

18th ISC

Stuttgart, Germany
Oct. 8-9, 2014



International Sealing Conference *Internationale Dichtungstagung*

Eine Kooperation von



Fluidtechnik

18th ISC

International Sealing Conference
Internationale Dichtungstagung

Stuttgart, Germany
October 08–09, 2014

Sealing Technology –
Hidden High Tech

*Dichtungstechnik –
Hightech im Verborgenen*

Copyright VDMA Fluidtechnik, 2014

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in retrieval systems, or transmitted, in any form by any means without the prior permission of the publisher.

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne die vorherige Zustimmung des Herausgebers vervielfältigt, gespeichert oder übertragen werden.

Gesamtherstellung:
Leithner's Shop UG

FACHVERBAND FLUIDTECHNIK
IM VDMA e.V.
Lyoner Strasse 18
60528 Frankfurt am Main
Germany

Phone	+49 69 6603-1318
Fax	+49 69 6603-2318
E-Mail	christian.geis@vdma.org
Internet	www.vdma.org/fluid

ISBN 978-3-00-046879-7

Bewertung von Radial-Wellendichtungen anhand des Förderwerts

Dipl.-Ing. Marco Remppis, Dr.-Ing. Frank Bauer,
Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas
Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Germany

1 Einleitung

Radial-Wellendichtringe (RWDR) aus Elastomer werden in vielen Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau eingesetzt. Als Dichtsystem wird hierbei der Dichtring, die Welle als Dichtungsgegenläufigkeit und das abzudichtende Fluid betrachtet. Eine ausreichende Schmierung der Kontaktzone im Betrieb ist notwendig, da es ansonsten zu Verschleiß oder zur thermischen Schädigung der Elastomerdichtkante kommt. Das Fluid muss in den Dichtspalt eindringen, allerdings darf auf der Luftseite keine Leckage austreten.

Die dynamische Dichtigkeit von Elastomer-RWDR beruht auf deren Fähigkeit, Schmierstoff aktiv von der Luftseite zurück in den Ölraum zu fördern. Infolge der Rückförderung des Dichtrings tritt an der Luft- bzw. Bodenseite keine Leckage aus. Die Höhe des Förderwerts bestimmt die Dichtsicherheit des Systems und ist folglich eine wichtige Eigenschaft, s. Bild 1.

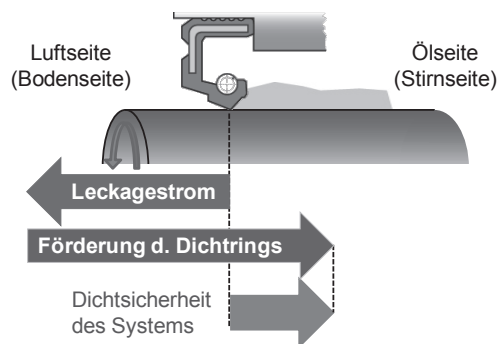


Bild 1: Schematische Darstellung des Dichtmechanismus und der Dichtsicherheit

Wie es zur Fluidförderung kommt, wird durch mehrere Förderhypothesen beschrieben, siehe z.B. [1]. Eine Berechnung von realitätsnahen Förderwerten für unterschiedliche Systemparameter ist nach dem aktuellen Stand der Technik jedoch nicht möglich. Analytische Modelle zur Berechnung der Fluidförderung durch das Dichtelement in [2] und [3] beruhen auf Berechnungsgrundlagen einer Gewindewellendichtung und sind damit stark vereinfacht. Der aktuelle Stand numerischer elasto-hydrodynamischer Modelle (EHD-Modelle) zum Betriebsverhalten von RWDR wird von Salant in [4] und [5] zusammengefasst. Teilaspekte der Vorgänge im Dichtspalt können abgebildet werden. Ein Simulationsmodell zur Berechnung realitätsnaher Förderwerte für unterschiedliche Betriebsbedingungen existiert jedoch nicht. Das System physikalisch korrekt mit allen Einflüssen in einem Simulationsmodell zu erfassen erscheint aktuell unmöglich, wie Salant in [6] verdeutlicht. Die Systemauslegung über den Weg der Simulation ist derzeit ausgeschlossen.

In diesem Beitrag wird ein empirischer Ansatz verfolgt. Der Zusammenhang zwischen Einflussparametern und Förderwert wird durch Prüfstandsuntersuchungen ermittelt und anhand eines empirischen Berechnungsmodells beschrieben. Die vorgestellten Ergebnisse wurden größtenteils im Rahmen von [7] erarbeitet und bereits veröffentlicht. Darüber hinaus enthält der Beitrag Ergebnisse weiterführender Untersuchungen.

2 Vorgehensweise

Im Folgenden werden der Versuchsaufbau, die Variation der Versuchsparameter sowie die Methodik bei der Auswertung und Modellbildung beschrieben.

