

19th ISC

Stuttgart, Germany
Oct. 12 – 13, 2016



International Sealing Conference *Internationale Dichtungstagung*

Eine Kooperation von



Fluidtechnik

19th ISC

International Sealing Conference
Internationale Dichtungstagung

Stuttgart, Germany
Oct. 12 – 13, 2016

Sealing Technology –
Indispensable

Dichtungstechnik –
Unverzichtbar

© 2016 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 978-3-8163-0684-9

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

Empirische Modellierung der Drall-induzierten Fluidförderwirkung von Dichtungsgegenauflflächen – Sind Grenzwerte möglich?

Dipl.-Ing. Matthias Baumann.Dr.-Ing. Frank Bauer, Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas,
Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA)

1. Einleitung

Drall-behaftete Dichtungsgegenauflflächen führen in der Industrie aufgrund ihrer Fluidförderwirkung regelmäßig zum Versagen von Radial-Wellendichtsystemen. Obwohl diese Thematik bereits seit den 50iger Jahren im Fokus der Wissenschaft steht [1], konnte dieses Problem bis heute nicht vollständig gelöst werden. Entgegen der allgemeinen Erwartungen sind derzeit sogar wieder zunehmende Probleme zu verzeichnen. Häufig bedingt durch Änderungen im Fertigungsprozess von Dichtungsgegenauflflächen, beispielsweise um Kosten einzusparen.

Über die Jahre wurden zwar diverse Drallmessverfahren [2, 3] entwickelt, ein eklatantes Problem besteht aber nach wie vor in der Fragestellung, wie deren Ergebnisse zu bewerten sind. Die einschlägigen nationalen und internationalen Normen und Richtlinien [4–7] für Radial-Wellendichtungen geben hierfür keinerlei Anhaltspunkte. Auch in der Literatur existieren bislang keine fundierten Grenzwerte für einen tolerierbaren Drall. Dem Anwender von Drallmessverfahren bleibt es daher selbst überlassen, einzuschätzen was deren Ergebnisse letztlich aussagen. Aufgrund der wechselnden und mannigfaltigen Einflüsse, welche auf ein Radial-Wellendichtsystem einwirken, stellt dies kein einfach zu lösendes Problem dar.

In diesem Beitrag wird der Versuch unternommen, anhand eines umfassend bekannten Referenzdichtsystems, Grenzen für einen tolerierbaren Drall auf der Dichtungsgegenauflfläche abzuleiten. Grundlage hierfür bilden die Ergebnisse mehrerer Forschungsprojekte [8–10]. Erste wichtige Erkenntnisse zur Förderfähigkeit von drallbehafteten Dichtungsgegenauflflächen sowie eine auf der optischen Topographiemessung basierende ganzheitliche Drallanalysemethode wurden bereits vor zwei Jahren auf der „*International Sealing Conference 2014*“ präsentiert [11]. Der vorliegende Beitrag schließt direkt an die damals vorgestellten Inhalte an.

2. Komponenten des Referenzdichtsystems

Um vergleichende Betrachtungen zu ermöglichen, wurden in diversen Forschungsprojekten des Instituts für Maschinenelemente umfangreiche Prüfstandsversuche mit einem gleichbleibenden Radial-Wellendichtsystem durchgeführt. Dieses wird im

Folgenden als Referenzdichtsystems bezeichnet. Es besteht aus einem handelsüblichen Radial-Wellendichtring der, nach DIN 3760 standardisierten, Bauform A und einem von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) definierten mineralischen und unadditivierten Referenz-Öl. Als Dichtungsgegenlauffläche kommen verschiedene Versuchswellen zum Einsatz, welche später an den entsprechenden Stellen näher erläutert werden.

