# Fertigungs- und Oberflächentechnologien für anforderungsgerechte, tribologisch effiziente Oberflächen von Umformwerkzeugen und Powertrain-Bauteilen

Schubert, A.; Neugebauer, R.; Sylla, D.; Avila, M.; Hackert, M.

## Abstract

Die Oberflächeneigenschaften von mechanisch beanspruchten Bauteilen haben einen entscheidenden Einfluss auf deren Leistungsfähigkeit. Diese Arbeit beschreibt die Potentiale von mikrostrukturierten Oberflächen hinsichtlich der Verbesserung von Ressourcen- und Energieeffizienz der Bauteile in ihrem wird die Lebenszyklus. Im Fertigungszyklus Verbesserung des Verschleißwiderstandes von beschichteten Warmumformwerkzeugen durch Mikrostrukturierung des Substrats betrachtet. Im Betriebszyklus ist das Ziel, Reibung und Verschleiß durch Oberflächenstrukturierung von aufeinander gleitenden Oberflächen zu reduzieren. Die Mikrostrukturen bauen einen zusätzlichen Druck auf, der für eine schnellere Trennung der Reibpartner sorgt. Die verwendete Mikrostruktur in Form einer Kalotte (Kugelsegment) wurde zunächst mit Hilfe der FEM-Software COMSOL Multiphysics untersucht und geometrisch ausgelegt. Als Bearbeitungsverfahren kamen die elektrochemische Bearbeitung (ECM) und das Laserabtragen zum Einsatz.

## 1 Einführung

In den letzten Jahren war zu beobachten, dass sich der Trend der Entwicklungsmaßnahmen im Bereich Powertrain in Richtung der Verbesserung der Energieeffizienz bewegt hat. Gründe für diesen Weg lassen sich in ansteigenden Kraftstoffpreisen, Ressourcenverknappung und politischen Vorgaben zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission finden. Die Tribologie weist einen entscheidenden Einfluss auf die Energie- und Ressourceneffizienz im Fertigungs- und Betriebszyklus auf. Die Möglichkeiten und Wege zur Steigerung der Energieeffizienz im Powertrain-Bereich durch geeignete tribologische Maßnahmen sollen anhand eines Funktionsdemonstrators (Bild 1) mit den Elementen Kurbel-, Getriebe- und Rotorwelle im Spitzentechnologiecluster eniPROD (Prozesskette Powertrain) aufgezeigt werden.



**Bild 1:** Ausgewählte Potentiale zur Energie- und Ressourceneinsparung durch Oberflächenstrukturierung

Insbesondere die Steigerung der Verschleißstabilität und der Betriebssicherheit von Warmumformwerkzeugen sowie die Reduzierung von Reibung an den hydrodynamischen Lagern während des Einsatzes stehen im Fokus dieser Arbeit. Die Oberfläche von Umformwerkzeugen beeinflusst ausschlaggebend ihre Standzeit und den Wartungsaufwand sowie das entstehende Produkt mit seinen Nutzungseigenschaften. Die Entwicklung von Warmmassivumformwerkzeugen mit einer höheren Verschleißbeständigkeit und Betriebssicherheit ist eine der effektivsten Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz in der metallverarbeitenden Industrie. Wegweisende Arbeiten zur Energieeffizienz in der Produktion von Lange [1] sowie von Berry und Fels [2] haben gezeigt, dass die Herstellung von technischen Werkstoffen und Halbzeugen die energieintensivste Phase in der Prozesskette zur Herstellung metallischer Bauteile ist. Somit führt die Reduzierung der erforderlichen Anzahl von Neuwerkzeugen und Werkzeugaufbereitungen für die Herstellung eines Produkts zu signifikanten Verbesserungen der Energiebilanz von Prozessketten. Dabei ist auch zu beachten, dass das endkonturnahe Umformen besonders störanfällig für Werkzeugverschleiß ist, wodurch eine Erhöhung der Verschleißbeständigkeit und besonders der Betriebssicherheit zu hohen Einsparungen durch die Vermeidung von Ausschuss führen kann.

Zur Reduzierung des Verschleißes bei Warmumformwerkzeugen aus Werkzeugstahl werden Beschichtungen eingesetzt. Jedoch verhindern die geringe Schichthaftung, die auf dem Beschichtungsprozess basierenden Restspannungen, die stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Schicht und Substrat und die hohen Herstellungskosten einen praktischen Einsatz in der Industrie. Durch eine gezielte Strukturierung des Substrates vor dem Beschichtungsprozess ist eine Erzielung von stärkeren Schichtanbindungen im Beschichtungsprozess, von höheren Risszähigkeiten im Schichtübergangsbereich zwischen Schicht und Substrat sowie von gradierten Werkstoffeigenschaften in diesem Bereich möglich. Die Nutzung von regelmäßigen Strukturen zur Erhöhung der Schichtstabilität und die Integration deren Fertigung in energie- und kosteneffizienten Fertigungsketten zur Herstellung von Warmumformwerkzeugen wird im Rahmen dieses Beitrags vorgestellt.

