Simulationsmethoden für elasto-hydrodynamisch gekoppelte Hydraulik-Komponenten

Gunter Knoll, Jochen Lang, Igor Jurtaev
IST Ingenieurgesellschaft für Strukturanalyse und Tribologie

Zusammenfassung Der Beitrag behandelt den aktuellen Stand der Simulationstechniken zur tribologischen Analyse und Bewertung elasto-hydrodynamisch gekoppelter Mehrkörpersysteme. Vorgestellt werden Algorithmen sowie verfügbare Software zur Berechnung der elasto-hydrodynamischen Druckverteilung sowie der Mischreibungsbedingungen infolge lokaler Festkörperkontakte rauer Oberflächen. Aufgrund der hohen spezifischen Belastungen sind hierbei die Wechselwirkungen zwischen lokalen elastischen Oberflächendeformationen, Druckverteilung und Ausbildung der Schmierspaltgeometrie zu berücksichtigen. Die Analyse der tribologischen Parameter, wie - Spaltweite, Druck, Reibung und Verlustleistung – liefert hierbei wesentliche Erkenntnisse für eine Systemoptimierung. Die Leistungsfähigkeit der elasto-hydrodynamischen Simulationstechniken wird exemplarisch an den unterschiedlichen Tribosystemen einer Hochdruck-Kraftstoffpumpe vorgestellt.

Schlüsselwörter Simulation, Tribologie, Mehrkörpersysteme, Elasto-Hydrodynamik, raue Oberflächen, Hochdruck-Kraftstoffpumpen

---

Abstract This paper presents state of the art simulation techniques to analyse and evaluate mechanical systems with fluid film coupling. The algorithms are implemented in a stable and user-friendly software, which considers the hydrodynamic pressure build-up in the lubricated gaps as well as states of mixed lubrication when surface roughness gets into contacts. Under high loads, the consideration of the interaction of the local elastic surface deformations and the pressure build-up is absolutely necessary. The analysis of the calculated tribological parameters like gaps, pressures, friction power losses and mixed lubrication areas help to optimize the design of the bearings and their elastic surroundings. The capability of elasto-hydrodynamic simulation is shown exemplarily on the tribological contacts of one of Delphi's high-pressure fuel pumps.

Keywords Simulation, Tribology, Multi Body Systems, Elasto-Hydrodynamics, High-Pressure Fuel Pumps

1 Einleitung

Aufgrund verkürzter Entwicklungszyklen werden zur Reduktion zeit- und kostenintensiver Prüfstands- und Feldversuche zunehmend Simulationstechniken zur Auslegung, Schwachstellenanalyse und Systemoptimierung hinsichtlich Lebensdauer (Verschleißsicherheit) und Verlustleistung eingesetzt. Die ganzheitliche Systembetrachtung führt hierbei aus Sicht der Mechanik auf die Problemstellung der Kopplung von Elasto-Hydrodynamik und Mehrkörperdynamik, wobei die Systembetrachtung auch transiente Vorgänge einschließt. Neben dem Bereich hydrodynamischer Gleitlager und Führungen werden entsprechende Simulationstechniken verstärkt bei den Tribosystemen von Hochdruckpumpen eingesetzt, deren spezifische Beanspruchung infolge niedrigviskoser Medienschmierung sowie zunehmend erhöherer Einspritzdrücke in besonderem Maße kritisch ist.

Bei den Tribosystemen von Hochdruckpumpen treten sowohl flächige Gleitkontakte als auch konzentrierte Wälz-Gleitkontakte auf, wie: Wellenlagerung und Rollschuh, Kolbenführung, Kugelkopf und Steuerscheibe sowie Nocke-Rolle. Bei allen Kontakten ist zwingend erforderlich die elastische Deformation der Funktionsflächen infolge der Druckverteilung durch hydrodynamische Druckverteilung (EHD) und Festkörperkontakt (Mischreibung) in die Modellbildung einzubeziehen. Weitere zu berücksichtigende Parameter sind: temperatur- und druckabhängige Schmierstoffkennwerte, Oberflächenmikrostruktur, Oberflächenkonturierung infolge Fertigung und Verschleiß (z.B. Einlaufkontur) sowie transiente äußere Belastungsfunktionen.

Die Modellbildung umfaßt auch die definierte Schmierstoffversorgung einschließlich der Betrachtung von Teilfüllungszuständen, für deren Behandlung entsprechende masseerhaltende Kavitationsalgorithmen zur Verfügung stehen.

Insgesamt sind folgende Teilprobleme zu behandeln: Hydrodynamische Schmierfilm-bildung rauer Oberflächen, Rückwirkung der elastischen Makro- und Mikroverformung der Komponenten und deren funktionalen Oberflächen auf die Schmierspaltgeometrie infolge hydrodynamischer Druckentwicklung, Festkörperkontaktdruck und äußerer Belastung sowie lokaler Trägheitseffekte. Zur ganzheitlichen Modellbildung von Systemen werden diese Teilprobleme in eine Mehrkörpersystematik elastischer Körper eingebunden. Mit dem Beitrag wird die Leistungsfähigkeit der Simulationstechnik für elasto-hydrodynamisch/ mehrkörperdynamisch gekoppelte Systeme an einer ganzheitlichen Modellbildung der Tribosysteme einer Hochdruckpumpe vorgestellt. Die Untersuchungen wurden mit dem Programmsystem FIRST [1] durchgeführt. Zu weitere Anwendungsfelder s. Beträge [2, 3, 4].

Der Fokus des Beitrags liegt auf den Tribosystemen Nockenwellenlagerung, Rollenschuh/Kolben, Kolben/Gehäuse, Plungerführung sowie Nocken-/Gegenläuferkontakt.

