

Kurzfassung

Hydrostatische Pumpen und Motoren sind entscheidende Komponenten hydraulischer Systeme. Sie wandeln mechanische in hydraulische Energie und umgekehrt. Hydraulische Verdrängereinheiten und ihre auf Mineralöl basierenden Druckübertragungsmedien haben einen hohen Entwicklungsstand erreicht.

Die eingesetzten Fluide sind dabei häufig toxisch und nicht umweltverträglich. Umweltverträgliche Fluide (zum Beispiel synthetische Ester) dürfen keine toxischen Additive enthalten. Durch das Fehlen der Additive in biologisch schnell abbaubaren Fluiden weisen diese häufig schlechtere

tribologische Eigenschaften als Standardfluide auf. Wenn diese Fluide eingesetzt werden sollen, müssen wichtige tribologische Eigenschaften des Fluids wie Verschleißresistenz und Reibungsminderung

vom Fluid auf den Werkstoff übertragen werden. Dieses kann durch neue Beschichtungen erreicht werden.

In dieser Arbeit werden die Belastungen, welche in tribologischen Kontakten hydraulischer Axialkolbenpumpen

auftreten, berechnet. Anschließend werden die tribologischen Eigenschaften von Beschichtungen (Physical Vapour Deposition) untersucht und mit Standardwerkstoffen verglichen.

Zunächst werden grundlegende Ergebnisse zum Reibungs- und Verschleißverhalten unterschiedlicher

Werkstoffe aus praxisrelevanten Modellversuchen vorgestellt. Darauf aufbauend werden beschichtete

Kolben und Steuerspiegel einer Axialkolbenpumpe untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere

der Verschleißwiderstand der Komponenten durch die Beschichtung entscheidend erhöht werden kann. Weiterhin zeigen die Ergebnisse der grundlegenden Untersuchungen, dass durch die

Verwendung

von Beschichtungen ebenfalls der Reibwert entschieden verringert werden kann.

Abstract

Hydrostatic pumps and motors are essential components of hydraulic systems. They transform mechanical energy into hydraulic energy and vice versa. Hydrostatic displacement units and their standard fluids based on mineral oils have been developed to a high technical standard. The fluids in this case

are biologically harmful and often toxic. Fluids that are environmentally friendly (for example synthetic ester) must not include additives that are toxic. Due to the lack of additives, many environmentally

friendly fluids have worse tribological properties than standard fluids. To use these fluids successfully, important tribological qualities of the fluid like wear resistance and friction reduction must be transferred to the materials. This can be achieved by new coatings.

In the first part of this thesis the load occurs in the tribological contacts of axial piston pumps is calculated. In the second part the tribological properties of coatings (Physical Vapour Deposition) are investigated and compared to standard materials. We first present results concerning friction and wear from basic investigations with simplified specimen. Then coated pistons and valve plates in axial

piston pumps are investigated. The results show, that especially the wear resistance of components is decisively increased by coatings. Furthermore the results from fundamental investigations show that it is also possible to reduce the friction in tribological contacts by using special coatings.

15 Zusammenfassung und Ausblick

Der Wirkungsgrad und die Lebensdauer hydraulischer Verdichtungsereinheiten ist entscheidend von ihren tribologischen Systemen abhängig. In Achsialkolbeneinheiten sind das neben den Lagerungen die Kontakte Kolben/Buchse, Kolbentrommel/Steuer Spiegel, Kolben/Gleitschuh und Gleitschuh/Schraubscheibe.

Das tribologische Verhalten hängt dabei maßgeblich von den verwendeten Werkstoffen und Zwischenstoffen ab. Eine Verbesserung des Wirkungsgrads und der Lebensdauer ist somit durch die Veredelung der eingesetzten Werkstoffe möglich. Das tribologische Verhalten eines kostengünstigeren

Grundwerkstoffs, der die Volumenfunktion übernimmt, kann beispielsweise durch eine PVD-Beschichtung optimiert werden.