2.1 Versuchsaufbau

Alle Förderwertmessungen wurden mit der Methode des inversen Einbaus durchgeführt. Der RWDR wird dabei entgegen seiner eigentlichen Einbaurichtung montiert. Durch den inversen Einbau ist die Bodenseite nun dem Öl zugewandt und die Stirnseite befindet sich auf der Luftseite (s. Bild 2). Die Ölkammer wurde jeweils bis zur Wellenmitte mit Öl gefüllt. Bei Rotation der Welle beginnt der RWDR das Öl aus der Kammer zu fördern. Es stellt sich eine kontinuierliche Förderung ein.

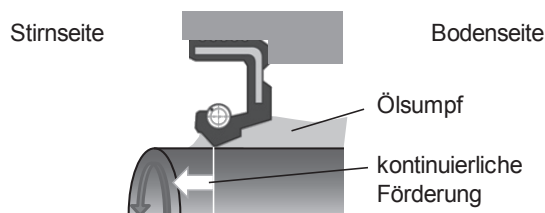


Bild 2: Kontinuierliche Förderung durch inversen Einbau des Dichtrings

Der Ölsumpf wurde jeweils auf $\vartheta = 40^\circ\text{C}$ temperiert. Die Versuchszeit betrug $\Delta t = 10$ h, eine Einlaufphase war nicht vorgesehen. Das während der Versuchszeit geförderte Öl wurde in einem Becherglas aufgefangen und anschließend gewogen. Aus der Masse Δm des Öls und der Förderzeit kann schließlich ein Förderwert FW bestimmt werden:

$$FW = \frac{\Delta m}{\pi \cdot d \cdot \Delta t \cdot \rho \cdot n} \quad (\text{Gl.1})$$

Dabei sind: FW : Normierter Förderwert als Volumen pro Rotationsweg;
 Δm : Masse des geförderten Schmierstoffs, $\pi \cdot d$: Umfang der Welle,
 Δt : Förderzeit; ρ : Dichte des Schmierstoffs; n : Drehzahl.

2.2 Variation der Versuchsparameter

Bei den Untersuchungen wurden alle Komponenten des Dichtsystems variiert, das Dichtelement, die Dichtungsgegenlauffläche sowie der Schmierstoff.

Untersuchte Dichtringe: Es wurden zwei Standard-RWDR ohne Schutzlippe vom selben Hersteller verwendet, ein Dichtring mit gestochener Dichtkante und einem Fluorkautschuk (FKM) als Grundwerkstoff sowie ein Dichtring mit gespritzter Dichtkante und einem Nitrilkautschuk (NBR) als Grundwerkstoff. Es wurden jeweils Dichtringe verschiedener Abmessungen verwendet, mit Abdichtdurchmessern zwischen 20 mm und 100 mm. In Stichversuchen wurden vergleichbare Standard-RWDR von anderen Herstellern untersucht.

Dichtungsgegenlaufflächen: Als Dichtungsgegenlaufflächen wurden vorwiegend im Einstich geschliffene Wellenhülsen aus 100Cr6 verwendet. Die Oberflächenrauheit der Wellenhülsen wurde zwischen $Rz = 1 \mu\text{m}$ und $Rz = 7 \mu\text{m}$ variiert. Ergänzende Untersuchungen wurden mit hartgedrehten, rollierten und kugelgestrahlten Wellenhülsen durchgeführt.

Schmierstoffe: Als Schmierstoffe wurden sowohl Öle auf Mineralölbasis als auch synthetische Öle (Polyglykol, Polyalphaolephin, Ester) eingesetzt. Bei den Mineralölen wurden vorwiegend die FVA-Referenzöle 1 bis 4 verwendet, dabei handelt es sich um reine Mineralöle ohne Additive. In ergänzenden Versuchen kamen kommerzielle Öle auf Mineralölbasis zum Einsatz, hier ist die Additivierung unbekannt. Bei den synthetischen Ölen wurden die Referenzöle FVA PG1 und FVA PG3 sowie einige kommerzielle Öle verwendet. Als Haupteinflussgröße wurde die dynamische Viskosität durch den Einsatz der verschiedenen Öle zwischen $\eta (40^\circ\text{C}) = 12 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ und $\eta (40^\circ\text{C}) = 405 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ variiert.

2.3 Datenauswertung und Modellbildung

Die Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen (variierte Parameter des Dichtsystems) und der Zielgröße (Förderwert) wurden anschließend mittels Regressionsana-

lyse ausgewertet. Bei der Regressionsanalyse wird ein mathematisches Modell (Regressionspolynom) an vorhandene Daten angepasst. Die Anpassung des Polynoms kann nach der Methode der kleinsten (Fehler-)Quadrate erfolgen. Die einfachste Form eines Regressionspolynoms ist eine lineare Gleichung und lautet:

$$\hat{y} = c_0 + c_1 \cdot x \quad (\text{Gl.2})$$

Dabei ist \hat{y} der Schätzwert für die Zielgröße, x ist die Einflussgröße und c_0 bzw. c_1 sind die zu bestimmenden Parameter der Regressionsgleichung. Liegen nun Messdaten y_i für unterschiedliche Werte x_i der Einflussgröße vor, so kann deren Zusammenhang anhand von Gleichung 2 beschrieben werden. Die Koeffizienten c_0 und c_1 werden dann nach der Methode der kleinsten (Fehler-)Quadrate so bestimmt, dass die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen den Schätzwerten \hat{y}_i und den Messwerten y_i über alle N Messwerte so klein wie möglich wird, s. Bild 3. Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies:

$$\sum_1^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_1^N (y_i - (c_0 + c_1 \cdot x_i))^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{Gl.3})$$

