

Raphael Scharf

Texturen in geschmierten Kontakten

Die Brücke zwischen Tragfähigkeitssteigerung und Reibungsreduktion

Etwa 20 % des weltweiten Gesamtenergiebedarfs gehen durch Reibungsverluste in unterschiedlichsten Kontakten verloren [1]. Reibung tritt überall dort auf, wo mindestens zwei Körper miteinander in Kontakt stehen und sich relativ zueinander bewegen. Insbesondere bei maschinenbaulichen Komponenten, wie sie in Motoren, Turbinen oder vergleichbaren Systemen eingesetzt werden, stellt Reibung seit langem ein zentrales Forschungsthema dar. Das entsprechende Fachgebiet ist die Tribologie (vom altgriechischen τριβειν / tribein – „reiben, abnutzen“), welche sich mit dem Reibungs- und Verschleißverhalten technischer Systeme befasst.

Ligier et al. [2] unterteilten die Möglichkeiten zur Reduktion von Reibung in drei grundlegende Kategorien. Ihren Ergebnissen zufolge kann Reibung durch die Modifikation der

- Werkstoffe der kontaktierenden Körper,
- Umgebungsbedingungen sowie
- Geometrie der kontaktierenden Körper

verringert werden [2].

Im Rahmen dieser Arbeit soll insbesondere auf den letztgenannten Aspekt, die Geometrie der Kontaktflächen, eingegangen werden. Ein anschauliches Beispiel für die gezielte Modifikation von Oberflächen findet sich in der Natur, etwa bei Fischen. In [3] wurde ein Fisch untersucht, wobei die Oberflächenstruktur mehrerer Schuppen vermessen wurde (vgl. Abbildung 1). Die Ergebnisse zeigen, dass diese Schuppen eine spezifische Geometrie aufweisen, die möglicherweise einen reibungsreduzierenden Effekt besitzt [3].

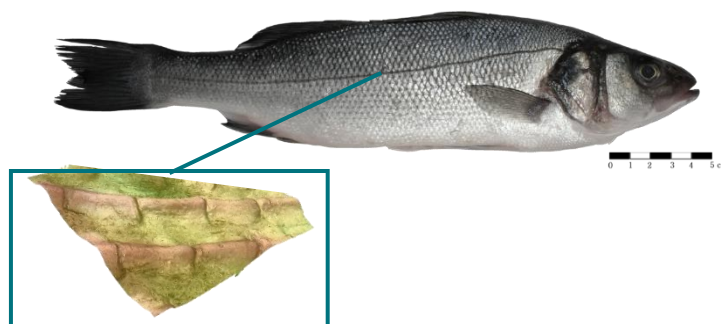


Abbildung 1 Fischeschuppen als Inspirationsquelle

Maschinenelemente sind jedoch nicht direkt mit umströmten Körpern, wie beispielsweise einem Fisch, vergleichbar. Dennoch kann die Natur als Inspirationsquelle für technische Anwendungen dienen [3].

Viele Maschinenelemente, die einer Relativbewegung ausgesetzt sind, werden durch ein Fluid geschmiert. Dabei kann es sich um Öl oder eine andere Flüssigkeit handeln, die an den Oberflächen der Körper haftet. Nähert sich ein Körper einem anderen an, entsteht im Fluid ein hydrodynamischer Druck. Dieses Phänomen wird in Maschinenelementen gezielt genutzt, um die Oberflächen voneinander zu trennen und somit Reibung und Verschleiß zu reduzieren. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist der konvergierende Schmierspalt, wie er in Abbildung 2 dargestellt ist. In diesem sich verengenden Schmierspalt bewegt sich Körper 2 relativ zu Körper 1. Das Fluid haftet an der Oberfläche der Körper und wird aufgrund der Relativbewegung mitgeführt, wodurch es in den Schmierspalt hineingezogen wird. Da die Oberfläche von Körper 1 geneigt ist, konvergiert der Schmierspalt, was zur Ausbildung eines hydrodynamischen Drucks im Fluid führt. Der dadurch entstehende Strömungswiderstand bewirkt eine Trennung der beiden Körper. Mit zunehmendem hydrodynamischem Druck steigt folglich die maximal übertragbare Last. [4]

