

Fertigungstechnik, Oberflächentechnik, Beschichtungen

Mikrostrukturierung funktionaler Oberflächen *

Auslegung, Fertigung und Charakterisierung von Mikrostrukturen zur tribologischen Funktionalisierung von Oberflächen

B. Denkena, J. Kästner, G. Knoll, S. Brandt, F.-W. Bach, B. Drößler, E. Reithmeier, M. Bretschneider

Im Rahmen der DFG-Forschergruppe 576 werden Methoden zur Auslegung, Herstellung sowie Charakterisierung von funktionalen Oberflächen entwickelt. Durch die gezielte Strukturierung tribologisch kritischer Oberflächenbereiche lassen sich Mischreibungseffekte und folglich Reibungsverluste sowie Verschleiß deutlich reduzieren. Die Strukturen mit Abmessungen im Mikrometerbereich stellen einen zusätzlichen Schmierstoffspeicher zur Verfügung und können darüber hinaus – bei entsprechender Auslegung und Anordnung – den Aufbau des Schmierfilmdruckes schon bei geringen Gleitgeschwindigkeiten unterstützen.

Surface functionalization through microstructures – Dimensioning, production and characterization of microstructures

Adapted methods for dimensioning, production as well as characterization of functionalized surfaces are developed within the research group 576 supported by the DFG. Microstructuring of thermo mechanically highly loaded surface areas minimizes effects of mixed friction and consequently reduces friction losses and wear. Structures with dimensions in the micrometer range can withhold lubricant to ensure adequate lubricant supply but they can also support the hydrodynamic pressure built up between the sliding partners even at low sliding speeds.

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena, Dipl.-Ing. (FH) Jan Kästner
 Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)
 Leibniz Universität Hannover
 An der Universität 2, D-30823 Garbsen
 Tel. +49 (0)511 / 762-5209, Fax +49 (0)511 / 762-5115
 E-Mail: kaestner@ifw.uni-hannover.de
 Internet: www.ifw.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Gunter Knoll, Dipl.-Ing. Sven Brandt
 Institut für Maschinenelemente und
 Konstruktionstechnik (IMK) – Universität Kassel
 Mönchebergstr. 3, D-34125 Kassel
 Tel. +49 (0)561 / 804-2769, Fax +49 (0)561 / 804-2330
 E-Mail: sven.brandt@imk.uni-kassel.de
 Internet: www.uni-kassel.de/fb15/tribo

Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach, Dipl.-Ing. Bert Drößler
 Institut für Werkstoffkunde (IW) – Leibniz Universität Hannover
 An der Universität 2, D-30823 Garbsen
 Tel. +49 (0)2302 / 661 647, Fax +49 (0)511 / 762-5245
 E-Mail: droessler@iw.uni-hannover.de
 Internet: www.iw.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
 Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Bretschneider
 Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR)
 Leibniz Universität Hannover
 Nienburger Str. 17, D-30167 Hannover
 Tel. +49 (0)511 / 762-4456, Fax +49 (0)511 / 762-3234
 E-Mail: martin.bretschneider@imr.uni-hannover.de
 Internet: www.imr.uni-hannover.de

Dank

Die hier vorgestellten Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der DFG-Forschergruppe 576: „Mikrostrukturierung thermomechanisch hoch beanspruchter Oberflächen“ gefördert. Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung.

Info

* Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen „reviewten“ Fachaufsatz: Autoren-unabhängig von Experten auf diesem Fachgebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben.

1 Einleitung

Eine steigende Leistungsübertragung bei immer kleinerem Bauraum führt zu einer erheblichen Steigerung der Leistungsdichte. Aufgrund der dadurch höheren thermischen und auch mechanischen Bauteilbelastungen wird es immer schwieriger, eine störungsfreie Funktion von Tribosystemen zu gewährleisten. Allein durch konstruktive Anpassungen und dem Einsatz neuer Werk- und Schmierstoffe sowie funktionsangepasster Beschichtungen kann diesen steigenden Anforderungen nicht immer zufriedenstellend entsprochen werden. Hier zeigt die Mikrostrukturierung als eine Form der Oberflächenfunktionalisierung ein großes Potential auf [1, 2]. Der Forschungsbedarf orientiert sich insbesondere an den Fragestellungen, wie Mikrostrukturen in Abhängigkeit des Belastungsfalls wirkoptimal auszulegen sind, welche Fertigungsverfahren zur Herstellung das größte Potential aufweisen und welche messtechnischen Verfahren zu deren Charakterisierung geeignet sind.

Im Rahmen der DFG-Forschergruppe 576 wird aus diesem Grund die Wirkung der Oberflächenstruktur auf das Systemverhalten durch Simulationsmethoden und tribologische Untersuchungen näher betrachtet. Sowohl spanabhebende Verfahren zur Erzeugung deterministischer Strukturen als auch das thermische Spritzen zur Erzeugung stochastischer Strukturen werden in diesem Verbundprojekt als Mikrostrukturierungsverfahren entwickelt und optimiert. Durch angepasste Messverfahren und Kenngrößenbildung ist es möglich, gefertigte Strukturen zu charakterisieren. Ziel ist es, zukünftig Oberflächen in Abhängigkeit des Belastungsfalls wirtschaftlich zu funktionalisieren und den Mikrostrukturierungsprozess zudem als hybrides Verfahren in bisherige Bearbeitungsverfahren zu integrieren.

2 Methoden und Modelle zur Auslegung von Mikrostrukturen

Die Ziele der Arbeiten betreffen die Entwicklung von Methoden zur tribologischen Charakterisierung strukturierter