2 Methoden der Mehrkörpersysteme mit Fluid Film Kopplung

2.1 Systematik der Modellbildung

Die Simulation von Mehrkörpersystemen mit Fluidfilm-Interaktionen erfordert die Kopplung der drei Teilkomplexe

- Nichtlineare Mehrkörperdynamik elastischer Körper (MBS)
- Hochnichtlineare elasto-hydrodynamische Kopplung mit Mischreibungskontakt (EHD)
- Lineare Strukturdynamik mit robusten schrittweitengesteuerten Integrationsalgorithmen

Den grundsätzlichen Ablauf einer gekoppelten MBS/EHD-Simulationstechnik zeigen Abb. 1und 2.

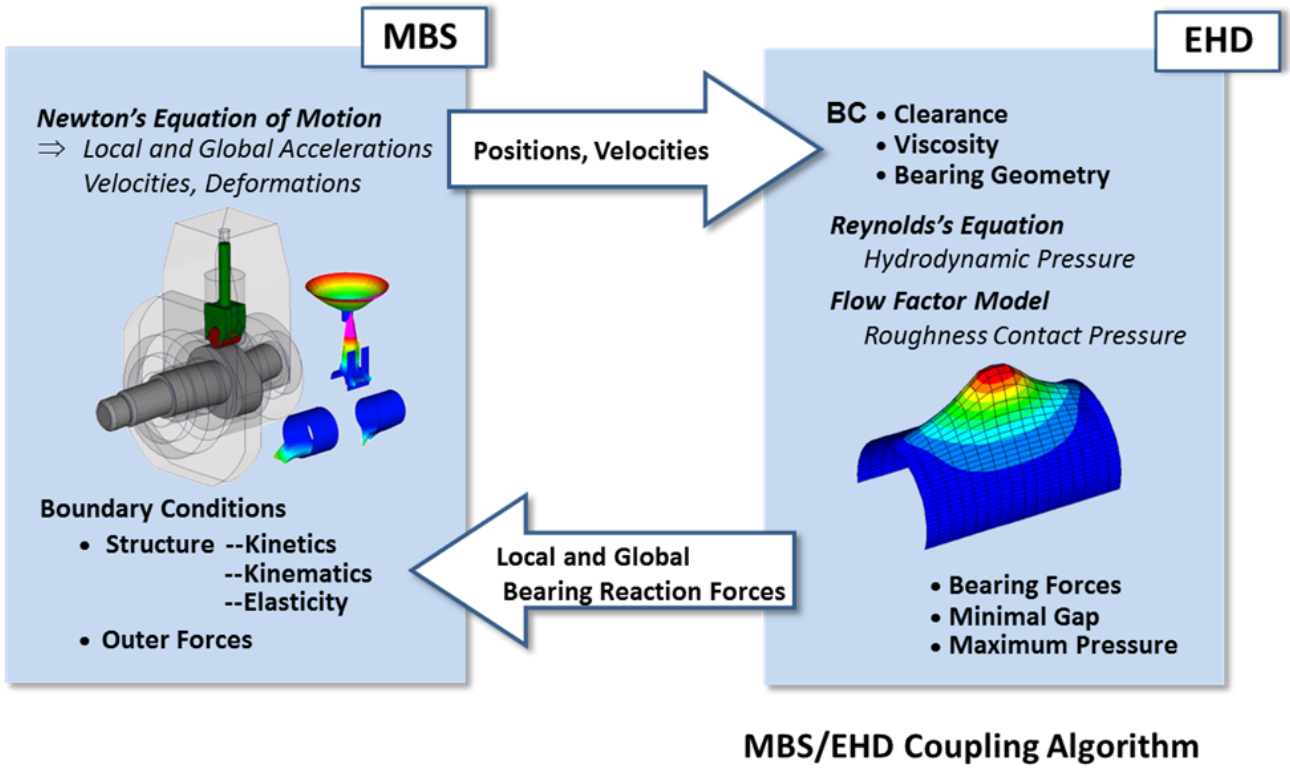


Abbildung 1: Konzept einer gekoppelten MBS-/EHD-Simulation

In einem ersten Schritt liefert die Lösung der *Newton*schen Bewegungsgleichungen der elastischen Strukturen des MBS-Modells unter Einwirkung der äußeren lokalen und globalen Belastungen sowie die resultierenden lokalen und globalen Beschleunigungen, deren Integration die lokalen Geschwindigkeiten und Positionen (Verformungen) für einen Zeitschritt liefert. Aus dem Lösungsvektor werden dann die Verformungen der funktionalen Oberflächen errechnet, die als Korrekturwerte den Konturen der fertigungsbedingten funktionalen Oberflächen überlagert werden. Die neue Schmierspaltgeometrie ist dann Basis für die Berechnung der elasto-hydrodynamischen Druckentwicklung auf Basis der *Reynolds*schen Differentialgleichung. Die resultierenden radialen und tangentialen Lagerkräfte werden dann in das MBS-Modell eingeführt und sind Randbedingung für den nächsten Zeitschritt.

