ABSCHLUSSBERICHT

1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen:

1. Förderperiode: MU 3294/2-1; OS 166/19 -1
2. Förderperiode: MU 3294/2-3; OS 166/19 -3

Projektnummer: 390252106

Titel des Projekts: *„Modellbasierte und experimentelle Grundsatzuntersuchungen zu tribologischen Kontakten mit teilgefüllten Spalten“*

Fortsetzungsprojekt: *Modellbasierte und experimentelle Grundsatzuntersuchungen zu tribologischen Kontakten mit minimalgefüllten Spalten*

Name(n) der Antragsteller*innen:

Prof. Dr.-Ing. Michael Müller, Prof. Dr.-Ing. Georg-Peter Ostermeyer

Dienstanschrift/en:

Prof. Dr.-Ing. Michael Müller:

Technische Universität Braunschweig

Langer Kamp 19

38106 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer

Technische Universität Braunschweig

Schleinitzstraße 20

38106 Braunschweig

Name(n) der Mitverantwortlichen:

Name(n) der Kooperationspartner*innen:

Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer): 05/2018 bis 04/2025

2 Zusammenfassung / Summary

Trotz intensiver Forschung über mehrere Jahrhunderte ist Reibung ein nach wie vor nur sehr unzureichend verstandenes Phänomen. In der Regel werden pragmatische Reibgesetze als integrale Charakterisierung eines homogenisierten Kontaktes formuliert, ohne die dort auftretenden Phänomene und deren komplexe Wechselwirkung hinreichend zu kennen. Bei geschmierten Kontakten wird hierfür üblicherweise die Stribeck-Kurve verwendet, welche je nach äußerer Last, Spaltgeometrie, Relativgeschwindigkeit und eingesetztem Schmierstoff das Reibregime (von Trockenreibung über Grenzreibung, Mischreibung hin zu hydrodynamischer Reibung) identifiziert. Wenngleich diese Abhängigkeiten bei vielen praktischen Systemen gut charakterisierbar sind, war das in Bezug auf die Fluidmenge im Spalt nicht gegeben. Zwar ist es offensichtlich, dass bei Abwesenheit eines Schmierstoffs Trockenreibung und bei Überflutungsschmierung in der Regel Hydrodynamik vorliegt, aber der Zusammenhang zwischen Schmierstoffmenge und Reibregime war unbekannt. Dabei ist es aus ökonomischen und ökologischen Gründen sehr wünschenswert, diejenige Menge an Schmierstoff einzusetzen, die für den sicheren, nachhaltigen und wirtschaftlichen Betrieb reibungsbeeinflusster Systeme optimal ist. Hier setzte dieses Projekt an. Es machte sich zur Aufgabe, auf experimentellem und numerischem Weg den Einfluss der Fluidmenge auf die Reibzahl auf kontaktmechanischer Ebene zu erforschen.

In der ersten Förderperiode wurden zu diesem Zweck spezifische Prüfstände und Messprozeduren entwickelt, mit denen es möglich wurde, eine definierte und reproduzierbare Spaltunterversorgung zu applizieren. Die darauffolgenden Experimente zeigten das durchaus überraschende Ergebnis, dass eine Minimierung der Reibzahl bei schon sehr geringen Füllgraden (Verhältnis aus Fluidvolumen zu vorhandenem Spaltvolumen) im Bereich von 10% auftraten. Parallel dazu wurden Modelle entwickelt, mit denen erfolgreich die Fluidverteilung im Spalt und die zugehörigen Druckverteilungen berechnet werden konnten. Aufbauend auf diesen Ergebnissen widmete sich die zweite Förderperiode der genaueren Beschreibung des Bereichs von der Trockenreibung bis zum Minimum. Dies erforderte auf experimenteller Seite die konstruktive Anpassung der Prüfstände und Entwicklung neuartiger Prozeduren und auf numerischer Seite die Implementierung einer neuartigen Modellbildungstechnik basierend auf der Isogeometrischen Analyse. Der Vergleich zwischen Messung und Simulation zeigt hinsichtlich der Reibzahlen über der Fluidmenge qualitativ und quantitativ gute Übereinstimmungen. Dies ermöglicht auch die Sichtweise, neben den üblichen Parametern der Stribeck-Kurve den Füllgrad als orthogonale Einflussgröße in die Identifikation des Reibregimes einfließen zu lassen. Die Ergebnisse konnten bereits auf verschiedene praktische Fragestellungen, wie beispielsweise die Prozesse beim Nassschleifen, die Berechnung von Gleitlagern oder künstlichen Hüftgelenken angewendet werden.

