Maschinenelemente, Konstruktionstechnik und Tribologie
- Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen

Tag der Promotion: 10. Dezember 2010

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

Martin Bretschneider

**Charakterisierung von Mikrostrukturen mit
strukturorientierten Rauheitskenngrößen und
Identifikation funktionsrelevanter Kenngrößen
durch Reibwert-Korrelation**

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., 2010

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 978-3-8322-9750-3

ISSN 1615-7184

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover. Dem Leiter der Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier gilt mein großer Dank für die wissenschaftliche Förderung und für die Übernahme des ersten Referates.

Auch möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, Konstruktionstechnik und Tribologie der Leibniz Universität Hannover, für die Übernahme des zweiten Referates bedanken. Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena, Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover, bedanke ich mich für den Prüfungsvorsitz.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Arbeitsgruppenleitern Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig und Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Markus Kästner, den Mitarbeitern des Instituts für Mess- und Regelungstechnik und der anderen Institute, mit denen ich zusammengearbeitet habe, bedanken.

Natürlich möchte ich mich auch bei meiner Familie und meiner Freundin Melanie für die Unterstützung bedanken.

Hannover, September 2010

Kurzdarstellung

In einer DFG-Forschergruppe wird untersucht inwiefern das Modifizieren der Oberfläche von Metallen die tribologischen Eigenschaften verändern kann. Hierzu werden durch zwei verschiedene Produktionsverfahren Mikrostrukturen eingebracht: Mit einem Spanprozess werden deterministische Strukturen und mit dem atmosphärischen Plasmaspritzen werden stochastische Strukturen erzeugt.

Für eine schnelle Erfassung dieser Strukturen werden optische Rauheitsmessgeräte verwendet. Hiermit kann eine große Anzahl von Mikrostrukturen gemessen werden. Diese Messdaten werden mit verschiedenen Messdatenvorverarbeitungsschritten wie die Bestimmung der Referenzebene und Segmentierung der einzelnen Mikrostrukturen durch das Schwellwertverfahren oder die Wasserscheidentransformation aufbereitet.

Zur Beschreibung der Mikrostrukturen werden verschiedene Kenngrößen wie Volumen, Fläche, Tiefe, mittlere Rauheit innerhalb und außerhalb der Strukturen, Porositäten und weitere berechnet. Anhand dieser Kenngrößen können bereits Aussagen über die Produktionsprozesse gemacht werden.

Diese Kenngrößen werden mit tribologischen Experimenten verglichen. Durch diese Korrelation werden funktionsrelevante Kenngrößen identifiziert: Bei deterministischen Strukturen hat die Tiefe einen Einfluss, denn bei hohen Relativgeschwindigkeiten verringern tiefe Strukturen den Reibwert, bei geringen Geschwindigkeiten vergrößern sie diesen. Stochastische Strukturen mit einer größeren Fläche zeigen einen kleineren Reibwert, manche stochastische Strukturen zeigen bei kleineren Tiefen einen geringeren Reibwert und eine geringere mittlere Rauheit zwischen den stochastischen Strukturen verringert den Reibwert ebenfalls.

Stichworte: 3D-Rauheitsmesstechnik, Mikrostrukturierung, tribologisch relevante Kenngrößen

Abstract

In a research unit of the *German Research Foundation* the surface of metals is modified by microstructures in order to change the tribological properties. Two production methods are used to create these microstructures: A cutting process manufactures deterministic microstructures and atmospheric thermal spraying creates stochastic microstructures.

Optical roughness measurement devices are used to detect the large amounts of microstructures. The resulting measurement data is preprocessed by methods like the calculation of the reference plane and the segmentation of each microstructure using a threshold method or the watershed transformation.

Several characteristics of the microstructures like volume, area, depth, average roughness in and besides the microstructures, porosities and others are calculated. Using these characteristics some properties of the production process can be concluded.