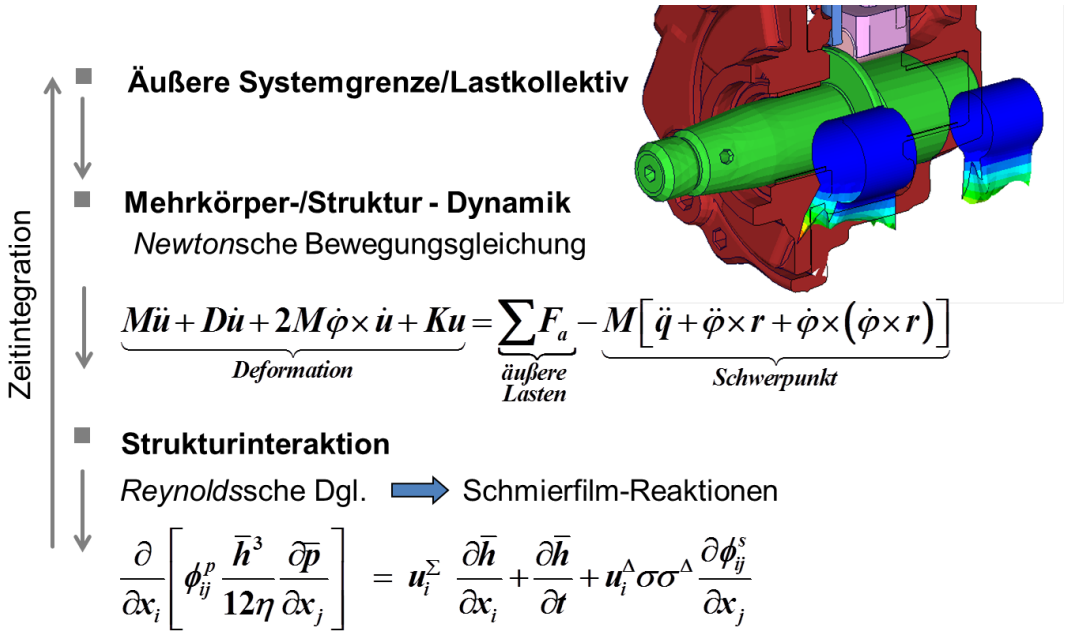


Abbildung 2: Transiente Berechnung elasto-hydrodynamisch gekoppelter Mehrkörpersysteme

2.2 Elasto-Hydrodynamik und Mischreibung raue Oberflächen

Die Berechnung der elasto-hydrodynamischen Tragdruckentwicklung rauer Ober-flächen basiert auf einer Erweiterung der *Reynolds*schen Differentialgleichung durch Scher- und Druckflußfaktoren. Flußfaktoren beschreiben die Änderung des Fluidtransportes zwischen rauen und ideal glatten Oberflächen, s. Average Flow Modell nach [5].

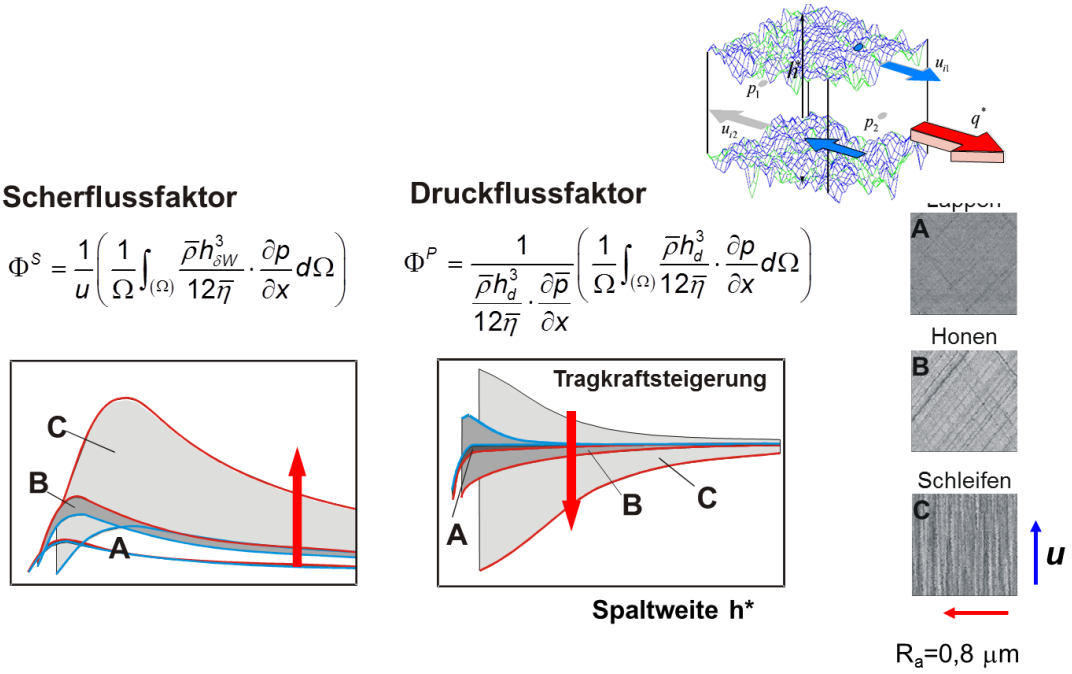


Abbildung 3: Average Flow Modell, tribologische Kennwertbildung Mikrohydrodynamik

Die Ermittlung der Flußfaktoren erfolgt spaltweitenabhängig, indem der Fluß infolge Scher- und Druckströmung auf Basis der *Reynolds*gleichung für einen repräsentativen Bereich der realen Oberflächenmikrostruktur berechnet wird, s. Abb. 3.

In dem Berechnungsalgorithmus ist ein Mischreibungsmodell integriert, das auf Basis der Kontaktsteifigkeit des Rauheitsprofils die Traganteile infolge Festkörperkontakt liefert. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, die Gesamtreibungsverluste infolge der hydrodynamische Fluidreibung und der Mischreibungskontakte zu berechnen, s. Abb. 4. Damit liegen alle Informationen vor, um in einem übergeordneten Iterationsschema den zeitlichen lokalen Verschleiß bei Mischreibungskontakt zu berechnen. Derzeit implementiert sind in FIRST die Verschleißgesetze nach Fleischer und Archard.

