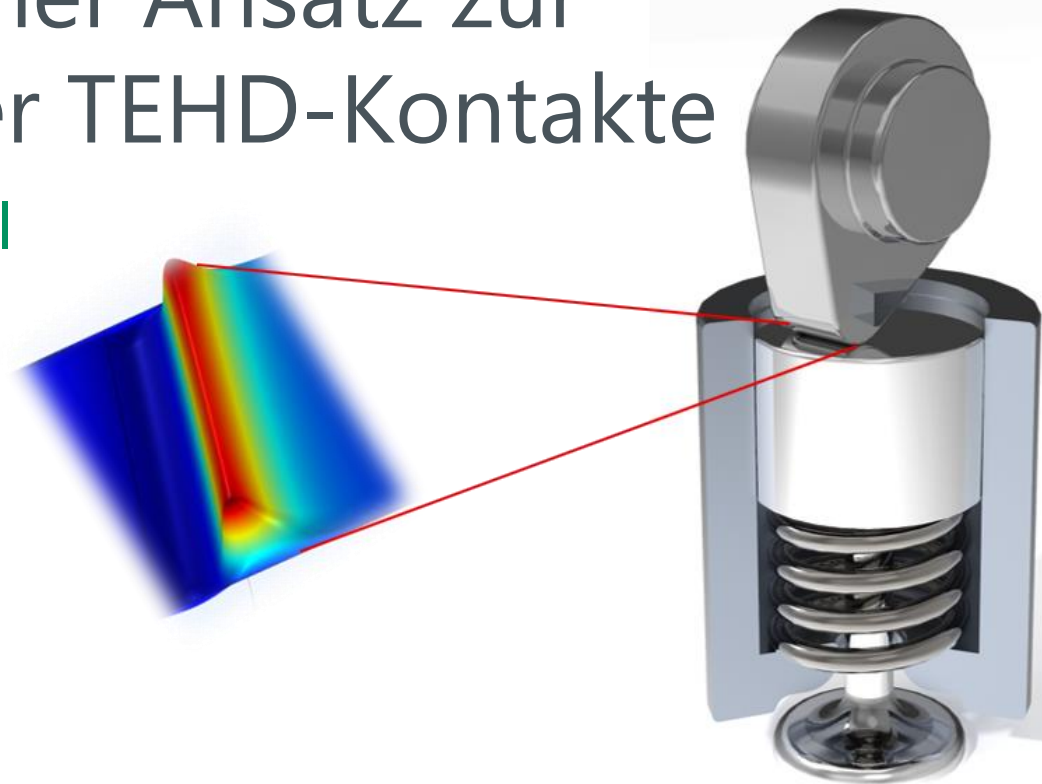


Tribologische Kontakte verstehen und optimieren – Ein numerischer Ansatz zur Berechnung hochbelasteter TEHD-Kontakte

Christian Orgeldinger, Stephan Tremmel

22. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag
Online, 15.09.2021



Motivation

Tribologie – überall wo sich etwas bewegt...

Aktuelle Entwicklungen

- Ressourcenknappheit
- Klimawandel
- Entwicklung energieeffizienter und langlebiger Produkte → Reibung und Verschleiß sind oft entscheidend für das gesamte System



Tribologische Optimierung wird auch aus wirtschaftlicher Sicht zunehmend interessant



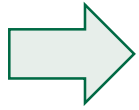
Anwendungen

- Zahnräder
- Wälz- und Gleitlager
- Nocken- bzw. Kurvengetriebe
- Medizinische Implantate
- ...



