

# Neue Methoden zur Charakterisierung und Optimierung reibungsoptimierter Oberflächen

Reimund Neugebauer<sup>1</sup>, Hans Bräunlich<sup>1</sup>,  
Thomas Burkhardt<sup>1</sup>, Sophie Gröger<sup>2</sup>, Uladzimir Mikulich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU  
Reichenhainer Straße 88  
09126 Chemnitz

<sup>2</sup>Technische Universität Chemnitz  
Professur Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung  
Reichenhainer Straße 70  
09126 Chemnitz

---

## Zusammenfassung

Die Gestaltung und Herstellung reibungsarmer Oberflächen durch Mikrostrukturierung steht im Fokus der vorliegenden Veröffentlichung. Ausgewählte Mikrostrukturierungsverfahren und deren technologische Besonderheiten werden beschrieben, wobei die inkrementelle Mikroumformung mittels Rundwalzwerkzeugen sowie durch die Verformung mit ultraschallgetriebenen Werkzeugen im Mittelpunkt steht. Zum besseren Verständnis der Wirkung einer bestimmten Oberflächenqualität oder auch einer definiert eingebrachten determinierten Oberflächentopografie auf das Reibverhalten werden Wirkungsmechanismen definiert. Die Charakterisierung der Oberflächen durch erweiterte Erfassungsmethoden und neue Ansätze für die Ableitung von 3D-Kenngrößen zur Beschreibung des Kontaktverhaltens zeigen den Informationsgewinn für die Ableitung geometrisch determinierter Oberflächenstrukturen für die Reduzierung von Reibung und Verschleiß.

The focus of the paper is the design and manufacturing of friction optimized surfaces with microstructures. Selected microstructuring technologies especially the manufacturing of microstructures with incremental micro forming by round rolling and plastic deformation by ultrasonic powered tools are described. For a better understanding of the mechanisms of a certain surface quality or a defined, determined surface structure for tribological behavior, a detailed interpretation of the effects and mechanisms in and on microstructures is needed. A new measuring method and an approach for 3D-parameters to describe the contact behavior are derived for an improved description of friction and wear optimized surfaces.

## **1. Einleitung und Ausgangssituation**

Bei der energieeffizienten Darstellung von mechanischen Bewegungen, von der Fahrt eines Kraftfahrzeugs bis hin zum Betrieb einer Produktionsmaschine, spielt die Beherrschung der Reibvorgänge eine entscheidende Rolle. Dabei rückt neben der Optimierung moderner Schmierstoffe die Gestaltung und Herstellung geeigneter reibungsarmer Oberflächenstrukturen zunehmend in den Fokus aktueller Forschungsarbeiten.

Vielfach wird versucht, mit abtragenden und spanenden Verfahren eine Mikrostruktur herzustellen, welche vorzugsweise aus geometrisch determinierten, äquidistant angeordneten Mikrokavitäten besteht. Die applikationsspezifische Auslegung und Dimensionierung solcher Mikrostrukturierungen erfolgt allerdings noch immer meist empirisch und ein systematisches Mikrostrukturdesign auf der Basis der tribologisch relevanten Wirkungsmechanismen an und in den Mikrostrukturen ist die Ausnahme. Weiterhin ist die Ableitung des tribologischen Verhaltens allein aus den bekannten Oberflächenkenngrößen, wie beispielsweise  $R_a$  und  $R_z$  sowie aus der Abbott-Kurve,  $R_{pk}$ ,  $R_k$  und  $R_{vk}$  nur eingeschränkt möglich. Auch wird häufig die Mikrostrukturierung von Funktionsflächen allein im Hinblick auf besonders gute Gleiteigenschaften durchgeführt, während der Einfluss des Verschleiß- und Ermüdungsverhaltens auf den Betrieb von mikrostrukturierten Reibpartnern unberücksichtigt bleibt.

Wird für eine Applikation eine Mikrostrukturierung ermittelt, die eine signifikante Reibungsminimierung bewirkt und wird darüber hinaus ihre dauerhafte Funktionstüchtigkeit in ersten Prüfläufen nachgewiesen, bleibt die Frage nach einem serienproduktionstauglichen Verfahren zur Mikrostrukturierung und den resultierenden Kosten.

Im vorliegenden Beitrag wird das Ziel verfolgt, aus der Sicht des Produktionstechnikers Vorschläge für die Charakterisierung von Oberflächen zu formulieren und Wirkungsmechanismen zu definieren, die eine signifikante Reibungs- und Verschleißminimierung erwarten lassen. In diesem Zusammenhang werden ausgewählte Mikrostrukturierungsverfahren und deren technologische Besonderheiten und Potentiale skizziert und eine Einordnung im Hinblick auf die Fertigungskosten vorgenommen, wobei die Mikrostrukturierung durch inkrementelle Mikroumformung mittels Rundwalzwerkzeugen sowie durch oberflächennahe plastische Verformung im Mittelpunkt stehen.

## **2. Wirkungsmechanismen an mikrostrukturierten Oberflächen**

Der Schlüssel zum besseren Verständnis der Wirkung einer bestimmten Oberflächenqualität oder einer definiert eingebrachten determinierten Oberflächentopografie auf das Reibverhalten liegt in der Aufklärung der an und in den Mikrostrukturen wirkenden Mechanismen und Effekte. So können durch Mikrokavitäten Schmierstoff bereitgestellt oder Schmutzpartikel, die zu zusätzlicher Reibung und zu erhöhtem Verschleiß führen würden, aufgenommen werden. Bei diesen sekundären Mechanismen spielen hauptsächlich die laterale Ausdehnung der Mikrokavität, das Kavitätvolumen und ihr flächenbezogener Anteil an der nominellen Oberfläche eine Rolle.