Summary

Despite intensive research over several centuries, friction is still a rather poorly understood phenomenon. Usually, pragmatic friction laws are formulated as an integral characterization of a homogenized contact without sufficient knowledge of the phenomena and their complex interactions occurring there. For lubricated contacts, the Stribeck curve is commonly used for this purpose, which identifies the friction regime (from dry friction to boundary friction, mixed lubrication and hydrodynamic lubrication) depending on the external load, gap geometry, relative speed and lubricant used. Although these dependencies can be well characterized in many practical systems, this was not the case with regard to the amount of fluid in the gap. Although it is obvious that dry friction is present in the absence of a lubricant and hydrodynamic friction is usually present in the case of flooding lubrication, the distinct relationship between the amount of lubricant and the friction regime was unknown. For economic and ecological reasons, it is highly beneficial to use the quantity of lubricant that is optimal for the safe, sustainable and economical operation of friction-influenced systems. This is where this project started. It set itself the task of investigating the influence of the fluid quantity on the friction coefficient at the contact mechanical level by experimental and numerical methods.

In the first funding period, specific test rigs and measuring procedures were developed for this purpose, which made it possible to apply a defined and reproducible fluid supply. The subsequent experiments showed the rather surprising result that the friction coefficient was minimised at very low filling ratios (ratio of fluid volume to available gap volume) in the range of 10%. At the same time, models were developed with which the fluid distribution in the gap and the associated pressure distributions have been successfully calculated. Based on these results, the second funding period was dedicated to a more precise description of the range from dry friction to the minimum friction. On the experimental side, this required the design adaptation of the test rigs and the development of new procedures and, on the numerical side, the implementation of a new modelling technique based on isogeometric analysis. The comparison between measurement and simulation shows good qualitative and quantitative agreement with regard to the friction coefficients over the fluid volume. This also makes it possible to include the filling ratio as an orthogonal influencing variable in the identification of the friction regime in addition to the usual parameters of the Stribeck curve.

The results have already been applied to various practical issues, such as the processes involved in wet grinding, the calculation of plain bearings or artificial hip joints.

3 Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

Ausgangspunkt des Gesamtprojekts war der Mangel an einem grundlegenden Verständnis zu Kontakten unter Fluideinfluss für den Fall, dass der Spalt eines tribologischen Systems nur zum Teil mit einem Fluid gefüllt ist. So wurden im ersten Vorhaben explizit der Einfluss der Fluidmenge auf die kontaktmechanischen Eigenschaften experimentell und modellbasiert untersucht. Das Fluid nimmt unter Teilfüllung ganz bestimmte Verteilungen im Spalt an und kann, je nach Lastzustand und Viskosität, die gegenüberliegenden Oberflächen trennen. Diese Eigenschaften wurden sowohl numerisch als auch experimentell untersucht. Bei numerischen Studien mit dem dabei weiterentwickelten Partially Filled Gaps Modell (PFGM) konnte vor allem herausgestellt werden, wie der lokale und globale Druckaufbau durch die Fluidmenge selbst beeinflusst wird und wie beispielsweise auch im Sinne der Mikro-EHD Flussfaktoren mit dem Füllgrad zusammenhängen [1]. Auf experimentellem Wege wurden 2 unterschiedliche Ansätze verfolgt. Die Voraussetzung dieser experimentellen Ansätze wurde in zahlreichen Entwicklungsschritten und Vorgängerprojekten von Antragsteller Ostermeyer geschaffen. Zum einen wurden Messungen mit einem Stift-Scheibe-Tribometer (HLT) mit mikroskopischen Rauheiten [2] durchgeführt, bei dem die gezielte Einbringung sehr kleiner Fluidmenge eine besondere Herausforderung darstellt und eine Fluidverteilung im Spalt praktisch nicht beobachtbar macht. Dieses in der Tribologie grundsätzlich bestehende Problem sollte deshalb mit einem weiteren Versuchsaufbau in skalierter Form mit Ornamentglasscheiben nachgebildet werden [3]. Eine der zentralen Erkenntnisse dieses ersten Projektes war, dass bereits sehr kleine Fluidmengen in der Größenordnung von 10 Prozent des Spaltvolumens (Füllgrad 0.1) bereits zu einer signifikanten Reduktion des Reibwerts führte. Das Reibwertminimum lag folglich ebenfalls in diesem Bereich dieser applizierten Fluidmenge. Diese Beobachtung war sowohl im System mit mikroskopischer Rauheit (HLT) als auch im skalierten Versuch (WDI) reproduzierbar nachweisbar. Eine Zusammenstellung aller wesentlichen Ergebnisse der ersten Förderphase finden sich in einer daraus entstandenen Dissertation [4].

Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage eines Fortsetzungsantrags, der sich fokussierter mit dem Bereich von der Trockenreibung bis zum Minimum des Reibwertes befassen sollte. Hierfür waren aus experimenteller Sicht Strategien zur präzisen Zugabe und homogenen Verteilung kleinster Fluidmengen (wenige Mikroliter) für den HLT-Versuch sowie einer Neukonstruktion und Erweiterung des WDI-Prüfstands (FLUCS), bei welchem die vertikale Führung und die Kraftzustellung überarbeitet werden musste. Im Bereich der Modellbildung zeigte sich in der ersten Förderphase, dass das PFGM bei sehr kleinen Füllgraden zu Konvergenzproblemen neigt, weswegen ein neues Konzept, basierend auf Ansätzen der Isogeometrischen Analyse (IGA) umgesetzt wurde. Dies war ein auf Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) basierendes EHL (Elastohydrodynamic Lubrication) - Modell, welches große, nichtlineare Deformationen der Festkörper abbildet und die Strömung eines zweiphasigen Fluidsystems (bestehend aus Schmierstoff und Kavitation) berücksichtigt. Die gekoppelte Simulation erlaubte die Untersuchung von Druckaufbau, Scherströmung und Kontaktbedingungen in teilgefüllten,

rauen Spalten. Die im Rahmen des Projekts (insbesondere des Fortsetzungsprojekts) erzielten experimentellen und numerischen Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

Ergebnisse des experimentellen Teils

Die übliche Stribeck-Kurve stellt den Reibwert über einen normierten Parameter, der die Geschwindigkeit, den Druck und die Viskosität des Schmierstoffes berücksichtigt, dar. Anhand der Kurve lassen sich die verschiedenen Reibregime (Festkörperreibung, Mischreibung und Flüssigkeitsreibung) erkennen und ablesen. Es liegt nahe, dass sich die verschiedenen Reibregime ebenfalls über den Füllgrad einstellen lassen. Abbildung 1 demonstriert diesen Effekt in Form der Reibzahl über der zugeführten Fluidmenge im Spalt [2]. Mit Überschlagsrechnungen zum vorhandenen Spaltvolumen kann dieser Fluidmenge ein ungefährer Füllgrad zugewiesen werden, in diesem Fall entsprachen die Werte am rechten Rand des Diagramms der Vollfüllung und die kleinste zugeführte Menge einem Füllgrad von etwa 1%. Durch spezielle Applikationsverfahren konnte so der Übergang von einem trockenen Reibzustand zu einem Füllgrad von 10-20% sehr gut und reproduzierbar nachgebildet werden.

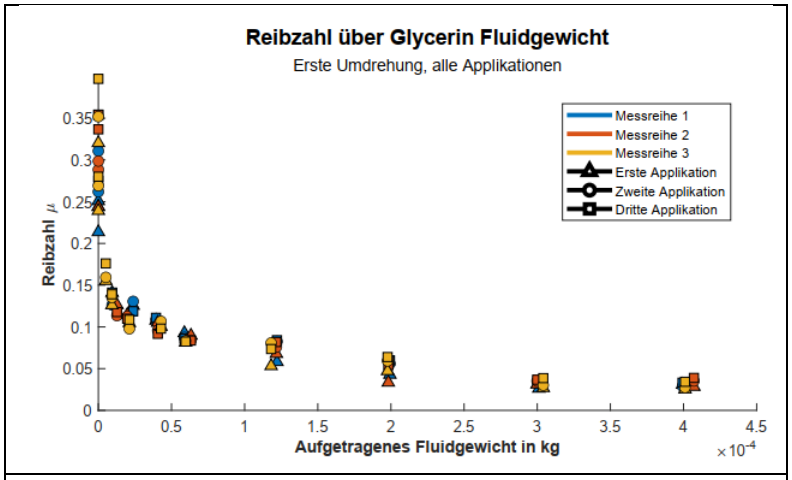
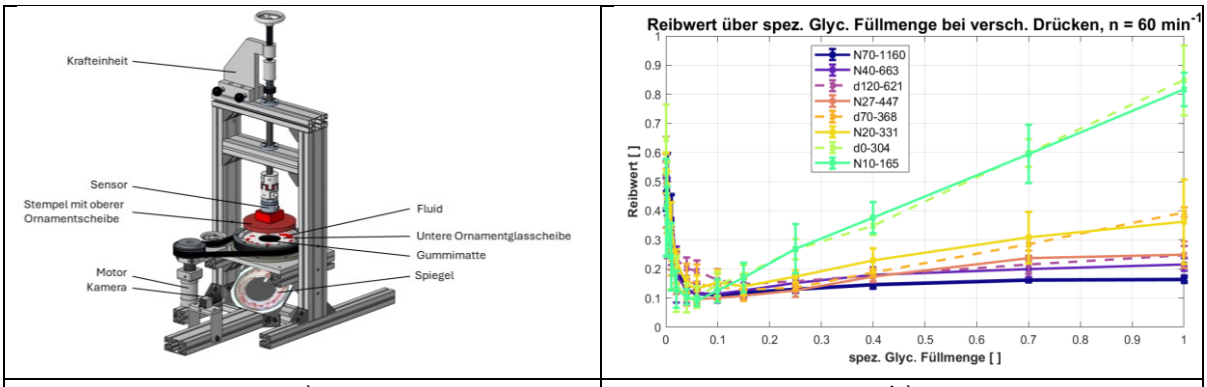


