

## 8. Zusammenfassung

Neue Erkenntnisse in der Meßtechnik, insbesondere bei der Entwicklung aufgabenspezifischer Sensoren, eröffnen in der Dichtungstechnik den Zugang zu bisher technisch-wissenschaftlich nur unvollständig erfaßten physikalischen Vorgängen in Dichtspalten. Mit Hilfe von neuentwickelten Oberflächensensoren, die auf der Kolbenstange angebracht werden können, wurden die Meßgrößen Druck, Temperatur und Filmhöhe im Dichtspalt unter praxisnahen Bedingungen synchron aufgenommen und in ihrer genauen Zuordnung zu dem Dichtungsprofil dargestellt. Derartige Meßkurven lassen eine verfeinerte Analyse der tribologischen Vorgänge im Dichtspalt und somit Rückschlüsse auf die Betriebs-eigenschaften der Dichtung zu.

Die Erfassung der Reibkraft einer einzelnen Dichtung stellt die Meßtechnik vor schwierige Probleme. Mittels eines speziellen Prüfstandsbaus, der im wesentlichen durch eine in der Mitte geteilte Kolbenstange und durch eine berührungslose Abdichtung der Stoßstelle der beiden Kolbenstangenhälften gekennzeichnet ist, wird die genaue Reibkraftmessung in Abhängigkeit von der Hubrichtung ermöglicht.

Unter Anwendung dieser neuartigen Meßverfahren wurden diverse Polyurethan-Nutringe mit verschiedenen Querschnittsgeometrien, eine NBR-Kompaktdichtung und ein PTFE-Dichtkantenring untersucht. Diese Dichtungen repräsentieren den Stand der Dichtungstechnologie.

Nutringe aus Polyurethan gelten als zuverlässige Dichtelemente auch bei schweren Einsätzen. In den Druckverläufen aller untersuchten Nutringe konnte eine ausgeprägte Druckspitze unter der Dichtkante zumindestens beim ausfahrenden Hub festgestellt werden. Dies bedeutet eine starke Abstreifwirkung der Dichtkante beim ausfahrenden Hub. An der Dichtungsferse wurde ein großer Anstieg des Druckes gemessen, der die Rückförderung des Restölfilms auf der Kolbenstange beim einfahrenden Hub beschränkt. Es stellte sich heraus, daß die untersuchten Nutringe bei den gefahrenen Betriebsbedingungen fast ausschließlich in einem Mischreibungsbereich arbeiten und durch Variation der Betriebsparameter wie Druck, Geschwindigkeit und Öltemperatur nur die prozentualen Anteile der hydrodynamischen Reibung beeinflußt werden können. Somit sind in den gemessenen Reibkraftverläufen der Polyurethan-Nutringe sowohl die hydrodynamisch beeinflussten als auch durch die Festkörperreibung bedingten Charakteristika zu erkennen. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ergeben sich Reibkraftverläufe, die der *Stribeck*-Kurve gleichen. Aufgrund

der Hubrichtungsabhängigen Schmierverhältnisse im Dichtspalt ist die Reibkraft beim einfahrenden Hub größer als beim ausfahrenden. Mit zunehmendem Betriebsdruck steigt die Reibkraft degressiv an. Dieses resultiert aus der degressiven Zunahme der wahren Kontaktfläche zwischen Dichtung und Kolbenstange beim steigenden Betriebsdruck.

Die einzelnen Konstruktionsdetails der untersuchten Nutringe lassen sich deutlich in ihren Druckprofilen erkennen, führen aber nicht zu einem wesentlichen Unterschied in ihrem Reibverhalten. Der Grund dafür ist, daß wegen der vorliegenden Mischreibung die Reibkraft in einem hohen Maß von dem Dichtungswerkstoff sowie von der Größe der Kontaktfläche zwischen Dichtung und Kolbenstange bestimmt wird. Die Reibkräfte der Polyurethan-Nutringe verschiedener Geometrien unterscheiden sich vor allem im Bereich niedriger Drücke, in dem die Dichtung noch nicht ausgeformt ist.

Bei der NBR-Kompaktdichtung konnte der Schmierfilmhöhenverlauf im Dichtspalt gemessen werden. Die Schmierfilmhöhe ist sehr klein und beträgt an vielen Stellen nur noch wenige Nanometer, so daß hier nicht mehr eindeutig von einem Schmierpalt ausgegangen werden kann. Die Dichtung zeigt Eigenschaften, die auf einen Mischreibungszustand rückschließen lassen.

Unter dem PTFE-Dichtkantenring wurde ein annähernd dreieckförmiges Druckprofil mit einem relativ flachen Druckanstieg auf der druckabgewandten Seite gemessen. Dichtungstechnisch ist dieser Druckverlauf günstig, da der beim vorangegangenen ausfahrenden Hub herausgeschleppte und auf der Kolbenstange anhaftende Ölfilm beim einfahrenden Hub wieder in den Zylinder rückgefördert werden kann. Dadurch wird eine hohe dynamische Dichtheit erzielt. Der PTFE-Dichtkantenring weist ein günstiges Reibverhalten auf. Die gemessenen Reibkräfte liegen im Vergleich zu den entsprechenden Werten von Polyurethan-Nutringen vielfach niedriger. Zudem wurde am Prüfstand auch bei sehr kleinen Geschwindigkeiten kein Stick-Slip-Effekt beobachtet.

Bei der Untersuchung an vorgealterten Polyurethan-Nutringen stellte sich heraus, daß sich die Schmier- und Reibverhältnisse im Dichtspalt mit zunehmender Laufleistung in einer charakteristischen Weise ändern. Aufgrund des Verschleisses der Dichtkante läßt die Abstreifwirkung der Dichtung bei hoher Laufleistung nach, welches zur Begünstigung der Schmierfilmbildung im Dichtspalt und zur Reduzierung der Reibkraft beim ausfahrenden Hub führt. Beim einfahrenden Hub geht der degressive Reibkraft-Druck-Verlauf mit zunehmender Laufleistung in einen annähernd linearen Verlauf über. Die beim hohen Systemdruck auftre-

tende Spaltextrusion läßt sich deutlich in den gemessenen Druckprofilen erkennen.

Im Vergleich zu Polyurethan-Nutringen zeigte der PTFE-Dichtkantenring ein ausgeprägtes Einlaufverhalten. Innerhalb einer kurzen Einlaufstrecke trat eine große Veränderung sowohl im Druckverlauf im Dichtspalt als auch in der Reibkraft ein. Bei einer Steigerung der Laufleistung bis auf 211 km änderte sich der Druckverlauf im Dichtspalt und die Reibkraft jedoch nur unwesentlich.