

Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 1

Konstruktions-
technik/
Maschinen-
elemente

Nr. 448

Dipl.-Ing. Martin Weschta,
Erlangen

Untersuchungen zur Wirkungsweise von Mikrotexturen in elastohydrodynamischen Gleit/Wälzkontakten

Lehrstuhl für

Konstruktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRKUNGSWEISE VON MIKROTEXTUREN IN ELASTO- HYDRODYNAMISCHEN GLEIT/WÄLZ- KONTAKTEN

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Martin Franz Weschta
aus Neustadt an der Aisch

Als Dissertation genehmigt

von der Technischen Fakultät

der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Tag der mündlichen Prüfung: 20. November 2017

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Hick

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Martin Weschta,
Erlangen

Nr. 448

Untersuchungen zur
Wirkungsweise von
Mikrotexturen in
elastohydrodynamischen
Gleit/Wälzkontakten

Lehrstuhl für

Konstruktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack



Weschta, Martin

Untersuchungen zur Wirkungsweise von Mikrotexturen in elastohydrodynamischen Gleit/Wälzkontakten

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 448 . Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

218 Seiten, 93 Bilder, 11 Tabellen.

ISBN 978-3-18344801-2 ISSN 0178-949X,

€ 76,00/VDI-Mitgliederpreis € 68,80.

Für die Dokumentation: Wälzkontakt – Computersimulation – Elastohydrodynamik – Reibung – Schmierung – Mikrotextur – Tribologie

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler aus dem Bereich der Tribologie, die sich mit der Reibungsminderung in elastohydrodynamischen (EHD) Gleit/Wälz-Kontakten befassen. Eine mögliche Methode hierzu stellt die selektive Oberflächenbearbeitung dar, die Oberflächenmerkmale im mikroskopischen Maßstab erzeugt. In dieser Arbeit erfolgt eine Einschränkung auf diskrete Texturelemente. Bei diesen konnte ein positiver Effekt auf die Reibung bisher nur für niedrigbelastete Gleitkontakte wie den Zylinder/Laufbahn-Kontakt nachgewiesen werden, für EHD Kontakte fehlten noch klare Aussagen. Die Arbeit bietet einen Literaturüberblick zu bekannten Mechanismen diskreter Mikrotexturen in verschiedenen Kontakt Situationen, baut ein vertieftes Verständnis hinsichtlich der EHD-Wälz/Gleit-Kontakte auf und zeigt in einem Machbarkeitsnachweis ihr Reibungsreduktionspotential in diesen Kontakt Situationen auf. Hierzu werden numerische Studien und deren Umsetzung sowie Experimente an einem Komponentenprüfstand vorgestellt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Vorwort

“The best way to predict the future is to invent it.”

Alan Kay

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg FAU. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die auf vielfältigste Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater Prof. S. Wartzack für die Betreuung dieser Arbeit, die herausfordernde Themenstellung und die großen Freiheiten bei der Bearbeitung dieser danken. Er hatte immer das Vertrauen in das Gelingen der Arbeit.

Meinem Zweitgutachter Prof. H. Hick, Leiter des Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik der TU Graz, und meinem fachfremden Prüfer Prof. A. Wierschem, Professur für Hochdruckthermofluiddynamik und Rheologie am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der FAU, danke ich für ihr Interesse an meiner Arbeit. Ebenso danke ich Prof. H. Meerkamm, ehemaliger Ordinarius des KTmfk, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG und dem Schwerpunktprogramm SPP 1551 „Ressourceneffiziente Konstruktionselemente“ das die finanziellen Mittel für das Teilprojekt „Reibungsreduzierung in EHD-Kontakten durch mikrostrukturierte Bauteiloberflächen – Auslegung, Gestaltung und umformtechnische Herstellung“ zur Verfügung gestellt hat und in dessen Rahmen viele Grundlagen für diese Arbeit entstanden sind. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank auch dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie LFT der FAU, der für den fertigungstechnischen Teil, die Herstellung der Mikrotexturen, verantwortlich zeichnete, sowie dem Bayerischen Laserzentrum BLZ für die Lasermikrotexturierung der Tassenstöfel-Einstellscheiben.