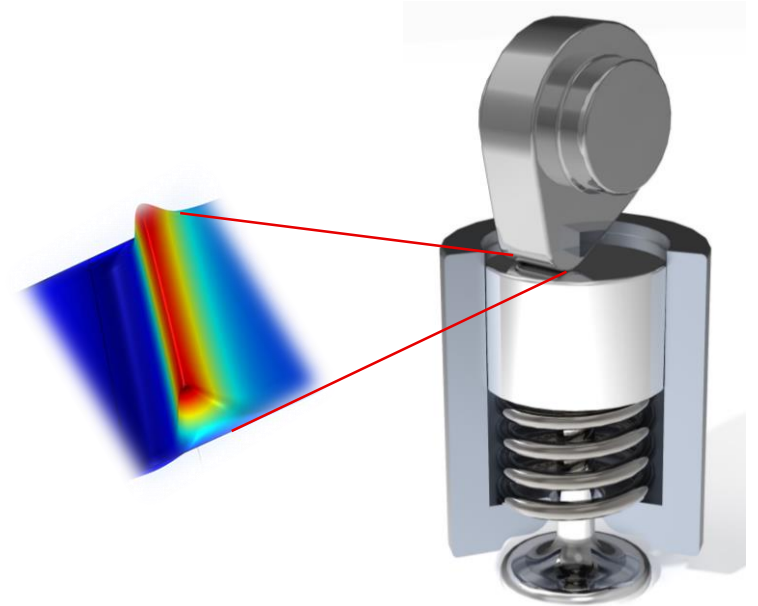
Bilder: Schaeffler, B. Braun

Herausforderung: Hoher experimenteller Aufwand der Kontaktoptimierung

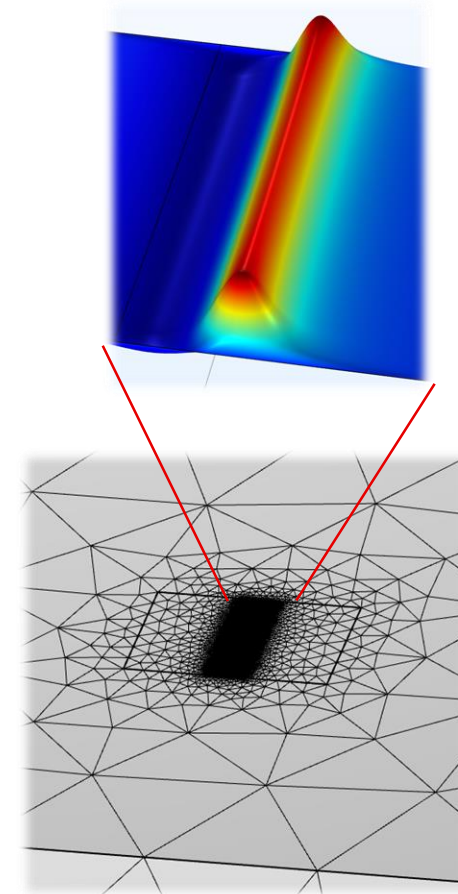


Ansatz: Kontakte numerisch abbilden

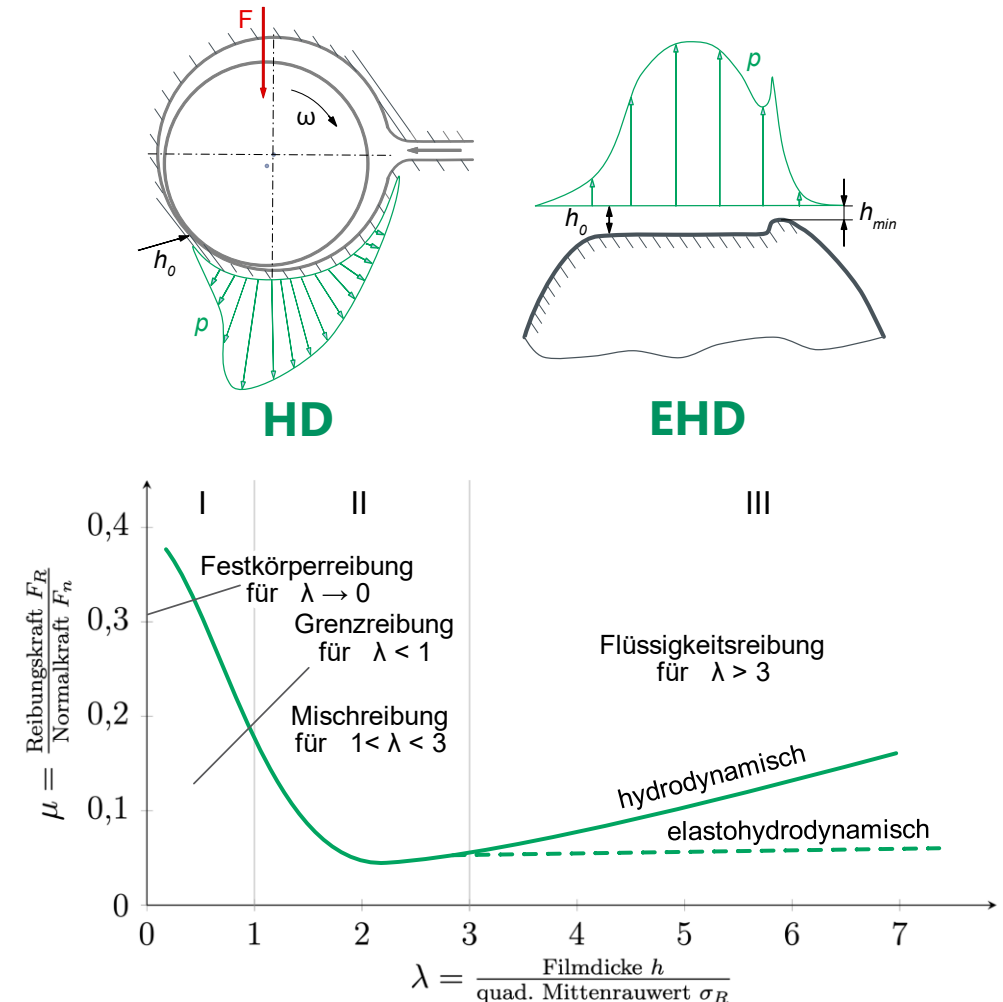
- Besseres Verständnis der komplexen physikalischen Zusammenhänge
- Anwendung der gleichen Methodik auf unterschiedlichste Anwendungsfälle möglich
→ z.B. Wälzlager und medizinische Implantate
- Optimierungspotential kann mit geringem experimentellen Aufwand ermittelt werden
→ Geometrieänderung, Beschichtung, Texturen...



- Grundlagen tribologischer Kontakte
- Simulationsmethodik
 - Hydrodynamik und Strukturmechanik
 - Oberflächenrauheit und Schmierung
 - Thermische Einflüsse
- Anwendungsbeispiele
 - Nocken-Stößel-Kontakt
 - Knie-Totalendoprothese
 - Mikrotexturierte Oberflächen
- Ausblick



- Unterscheidung zwischen hydrodynamischen und elastohydrodynamischen Kontakten je nachdem, ob die Kontaktpartner elastisch signifikant deformiert werden
- Einteilung in unterschiedliche Schmierzustände nach der STRIBECKKurve