Um die Ziele Schadstoffemissionsverringerung und Kraftstoffverbrauchsreduktion im Produktlebenszyklus zu erreichen, ist es notwendig, sich Gedanken über reibungsminimierende Maßnahmen im Antriebsstrang zu machen. Vor allem die Komponenten Kurbelwelle, Kolbengruppe und Ventiltrieb besitzen ein hohes Einsparpotential. Eine Reibminimierung führt zu einer Verschleißreduzierung und somit weiter zu einer Wirkungsgradverbesserung und letztendlich zu Erhöhung der Lebensdauer der Baugruppen. Daher ist es das Ziel, durch geeignete Maßnahmen Reibung und Verschleiß von aufeinander gleitenden Oberflächen zu reduzieren. In zahlreichen Veröffentlichungen konnte gezeigt werden, dass die Oberflächenstruktur maßgeblichen Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften hat. Eine gezielte Veränderung der Oberfläche von Tribopartnern in Form von eingebrachten Mikrostrukturen hat den Reib- bzw. Verschleißkoeffizient um bis zu 60 % verringert [3-8]. Hauptsächlich wurde für diesen Anwendungsfall der Laser als Werkzeug eingesetzt. In dieser Arbeit werden mikrostrukturierte Oberflächen sowohl durch das Laserabtragen als auch durch elektrochemische Verfahren hergestellt. Die elektrochemische Bearbeitung hat den Vorteil, eine hohe Abtragsgenauigkeit ohne mechanische oder thermische Beeinflussung der Bauteiloberfläche zu erreichen. Dadurch entfällt eine Nachbearbeitung, da es zu keiner Gratbildung bzw. zu keinem Materialaufwurf, wie beim Einsatz des Lasers, kommt.

## 2 Einsatzbedingungen von Umformwerkzeugen und Powertrain-Komponenten

Der Einsatz von strukturierten Oberflächen verbessert die tribologischen Eigenschaften bei Warmumformwerkzeugen und bei Gleitlagern von Antriebskomponenten, wobei jeweils unterschiedliche Einsatzbedingungen auftreten.

Die Oberflächen von Werkzeugen für die Warmmassivumformungen müssen sehr hohen thermischen und mechanischen Belastungen standhalten. Diese Belastungen sind stark zyklisch, wodurch es zu einem Versagen basierend auf thermischem und mechanischem Verschleiß bei unter 10<sup>4</sup> Zyklen kommt. Für diesen Anwendungsfall soll die Oberflächenstrukturierung eine Erhöhung der Verschleißbeständigkeit erzielen.

Im Fall der hydrodynamischen Gleitlager bei Antriebskomponenten sind die Belastungen geringer und die Ermüdung der Oberfläche liegt bei Lastspielzahlen deutlich über 10<sup>4</sup>. Hierbei ist die Reduzierung der Reibung in der tribologischen Paarung das Hauptziel der Strukturierung.

### 2.1 Spezifische Einsatzbedingungen von Umformwerkzeugen

Bei der Warmumformung von Eisenwerkstoffen muss die Werkzeugoberfläche Berührungen mit über 1000 bis 1200 °C heißen Werkstücken bei mechanischen Drücken im Bereich von 155 bis 310 MPa überstehen [9]. In kritischen Bereichen der Werkzeugoberfläche tritt eine Kombination von mechanischen Spannungen und durch hohe Temperaturunterschiede hervorgerufenen Spannungen auf. Finite-Elemente-Analysen [10, 11] haben gezeigt, dass die thermischen Spannungen das Zehnfache der mechanischen Spannungen betragen können, wodurch die kombinierte äquivalente Spannung im Bereich der Kanten einen Wert von 1360 MPa erreichen kann.

Generell werden Werkzeugoberflächentemperaturen von mehr als 600 °C, welche über der Anlasstemperatur von Werkzeugstählen liegt, beim Kontakt mit dem heißen Werkstück erreicht [12]. Eine weitere Konsequenz der hohen Temperaturen bei der Warmumformung ist die Bildung von Zunder am Werkstück, welcher sehr hart ist und stark abrasiv auf die Werkzeugoberfläche wirkt. Die Werkzeugoberflächen sind auch hohen thermischen und mechanischen Wechselbelastungen ausgesetzt. So sind Werkzeughübe von 4 bis 200 Umformungen Minute für hydraulische Schmieden pro und Hochgeschwindigkeitsschmieden Standard, wobei das Werkzeug zwischen den Hüben auf rund 300 ℃ abgekühlt wird [13, 14].

Um diese ungünstigen Arbeitsbedingungen zu überstehen, müssen die Materialien der Warmumformwerkzeuge folgende Eigenschaften aufweisen:

- hohe Härte bei hohen Temperaturen, um dem abrasiven Verschleiß zu widerstehen
- geringe Wärmerissanfälligkeit, um bei raschen thermischen Wechselbeanspruchungen zu bestehen
- Anlassbeständigkeit zur Vermeidung thermischer Erweichung
- Tragfähigkeit gegenüber plastischen Deformationen
- Zähigkeit zum Unterbinden von mechanisch induzierten Rissen
- chemische Stabilität gegenüber den Werkstückwerkstoff zum Vorbeugen gegen Aufschweißungen und Abrieb
- Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen zur Korrosionsvermeidung
- geringe Kosten im Masseneinsatz.

Hartmetalle (Karbidphase und metallischer Binder) zeichnen sich im Gegensatz zu Werkzeugstählen durch eine hohe Warmfestigkeit, Oxidationsbeständigkeit und chemische Stabilität gegenüber Eisenwerkstoffen aus. Demgegenüber weisen Werkzeugstähle eine hohe Tragfähigkeit gegenüber plastischen Verformungen bei relativ geringen Werkstoffkosten auf. Der Ersatz von energie- und kostenintensiven monolithischen Werkzeugen aus Hartmetall durch Werkzeuge aus Werkzeugstahl, die mit Vollhartmetall beschichtet sind, eröffnet ein hohes Einsparpotential. Dabei wird eine ausreichende Schichtstabilität, welche durch eine genau eingestellte

chemische Zusammensetzung und eine porenfreie Mikrostruktur erreicht werden kann, vorausgesetzt.