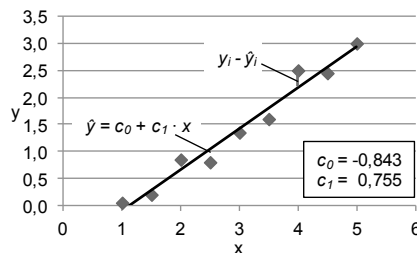


Bild 3: Methode der kleinsten (Fehler-)Quadrate

Im Forschungsvorhaben wurde der Einfluss von vier quantitativen Einflussgrößen (Durchmesser D , Oberflächenrauheit Rz , Umfangsgeschwindigkeit u und dynamische Viskosität η) auf den Förderwert FW (Zielgröße) analysiert. Zur Beschreibung des Zusammenhangs wurde ein multiples quadratisches Regressionspolynom verwendet. Bei den vier genannten Einflussfaktoren nimmt es folgende Form an:

$$FW = \underbrace{c_0}_{\text{Konstante}} + \underbrace{c_1 Rz + c_2 u + c_3 \eta + c_4 D}_{\text{Haupteffekte}} + \underbrace{c_{12} Rz \cdot u + c_{13} Rz \cdot \eta + c_{14} Rz \cdot D + c_{23} u \cdot \eta + c_{24} u \cdot D + c_{34} \eta \cdot D}_{\text{Wechselwirkungen}} + \underbrace{c_{11} Rz^2 + c_{22} u^2 + c_{33} \eta^2 + c_{44} D^2}_{\text{quadratische Effekte}} \quad (\text{Gl.4})$$

Ein quadratisches Regressionspolynom beinhaltet lineare Terme für die Haupteffekte, Terme mit jeweils zwei Einflussgrößen zur Darstellung von Wechselwirkungen sowie quadratische Terme zur Abbildung nichtlinearer Effekte. Die nächste Erweiterung wäre ein kubisches Modell. Für die meisten technischen Problemstellungen ist

eine quadratische Modellgleichung jedoch ausreichend, um das System innerhalb des mehrdimensionalen Versuchsraums ganzheitlich zu beschreiben. Zur Berechnung der Koeffizienten nach der Methode der kleinsten (Fehler-)Quadrate wurde die Versuchsplanungssoftware Cornerstone v4.2.2 eingesetzt.

3 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen dieses Beitrags können nur die wichtigsten Erkenntnisse der Untersuchungen dargestellt werden. Die grafische Ergebnisdarstellung erfolgt nur am Beispiel des Dichtelements mit dem Grundwerkstoff FKM. Für eine detaillierte und weiterführende Ergebnisdarstellung wird auf [7] verwiesen.

3.1 Einfluss von Oberflächenrauheit und Wellenbearbeitungsverfahren

Es wurden hauptsächlich im Einstich geschliffene Dichtungsgegenläufigen untersucht. In Bild 4 ist der Förderwert über der gemittelten Rautiefe Rz für im Einstich geschliffene Dichtungsgegenläufigen dargestellt. Raue Dichtungsgegenläufigen bewirken höhere Förderwerte, was auf eine verstärkte Aufrauung des Dichtungselastomers bzw. auf eine bessere Konditionierung zurückzuführen ist. Dieser Effekt war bei den FKM-Dichtringen etwas stärker ausgeprägt als bei den NBR-Dichtringen. Bild 4 zeigt den Rauheitseinfluss bei drei unterschiedlichen Schmierstoffen (FVA1, FVA3 und FVA4). Bei Schmierstoffen mit höherer Viskosität wurden höhere Förderwerte gemessen.

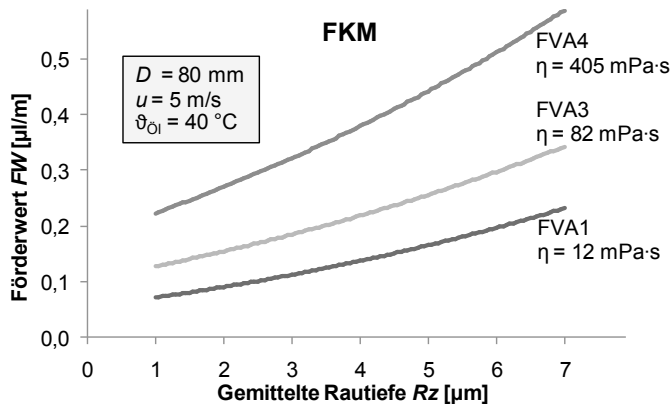


Bild 4: Förderwert in Abhängigkeit der Rauheit bei im Einstich geschliffenen Dichtungsgegenläufigen

Die Untersuchungen mit verschiedenen gefertigten Wellen zeigte, dass eine dichtungstechnische Bewertung von Dichtungsgegenläufigen nicht anhand eines einzelnen Oberflächenkennwerts erfolgen kann. Auch bei ähnlichen Rauheitskennwerten unterscheiden sich die Topographien unterschiedlich gefertigter Dichtungsgegenläufigen in der Regel sehr. Dies wirkt sich auch auf das Förderverhalten des Dichtsystems aus, wie Bild 5 zeigt.