- Wenn thermische Effekte relevant sind, können diese mit berücksichtigt werden
→ TEHD-Simulation



- Komplexes Kontaktproblem wird auf Modellkontakt reduziert → Linie-Ebene oder Ellipsoid-Ebene Kontakt
- Berechnung der Hydrodynamik über die REYNOLDSgleichung
- Elastische Deformation wird über eine strukturmechanische FE-Simulation berechnet
- Berechnung von Hydrodynamik und Strukturmechanik in einem Gleichungssystem über weitere Beziehungen
→ Full-System Ansatz in COMSOL Multiphysics

POISEUILLEterm

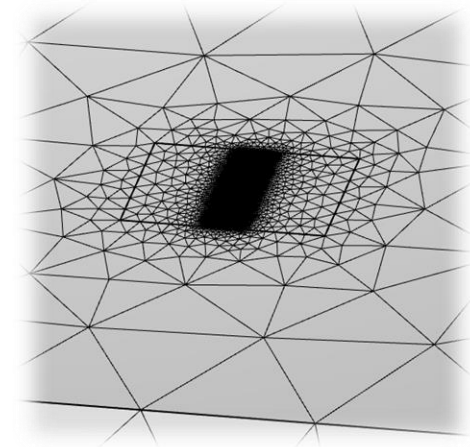
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta (u_1 + u_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h}{\partial t}$$

COUTTeterm

Zeitabhängiger Anteil

Strukturmechanik

$$\nabla \cdot \sigma = 0$$



- Kräftegleichgewicht: Zusammenhang zwischen Kontaktnormalkraft und Druckverteilung
- Schmierpalthöhengleichung: Geometrie, Deformation und Oberflächengestalt

$$h(x, y, t) = h_0(t) + \frac{x^2}{2r'(t)} + \frac{y^2}{2r'(t)} + \delta(x, y, t) + S(x, y, t)$$