Der in Abbildung 2 dargestellte Druckverlauf kann mithilfe physikalischer Gleichungen berechnet werden. Der mathematische Aufwand ist dabei erheblich, da eine partielle Differentialgleichung — eine Gleichung, in der sowohl die gesuchte Größe als auch deren Ableitungen auftreten — numerisch gelöst werden muss. In der Praxis wird hierfür die Navier-Stokes-Gleichung oder eine geeignete Vereinfachung dieser verwendet. [4]

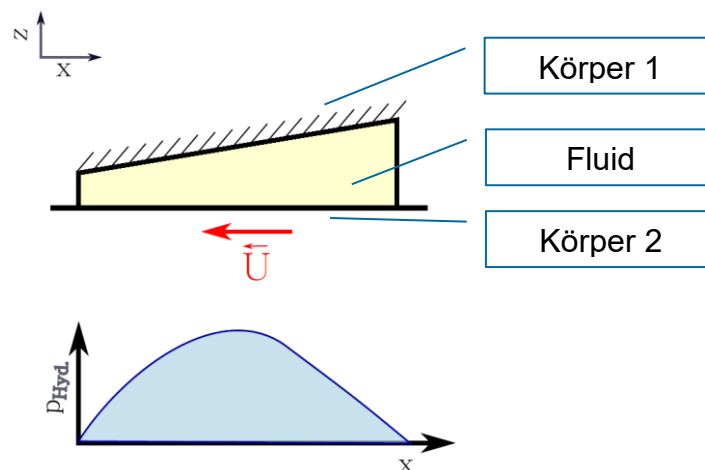


Abbildung 2 Konvergierender Schmierspalt

Da die Eigenschaften einer Oberflächenmodifikation stark von unterschiedlichen Parametern abhängen, ist ein numerisches Simulationsmodell zur Bewertung der Tragfähigkeit und der Reibkraft unerlässlich (vgl. Abbildung 3) [2,3,5]. Wie in Abbildung 3 dargestellt, wird hierzu zunächst eine geeignete Schmierspaltgeometrie benötigt. Dabei ist zu beachten, dass nicht die kontaktierenden Körper selbst, sondern ausschließlich der

Schmierspalt diskretisiert wird. Eine Erhöhung innerhalb der Schmierspaltgeometrie entspricht folglich einer Vertiefung in der Oberfläche des Körpers. Im nächsten Schritt werden die zu lösenden Gleichungen sowie die Randbedingungen definiert, welche von der jeweiligen technischen Realisierung abhängen. Als Ergebnis der Simulation erhält man ein Druck- und Geschwindigkeitsfeld im Schmierspalt. Diese Größen bilden die Grundlage zur Berechnung der Tragfähigkeit \vec{F}_{lift} sowie der Reibkraft \vec{F}_{drag} . Auf diese Weise können unterschiedliche Texturgeometrien systematisch miteinander verglichen werden. Ziel ist es dabei, eine möglichst hohe Tragfähigkeit bei gleichzeitig geringer Reibung zu erzielen.