#### 2.2 Spezifische Einsatzbedingungen im Powertrain mit Hauptaugenmerk auf den Funktionsdemonstrator Kurbelwelle

In einem technischen System wie dem Antriebsstrang herrschen komplexe thermische und mechanische bauteilbeanspruchende Bedingungen. Es liegen Einspritzdrücke von bis zu 2000 bar vor. Durch das Zünden des Gasgemisches entwickeln sich im Brennraum Temperaturen von bis zu 2200 ℃. Die Zündexplosion bewirkt dabei im Zylinder einen Maximaldruck von p<sub>max</sub> = 60 bis 190 bar (je nach Motorart), wodurch die Hauptbeanspruchung (neben den Massenkräften) verursacht wird. Die Zylinderkolben erreichen dadurch eine mittlere Kolbengeschwindigkeit bei pmax von 11 bis 18 m/s und beschleunigen die Kurbelwelle. Die Kurbelwelle setzt die durch die lineare Bewegung des Kolbens auf die Pleuelstange abgegebene Kraft in eine rotierende Bewegung um. Die Kurbelwelle muss dadurch einer Biegebeanspruchung, einer Torsionsbeanspruchung und einer Drehschwingungsbeanspruchung standhalten. Deshalb müssen sowohl gefügte als auch gegossene Kurbelwellen eine hohe Zugfestigkeit von ca. 1000 MPa aufweisen. Zusätzlich zu den genannten Beanspruchungen kommt es zum Verschleiß in Folge von Reibprozessen in den Gleitlagern. Der Reibbzw. der Verschleißkoeffizient hängt dabei vom Betriebszustand ab. Bei sehr kleinen Drehzahlen (Anlaufvorgang) liegt ausschließlich Festkörperkontakt vor. Die Folge ist ein hoher Reibwert und damit ein starker Verschleiß. Bei einer Erhöhung der Drehzahl löst sich die Kurbelwelle zeitweise von der Lagerschale. In diesem sogenannten Mischreibungsgebiet nehmen Reib- und Verschleißkoeffizient ab. Überschreitet die Wellendrehzahl einen bestimmten Grenzwert bewegt sich die Welle in Richtung Lagermitte und erreicht den hydrodynamischen Zustand. Es existiert ausschließlich Flüssigkeitsreibung. Der Verschleiß ist in diesem Bereich minimal. Jedoch nimmt der Reibkoeffizient zu, da nun vermehrt Flüssigkeitsschichten übereinander reiben. Dadurch wird im Schmieröl Wärme erzeugt und die Öltemperatur steigt bis auf 130 ℃ [15].

### 3 Stand der Technik – Wirkung von Funktionsstrukturen

### 3.1 Verwendung in Warmumformwerkzeugen

Für Umformwerkzeuge wird aktuell vorrangig durchgehärteter Werkzeugstahl eingesetzt, wobei mittels verschiedener Oberflächenmodifikationsverfahren die Verschleißbeständigkeit erhöht wird. Diese sind:

- thermische Verfahren, bei welchen die Gefügestruktur mittels Wärmebehandlung verändert wird,
- thermochemische Behandlungen, welche die oberflächennahe Werkstoffzusammensetzung lokal verändern und
- Beschichtungen, wobei Materialen wie beispielsweise Hartmetalle und Sonderlegierungen mit einem gewissen verfahrensabhängigen Grad an Diffusion abgeschieden werden. Auftragsschweißen mit Lichtbogen und Laser sowie thermisches Spritzen sind dabei die am häufigsten eingesetzten Beschichtungsverfahren für Schichten dicker 10 µm.

Wie im Kapitel 2.1 beschrieben, weisen Hartstoffbeschichtungen ein Potential zur Verschleißbeständigkeit Steigerung der von Umformwerkzeugen aus Werkzeugstahl auf. Beim Literaturstudium wird deutlich, dass es in Bezug auf die erreichbare Verschleißbeständigkeit und der Betriebssicherheit für kritische Bereiche wie Kanten und Kehlen zwischen beschichteten und unbeschichteten Werkzeugen keine Übereinstimmung auftritt [16, 17]. Im Fall von thermisch gespritzten Schichten wird deren Einsatz für Umformwerkzeuge durch die geringe dadurch auftretende Schichtabplatzung Schichthaftung und limitiert. Auftragsgeschweißte Schichten weisen eine gute Schichthaftung auf, da im Beschichtungsprozess Diffusionsvorgänge zwischen Schicht und Substrat auftreten [18]. Jedoch kommt es zu einer thermischen Entfestigung der Randschicht des Substrats, welche beim thermischen Spritzen nicht auftritt. Des Weiteren werden durch die Auftragsschweißverfahren unerwünschte Zugspannungen in die Schicht eingebracht und die einsetzbaren Beschichtungsmaterialen sind verfahrensspezifisch stark begrenzt. Zur Nutzung der potentiellen Möglichkeiten von Schichten bei Warmumformwerkzeugen ist es zwingend notwendig, die Probleme von aktuellen Beschichtungsprozessen zu überwinden. Die größten Hindernisse dabei stellen die geringe Schichthaftung und die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Schicht und Stahlsubstrat dar, welche zum Versagen bei der zyklischen thermischen und mechanischen Belastung von Umformwerkzeugen im Einsatz führen. Zur Vorbereitung der Oberfläche vor dem Beschichten werden aktuell fast ausschließlich Strahlverfahren eingesetzt, welche die Oberfläche anrauen und reinigen. Die auf der Oberflächenrauheit basierende mechanische Adhäsion ist die mitbestimmende Größe für die Schichthaftung von thermisch gespritzten Schichten [19]. Jedoch ist die Haftung, beruhend auf mechanischer Adhäsion, nicht ausreichend für die Belastungen des Verbundes beim Einsatz für Warmmassivumformwerkzeugen.