**Abstand der
unverformten
Körper**

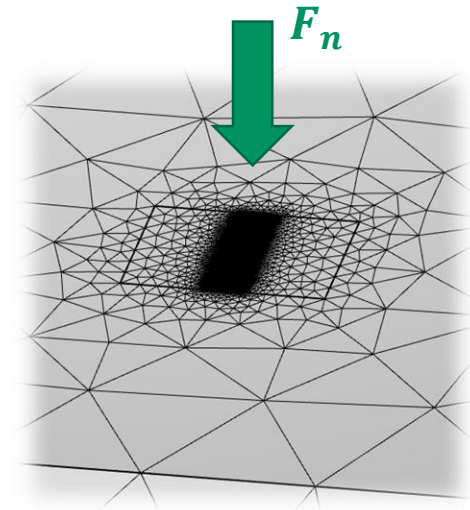
Geometrie

Elastische Deformation

Oberflächengestalt

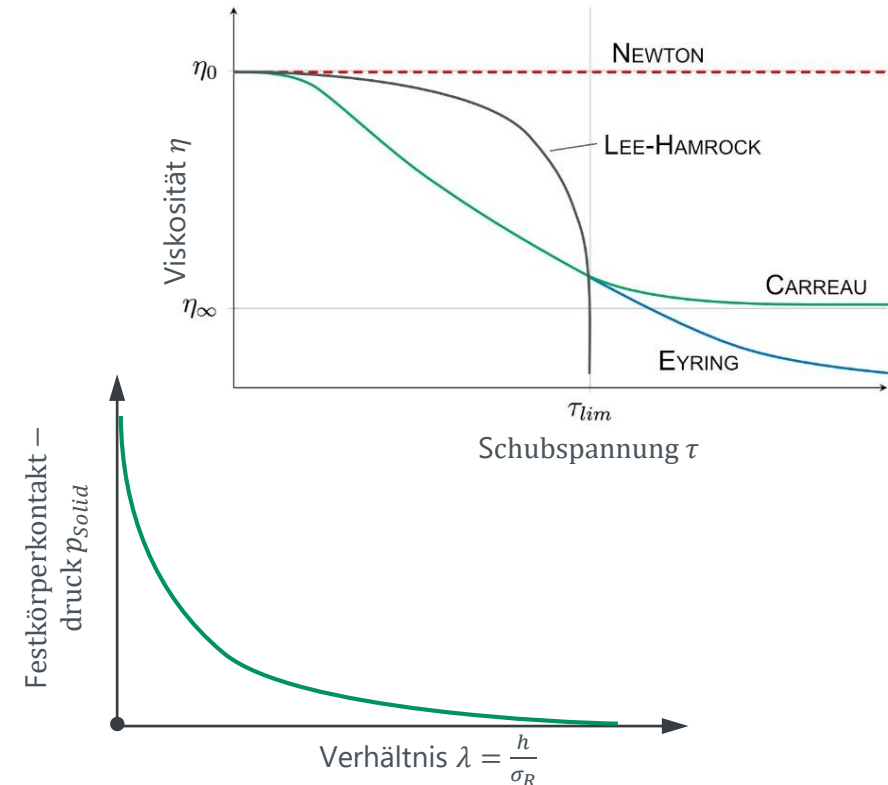
Kräftegleichgewicht

$$\int_{\Omega} p(x, y, t) dx dy = F_n(t)$$



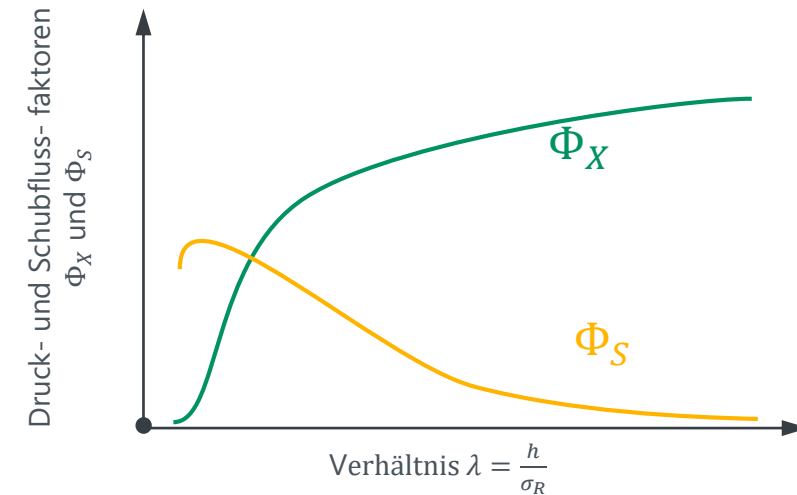
- Beschreibung der Kavitationseffekte durch unterschiedliche Modelle
- Berücksichtigung von nicht-NEWTONschen Fluideigenschaften
- Druck und temperaturabhängige Eigenschaften
- Im Misch- und Grenzreibungsbereich muss die Oberflächenrauheit mit berücksichtigt werden
- Festkörperkontaktdruck nach GREENWOOD

$$F = \int_{\Omega} P d\Omega = \int_{\Omega} \left[\underbrace{(1 - \lambda_R) P}_{P_{Fluid}} + \lambda_R \cdot P_{Solid} \right] d\Omega$$