Einen Überblick über einige Eigenschaften der Komponenten des Referenzdichtsystems gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Eigenschaften der Komponenten des Referenzsystems

Radial-Wellendichtring		Versuchsfluid	
Herstellerbezeichnung	BAUM5X7	Herstellerbezeichnung	FVA Referenöl Typ 3
Hersteller	Simrit	Dichte bei 40° [kg/l]	0,867
Bauform	A	Kinematische Viskosität bei 40° [mm ² /s]	92-99
Werkstoff	75 FKM 585	Dynamische Viskosität bei 40° [mPa·s]	82
Abmessungen			
Nenn Durchmesser [mm]	80		
Außendurchmesser [mm]	100		
Breite [mm]	10		

3. Empirisches Modell der Drall-induzierten Förderwirkung

Elastomere Radial-Wellendichtringe sind aktive Dichtelemente. Die vom Dichtring induzierte Rückförderwirkung ist die Grundlage für die Fähigkeit Fluid im dynamischen Betrieb gegenüber der Umgebung abzudichten. In der Praxis zeigt sich im Normalfall, dass ein Radial-Wellendichtring mit hoher Rückförderwirkung besser dichtet, als ein Radial-Wellendichtring mit geringer Rückförderwirkung. Um eine Aussage über die Dichtgüte eines Radial-Wellendichtsystems zu ermöglichen, werden daher sogenannte Förderwerte (**FW**) gemessen. Dies kann beispielsweise über eine Zeitmessung bis zum Verschwinden von einer an die luftseitige Dichtkante applizierten bekannten Ölmenge oder durch die inverse Montage des Radial-Wellendichtringes erfolgen. Eine umfassende Übersicht und eine ausführliche Beschreibung verschiedener Methoden, den Förderwert eines Radial-Wellendichtsystems zu messen, sind in [9] gegeben.

Drall-behaftete Dichtungsgegenlaufflächen verursachen im dynamischen Betrieb eines Radial-Wellendichtsystems eine eigene Fluidförderwirkung. Die Theorie besagt, dass ein Radial-Wellendichtsystem genau dann undicht wird, wenn diese Fluidförderwirkung bei entsprechender Rotationsrichtung der Welle aus dem System wirkt und die Rückförderkapazität des Radial-Wellendichtringes übersteigt. Um Drall-Grenzwerte festzulegen, müssten demnach die Förderkapazitäten der Dichtungsgegenlauffläche sowie des eingesetzten Radial-Wellendichtringes bilanziert werden.

Im Falle eines aus dem System fördernden Dralls würde sich auf diese Weise eine Dichtsicherheit S_{dicht} nach Gleichung (1) definieren lassen:

$$S_{dicht} = FW_{DR} - FW_{Welle} \quad (1)$$

Wäre es möglich, sowohl den Dichtringförderwert (FW_{DR}) als auch den Wellenförderwert (FW_{Welle}) auf empirischer Basis zu beschreiben, wäre bei einem positiven S_{dicht} Wert von einem funktionsfähigen Radial-Wellendichtsystem auszugehen. Es stellt sich somit die Frage, wovon die Förderfähigkeiten einer drall-behafteten Dichtungsgegenauflfläche und die des Radial-Wellendichtringes abhängen und inwieweit diese miteinander wechselwirken.

Für das gegebene Referenzdichtsystem wurden diese Abhängigkeiten bereits umfangreich untersucht [8, 9, 12]. Die hieraus resultierenden Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Der Wellenförderwert FW_{Welle} wird maßgeblich bestimmt durch:
 - den arithmetisch gemittelten Drallwinkel MS_{mean}^{15} der Dichtungsgegenauflfläche
 - die Oberflächenrauheit Sz^{16} der Dichtungsgegenauflfläche
 - die Rotationsgeschwindigkeit der Welle

2. Der Dichtringförderwert FW_{DR} wird maßgeblich bestimmt durch:
 - Die Oberflächenrauheit Sz der Dichtungsgegenauflfläche

Die umfangreichen experimentellen Ergebnisse der Förderwertversuche, welche die Grundlage für die vorgestellten Erkenntnisse bilden, sind in komprimierter Form in Bild 1 und Bild 2 dargestellt. Die Oberflächen- und Drallkenngrößen für die Versuchswellen wurden hierbei mit einem optischen Topographiemessgerät und dem in [8, 11] beschriebenen strukturbasierten Drallmessverfahren ermittelt.

¹⁵ Die Kenngröße MS_{mean} resultiert aus einer strukturbasierten Drallanalysemethode und kann als globaler Mikrodrallwinkel für eine Dichtungsgegenauflfläche interpretiert werden. Nähere Informationen zur strukturbasierten Drallauswertung gibt Quelle [8]

¹⁶ Der Sz -Wert ist nach DIN EN ISO 25178 genormt und gehört zu den sogenannten neuen 3D-Kenngrößen, welche anhand von 3D-Oberflächentopographien abgeleitet werden.