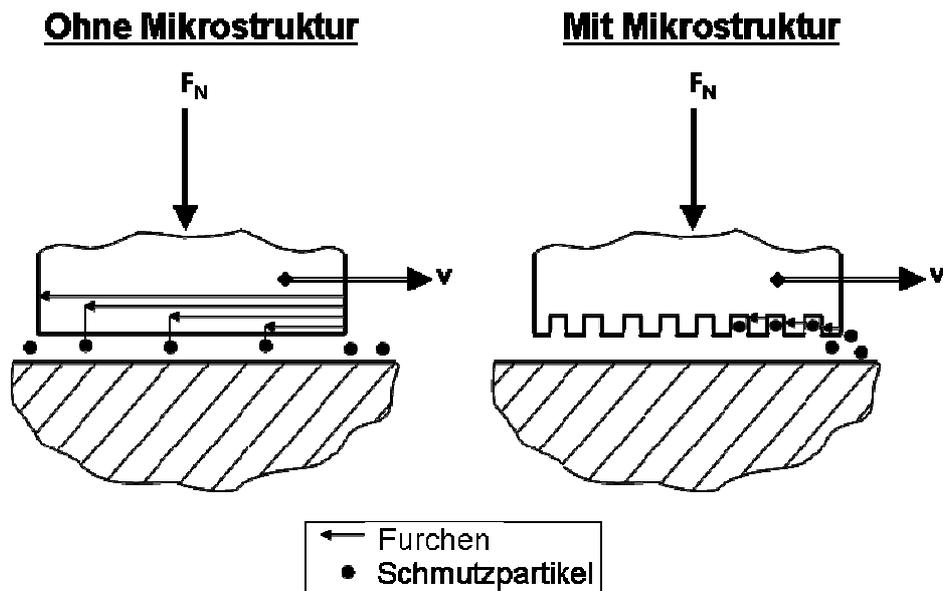


Bild 1: Wirkung mikrostrukturierter Oberflächen – Aufnahme von abrasiven Partikeln  
 Figure 1: Mechanism of microstructured surfaces – absorption of abrasive particles

Eine hinreichend tiefe Mikrostruktur kann im Schmierpalt befindliche Schmutzpartikel aufnehmen (Bild 1). Die reibungsreduzierende Wirkung leitet sich aus dem verkürzten Furchungsweg ab, den ein Partikel an den Reibpartnern zurücklegt (Pflugwirkung). Bei diesem sekundären Wirkungsmechanismus wird die, dem Furchungsweg proportionale Energiedissipation, welche ihre Ursache in mikroplastischen Verformungs- und Mikrospannungsvorgängen hat, reduziert und abrasiver Verschleiß durch harte Partikel im Schmierpalt minimiert.

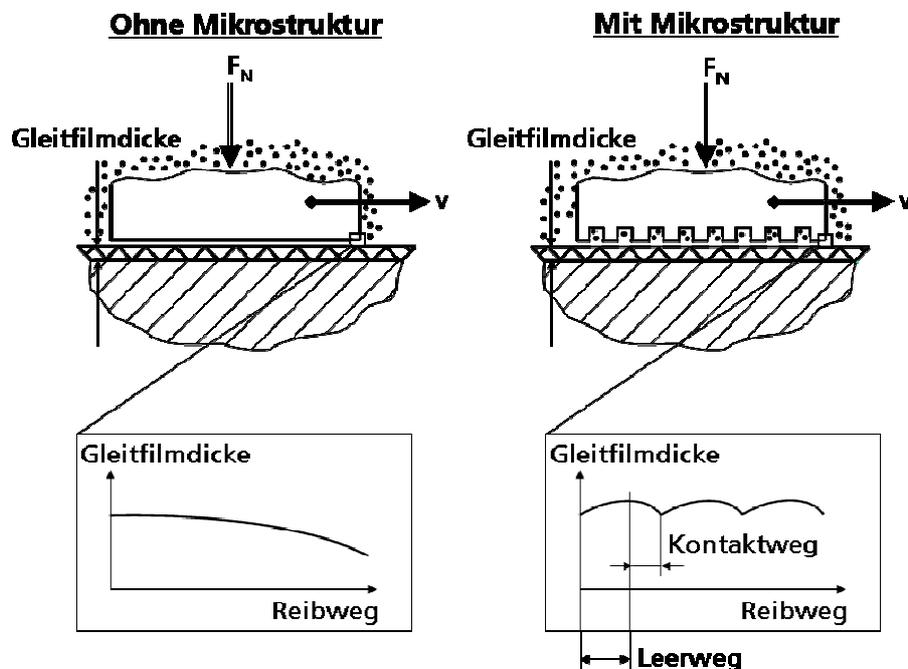


Bild 2: Wirkung mikrostrukturierter Oberflächen – zyklische Erneuerung des Gleitfilms  
 Figure 2: Mechanism of microstructured surfaces – periodical regeneration of the lubrication film

Die Fähigkeit einer tribologisch beanspruchten Oberfläche Schmierstoff aufzunehmen, ist für das Reib- und Verschleißverhalten von großer Bedeutung. Eine entsprechende quantitative Bewertung auf der Grundlage oberflächenmesstechnisch ermittelter Rauheitsparameter, beispielsweise aus der Abbott-Kurve, ist vergleichsweise einfach realisierbar und seit langem bekannt.