Auch bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen möchte ich mich bedanken. Im Besonderen gilt dieser Dank meinem Gruppenleiter Dr.-Ing. S. Tremmel für die vielen Diskussionen und die „rot gefärbten“ Manuskripte, den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Wälzlagertechnik M. Marian, A. Meinel, M. Müller und A. Pabst sowie meinen Bürokolleginnen und -kollegen D. Hochrein, K. Seiler, T. Stahl und R. Zhao für die sehr angenehme und in Erinnerung bleibende Zeit am und auch außerhalb des Lehrstuhls. Auch die technisch-administrativen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls seien an dieser Stelle hervorgehoben, die durch Ihre Unterstützung in Verwaltung, Prüfstandsinstandhaltung und IT die Arbeit wesentlich erleichtert haben.

Ebenso danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der zentralen Mechanik- und Elektronikwerkstatt der Technischen Fakultät die durch die hervorragende Umsetzung von Entwicklungs- und Fertigungsaufträgen für Messtechnik und Prüfstandsbauteile die experimentellen Arbeiten unterstützt haben.

Zudem möchte ich den vielen Studierenden danken, die in meiner Lehrstuhlzeit durch ihre Arbeit als Hilfswissenschaftler oder durch die Bearbeitung ihrer Abschlussarbeiten unter meiner Betreuung ihren Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten. Namentlich seien F. Halmos, S. Luckert, M. Marian, V. Sessner und T. Spannbauer genannt.

Meinen Eltern danke ich, für Ihre Unterstützung auf meinem Weg vom Studium bis nun zum Abschluss dieser Arbeit, ohne die dies alles nicht möglich gewesen wäre.

Steffi, dir danke ich für deine Unterstützung weit über die Promotion hinaus. Gerade zu Ende hast du mich immer wieder auf die Motivationsspur zurück gebracht.

Zu guter Letzt möchte ich meinem Opa Leo danken, der all dies leider nicht mehr erleben durfte. Er hat mich bereits in Kindergartenzeiten für Technik und „Basteln“ begeistert. Ich werde dies immer in Erinnerung behalten.

Im November 2017

Martin Weschta

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 1.1 | Motivation und Problembeschreibung | 1 |
| 1.2 | Aufgabenstellung | 2 |
| 2 | Grundlagen der Mikrotexturierung von Tribokontakten | 5 |
| 2.1 | Tribologische Kontakte | 5 |
| 2.1.1 | Das tribologische System | 6 |
| 2.1.2 | Größenskalen tribologischer Systeme | 8 |
| 2.1.3 | Beanspruchung konzentrierter tribologischer Kontakte..... | 9 |
| 2.1.4 | Schmierung und Schmierungszustand | 14 |
| 2.2 | Mikrotexturierung tribologischer Bauteiloberflächen | 16 |
| 2.2.1 | Herstellungsverfahren diskreter Mikrotexturen..... | 18 |
| 2.2.2 | Hydrodynamische Gleitkontakte | 20 |
| 2.2.3 | Elastohydrodynamische Kontakte..... | 31 |
| 3 | Grundlagen der Simulation geschmierter Tribokontakte | 40 |
| 3.1 | Grundgleichungen der Strömungsmechanik | 40 |
| 3.2 | Reynoldssche Differentialgleichung | 43 |
| 3.3 | Verallgemeinerte reynoldssche Differentialgleichung..... | 45 |
| 3.4 | Gültigkeit der reynoldsschen Differentialgleichung in texturierten Kontakten..... | 47 |
| 3.5 | Berücksichtigung der Oberflächengeometrie und -mikrotextur in der Hydrodynamik..... | 49 |
| 3.5.1 | Makrogeometrie..... | 49 |
| 3.5.2 | Mikrogeometrie | 50 |
| 3.6 | Kavitation | 54 |
| 3.7 | Berechnung der Temperaturverteilung | 58 |
| 3.8 | Schmierstoffeigenschaften..... | 60 |
| 3.8.1 | Viskosität | 60 |
| 3.8.2 | Dichte..... | 67 |
| 3.8.3 | Thermische Eigenschaften..... | 70 |
| 3.9 | Reibungsmechanismen und Reibungsberechnung | 72 |
| 3.9.1 | Kontaktmechanischer Reibungsanteil | 72 |
| 3.9.2 | Hydrodynamischer Reibungsanteil..... | 74 |
| 3.10 | Elastische Deformation..... | 76 |