Hartgedrehte Wellen weisen fertigungsbedingt eine gewindeähnliche Drehwendel auf. Die Folge ist ein drehrichtungsabhängiger Förderwert. Daher muss bei der Förderwertmessung ein Drehrichtungswechsel durchgeführt werden. Damit lassen sich dann ein Förderwert für den Dichtring und ein Förderwert für die Dichtungsgegenläufige fläche bestimmen. In Bild 5 sind jeweils die Förderwerte des Dichtrings dargestellt. Wie die Auswertung zeigt, ergibt sich bei hartgedrehten Dichtungsgegenläufigen flächen kein Anstieg des Förderwerts infolge der Oberflächenrauheit. Hier muss beachtet werden, dass alle Rauheitsmessungen in axialer Richtung durchgeführt wurden. Bei hartgedrehten Wellen wird in axialer Richtung eine wesentlich höhere Rauheit gemessen als in Umfangsrichtung. Die Rauheit in Umfangsrichtung hat jedoch aus dichtungstechnischer Sicht eine höhere Relevanz. Wie sich in [8] zeigte, ergibt sich mit der Rauheit in Umfangsrichtung eine bessere Korrelation.

Die Topographie von kugelgestrahlten Wellen weist noch stochastischer verteilte Strukturen auf als die Topographie im Einstich geschliffener Wellen. Folglich ergibt sich auch bei der Auswertung ein ähnliches, noch ausgeprägteres Verhalten – der Förderwert steigt mit zunehmender Oberflächenrauheit noch stärker an.

Rollierte Wellen sind ähnlich glatt wie hartgedrehte in Umfangsrichtung. Die gemessenen Förderwerte sind deshalb vergleichsweise niedrig. Fertigungsbedingt lassen sich durch Rollieren kaum unterschiedliche Rauheitswerte erzielen. Daher ist auch keine Auswertung bzgl. des Rauheitseinflusses möglich.

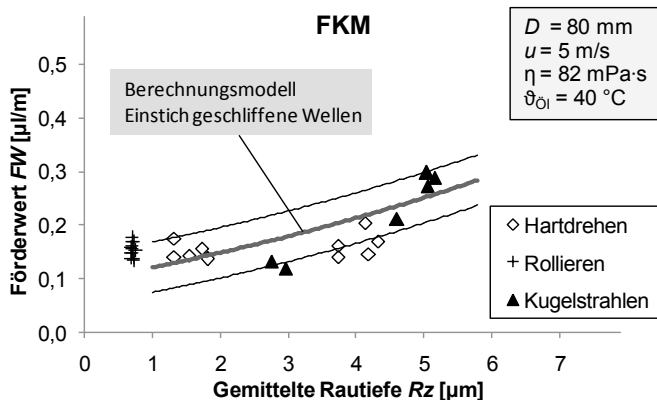


Bild 5: Förderwert des Dichtrings in Abhängigkeit der Rauheit bei unterschiedlich gefertigten Dichtungsgegenläufigen flächen

3.2 Einfluss von Viskosität des Schmierstoffs und Schmierstoffart

Die Viskosität des Schmierstoffs hat einen großen Einfluss auf den Förderwert. Bild 6 zeigt den Verlauf für Mineralöl (FVA-Referenzzöle) und Wellen mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit. Der Förderwert nimmt bei steigender Viskosität zu. In Stichversuchen mit kommerziellen Mineralölen, deren Additive jedoch nicht bekannt waren,

wurde ein ähnliches Verhalten beobachtet. Es ergaben sich nur geringfügige Abweichungen zu den FVA-Referenzölen. Im Allgemeinen gilt jedoch, dass sich das Verhalten durch Additive trotz desselben Grundöls stark verändern kann. Dies ist nach dem derzeitigen Stand der Technik in den meisten Fällen nicht prognostizierbar [9].

Bei der Untersuchung synthetischer Öle (Polyglykol, Polyalphaolefin, Ester) zeigte sich, dass das Verhalten chemisch unterschiedlicher Schmierstoffe durch die Viskosität als alleinigen Einflussparameter nicht ausreichend genau beschrieben werden kann. Insbesondere Schmierstoffe mit dem Grundöl Polyglykol führten zu wesentlich höheren Förderwerten als die untersuchten Mineralöle. Die Unterschiede sind u.a. auf unterschiedliche Benetzungseigenschaften der Grundöle zurückzuführen [10].