#### 3.2 Verwendung im Powertrain

Das Ziel der Mikrostrukturierung von Gleitpaarungen wird aus Bild 2 (Stribeck-Kurve) ersichtlich. Hierbei ist der Reibkoeffizient  $\mu$  über dem relativen Geschwindigkeitsverlauf v der Reibkörper aufgetragen. Die sich daraus ergebende IST-Kurve lässt sich in drei Bereiche einteilen: Grenzreibung, Mischreibung und Flüssigkeitsreibung (hydrodynamischer Zustand). In der Hochlaufphase befindet sich die Reibpaarung im Grenzreibungsgebiet. Dort liegt ausschließlich Festkörperreibung vor und es existiert maximaler Verschleiß. Der anzustrebende Bereich ist die Flüssigkeitsreibung, da dort der geringste Verschleiß auftritt.

Eine Oberflächenstrukturierung soll somit erstens über den gesamten Bereich den Reibkoeffizienten absenken und zweitens die Stribeck-Kurve nach links in Richtung kleinerer Geschwindigkeiten verschieben, so dass Grenz- und Mischreibungsgebiet schneller überbrückt werden und der hydrodynamische Zustand erreicht werden kann (Bild 2: Mikrodruckkammer).



Bild 2: links: Stribeck-Kurve, rechts: Funktionsweise einer Mikrodruckkammer [20]

Voraussetzung für eine schnelle Trennung der Reibpartner und eine damit einhergehende Reduzierung von Reibung und Verschleiß ist ein durch die Mikrostruktur zusätzlich erzeugter Druckaufbau. In Wakuda [4] wird durch eine näpfchenförmige Geometrie eine Absenkung der Reibkräfte um 20 % beobachtet. In Hoppermann [21] konnte gezeigt werden, dass durch eine Mikrostrukturierung das Mischreibungsgebiet eingeschnürt wird, so dass bereits bei niedriger Drehzahl die Probenpaarung im Bereich der Flüssigkeitsreibung arbeiten konnte. Unterschiedliche Ergebnisse zwischen Mikrostrukturen 0. Ordnung (Punktabtrag) und ein- bzw. zweidimensionalen (Linien- bzw. Flächenabtrag) konnten nicht festgestellt werden. In Bild 3 ist eine mikrostrukturierte Zylinderlauffläche abgebildet, in der näpfchenförmige Strukturen eingearbeitet wurden. Durch diese Maßnahme konnte der Ölverbrauch um bis zu 85 % gesenkt und eine Kraftstoffeinsparung bis zu 6 % erzielt werden [27]. Weitere positive Wirkungen von Mikrostrukturen auf Reibung und Verschleiß lassen sich in [5, 7, 22-26] finden. Ebenfalls werden Tendenzen hinsichtlich Geometriegröße, Tiefe und Abstände aufgezeigt. Jedoch gibt es in diesen Punkten keine Übereinstimmung und zum Teil gegenläufige Erkenntnisse.



| Vorteile durch Mikrostrukturierung |             |  |
|------------------------------------|-------------|--|
| Reibungsreduzierung:               | bis zu 50 % |  |
| Verschleißreduzierung:             | bis zu 60 % |  |
| Ölverbrauchseinsparung:            | bis zu 85 % |  |
| Kraftstoffeinsparungen:            | bis zu 6 %  |  |
|                                    |             |  |

Bild 3: Zylinder mit Laser-Honen hergestellten Mikrostrukturen [27]

## 4 Demonstrator Umformwerkzeug

#### 4.1 Zielstellung

Das Hauptziel der Untersuchungen ist die Steigerung der Verschleißbeständigkeit von Umformwerkzeugen und dabei eine bedeutende Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz bei der Anwendung in der Warmmassivumformung sowie in der Werkzeugherstellung.

Zur Überwindung der Einschränkungen von aktuellen Beschichtungssystemen für Umformwerkzeuge fokussieren die Betrachtungen folgende Punkte:

- Erstellung energie- und ressourceneffizienter Prozessketten zur Herstellung von Umformwerkzeugen

#### 4.2 Lösungsweg

Durch die Optimierung von Oberflächen des zu beschichteten Substrates kann die Schichthaftung von thermisch gespritzten Schichten gesteigert werden.

Als potentielle Vorteile einer Oberflächenstrukturierung sind zu nennen:

- Erzeugung von Haftung basierend auf Diffusion zwischen Schicht und Substrat
- Minimierung der Schichtablösung auf Grund der Verhinderung einer Rissausbreitung im Schichtübergangsbereich
- Vorhersage der Volumengradienten im Schichtübergangsbereich

Untersuchungen zum thermischen Spritzen haben gezeigt, dass die Oberflächengeometrie der entscheidende Parameter für die Schichthaftung ist [19, 28]. Das Anrauen der Substrate vor dem Beschichtungsprozess ist in der Praxis üblich, da die Oberflächenhaftung auf glatten Oberflächen sehr gering ist [29]. Die Verbesserung der Schichthaftung durch erhöhte Rauheit beruht auf den Effekt der mechanischen Adhäsion und ergänzend auf thermischen Mechanismen (Diffusion). Im Fall des High-Velocity Oxy-Fuel Spritzens (HVOF) von Hartmetallschichten bildet die mechanische Adhäsion den Haupthaftungsmechanismus. Auf Grund der relativ geringen Abscheidtemperaturen beim HVOF-Prozess im Vergleich zum Auftragsschweißen entstehen nur sehr geringe Haftungskräfte basierend auf Diffusion. Jedoch wird auch berichtet, dass es zu Aufschmelzungen von bis zu 10 µm Tiefe bei gestrahlten Oberflächen kommen kann [19]. Ein Nachteil des thermischen Spritzens sind die Hohlräume und Poren, welche durch das seitliche Verspritzen der auftreffenden, teilweise oder gänzlich geschmolzen Partikel entsteht [19, 28]. Diese Poren reduzieren den SchichtSubstrat-Kontakt und damit die Schichthaftung. Oberflächenstrukturen mit einer durchschnittlich Größe wie die Spritzpartikel (typischerweise im Bereich von 20 bis 60 µm) reduzieren das beschriebene Breitspritzen von schlecht haftenden Material.