| | |
|---|------------|
| 3.11 Dimensionslose Kennzahlen und Gleichungen | 81 |
| 3.11.1 Dimensionslose Kennzahlen | 81 |
| 3.11.2 Dimensionslose Gleichungen | 82 |
| 3.12 Lösung des gekoppelten EHD-Problems | 85 |
| 3.12.1 Kopplung von elastischer Deformation und Hydrodynamik | 86 |
| 3.12.2 Stabilisierung der reynoldsschen Differentialgleichung | 89 |
| 3.12.3 Kopplung von Hydrodynamik, Deformation, nicht-newtonsschem Fluid und Wärmeübertragung | 91 |
| 4 Untersuchungen am Nocken/Stößel-Kontakt..... | 94 |
| 4.1 Tribologisches System Nocken/Stößel..... | 97 |
| 4.1.1 Geometrie des Tribosystems | 98 |
| 4.1.2 Kinematik, Belastung und Beanspruchung des Tribosystems | 100 |
| 4.2 Prüfaufbau der experimentellen Untersuchungen | 105 |
| 4.3 Schmierungszustand im Tribosystem Nocken/Stößel | 106 |
| 4.4 Reibungsmessung an mikrotexturierten Flachstößeln..... | 112 |
| 4.4.1 Probekörper | 112 |
| 4.4.2 Versuchsreihen und Versuchsdurchführung..... | 112 |
| 4.4.3 Versuchsergebnisse..... | 116 |
| 5 Simulation mikrotexturierter EHD-Kontakte | 120 |
| 5.1 Validierung..... | 120 |
| 5.1.1 Unterschiede durch Kavitationsmodelle | 120 |
| 5.1.2 Linienkontakt..... | 123 |
| 5.1.3 Punktkontakt..... | 129 |
| 5.2 Mathematische Beschreibung diskreter Mikrotexturen..... | 131 |
| 5.3 Auswirkung des Schlupfes auf den Schmierfilm unter Berücksichtigung von Mikrotexturen, nicht-newtonsschem Fluidverhalten und thermischen Effekten | 137 |
| 5.4 Statistische Versuchsplanung und Modellbildung..... | 147 |
| 5.5 Gaußförmige Mikrotexturen im infiniten EHD-Linienkontakt..... | 151 |
| 5.6 Trapezförmige Mikrotexturen im infiniten EHD-Linienkontakt | 158 |
| 5.7 Gaußförmige Mikrotexturen im finiten EHD-Linienkontakt..... | 163 |
| 5.8 Diskussion der Ergebnisse | 171 |
| 6 Zusammenfassung und Ausblick..... | 174 |
| Anhang - Berechnungsergebnisse der Simulationsstudien | 177 |
| Literaturverzeichnis | 182 |