Belastungsanalyse

Hydrostatische Belastungsanalysen von Schraubscheibenpumpen ergeben, dass die auftretenden Kräfte

mit der Baugröße nahezu linear ansteigen. Da die geometrischen Abmaße und dadurch ebenfalls die

Kontaktflächen der Tribosysteme ansteigen, bleiben die Flächenpressungen in den unterschiedlichen

Baugrößen nahezu konstant. Dies ermöglicht die Übertragbarkeit optimierter Tribosysteme auf jede Baugröße. Weiterhin können grundsätzliche Belastungsanalysen auf eine Baugröße beschränkt werden.

Die zusätzliche Berücksichtigung der Hydrodynamik in der Belastungssimulation zeigt deutlich den großen Einfluss dieser Effekte auf die im tribologischen Kontakt Kolben/Buchse auftretenden Flächenpressungen. Gerade bei der Verwendung einer langen Buchse können durch Geometrieänderungen der Kolben- und Buchsenform starke Verringerungen der Belastungen erzielt werden.

Bei der Verwendung einer gut ausgelegten kurzen Buchse ist die erzielbare Verringerung bereits sehr viel kleiner. Es zeigt sich, dass durch geometrische Veränderungen Optimierungen des tribologischen Systems möglich sind. Diese sind jedoch stark von den vorhandenen geometrischen Randbedingungen

abhängig und müssen auf jedes System separat angepasst werden. Ähnliches gilt für die maximal

auftretenden Pressungen im Kontakt Kolben/Buchse, wenn sich der Kolben im unteren Totpunkt befindet und der hydrodynamische Schmierfilm zusammenbricht. Durch Geometrieänderungen der Buchsenkante kann diese so gestaltet werden, dass sie sich den auftretenden Belastungen in gewissen

Grenzen durch Verformung anpasst. Hier sind darüber hinaus vorhandene Geometriebedingungen wie

beispielsweise die Spaltweite zwischen Kolben und Buchse für die optimale Auslegung entscheidend. Grundsätzlich liegen die durchschnittlich auftretenden Druckspannungen in

Schraubscheibenpumpen

unter 200 N/mm^2 . Im Extremfall können auch höhere Pressungen auftreten, die noch weit unter den Spannungen liegen, die in beschichteten Zahnradern oder Schneidwerkzeugen auftreten.

Modelluntersuchungen

Grundlegende Untersuchungen verschiedener Schichtsysteme im Modellversuch nach Siebel und Kehl dienten zur Prüfung und Entwicklung neuer Schichtsysteme für den Einsatz in tribologischen Systemen hydraulischer Verdichtungsereinheiten. Da das tribologische Verhalten eingelaufener Systeme für den industriellen Einsatz von größerer Bedeutung ist als das von Neusystemen, wurden die Untersuchungen

hauptsächlich nach einem Einlaufprozess durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine Polierung der Substratoberfläche (Substratvorbehandlung) neben dem Einfluss der Schichthafungssteigerung