Abbildung 1: HLT Messung mit einer fein geschliffenen Probe in Anlehnung an [2]

Zudem wurde die Oberfläche durch Feilen unterschiedlich vorbehandelt, um die Effekte der Oberflächenrauheit einzubeziehen. Es wurde ein signifikanter Unterschied zwischen der fein gefeilten Probe und der stark gefeilten Probe detektiert. Bei den leicht gefeilten Proben fällt der Reibwert schon bei 0,01 g Fluid auf unter 0,15 ab. Die stark gefeilten Proben erreichen diesen Reibwert erwartungsgemäß erst mit einer deutlich höheren (hier vierfachen) Fluidmenge. Des Weiteren wurde der Einfluss der Relativgeschwindigkeit und der Normalkraft bei einer Teilfüllung analysiert [2]. Die Reibwertcharakteristiken konnten dabei erfolgreich den mit diesen Variationen einhergehenden Verschiebungen der Reibregime zugeordnet werden. Setzt man die ELROD'sche Behandlung der Kavitationsbedingung auch für das Gesamtgebiet voraus, wäre eine daraus resultierende Hypothese, dass eine Reduzierung der Fluidmenge zu einer entsprechenden Reduktion der effektiven Viskosität oder Verringerung der Geschwindigkeit gleichkommt. Diese ohnehin recht vage Hypothese konnte dahingehend widerlegt werden, als dass eine Halbierung der Geschwindigkeit im Bereich hoher Füllgrade einen deutlich größeren Einfluss als die Halbierung der Fluidmenge hat, während es bei kleinen Füllgraden genau umgekehrt ist.

Der FLUCS (FLUid Contact triboScope, siehe Abbildung 2a) wurde für die Experimente entwickelt und stellt eine Erweiterung des Vorgängers WDI (Wear Debris Investigator) dar. Das Kernstück des FLUCS sind zwei Scheiben aus handelsüblichem und normiertem

Ornamentglas, die als makroskopische Kontaktfläche verwendet werden. Der Motor treibt über einen Riemen die untere Ornamentglasscheibe an und kann nun Drehzahlen zwischen 0,5 U/min und 1290 U/min erreichen. Die obere Ornamentglasscheibe ist mit einem Stempel fest verbunden und an dem Sensor montiert.



a) b)

Abbildung 2: FLUCS a) Entwickelter Versuchsstand b) Gemessene Reibwertverläufe

Der Sensor misst das Moment und die Kraft, die auf die obere Scheibe wirkt. Eine Linearführung bewirkt eine einfache Bewegung der oberen Scheibe in vertikaler Richtung. Die Krafteinheit überträgt über eine Federkonstruktion stufenlos eine Kraft von 3-130 N auf den Reibkontakt. Bei der Verwendung von Ringscheiben wird in der Mitte der untere Scheibe zur Abdichtung eine Gummimatte montiert, damit das Fluid im Reibspalt verbleibt. Die Fluidverteilung wird mit einer Kamera aufgezeichnet. Über einen Lasertriangulationssensor kann die Höhenänderung der oberen Scheibe gemessen und Rückschlüsse auf die Spalthöhenänderung vorgenommen werden. Mit diesem Aufbau wurde der Einfluss verschiedener Parameter, wie Viskosität, Normalkraft, Geschwindigkeit und Oberflächentopographie untersucht.

