

## **Kurzfassung**

Die Verluste hydrostatischer Maschinen entstehen hauptsächlich in den Fugen zwischen den beweglichen Teilen der Maschine. Zum einen trennen die Fugen bewegliche Teile und üben eine Lagerfunktion aus, zum anderen übernehmen sie gleichzeitig auch noch eine Dichtfunktion zwischen Räumen unterschiedlichen Druckniveaus. Die Minimierung der durch Reibung und Leckage entstehenden Verluste an diesen Stellen ist für den Betrieb kostengünstiger Anlagen unumgänglich.

In dieser Arbeit werden zunächst die mathematischen Grundlagen für die Verlustermittlung in den Fugen hergeleitet. Ausgehend von den allgemeinen Strömungsgleichungen wird mittels eines Ansatzes zur Beschreibung von laminaren Strömungen im Mischreibungsgebiet die Berechnung der Druckverteilung, sowie der Reibung und Leckage erläutert. Auf dieser Basis entstand ein Simulationsprogramm, welches die Verluste einer Maschine in verschiedenen Arbeitspunkten ermittelt. Mit Hilfe geeigneter Prüfstands- und Messtechnik werden die Berechnungen verifiziert. Abschließend werden die Möglichkeiten der Simulation an verschiedenen Beispielen aufgezeigt.

## **Abstract**

The losses in hydrostatic machines are developing from the gaps between parts with relative movement mainly. One function of these gaps is the separation and bearing of moving parts, another function is sealing chambers with different pressure level against each other. Minimization of friction and leakage and there from resulting losses of the complete machine is absolutely mandatory for energy and cost saving installations.

This thesis explains the PC based simulation of machine losses. Based on general flow equations a method is used for describing laminar flow in mixed friction area for calculation of pressure distribution, friction and leakage. Out of this a simulation program is developed which evaluates the losses of a hydrostatic machine in different points of operations. With the usage of appropriate test rigs and sensors for pressure,

displacement, force and temperature the calculation results are verified. Finally several examples demonstrate the capabilities of the simulation tool.

## 1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den hydrostatischen und hydrodynamischen Dicht- und Lagerfugen hydraulischer Maschinen. Funktionsfähigkeit, Wirkungsgrade und Lebensdauer dieser Maschinen hängen im wesentlichen von der Gestaltung dieser Lagerfugen ab. Da deren Auslegung bisher meist empirisch erfolgt, sollte mit dieser Arbeit ein Handwerkszeug erstellt werden, dass die genaue Berechnung ermöglicht. Auf Grundlage der allgemeinen Strömungsgleichungen sind die für den laminar durchströmten Spalt gültigen Vereinfachungen getroffen worden. Daraus ergibt sich die mehrdimensionale Reynolds'sche Differentialgleichung, die, zusammen mit Stoffgleichungen, welche das physikalische Verhalten des flüssigen Trennmediums beschreiben, das Strömungsverhalten im Laminarspalt wiedergibt. Aus dem Strömungsverhalten und den Randbedingungen, also anliegende Randdrücke, Relativgeschwindigkeiten der Flächen, Temperaturen u.a. kann die Druckverteilung im Spalt berechnet werden. Da die betrachteten Spalten von technischen Oberflächen gebildet werden, ist darüber hinaus ein Ansatz zur Berechnung des Spaltdruckes im Bereich der Mischreibung hinzugefügt worden. Die Lösung dieser mehrdimensionalen Gleichung kann nicht mehr analytisch erfolgen, weshalb hier numerische Verfahren zum Einsatz kommen. Aufgrund der Leistungsfähigkeit heute üblicher Personalcomputer erfolgt die numerische Lösung der mehrdimensionalen Reynoldsgleichung in wenigen Millisekunden.

Die den Spalt begrenzenden Flächen bewegen sich relativ zueinander, wobei die Bewegung von allen an die entsprechenden Körper angreifenden Kräfte abhängig ist. Für das Beispiel einer Axialkolbenpumpe wurden die Kraftgleichungen ermittelt und daraus die Gleichungssysteme für die verschiedenen Spalten (Gleitschuh-Scheibe, Kugel-Kugelkopf, Kolben-Zylinder und Steuerspiegel-Kolbentrommel) aufgestellt. Mit einem entsprechenden iterativen Verfahren können die Gleichungssysteme gelöst werden. Daraus ergeben sich für ein Arbeitspiel einer Axialkolbenpumpe die den Konstrukteur interessierenden Größen Reibverlust und Leckage. Mit Hilfe der minimalen Spaltweite kann darüber hinaus die Gültigkeit der Berechnung überprüft werden bzw. ein eventuell auftretender Mischreibungskontakt ermittelt und durch Modifikation der Konstruktionsparameter verhindert werden.

Zur Überprüfung der Gültigkeit der Berechnungen wurden verschiedene Prüfaufbauten realisiert. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge und der extrem schwierig zugänglichen Spalten in Maschinen sind Messungen an der realen Maschine kaum möglich. Deshalb wurden

Modellprüfstände aufgebaut, die aufgrund ihrer Vereinfachungen eine optimale Vergleichsmöglichkeit boten. Mit Hilfe geeigneter Messtechnik konnten die entscheidenden Berechnungen verifiziert werden. Dies wurde sowohl für statische als auch für dynamische Vorgänge durchgeführt.

Die Möglichkeiten, die ein solches Simulationsprogramm bietet, wurden anhand von Beispielen dargestellt. Die Auswahl der Beispiele erfolgte, um zu zeigen, welche Auswirkungen makrogeometrische Änderungen bei einer Konstruktion haben. Natürlich ist es darüber hinaus auch möglich, die Dicht- und Lagerfugen mit Hilfe von Formänderungen im Mikrometerbereich zu optimieren. Diese sind jedoch in einer kostengünstigen Fertigung nur schwer zu realisieren. Deshalb wird die Simulation sinnvoller für Untersuchungen der Auswirkungen von fertigungsbedingten Formänderungen eingesetzt.

Ein Bereich, der in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet wurde, ist der thermische Einfluss auf die Funktion der Spalten. Sowohl die durch Berechnungen als auch die messtechnisch erworbenen Erkenntnisse ergaben zwar keine signifikante Beeinflussung, jedoch ist hierzu anzumerken, dass zum einen die messtechnische Erfassung schwierig ist, zum anderen ist die Berechnung wesentlich von den getroffenen Annahmen für die Randbedingungen abhängig und damit naturgemäß nicht präzise ist. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge innerhalb dieser Thematik sollte dies unabhängig untersucht werden, wie dies auch geschieht /O2/. Aufgrund der immer weiter steigenden Leistungsfähigkeit der Rechner ist zudem in Zukunft eine weitaus komplexere Betrachtung möglich, ohne dabei die Handhabung der Berechnungsprogramme zu verschlechtern.

Ein zusätzliche Vervollständigung ist durch die Einbeziehung weiterer Vorgänge in einer hydraulischen Maschine möglich. Beispielhaft sei hier die Berechnung des Druckes im Kolbenraum genannt, der eine der Randbedingungen der in dieser Arbeit beschriebenen Berechnung darstellt. Damit ergäbe sich ein komplexes Programm, das eine hohes Maß an Information bereitstellen würde.