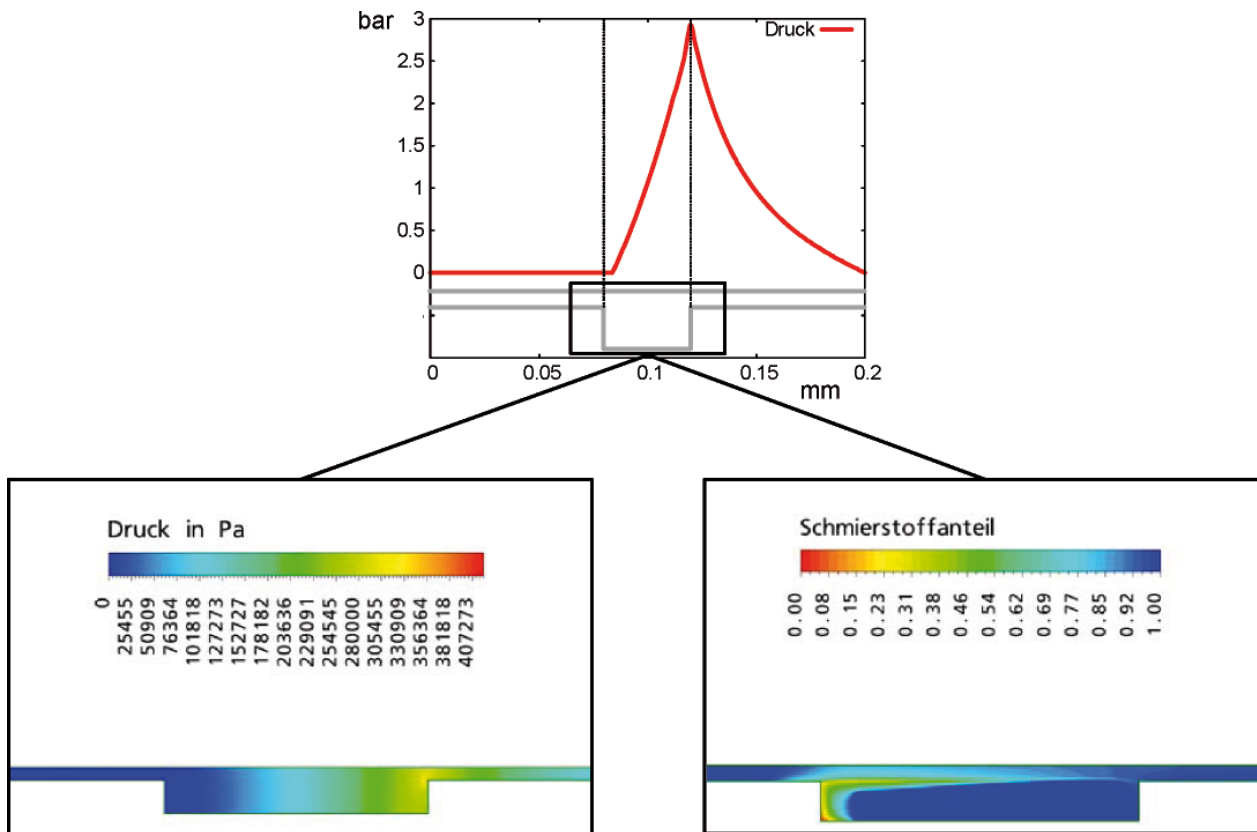


Bild 1. Schematische Darstellung eines Simulationsmodells mit hydrodynamischem Druckaufbau und Schmierstoffanteil unter Kavitationsrandbedingungen

Funktionsflächen sowie deren Anwendung zur Identifikation optimaler Geometrieparameter für die Ausbildung eines hydrodynamischen Tragdruckaufbaus. Auf Basis fluiddynamischer Simulationstechniken werden diesbezüglich unterschiedliche Napfquerschnittsgeometrien untersucht, die für deterministisch strukturierte Oberflächen geeignet sind. Nebenbedingungen für die Festlegung der Geometrieparameter leiten sich unter anderem aus fertigungstechnisch umsetzbaren Randbedingungen ab. Zur Abstimmung der Simulationsergebnisse wird ein Demonstrator zur Identifikation der Reibkräfte zwischen Zylinder und Kolbenring eingesetzt.

2.1 Ermitteln der optimalen Napfgeometrie

Die optimale Napfgeometrie für maximalen hydrodynamischen Tragdruckaufbau wird durch die Abstimmung der Längenverhältnisse von Napfabmaßen und Rastflächen bestimmt, wobei der optimale Einsatzbereich zusätzlich durch ein bestimmtes Verhältnis von minimaler Spaltweite und Napftiefe festgelegt ist. Entscheidend für die Aussagesicherheit fluiddynamischer Simulationstechniken sind unter anderem mikrohydrodynamische Kavitationseffekte, die in bauteilbezogenen Simulationstechniken zusammen mit Flusstenoren in der erweiterten Reynoldsschen Differentialgleichung Berücksichtigung finden. Flusstenoren berücksichtigen zusätzlich den Einfluss der Oberflächentopographie auf den Fluidtransport und werden durch das Average Flow Model ermittelt [3].

Ein erstes Teilziel sind Untersuchungen zur Gültigkeit des Average Flow Models unter Anwendung der 2-dimensionalen Reynoldsschen Differentialgleichung:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\phi_{ij}^p \frac{\bar{h}^3}{12\eta} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \right] = u_i^z \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + u_i^\Delta \sigma \sigma^\Delta \frac{\partial \phi_{ij}^s}{\partial x_j} \tag{1}$$

Die Identifikation optimaler Napfquerschnittsgeometrien für den hydrodynamischen Tragdruckaufbau bildet das zweite Teilziel. Dafür werden unter anderem dreidimensionale CFD-Techniken zur direkten Lösung der vollständigen Navier Stokes-Gleichung eingesetzt:

$$\rho \left(\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_j \tag{2}$$

Bild 1 zeigt die hydrodynamische Druckentwicklung einer Mikro-Taschenstruktur, die auf Basis einer CFD-Berechnung unter folgenden Modellrandbedingungen ermittelt wurde:

- Grundkörper mit Mikrotasche, festgelegt durch Taschengeometrie, Taschenbreite *b*, Taschentiefe *t*, Steglänge $(L-b)/2$,
- Gegenkörper im Abstand *h* mit einer konstanten Tangentialgeschwindigkeit *v* sowie
- Newton'sches Fluid als Zwischenmedium.

Die Berechnung der hydrodynamischen Druckverteilung erfolgte an den Systemgrenzen mit der Druckrandbedingung Umgebungsdruck *p* = 0 bar und im Kavitationsgebiet auf Basis des Rayleigh-Plesset-Kavitationsmodells.

Als Kriterium zur Beurteilung der Napfqualität hinsichtlich des hydrodynamischen Druckaufbaus wird die resultierende Tragkraft in Form einer Linienlast herangezogen:

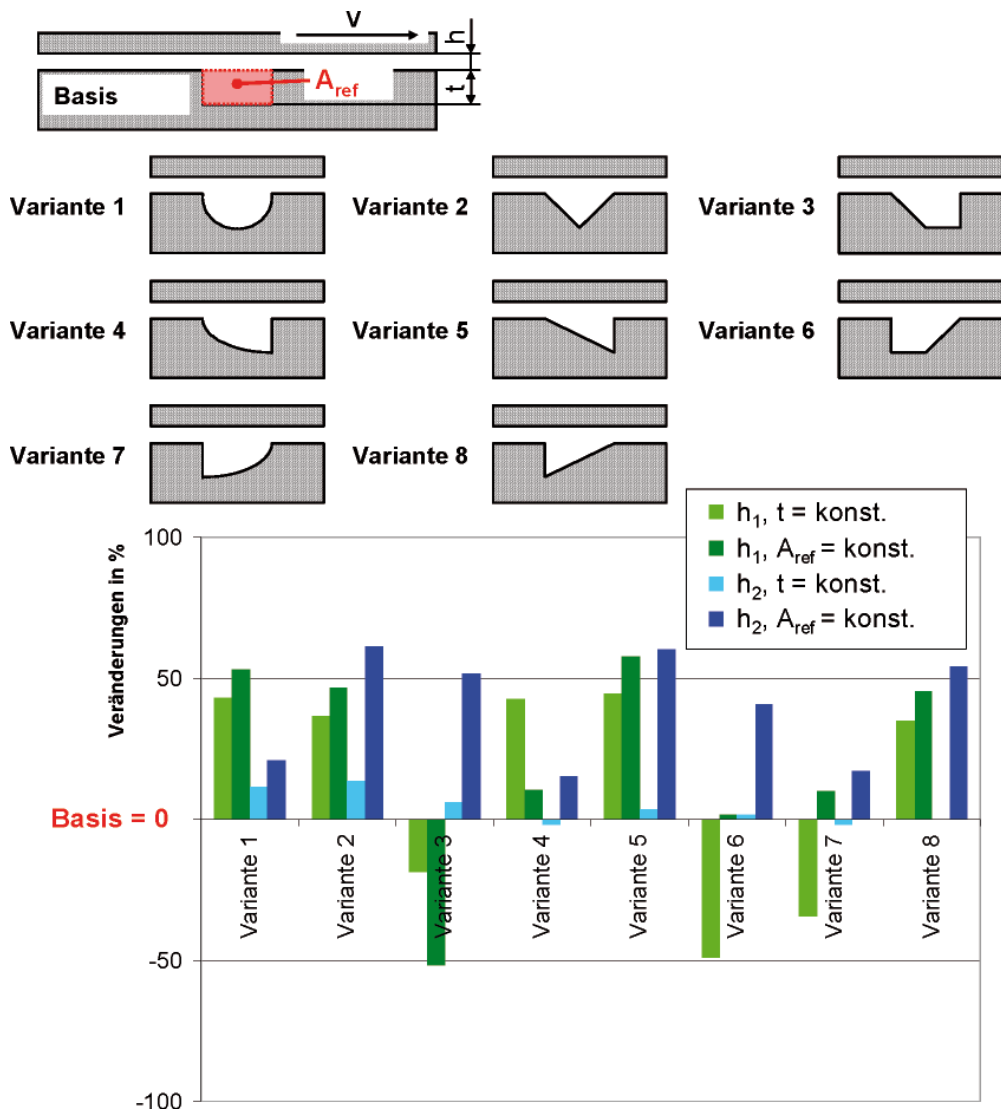


Bild 2. Beeinflussung der resultierenden Tragkraft durch die Napfkontur

$$F = \int_{x=0}^{x=L} p \, dx . \quad (3)$$

2.2 Einfluss der Napf-Querschnittsgeometrie auf den hydrodynamischen Druckaufbau

Zur Ermittlung der optimalen Napfquerschnittsgeometrie werden acht Querschnittsvarianten mit einer Basisvariante (rechteckiger Napf) verglichen (Bild 2). Bei den Varianten 1 und 2 handelt es sich um symmetrische Napfquerschnitte, während die weiteren Varianten asymmetrische Querschnittsprofile aufweisen, bei denen jedoch beide Bewegungsrichtungen der Lauffläche berücksichtigt werden. Nachfolgend sind die Randbedingungen der Berechnungen, unterteilt in konstante Parameter und Variationsparameter aufgelistet.

Konstante Parameter

- Spalthöhe $L = 0,5 \text{ mm}$
- Laufflächengeschwindigkeit $v = 10 \text{ m/s}$
- dynamische Viskosität $\eta = 0,01217 \text{ Pas}$
- Napfbreite $b = 2 \text{ t}$ (fixiertes Verhältnis)

Variationsparameter

- Spalthöhe $h_1 = 5 \text{ }\mu\text{m}$ (entspricht der Spaltweite zwischen Kolbenring und Zylinderwand), $h_2 = 35 \text{ }\mu\text{m}$ (entspricht der Spaltweite in Pleuellagern)
- Napftiefe konstant $t = 30 \text{ }\mu\text{m}$
- Napfquerschnittsfläche konstant $A_{ref} = 1800 \text{ }\mu\text{m}^2$ (Grundlage Basisvariante mit $b = 60 \text{ }\mu\text{m}$ und $t = 30 \text{ }\mu\text{m}$ (siehe Bild 2))

Die konstante Napfquerschnittsfläche wurde in die Parameterstudie miteinbezogen, da bei konstanter Napftiefe aber unterschiedlichen Querschnittsgeometrien die Querschnittsflächen stark variieren.

Bild 2 zeigt die verschiedenen Napfkonturen, die der Parameterstudie zugrunde liegen. Darüber hinaus sind in der Abbildung die Ergebnisse der Konturvariation ins Verhältnis zur Basisvariante (Rechtecknapf) als prozentuale Änderung der resultierenden Tragkraft F dargestellt. Ist die prozentuale Veränderung größer als 0, ist der Tragkraftaufbau höher als der der Basisvariante. Die Ausbildung der Tragkräfte ist bei den Varianten 2 und 5 durch alle Simulationsreihen am höchsten. Bildet man bei allen Varianten den Mittelwert über die Ergeb-

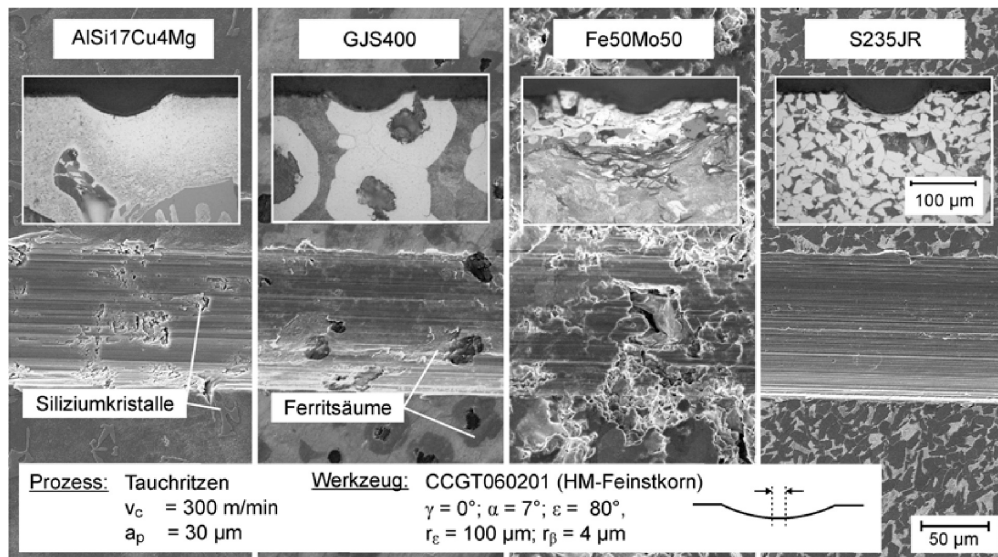


Bild 3. Beeinflussung der Strukturqualität durch die Gefügeeigenschaften des Werkstoffs

nisse der jeweiligen vier Berechnungen, liefert die Variante 5 den höchsten Tragdruckaufbau. Durch eine zusätzliche Ab- und Abrundung der Spitze im Napfgrund von Variante 5 mit einem definierten Radius, ist diese Geometrie werkzeugseitig im Rahmen des Verbundprojekts auch sehr gut durch spanende Verfahren umsetzbar. Hierauf basierend wird diese Variante mit abgerundetem Napfgrund als Grundlage der weiteren Variationsrechnungen hinsichtlich optimaler Napftiefe und -anordnung fokussiert.