These characteristics are compared to tribological experiments. Due to these correlations the functional relevant characteristics are identified: Deterministic microstructures show an influence of the depth of the microstructures since at high velocities microstructures with a larger depth decrease the friction value, whereas at low velocities they increase the friction value. Stochastic microstructures with a larger area decrease the friction value and some stochastic microstructures with a smaller depth cause a lower friction value. A smaller average roughness besides the microstructures also decrease the friction value.

keywords: 3d-roughness measurement, microstructuring, tribological functional characteristics

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	5
2.1 2D- und 3D-Rauheitsmesstechnik	5
2.1.1 Taktile Rauheitsmessgeräte	5
2.1.2 Optische Rauheitsmessgeräte	6
2.2 3D-Ausrichtung	13
2.3 Stitching	14
2.4 Segmentierung	16
2.5 Tribologisch funktionsrelevante Kenngrößen	17
3 Produktion der Mikrostrukturen	21
3.1 Produktion deterministischer Mikrostrukturen durch Mikrospanen	21
3.2 Produktion stochastischer Mikrostrukturen durch atmosphärisches Plasmaspritzen	24
3.3 Produktion von Mikrostrukturen durch andere Verfahren	26
4 Vorverarbeitung der Messdaten	27
4.1 3D-Ausrichtung von Messungen mit großen Strukturen	27
4.1.1 Ausrichtung über ein Histogramm	29

Inhaltsverzeichnis

4.1.2	Automatische Ausrichtung über eine Einpassung mit kombinierter Strukturerkennung	31
4.2	Stitching von lateral groß ausgedehnten Mikrostrukturen mit Kenngrößen	35
4.3	Segmentierung	39
4.3.1	Segmentierung von stochastischen Strukturen mit der Wasserscheidentransformation	40
4.3.2	Segmentierung von deterministischen Strukturen	42
4.4	Regionen-Findung	46
5	Kenngrößen für Mikrostrukturen	51
5.1	Kenngrößen für Proben mit deterministischen und stochastischen Strukturen	51
5.1.1	Vorverarbeitung: Querschnitte	51
5.1.2	Volumen	53
5.1.3	Histogrammbasierte Tiefen	54
5.1.4	Fläche	55
5.2	Kenngrößen für mikrogespante Proben	55
5.2.1	Längen	55
5.2.2	Aufwürfe	56
5.2.3	Flächen	56
5.2.4	Werkzeugradius, Spannungsdicke aus Kreisfit	57
5.2.5	Eingriffslänge	58
5.2.6	Relatives Spanvolumen	59
5.2.7	Rauheiten in der Struktur	60
5.2.8	Eckenwinkel und Eckenradius	60
5.3	Kenngrößen für thermisch gespritzte Proben	61
5.3.1	Porositäten	62
5.3.2	Struktur-Rundheit	63
5.3.3	Mittlere Rauheit abseits der Strukturen	63
5.4	Virtuelle Normale	64
5.5	Abstand der Strukturen	66

6	Auswertung der Messungen mit Kenngrößen	71
6.1	Programm zum Auswerten der Messungen	71
6.2	Auswertung der Kenngrößen für gespannte Mikrostrukturen . . .	73
6.2.1	Einfluss des Eckenradius und des Spanwinkels	73
6.2.2	Einfluss von Werkstoff und Spangeschwindigkeit bei der Außenstrukturierung rotationssymmetrischer Proben . . .	74
6.2.3	Einfluss von Werkstoff und Spangeschwindigkeit an ebenen Proben	76
6.3	Auswertung der Kenngrößen für thermisch gespritzte Mikrostrukturen	77
6.3.1	Einfluss der Messfeldgröße	78
6.3.2	Kenngrößen-Kenngrößen-Diagramme	80
6.3.3	Einfluss der Schwellwerte	81
7	Funktionsrelevante Kenngrößen durch Korrelation mit Tribometerversuchen	87
7.1	Tribologische Grundlagen	87
7.2	Grundlagen des Verbrennungsmotors	88
7.3	Tribometer-Versuche	89
7.4	Korrelation von Kenngrößen mit Tribometerversuchen	92
7.4.1	Deterministische Strukturen mit verschiedenen Tiefen . .	93
7.4.2	Stochastische Strukturen	96
8	Zusammenfassung	101
8.1	Ausblick	103
	Literaturverzeichnis	105
	Lebenslauf	117