Die Wirksamkeit dieser Form der Schmierstoffversorgung hängt darüber hinaus von der charakteristischen lateralen Ausdehnung der Einzelkontakte und dem charakteristischen Abstand zwischen diesen ab. Bild 2 zeigt schematisch die Abhängigkeit der Gleitfilmdicke von den, durch die Mikrostrukturierung gezielt beeinflussbaren geometrischen Verhältnissen. Unter dem Begriff Gleitfilmdicke wird hierbei nicht nur die Benetzung mit Schmierstoff und die wirksame Schmierstathöhe verstanden, sondern, im Fall eines nicht geschmierten, »trockenen« Tribosystems, auch die Menge an ab- und adsorbierten Gas- und Flüssigkeitsteilchen aus der Umgebungsatmosphäre, welche beispielsweise aufgerissene und geschädigte Oxidschichten »ausheilen« und somit das Reibverhalten signifikant beeinflussen können.

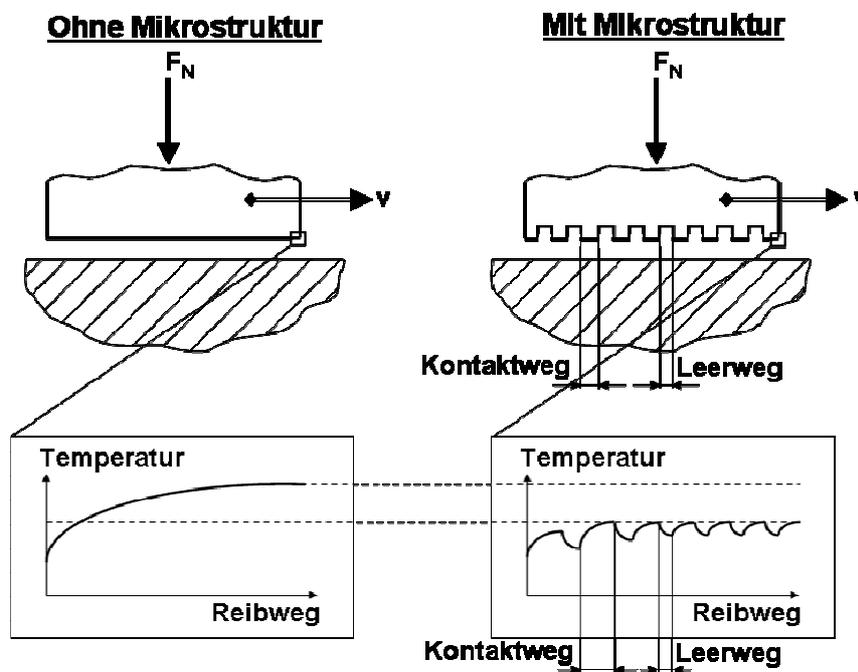


Bild 3: Wirkung mikrostrukturierter Oberflächen – zyklische thermische Entlastung des Tribosystems

Figure 3: Mechanism of microstructured surfaces – periodical thermal recovery of the tribological system

In ähnlicher Weise wie die Gleitfilmdicke wird die wirksame Kontakttemperatur durch die geometrischen Verhältnisse der Mikrostruktur beeinflusst (Bild 3). Beide Fälle lassen sich den sekundären beziehungsweise mittelbaren Wirkungsmechanismen zuordnen.

Für die Erzeugung eines hydrostatischen Druckes ist neben der lateralen Geometrie der Mikrokavität auch deren Tiefenprofil von ausschlaggebender Bedeutung und entsprechend der gegebenen Gleitgeschwindigkeit und der Schmierstoffviskosität zu dimensionieren. Bei diesem primären Wirkungsmechanismus wird durch die Gleitgeschwindigkeit des Gegenkörpers und die Mitnahme von viskosem

Schmierstoff in der Mikrokavität eine Schmierstoffzirkulation erzeugt, welche ihrerseits einen hydrodynamischen Druck induziert. Der realisierbare Druckaufbau ist von Gleitgeschwindigkeit und Schmierstoffviskosität, von der Schmierfilmdicke und den Abflussverhältnissen im Schmierpalt sowie vom Verhältnis aus der lateralen Ausdehnung der Mikrokavität in Bewegungsrichtung und dem Tiefenprofil der Mikrokavität abhängig. Für einen wirksamen Druckaufbau ist eine, im Verhältnis zur Tiefe, große laterale Ausdehnung insbesondere in Bewegungsrichtung erforderlich. Das Tiefenprofil sollte hingegen flach ausgeführt werden. Ist die Tiefe der Mikrokavität größer als die zehnfache Schmierpalthöhe, ergeben sich ungünstigere Verhältnisse im Hinblick auf einen hydrodynamischen Druckaufbau in der mikrostrukturierten Oberfläche.

Die äußeren Abmessungen des Tribosystems, insbesondere die Größe und Geometrie der nominellen Kontaktfläche sowie die Schmierpalthöhe, sind bei mikrostrukturierten Gleitflächen ebenso wie bei klassischen technischen Gleitflächen von größter Wichtigkeit für die Gestaltung einer reibungsoptimierten Gleitpaarung. Die hydrodynamischen Schmierungsverhältnisse, definiert sowohl durch die Ausbildung eines Schmierkeils als auch durch Quetschströmungen bei wechselnden Lastrichtungen, sind beim Design einer Mikrostrukturierung zunächst für die nicht mikrostrukturierte Lauffläche zu bestimmen. Hierauf aufbauend ist die Mikrostrukturierung so zu gestalten, dass diese Schmierungsverhältnisse keinesfalls negativ beeinflusst werden. Insbesondere die »Drainagewirkung« einer falsch bemessenen Mikrostrukturierung, bei welcher der Schmierstoff aus der am höchsten belasteten Zone durch die Mikrostruktur hindurch abfließt und eine Reduzierung der Schmierpalthöhe hervorruft, ist unbedingt zu vermeiden.

