

20th ISC

Stuttgart, Germany
Oct. 10 – 11, 2018



International Sealing Conference *Internationale Dichtungstagung*

Eine Kooperation von

iMA
UNI STÜTTGART

VDMA
Fluidtechnik

Fluidtechnik

20th ISC

International Sealing Conference
Internationale Dichtungstagung

Stuttgart, Germany
Oct. 10 – 11, 2018

Sealing Technology –
Beyond Limitations

*Dichtungstechnik –
Grenzen überwinden*

Eine Kooperation von



Fluidtechnik

© 2018 VDMA Fluidtechnik

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, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

ISBN 978-3-8163-0727-3

Fachverband Fluidtechnik im VDMA e. V.
Lyoner Str. 18
50628 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

Einflüsse praxisrelevanter Systemparameter auf das Förderverhalten von Radial-Wellendichtungen

Dipl.-Ing. Sumbat Bekgulyan, Dipl.-Ing. Simon Feldmeth, Dr.-Ing. Frank Bauer, Institut für Maschinenelemente (IMA), Universität Stuttgart, Deutschland

1 Einleitung

In diesem Beitrag wird das Förderverhalten von Radial-Wellendichtungen (RWDR) aus Elastomer betrachtet. RWDR verhindern den Schmierstoffaustritt zwischen rotierenden (Wellen) und ruhenden Maschinenteilen (Getriebegehäuse). Der RWDR ist Teil eines komplexen tribologischen Systems – dem Dichtsystem Radial-Wellendichtung, bestehend aus dem Dichtring, der Dichtungslaufläche auf der Welle, dem abzudichtenden Fluid und den Betriebsbedingungen, Bild 1. Erst das richtige Zusammenspiel dieser einzelnen Komponenten ergibt ein zuverlässig dichtes System. Kleine Veränderungen der Systemparameter (Oberflächenrauheit, Schmierstoffart, Viskosität, etc.) können sich stark auf das Abdichtverhalten auswirken. Eine ungünstige Parameterauswahl kann die Lebensdauer des Dichtsystems verkürzen. Eine „zu sichere“ Auslegung des Dichtsystems kann zu ungenutztem Einsparpotential führen.

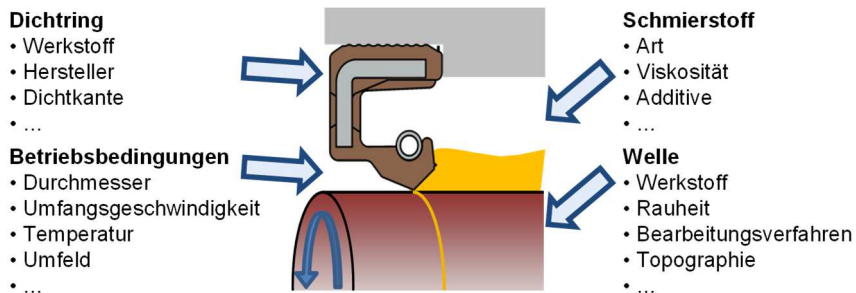


Bild 1: Parameter des Dichtsystems Radial-Wellendichtung

Die Dichtwirkung von Radial-Wellendichtungen wird im Wesentlichen durch das Rückfördervermögen des Systems bestimmt. Im Forschungsprojekt „Berechenbare Dichtgüte I“ /1/ wurden die Einflüsse einzelner Systemparameter auf das Förderverhalten von Radial-Wellendichtungen unter Beachtung der auftretenden Wechselwirkungen mit Mineralölen experimentell untersucht. Aufbauend auf /1/ wurden im Forschungsprojekt „Berechenbare Dichtgüte II“ /2/ Untersuchungen zum Förderverhalten mit synthetischen Ölen durchgeführt. Im vorliegenden Beitrag

werden die Ergebnisse aus /2/ präsentiert und mit den aus /1/ verglichen. Der Beitrag stellt damit eine Erweiterung der in /3/ vorgestellten Ergebnisse dar.

2 Stand der Technik

Im Folgenden wird der Stand der Technik in Kurzform dargestellt. Ausführliche Beschreibungen finden sich in /4/. Des Weiteren werden die Ergebnisse aus /3/, auf denen der vorliegende Beitrag aufbaut, vorgestellt.

2.1 Förderwirkung

Radial-Wellendichtungen sind dynamische Dichtsysteme. Im Betrieb gelangt Schmierstoff aus dem abzudichtenden Raum in die Kontaktzone zwischen der Dichtkante des RWDRs und der Dichtungsgegenlauffläche. Es bildet sich dort ein mit Schmierstoff gefüllter Dichtspalt, der für die notwendige Schmierung der Dichtkante sorgt, Bild 2. Aufgrund einer aktiven Rückförderung tritt kein Schmierstoff an der Luftseite aus. Die aktive Rückförderung basiert auf der asymmetrischen Flächenpressung der Dichtkante. Die asymmetrische Flächenpressung entsteht in Folge der asymmetrisch ausgeführten Kontaktflächen.