3 Spanende Verfahren zur Mikrostrukturierung duktiler, inhomogener Werkstoffe

Im Rahmen der dargestellten Arbeiten werden spanende Verfahren zur Fertigung deterministischer Mikroschmier-taschen entwickelt. Diese qualifizieren sich insbesondere durch hohe Präzision und Wiederholgenauigkeit. Die flexible Herstellbarkeit unterschiedlichster Strukturquerschnitts-geometrien ermöglicht zudem das gezielte Anpassen der tribologischen Oberflächeneigenschaften an den vorliegenden Belastungsfall [4]. Das Ziel ist die wirtschaftlichste, tribologisch angepasste Funktionalisierung von Oberflächen sowie die Einbindung des Mikrostrukturierungsprozesses in bestehende Prozessketten wie etwa dem Honen. Die Herausforderung an den Zerspanprozess stellen die besonders kleinen Dimensionen der Mikrostrukturen dar. Durch die geringen Eingriffstiefen des Werkzeugs mit weniger als $50\ \mu\text{m}$ sind werkstoff-, werkzeug- sowie prozessabhängige Größeneinflüsse zu berücksichtigen. Die Werkzeug- und Prozessauslegung erfolgt mit dem Fokus, Mikrostrukturen mit hoher Formtreue, Oberflächengüte sowie geringer Gratbildung zu erzeugen.

Zur Identifikation grundsätzlicher Einflussparameter auf die Strukturqualität sowie die Energetik des Prozesses werden Tauchritzuntersuchungen an planen Werkstückproben durchgeführt. Bei der vorliegenden Versuchskinetik durchdringt eine rotierende Schneide die Werkstückoberfläche und erzeugt einen ellipsoiden-abschnittsförmigen Volumenaus-trag. Durch axiales Verfahren der Spindel wird das rotierende Werkzeug über das leicht angestellte aufgespannte Werkstück hinweg bewegt. Auf diese Weise entstehen in einem Überlauf

Strukturen mit konstanter Schnitttiefenzunahme hinter-einander [5, 6]. Die Detektion der Schnitt- und Passivkräfte erfolgt mit einem sehr dynamischen Kistler-Dynamometer Typ 9256.

Zerspanexperimente werden an Werkstoffen durchgeführt (AlSi17Cu4Mg, GJS400, Fe50Mo50 thermisch gespritzt), die besonders im Bereich thermomechanisch beanspruchter Komponenten (beispielsweise Zylinderlaufbahnen) Einsatz finden. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch besonders inhomogene Gefügeeigenschaften aus, welche die Materialtrennung signifikant beeinflussen. Der Stahl S235JR wird aufgrund seiner homogenen Gefügeeigenschaften als Referenzwerkstoff herangezogen. **Bild 3** zeigt, dass besonders im Bereich der Gefügeinhomogenitäten Defekte auf den bearbeiteten Oberflächen zu erkennen sind. Bei der Aluminiumlegierung werden die hochharten Siliziumkristalle zwar getrennt, dabei aber auch aus der duktilen Aluminiummatrix herausgerissen oder innerhalb der Matrix in Schnittrichtung verschoben. In den Randbereichen der Grauguss-Graphitporen sind Abplatzungen auf der erzeugten Oberfläche erkennbar. Diese als Ferritsäume bezeichneten Bereiche weisen im Vergleich zum perlitischen Grundgefüge andere mechanische Eigenschaften und somit auch andere Trennmechanismen auf. Die porige Struktur der thermisch gespritzten Fe50Mo-Schicht zeigt eine unerwartet saubere Materialtrennung. Durch den Materialabtrag kommen tiefer liegende Poren zum Vorschein. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der porösen Werkstoffeigenschaften zudem Werkstoffpartikel aus der Oberfläche herausgerissen werden.

Im Hinblick auf die geringen Eingriffstiefen sowie die besonders inhomogenen Werkstoffe ist eine angepasste Werkzeug- und Prozessauslegung notwendig. Strukturierungs-untersuchungen haben gezeigt, dass zur grat- und aufwurf-freien Herstellung von Mikrostrukturen Werkzeuge mit positivem Spanwinkel ($\gamma = 10^\circ$ bis 20°) und kleinem Schneidkan-tenradius ($r_\beta \leq 4\ \mu\text{m}$) erforderlich sind. Der Einsatz negativer Spanwinkel sowie großer Kantenradien ist durch einen energetisch ungünstigen, hohen Umformanteil in der Trenn-zone und hoher Spanstauchung gekennzeichnet, was sich in Schuppenbildung, Gratbildung, sowie wesentlich höheren

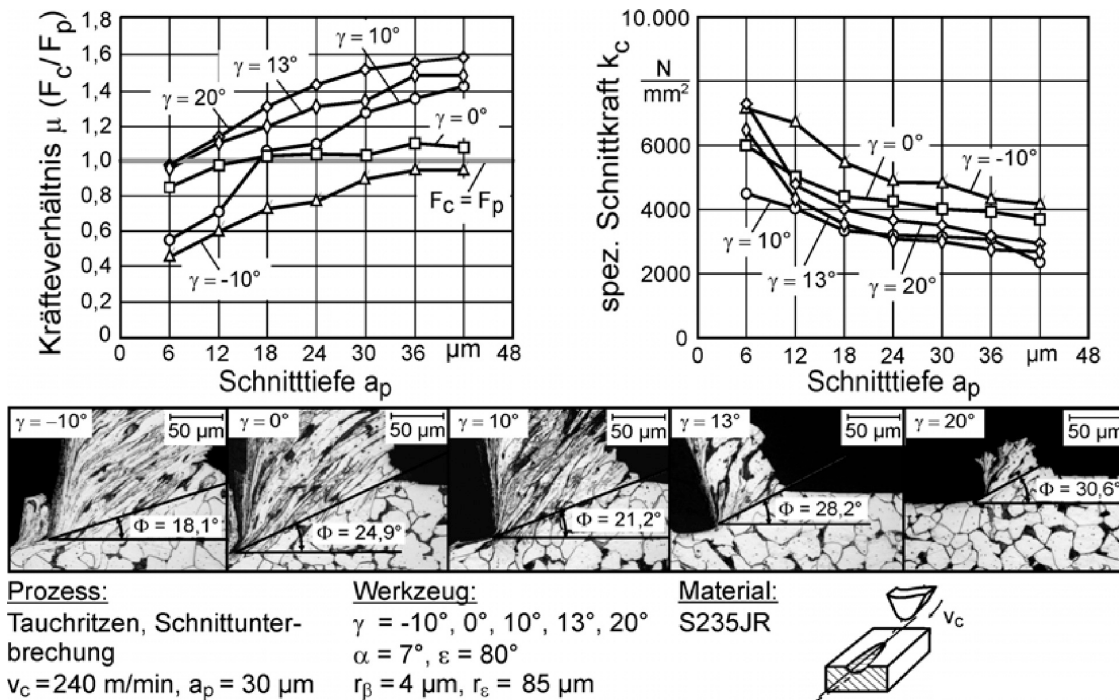


Bild 4. Einfluss des Spanwinkels auf die Spanbildung und die Bearbeitungskräfte

spezifischen Bearbeitungskräften widerspiegelt. **Bild 4** zeigt diese Zusammenhänge am Beispiel des Spanwinkleinflusses.