Abbildungsverzeichnis

1.1	Energiebedarf eines PKWs	2
2.1	Weißlichtinterferometer	9
2.2	konfokales Mikroskop	11
2.3	chromatischer Sensor	12
3.1	verschiedene Größen beim Spanen an der Werkzeugschneide . .	22
3.2	schematischer Spanprozess mit der Werkzeugschneide zur Erzeugung einer Mikrostruktur	23
3.3	Rauheitsmessungen gespannter Mikrostrukturen	23
3.4	Prinzip des atmosphärischen Plasmaspritzens	24
3.5	thermisch gespritzte FeCr-Schichten	25
4.1	Rauheitsmessung ohne 3D-Ausrichtung	28
4.2	Rauheitsmessung mit 3D-Ausrichtung	29
4.3	unterschiedliche 3D-Ausrichtungen mit Ebeneneinpassungen bei Messungen mit großen Strukturen	30
4.4	Ausgangsmessung ohne 3D-Ausrichtung als Grundlage für weitere Untersuchungen	31
4.5	grobe Einpassung mit einem Ausgleichselement zweiter Ordnung	32
4.6	Strukturerkennung aus der groben Einpassung	33
4.7	Verarbeitungsmöglichkeiten der erkannten Strukturen	33
4.8	feine Einpassung mit einem Ausgleichselement zweiter Ordnung ohne Berücksichtigung der Strukturen	34

Abbildungsverzeichnis

4.9	Teilmessungen zum Stitching und der Verlauf der Kenngrößen Strukturbreite und Querschnittfläche	36
4.10	Zusammensetzen der Teilmessungen einer deterministischen Mi- krostruktur basierend auf der Kenngröße Querschnittfläche. Das Zusammenschieben wird durch die Pfeile gezeigt.	38
4.11	Funktionsprinzip der Wasserscheidentransformation	41
4.12	Segmentierung der stochastischen Strukturen	42
4.13	Vergleich von zwei Segmentierungsverfahren und den segmen- tierten Bereichen an einer deterministischen Mikrostruktur im Querschnitt	43
4.14	Bitmaske der Regionen aus der Messung aus Abbildung 4.2(a) . .	44
4.15	Suchgebiete von Aufwürfen innerhalb der Messung aus Abbil- dung 4.2(a)	45
4.16	Bestimmen der gesamten Regionen aus den Messdaten mit Seg- mentierungsverfahren	46
4.17	Basis- und Nachbarschaftsalgorithmus bestimmen eine Region . .	48
4.18	Basis- und Nachbarschaftsbearbeitung zum Finden weiterer Re- gionen	49
4.19	erkannte Regionen der Messung aus Abbildung 4.2(a)	50
5.1	Draufsicht einer schematischen deterministischen Mikrostruktur mit Schnitten und Ausrichtungswinkel	52
5.2	Interpolation der Ausdehnung eines Messpunktes in einem Schnitt	53
5.3	Vergleich von der Tiefe a_p mit dem histogrammbasierten Wert $a_{p,hist}$ anhand einer deterministischen Mikrostruktur	54
5.4	deterministische Mikrostruktur in der Draufsicht mit Kenngrößen	56
5.5	deterministische Mikrostruktur im Querschnitt mit Kenngrößen .	56
5.6	deterministische Mikrostruktur mit Kenngrößen in drei Ansichten	57
5.7	deterministische Mikrostruktur im Längsschnitt mit Kenngrößen zur Schneidenbewegung und Messung mit eingepasstem Kreisfit	58
5.8	deterministische Mikrostruktur im Querschnitt mit Kenngrößen zum relativen Spanvolumen	59