Siehe auch: PATIR, N.; CHENG, H. S.: An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication. J. Lubr. Technol. 100 (1978) 1, S. 12-17
GREENWOOD, J. A.; TRIPP, J. H.: The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 185 (1970) 1, S. 625-633

- Die Änderung des Flusses wird durch Flussfaktoren in der REYNOLDSgleichung
- Ansatz für die Berechnung nach PATIER und CHENG

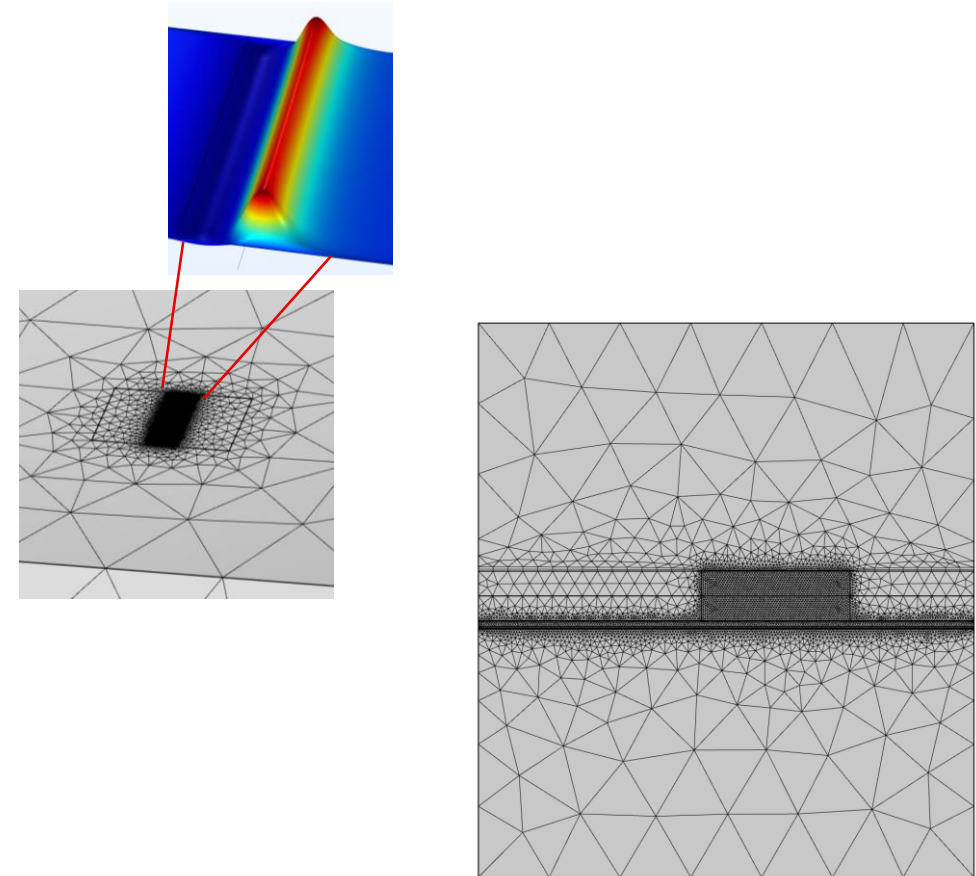


$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{\rho \cdot h_m^3}{12 \cdot \eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{u_1 + u_2}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot h_m) - \frac{u_1 - u_2}{2} \sigma \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot \phi_s) = 0$$