Sobolev [19] zeigte, dass bei einem günstigen Verhältnis zwischen Oberflächenstruktur und Partikel die Zeitdauer für die thermischen Impulse beim Auftreffen des Partikels verlängert wird und somit die Anbindung basierend auf Diffusion verbessert wird (Bild 4).

In der Literatur aufgeführte Untersuchungen beschränken sich immer auf Strahlprozesse zur Substratvorbereitung, welche im Vergleich zu anderen Materialabtragsverfahren nur gewisse Formen von Oberflächenstrukturen wiedergeben können. Ein weiteres Problem des Strahlprozesses ist, dass Strahlpartikel an der Substratfläche anhaften. Diese Verunreinigungen erleichtern eine Risseinleitung und Schichtablösung [30].



**Bild 4:** Schematische Darstellung des Einflusses der Substratrauheit auf die mechanischen und thermischen Haftungsmechanismen beim thermischen Spritzen [17]

Außer Hochdruckwasserstrahlen [31] sind keine alternativen Verfahren zum Korundstrahlen bezüglich der Erhöhung von Schichthaftung und Stabilität untersucht wurden. Des Weiteren wurden mögliche Effekte von exakt reproduzierbaren Strukturen wie beispielsweise durch Fräsen und Laserabtrag noch nicht untersucht.

Mit diesen Prozessen kann ein weiteres Feld von Oberflächenstrukturen erzeugt und die Struktur auf den Beschichtungsprozess angepasst werden, um die Schichthaftung und damit die Stabilität des Umformwerkzeuges zu erhöhen. Das Größenverhältnis und der Abstand könnte gezielt so gewählt werden, dass die thermischen Haftungsmechanismen im Beschichtungsprozess gesteuert werden können. Die Reduzierung von thermischen Spannungen bei schnellen Werkzeugtemperaturwechseln der Warmumformung durch die gezielte Strukturierung von Oberflächen stellt eine weitere Möglichkeit dar (Bild 5).



**Bild 5:** Konzeptentwurf zu gradierten Werkstoffeigenschaften im Schichtübergangsbereich bei strukturierten Substratoberflächen

Der Einsatz von Fräsen zur Oberflächenstrukturierung eliminiert auch den zusätzlichen Prozessschritt des Strahlens, da der Prozess mit der vorangegangen geometriegebenden Zerspanung auf einer Maschine durchgeführt werden kann. Dies spart zusätzliches Equipment und Wechselzeiten ein. Im Bild 6 wird diese vorgeschlagene Prozesskette mit der konventionellen Prozesskette verglichen.



Bild 6: Konventionelle und neue Prozesskette für die Herstellung von Warmumformwerkzeugen

## 5 Demonstrator Powertrain-Komponente

Aus dem Funktionsdemonstrator Kurbelwelle im Teilprojekt eniPROD-Powertrain wird zur Beurteilung der Mikrostrukturwirkung auf Reibung und Verschleiß das Teilsystem Hauptradialgleitlager-Kurbelwelle betrachtet. Dieses zeichnet sich aufgrund der Gas- und Massenkräfte durch eine zyklische mechanische Belastung und wechselnde thermische Bedingungen aus. Abhängig von der Drehzahl und der Last lassen sich drei Betriebszustände unterscheiden, in denen aufgrund unterschiedlicher Kontaktbedingungen unterschiedliche Reibwerte vorliegen (Bild 7).



Bild 7: Darstellung der unterschiedlichen Betriebszuständen im System Gleitlager-Kurbelwelle

a) Im Stillstand befindet sich die Welle mit dem Wellendurchmesser d an der tiefsten Stelle in der Lagerbuchse und hat reinen Festkörperkontakt. Um eine Bewegung zu erzeugen, muss die durch den Festkörperkontakt verursachte Haftreibung überwunden werden. Je nach Oberflächenrauheit kann der Haftreibungskoeffizient Werte größer als 0,3 annehmen.

b) Im Anlaufvorgang wandert die Welle entgegen dem Drehsinn an der Lagerbuchse (Lagerdurchmesser D) hoch. Die Last wird ausschließlich durch Festkörperkontakt übertragen. Die Verschleißrate ist sehr hoch. Durch Steigerung der Drehzahl n (Gleitgeschwindigkeit) wird das Öl in den enger werdenden Schmierspalt gedrückt, wodurch sich ein Druck aufbaut, der für eine kurzzeitige Trennung der Reibpartner sorgt. In diesem Betriebszustand liegt Mischreibung mit Reibkoeffizienten zwischen 0,01 und 0,15 vor.

c) Erreicht die Drehzahl einen gewissen Schwellenwert, den man Grenzdrehzahl n<sub>grenz</sub> nennt, wird der mittlere Tragdruck vollständig durch den Flüssigkeitsdruck getragen. Der Wellenmittelpunkt nähert sich immer mehr der Lagermitte. Der Werkstoffverschleiß ist hier minimal. Der Reibkoeffizient liegt zwischen 0,002 und 0,01.