Bild 1 zeigt auf Basis von insgesamt 160 Förderwertversuchen mit einstichgeschliffenen Versuchswellen eine deutlich lineare Abhängigkeit des Dichtringförderwertes vom Sz-Wert der eingesetzten Dichtungsgegenläufigen. Aus den Ergebnissen resultiert folgende empirische Gleichung (2) für den Dichtringförderwert:

$$FW_{DR} \left[\frac{g}{h} \right] = 0,5372 \cdot Sz [\mu m] + 1,472 \quad (2)$$

Bild 2 zeigt anhand der bereits 2014 vorgestellten experimentellen Untersuchungen mit gezielt hergestellten drall-behafteten Versuchswellen [8, 11], dass sich der Wellenförderwert mit einer Kenngrößenkombination aus dem Produkt des Drallwinkels MS_{mean} und dem Sz-Wert beschreiben lässt. Hieraus resultiert Gleichung (3) für den Wellenförderwert:

$$FW_{Welle} \left[\frac{g}{h} \right] = 0,25 \cdot (Sz \cdot MS_{mean}) [^\circ \mu m] - 0,0487 \quad (3)$$

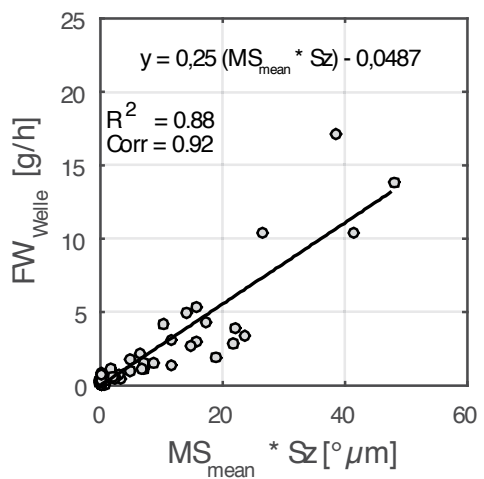
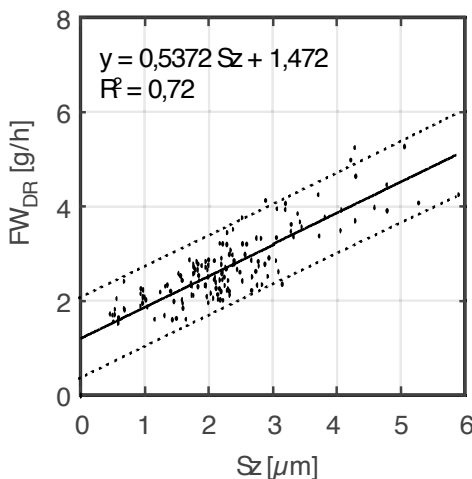


Bild 1: Ableitung einer Modellgleichung für den Dichtringförderwert für das Referenzdichtsystem bei 1000 U/min

Bild 2: Ableitung einer Modellgleichung für den Wellenförderwert für das Referenzdichtsystem bei 1000 U/min

Allgemein formuliert ergibt sich nach Gleichung (1) demnach folgende empirische Gleichung für die Dichtsicherheit S_{dicht} :

$$S_{dicht} [g/h] = (K_1 \cdot Sz [g/h] + K_2) - (K_3 \cdot (MS_{mean} \cdot Sz) [^\circ \mu m] + K_4) \quad (4)$$

Spannt man Gleichung (4) unter Berücksichtigung der für das Referenzdichtsystem gültigen, empirischen Konstanten $K_1 - K_4$ aus den Gleichungen (2) und (3) über dem Parameterraum auf, resultiert das in Bild 3 dargestellte Diagramm.

Da die den Modellgleichungen zugrunde liegenden, experimentellen Versuche alle bei einer Drehzahl von 1000 U/min mit einem Abdichtdurchmesser von 80 mm durchgeführt wurden, stellt das Diagramm die Dichtsicherheit bezogen auf eine Umfangsgeschwindigkeit von 4,19 m/s dar.