Ebenfalls begünstigen kleine Eckenradien die Gratbildung, da das Material vor der Schneide wesentlich leichter in Richtung der seitlichen freien Oberflächen umgelenkt werden kann. Im Hinblick auf die Strukturqualität sowie die Standzeit beim Einsatz von Hartmetallwerkzeugen erweist sich ein Schnittgeschwindigkeitsbereich zwischen 250 m/min und 300 m/min als geeignet. Zu niedrige Schnittgeschwindigkeiten führen zu Schuppenbildung auf der Oberfläche, zu hohe Schnittgeschwindigkeitsbereiche hingegen beschleunigen den Werkzeugverschleiß.

Die hinsichtlich des angestrebten Tragdruckaufbaus besonders vorteilhaften asymmetrischen Strukturquerschnitte sind Gegenstand derzeitiger Forschungsarbeiten. Die Asymmetrie wird durch Anstellen der Maschinenspindel und somit Veränderung des Einstellwinkels erreicht. Je nach Einstell-

winkel und folglich Lage der Schneide zur Werkstückoberfläche ist zur Vermeidung der Gratbildung besonders eine Anpassung des Neigungswinkels, das heißt des orthogonal zur Strukturflanke vorliegenden Spanwinkels erforderlich. Dieser sollte zwischen 10° und 20° liegen. **Bild 5** zeigt asymmetrische Mikrostrukturen, die auf einem Präzisionsbearbeitungszentrum des Typs Kugler micro grind SF4/305 gezielt gesetzt wurden.

Die an ebenen Proben gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Übertragung des Strukturierungsprozesses auf rotationssymmetrische Bauteile. Das Einbringen der Mikrostrukturen erfolgt durch einen Längsdrehprozess mit einem orthogonal zur Bauteiloberfläche piezoaktorisch angetriebenem, Werkzeug [7]. Dieses Werkzeug wurde im Rahmen des EU-Vorhabens „Smartool“ ursprünglich zur Kompensation von Ratterschwingungen beim Drehen entwickelt. Durch Variation der Größen Schnittgeschwindigkeit, Anre-

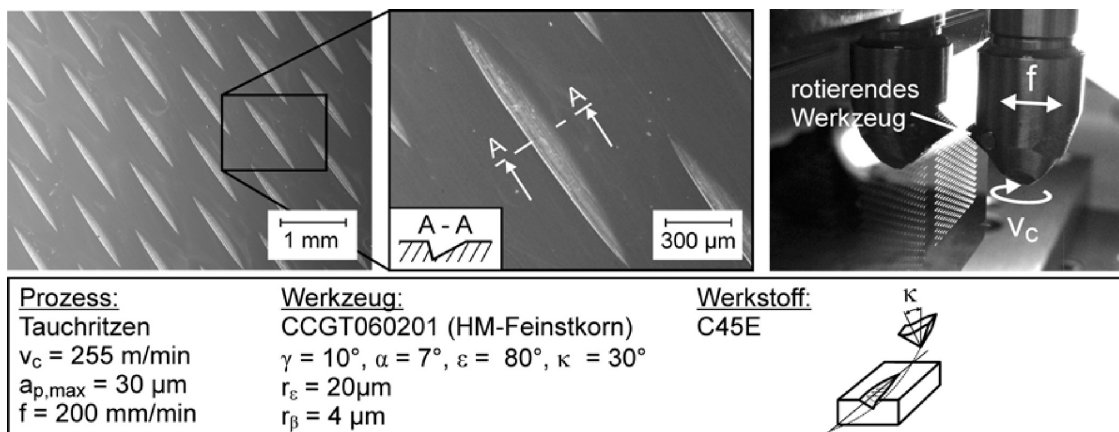


Bild 5. Definiertes Setzen asymmetrischer Mikrostrukturen mit richtungsabhängigen tribologischen Eigenschaften

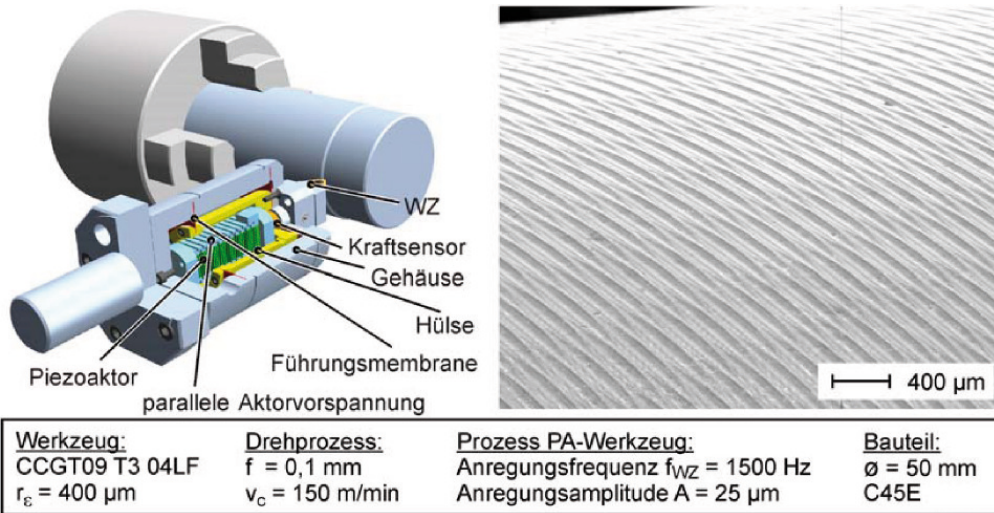


Bild 6. Mikrostrukturierung rotationssymmetrischer Oberflächen mit piezoaktorisch angetriebenem Werkzeug

gungsfrequenz und Anregungsamplitude wird derzeit die Steuerbarkeit von Strukturdichte, Strukturvolumen sowie Ein- und Austrittswinkel des Werkzeugs untersucht. **Bild 6** zeigt den Aufbau des Werkzeugs sowie beispielhaft eine mit einer Sinusfrequenz ($f_{WZ} = 1500 \text{ Hz}$) strukturierte rotationssymmetrische Oberfläche.

4 Mikrostrukturierte thermisch gespritzte Schichten

Im Gegensatz zur spanenden Oberflächenstrukturierung werden durch das thermische Spritzen stochastische Mikrostrukturen hinsichtlich Gestalt und Anordnung erzeugt. Die Morphologie der thermisch gespritzten Schicht stellt hierbei die Stellgröße zur Steuerung des Schmierstoffspeichervolumens der Oberfläche dar.