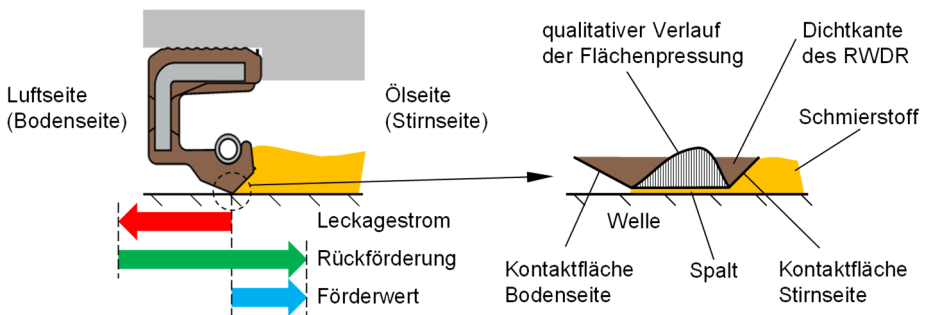


Bild 2: Schematische Darstellung des Dichtmechanismus von Radial-Wellendichtungen

Die dynamische Förderwirkung von RWDR wird mit unterschiedlichen physikalischen Hypothesen erklärt (z. B. Verzerrungshypothese /5/, Seitenstromhypothese /6/, Oszillations- bzw. Wischkantenhypothese /7/, Taylor-Görtler-Wirbel /8/, Nichtnewtonsches Fluidverhalten im Dichtspalt /9/).

2.2 Förderwert

Die Förderfähigkeit des Dichtsystems kann gemessen und in Form eines Förderwerts angegeben werden. Der Einfluss einzelner Systemparameter auf das Förderverhalten von Radial-Wellendichtungen kann somit anhand des Förderwerts ermittelt werden. Mehrere Versuchsmethoden werden zur Förderwertmessung eines Dichtsystems eingesetzt, /4/. Es kann die Schmierstoffmenge (Masse oder Volumen), die in einem vorgegebenen Zeitabschnitt gefördert wird, oder die Zeit, die zum Fördern einer vorgegebenen Schmierstoffmenge benötigt wird, ermittelt

werden. Der Quotient zwischen der geförderten Schmierstoffmenge und der dazu benötigten Zeit entspricht dem Förderwert. Zur Vergleichbarkeit des Förderverhaltens bei unterschiedlichen Drehzahlen oder von Systemen mit unterschiedlichen Wellendurchmessern, können die Förderwerte normiert werden. Im vorliegenden Beitrag wird hierzu der Förderwert als Fördervolumen pro zurückgelegtem Rotationsweg der Gegenläufigfläche in $[\mu\text{l}/\text{m}]$ angegeben. Ein als Volumen pro Rotationsweg normierter Förderwert FW ergibt sich aus Gleichung (1), wobei Δm für die Masse des geförderten Schmierstoffs, D für den Durchmesser der Welle, Δt für die Förderzeit, ρ für die Dichte des Schmierstoffs und n für die Drehzahl stehen.

$$FW = \frac{\Delta m}{\pi \cdot D \cdot \Delta t \cdot \rho \cdot n} \quad (1)$$

2.3 Förderwertermittlung bei Mineralölen

In /1/ wurde der Förderwert zum Bewerten der Dichtsicherheit von Radial-Wellendichtungen eingesetzt. Es wurden Förderwertmessungen unter Variation einzelner Systemparameter (Viskosität des Schmierstoffs, Oberflächenrauheit der Gegenläufigfläche, Umfangsgeschwindigkeit und Systemdurchmesser) durchgeführt. Die Förderwertmessungen erfolgten mit invers eingebauten RWDR, Bild 3. Dadurch kam es zu einer kontinuierlichen Schmierstoffförderung nach außen. Aus der geförderten Schmierstoffmenge innerhalb von 10 h wurde anschließend der Förderwert nach Gleichung (1) bestimmt. Bei den Versuchen betrug die Ölsumpftemperatur 40°C bei einem Ölstand bis zur Wellenmitte.

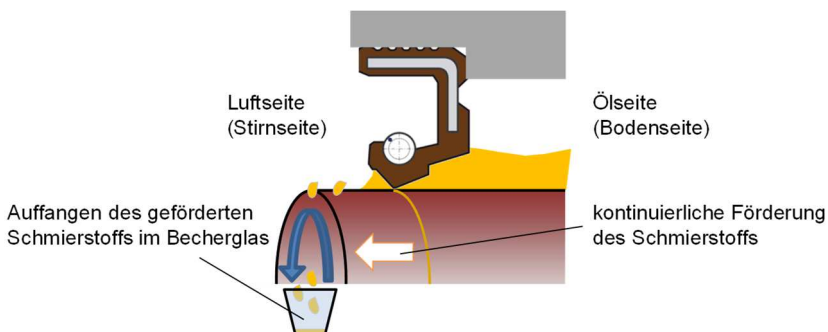


Bild 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus beim invers eingebauten RWDR