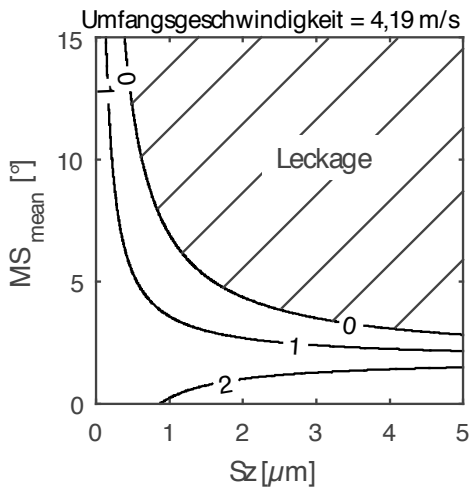


Bild 3: Dichtsicherheiten S_{dicht} des Referenzdichtsystems für eine Umfangsgeschwindigkeit von 4,19 m/s

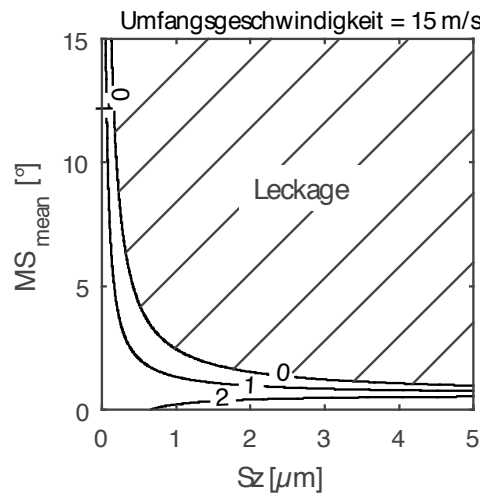


Bild 4: Dichtsicherheiten S_{dicht} des Referenzdichtsystems für eine Umfangsgeschwindigkeit von 15 m/s

Die Nulllinie des Diagramms zeigt in Abhängigkeit des Drallwinkels MS_{mean} und des Sz -Wertes der Dichtungsgegenauflfläche die zu erwartende Leckagegrenze des betrachteten Referenzdichtsystems. Liegen die Kennwerte einer Dichtungsgegenauflfläche oberhalb der Nulllinie, so ist bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 4,19 m/s mit sofort einsetzender Leckage zu rechnen. Setzt man eine höhere Dichtsicherheit S_{dicht} von beispielsweise 1 oder 2 g/h voraus, so verschieben sich die Linien zu geringeren Sz und MS_{mean} Werten. Höhere Drallwinkel können gemäß dem Diagramm bei geringeren Oberflächenrauheiten abgedichtet werden. Die Leckagegrenze sinkt für eine zunehmende Oberflächenrauheit hin zu kleineren Drallwinkeln. Dieser Effekt wird nochmals potenziert, wenn Gleichung (4) um den linearen Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf den Wellenförderwert erweitert wird:

$$S_{dicht} \left[\frac{g}{h} \right] = \left(K_1 \cdot Sz \left[\frac{g}{h} \right] + K_2 \right) - (K_3 \cdot (MS_{mean} \cdot Sz) [^\circ \mu m] + K_4) \cdot K_5 [m/s] / 4,19 \quad (5)$$

Hieraus resultiert beispielsweise das in Bild 4 aufgetragene Diagramm für eine Umfangsgeschwindigkeit von 15 m/s. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Grenzkurven für höhere Umfangsgeschwindigkeiten einen für die Dichtungsgegenläufigkeit engeren Bereich tolerieren.

Möchte man darüber hinaus den Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit direkt berücksichtigen, lässt sich aus Gleichung (5) das in Bild 5 dargestellte Diagramm konstruieren. Hierfür werden die entsprechenden Kurven für eine festgelegte Dichtsicherheit berechnet und in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit in ein gemeinsames Diagramm überführt. Für eine Dichtsicherheit S_{dicht} von 0 g/h stellen die Kurven beispielsweise die Leckagegrenze für das betrachtete Referenzdichtsystem dar.