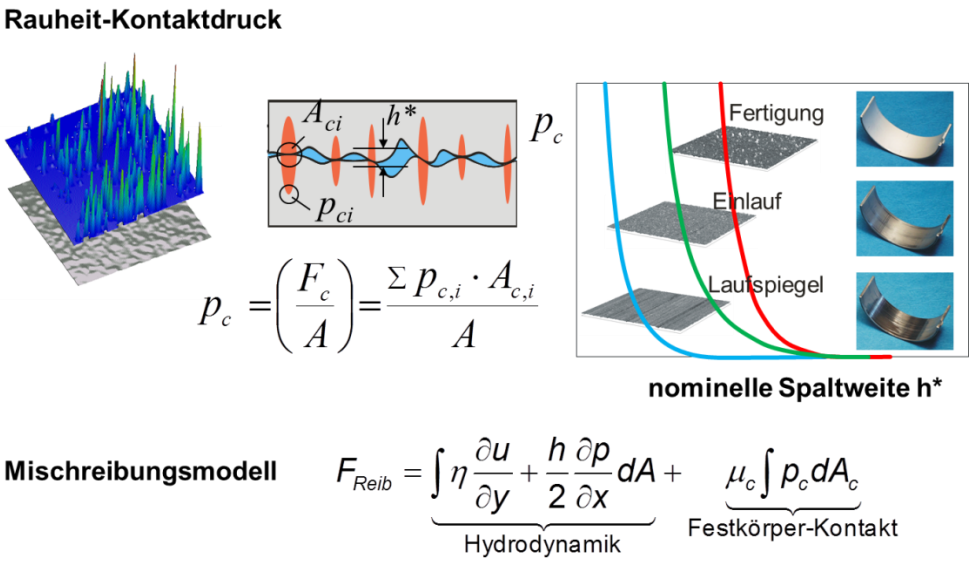


Abbildung 4: Kontaktdruck rauer Oberflächen und Mischreibungsmodell

3. Modellparameter Hochdruck-Kraftstoffpumpe

Mit Anhebung der Einspritzdrücke – bei Neuentwicklungen bis zu 3000 bar – unterliegen Tribosysteme von Hochdruckpumpen in Verbindung mit niedrigviskosen Schmierstoffe extrem hohen spezifischer Belastungen. Für die erforderliche Funktionssicherheit müssen hierbei insbesondere Mischreibungszustände beherrscht werden. Im Zuge der Designoptimierung sind u.a. Schwachstellen durch fertigungs-, montage- und verformungsbedingte Belastungskonzentrationen, z.B. Kantenträger, frühzeitig zu identifizieren und durch entsprechende Gegenmaßnahmen, wie Konturkorrektur und/oder Steifigkeitsoptimierung der Kontaktpartner auszuschließen. Die Forderung nach hoher Aussagesicherheit der Simulationsergebnisse ist nur durch eine entsprechende Modelltiefe zu erreichen, was wiederum einen hohen Grad der zu berücksichtigenden Einflußparameter erfordert.

Im Rahmen der Fallstudien werden die unterschiedlichen Tribosysteme einer Hochdruckpumpe unter elasto-hydrodynamischen Bedingungen berechnet und bzgl. der Optimierungspotentiale hinsichtlich Verschleißsicherheit und Reibungsverluste analysiert. Bezüglich der Optimierung der elasto-hydrodynamischen Traganteile (Verschleißsicherheit durch

Reduktion von Mischreibungszuständen) werden die folgenden Aspekte betrachtet:
• Einfluss der Bauteilauslegung (Steifigkeit)
• Konturoptimierung der Laufflächen von Herstellungs- oder Run-in-Prozesse
• Einfluss von Lagerparameter wie Abstand, Oberflächenrauheit und Schmierstoff

Abb. 5 zeigt den grundsätzlichen konstruktiven Aufbau sowie die verschiedenen Tribosysteme der Hochdruckpumpe der Konzeptstudie. Konstruktives Design, tribologische Randbedingungen sowie Belastungszustände entsprechen hierbei grundsätzlich realitätsnahen Bedingungen. In dem Modell werden die Elastizitäten sowie die Trägheitseffekte der einzelnen Komponenten auf Basis von Finite Elemente beschrieben. Der Nocken-Gegenläufer-kontakt (Rolle/Nocke) wurde als Wälz-/Gleitkontakt ebenfalls unter EHD-Bedingungen gekoppelt.

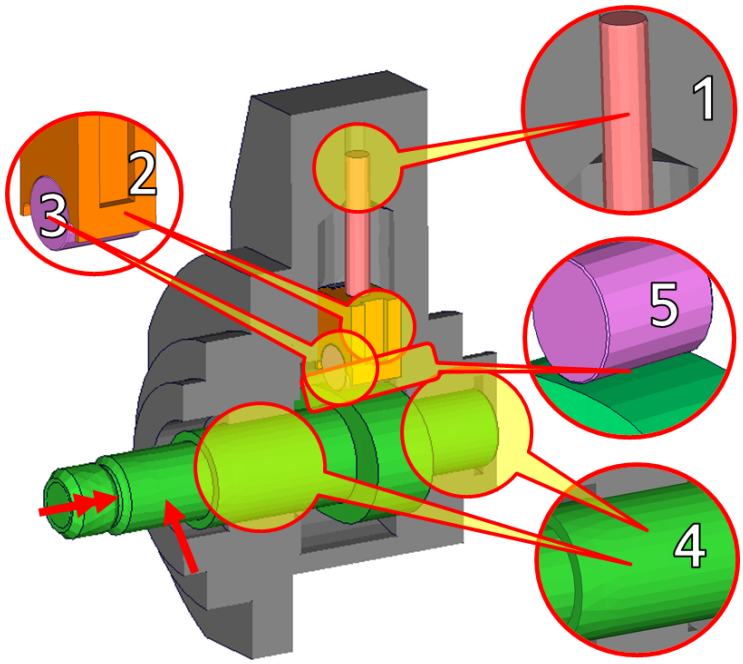


Abbildung 5: Komponenten der Hochdruckpumpe mit Tribosystemen

• 1 Führung Plunger / Pumpengehäuse
• 2 Führung Rollenschuh / Gehäuse
• 3 Lagerung Rolle / Rollenschuh
• 4 Lagerung Nockenwelle / Pumpengehäuse

