



**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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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 $r_\beta$ und Spanwinkeln $\gamma$ . . . . .	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
$\alpha$	Freiwinkel
$\gamma$	Spanwinkel
$\beta$	Keilwinkel
$\epsilon$	Eckenwinkel
$\kappa$	Einstellwinkel
$r_\beta$	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 $R_i$ 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
$x_{\text{Anzahl}}$	Anzahl der Messpunkte in lateraler $x$ -Richtung
$y_{\text{Anzahl}}$	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
$\phi$	Ausrichtungswinkel der Struktur
$b$	Strukturbreite
$l_E$	Eingriffslänge
$l_S$	Strukturlänge
$r_{WZ}$	Werkzeugradius
$\epsilon$	Eckenwinkel
$r_{\epsilon, WZ}$	Eckenradius des Werkzeugs
$\epsilon_{WZ}$	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 $j$
<b>D</b>	Abstandsmatrix aller Strukturen

## Symbole für die Korrelation

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