### 5.1 Zielstellung

Um den unterschiedlichen Anforderungen in den verschiedenen Betriebszuständen des Systems Gleitlager-Kurbelwelle gerecht zu werden, müssen geeignete Maßnahmen, wie das Auftragen reibungsarmer und verschleißfester Beschichtungen oder das Einbringen von Mikrostrukturen, getroffen werden. In diesem Kapitel soll das Potential von mikrostrukturierten Oberflächen untersucht werden.

### 5.2 Lösungsweg

Der Weg zum durch Mikrostrukturen druckunterstützten Radialgleitlager unterteilt sich in die fünf Hauptpunkte:

- Ermittlung einer geeigneten Mikrostruktur (Teil dieser Arbeit)
- Herstellung der Mikrostruktur (Teil dieser Arbeit)
- Tribometrische Charakterisierung
- Umsetzung der Mikrostruktur am Realbauteil Gleitlager
- Überprüfung im Gleitlagerprüfstand

#### 5.2.1 Form- und Geometriebestimmung der Mikrostruktur

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde zunächst nach geeigneten Mikrostrukturen, die großes Potential hinsichtlich Reib- und Verschleißminimierung besitzen, gesucht. Hierbei hat sich die Kalottenstruktur als sehr vorteilhaft herauskristallisiert [3-8, 20-25]. Diese Grundform der Mikrostruktur wurde mit dem Simulationsprogramm COMSOL Multiphysics untersucht, um herauszufinden, welche Kalottengeometrien den größten Effekt auf den Druckaufbau haben. Das Simulationsmodell (Bild 8) beinhaltet einen ruhenden mikrostrukturierten Körper (Reibpartner 1 mit einer Kalottenstruktur) und einen Körper (Reibpartner 2), welcher sich mit einer Relativgeschwindigkeit von v = 1 m/s parallel zur betrachteten Oberfläche bewegt. Beide Körper sind durch einen Schmierfilm mit einer Höhe von 20  $\mu$ m (Öl mit einer Viskosität von 0,79 Pas) getrennt. Für unterschiedliche Kalottentiefen, -abstände und -durchmesser (Tabelle 1) wird der Druckverlauf im Strömungsspalt ausgegeben (Bild 9).

Tabelle 1: Simulierte Geometriepaarungen

| Durchmesser 50500 μm | Tiefe 2500 μm      | Abstand 10500 µm   |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| Abstand 100 µm       | Abstand 100 µm     | Tiefe 50 μm        |
| Tiefe 50 μm          | Durchmesser 200 μm | Durchmesser 200 μm |



Bild 8: Darstellung des Geschwindigkeitsfelds im Schmierspalt aufeinander gleitende Körper

Im Diagramm (Bild 9) zeigt sich, dass der Kalottendurchmesser den größten Einfluss auf den Druckaufbau hat. Dieser steigt zwischen 50 und 500 µm linear an und erreicht bei 500 µm seinen höchsten Wert von 4 bar. Diese Linearität bleibt bis 1000 µm erhalten (nicht im Diagramm dargestellt). Die Kalottentiefe stellt den zweitgrößten Einfluss dar. In einem Tiefenbereich zwischen 0 und 20 µm entwickelt sich ein starker Druckanstieg, der bei 20 µm seinen maximalen Wert von ca. 2,4 bar erreicht. Anschließend sinkt dieser Wert über zunehmende Kalottentiefen exponentiell ab. Der Kalottenabstand hat einen kaum veränderlichen Einfluss auf die Druckentstehung. Es ergibt sich über sämtliche Abstände ein konstanter Druckverlauf von ca. 1,8 bar. Jedoch ist es vorteilhaft, den Abstand so gering wie möglich zu wählen, da in den kalottenfreien Gebieten ein Druckabfall zu registrieren ist, der um so höher ausfällt, je weiter die Kalotten voneinander entfernt sind. Um den Druck zu optimieren, werden die Geometrieparameter (Kalottentiefe = 20 µm, Kalottendurchmesser = 1000  $\mu$ m, Kalottenabstand = 100  $\mu$ m) mit den maximalen Druckwerten kombiniert und simuliert (Ölfilmdicke = 5 µm). Es zeigt sich, dass durch diese Maßnahme ein Druckaufbau von knapp 90 bar erzielt werden kann. Im System Gleitlager-Kurbelwelle bildet sich durch den verengenden Keilspalt ein Druck von ca. 1000 bar aus. Somit erhält man durch den Einsatz dieser Kalottenstruktur eine Druckunterstützung von etwa 9 %. Die Kurbelwelle kann sich dadurch schneller in den hydrodynamischen Zustand bewegen.