Neben mikrostrukturierten Oberflächen, die durch in definiertem Abstand eingebrachte Kavitäten mit definierter Geometrie gekennzeichnet sind (»mikrostrukturierte Oberfläche erster Art«), besteht weiterhin die Möglichkeit, eine geometrisch bestimmte, dreidimensionale Mikrostruktur vollflächig zu generieren und somit eine gezielt determinierte Oberflächentopografie zu verwirklichen (»mikrostrukturierte Oberfläche zweiter Art«).



a)



b)

Bild 4: Mikrostrukturierte Oberflächen für Umformwerkzeuge – a) Abbildung einer Versuchswerkzeugoberfläche mit einer »mikrostrukturierten Oberfläche zweiter Art«

b) Mikrostrukturierung eines Aktivteils für ein Tiefziehwerkzeug durch Mikrofräsbearbeitung

Figure 4: Microstructured surfaces for forming tools – a) Tool surface with microstructure type 2  
b) Micro structuring of an active component for a cupping tool by micro milling

Hierfür werden am Fraunhofer IWU erste Lösungsansätze zur Gestaltung der Topografie und zu den nutzbaren Fertigungsverfahren am Beispiel eines reibungsoptimierten Tiefziehwerkzeugs entwickelt. Der besondere Anspruch an das Mikrostrukturdesign resultiert hierbei aus dem im plastischen Zustand befindlichen Werkstück, welches den Gegenkörper zum starren Tiefziehwerkzeug bildet. Die Mikrostrukturierung soll die adhäsionsbehafteten Kontakte sowohl in ihrer Ausdehnung in Bewegungsrichtung beeinflussen als auch deren wirksame Fläche reduzieren und somit für eine definiert limitierte Werkstoffanstrengung sorgen. Weiterhin sollen die sekundären Wirkungsmechanismen zur Gleitfilmbildung entsprechend Bild 2 sowie zur Aufnahme von abrasiven Schmutzpartikeln, wie in Bild 1 gezeigt, zur Anwendung kommen.

Die sowohl durch Mikrofräsen (Bild 4) als auch durch Präzisionsdrehen hergestellten Mikrostrukturierungen auf Niederhalter und Ziehring besteht aus einer konzentrischen Anordnung der näherungsweise sinusförmigen Geometrie mit einer »Wellenlänge« von 500  $\mu\text{m}$  und einer »Wellenhöhe« von 5 bis 10  $\mu\text{m}$ . Erste Tiefziehversuche mit dem auf diese Weise mikrostrukturierten Werkzeug verliefen vielversprechend. Die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse lassen erkennen, dass durch eine Halbierung von »Wellenlänge« und »Wellenhöhe« und eine Vergrößerung des Kontaktradius eine signifikante Verbesserung des Reibverhaltens, messbar durch die Verfahrensgrenze maximales Ziehverhältnis, erzielt werden kann.

### **3. Oberflächenbewertung**

Für die Charakterisierung der tribologischen Eigenschaften sollten zumindest ansatzweise die Kontaktbedingungen aus den Oberflächenkennwerten ableitbar sein. Die TU Chemnitz qualifiziert hierfür sogenannte »morphologische Filter«, mit deren Hilfe aus 3D-Datensätzen, welche die Oberflächentopografien der Kontaktpartner beschreiben, erweiterte 3D-Oberflächenkennwerte gewonnen werden können. Dabei sind beispielsweise auch die charakteristische laterale Ausdehnung der realen Einzelkontaktflächen sowie der »repräsentative effektive Kontaktradius« für die gesamte Kontaktfläche quantifizierbar, auf deren Basis wiederum Aussagen zur Werkstoffanstrengung bei definierter nomineller Kontaktspannung und zu der sich einstellenden Adhäsionsfläche möglich sind. Die Charakterisierung der Kontaktfläche ist eine 3D-Aufgabenstellung und erfordert neue Ansätze zur Ermittlung von Kenngrößen. Die Grundlage dafür ist die Betrachtung der Oberfläche als Struktur, die die Fertigungsparameter und Funktionseigenschaften abbildet. Die Darstellung der Korrelation der geometrischen Eigenschaften für die Prozesssteuerung und Funktionsgenerierung setzt in der frühen Entwicklungsphase eine ganzheitliche Erfassung voraus, um alle Bestandteile der Oberfläche in die Auswertung einbeziehen zu können. Damit werden neue Erfassungsmethoden notwendig, die die bereits bekannten Vorgehensweisen ergänzen.

### 3.1 Bisherige Vorgehensweisen

Bei den heute genormten Ansätzen werden die Gestaltabweichungen der Oberfläche in Rauheit, Welligkeit und Form getrennt. Für die Rauheit wird üblicherweise ein 2D-Profil aufgenommen und der Form- und Welligkeitsanteil durch Gaußfilter in Abhängigkeit der Wellenlänge entfernt. Die Formabweichung einer Oberfläche wird mit Formmessgeräten bewertet, die auf Grund der Größe und Form des Antastelementes einen großen Anteil der Rauheit bereits bei der Erfassung eliminieren. Darüber hinaus werden ebenfalls Gaußfilter zur Darstellung der Formanteile eingesetzt. Die Formabweichung wird durch Zuordnung einer Minimum-Zone und Berechnung des Abstandes ermittelt.

Kenngrößen existieren hauptsächlich für die Rauheitsbewertung. Am häufigsten eingesetzt werden Rz und Ra sowie die Abbott-Kurve, Rpk, Rk und Rvk, die einen statistischen Wert über die Verteilung der Amplituden der Oberfläche liefern. Derzeit im Prozess der Veröffentlichung sind zudem Rauheitskenngrößen für 3D-Oberflächen [1]. Neben der statistischen Auswertung, abgeleitet von den 2D-Parametern, können neue strukturbeschreibende Parameter eingesetzt werden. Die Anwendung dieser Parameter ist jedoch noch nicht untersucht. Nachteilig für die Anwendung dieser Kenngrößen zur Beschreibung der am Kontakt beteiligten Oberflächenstruktur sind die Beschränkung der Parameter auf die Rauheit der Oberfläche und die Mittellinie als Bezug. Eine Ableitung des tribologischen Verhaltens der Oberfläche ist damit nicht beschreibbar.