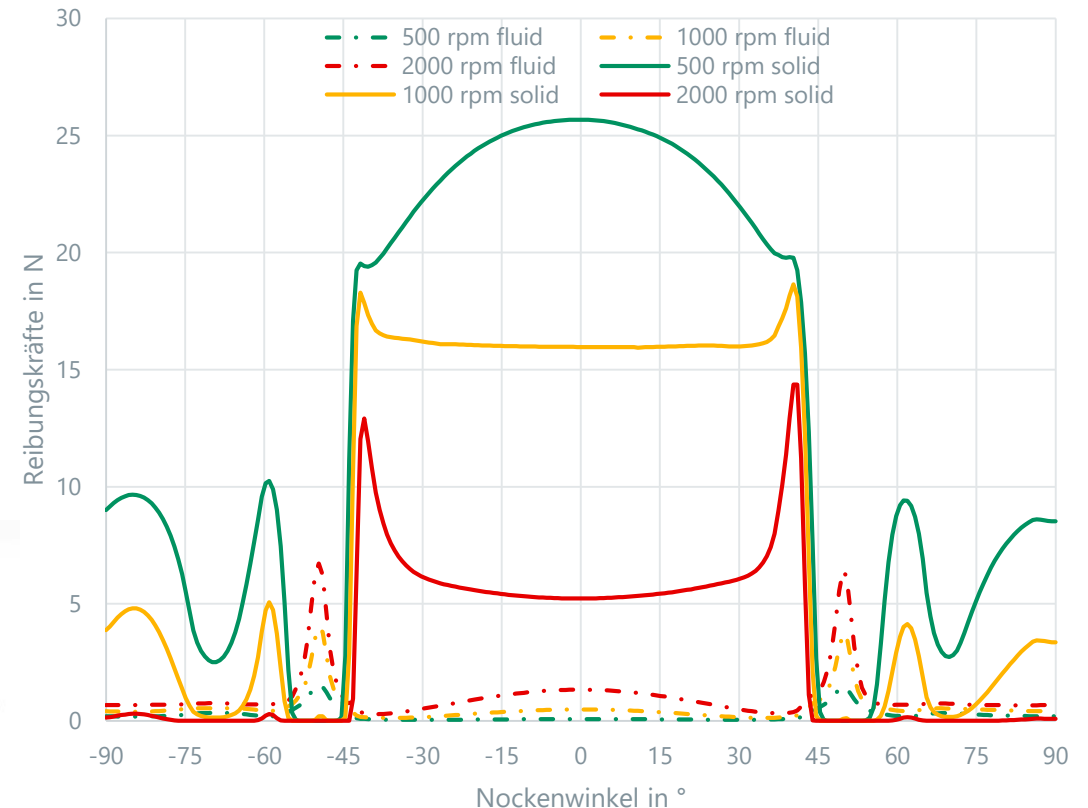
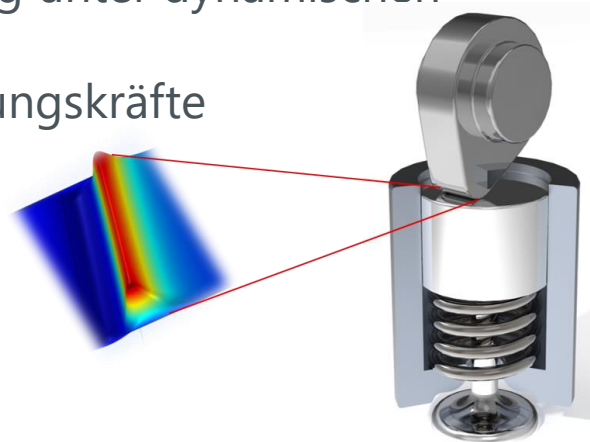
Siehe auch: PATIR, N.; CHENG, H. S.: An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication. J. Lubr. Technol. 100 (1978) 1, S. 12-17
GREENWOOD, J. A.; TRIPP, J. H.: The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 185 (1970) 1, S. 625-633