Als äußere Randbedingungen werden neben der Antriebsdrehzahl Querkräfte infolge des Riementriebs sowie der zeitliche Verlauf Kraftstoffdrucks in der Druckkammer vorgeschrieben.

4.0 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der betrachteten Tribosysteme im Hinblick auf Parameterabhängigkeit und Optimierungspotential dargestellt.

Tribosystem 1 *Plunger-Gehäuseführung* Der Kontakt zwischen Plunger und Pumpengehäuse ist in hinsichtlich der Funktionalität der Pumpe unter folgenden Gesichtspunkten zu bewerten:

- Hydraulischer Wirkungsgrad der Pumpe
  – Leckagestrom und Drosselverluste werden durch elastische Aufweitung der Gehäusebohrung längs der Plungerführung beeinflußt
- Tribologische Beanspruchung
  – Reibungsverluste und Verschleiß an der Plungerführung infolge Mischreibungszustände, s. Abb. 6.

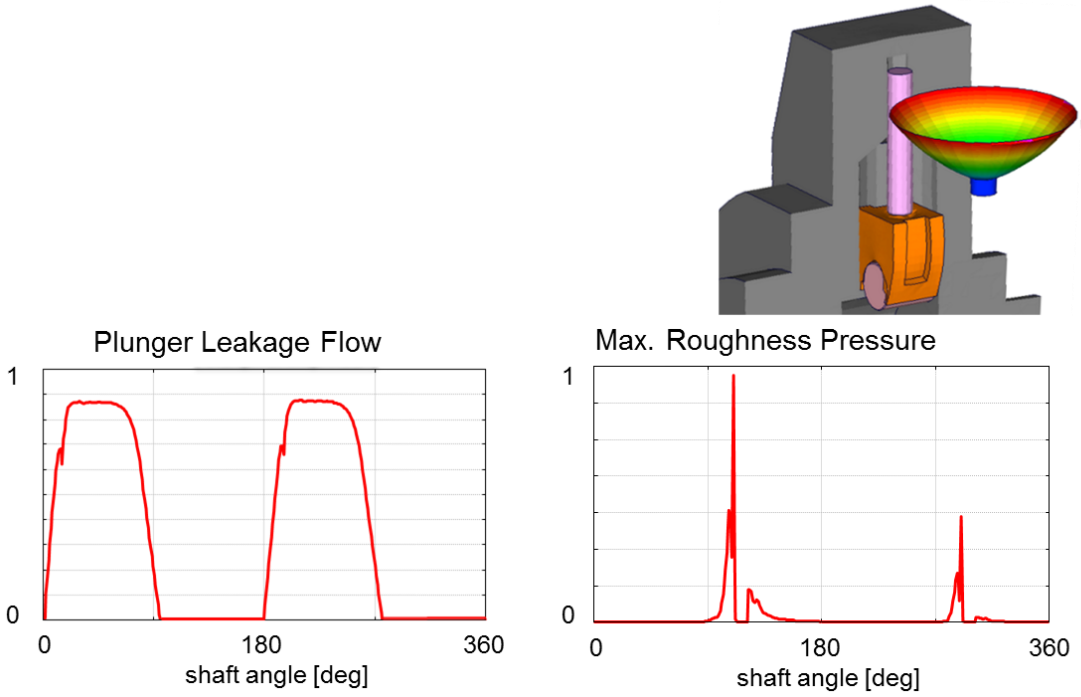


Abbildung 6: Druckverlauf und Mischreibungskontakt längs Plungerführung

Tribosystem 2 *Rollenschuh/Gehäuseführung* Der tribologische Kontakt zwischen Rollenschuh- und Gehäuse wird druck- und gegendruckseitig durch zwei Axialgleitlager gebildet. Optimierungspotentiale bieten die Spaltgeometrie (Spiel und Konturierung) sowie die Elastizität des Rollenschuhs. Abbildung 7 zeigen für eine Position der Nockenwelle die prinzipielle Druckverteilung auf der Lauffläche sowie die Reibungsverluste über °NW. Die Peaks im Verlauf der Reibungsverluste bei 10, 100, 190 und 280 °NW sind aufgrund des Anlagewechsels mit Festkörperkontakt zurückzuführen. In der Phase zwischen 10 und 90 °NW sowie zwischen 190 und 270 NW werden die Reibungsverluste durch die Gleitgeschwindigkeit des Rollenschuhs dominiert.