Der gemessene Reibwert am FLUCS stellt über den Füllgrad ebenfalls eine Stribeck-artige Kurve dar (siehe auch [1], [2]. Dieser Reibwertverlauf zeigt sich sowohl bei den Ornamenten 528, als auch bei den Ornamenten 521, 504 und 523. Dabei hatten die Ornamente 528 und 521, dessen Asperiten näher zusammen liegen, das Minimum der Reibwertkurve schon bei geringeren Füllgraden. Das Ornament 523 besitzt eine größere Spanne zwischen den Asperiten und das Minimum der Reibwertkurve wird erst bei höheren Füllgraden erreicht. Im Vergleich zwischen den unterschiedlichen eingesetzten Ornamenten konnte demnach festgestellt werden, dass im Allgemeinen die Topographie den zum Minimum zugehörigen Füllgrad stark beeinflusst.

Darüber hinaus wurde auch das Material der oberen Kontaktfläche variiert. Dafür wurde ein Negativ der Scheibe aus Silikon geformt. Anschließend konnte die Scheibe mit zwei verschiedenen Kunststoffen in eine Positiv-Form nachgegossen werden. In den Reibversuchen besteht die untere Scheibe weiterhin aus Glas. Der Reibwert über dem Füllgrad zeigt auch bei den unterschiedlichen Materialien eine Stribeck-artige Kurve. Einen großen Einfluss hatte hierbei die Adhäsivität eines Materials. Dabei konnte bei sehr adhäsiven Materialien ein extremer Einfluss der Fluidmenge in der Nähe der Trockenreibung identifiziert werden. Schon geringste

Fluidmengen (weit unter 1% Füllgrad) führten von einem sehr hohen Reibwert (>1) bei Trockenreibung zu deutlich kleineren Reibwerten (<0.2). Eine weitere Variation in den Experimenten am FLUCS war die Variation des Flächendruckes. Dabei wurde zum einen die Flächengeometrie über eine Bohrung in der Mitte variiert, sodass Ringscheiben mit verschiedener Breite verwendet wurden. Als zweiter Stellwert für die Variation des Druckes diente die Normalkraft, die über die obere Scheibe auf die Kontaktfläche wirkt.
In Abbildung 2b ist der Reibwert über den spezifischen Füllgrad dargestellt. Die durchgezogenen Linien stellen die Variation der Normalkraft dar (10 N, 20 N, 27 N, 40 N und 70 N). Die gestrichelten Linien zeigen die Ergebnisse über der Variation der Kontaktfläche mit verschiedenen Innendurchmessern (0 mm, 70 mm, 95 mm, 120 mm). In der Legende ist hinter der Bezeichnung der Kraft der Druck in N/m² aufgeführt. Es ist klar zu erkennen, dass der Reibwert mit zunehmendem Flächendruck im hydrodynamischen Bereich sinkt. Bei geringen Fluidmengen ist keine klare Reihenfolge zu erkennen. Zudem scheint der variierende Flächendruck über den Innendurchmesser einen geringeren Effekt auf den Reibwert zu haben als die Variation der Normalkraft. Die Verringerung des Reibwertes mit zunehmenden Normalkraft stimmt mit den Ergebnissen des mikroskopischen Bereichs (HLT-Messungen) überein.

Ergebnisse des numerischen Teils

Obwohl es zahlreiche Modellbildungsansätze zur Beschreibung tribologischer Kontakte unter Mangelschmierung gibt, existierte bislang kein Modell, das den Übergang von Trockenreibung zur hydrodynamischen Schmierung auch unter Berücksichtigung großer, nichtlinearer Festkörperverformungen realistisch abbildet. Die zentrale Herausforderung besteht darin, dass eine Reduktion der Schmierstoffmenge bei konstanten Betriebsbedingungen zu einem drastischen Rückgang der Spalthöhe führt (bis hin zum nahezu vollständigen Festkörperkontakt). Dies erschwert die Kopplung zwischen Fluid- und Strukturmodell erheblich und verhindert bislang eine konsistente Beschreibung des experimentell beobachteten Reibwertabfalls bei kleinsten Schmierstoffmengen.
Zur Bewältigung dieser Problematik wurde im Projekt ein isogeometrischer Ansatz auf Basis von NURBS-Funktionen gewählt. Diese ermöglichen eine exakte Geometriebeschreibung und zugleich eine höhere Kontinuität der Basisfunktionen, was insbesondere in hochgradig nichtlinearen Kontaktproblemen von Vorteil ist. Vorangestellte Arbeiten zur Modellierung von Festkörperkontakten mit Reibung [5] zeigen, dass NURBS-basierte Verfahren sowohl die Spannungsauflösung verbessern als auch zur numerischen Stabilität beitragen können. Ein zentraler Bestandteil des entwickelten Modells ist die physikalisch konsistente Beschreibung kavitierter Bereiche im Schmierfilm. Zu diesem Zweck wurde eine massenerhaltende Kavitationsformulierung implementiert, die auf einem Konzept analog zur Augmented-Lagrange-Methode basiert (weitere Einzelheiten finden sich in [6], [7]) und gleichzeitig die explizite Modellierung der Komplementaritätsbedingungen zwischen Druck und Volumenanteil der Kavitation erlaubt. Für die numerische Umsetzung wurde eine Mortar-basierte Diskretisierungsstrategie gewählt, um Instabilitäten und Druckoszillationen zu vermeiden, wie sie typischerweise bei überbestimmten Systemen auftreten. Die Ergebnisse zeigten, dass insbesondere die Kombination