Nomenklatur

Abkürzungen

| | |
|------|---|
| CAD | Computer-Aided Design |
| CCD | Central Composite Design |
| CFD | Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungsmechanik) |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DLC | Diamond-Like Carbon (amorpher Kohlenstoff) |
| DOHC | Double Overhead Camshaft (doppelt obenliegende Nockenwelle) |
| EHD | Elastohydrodynamik |
| EN | Europäische Norm |
| FD | Finite Differenzen |
| FE | Finite Elemente |
| FEM | Finite Elemente Methode |
| FSI | Fluid-Struktur-Interaktion |
| FVA | Forschungsvereinigung Antriebstechnik |
| GLS | GALERKIN-Least-Squares |
| HD | Hydrodynamik |
| HVA | hydraulischer Ventilspiel-Ausgleich |
| ID | Isotropic Diffusion |
| ISO | International Organization for Standardization |
| LHS | Latin Hypercube Sampling |
| MOP | Metamodel of Optimal Prognosis |
| OHV | Overhead Valve (unten liegende Nockenwelle) |
| RMS | Root Mean Square (quadratisches Mittel, Effektivwert) |
| SP | Simulationspunkt (in der Simulationsplanung) |
| SRR | Slide-to-Roll-Ratio (Gleit/Roll-Verhältnis) |
| SRV | Schwing-Reib-Verschleiß |
| SSK | Solid-Solid-Kontakt |
| SUPG | Streamline Upwind PETROV GALERKIN |
| TEHD | thermische Elastohydrodynamik |
| TEM | Transversale Elektromagnetische |
| VD | variable Dichte |

| | |
|-----|-----------------------------|
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| VI | Viskositäts-Index |

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

| | |
|-------------------------------------|---|
| <i>a</i> | große (Ellipsen-)Halbachse quer zur Rollrichtung, Kontaktlänge |
| <i>a_c, n_c</i> | Anpassungsparameter für das CARREAU-Viskositätsmodell |
| <i>A</i> | Fläche |
| <i>A, …, E</i> | Anpassungsparameter der Viskositäts- bzw. Dichtemodelle |
| <i>b</i> | kleine (Ellipsen-)Halbachse, Kontaktbreite |
| <i>c</i> | Wärmekapazität |
| <i>C</i> | Koeffizient der polynomialen Regression |
| <i>C</i> | Elastizitätsmatrix |
| <i>C_r</i> | Faktor zur transienten Anpassung des Krümmungsradius |
| <i>C_u</i> | Faktor zur transienten Anpassung der hydrodynamischen Geschwindigkeit |
| <i>C_w</i> | Faktor zur transienten Anpassung der Belastung |
| <i>C^{zz}</i> | Einflussfunktion des elastischen Halbraums |
| <i>d</i> | Durchmesser |
| <i>d_s</i> | Laserstrahl durchmesser |
| <i>e</i> | Exzentrizität |
| <i>E</i> | Elastizitätsmodul des Werkstoffes |
| <i>E'</i> | reduziertes Elastizitätsmodul |
| <i>E_e</i> | äquivalenter Elastizitätsmodul |
| $\overline{E_e}$ | Elastizitätsmodul des dimensionslosen Berechnungskörpers |
| <i>F</i> | Kraft |
| <i>F</i> | Belastungsmatrix |
| <i>F_n</i> | Normalkraft |
| <i>F_R</i> | Reibungskraft |
| <i>g</i> | Erdbeschleunigung |
| <i>G</i> | dimensionslose Materialkennzahl |
| <i>G_c</i> | kritische Schubspannung |
| <i>h</i> | Schmierfilmdicke |
| <i>h_{el}</i> | Elementgröße |
| | $G = \alpha_{\eta} E'$ |