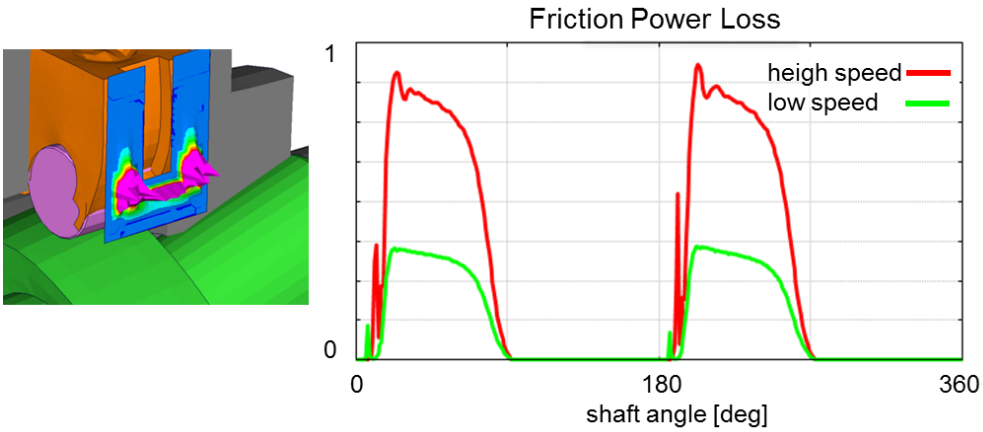


Abbildung 7: Druckverteilung zwischen Rollenschuh und Gehäuseführung (links) sowie Reibkraftverlauf über °NW bei unterschiedlichen Betriebspunkten

Tribokontakt 3 *Rolle-/Rollenschuh* Der tribologischen Kontakt zwischen Rolle und Rollenschuh entspricht einem halbumschlossenen Radialgleitlager. In der Studie wurden die Potentiale der Lagerung bzgl. Leistungssteigerung durch Rollenelastizität und Wechsel von niedrigviskoser Kraftstoffschmierung auf Ölschmierung untersucht, s. Abb. 8. Deutlich erkennbar reduzieren beide Maßnahmen den Kontaktdruck und damit die Intensität von Mischreibungszuständen.

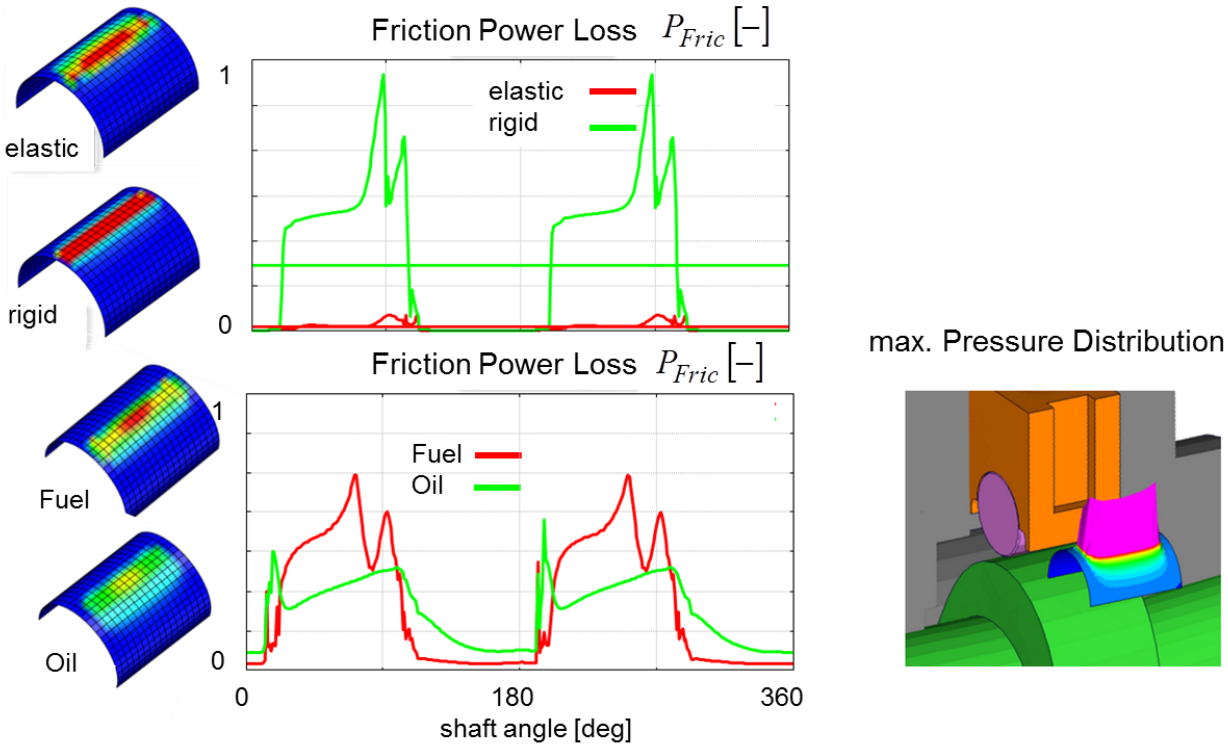


Abbildung 8: Maximale Kontaktdruckverteilung und Reibungsverluste bei starrer/elastischer Rolle sowie bei Kraftstoff- und Ölschmierung

Tribosystem 4 *Nockenwellenlagerung* Die Spaltgeometrie der Nockenwellenlagern wird durch Biegung der Nockenwelle zwischen den beiden Stützlagen sowie durch Schiefstellung am freien Ende der Nockenwelle infolge Nockenkräfte sowie Riemenzug bestimmt. Abb. 8 zeigt den Einfluß von Lagerelastizität sowie Lagerspiel auf Mischreibungszustände, die überwiegend verursacht werden durch Kantenträger, die riementriebseitig insbesondere zwischen 90 und 180 °NW sowie zwischen 270 und 360 °NW auftreten. Den Einfluß von Gehäuseelastizität sowie unterschiedlicher Lagerspiel zeigen die Verläufe des Kontaktdrucks sowie der Verlustleistung durch Reibung, die insbesondere durch unterschiedliche Mischreibungszustände bedingt sind.