aus Mortar-Verfahren und NURBS-Basisfunktionen eine robuste und präzise Lösung des stark gekoppelten Problems ermöglicht. Zum Vergleich wurden zusätzlich klassische Lagrange-Basisfunktionen eingesetzt, wobei sich die NURBS-basierten Ansätze durch eine bessere Auflösung in Bereichen mit hohen Druckgradienten auszeichneten.

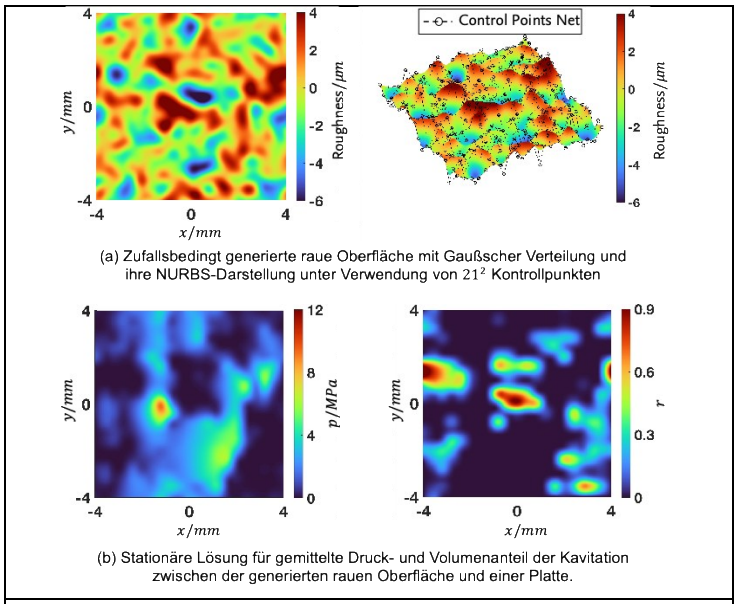


Abbildung 3: Ergebnisse einer zufallsbedingt generierten rauen Oberfläche und einer flachen Platte [6]

Die entwickelte Formulierung wurde zunächst auf ein Beispiel für die hydrodynamische Schmierung (ohne Berücksichtigung von Festkörperdeformationen) angewendet (vgl. Abbildung 3). Hierzu wurde ein vereinfachter Algorithmus auf Basis von NURBS-Basisfunktionen eingesetzt, um die Rauheitstopographie direkt aus zufällig generierten Höhendaten zu rekonstruieren. Die interpolierte NURBS-Oberfläche konnte ohne zusätzliche Vernetzung unmittelbar in das Modell integriert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die vorgeschlagene Formulierung auch bei komplexen Oberflächen zuverlässige Druckverteilungen und plausible Volumenanteile der Kavitation liefert.

Zur Beschreibung von EHL-Kontakten unter Berücksichtigung nichtlinearer Festkörperverformungen und Mangelschmierung wurde im Rahmen des Projekts ein neues EHL-Modell auf Basis von NURBS entwickelt (weitere Einzelheiten finden sich in der daraus hervorgegangenen Dissertation [8]). Das zuvor beschriebene massenerhaltende Kavitationsmodell wurde dabei in ein isogeometrisches Rahmenwerk integriert, das eine vollständige Kopplung zwischen Fluid- und Festkörperdomänen ermöglicht.

Die Kopplung erfolgt über eine konsistente Schwache Formulierung, in der sowohl die Kinematik des hyperelastischen Festkörpers als auch die hydrodynamischen Drücke und Schubspannungen im Fluid berücksichtigt werden. Für die Diskretisierung der Kontaktfläche kommt ein Mortar-Verfahren zum Einsatz, das eine flexible Auflösung in beiden Domänen erlaubt und numerische Stabilität bei stark gekoppelten Problemen gewährleistet.