| | | |
|-----------------------|---|---|
| h_{No} | Hub des Nockens | |
| H | dimensionslose Schmierfilmdicke | 1D: $H = hr'/b^2$ 2D: $H = hr'_x/a^2$ |
| I | Impulskraft | |
| I | Intensität | |
| K | Gesamtsteifigkeitsmatrix | |
| K_0 | Kompressionsmodul | |
| K'_0 | initiale druckbedingte Änderungsrate des Kompressionsmoduls | |
| l | Länge | |
| L | dimensionslose Materialkennzahl nach MOES | $L = G(2U)^{0,25}$ |
| m | Masse | |
| m | Massenstrom | |
| max | Maximum-Funktion | |
| min | Minimum-Funktion | |
| mw | Mittelwert-Funktion | |
| M | Massenkraft | |
| M | dimensionslose Lastkennzahl nach MOES | 1D: $\left(\frac{W}{(2U)^{0,5}}\right)$ 2D: $\left(\frac{W}{(2U)^{0,75}}\right)$ |
| n | Drehzahl | |
| N | Stichprobengröße | |
| O | Oberflächenkraft | |
| O_{el} | Ordnung der Ansatzfunktion in der FE-Formulierung | |
| p | Druck | |
| p_{cav} | Kavitationsdruck | |
| p_s | Verfestigungsdruck | |
| P | dimensionsloser Druck | $P = p/p_{\text{max}}$ |
| P | Druckkraft | |
| Pe | PECLET-Zahl | |
| Pf | Penalty-Faktor | |
| q | Linienbelastung | |
| Q | Quellterm | |
| Q_{ϑ} | Wärmequelle | |
| r | Radius | |
| r' | reduzierter Krümmungsradius | |

| | | |
|---------------------|---|--|
| r_G | Radius des Nockengrundkreises | |
| r_{Sp} | Radius der Nockenspitze | |
| r_{SSK} | Verhältnis an Solid-Solid-Festkörperkontakten | |
| R | Rauheit der Oberfläche | |
| R | elektrischer Widerstand | |
| \mathfrak{R} | Volumenelement | |
| \mathcal{R}_P | Residuum der dimensionslosen REYNOLDS-Gleichung | |
| R^2 | Bestimmtheitsmaß der Regression | |
| R_{prog}^2 | Prognosefähigkeit der Regression | |
| Re | REYNOLDS-Zahl | |
| $R_{z,\text{DIN}}$ | gemittelte Rauhtiefe nach DIN | |
| s | mathematische Funktion der Mikrotextur | |
| s_0 | Ventilspiel | |
| s_w | Texturbreite (engl. width) | |
| s_l | Texturlänge | |
| s_a | Texturtiefe, -amplitude | |
| s_d | Texturabstand (engl. distance) | |
| S | dimensionslose mathematische Funktion der Mikrotextur | |
| S_w | dimensionslose Texturbreite | $S_w = s_w/b$ |
| S_l | dimensionslose Texturlänge | $S_l = s_l/b$ |
| S_a | dimensionslose Texturtiefe, -amplitude | $S_a = s_a r' / b^2$ |
| S_d | dimensionsloser Texturabstand (engl. distance) | $S_d = s_d/b$ |
| S_{Roel} | Temperatur-Exponent der ROELANDS-Viskositätsgleichung | |
| t | Zeit | |
| t | standardisierter Effekt | |
| T | dimensionslose Zeit | 1D: $T = u_m t / b$ 2D: $T = u_m t / a$ |
| T | Temperatur in Kelvin | |
| T_g | Glasübergangstemperatur | |
| u | Geschwindigkeit in x-Richtung | |
| u | Verschiebung in x-Richtung | |
| U | dimensionslose Geschwindigkeitskennzahl | $U = \frac{\eta_0 u_m}{E' r_x^2}$ |
| U | elektrische Spannung | |
| \mathbf{U} | Verschiebungsmatrix | |