5.9	deterministische Mikrostruktur im Querschnitt mit Kenngrößen	61
5.10	Erstellen von beliebigen Strukturen mit dem Vektorzeichenprogramm Inkscape	64
5.11	beispielhafte Strukturen und Anordnungen, erstellt mit dem Vektorzeichenprogramm Inkscape (siehe Abbildung 5.10)	65
5.12	Strukturen und deren Schwerpunkte	66
5.13	Abstände der Strukturen aus Abbildung 5.12	67
5.14	Beispiele für Abstände mit Abstandsmatrizen	69
6.1	Ablauf der Vorgänge von der Messung bis zum Ergebnis Korrelation	72
6.2	verschiedene Kenngrößen bei unterschiedlichen Eckenradien r_β und Spanwinkeln γ	73
6.3	Kenngröße Spanungsquerschnitt A bei verschiedenen Spanungsdicken	75
6.4	Kenngröße relatives Spanvolumen über alle Querschnitte $f_{ab,total}$ und Mittenrauheit in Längsrichtung $R_{a,l}$ bei unterschiedlichen Werkstoffen und Spangeschwindigkeiten	76
6.5	verschiedene Kennwerte der Versuchsreihe an ebenen Proben	77
6.6	FeCr-Messung mit stochastischen Strukturen und Histogramme von zwei Kennwerten	78
6.7	Histogramm des Kennwertes Fläche A_p bei unterschiedlicher Anzahl von Messungen bzw. unterschiedlicher Messfeldgröße	79
6.8	Einpassung einer e^x -Funktion in das Histogramm des Kennwertes Fläche A_p	79
6.9	Kenngrößen-Kenngrößen-Diagramme aller Strukturen einer FeCr-Probe	80
6.10	Messungen und Strukturen bei unterschiedlichen Schwellwerten	82
6.11	Verlauf verschiedener Kennwerte von FeCr- und FeMo-Proben	83
6.12	Verlauf verschiedener Kennwerte von FeCr- und FeMo-Proben bei unterschiedlichen Schwellwerten und Normierungen	85
7.1	vereinfachtes Prinzip eines Verbrennungsmotors in einem Zylinder	88

Abbildungsverzeichnis

7.2	Tribometer TRM 5000 der Firma Wazau	89
7.3	Verlauf von Stribeckkurven	91
7.4	Bildbetrachter mit mehreren Kenngrößen-Reibwert-Diagrammen	93
7.5	Kenngrößen-Reibwert-Diagrammen der Kenngröße $a_{p,hist}$ der deterministischen Proben	94
7.6	Kenngrößen-Reibwert-Diagramme der Kenngröße A_p der FeCr-Proben	97
7.7	Kenngrößen-Reibwert-Diagramme der Kenngröße R_a bei unterschiedlichen Proben	98
7.8	Kenngrößen-Reibwert-Diagramme der Kenngröße t_{hist} der FeCr-Proben	99

Symbolverzeichnis

Allgemeine Symbole

Symbol	Erklärung
s	Skalar s
\vec{v}	Vektor \vec{v}
\mathbf{M}	Matrix \mathbf{M}
$\mathbf{1}$	$\mathbf{M}(x, y) = 1 \quad \forall (x, y)$

Symbole für die Produktion

Symbol	Erklärung
α	Freiwinkel
γ	Spanwinkel
β	Keilwinkel
ϵ	Eckenwinkel
κ	Einstellwinkel
r_β	Eckenradius