Anschließend wurden die Messdaten mittels Regressionsanalyse ausgewertet und empirische Modelle zur Berechnung des Förderwerts in Abhängigkeit von Systemparametern aufgestellt. Für die Berechnungsmodelle wurde ein multiples quadratisches Regressionspolynom eingesetzt. Die Anpassung der Polynomkoeffizienten erfolgte mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Für die Berechnungsmodelle in /1/ wurden RWDR der Firma Freudenberg aus FKM (Typ BAUMX7, Compound 75 FKM 585) mit gestochener (bearbeiteter) Dichtkante und NBR (Typ BAFUDX7, Compound 72 NBR 902) mit gespritzter (unbearbeiteter) Dichtkante eingesetzt. Als Schmierstoffe wurden die von der Forschungsvereinigung

Antriebstechnik (FVA) als Referenzöle bezeichneten Mineralöle FVA 1 bis 4 verwendet. Die dynamische Viskosität bei 40 °C dieser Referenzöle variiert von 12 bis 405 mPa·s, /10/. Es wurden drallfrei im Einstich geschliffene Wellen mit einer gemittelten Rautiefe zwischen 1 und 7 µm verwendet. Die Umfangsgeschwindigkeit wurde innerhalb der Einsatzgrenzen des jeweiligen RWDR-Werkstoffs variiert: Bei den FKM-RWDR variierte die Umfangsgeschwindigkeit von 1 bis 28 m/s, bei den NBR-RWDR zwischen 1 und 12 m/s. Es wurden RWDR mit einem Systemdurchmesser zwischen 20 und 100 mm verwendet.

Die in /1/ und /3/ präsentierten Modelle gelten jeweils nur für die eingesetzte FKM- und NBR-RWDR unter Einsatz von Mineralölen. Die Aufstellung eines gemeinsamen Berechnungsmodells für RWDR unterschiedlicher Hersteller und Werkstoffe war nicht möglich, da sich das Förderverhalten der RWDR stark unterscheidet. Stichprobenversuche mit synthetischen Ölen zeigten, dass die Berechnungsmodelle für Mineralöle nicht für den Einsatz von synthetischen Ölen geeignet sind.

3 Vorgehensweise

Im Beitrag wird der Einfluss unterschiedlicher Systemparameter auf das Förderverhalten von RWDR mittels Förderwertmessungen für synthetische Öle analog zu /1/ dargestellt. Die Versuchsdurchführung, die Variation der Systemparameter sowie die Vorgehensweise zur Auswertung der Messdaten werden im Folgenden erörtert.

Die Förderwertmessungen erfolgten analog zu /1/ mit invers eingebauten RWDR wie in Abschnitt 2.3 beschrieben. Die Untersuchungen wurden mit RWDR der Firma Freudenberg mit gestochenen Dichtkanten aus FKM (Typ BAUMX7, Compound 75 FKM 585) und NBR (Typ BAUX2, Compound 72 NBR 902) durchgeführt. Als Systemparameter werden die Viskosität des Schmierstoffs, die Oberflächenrauheit der Gegenauflfläche, die Umfangsgeschwindigkeit im Betrieb und der Systemdurchmesser betrachtet. Es wurden synthetische FVA-Referenzöle auf Polyglykol- und Polyalphaolefinbasis eingesetzt. Bei den FVA-Polyglykolölen (FVA PG) handelt es sich um FVA PG 1, 3 und 4 mit einer dynamischen Viskosität bei 40 °C von 72 bis 480 mPa·s, /10/. Bei den FVA-Polyalphaolefinölen (FVA PAO) handelt es sich um FVA PAO 1, 3 und 4 mit einer dynamischen Viskosität bei 40 °C von 23 bis 338 mPa·s, /10/. Zusätzlich wurden Stichversuche mit kommerziellen synthetischen Ölen durchgeführt. Als Gegenauflflächen wurden drallfrei im Einstich geschliffene Wellenhülsen aus dem Werkstoff 100Cr6 mit einer gemittelten Rautiefe von 2,0 bis 5,3 µm eingesetzt. Die Umfangsgeschwindigkeit wurde bei FKM-RWDR zwischen 1 und 25 m/s und bei NBR-RWDR zwischen 1 und 12,5 m/s variiert. Die Variation des Systemdurchmessers erfolgte im Bereich von 20 bis 100 mm.

Zwischen den Systemparametern können Wechselwirkungen auftreten, die von den Modellfunktionen berücksichtigt werden sollen. Von Wechselwirkungen spricht man, wenn sich durch Änderung einer Einflussgröße auch der Effekt einer anderen Einflussgröße ändert. Der Effekt kann dabei verstärkt oder geschwächt werden.

Die Systemparameter wurden nach dem Prinzip des Design of Experiments (DoE) variiert. Die Versuchsdaten wurden wie in /1/ mittels Regressionsanalyse ausgewertet. Das multiple quadratische Regressionspolynom mit den vier Systemparametern

entspricht Gleichung (2). Dabei ist FW der Förderwert, c_0 bis c_{44} die mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate zu bestimmende Koeffizienten, Rz die gemittelte Rautiefe, u die Umfangsgeschwindigkeit, η die dynamische Viskosität bei Ölsumpftemperatur und D der Systemdurchmesser.