Das entwickelte Modell ermöglicht die Untersuchung sowohl harter als auch weicher EHL-Kontakte. Besonders bei weichen Materialien wie Elastomeren können große Verformungen realistisch abgebildet werden, wodurch sich der Einfluss der Schmierstoffmenge unter praxisnahen Bedingungen systematisch analysieren lässt. Abbildung 4 zeigt ein numerisches Beispiel zur Untersuchung des Schmierverhaltens bei weichen EHL-Kontakten mit rauer Oberfläche (weitere Einzelheiten finden sich in [9]). Die obere Substratdomäne besteht aus einem verformbaren Festkörper mit statistisch isotroper Rauheit an der Unterseite. Ein starrer

Gegenkörper bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit in x-Richtung, während periodische Randbedingungen an den seitlichen Flächen definiert sind. Die Oberflächentopographie wurde mithilfe einer NURBS-Interpolation aus zufällig generierten Höhendaten erzeugt und direkt in das numerische Modell integriert. Das untere Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten und der Schmierstoffmenge für zwei unterschiedliche äußere Lasten. Die Ergebnisse verdeutlichen einen nichtlinearen Anstieg des Reibungskoeffizienten bei Unterschreiten einer bestimmten Schmierstoffmenge, was auf einen Übergang zur Trockenreibung hinweist. Abbildung 4 erweitert die in Abbildung 3 dargestellten Ergebnisse durch die Berechnung des Reibungskoeffizienten für eine Vielzahl von Kombinationen äußerer Belastungen und Schmierstoffmengen. Die so ermittelten Reibwerte zeigen qualitativ und quantitativ sehr gute Übereinstimmungen zu den in den experimentellen Ergebnissen dargestellten Verläufen (vergleiche Abbildungen 1 und 2b), so dass es im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstmals gelungen ist, den Einfluss der Fluidmenge auf die Reibeigenschaften nachzuweisen und zu bewerten.

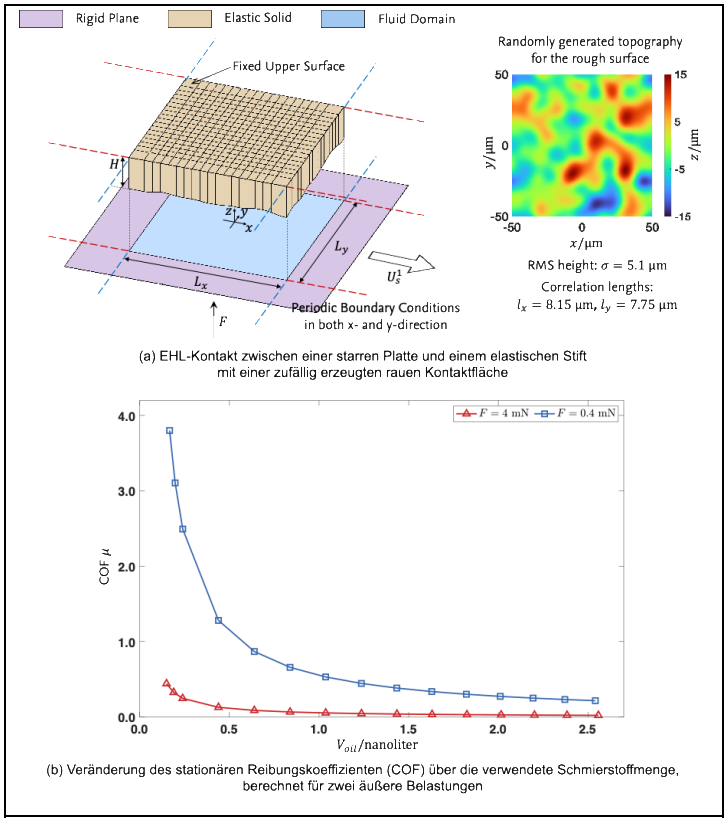


Abbildung 4 Korrelation zwischen dem Reibungskoeffizient und der Schmierstoffmenge bei einem EHL-Kontakt zwischen einer rauen Oberfläche und einer starren Platte aus [9]

Diese Sichtweise erlaubt auch eine Interpretation, welche die Stribeckkurve um eine weitere Dimension, die der Fluidmenge, erweitert ([9], vergleiche Abbildung 5). Diese Fläche stellt eine erweiterte Form der konventionellen Stribeck-Kurve dar, bei der die Schmierstoffmenge als unabhängige dritte Variable berücksichtigt wird. Auf diese Weise lassen sich Übergänge zwischen hydrodynamischer und nahezu trockenlaufender Schmierung unter Einbeziehung von Mangelschmierungseffekten systematisch analysieren. Die gewonnenen