### 3.2 Ganzheitliche Erfassung

An der Professur Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung werden seit einigen Jahren neue Ansätze zur Ermittlung von geometrischen Eigenschaften von Oberflächen untersucht [2]. Diese Ansätze basieren auf der ganzheitlichen Erfassung, Filterung und Auswertung von Oberflächeneigenschaften in einem einheitlichen, an der materialfreien Seite anliegenden Bezugssystem.

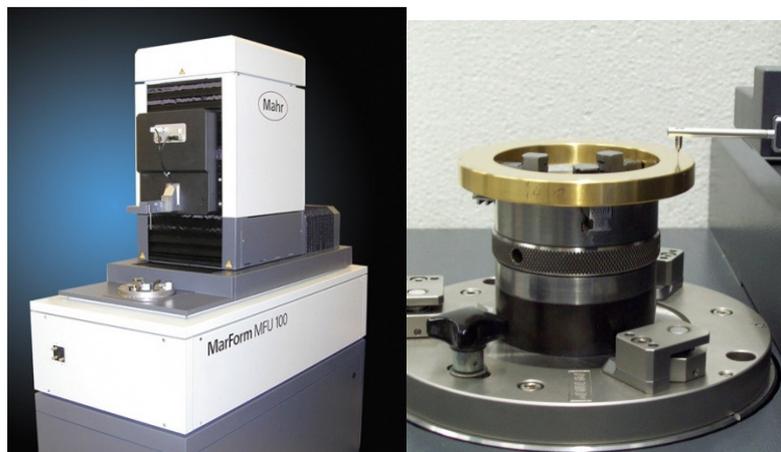


Bild 5: Formmessgerät und Messaufbau

Figure 5: Form measuring instrument and measuring assembly

Bei der ganzheitlichen Erfassung werden die Messbedingungen aus den zu erfassenden geometrischen Strukturen auf der Oberfläche abgeleitet. Die Größe der Krümmungsradien auf der Oberfläche bestimmt die Größe und Form des Antastelementes sowie die Lage und Anzahl der Messpunkte. Formmessgeräte (Bild 5) können mit Antastelementen ausgestattet werden, die Radien von wenigen Mikrometern für die Antastung nutzen.

Mikrokavitäten der Oberfläche werden mit den kleinen Radien der Antastelemente ausgetastet und durch eine sehr hohe Anzahl von Antastpunkten detailliert abgebildet. Die Erfassung der Formanteile und die Verteilung der kleinen Strukturen werden durch den Messbereich der Formmessgeräte möglich. Sehr große Datenmengen und Messzeiten spielen im Vergleich zu dem Informationsgewinn über die Oberflächenstrukturen keine Rolle.

### 3.3 Ansätze für neue Kenngrößen

Für die Ermittlung der Kontaktradien und die Trennung der Bestandteile der Oberfläche werden morphologische 3D-Filter [3] eingesetzt. Mit einem strukturierenden Element wird die Abtastung einer Oberfläche simuliert. Das einfachste Beispiel für eine morphologische Operation ist das Abrollen einer Kugel auf der Oberfläche, vergleichbar mit der Abtastung bei taktiler Messung mit einem kugelförmigen Antastelement und der Darstellung der Mittelpunktsbahn als Ergebnis. Die morphologische Umkehrfunktion dieser Dilatation ist die Erosion (Bild 6), die nacheinander ausgeführt, als Closing und Opening, anliegende Oberflächen mit reduzierter Tiefen- und Strukturinformation erzeugen, wenn das strukturierende Element einen größeren Radius als der kleinste Krümmungsradius der Oberfläche aufweist.

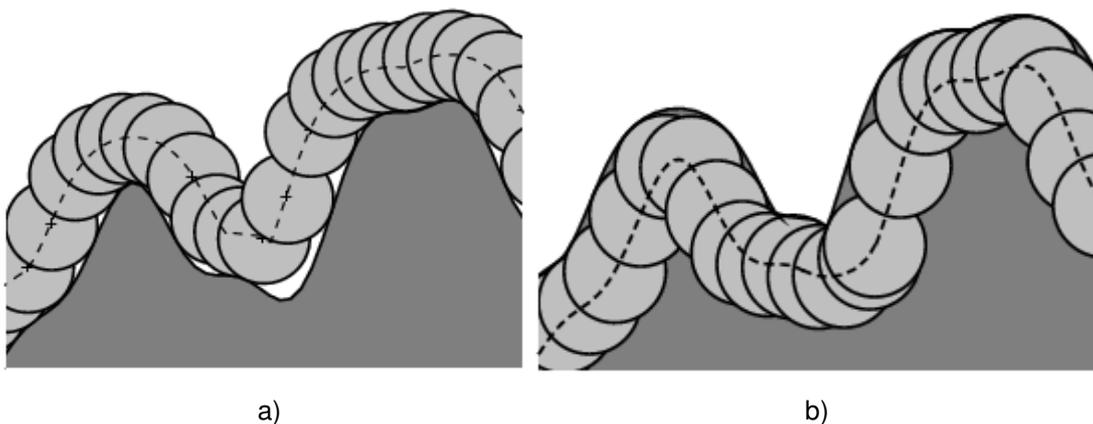


Bild 6: Morphologische Operationen a) Dilatation b) Erosion  
Figure 6: Morphological operation a) Dilatation b) Erosion

Mit Simulationswerkzeugen werden die Kontaktradien durch unterschiedliche Radien für das strukturierende Element berechnet. Bild 7 stellt unterschiedliche Radien in Bezug zur erfassten Oberfläche, als grafische Darstellung dieses Simulationsprozesses, dar.