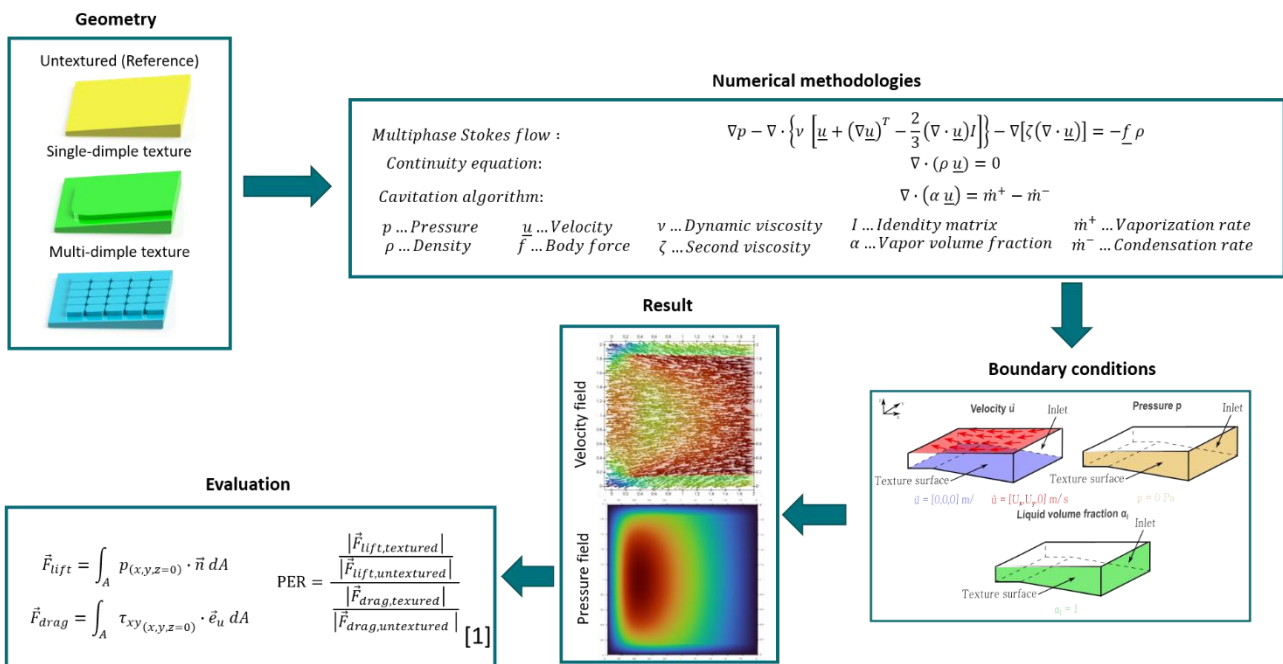


Abbildung 3 Simulationstheorie

Diese Texturen können durch unterschiedliche Verfahren gefertigt werden [6], wobei in Abbildung 4 Texturen, die durch Fräsen hergestellt werden, dargestellt sind. Hierbei rotiert das Werkzeug, in diesem Fall der Kugelfräser, und trägt so Material ab. Somit können die in Abbildung 4 dargestellten Taschen, mit einer Tiefe von 15 μm (im Vergleich dazu: ein Haar hat einen Durchmesser von etwa 40 bis 120 μm), gefertigt werden.

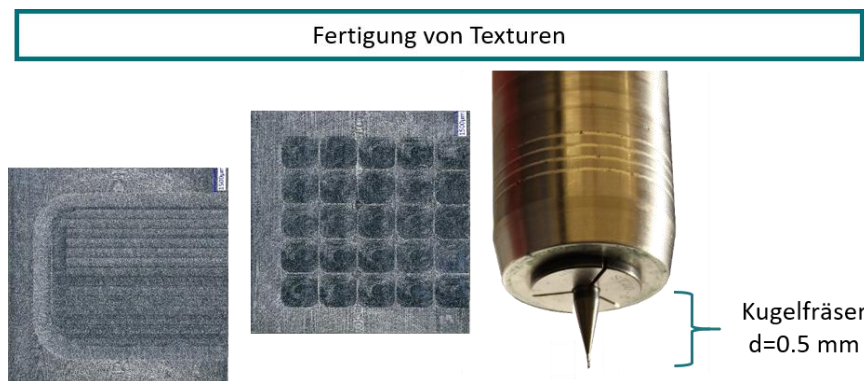


Abbildung 4 Fertigung der Texturen

Diese gefertigten Oberflächen können dann in geeignete Prüfstände eingebaut werden. Diese Prüfstände basieren auf der Methode, dass ein spezifischer Schmierpalt (Abstand zwischen den beiden Körper) zugewiesen wird, wobei zumindest ein Körper sich bewegt [7]. Die resultierende Tragfähigkeit \vec{F}_{lift} und Reibkraft \vec{F}_{drag} wird gemessen [7].