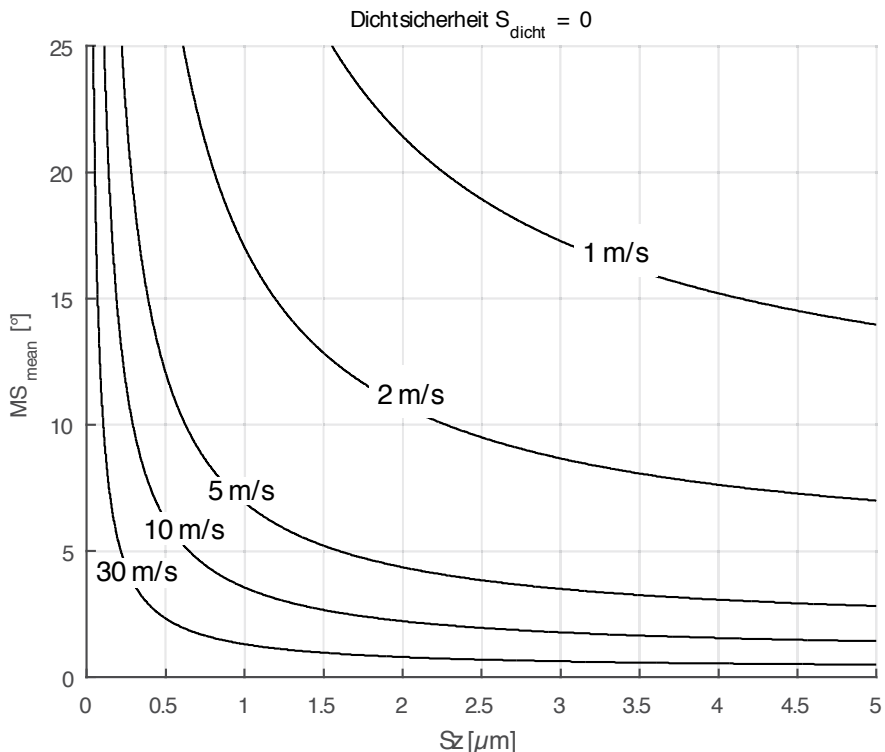


Bild 5: Drallgrenzkurven $S_{dicht} = 0$ des Referenzdichtsystems in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit

Äquivalent zu den Darstellungen in Bild 3 und Bild 4 lassen sich aber auch Diagramme für höhere Dichtsicherheiten ableiten. Bild 6 zeigt beispielsweise das sich für eine Dichtsicherheit von 2 g/h ergebende Diagramm. Die Grenzen für einen tolerierbaren Drall verschieben sich hier deutlich zu geringeren Drallwinkeln. Interessant ist darüber hinaus, dass Oberflächenrauheiten mit Sz Werten kleiner als 1 μm größtenteils außerhalb des tolerierten Bereiches liegen. Diese Grenze stimmt im übertragenen Sinne überraschend genau mit den in gängigen Normen für Radial-Wellendichtringe spezifizierten unteren Grenzwerten für die Oberflächenrauheit überein. Wobei allerdings beachtet werden muss, dass der Sz-Wert nicht dem Rz-Wert einer Oberfläche gleichgesetzt werden kann.