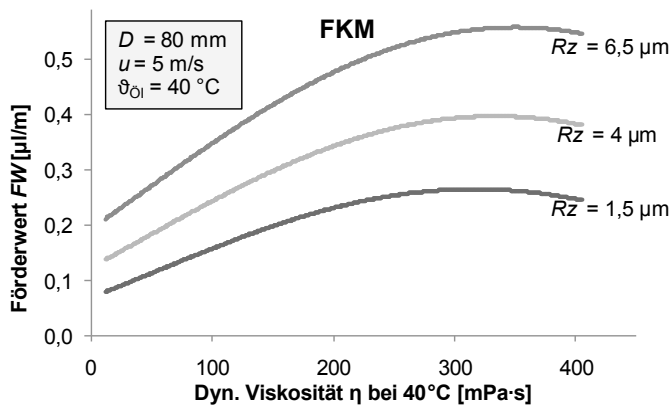


Bild 6: Förderwert in Abhängigkeit der Viskosität (bei Mineralöl)

3.3 Einfluss des Systemdurchmessers

Der Förderwert steigt mit größer werdendem Durchmesser erwartungsgemäß an. Über einen Bereich von $D = 20$ mm bis $D = 100$ mm verläuft dieser Anstieg nichtlinear. Bild 7 zeigt den Verlauf exemplarisch für den FKM-Dichtring. Der Anstieg des Förderwerts ist im Bereich großer Durchmesser steiler als im Bereich kleiner Durchmesser. Eine quadratische Funktion ergab folglich eine bessere Anpassung an die Messwerte als eine lineare Funktion. Da die Temperatur im Dichtspalt bei den Untersuchungen nicht erfasst wurde kann nur vermutet werden, dass die hier beobachtete Nichtlinearität auf Temperatureffekte zurückzuführen ist. Mit dem Durchmesser ändert sich die Wärmeabfuhr. Wellen mit kleinem Durchmesser führen weniger Wärme ab, was bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit zu höheren Dichtspalttemperaturen führt als bei großen Durchmessern. Die Viskosität des Schmierstoffs sinkt folglich stärker. Dadurch liegen die Förderwerte der drei dargestellten Schmierstoffe im Bereich kleiner Durchmesser enger beieinander. Je größer der Durchmesser desto besser die Wärmeabfuhr und desto mehr kommt der Viskositätseinfluss zum Tragen. Der Anstieg des Förderwerts ist folglich steiler.

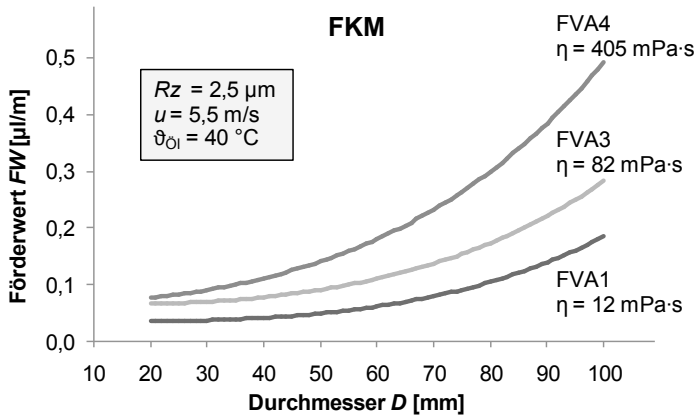


Bild 7: Förderwert in Abhängigkeit des Durchmessers

3.4 Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit

Der Verlauf des Förderwerts über der Umfangsgeschwindigkeit ist in Bild 8 für unterschiedliche viskose Schmierstoffe dargestellt. Die Messwerte zeigen keinen eindeutigen Trend. Die Förderwirkung nimmt mit steigender Geschwindigkeit zu, fällt für hohe Geschwindigkeiten jedoch wieder ab. Der Anstieg mit zunehmender Geschwindigkeit lässt sich durch den Aufbau eines hydrodynamischen Schmierfilms erklären. Die Abnahme des Förderwerts für hohe Geschwindigkeiten ist auf eine Erhöhung der Dichtspalttemperatur und der damit einhergehenden Abnahme der Viskosität im Dichtspalt zurückzuführen. So liegen die Förderwerte trotz stark unterschiedlicher Viskosität bei hoher Umfangsgeschwindigkeit relativ nah beieinander.

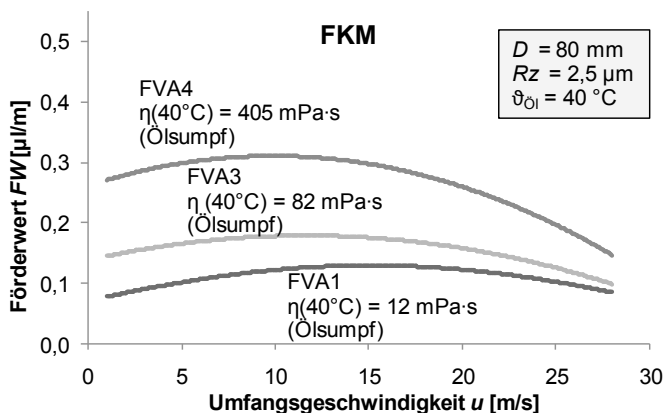


Bild 8: Förderwert in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit

3.5 Förderwerte von Dichtringen unterschiedlicher Hersteller

In Stichversuchen wurden Dichtelemente unterschiedlicher Hersteller untersucht: 9 Hersteller (A bis I), 18 unterschiedliche Dichtringe (8x FKM, 10x NBR). Die Untersuchungen wurden bei möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt. Parameter und Betriebsbedingungen wurden nicht variiert. Die Förderwerte der unterschiedlichen Dichtringe sind in Bild 9 dargestellt, links Dichtringe aus dem Grundwerkstoff FKM, rechts Dichtringe aus dem Grundwerkstoff NBR. Unabhängig vom Grundwerkstoff sind die Unterschiede von Dichtring zu Dichtring sehr groß. Es gibt Dichtringe mit sehr hoher Förderwirkung sowie Dichtringe, die nahezu keine Förderwirkung haben.