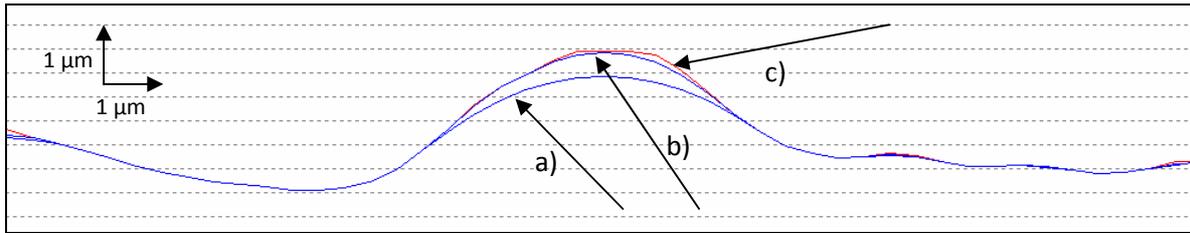


Bild 7: Ermittlung des Kontaktradius durch Simulation a) Radius 5  $\mu\text{m}$  b) Radius 3  $\mu\text{m}$  c) erfasste Oberfläche

Figure 7: Calculation of the contact radius by simulation a) Radius 5  $\mu\text{m}$  b) Radius 3  $\mu\text{m}$  c) extracted surface

Die in Bild 8 veranschaulichte Simulation verschiedener Radien für ein erfasstes Profil wird in gleicher Weise für 3D-Oberflächen durchgeführt.

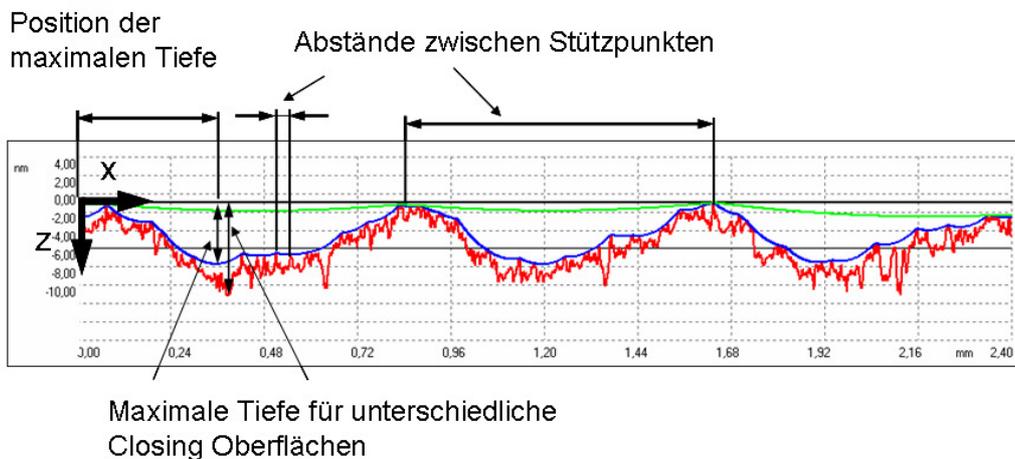


Bild 8: Laterale und vertikale Abstände im Bezugssystem

Figure 8: Lateral and vertical distances in the datum system

Aus den Schnittpunkten der neuen Oberflächen werden neben den Kontaktradien die lateralen und horizontalen Abstände in einem gemeinsamen Bezugssystem berechnet. Durch Simulation des anliegenden Gegenstückes ist die Anzahl der Kontakte ableitbar.

## 4. Umformtechnische Mikrostrukturierungsverfahren

### 4.1 Mikroumformung mittels Rundwalzwerkzeugen

Die umformtechnische Generierung mikrostrukturierter Oberflächen zeichnet sich durch hohe Präzision und Oberflächenqualität aus und ermöglicht auch die kostengünstige Herstellung komplexer Mikrostrukturgeometrien mit hohem Miniaturisierungsgrad. Angewendet werden Präge- und Walzverfahren (Bild 9), wobei zwischen dem freien Einsenken (Bild 10, Bildausschnitt a)) und dem vollflächigen Auskalibrieren (Bild 10, Bildausschnitt b)) der Mikrostruktur unterschieden wird. Beim freien Einsenken entspricht die gedrückte Fläche der

projizierten Grundfläche der Mikrokavität. Die Geometrie der Kavität ist durch die Werkzeuggeometrie determiniert. Im Übergangsbereich zwischen Mikrokavität und Ausgangsoberfläche bildet sich eine umlaufende wallartige Materialanhäufung, welche durch freie Formung ausgebildet wird und nicht durch die Formspeicherfunktion des Werkzeugs festgelegt ist. Diese, aus der Ausgangsoberfläche hervortretende, wallartige Materialanhäufung beeinflusst maßgeblich das Reibverhalten und es ist vielfach nach der umformtechnischen Mikrostrukturierung erforderlich, durch ein trennendes oder abtragendes Finishverfahren eine ebene tragende Fläche herzustellen. Der Vorteil des freien Einsenkens im Vergleich zum vollflächigen Auskalibrieren besteht in den wesentlich kleineren Prozesskräften und Werkzeugbelastungen.