Das thermische Spritzen umfasst „Verfahren, bei denen Spritzzusätze inner- oder außerhalb von Spritzgeräten an-, auf- oder abgeschmolzen und auf Oberflächen von Werkstücken aufgeschleudert werden. Die Oberflächen werden hierbei nicht aufgeschmolzen“ [8]. Zum Schmelzen und Beschleunigen des Spritzwerkstoffs dient etwa eine chemische Flamme oder ein Gleichstromplasmatron. Beim Aufprall auf die Substratoberfläche zersprätzen die Spritzpartikel, erstarren und unterliegen dadurch einer Schrumpfung, die zu einer mechanischen Verklammerung auf der rauen Substratoberfläche führt. Durch wiederholtes Überfahren mit dem Brenner baut sich die Schicht lagenweise auf, bis die gewünschte Schichtdicke erreicht ist [9]. Im technologisch bedeutsamen Dickenbereich von weniger als 100 Mikrometern bis zu einigen Millimetern können so Schichten aus Polymeren, Metallen und Keramiken erzeugt werden.

Die Schichtporosität entsteht im Wesentlichen aus Hinterschneidungen durch Überlagerung einzelner an- oder aufgeschmolzener Partikel. Schichten auf FeMo-Basis für Zylinderbeschichtungen werden bereits erfolgreich als Verschleißschutzschicht für Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse eingesetzt. Ein Abtrag in oberflächennahen Bereichen führt hier nicht zu einer Zerstörung der Struktur, sondern legt stets neue Schichtbereiche frei, die dieselbe Struktur aufweisen. Bisher sind thermisch gespritzte Schichten ohne spezielle Entwicklung ihrer Mikrostruktur eingesetzt worden [10–12]. Diese

Mikrostruktur soll zur Erzeugung entsprechender Trag- und Ölrückhalteanteile, beispielsweise für Zylinderlaufbahnen im Motorenbau, genutzt werden.

Die Prozessentwicklung wird zunächst mit einem konventionellen Sulzer Metco F4MB Einkathoden-Plasmabrenner durchgeführt. Die Schichten werden im Wesentlichen hinsichtlich ihrer Topologie sowie bezüglich ihrer reibwertmindernden Funktion im Tribometer beziehungsweise Komponentenprüfstand charakterisiert. Auf Basis dieser Ergebnisse und der Unterstützung durch die messtechnischen sowie theoretischen Untersuchungen soll im weiteren Verlauf ein Innenbeschichtungsprozess mit einem Sulzer Metco F210-Innenplasmabrenner entwickelt werden.

In den Untersuchungen werden Stahl- und Graugusssubstrate mit Fe-Basis-Werkstoffen beschichtet. Als Spritzwerkstoffe kommen FeCr13-Pulver in Fraktionierungen von 20 µm bis 45 µm, sowie eine Pseudolegierung 50Fe50Mo mit einer Fraktionierung von 15 µm bis 45 µm zum Einsatz. Zur statistischen Absicherung werden in einem Versuchsplan Flach- und Rundproben aus GG-25 und 1.0037 mit diesen Pulvern jeweils etwa 300 µm dick beschichtet. Metallographische Untersuchungen an Querschliffen werden jeweils zur Beurteilung der Schichtmorphologie / Oberflächentopologie, insbesondere in Bezug auf Porosität und Porositätsverteilung herangezogen. Wie zuvor beschrieben, werden neben schichtspezifischen Gefügeeigenschaften auch die Zerspaneigenschaften thermisch gespritzter Schichten untersucht.

Im Folgenden wird eine Variation der Einflussgrößen Spritzabstand und Plasmameter (als Kumulation von Ar-/H₂-Massenfluss und Stromstärke) vorgenommen, und die Auswirkungen auf die Porosität gezeigt. Die Variation wird jeweils dreistufig um einen spritzwerkstoffüblichen Zentralparametersatz (Sulzer Metco F4MB mit Ø6 mm-Düse, 65 SLPM Ar, 8 SLPM H₂, 530 A, Spritzabstand 90 mm) vorgenommen. **Bild 7 a** zeigt exemplarisch einen Querschliff für den Werkstoff FeCr-13. Die Schicht besitzt eine grobe, lamellare Morphologie mit sichtbaren Oxidsäumen und eine niedrige, inhomogen verteilte Porosität von 1,3% ± 1%. Am linken oberen Bildausschnitt lassen sich, wie auch bei anderen FeCr-13-Proben, Porencluster beobachten. Die Ermittlung der Ursachen hierfür ist Bestandteil derzeitiger Arbeiten.

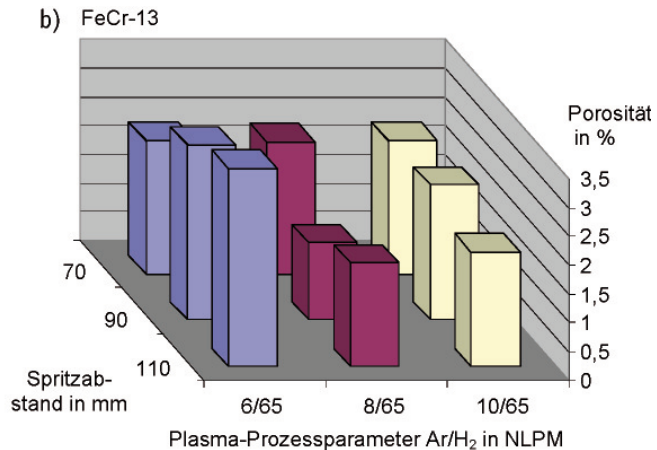
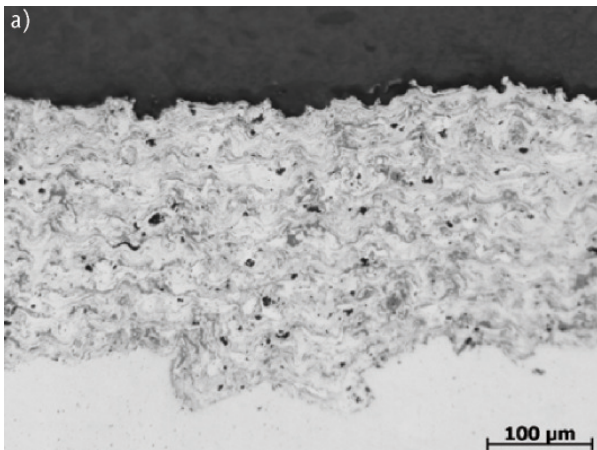


Bild 7. a) Querschliff einer plasmagespritzten FeCr-13-Schicht (Zentralparametersatz); b) Porositäten im Werkstoffsystem FeCr-13 als Funktion von Spritzabstand und Plasmametern

Bild 7 b zeigt die Porosität als Funktion der Plasmametern und des Spritzabstands an metallographischen Querschliffen für FeCr-13. Die Porositätsspannweite liegt im Bereich von lediglich 1.3% bis 3.5% ± 1%. Es lässt sich danach erkennen, dass der praxiserprobte Zentralparametersatz zur geringsten Porosität des Parameterfeldes führt. Dies erscheint gemäß der üblicherweise durchgeführten Optimierung auf Auftragswirkungsgrad und Maximierung der mechanischen Schichteigenschaften wie Adhäsion und Kohäsion plausibel. Des Weiteren wird impliziert, dass jedwede Verlagerung der Prozessparameter aus dem Zentralpunkt zu einer (im Anwendungsfall gewünschten) Erhöhung der Porosität führt. Unter Berücksichtigung des statistischen Fehlers kann jedoch keine signifikante Korrelation zwischen der anhand von Querschliffen ermittelten Porosität und dem tribologischen Verhalten gezogen werden. Laufende Untersuchungen legen nahe, dass die topologische Charakterisierung der metallographisch präparierten Schichtoberflächen hier eine bessere Korrelation als die im Querschliff gemessenen Porositäten aufweist. Weiterhin sollen auch größere Pulver aus den Werkstoffen FeCr-13 und 50Fe50Mo sowie niedrigere Spritzabstände (aufgrund der Innenbeschichtungsgeometrie) auf die durchschnittliche Porosität sowie Porengröße und -durchmesser untersucht werden, um einen Innenbeschichtungsprozess für maßgeschneiderte stochastische Mikrostrukturen zu entwickeln.