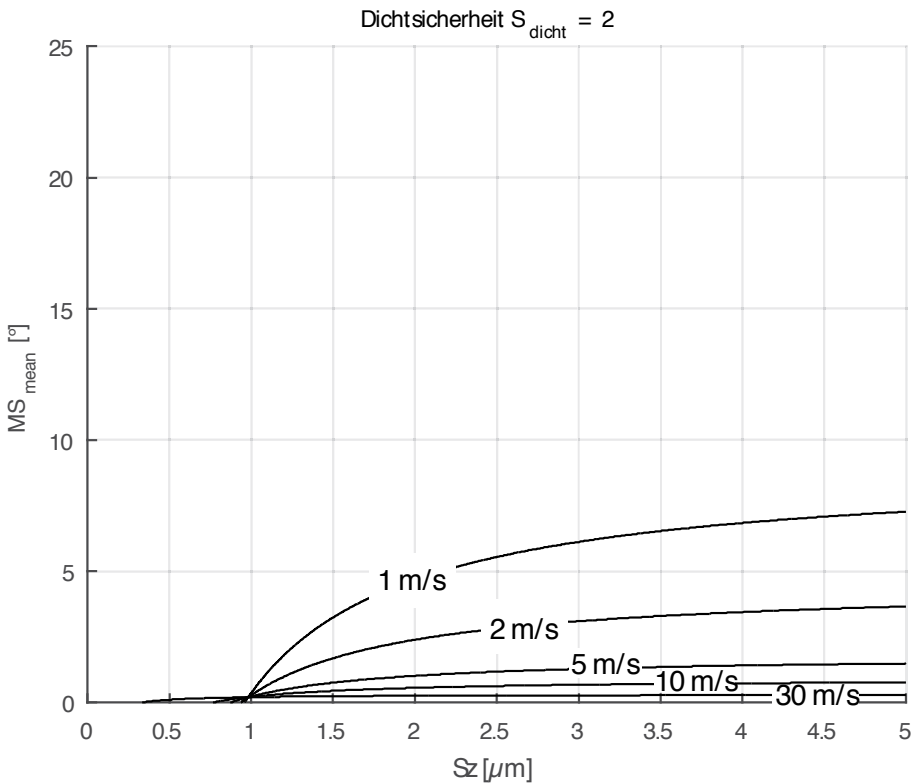


Bild 6: Drallgrenzkurven $S_{\text{dicht}} = 2$ des Referenzdichtsystems in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit

4. Verifikation des empirischen Regressionsmodells

Für eine aus dem Dichtsystem fördernde, drallbehaftete Dichtungsgegenlauffläche kann aus Bild 5 direkt die Umfangsgeschwindigkeit abgelesen werden, ab welcher

mit einer Leckage gerechnet werden muss. Mit der Absicht, die Genauigkeit der Vorhersage des Modells zu bestimmen, wurden Prüfläufe mit drall-behafteten Versuchswellen durchgeführt. Um mit den Versuchen einen repräsentativen Bereich abzubilden, wurden gezielt 14 Versuchswellen über einen großen Bereich des Diagrammes ausgewählt und derart im Prüfstand montiert, dass deren Förderwirkung aus dem System gerichtet ist. Bild 7 zeigt die Kennwerte der Versuchswellen sowie die dazugehörigen Positionen im Diagramm.

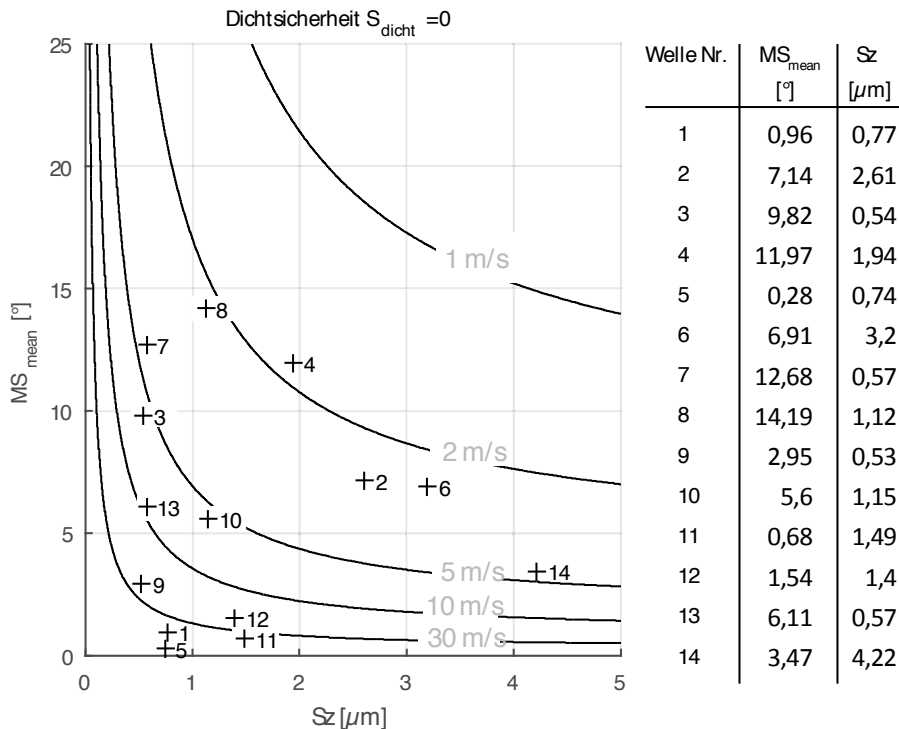


Bild 7: Drallgrenzkurven $S_{\text{dicht}} = 0$ des Referenzdichtsystems mit eingetragenen Kennwerten der Versuchswellen

Um die tatsächliche Umfangsgeschwindigkeit zu bestimmen, ab welcher die Dichtsysteme undicht werden, wurde die Wellendrehzahl im Versuch in festgelegten Rampen durchfahren. Nach einer dreistündigen Einlaufphase mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 4,19 m/s bei einer Ölsumpftemperatur von 40° C, folgte hierfür in Abständen von jeweils 5 Minuten eine Erhöhung oder Verringerung der Umfangsgeschwindigkeit um jeweils 0,42 m/s. Für Versuchswellen, welche bereits zu Beginn des Versuches Leckage zeigten, wurde die Umfangsgeschwindigkeit ausgehend von der Einlaufdrehzahl solange verringert, bis die Leckage stagnierte. Für alle anderen Versuchswellen wurde die Umfangsgeschwindigkeit bis zu einem maximalen Wert von 25 m/s erhöht und der Zeitpunkt einsetzender Leckage notiert.