Bild 9: Darstellung des Kalottendrucks in Abhängigkeit der jeweiligen Geometriegrößen

#### 5.2.2 Verfahrensbeschreibung und Mikrostrukturherstellung

Die Simulation zeigt, dass je kleiner das Aspektverhältnis einer Kalotte mit einer Tiefe von 20 µm ist, desto größer ist der Druckaufbau. Der Kalottenabstand in Bewegungsrichtung ist so gering wie möglich zu halten. Inwieweit die Simulationsergebnisse sich auf den Reibkoeffizient auswirken, soll experimentell untersucht werden. Um den hydrodynamischen Effekt darzustellen zu können, wird eine ausreichend große Kontaktfläche benötigt. Daher soll in der tribometrischen Versuchsdurchführung die Ring-Scheibe-Anordnung eingesetzt werden, wobei die Ringe mikrostrukturiert werden. Die in den Versuchen verwendeten Kalottengeometrien sowie die Flächenbelegung (durch Kalotten bedeckte Fläche in Bezug zur gesamten Fläche) werden in Tabelle 2 aufgeführt. Hergestellt und getestet werden alle Kombinationen. Die relevanten Kennwerte zu der Tribometerpaarung sind in Tabelle 3 dargestellt.

| Durchmesser d in μm    | 200 / 500 |
|------------------------|-----------|
| Tiefe h in μm          | 10/20/50  |
| Flächenbelegung F in % | 10/20/30  |

| Tabelle 2: | Mikrostruktur | paramete |
|------------|---------------|----------|
|------------|---------------|----------|

|                        | Ring  | Scheibe |
|------------------------|-------|---------|
| Werkstoff              | CuSn8 | 42CrMo4 |
| Außendurchmesser in mm | 100   | 100     |
| Innendurchmesser in mm | 70    |         |
| Dicke in mm            | 10    | 8       |
| Härte in HV            | 160   | 650     |
| Rauheit Rz in μm       | 1     | 1       |
| Ebenheit in µm         | 5     | 5       |
| Parallelität in µm     | 10    | 10      |

Tabelle 3: Daten und Kennwerte der verwendeten Probekörper

Als Bearbeitungsverfahren für die Kalottenherstellung kommen Jet-ECM (elektrochemisches Abtragen mit geschlossenem elektrolytischen Freistrahl), PECM (präzise elektrochemische Bearbeitung) und Laserabtragen zum Einsatz. Die wesentlichen Gemeinsamkeiten und Unterschiede der verwendeten Verfahren sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

| PECM / Jet-ECM                                    | Laser                                      |  |
|---|--|--|
| Elektrochemisches Verfahren                       | Thermisches Verfahren                      |  |
| Anodische Auflösung des Werkstücks                | Wärmeeintrag im Werkstück                  |  |
| Oberflächengüte Ra ≥ 0,05 μm                      | Ra ≥ 0,1 μm                                |  |
| Geringe thermische Belastung                      | Hohe lokale thermische Belastung           |  |
| Bearbeitung nur elektrisch leitfähiger Werkstoffe | Bearbeitung vieler Werkstoffe möglich      |  |
| Keine Nachbearbeitung nötig                       | Nachbearbeitung wegen Schmelzaufwurf nötig |  |
| Kein Werkzeugverschleiß                           |  |  |
| Kräftefreie Bearbeitung                           |  |  |
| Bearbeitung unabhängig von Härte oder Festigkeit  |  |  |
| Strukturabmessungen bis 10 μm                     |  |  |

Ein Vergleich von Jet-ECM hergestellten zu lasergefertigten Kalotten (Durchmesser =  $500 \ \mu m$ , Tiefe =  $30 \ \mu m$ ) zeigt Bild 10. Die laserstrukturierte Oberfläche wurde nach der Bearbeitung überschliffen, um die Schmelzaufwürfe zu entfernen. Die Kalottenoberflächen weisen im Gegensatz zu den elektrochemisch hergestellten Kalotten eine stärkere Oxidation und Rauheit auf. Ein mit Jet-ECM strukturierter Ring ist in Bild 11 zu finden.



Bild 10: Kalottenstrukturen mit Jet-ECM (links) und Laserablation hergestellt



Bild 11: Mit Jet-ECM strukturierter Ring

Die experimentelle Verifizierung der Kalottenfunktion soll im Tribometer TRM5000 der Firma Wazau erfolgen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Energieeinsparung ist eine wichtige und aktuelle Thematik. Reibung und Verschleiß sind zwei entscheidende Faktoren, die den Energiebedarf beeinflussen. Im Reibprozess geht Energie in Form von Wärme verloren. Der Verschleiß als Folge der Reibung verursacht hohe Energieverluste durch ein Verkürzen der Lebenszeiten der beanspruchten Bauteile, was ein vorzeitiges Ersetzen nach sich zieht. Damit entstehen Energieverbräuche in sämtlichen zur Herstellung der Bauteile benötigten Prozessketten, einschließlich der Erzeugung des Rohmaterials. Somit ist es von größter Wichtigkeit, Reibung und Verschleiß zu reduzieren. Die Veränderung der Oberflächenstruktur bietet in dieser Hinsicht großes Potential. Sowohl in der Bauteilherstellung lässt sich Energie einsparen, als auch im Betrieb durch die längere Nutzungsphase.

In der Bauteilherstellung kann eine Energieersparnis durch die Verbesserung der Schichthaftung durch eine gezielte Oberflächenstrukturierung von Warmumformwerkzeugen erreicht werden.

Im Betrieb ermöglicht das schnelle Erreichen des hydrodynamischen Zustands die Energieeinsparung. Im Flüssigkeitsreibungsgebiet sind die Reibpartner vollständig getrennt. Es reiben lediglich Flüssigkeitsschichten übereinander und ein Verschleiß ist kaum wahrnehmbar. Um das Übergehen in den hydrodynamischen Zustand zu beschleunigen, wird ein zusätzlicher Druck benötigt. Dieser entsteht durch das Einbringen von Mikrostrukturen in die Oberfläche eines Reibpartners. Die Kalottenstruktur hat sich dabei als sehr vorteilhaft herauskristallisiert. Die FEM-Simulation mit COMSOL Multiphysics zeigt, dass durch eine geeignete Geometrieauslegung ein Zusatzdruck von ca. 90 bar pro Kalotte erreicht werden kann. Durch eine Hintereinanderreihung mehrerer Kalotten lässt sich der Druckaufbau weiter steigern. Die Wirkweise der Kalottenoberfläche soll im Tribometer TRM5000 der Firma Wazau mit der Ring-Scheibe-Anordnung messtechnisch erfasst werden. Dazu werden die Ringe mit den Verfahren PECM, Jet-ECM und Laserablation mikrostrukturiert. Nach den noch ausstehenden tribometrischen Messungen wird erwartet, sowohl das tribologisch günstigste Fertigungsverfahren, als auch die am besten geeignete Kalottenstruktur zu kennen. Dieses Wissen soll in Folge an einem Gleitlager umgesetzt und überprüft werden.