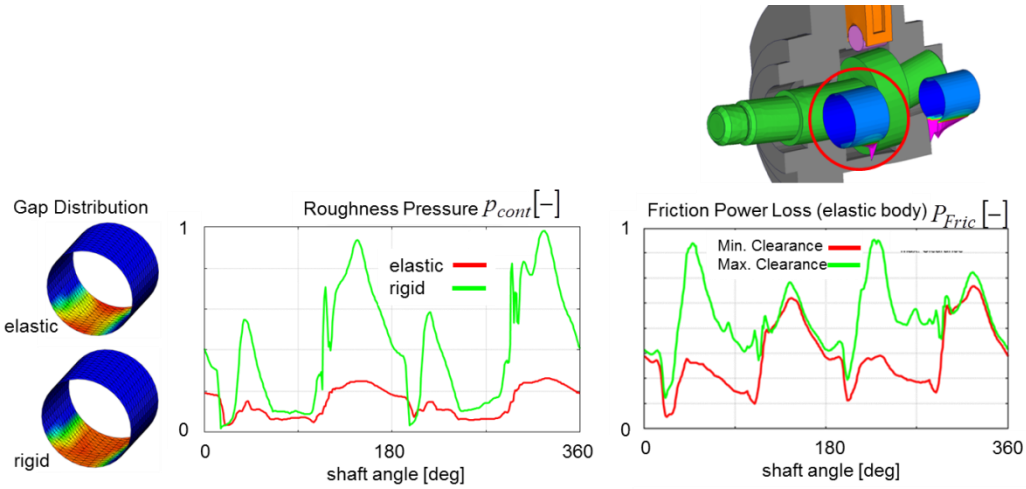


Abbildung 8: Kontaktdruck Nockenwellenlager riementriebseitig (Mischreibung) bei starrem und elastischem Gehäuse sowie Reibungsverluste bei unterschiedlichen Lagerspielen.

Eine wesentliche Verbesserung der Aussagesicherheit tribologischer Simulationstechniken wurde durch die Integration von Algorithmen zur Berechnung der Veränderungen der Schmierspaltgeometrie durch Verschleiß erzielt. Abbildung 9 zeigen den Einfluß des Einlaufverschleißes (run in) auf den Verlauf der maximalen Druckentwicklung (Summe hydrodynamischer Druck und Festkörperkontaktdruck), Rauheitskontaktdruck sowie Reibungsverluste. Durch den Einlaufvorgangs werden die Festkörpertraganteile (Kontaktdruck) gegenüber dem Neuzustand um ein Vielfachen abgesenkt wird, so daß sich überwiegend ein EHD-Tragdruck ausbilden kann. Die vorliegenden Berechnungsergebnisse basieren auf dem energetischen Verschließmodell nach *Fleischer*, das - neben dem Verschleißmodell von *Archard* - in dem Programmsystem FIRST implementiert ist.

Tribosystem 5 *Nocken-Rollenkontakt* Der Kontakt zwischen Nocke und Rolle ist ein konzentrierter Wälz-Gleitkontakt. Aus Sicht der tribologischen Beanspruchung treten in diesem Kontakt hohe *Hertz*sche Pressungen auf, in deren Folge es zu Ermüdungs-schäden kommen kann. Des Weiteren besteht die Gefahr, daß in dem Kontakt infolge von Schlupf erhöhter Verschleiß auftritt. Zur betriebssicheren Auslegung ist daher die Kenntnis von *Hertz*scher Pressung und auftretendem Schlupf ein wesentliches Kriterium für die Werkstoffauswahl sowie für die Funktionssicherheit.

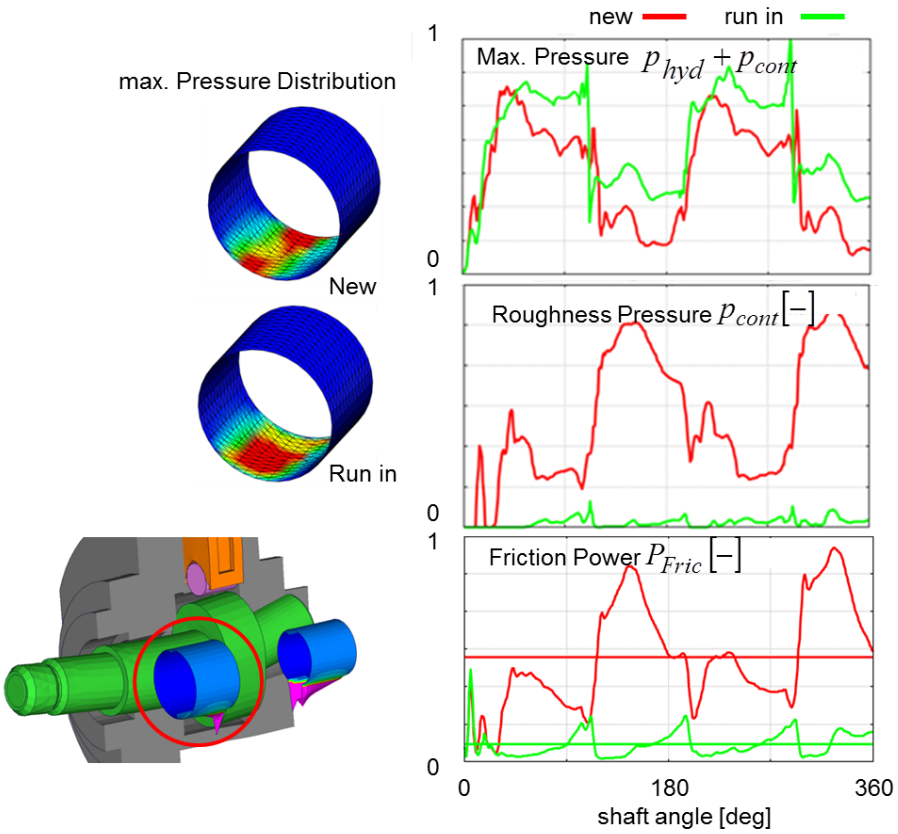


Abbildung 9: Einfluß von Einlaufverschleiß auf Maximaldruck, Festkörperkontaktdruck und Reibleistung