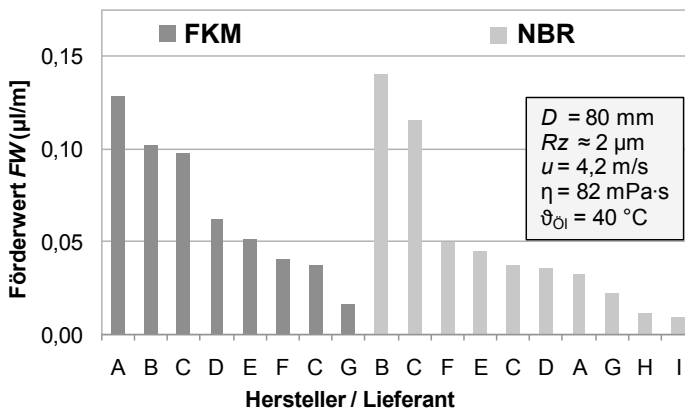


Bild 9: Förderwerte von FKM- und NBR-Dichtringen verschiedener Hersteller bzw. Lieferanten (A bis I) bei gleichen Versuchsbedingungen

Um die Ursachen der großen Unterschiede zu analysieren wurden einige Dichtringeigenschaften näher untersucht, z.B. Radialkraft, Elastomerhärte und Kontaktflächenwinkel. Bei keiner der untersuchten Eigenschaften konnte jedoch eine eindeutige Korrelation zum Förderwert festgestellt werden.

Ein sehr großer Einfluss auf das Förderverhalten scheint vom jeweiligen Dichtungswerkstoff auszugehen. Dieser ist nicht quantifizierbar. Die Elastomermischungen unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller. Jeder Hersteller bietet zudem selbst noch unterschiedliche Mischungen an. Die Mischung bleibt Geheimnis der Hersteller – ähnlich wie bei den Schmierstoffen und Additiven.

3.6 Allgemeines Berechnungsmodell für Dichtringe unterschiedlicher Hersteller

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Förderwerte können die mittels Regressionsanalyse bestimmten empirischen Berechnungsmodelle nicht zur Förderwertprognose eines beliebigen Dichtrings genutzt werden. Zur Bestimmung von realistischen Förderwerten muss für jeden Dichtring ein separates Modell erarbeitet werden, was sehr aufwändig ist. Gegebenenfalls besteht die Möglichkeit, ein Grundmodell zu erstellen,

das sich mit Hilfe eines dichtringspezifischen Skalierungsfaktors an das Förderniveau des jeweiligen RWDR anpassen lässt. Der Skalierungsfaktor könnte mit wenigen Versuchen bestimmt werden und würde den Aufwand wesentlich reduzieren. Ein skalierbares Modell setzt jedoch ein sehr ähnliches Förderverhalten der Dichtringe voraus, d.h. der Verlauf des Förderwerts über den einzelnen Einflussgrößen muss sehr ähnlich sein. Nur dann ließe sich das Niveau des Förderwerts an den jeweiligen Dichtring mit einem einfachen Skalierungsfaktor anpassen.

Erste Ergebnisse aus laufenden Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Dichtringe in ihrem Grundverhalten ähneln. Bild 10 zeigt den Förderwert von drei Dichtringen zweier Hersteller über den Einflussgrößen gemittelte Rautiefe, dynamische Viskosität, Systemdurchmesser und Umfangsgeschwindigkeit. Mit Ausnahme des Durchmesserereinflusses sind die Verläufe sehr ähnlich. Folglich sollte es möglich sein zumindest ein lineares Näherungsmodell zu bilden, das anhand eines Skalierungsfaktors an den jeweiligen Dichtring angepasst wird.