Symbole für die Messdatenvorverarbeitung

Symbol	Erklärung
t	Tiefe
\mathbf{M}	alle Messdaten, also Höheninformation
$\mathbf{M}(x = 1, y = 2)$	Messdaten an der Position $(x = 1, y = 2)$, also ein Skalar
$\mathbf{M}(x = 1 \dots 7, y = 1 \dots 5)$	Messdaten an den Positionen $(x = 1 \dots 7, y = 1 \dots 5)$, also wieder eine Matrix, aber mit geringem Inhalt
$\mathbf{M}_i^{(u=1, v=1)}$	relative Position der Messung \mathbf{M}_i in einem übergeordneten Gitter mit der Position $(u = 1, v = 1)$
\mathbf{R}	alle Regionen
\mathbf{R}_i	einzelne Region i mit Messdaten
\vec{R}_i	Liste von Punkten in der Region i
t_s	Schwellwert für Struktur
t_{s,a_j}	Schwellwert für j -ten Aufwurf
\vec{r}_i	Liste der Elemente aus \mathbf{R} , für die $\mathbf{R} = 1$ gilt
\mathbf{SE}	strukturierendes Element, mit dem \mathbf{R} bearbeitet wird
$\mathbf{M}_{\mathbf{R}_i}$	Messdaten, also Höheninformation, die der Region \mathbf{R}_i zugehörig sind

Symbole für die Kenngrößen

Symbol	Erklärung
\mathbf{M}_{R_i}	Messdaten, also Höheninformation, die der Region oder Struktur R_i zugehörig sind
$x_{\text{Auflösung}}$	Auflösung in lateraler x -Richtung oder Abstand zweier Messpunkte in lateraler x -Richtung
$y_{\text{Auflösung}}$	Auflösung in lateraler y -Richtung oder Abstand zweier Messpunkte in lateraler y -Richtung
x_{Anzahl}	Anzahl der Messpunkte in lateraler x -Richtung
y_{Anzahl}	Anzahl der Messpunkte in lateraler y -Richtung
x_s	x -Koordinate des Schwerpunktes einer Region
y_s	y -Koordinate des Schwerpunktes einer Region
\vec{s}_q	Querschnitt
\vec{s}_l	Längsschnitt
ϕ	Ausrichtungswinkel der Struktur
b	Strukturbreite
l_E	Eingriffslänge
l_S	Strukturlänge
r_{WZ}	Werkzeugradius
ϵ	Eckenwinkel
$r_{\epsilon, WZ}$	Eckenradius des Werkzeugs
ϵ_{WZ}	Eckenwinkel des Werkzeugs
$a_{p, max}$	maximale Spanungsdicke
$a_{p, hist}$	histogrammbasierte Spanungsdicke
$a_{p, fit}$	Spanungsdicke aus Kreisfit
f_{ab}	relatives Spanvolumen
$f_{ab, total}$	relatives Spanvolumen über alle Querschnitte
A	Querschnittsfläche
A_p	projizierte Fläche
A_E	Fläche im Längsschnitt

Symbolverzeichnis

V	Strukturvolumen
$b_{a,r}$	Aufwurfbreite rechts
$b_{a,l}$	Aufwurfbreite links
$h_{a,r}$	Aufwurfhöhe rechts
$h_{a,l}$	Aufwurfhöhe links
$b_{a,r,hist}$	Aufwurfbreite rechts, histogrammbasiert
$b_{a,l,hist}$	Aufwurfbreite links, histogrammbasiert
$h_{a,r,hist}$	Aufwurfhöhe rechts, histogrammbasiert
$h_{a,l,hist}$	Aufwurfhöhe links, histogrammbasiert
$R_{a,q}$	Mittenrauheit quer zur Schnittrichtung
$R_{a,l}$	Mittenrauheit längs zur Schnittrichtung
$R_{t,q}$	Rauhtiefe quer zur Schnittrichtung
$R_{t,l}$	Rauhtiefe längs zur Schnittrichtung
A_V	flächenhafte Porosität
V_V	volumenhafte Porosität
$V_{V,sp}$	spezifische volumenhafte Porosität
M_{Rund}	Struktur-Rundheit
R_a	mittlere Rauheit abseits der Strukturen
$d_{i,j}$	Abstand der Strukturen i und j
D	Abstandsmatrix aller Strukturen

Symbole für die Korrelation

Symbol	Erklärung
v	relative Geschwindigkeit der Reibpartner
μ	Reibwert
T	Temperatur des Schmiermittels bei den Tribometerversuchen
p	Last (Druck) bei den Tribometerversuchen