Die *Hertz*sche Pressung ist zunächst wesentlich für Werkstoffmaßnahmen bzgl. der erforderlichen Ermüdungsfestigkeit. Bei auftretendem Schlupf sind zwei Aspekte zu beachten: Schlupf führt gegenüber einem reinen Wälz-/Gleitkontakt zu erhöhtem Verschleiß und zu einer Veränderung der Steuerzeiten.
Aus Sicht der Simulationstechnik führt die Berechnung des Nocken-Rollenkontaktes auf das Problem der Elasto-Hydrodynamik konzentrierter Wälz-Gleitkontakte. Die Schmierspaltgeometrie wird hierbei beschrieben durch die Krümmungsradien von Rolle und Nocke sowie die lokalen Verformungen infolge der Kontaktdrücke. Abbildung 10 zeigt beispielhaft die Druckverteilung sowie die Verteilung der Material-spannungen unter der Kontaktoberfläche für eine bestimmte Nockenstellung.

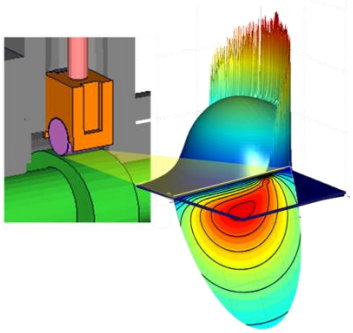
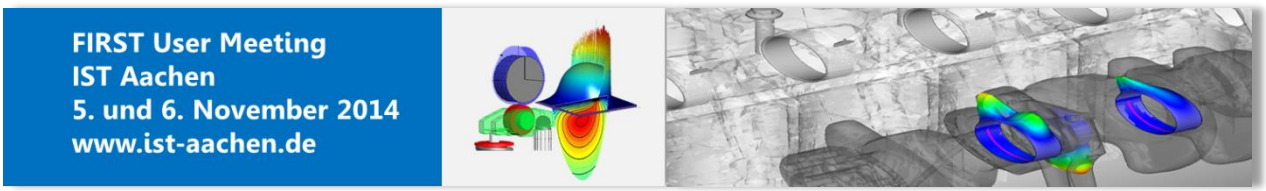


Abbildung 10: Nocken-Rollenkontakt
EHD-Druckverteilung und Materialspannungen

4 Zusammenfassung und Fazit

Mit dem Beitrag wurden die unterschiedlichen tribologischen Beanspruchungen der auftretenden Tribosysteme einer Hochdruckpumpe vorgestellt und unterschiedliche Randbedingungen hinsichtlich deren Auswirkung analysiert. Im Rahmen der Parameteridentifikation wurden unterschiedliche Lagerspiele, Auswirkung elastischer Verformung von Komponenten sowie der Einfluß des Einlaufverschleißes untersucht. Für die Bewertung herangezogen werden die tribologischen Kenngrößen: minimaler Schmierspalt, lokaler Kontaktdruck und elasto-hydrodynamischer Druck sowie Reibungsverluste.
Aus Sicht der Simulationstechnik basieren die Untersuchungsergebnisse auf einer ganzheitlichen Modellbildung, bei der alle Komponenten der Hochdruckpumpe sowie der verschiedenen Tribokontakte mehrkörperdynamisch und elasto-hydrodynamisch gekoppelt behandelt wurden. Die Projektstudie wurde mit dem Programmsystem FIRST durchgeführt. Nähere Informationen über die vorgestellte Fallstudie sowie über weitere Anwendungsfelder sind in dem Tutorial für das Programmsystem FIRST (www.IST-aachen.de) dokumentiert.

5 Literatur

Knoll, G., Lang, J.: Software-Entwicklungswerkzeug zur reibungsoptimierten Auslegung von Kurbeltriebskomponenten. ATZ/MTZ- 9.-10. Dez., Esslingen, 2009
Leonhardt, L., Murrenhoff, H., Lang, J. und Knoll, G.: Tribologische Analyse der Kolben / Zylinder-Baugruppe von hydrostatischen Axialkolbenpumpen – Elasto-hydrodynamische Simulationstechnik und experimentelle Validierung.
GfT-Fachtagung 26.-28. September, Göttingen 2011
Knoll, G., K. Backhaus: Turboladerhochlauf mit nichtlinear modellierten Schwimmbuchsenlagern, MTZ Motorentechnische Zeitschrift 2010-04 2010
Lang, J., Knoll, G.: Elastohydrodynamische Simulation des High-Speed-Kurbelwellenlager des hydraulischen Getriebes einer Windkraftanlage
CWD Tagung, 2013, 19.-20. März, Aachen, 2013

Autoren
Prof. Dr.-Ing. habil. Gunter Knoll, (gunter.knoll@ist-aachen.com)
Geschäftsführender Gesellschafter IST-Aachen, Ingenieurgesellschaft für Strukturanalyse und Tribologie mbH, 52072 Aachen, Schloß Rahe Str. 12
Dr.-Ing. Jochen Lang, Leiter Technische Berechnung, IST Aachen
M.Sc. Igor Jurtaev, IST Aachen