Die Ergebnisse eines solchen Versuchs sind in Abbildung 5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Tragfähigkeit beider texturierten Oberflächen deutlich höher ist als die der glatten Referenzprobe. Zudem weist die Textur mit einer einzelnen großen Tasche eine höhere Tragfähigkeit auf als die Textur mit mehreren kleinen Taschen. [7]

Hinsichtlich der Reibkraft zeigt sich, dass beide Texturen vergleichbare Werte aufweisen, während beide Oberflächenmodifikationen eine geringere Reibkraft als die glatte Referenzprobe besitzen. Insgesamt wird deutlich, dass Texturen gewissermaßen wie eine Brücke wirken, indem sie eine Erhöhung der Tragfähigkeit mit einer gleichzeitigen Reduktion der Reibung kombinieren. [7]

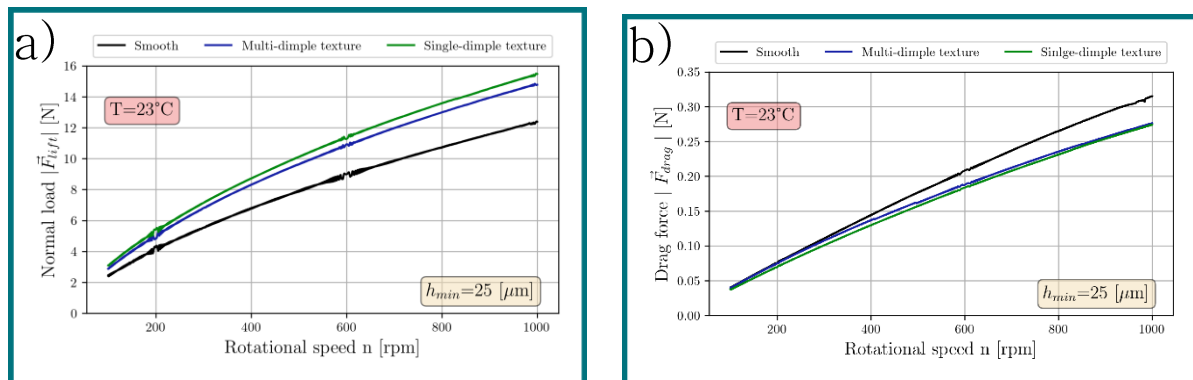


Abbildung 5 a) Tragfähigkeit - b) Reibkraft unterschiedlicher Texturen bei variierenden Geschwindigkeiten

Industrielle Anwendung

Hinsichtlich der industriellen Anwendung ist zwischen geometrisch definierten Texturen, wie sie in Abbildung 4 dargestellt sind, und unregelmäßigen, kratzartigen Strukturen auf der Oberfläche zu unterscheiden. Letztere werden bereits seit Jahrzehnten eingesetzt, beispielsweise in Kontakten zwischen Kolbenringen und Zylinderlaufbahnen. Die tribologischen Eigenschaften werden hierbei durch das gezielte, unregelmäßige Einbringen von Oberflächenstrukturen verbessert, da sich in den Vertiefungen Öreservoirs ausbilden und somit im Vergleich zu glatten Oberflächen mehr Schmierstoff zur Verfügung steht. [8]

Die in dieser Zusammenfassung vorgestellten geometrisch definierten Texturen finden bislang nur in geringem Umfang industrielle Anwendung, da sie weiterhin Gegenstand aktueller Forschung sind. Potenzielle Einsatzgebiete sind jedoch hydrodynamische Gleitlager, Werkzeuge oder Prothesen. [9]

Insbesondere eignen sich die dargestellten Texturen für hydrodynamische Axialgleitlager (vgl. Abbildung 6). Diese Maschinenelemente dienen der Aufnahme von Kräften in Achsrichtung und werden unter anderem in Pumpen und Turbinen eingesetzt. Sie fungieren als Trennelemente zwischen dem stationären Gehäuse und den rotierenden Komponenten einer Maschine. Die zuvor vorgestellten Schmierpaltgeometrien und Texturen stellen im Wesentlichen eine vereinfachte Abbildung des Schmierpalts dar, wie er in einem hydrodynamischen Axialgleitlager vorliegt. [9]