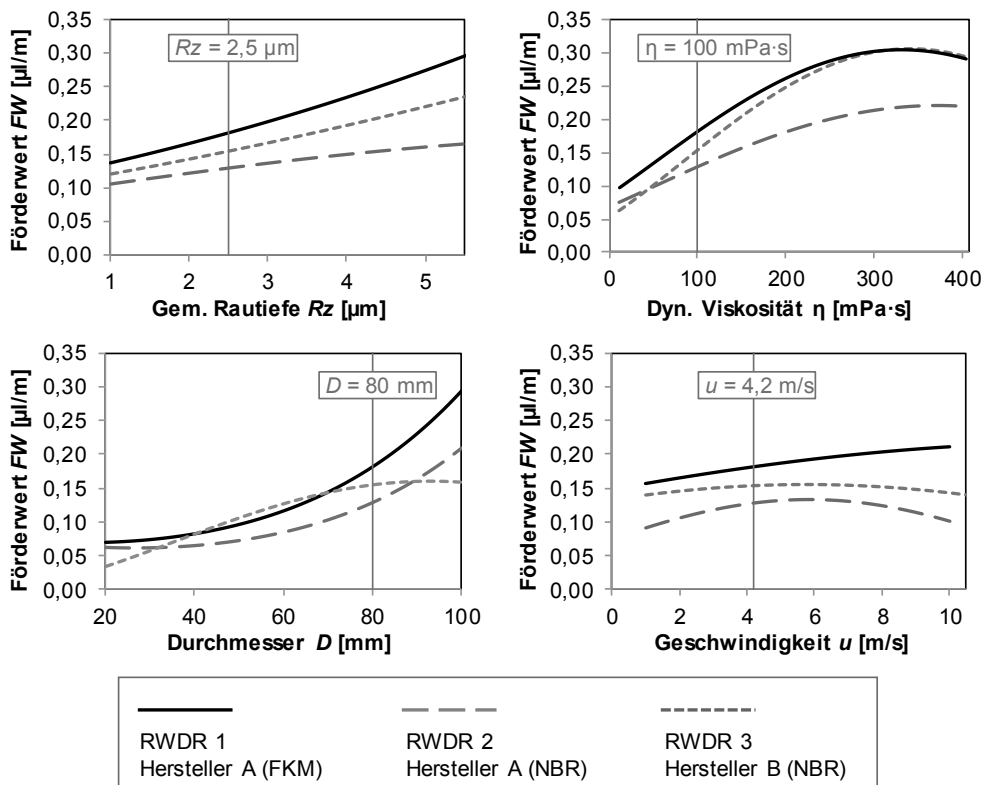


Bild 10: Förderwert über Einflussparametern bei drei unterschiedlichen Dichtelementen von zwei Herstellern

4 Bedeutung für die Praxis

Das Ziel der bis hierher vorgestellten Untersuchungen war die Bewertung der Dichtsicherheit von Radial-Wellendichtungen anhand des Förderwerts des Dichtrings. Hierzu wurde ein empirisches Modell erarbeitet, das den Zusammenhang zwischen Einflussparametern und Förderwert beschreibt.

Um das Modell in der Praxis nutzbar zu machen. Stellt sich für Anwender die Frage nach dem idealen Förderwert. Bei dieser Frage muss abgewägt werden. Prinzipiell gilt, wie in Bild 11 dargestellt:

- Ein hoher Förderwert führt zu einer hohen Dichtsicherheit, aber möglicherweise zu mehr Verschleiß oder zu höheren Temperaturen infolge einer ungünstigeren Schmierung des Dichtkontakts.
- Ein niedriger Förderwert bedeutet eine geringere Dichtsicherheit, aber ein besser geschmiertes System.

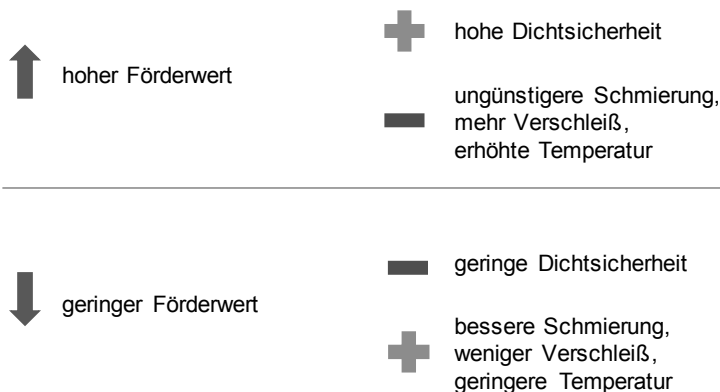


Bild 11: Auswirkung des Förderwerts auf Dichtsicherheit und Verschleiß

Die Entscheidung, welcher Förderwert ideal ist, muss letztendlich vom Konstrukteur getroffen werden und ist auf den Anwendungsfall abzustimmen. Hierbei sind die allgemeinen Schmierungsbedingungen (bespritzte oder überflutete Dichtstelle) und die Förderwirkung der Dichtungsgegenlauffläche zu berücksichtigen:

- Bei förderneutraler und bei nach außen fördernder Dichtungsgegenlauffläche sind höhere Förderwerte zu bevorzugen
- Bei nach innen fördernder Dichtungsgegenlauffläche ist ein niedrigerer Förderwert für die Dichtsicherheit ausreichend und für die Schmierungsverhältnisse günstiger.

Dies gilt jeweils für chemisch ähnliche Schmierstoffe, deren Benetzungsverhalten ebenfalls ähnlich ist.