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

Das Regressionspolynom besteht aus linearen Termen zur Beschreibung der Haupteffekte der einzelnen Systemparameter, aus Termen mit zwei Systemparametern zur Beschreibung der Wechselwirkungen und aus quadratischen Termen zur Berücksichtigung der nichtlinearen Effekte. Für die Versuchsplanung und Auswertung wurde die Software Cornerstone v5.3.0.7 eingesetzt.

4 Ergebnisse

Nach Versuchsdurchführung und -auswertung wurden vier Modelle für die zwei RWDR-Werkstoffe (FKM und NBR) und zwei Schmierstoffarten (Polyglykol- und Polyalphaolefinöl) zur Berechnung des Förderwerts gebildet. Die Berechnungsmodelle berücksichtigen vier quantitative Systemparameter: gemittelte Rautiefe der Wellenoberfläche, Umfangsgeschwindigkeit, dynamische Viskosität im Ölsumpf sowie den Systemdurchmesser. Im Folgenden werden die vier Berechnungsmodelle für synthetische Öle präsentiert und mit den Berechnungsmodellen für Mineralöle verglichen.

In Tabelle 1 ist das Bestimmtheitsmaß R^2 als Modellgütekennzahl für die vier Berechnungsmodelle mit den synthetischen und die zwei Berechnungsmodelle mit den Mineralölen angegeben. Bei allen drei Öarten wurden die Berechnungsmodelle mit dem FKM-RWDR desselben Typs mit gestochener (bearbeiteter) Dichtkante erstellt. Für die Berechnungsmodelle mit synthetischen Ölen wurde NBR-RWDR mit gestochener (bearbeiteter) Dichtkante eingesetzt. Bei dem Mineralöl kam ein NBR-RWDR mit gespritzter (unbearbeiteter) Dichtkante zu Einsatz. Die ermittelten Polynomkoeffizienten sowie weitere Modellgütekennzahlen sind in /1/ und /2/ ausführlich beschrieben.

Tabelle 1: Bestimmtheitsmaße der Berechnungsmodelle

	Polyglykolöl /2/		Polyalphaolefinöl /2/		Mineralöl /1/	
	FKM gestochen	NBR gestochen	FKM gestochen	NBR gestochen	FKM gestochen	NBR gespritzt
R^2	0,805	0,681	0,947	0,891	0,880	0,740

Die FKM-RWDR weisen höhere Bestimmtheitsmaße und somit bessere Modellgüte im Vergleich zu NBR-RWDR bei allen drei Ölarten. Bei Modellen für Polyglykolöle ist die Modellgüte schlechter im Vergleich zu Polyalphaolefinölen und Mineralölen. Die Modelle für Polyalphaolefinöle zeigen die höchsten Modellgüten. Das Berechnungsmodell für Polyglykolöle und NBR-RWDR zeigt die größte Unsicherheit mit der kleinsten Bestimmtheitsmaße $R^2 = 0,681$. Die Güte der anderen Modelle ist mit $R^2 > 0,740$ als gut bis sehr gut zu bewerten.

Die Einflüsse der Systemparameter werden im Weiterem am Beispiel eines Dichtsystems mit einem Durchmesser von 80 mm, einer gemittelten Rautiefe von 2,5 μm , einer Umfangsgeschwindigkeit von 5 m/s und einer dynamischen Viskosität bei 40 °C von 200 mPa·s grafisch dargestellt und erläutert. Bei der grafischen Darstellung im Bild 4 bis Bild 9 ist die Modellfunktion, die Standardabweichung der Messwerte, der eingesetzte Systemparameter sowie der berechnete Förderwert gekennzeichnet. Wegen der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern dürfen die hier als Funktion der einzelnen Systemparameter dargestellten Förderwertverläufe nicht als statisch angenommen werden. Wird in Bild 4 bis Bild 9 ein Systemparameter variiert, so verändern sich die Kurvenverläufe für die drei anderen Parameter.

4.1 Berechnungsmodelle für synthetische Öle

Bei den vier Modellen für synthetische Öle ist der Zusammenhang zwischen dem Förderwert und dem Durchmesser ähnlich, Bild 4 bis Bild 7. Der Förderwert steigt mit steigendem Durchmesser bis ca. 70 mm. Für größere Durchmesser fällt der Förderwert ab.