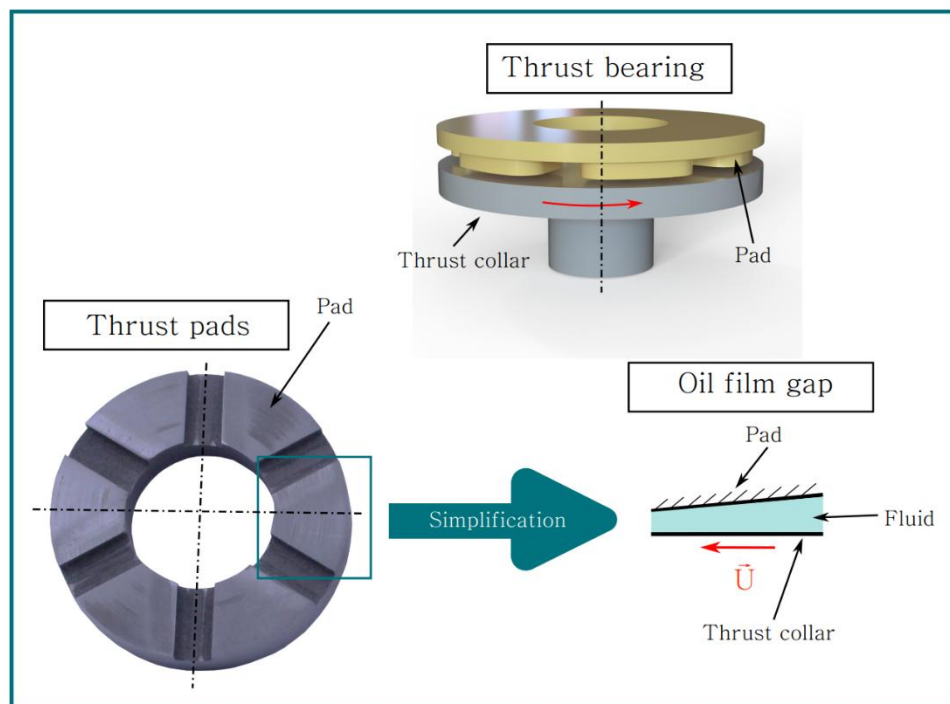


Abbildung 6 Hydrodynamische Axialgleitlager

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Idee der Texturen von der Natur kopiert wurde und diese die Tragfähigkeit steigern und die Reibung reduzieren können. Dennoch ist weitere Forschung nötig, um aus diesen Oberflächenmodifikationen eine stabile Brücke zwischen Tragfähigkeitssteigerung und Reibungsreduktion bauen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Holmberg, K.; Erdemir, A. The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribol. Int.* 2019, 135, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.024>.
- [2] J. Ligier and B. Noel. “Friction Reduction and Reliability for Engines Bearings”. In: *Lubricants* 3.3 (2015), pp. 569–596. doi: 10.3390/lubricants3030569.
- [3] R. Scharf, M. Maier, M. Pusterhofer, and F. Grün: A Comprehensive Numerical Study of a Wedge-Shaped Textured Convergent Oil Film Gap, *Lubricants*, vol. 12, no. 4, p. 121, 2024, doi: 10.3390/lubricants12040121
- [4] O. R. Lang and W. Steinhilper, *Gleitlager: Berechnung und Konstruktion von Gleitlagern mit konstanter und zeitlich 625 veränderlicher Belastung ; mit 6 Arbeitsblättern*, 1978th ed. Berlin: Springer, 2014.
- [5] Gherca, A. R., Maspeyrot, P., Hajjam, M., and Fatu, A. (2013). Influence of texture geometry on the hydrodynamic performances of parallel bearings. *Tribol. Trans.* 56 (3), 321–332. doi:10.1080/10402004.2012.752550
- [6] Costa, H. L., and Hutchings, Im (2015). Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes. *Proc. Institution Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* 229 (4), 429–448. doi:10.1177/1350650114539936
- [7] R. Scharf, M. Pusterhofer, F. Grün and P. Staudinger: Simulation-based parameter optimization and experimental assessment of single- and multi-dimple textures in full-film lubrication, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2026, doi: <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1749899>
- [8] Gussmagg, J.; Pusterhofer, M.; Summer, F.; Grün, F. Experimental visualization of the wear and scuffing evolution of a flake graphite cast iron cylinder liner. *Wear* 2023, 526, 204948.
- [9] Q. Xiao et al. “Beyond smoothness: the art of surface texturing battling against friction”. In: *International Journal of Extreme Manufacturing* 7.2 (2025), p. 022014. doi: 10.1088/2631-7990/ad9c01.