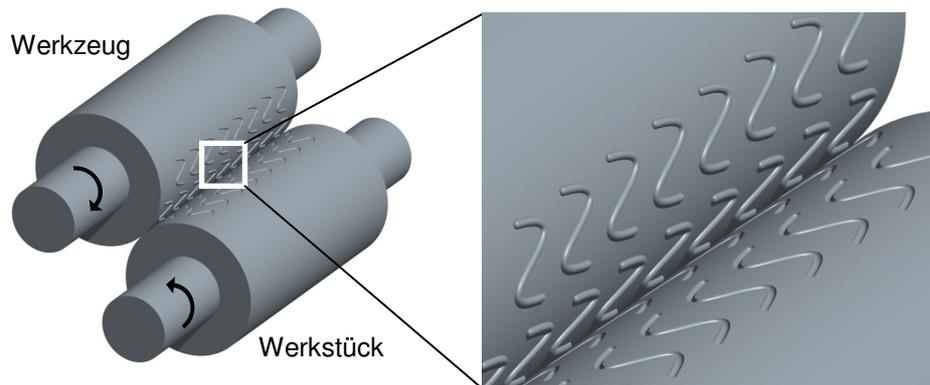


Bild 9: Umformtechnische Mikrostrukturierung mittels Rundwalzwerkzeug  
 Figure 9: Micro forming by round rolling

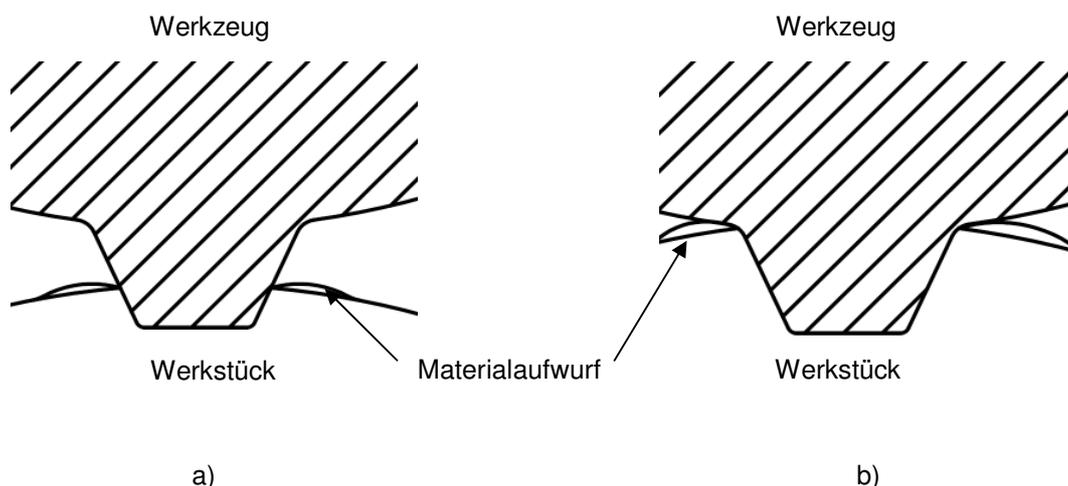


Bild 10: Kontaktverhältnisse beim umformtechnischen Mikrostrukturieren durch Rundwalzen  
 a) Ausbildung einer Materialanhäufung (Materialaufwurf) beim freien Einsenken  
 b) Ausformung der Mikrostrukturierung auf der gesamten Oberfläche durch vollflächiges Kalibrieren  
 Figure 10: Contact ration of the micro forming by round rolling  
 a) Material accumulation at free hobbing  
 b) Molding of the microstructure on the complete surface by holoheedral calibration

Allerdings lassen sich mit dem freien Einsenken nur »mikrostrukturierte Oberflächen erster Art« (siehe hierzu Abschnitt 2) realisieren. Beim vollflächigen Auskalibrieren der Mikrostruktur, bei dem die gesamte bearbeitete Werkstückfläche vom Werkzeug beaufschlagt wird, sind hingegen auch »mikrostrukturierte Oberflächen zweiter Art« herstellbar. Die Topografie der gesamten mikrostrukturierten Werkstückoberfläche ist hierbei durch die Formspeicherfunktion des Werkzeugs determiniert. Nachteilig sind die für das vollflächige Auskalibrieren erforderlichen großen Prozesskräfte, die hohen Werkzeugbelastungen und die höheren Anforderungen an die Maschinentechnik hinsichtlich übertragbarer Prozesskraft und Systemsteife.

Im Hinblick auf die erforderlichen Investitionen für Werkzeug und Mikrostrukturierungsanlage ist das freie Einsenken dem vollflächigen Auskalibrieren dann überlegen, wenn die geforderte Mikrostrukturgeometrie mittels Einsenken prozesssicher herstellbar ist und die Kosten für den nachgeschalteten Finishprozess niedrig bleiben.

Bestehen höhere Anforderungen an die Komplexität der Mikrostrukturgeometrie oder ist eine »mikrostrukturierte Oberfläche zweiter Art« zu realisieren, ist das vollflächige Auskalibrieren zu favorisieren. Sowohl die für die Mikrostrukturwerkzeugherstellung als auch für die Maschinentechnik erforderlichen Anfangsinvestitionen können reduziert werden, wenn beim vollflächigen Auskalibrieren mit möglichst kleinen Rundwalzwerkzeugen gearbeitet wird, wobei hierbei technologische Grenzen zu berücksichtigen sind. Gegen kleinere Werkzeuge sprechen die etwas längere Bearbeitungszeit und die kürzere Werkzeugstandzeit.