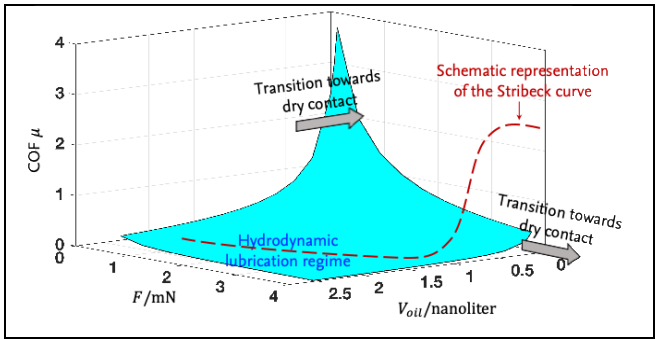


Abbildung 5 Erweiterung der konventionellen Stribeck-Kurve unter Berücksichtigung von Mangelschmierung [9]

Ergebnisse lassen sich auf praktische Anwendungen projizieren. So wurden beispielsweise Druckverläufe künstlicher Hüftgelenke [10] mit den hier entwickelten numerischen Verfahren simuliert und die FLUCS-Messungen auf eine Charakterisierung von Kühlschmierstoffen [11] erfolgreich angewandt. Die Methodiken zu den kontaktmechanischen Grundlagen werden bereits in weiterführenden (DFG-) Projekten umgesetzt. So werden einerseits Prozesse beim Nassschleifen (Projekt Nr. 498570013) und andererseits Gleitlager unter Minimalmengenschmierung untersucht (Projekt Nr. 527815977).

4 Veröffentlichte Projektergebnisse

4.1 Kategorie A – Fachaufsätze in Peer Review-Zeitschriften, Beiträge zu Konferenzen mit Peer Review oder Sammelbänden sowie Buchpublikationen

[1] M. Müller, L. Stahl, G.-P. Ostermeyer: *Studies on the Pressure Buildup and Shear Flow Factors in the Cavitation Regime*, Lubricants 2020, 8, 82.pp. https://doi.org/10.3390/lubricants8080082

[2] Stahl, L., Müller, M. & Ostermeyer, G. P. (2022). *On the experimental characterization oft he fluid volume influence on the friction between rough surfaces*. Friction. Doi: 10.1007/s40544-022-0683-9

[3] M. Müller, L. Stahl, G.-P. Ostermeyer: *Experimental Studies of Lubricant Flow and Friction in Partially Filled Gaps*, Lubricants 2018, 6, 110, pp 1-24, https://doi.org/10.3390/lubricants6040110

[4] Stahl, L., 2022, *Über den Einfluss der Fluidmenge auf die Kontaktmechanik bei geschmierten Systemen, Dissertation*, TU Braunschweig, 2022 https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202211201243-0

[5] Tong, Y., Müller, M., & Ostermeyer, G. P. (2021). *Investigations on the dynamic influence of the contact angle on frictional sliding processes between rough surfaces using NURBS and mortar-based augmented Lagrangian method*. Tribology International, 158, 106889. doi:10.1016/j.triboint.2021.106889.

[6] Tong, Y., Müller, M., & Ostermeyer, G. P. (2022). *A mortar-based cavitation formulation using NURBS-based isogeometric analysis*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 398, 115263. doi:10.1016/j.cma.2022.115263.

[7] Tong, Y., Müller, M., & Ostermeyer, G. P. (2023). *An arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation for the Reynolds equation considering the JFO boundary condition*. PAMM, 23(3), e202300216. doi:10.1002/pamm.202300216.

[8] Tong, Y., 2025. *A NURBS-Based Model for Elastohydrodynamically Lubricated Contacts.* Dissertation, Schriften des Instituts für Akustik und Dynamik. Institut für Akustik und Dynamik, Braunschweig. https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202412231058-0

[9] Y. Tong, M. Müller: *Investigation of starved soft EHL contacts using NURBS-based isogeometric analysis*, Tribology International, 212, (2025), 110965, https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110965

[10] Tong, Y., & Müller, M. (2024). *An Elastohydrodynamic Lubrication Framework for Hip Prostheses based on Isogeometric Analysis*. Technische Mechanik-European Journal of Engineering Mechanics, 44(2), 74-81. doi:10.24352/UB.OVGU-2024-056

[11] M. Müller, L. Stahl, R. Arafat, N. Madanchi, C. Herrmann: A case study on the observability of cutting fluid flow and the associated contact mechanics in scaled rough surfaces, SN Appl. Sci. 3, 570 (2021), pp 1-9 https://doi.org/10.1007/s42452-021-04572-x