| | | |
|--------------------|--|---|
| v | Geschwindigkeit in y-Richtung | |
| v | Verschiebung in y-Richtung | |
| V | Volumen | |
| w | Geschwindigkeit in z-Richtung | |
| w | Verschiebung in z-Richtung | |
| w^* | Testfunktion | |
| W | dimensionslose Lastkennzahl | 1D: $W = \frac{F_n}{E' l r'}$ 2D: $W = \frac{F_n}{E' r'_w \tau}$ |
| x | kartesische Raumkoordinate | |
| x_{Start} | Beginn der ersten Textur zum Startzeitpunkt der Simulation | |
| X | dimensionslose kartesische Raumkoordinate | 1D: $X = x/b$ 2D: $X = x/a$ |
| y | kartesische Raumkoordinate | |
| Y | dimensionslose kartesische Raumkoordinate | 1D: $Y = y/b$ 2D: $Y = y/a$ |
| z | kartesische Raumkoordinate | |
| Z | dimensionslose kartesische Raumkoordinate | Schmierspalt: $Z = z/h$ Solid 1D: $Z = z/b$ thermisch: $Z_{\text{sol}} = \frac{z}{a}$ $Z_{\text{liq}} = \frac{z}{h}$ |

Z_{Roel} Druck-Exponent der ROELANDS-Viskositätsgleichung

Griechische Buchstaben

| | |
|-------------------------|--|
| α | Signifikanzniveau |
| $\alpha_{\text{li,re}}$ | Neigungswinkel der Flanke trapezförmiger Mikrotexturen |
| α_{Stern} | kodierte Sternstufe des CCD-Versuchsplanes |
| α_{η} | Druck-Viskositätskoeffizient |
| β_{ρ} | Volumenausdehnungskoeffizient |
| β_{η} | Temperatur-Viskositätskoeffizient |
| γ | Schubverzerrung |
| γ | PEKLENIK-Faktor |
| $\dot{\gamma}$ | Scherrate |
| $\gamma(p)$ | Penalty-Funktion des Druckes |
| δ | elastische Deformation in z-Richtung |
| $\bar{\delta}$ | dimensionslose elastische Deformation in z-Richtung |

| | | |
|---------------------------|---|--|
| $\delta_{i,j}$ | KRONECKER-Delta (mathematischer Operator) | $\delta_{i,j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ |
| $\delta m_{\mathfrak{R}}$ | Masse des infinitesimalen Volumenelements | |
| $\delta V_{\mathfrak{R}}$ | infinitesimales Volumenelement | |
| ε | Dehnung | |
| ϵ | Fehler der Regression | |
| $\bar{\varepsilon}$ | dimensionsloser Diffusions-Koeffizient | |
| $\bar{\zeta}$ | dimensionsloser Konvektions-Tensor | |
| η | dynamische Viskosität | |
| $\bar{\eta}$ | dimensionslose dynamische Viskosität | $\bar{\eta} = \eta / \eta_0$ |
| η_H | hertzscher Beiwert für die Kontaktbreite | |
| ϑ | Temperatur in °C | |
| θ | Dichtevehältnis, Spaltfüllungsgrad | |
| Θ | HEAVISIDE-Funktion | |
| λ | Schmierfilmkennzahl | |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | |
| λ_R | Festkörpertraganteil | |
| Λ | spezifische Schmierfilmdicke | |
| μ | Reibungszahl | |
| ν | Querdehnzahl | |
| ν | kinematische Viskosität | |
| ξ_H | hertzscher Beiwert für die Kontaktlänge | |
| π | Kreiszahl | |
| ρ | Hauptkrümmung | |
| ρ | Dichte | |
| $\bar{\rho}$ | dimensionslose Dichte | $\bar{\rho} = \rho / \rho_0$ |
| ρ_{Σ} | kumuliertes Krümmungsmaß | |
| ϱ | Höhe der Rauheitsspitzen | |
| σ | Normalspannung | |
| σ_R | quadratischer Mittenrauwert | $\sigma_R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$ |
| Σ | Summe | |
| τ | Schubspannung | |
| τ_e | äquivalente Schubspannung | $\tau_e = \sqrt{\tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2}$ |
| $\tau_{i,j}$ | molekülbedingter Impulstransport pro Zeit u. Flächeneinheit | |