eine Verbesserung der tribologischen Eigenschaften hervorruft. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die meisten PVD-Beschichtungsverfahren neben der guten Formabbildung des Substrats die Oberflächenstruktur nur gering verändern. Hierdurch liegt auch nach dem Beschichtungsprozess eine Oberfläche vor, die einer polierten Oberfläche ähnelt. Eine Trennung der im Kontakt befindlichen Oberflächen ist damit bereits durch geringe Schmierfilmdicken möglich. Jedoch existieren auch Schichtsysteme, welche die Oberflächenrauigkeit soweit ändern, dass eine Oberflächenglättung des Substrats vor dem Beschichtungsprozess keinen Einfluss auf das tribologische Verhalten aufweist. Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass eine hohe Oberflächenrauigkeit und vereinzelte Rauigkeitsspitzen einen negativen Einfluss auf das tribologische Verhalten aufweisen. Vereinzelte Rauigkeitstaler oder Ausbrüche besitzen einen geringeren Einfluss. Standardschichtsysteme, die hauptsächlich für den Einsatz in Schneidwerkzeugen (Bohrer, Fräser, Drehmeißel) entwickelt wurden, zeigen durch ihre hohe Härte zwar einen geringen Verschleiß der Beschichtung, allerdings tritt am Gegenkörper ein erhöhter Verschleiß auf. Anpassungsprozesse des Schichtsystems (z.B. Glättung der Oberfläche) finden bei diesen Schichtsystemen nicht statt. Ein Einsatz dieser Tribosysteme ist trotz eines geringen Haftreibungswerts für die hier untersuchten Anwendungen nicht empfehlenswert. Der Einsatz von Festschmierstoffen kann das tribologische Verhalten bereits entscheidend verbessern. Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass die Art und Weise wie der Festschmierstoff in das Schichtsystem eingebaut wird, einen großen Einfluss auf das tribologische Verhalten hat. Aus diesen Erkenntnissen wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften der RWTH Aachen ein gradiertes Schichtsystem aus den Bestandteilen Hafnium und Kohlenstoff entwickelt. Dieses Schichtsystem weist durch seinen charakteristischen Aufbau einen weichen Härteübergang zwischen Substrat und Schicht, eine harte Mittelschicht (Karbide) und eine weiche Toplage auf. Durch die Gradierung finden sich auch in der Schicht keine sprunghaften Härteänderungen. Dieser Aufbau bietet dem Schichtsystem die Möglichkeit, sich an die auftretenden Belastungen selbständig anzupassen. Durch einen geringen Abtrag des weichen Toplayers wird die Oberfläche geglättet, so dass eine selbständige Optimierung der Oberflächenrauigkeit während des Betriebs auftritt. Ein Poliervorgang des Substrats zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens wird damit überflüssig. Weiterhin wird durch den Abtrag das Härteniveau der Schichtoberfläche solange erhöht, bis es mit dem des Gegenkörpers identisch ist. Hierdurch passt sich die Schicht selbständig an den Gegenkörper an, so dass auch Veränderungen der Gegenkörperhärte durch die Schicht ausgeglichen werden können. Das Schichtsystem HfCg zeigte hervorragende tribologische Eigenschaften im Modellversuch. Auch bei einer Erhöhung der Flächenpressung oder der Versuchszeit kann keine Verschlechterung des tribologischen Verhaltens oder ein weiteres Verschleifen des Schichtsystems festgestellt werden. Da Hafnium zur Zeit ein sehr teures Targetmaterial ist, wurde es im nächsten Arbeitsschritt durch Zirkon ersetzt. Um ein Schichtsystem mit gleichwertigen tribologischen Eigenschaften zu finden, wurden verschiedene Zusammensetzungen der ZrC-Schicht geprüft. Aufbauend auf diesen Ergebnissen konnte ein Schichtsystem ZrCg entwickelt werden, das im Modellversuch ähnlich gute tribologische Eigenschaften wie HfCg aufweist.

Alle geprüften Schichtsysteme weisen gegenüber Erosionserscheinungen (Kavitation- und Partikelerosion)

nur eine geringe Resistenz auf. Ein Schutz der Oberflächen kann durch die geprüften Materialien nicht gewährleistet werden.

Pumpenversuche

Die Übertragung der Schichten auf eine hydraulische Verdüngerereinheit sowie die grundsätzliche

Funktionsfähigkeit von PVD-Schichten in Verdüngerereinheiten wurde mittels Pumpenversuchen analysiert.