5 Strukturorientierte Oberflächencharakterisierung auf Basis optischer Messtechnik

Um Erkenntnisse über den Einfluss der Mikrostruktur, im Besonderen ihrer Geometrie, Größe und Anordnung, auf die tribologische Eigenschaften einer Oberfläche zu gewinnen, ist es erforderlich die Mikrostrukturen dreidimensional zu vermessen sowie anhand geeigneter Kenngrößen zu charakterisieren.

Hierfür werden die gefertigten Mikrostrukturen mit optischen Verfahren vermessen. Optische Rauheitsmessgeräte nutzen, je nach Typ, verschiedene Lichteigenschaften, wie die Interferenzfähigkeit oder chromatische Abberation an Linsen, aus und messen im Gegensatz zu taktilen Rauheitsmessgeräten wie Tastschnittgeräten, berührungslos. Die besonderen Vorteile sind der berührungslose Messvorgang sowie die kurze Messzeit, besonders wenn Messgeräte wie das Weiß-

lichtinterferometer Wyco NT 1100 der Firma Veeco zur flächigen Vermessung verwendet werden. Bei diesem Messgerät lassen sich durch unterschiedliche Objektive sowohl Messfeld als auch Auflösung an die Dimensionen des Messobjekts anpassen. Für die sichere Auswertung von Rauheitsinformationen werden hohe Auflösungen benötigt, weshalb mehrfach versetzte Teilmessungen mit kleineren Messfeldern durchgeführt werden, die anschließend zu einem Gesamtdatensatz wieder zusammengefügt werden (Stitches). Zur Vermeidung des Stitchens wird als weiteres optisches Rauheitsmessgerät ein chromatischer Punktsensor CLA-400 der Firma Digital Surf verwendet, der in einer Multisensorikmaschine OMS 553 HA der Firma Mahr integriert ist. Diese ermöglicht das hochpräzise Verfahren des chromatischen Punktsensors und somit auch das Erfassen größerer Messfelder.

Nach erfolgter Messung liegen die Höheninformationen digital vor. Vor der eigentlichen Auswertung ist es erforderlich, die Messdaten zunächst vorzuverarbeiten. Es können beispielsweise Fehlstellen vorhanden sein, an denen keine Höheninformation verfügbar ist. Eine Ursache hierfür ist beispielsweise eine zu geringe Lichtreflexion vom Messobjekt zur Detektor. Diese Fehlstellen werden durch angepasste Interpolationsverfahren mit Hilfe der umliegenden Messdaten berechnet.

Ein weiterer Vorverarbeitungsschritt ist die dreidimensionale Ausrichtung der Messdaten. Dieser Schritt ist erforderlich, da bei der Messung nur relative und keine absoluten Höheninformationen erfasst werden. Da die Mikrostrukturen zunächst auf planen Flächen eingebracht werden, wird eine Ebeneneinpassung durchgeführt und die unstrukturierte Fläche als sogenannte Bezugsebene definiert. In **Bild 8** sind interpolierte und ausgerichtete Messdaten einer einzelnen Struktur dargestellt. Diese Messdaten sind aus drei Einzelmessungen eines Weißlichtinterferometers zusammengefügt.

Nach der Messdaten-Vorverarbeitung können die Geometriedaten der Mikrostruktur ausgewertet werden. Dazu müssen zunächst durch ein Segmentierungsverfahren die einzelnen Strukturen detektiert und von der restlichen Fläche abgegrenzt werden. Als Segmentierungsverfahren wird die Wasserscheidentransformation verwendet, die die Messdaten von der tiefsten Stelle an mit fiktivem Wasser flutet und stufenweise den Wasserstand erhöht [13]. Wenn die Strukturen komplett überflutet sind, treffen die Wasseransammlungen

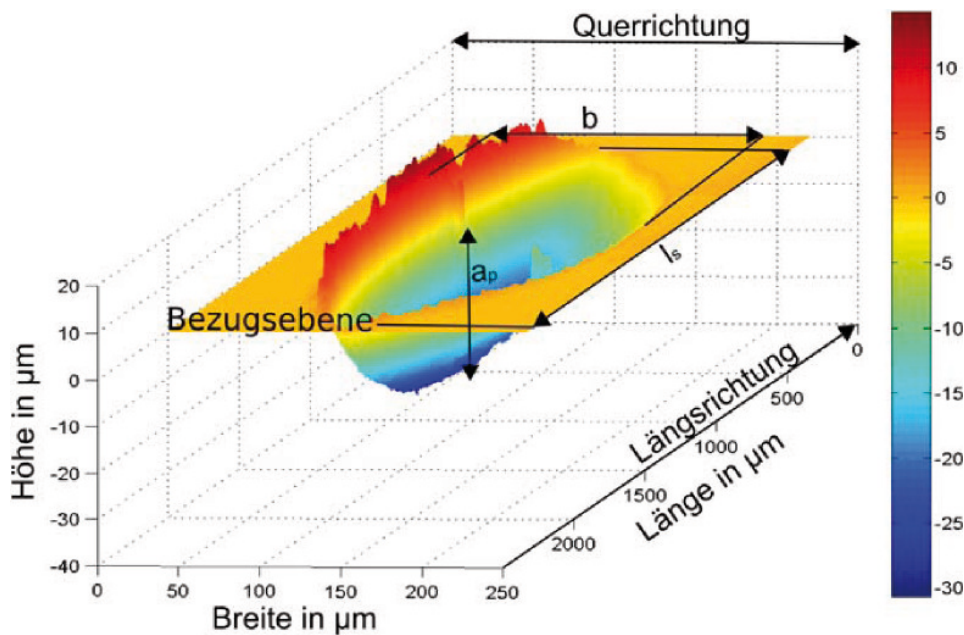


Bild 8. Gespannte, asymmetrische Mikrostruktur mit ausgewählten Kenngrößen: Am linken Rand der Struktur ist der Aufwurf zu erkennen

mehrerer Strukturen aufeinander. Hier werden nun Wasserscheiden zum Abgrenzen errichtet. Diese Wasserscheiden segmentieren die Messdaten und grenzen die Strukturen untereinander ab.