Im Zweifelsfall ist ein höherer Förderwert zu bevorzugen. Besonders um Leckage durch Fehlstellen oder durch ungewünschte Förderwirkung der Dichtungsgegenlauf­fläche zu vermeiden, ist dies von Vorteil. Dies zeigen Versuchsdaten aus [11]. Dabei wurden zehn Wellen mit Fehlstellen im Dauerlauf über 120 Stunden getestet. Es wurden zwei unterschiedlich stark fördernde Dichtringe verwendet. Die Leckagemesung zeigt, dass der Dichtring mit dem höheren Förderwert die deutlich höhere Dichtsicherheit aufweist. Es kam lediglich bei zwei von zehn mit Fehlstellen behafteten Wellen zur Leckage, wohingegen beim Dichtring mit dem niedrigeren Förderwert sechs Wellen Leckage zeigten, s Bild 12.

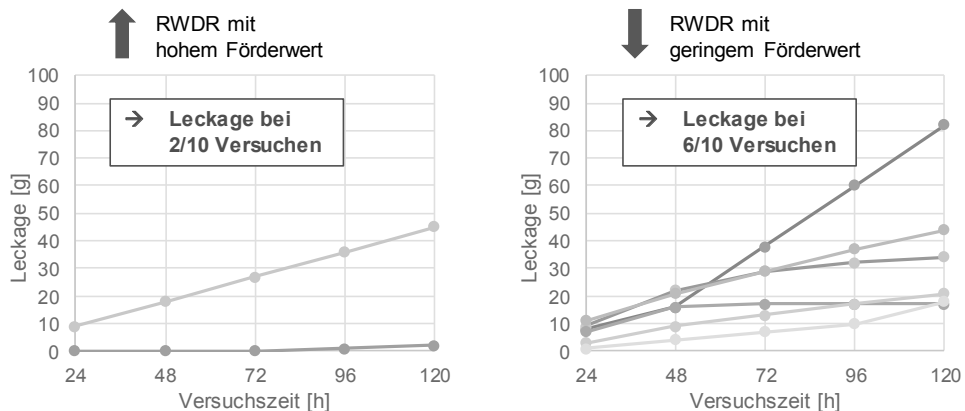


Bild 12: Erhöhte Dichtsicherheit durch höheren Förderwert bei Dichtungsgegenlauf­flächen mit Fehlstellen (Daten aus [11])

5 Ausblick

Die Arbeit betrachtet in erster Linie den mechanischen Aspekt der Förderung. Es hat sich jedoch sowohl in dieser als auch in den parallel laufenden Forschungsarbeiten [10] und [12] herausgestellt, dass auch chemische Aspekte wie das Benetzungsverhalten von Bedeutung sind. Weiterhin hat sich bei der Vermessung von Wellenoberflächen gezeigt, dass eine Messung in Bewegungsrichtung (Umfangsrichtung der Welle) oder 3D-Kennwerte aussagekräftigere Rauheitswerte liefern. Dies sollte in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

6 Literaturhinweise

- [1] MÜLLER, H. K.; NAU, B. S.: Fachwissen Dichtungstechnik – Kapitel 8: Wellendichtringe ohne Überdruck. Website: www.fachwissen-dichtungstechnik.de, Stand: Juli 2014.
- [2] KAMMÜLLER, M.: Zur Abdichtwirkung von Radial-Wellendichtringen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1986, Institutsbericht Nr. 20.
- [3] BRITZ, S.: Ein Beitrag zur Erfassung der Funktionsprinzipien dynamischer Wellendichtungen unter besonderer Berücksichtigung des Radialwellendichtrings. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1988.
- [4] SALANT, R. F.: Theory of lubrication of elastomeric rotary shaft seals. Proc. Inst. Mech. Eng., vol. 213, pp. 189-201, 1999.
- [5] SALANT, R. F.: Soft Elastohydrodynamic Analysis of Rotary Lip Seals. Proc. Inst. Mech. Eng., vol. 224, pp. 2637-2647, 2010.
- [6] SALANT, R. F.: Problems and Prospects for the Simulation of Dynamic Elastomeric Seal Wear and Life. 17th International Sealing Conference (ISC), Stuttgart, September 2012.
- [7] REMPPIS, M.; BAUER, F.; HAAS, W.: Rechnerische Abschätzung der Dichtgüte von Radial-Wellendichtungen durch Kenntnis der Systemparametereinflüsse. Abschlussbericht, FVA-Forschungsvorhaben Nr. 617 I / IGF-Nr. 16402N, FVA-Heft 1066, Frankfurt/Main 2013.
- [8] JUNG, S.: Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenauflä-chen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2012, Institutsbericht Nr. 141.
- [9] KLAIBER, M.; HAAS, W.: Einfluss verschiedener Additive auf Elastomere und die tribologischen Eigenschaften im System Radial-Wellendichtung. Abschlussbericht, FKM, Forschungsvorhaben Nr. 290, Heft 318, Frankfurt/Main, 2012
- [10] SCHULER, P.: Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2014, Institutsbericht Nr. 153.
- [11] SCHULER, P.; BAUER, F.: Einfluss weichgeschliffener Gegenauflä-chen auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen. Abschlussbericht, FVA Nr. 570 II, Stuttgart, 2013.
- [12] KLAIBER, M.: Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel additiver synthetischer Schmieröle; Dissertation 2013, Universität Stuttgart, Institutsbericht Nr. 149