Bei den Modellen für Polyglykolöl mit FKM- und NBR-RWDR (Bild 4 und Bild 5) und Polyalphaolefinöl in Kombination mit FKM-RWDR (Bild 6) steigt der Förderwert mit steigender gemittelter Rautiefe. Der Förderwertanstieg bei Polyglykolöl und NBR-RWDR fällt dabei sehr gering aus, Bild 5. Dagegen sinkt der Förderwert bei Polyalphaolefinöl und NBR-RWDR mit steigender gemittelter Rautiefe, Bild 7. Bei der Sensitivitätsanalyse zeigt sich bei dieser Öl-RWDR-Kombination eine starke Wechselwirkung zwischen der dynamischen Viskosität und der gemittelter Rautiefe: Bei dynamischen Viskositäten unter 100 mPa·s zeigt das Berechnungsmodell für Polyalphaolefinöl und NBR-RWDR, wie bei den anderen drei Berechnungsmodellen, steigende Förderwerte mit steigender gemittelter Rautiefe.

Der Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit unterscheidet sich bei allen vier Modellen für synthetische Öle. Bei Polyglykolöl und FKM-RWDR steigt der Förderwert mit steigender Umfangsgeschwindigkeit, Bild 4. Bei Polyglykolöl und NBR-RWDR sinkt der

Förderwert mit steigender Umfangsgeschwindigkeit bis ca. 7 m/s, danach steigt der Förderwert mit weiter steigender Umfangsgeschwindigkeit, Bild 5. Bei Polyalphaolefinöl in Kombination mit FKM-RWDR steigt der Förderwert mit steigender Umfangsgeschwindigkeit bis ca. 14 m/s leicht an, danach sinkt der Förderwert mit weiter steigender Umfangsgeschwindigkeit leicht ab, Bild 6. Bei Polyalphaolefinöl und NBR-RWDR ist der Förderwert bei geringer Umfangsgeschwindigkeit bis ca. 2,5 m/s näherungsweise konstant, Bild 7. Mit weiter steigender Umfangsgeschwindigkeit fällt der Förderwert stark ab.

Der Einfluss der dynamischen Viskosität im Ölsumpf fällt bei Polyglykolöl für FKM- und NBR-RWDR unterschiedlich aus, Bild 4 und Bild 5. Bei Polyglykolöl und FKM-RWDR steigt der Förderwert mit steigender Viskosität bis ca. 250 mPa-s, danach sinkt der Förderwert mit weiter steigender Viskosität, Bild 4. Bei Polyglykolöl und NBR-RWDR sinkt der Förderwert mit steigender Viskosität bis ca. 320 mPa-s, Bild 5. Danach steigt der Förderwert mit weiter steigender Viskosität leicht an. Bei Polyalphaolefinöl zeigen die Berechnungsmodelle für FKM- und NBR-RWDR untereinander einen ähnlichen Zusammenhang zwischen dem Förderwert und der dynamischen Viskosität, Bild 6 und Bild 7. Der Förderwert steigt mit steigender Viskosität, wobei der Anstieg ab ca. 250 mPa-s nur geringfügig ausfällt. Bei FKM-RWDR ist eine leichte Förderwertabnahme bei Viskositäten über 300 mPa-s zu erkennen, Bild 7.