- In hochbelasteten Kontakten werden thermische Einflüsse zunehmend relevant
- Zusätzlich werden die Energiegleichungen im Schmierpalt gelöst → Zusätzliche Komponente im FEM-Modell
- Die Berechnung erfolgt iterativ mit der Simulation der Druckverteilung
- Thermische Eigenschaften von Beschichtungen können mit berücksichtigt werden



- Der Ventiltrieb ist für 10-30 % der Reibungsverluste im Motor verantwortlich
- Ein großer Anteil davon ist auf den Kontakt zwischen Nocken und Stößel zurückzuführen
- Hohes Potential für Reibungsreduzierung
- Relevanz für zukünftige Motorische Anwendungen → Wasserstoff, E-fuels...
- Auswertung der Druck- und Schmierspaltverteilung unter dynamischen Bedingungen
- Z.B. Analyse der Reibungskräfte



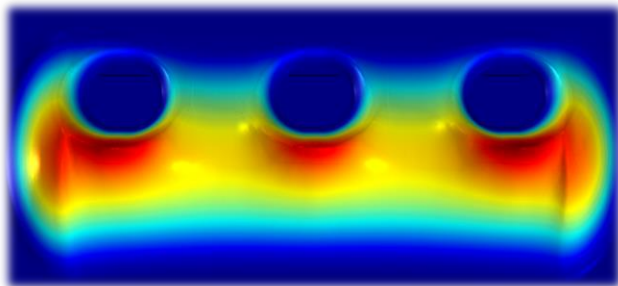
- Verschleiß der PE-Inlays in Knie-Totalendoprothesen ist häufig für ein frühes Versagen der Implantate verantwortlich → Verschleiß durch geeignete Maßnahmen reduzieren
- Durch transiente Kontaktsimulationen kann die Beanspruchung der Implantate über den kompletten Gangzyklus analysiert werden
- Gute Übereinstimmung der Ergebnisse mit experimentellen Versuchen



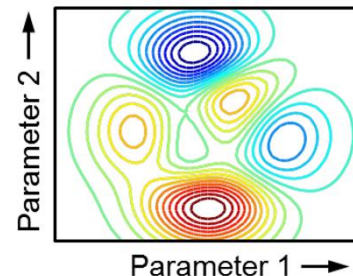
Bild: B. Braun



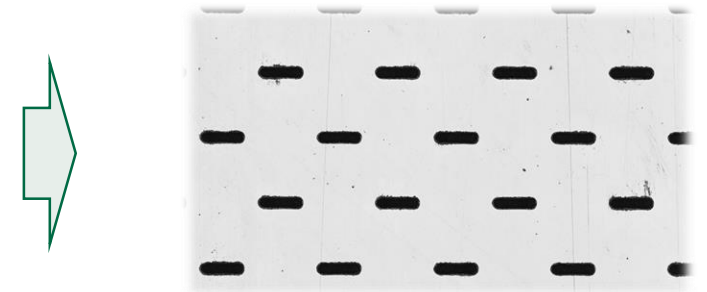
- Potential mikrotexturierter Bauteiloberflächen in EHD-Kontakten mit hohem Gleitanteil
- Reibungsreduktion
- Aufnahme von Verschleißpartikeln
- Einfache Integration in Fertigungsprozesse
- Auswahl einer geeigneten Mikrotexturgeometrie durch numerische Simulationen



TEHD-Simulation



Optimierung



Texturauswahl und Validierung



- Übertragung der Methodik auf weitere Anwendungsfälle
- Untersuchung von Spannungen unter der Kontaktoberfläche
- Optimierung von Texturen, Geometrien, Beschichtungen etc.
- Berücksichtigen weiterer Einflussfaktoren auf die Simulationen

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Die Autoren bedanken sich für die
Unterstützung durch die deutsche
Forschungsgemeinschaft