Die Untersuchung mit einer PVD-beschichteten Pumpe zeigte die grundsätzliche Einsatztauglichkeit von PVD-Beschichtungen in hydraulischen Verdüngerereinheiten. Trotz der Mängel des Prototypens im Hinblick auf die Geometrie der Kolben und Buchsen sowie der Anpassung der Sphärenradien

von Steuerspiegel und Kolbentrommel reichte die Schichthaftung aus, so dass es zu keiner Schichtablösung kam. Eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Einsatz von PVD-Schichten in Verdüngerereinheiten ist somit erfüllt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Schichthaftung von vielen

Parametern abhängt, die aufeinander abgestimmt werden müssen. Hier ist besonders die Materialwahl

des Substratwerkstoffes, die Bauteilgeometrie, die Wahl von optimalen Haftsichten, die zwischen Substrat und Funktionsschicht eingebracht werden, sowie die während des Beschichtungsprozesses eingestellten Prozessparameter zu nennen.

Durch den Einsatz von PVD-Schichten in Kombination mit vergütetem 42CrMo4 konnte der Verschleiß

der Bauteile durch Partikelkontamination des Druckübertragungsmediums bis zu 95% reduziert werden (Steuerspiegel). Geringe Verschleißerscheinungen treten lediglich durch Mängel des Prototypens

auf und verursachen nur eine minimale Leckageerhöhung. Bei den geprüften PVD-Pumpen treten die entscheidenden Leckageerhöhungen am Tribosystem Gleitschuh/Schrägscheibe auf, da hier

(wie in der Referenzpumpe) auf die Materialpaarung Bronze/Stahl zurückgegriffen wurde. Die Ergebnisse

zeigen deutlich, dass die Verschleißresistenz durch PVD-Schichten stark erhöht werden kann. Ein Steuerspiegel mit einer ZrCg-Beschichtung und Kolben mit einer HfCg-Beschichtung, die in hydraulischen

Verdüngerereinheiten geprüft wurden, zeigten ähnliche Einglättungs- und Anpassungserscheinungen

wie in den vorher durchgeführten Modellversuchen. Die Übertragung der Schichtsysteme vom Modellversuch auf hydraulische Verdüngerereinheiten war hier bereits in Grenzen erfolgreich.

Ausblick

Die Weiterentwicklung hydraulischer Verdüngerereinheiten trifft durch die Verwendung klassischer Hart-Weich-Paarungen an ihre Grenzen. Durch den Einsatz von PVD-Schichtsystemen ist es in Zukunft möglich, die jetzigen Grenzen zu überschreiten und beispielsweise einen höheren Wirkungsgrad, eine bessere Verschleißresistenz oder eine höhere Leistungsdichte zu erzielen. Weiterhin wird bei Verwendung von biologisch schnell abbaubaren Fluiden ohne Einsatz komplexer Additivpakete ein Leistungserhalt der Eigenschaften nur möglich, wenn tribologische Aufgaben von den Additiven auf neue Werkstoffe übertragen werden. Die PVD-Beschichtungstechnik wird in Zukunft ein wichtiges Konstruktionselement werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Funktionsfähigkeit von vielen Parametern abhängt. Dabei sind neben der Bauteilgeometrie und -belastung ebenso die

Substratwahl und -vorbehandlung sowie die Anpassung von Substrat und Schichtsystem entscheidend.

Auch die Vielzahl von Parametern des Beschichtungsprozesses hat einen großen Einfluss auf

die Schichtfunktion. Ein Schichtsystem mit gleichen Inhaltsstoffen und gleicher Bezeichnung kann dadurch völlig unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Ein erfolgreicher Einsatz von PVD-Schichtsystemen in hydraulischen Verdichtungsgeräten ist nur möglich, wenn alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Das grundsätzliche Konzept

graduierter Schichtsysteme, wie sie in dieser Arbeit betrachtet wurden, scheint dabei das vielversprechendste Konzept

zu sein. Dabei ist jedoch nicht zu vernachlässigen, dass für viele Tribosysteme eine spezielle Anpassung der Schichtsysteme erforderlich ist.

Die hier durchgeführten Arbeiten werden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 442 "Umweltverträgliche Tribosysteme durch geeignete Werkstoffverbunde und Zwischenstoffe am Beispiel der Werkzeugmaschine" am IFAS1 weitergeführt.

..