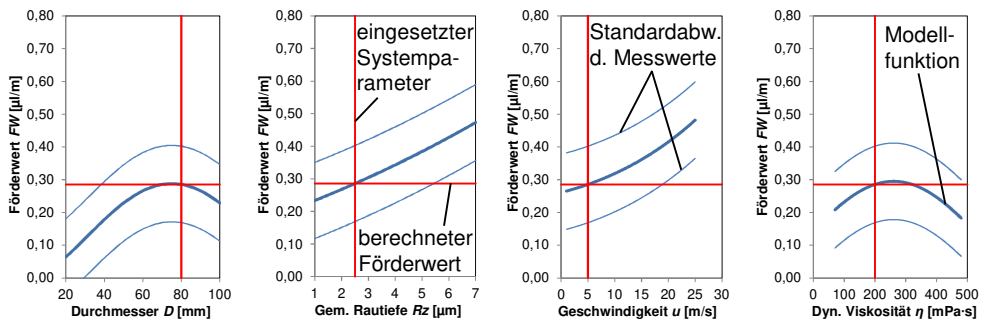


Bild 4: Förderwert nach Berechnungsmodell, FKM-RWDR (gestochen), FVA PG

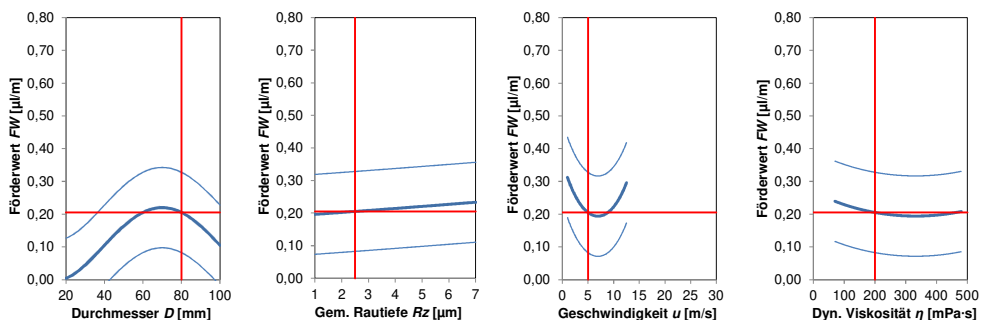


Bild 5: Förderwert nach Berechnungsmodell, NBR-RWDR (gestochen), FVA PG

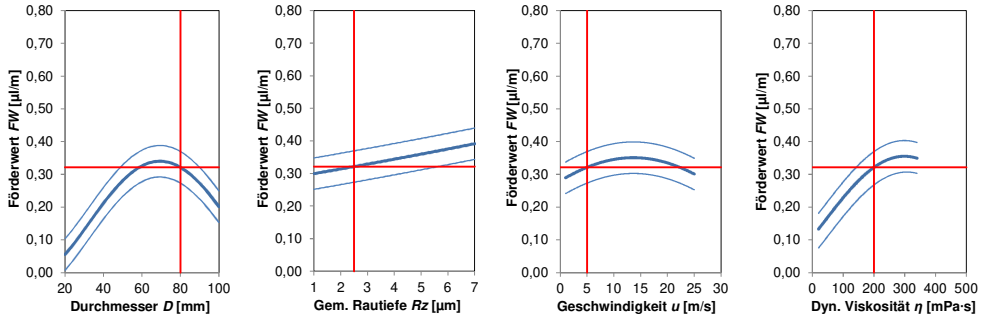


Bild 6: Förderwert nach Berechnungsmodell, FKM-RWDR (gestochen), FVA PAO

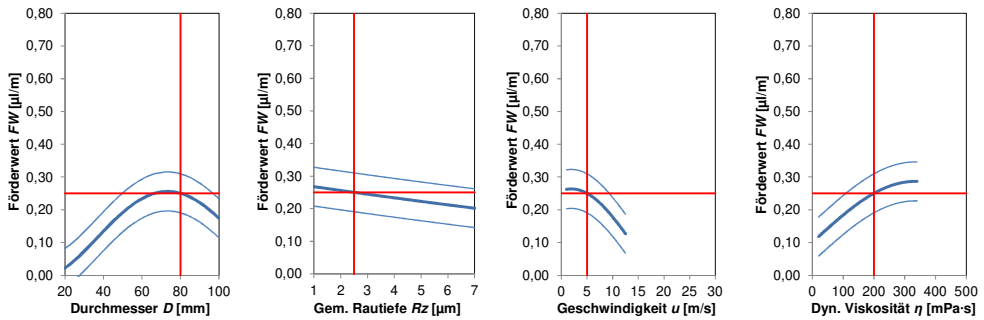


Bild 7: Förderwert nach Berechnungsmodell, NBR-RWDR (gestochen), FVA PAO

4.2 Vergleich der Berechnungsmodelle für synthetische Öle mit den Berechnungsmodellen für Mineralöle

In Bild 8 (FKM) und Bild 9 (NBR gespritzt) sind zum Vergleich die Einflüsse der Systemparameter der Berechnungsmodelle für Mineralöl aus /1/ dargestellt.

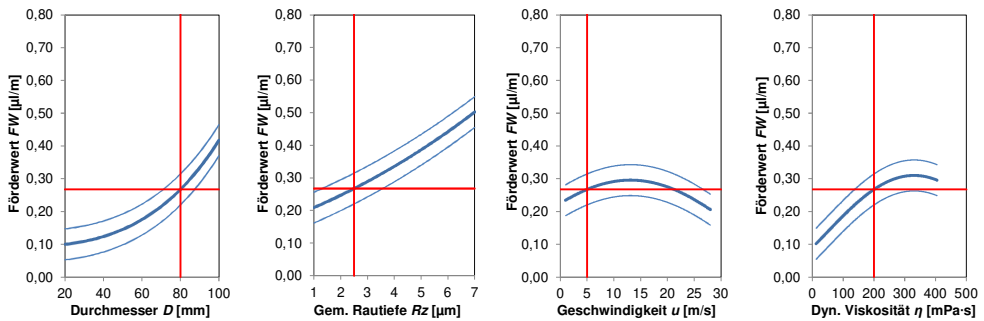


Bild 8: Förderwert nach Berechnungsmodell, FKM-RWDR (gestochen), FVA-Mineralöl, /1/

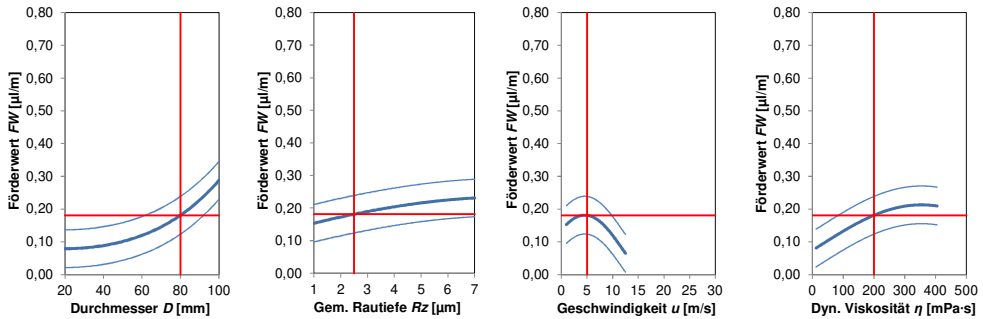


Bild 9: Förderwert nach Berechnungsmodell, NBR-RWDR (gespritzt), FVA-Mineralöl, /1/