## 7 Danksagung

Die Autoren danken dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) für die finanzielle Unterstützung des Projektes, die aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaates Sachsen erfolgte.

## Literaturangaben

- [1] Lange, K: Energieeinsparung und Fertigungstechnik. Zeitschrift für Industrielle Fertigung, Springer Verlag, 1978, S. 535–537
- [2] Berry, S.; Fels, M.: The energy cost of automobiles. Science and Public Affairs, December 1973, S. 11–60
- [3] Abeln, T. et al.: Laseroberflächenstrukturierung Verbesserung der tribologischen Eigenschaften. In: Hügel, H. et al: Stuttgarter Lasertage 2003, S. 107–110
- [4] Wakuda, M. et al.: Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. Wear 254 (2003) S. 356–363
- [5] Wan, Y.; Xiong, D.: The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal. Journal of materials processing technology 197 (2008) S. 96–100
- [6] Dumitru, G. et al.: Lasermicrostructuring of steel surfaces for tribological applications. Applied Physics A 70, (2000) S. 485–487
- [7] Andersson, P. et al.: Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces. Wear 262 (2007) S. 369–379
- [8] Zum Gahr, K. et al.: Friction control by surface engineering of ceramic sliding pairs in water. Wear 263 (2007) S. 920–929
- [9] Thomas, A: Wear of drop forging dies. ISI Publication 125, Iron and Steel Institute, London, 1970, S. 135–141
- [10] Brucelle, O.C.; Bernhart, G: Methodology for service life increase of hot forging tools. J. Materials Processing Technology, 87 (1999) S. 237–246

- [11] Lui, X.J.; Wang, H.C.; Li, D.W: Study on design techniques of a long life hot forging die with multi-materials. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 20 (6), 2007, S. 448–456
- [12] Doege, E.; Bobke, T.; Peters, K.: Fortschritt der Randzonenschädigung in Schmiedegesenken. Stahl und Eisen 111 (2), 1991, S. 113–118
- [13] ASM Handbook: Metalworking: Bulk Forming, Volume 14 A, ASM Int'l, 2005
- [14] Brockhaus, H.W.; Guderjahn, A.; Schruff, I.: Improving the performance of forging tools – A case study. 6th Int'l Tooling Conference, Karlstadt, Sweden, 2002
- [15] Küntscher, V.; Hoffmann, W.: Kraftfahrzeug-Motoren: Auslegung und Konstruktion. Vogel Buchverlag, 2006, S. 82–124
- [16] Joost, H.-G.: Beschichten von Schmiedegesenken, HFF-Bericht 9. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, Hannoversches Forschungsinstitut für Fertigungsfragen, 1977, S. 99–104
- [17] Persson, A.; Hogmark, S.; Bergström, J.: Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels. Surface & Coatings Technology, 191, 2005, S. 216–227
- [18] Nowotny, N.; Techel, A.; Luft, W.; Reitzenstein, W.: Microstructure and wear properties of laser clad carbide coatings. ICALEO '93, 12<sup>th</sup> International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 1993, S. 985–991
- [19] Sobolev, V.V. et al.: Development of Substrate-Coating Adhesion in Thermal Spraying. ASM International Materials Review, 42 (3), 1997, S. 117–136
- [20] Flores, G. et al.: Funktionsgerechte Endbearbeitung aus Gusseisen. MTZ 03/2007 Jahrgang 68 S. 181
- [21] Hoppermann, A.: Laser structured contact surfaces Effects on the tribological behaviour of hydraulic material combinations. Ölhydraulik und Pneumatik (O + P) 48 (2004) Nr. 10
- [22] Lu, X.; Khonsari, M.: An Experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings. Tribology Letters 27 (2007) S. 169–176
- [23] Rapoport, L. et al.: Friction and wear of MoS2 films on laser textured steel surfaces. Surface & Coatings Technology 202 (2008) S. 3332–3340
- [24] Schreck, S.; Zum Gahr, K.: Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties. Applied Surface Science 247 (2005) S. 616–622

- [25] Wang, X. et al.: Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water. Tribology International 36 (2003) S. 189– 197
- [26] Haefke, H. et al.: Microtexturing of functional surfaces for improving their tribological performance. Proceedings of the International Tribology Conference Nagasaki (2000) S. 217–221
- [27] Gehring Technologies GmbH: Laser-Honen: Das Verfahren, S. 2
- [28] Brown, S.D.: The medical-physiological potential of plasma-sprayed ceramic coatings. Thin solid films 119 (1984) S. 127–139
- [29] Hofinger, I. et al.: Effect of substrate surface roughness on the adherence of NiCrAlY thermal spray coatings. J. Thermal Spray Technol.11 (3), 2002, S. 387–392
- [30] Pawlowski, L.: The science and engineering of thermal spray coatings. 2<sup>nd</sup> Ed., Wiley, 2008, S. 60
- [31] Knapp, J.K.; Taylor, T.A.: Water roughened surface analysis and bond strength. Surf. Coat. Technol., 86-87 (1996) S. 22–27