Im Folgenden wird diese Vorgehensweise insbesondere an den deterministischen, spanend hergestellten, Mikroschmier-taschen angewendet. Diese lassen sich auf den ersten Blick nach ausgetragenen Werkstoffvolumen, der eigentlichen Tasche, und nach dem die Struktur umrandenden unerwünschten Materialaufwurf (Grat), der durch seitlichen Materialfluss bei der Fertigung entsteht, unterteilen. Es wurden Kenngrößen entwickelt, die die Strukturgeometrie grundlegend beschreiben. Einige der Kenngrößen basieren auf Längs- und Querschnitten durch die Struktur. Hierfür wird zunächst die Ausrichtung der Struktur in der Bezugsebene mit einer Gradeneinpassung berechnet, wodurch sich die Längsrichtung ergibt. Orthogonal hierzu in der Bezugsebene ist die Querrichtung (siehe Bild 8). Zunächst wird das spanend ausgetragene Volumen betrachtet: Die Eingriffslänge l_s und die Eingriffsbreite b beschreiben die maximale laterale Ausdehnung. Die Spannungsdicke a_p ist die tiefste Stelle, das Strukturvolumen V das Volumen der Struktur bis zur Bezugsebene; die projizierte Strukturfläche A_p ist die Fläche der Struktur in der Bezugsebene. Der Aufwurf wird mit der Aufwurfbreite b_a und Aufwurfhöhe h_a beschrieben (vergleiche [14]):

$$f_{ab} = \frac{V_{Struktur} - V_{Aufwurf}}{V_{Struktur}} \quad (4)$$

Das relative Spanvolumen ist eine wichtige Kenngröße zur Einordnung der Effektivität von Zerspanprozessen. Es beschreibt das Verhältnis von seitlich verdrängtem zu tatsächlich abgetrenntem Material und wird im Rahmen der vorgestellten Arbeiten zur quantitativen Klassifizierung der Gratbildung genutzt. Weiterhin werden die Rauheiten im Strukturgrund in Längs- und Querrichtung berechnet.

Die berechneten Kennwerte der Struktur aus Bild 8 sind: Spannungsdicke $a_p = 30,38 \mu\text{m}$, Eingriffsbreite $b = 139 \mu\text{m}$,

Länge $l_s = 1487 \mu\text{m}$, Fläche $A_p = 154\,335 \mu\text{m}^2$, Volumen $V = 2\,268\,911 \mu\text{m}^3$. Die an der Struktur ermittelten Kennwerte bilden die Basis, um im Folgenden tribologische Eigenschaften auf die Strukturgeometrie rückführen zu können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten werden Methoden zur Auslegung, Herstellung sowie Charakterisierung von Mikrostrukturen vorgestellt. Simulationsergebnisse zeigen, dass sich der Tragdruckaufbau in einem Tribosystem prinzipiell durch Mikrostrukturen steigern lässt. Asymmetrische V-förmige Strukturquerschnitte weisen hinsichtlich des Druckaufbaus bisher das größte Potential auf. Die qualitativen Anforderungen an die spanende Herstellung von Mikrostrukturen können durch eine angepasste Werkzeug- und Prozessauslegung erfüllt und auf weitere Strukturgeometrien erweitert werden. Zudem zeigte sich, dass sich die Porosität und somit das Schmierstoffspeichervolumen thermisch gespritzter Schichten anhand der Plasmaparameter und des Spritzabstandes gezielt einstellen lässt. Aus der auf optischen Verfahren basierenden messtechnischen Erfassung deterministischer Mikroschmier-taschen werden Kennwerte extrahiert, welche die Geometrie der Struktur grundlegend beschreiben und eine Rückführung der tribologischen Oberflächeneigenschaften auf die Strukturgeometrie zulassen. Anhand von Tribometeruntersuchungen wird derzeit der Einfluss von Mikrostrukturen, im speziellen deren Querschnittsgeometrie, Volumen und Anordnung, auf die tribologischen Oberflächeneigenschaften ermittelt und mit vorliegenden Simulationsergebnissen abgestimmt. Weiterführende Arbeiten fokussieren die Außen- sowie Innenstrukturierung rotationssymmetrischer Bauteile mit dem Ziel, die tribologischen Vorteile von mikrostrukturierten Oberflächen am Demonstrator Zylinder-Kolbenring zu nutzen.

→

Literatur

- [1] Lindner, H.; Bermann, H. W.; Brandenstein, C; Lang, A.; Queitsch, R; Reichsten, S.; Stengel, E.: Precision Processing of Cast Iron Cylinder Surfaces of Combustion Engines with UV-Photons. 13th Int. Colloquium Tribology. Lubricants. Materials and Lubrication Engineering Vol. 3 (2002), S. 2373–2396
- [2] Golloch, R.; Merker, G. P.; Kessen, U.; Brinkmann, S.: Benefits of Laser Structured Cylinder Liners for Internal Combustion Engines. 14th International Colloquium Tribology, Technische Akademie Esslingen, 2004
- [3] Lagemann, V.: Numerische Verfahren zur tribologischen Charakterisierung bearbeitungsbedingter rauher Oberflächen bei Mikrohydrodynamik und Mischreibung. Dissertation, Universität Kassel, 2000
- [4] Fischer, S.: Fertigungssysteme zur spanenden Herstellung von Mikrostrukturen. Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [5] Riemer, O.: Trennmechanismen und Oberflächenfeingestalt bei der Mikrozerspanung kristalliner und amorpher Werkstoffe. Dissertation, Universität Bremen, 2001
- [6] Denkena, B.; Tönshoff, H. K.; Becker, J.; Bockhorst, J; Hillmann-Apmann, H.: The Mechanisms of Material Separation at Steel and Concrete Material. Euro PM, 2003
- [7] Denkena, B.; Harms, A.: A Tool Adaptor for Vibration Damping in CNC lathes. 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Budapest, 2004, S. 127–131
- [8] N. N.: DIN 32530 – Thermisches Spritzen. Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth-Verlag 1989
- [9] Bach, Fr.-W.; Laarmann, A.; Wenz, Th.: Modern Surface Technology. Weinheim: Wiley-VCH 2006
- [10] Flor, S.: Beitrag zum Verschleißverhalten und zur Tribologie von plasmagespritzten Zylinderlaufflächen im Diesel-Motorbetrieb. Dissertation, Universität Dortmund. Göttingen: Cuvillier-Verlag 2003
- [11] Flor, S.: Einsatz von plasmagespritzten Zylinderlaufflächen für Dieselmotoren. In: Tagungsband des 2. IIR Technologie-Automobil-Kongress „Autotec – Innovationsmotor Technik“, Baden-Baden, 2004
- [12] Bach, Fr.-W.; Möhwald, K.; Drößler, B.: Thermally Sprayed Coatings With Stochastic Microstructure. Proceedings of the 6th THE Coatings. Berichte aus dem IFW, Band 10/2007, S. 317 ff
- [13] Wegner, S.: Die Wasserscheidentransformation als Segmentierungsverfahren in der medizinischen Bildverarbeitung. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1999
- [14] zum Gahr, K. Z.: Abrasiver Verschleiß metallischer Werkstoffe. Fortschrittsberichte der VDI-Reihe Grund- und Werkstoffe. Düsseldorf: VDI-Verlag 1981, S. 35 ff