Der Zusammenhang zwischen dem Förderwert und dem Systemdurchmesser unterscheidet sich bei Mineralöl im Vergleich zu den synthetischen Ölen. Beim Mineralöl sind höhere Förderwerte mit steigendem Systemdurchmesser zu erwarten. Die Berechnungsmodelle für synthetische Öle zeigen eine Förderwertabnahme ab einem Durchmesser von ca. 70 mm.

Der Zusammenhang zwischen dem Förderwert und der gemittelten Rautiefe ist für Mineralöl (Bild 8 und Bild 9), Polyglykolöl (Bild 4 und Bild 5) und Polyalphaolefinöl mit FKM-RWDR (Bild 6) ähnlich. Der Förderwert steigt mit steigender gemittelter Rautiefe, wobei der Anstieg bei NBR-RWDR geringer ist als bei den FKM-RWDR. Lediglich bei Polyalphaolefinöl und NBR-RWDR nimmt der Förderwert mit zunehmender Rautiefe ab, Bild 7.

Der Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf den Förderwert ist bei den Berechnungsmodellen für Mineralöl ähnlich wie bei Polyalphaolefinöl. Mit steigender Umfangsgeschwindigkeit steigt der Förderwert bei Mineralöl zunächst bis ca. 14 m/s für FKM-RWDR und ca. 5 m/s für NBR-RWDR an, Bild 8 und Bild 9. Anschließend fällt der Förderwert bei beiden RWDR ab. Bei Polyglykolöl dagegen steigt der Förderwert mit steigender Umfangsgeschwindigkeit bei FKM-RWDR an und sinkt bei NBR-RWDR bis ca. 7 m/s ab mit einem anschließenden Förderwertanstieg, Bild 4 und Bild 5.

Bei Berechnungsmodellen für Mineralöl steigt der Förderwert mit steigender dynamischer Viskosität bis ca. 300 mPa·s für FKM-RWDR und ca. 350 mPa·s für NBR-RWDR an, Bild 8 und Bild 9. Anschließend sinkt der Förderwert bei beiden Berechnungsmodellen leicht ab. Die Förderwertverläufe für Mineralöl sind ähnlich wie bei den zwei Modellen für Polyalphaolefinöl und beim Modell für Polyglykolöl mit FKM-RWDR, wobei beim letzteren Modell der Förderwertabfall deutlich stärker ausgeprägt ist. Lediglich bei Polyglykolöl und NBR-RWDR zeigt sich mit zunächst sinkendem und dann steigendem Förderwert bei steigender Viskosität ein anderer Verlauf, Bild 5.

Die Unterschiede in den Zusammenhängen zwischen den jeweiligen Systemparametern und dem Förderwert für die sechs Berechnungsmodelle sind in erster Linie auf die unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften der Schmierstoffe und Elastomere zurückzuführen. Hinzu kommen noch die Wechselwirkungen

zwischen den einzelnen Systemparametern, die sich innerhalb jedes einzelnen Berechnungsmodells unterschiedlich auswirken können.

Die Berechnungsmodelle für Polyaphaolefinöl und Mineralöl zeigten qualitativ ähnliche Zusammenhänge zwischen der Umfangsgeschwindigkeit sowie der dynamischen Viskosität im Ölsumpf und dem Förderwert. Die eingesetzten Polyaphaolefinöle und die Mineralöle haben einen ähnlichen chemischen Aufbau und sind deswegen miteinander in jedem Verhältnis mischbar, /10/. Die eingesetzten Polyglykolöle sind polare Flüssigkeiten, die mit Mineralölen nur bedingt mischbar sind, /10/. Der polare Charakter der Polyglykolöle kann ein Grund für die von den Polyglykolölen und Mineralölen qualitativ abweichenden Einflüsse der Umfangsgeschwindigkeit sowie der dynamischen Viskosität im Ölsumpf auf den Förderwert sein.

4.3 Vergleich von Referenzölen mit kommerziellen Ölen

Mit kommerziellen synthetischen Ölen wurden Stichprobenversuche durchgeführt. Die Vorhersage der Förderwerte mit den Berechnungsmodellen war nur bei bestimmten Parameterkombinationen zutreffend. Die Abweichungen liegen vermutlich in der chemischen Zusammensetzung der kommerziellen Öle, die anders additiviert sind als die nur leicht additivierten Referenzöle. Dies gilt sowohl für synthetische als auch für Mineralöle, /1/ und /2/. Für kommerzielle Öle können somit die vorgestellten Berechnungsmodelle nur bedingt eingesetzt werden. Mit Stichprobenversuchen muss überprüft werden, ob damit die Förderwerte für das jeweilige Öl berechnet werden können, /2/.