## **4.2 Oberflächennahe Verformung mittels ultraschallgetriebener Werkzeuge**

Am Fraunhofer IWU ist ein effektives Mikrostrukturierungsverfahren in Entwicklung, das zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens von technischen Reibpaarungen eine dynamische, oberflächennahe plastische Verformung mittels ultraschallgetriebener Mikroumformwerkzeuge nutzt. Dieses umformtechnische Verfahren zeichnet sich durch eine gut reproduzierbare, charakteristische Gestaltung der Oberflächentopografie (siehe Bild 11) und eine Verbesserung der Materialgebrauchseigenschaften der oberflächennahen Schicht aus. Letzteres wird durch die mikroumformtechnische Generierung eines sehr feinkörnigen Gefüges und durch das Einbringen von Druckeigenspannungen erzielt. Neben der tribologischen Optimierung soll damit auch eine deutliche Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit zyklisch beanspruchter Maschinenelemente erreicht werden. Von besonderem Vorteil sind die, gegenüber den Präge- und Walzverfahren wesentlich kleineren Bearbeitungskräfte und die hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit, welche kurze Bearbeitungszeiten ermöglichen.

Das Ultraschall-Werkzeugsystem für die oberflächennahe plastische Verformung ist darüber hinaus auch in Werkzeugmaschinen für die Fräs- oder Drehbearbeitung integrierbar. Der aus einem oder mehreren Mikrostößeln bestehende Bearbeitungskopf wird durch eine Piezoaktorik über einen Amplitudenverstärker angeregt und mittels einer pneumatisch angetriebenen Linearführungseinheit mit definierter Vorkraft auf die zu bearbeitende Fläche gedrückt. Die Bewegung des in kompakter Bauweise ausgeführten Ultraschall-Werkzeugsystems erfolgt hierbei

durch die Achsen der als Peripherie dienenden Werkzeugmaschine. Sowohl die erforderlichen Investitionen als auch die Kosten für die Oberflächenmikrostrukturierung sind verhältnismäßig gering.

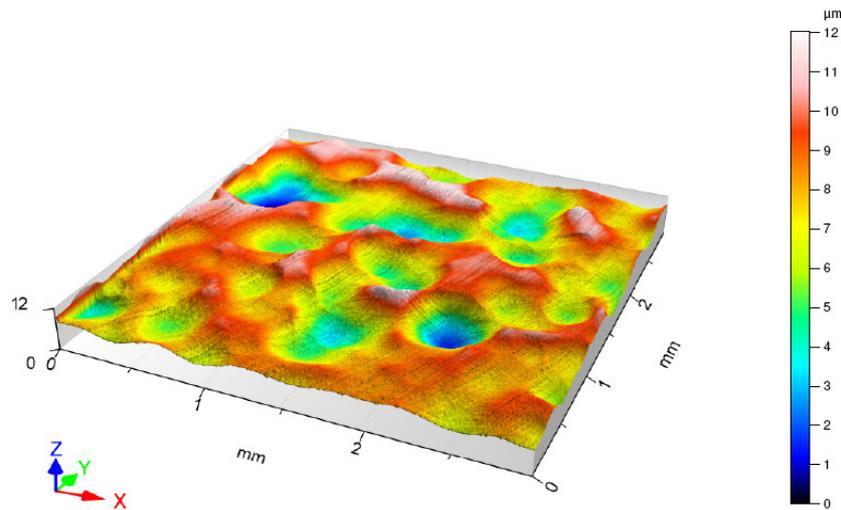


Bild 11: Erfasste Oberfläche einer mittels Ultraschallschlagverfahren modifizierten Lauffläche

Figure 11: Extracted surface of a contact surface structured by plastic deformation with an ultrasonic powered tool

Die oberflächennahe plastische Verformung mittels ultraschallgetriebener Werkzeuge weist ein großes Potential hinsichtlich der Verbesserung der tribologischen Eigenschaften und der Kosteneffizienz auf und wird sich als effektives Mikrostrukturierungsverfahren etablieren, wenn es gelingt, auf diese Weise auch komplexe, geometrisch determinierte Mikrostrukturen in hoher Präzision und Reproduzierbarkeit kostengünstig zu realisieren.

## 5. Ausblick

Das Fraunhofer IWU entwickelt applikationsspezifische Technologien und Anlagen zur Mikrostrukturierung von Oberflächen sowie Methoden zum gezielten Mikrostrukturdesign auf der Grundlage von parametrisierten Modellen zur Beschreibung tribologisch relevanter Wirkungsmechanismen im Rahmen von geförderten Projekten und im Auftrag ihrer Industriekunden.

Die an der Professur Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung durchgeführten Arbeiten zur Oberflächencharakterisierung beinhalten sowohl die Qualifikation oberflächenmesstechnischer Verfahren als auch die Entwicklung neuer Prüfmethoden und Auswertelgorithmen zur Ermittlung neuer Kennwerte zur Beschreibung des tribologischen Verhaltens aus Oberflächenkenngrößen.

Ziel ist es, sowohl Entwicklern von reibbeanspruchten Systemen als auch dem Fertigungstechniker Empfehlungen für die applikationsspezifische Gestaltung geeigneter Mikrostrukturen und Oberflächentopografien, produktive Strukturierungsverfahren sowie eine Oberflächenmesstechnik und Auswertung zur Verfügung zu stellen, mit deren Hilfe es gelingt, das tribologische Verhalten besser als bisher gezielt zu beeinflussen und einzustellen.

## 6. Literatur

- [1] E DIN EN ISO 25178-2, 2008-03: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen
- [2] Gerlach, M., Dietzsch, M., Gröger, S.: Neuer Ansatz zur Definition von geometrischen Oberflächeneigenschaften für tribologische Systeme. Reibung, Schmierung und Verschleiß: Forschung und praktische Anwendungen; 49. Tribologie-Fachtagung, 22. bis 24. September 2008 in Göttingen
- [3] ISO/TS 16610-49: 2006-11: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 49: Morphologische Profilfilter: Skalenraumverfahren