| | |
|----------------------|---|
| τ_{stab} | Gewichtungsfaktor für SUPG und GLS Stabilisierung |
| $\cos \tau$ | Hilfsgröße zur Bestimmung der hertzschen Beiwerte |
| ϕ | Flussfaktor |
| ψ | kombinierter Normierungsfaktor der REYNOLDS-Gleichung |
| ω | Winkelgeschwindigkeit |
| Ω_c | Kontaktfläche (engl. contact) |
| $\partial\Omega_c$ | Rand der Kontaktfläche |
| ∇ | Nabla-Operator (Vektor der partiellen Ableitungsoperatoren) $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ |

Indizes

| | |
|---------|---|
| 0 | Initialzustand, Zustand bei Umgebungsbedingungen |
| 1, 2 | Kontaktkörper 1 bzw. 2 |
| c | zentral (engl. central) |
| cav | Kavitation (engl. cavitation) |
| e | äquivalent (engl. equivalent) |
| f,l | bei trapezförmigen Texturen: f für in Bewegungsrichtung nachfolgend, engl. following und l für führend, engl. leading |
| g | Glasübergang |
| gas | gasförmig |
| i | Körper oder Oberfläche |
| i,j | in Strömungsmechanik: i = molekulare Transportrichtung, j = Komponente des Geschwindigkeitsvektors |
| i,j | in Strukturmechanik: i = Körper, j = Hauptkrümmungsebene |
| lim | limitiert, nach oben begrenzt |
| liq | Fluid (engl. liquid) |
| m | mittel |
| max | maximale, größte |
| min | minimale, kleinste |
| mix | Mischung (engl. mixture) |
| p | Druck |
| s | Schub, Scherung |
| sol | Festkörper (engl. solid) |
| x, y, z | kartesische Raumrichtungen |

Abstract

Due to increased requirements for machine elements and technical systems with regard to their energy efficiency, in the last decades there has been a focus in tribology oriented sciences and research on methods and treatments to reduce friction. Amongst others, a selective surface machining defining surface features on a microscopic scale was found to be an appropriate solution for friction reduction. These surface features can be divided into stochastically distributed yet oriented grooves or discrete surface features. Focusing on the latter in this thesis, a positive effect on friction has mainly been proven for them for low loaded sliding contacts as the cylinder/liner-contact whereas no clear decision can be done for elastohydrodynamic (EHL) contacts. The goal of this thesis therefore is to provide a literature overview of the known mechanisms of discrete microtextures in different contact situations, to develop a deeper understanding regarding rolling-sliding EHL contacts as well as to perform a proof of concept for their friction reduction potential in these contact situations. To achieve this, a focus was made on numerical studies and their implementation but also experiments were undertaken.

First, friction measurements in a cam/follower tribo system – representing rolling-sliding EHL contacts and running mostly in mixed lubrication – were conducted. Therefore different shapes and arrangements of microstructures were applied on flat-base tappets. A friction reduction potential of up to 18 % compared to a polished surface reference resulted in best case. But also a noteworthy amount of running in wear had to be detected that need deeper investigation.

Second, resembling a “numerical loupe” and in order to look deeper into microtextured rolling/sliding EHL contacts and the mechanisms and effects occurring a simulation model of these contacts was developed. Deviating from the widespread approach in EHL research of self-developed program codes and sequential numerical solution algorithms, the decision was made in favor of adopting commercial FE software and using a fully-coupled solution approach. Extended comparison with data from literature proved the feasibility of this approach and showed only small deviations that could be explained with differences in the numerical implementation. This was followed up by a broad study of non-newtonian and thermal effects as well as of different microtexture shapes and loading conditions. These studies provided findings for the importance of slip effects and medium loading conditions but high enough lubricant viscosity as well as favorable microtexture dimensions.

Summarizing, this thesis provides further insights into microtextured EHL contacts from a numerical point of view while giving confident prospects for their friction reduction potential in experiments.