5 Zusammenfassung

In /1/ wurde ein empirisches Modell zur Berechnung des Förderwerts in Abhängigkeit von Systemparameter für Mineralöle entwickelt. Im vorliegenden Beitrag wurde dieses Modell um synthetische Öle erweitert.

Die vorgestellten Ergebnisse bieten dem Anwender eine zusätzliche Hilfestellung bei der Auslegung des Dichtsystems und der Auswahl von Systemparametern. Mit Hilfe der Berechnungsmodelle haben die Anwender ein Werkzeug zur Untersuchung und Bewertung von Einflüssen praxisrelevanter Systemparameter auf das Dichtsystem Radial-Wellendichtung. Die Berechnungsmodelle können zur Auslegung und Überprüfung der Dichtsysteme eingesetzt werden. Die graphische Darstellung der Systemparameter auf den Förderwert hilft dem Anwender das Systemverständnis zu erweitern.

Bei Verwendung anderer Schmierstoffe oder RWDR muss zunächst die Kompatibilität des Berechnungsmodells überprüft werden. Mit der einfach realisierbaren Messmethode (inverser Einbau des RWDRs) können Förderwertmessungen an Dichtsystemen durchgeführt werden. Ein Vergleich des gemessenen Förderwerts mit dem berechneten Förderwert als Referenzwert liefert die Grundlage zur Bewertung der Dichtsysteme.

Der Gültigkeitsbereich der Berechnungsmodelle aus /1/ und dem aktuellen Beitrag deckt einen breiten praxisrelevanten Parameterbereich ab. Allerdings kann nach dem heutigen Stand kein allgemeingültiges Berechnungsmodell erstellt werden, mit welchem die große Variantenvielfalt an Dichtringen, Elastomerwerkstoffen, Schmierstoffen, Dichtungsgegenläufigkeiten und weiteren Betriebsparametern abgedeckt werden kann.

6 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17938 N/1 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



7 Formelzeichen

Variable	Beschreibung	Einheit
c_0 bis c_{44}	Polynomkoeffizienten	[-]
D	Durchmesser	[m]
FW	normierter Förderwert als Volumen pro Rotationsweg	[μ l/m]
Δm	Masse des geförderten Schmierstoffs	[g]
n	Drehzahl	[1/min]
Δt	Förderzeit	[s]
R^2	Bestimmtheitsmaß	[-]
Rz	gemittelte Rautiefe	[μ m]
u	Umfangsgeschwindigkeit	[m/s]
η	dynamische Viskosität	[mPa·s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]

8 Literaturverzeichnis

- /1/ Remppis, M. ; Bauer, F. ; Haas, W.: *Rechnerische Abschätzung der Dichtgüte von Radial-Wellendichtringen durch Kenntnis der Systemparameter*. Abschlussbericht, FVA, Forschungsvorhaben Nr. 617 I, FVA-Heft 1066, IGF-Nr. 16402 N/1, Frankfurt/Main, August 2013
- /2/ Bekgulyan, S. ; Bauer, F. ; Haas, W.: *Rechnerische Abschätzung der Dichtgüte von Radial-Wellendichtringen durch Kenntnis der Systemparametereinflüsse II*. Abschlussbericht, FVA, Forschungsvorhaben Nr. 617 II, FVA-Heft 1259, IGF-Nr. 17938 N/1, Frankfurt/Main, August 2017

- /3/ Remppis, M. ; Bauer, F. ; Haas, W.: *Bewertung von Radial-Wellendichtungen anhand des Förderwerts*. 18th ISC, Stuttgart, 8.-9. Oktober 2014; Fachverband Fluidtechnik im VDMA e.V., 2014, S. 640 – 652, - ISBN 978-3-00-046879-7
- /4/ Remppis, M.: *Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtungen aus Elastomer*. Universität Stuttgart. Dissertation. 2016. ISBN: 978-3-936100-68-6
- /5/ Kammüller, M.: *Zur Abdichtung von Radialwellendichtungen*. Universität Stuttgart. Dissertation. 1986. ISBN: 3-921920-19-1
- /6/ Müller, H. K.: *Abdichtung bewegter Maschinenteile*. Waiblingen : Medienverlag Müller, 1990
- /7/ Jenisch, B.: *Abdichten mit Radial-Wellendichtungen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen*. Universität Stuttgart. Dissertation. 1991. ISBN: 3-921920-40-x
- /8/ Ott, G. W.: *Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radial-Wellendichtungen*. Universität Stuttgart. Dissertation. 1983. ISBN: 3-921920-10-8
- /9/ Oliveira, S.: *Das nichtnewtonsche Verhalten von Fluiden bei hohen Scherfällen als Erklärung der Schmierungs- und Dichtvorgänge bei Radialwellendichtungen*. Technische Universität Hamburg-Harburg. Dissertation. 1995
- /10/ FVA-Heft 660: *Referenzölkatalog. Datensammlung*. Mai 2007