Tabelle 2 stellt die im Versuch ermittelten Leckagegeschwindigkeiten den mittels Regressionsmodell erwarteten Leckagegeschwindigkeiten der Versuchswellen gegenüber.

Tabelle 2: Erwartete und gemessene Umfangsgeschwindigkeit bis zum Einsetzen drall-bedingter Leckage

Welle Nr.	Erwartete Leckagegeschwindigkeit [m/s]	Gemessene Leckagegeschwindigkeit [m/s]
1	> 30	Dicht bis 25 m/s
2	2,61	5,86
3	5,78	5,86
4	1,83	2,09
5	>30	Dicht bis 25 m/s
6	2,44	3,35
7	4,24	4,19
8	2,21	2,51
9	21,5	20,11
10	5,61	18,43
11	>30	Dicht bis 25 m/s
12	19	Dicht bis 25 m/s
13	9,06	8,8
14	4,33	20,11

Anhand der Werte in Tabelle 2 ist ersichtlich, dass das vorgestellte empirische Regressionsmodell für die Mehrheit der Versuchswellen eine gute bis sehr gute Vorhersage für die Umfangsgeschwindigkeit liefert, ab welcher eine Leckage einsetzt. So waren die Versuchswellen 1, 5, 11 und 12 für die eine hohe Leckagegeschwindigkeit erwartet wurde, bis 25 m/s dicht. Eine sehr gute Übereinstimmung ergab sich für die Wellen 3, 4, 6, 7, 8, 9 und 13, welche alle sehr nahe der vorhergesagten Umfangsgeschwindigkeit Leckage zeigten. Größere Abweichungen resultierten nur für die Versuchswellen 2, 10 und 14. Bei allen drei Versuchswellen setzte eine Leckage aber erst bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten ein als ursprünglich erwartet.

5. Diskussion

Aus Abschnitt 4 lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass das vorgestellte empirische Regressionsmodell im Kurzzeitversuch eine sehr gute Abschätzung für die Förderwirkung drallbehafteter Dichtungsgegenaufläachen ermöglicht. Der im Versuch untersuchte Radial-Wellendichtring des Typs BAUM5X7 ist zudem in der Lage, erstaunlich hohe Drallwinkel zu kompensieren und somit bedingt auch das Abdichten drall-behafteter Dichtungsgegenaufläachen zu ermöglichen. Insbesondere für höhere Dichtsicherheiten, wie beispielsweise anhand Bild 6 ($S_{\text{dicht}} = 2$) gezeigt, sollte das vorgestellte Modell daher einen sicheren Betrieb eines Radial-Wellendichtsystems ermöglichen.

Dies gilt jedoch bislang nur für den Fall eines aus dem System fördernden Dralls. Wirkt die drall-induzierte Fluidförderwirkung gleichgerichtet mit der Rückförderwirkung des Radial-Wellendichtringes in das System, kann auch mittels einer Bilanzierung der Förderströme keine klare Grenze abgeleitet werden. Ab wann aufgrund der drall-induzierten Wellenförderwirkung eine Mangelschmierung einsetzt, könnte möglicherweise mittels Reibmomentmessungen analysiert werden. Dies ist aber nicht Inhalt dieses Beitrages. Grundsätzlich sollte ein in das System fördernder Drall daher nicht toleriert werden. Für einen aus dem System fördernden Drall bietet das hier vorgestellte Regressionsmodell, zumindest für das betrachtete Referenzdichtsystem, eine gute Grundlage um Grenzwerte zu definieren. Anhand der vorgestellten Diagramme in Bild 5 und Bild 6 kann der Anwender auf einfache Weise nach einer optischen Topographiemessung der Dichtungsgegenaufläache einer einzusetzenden Welle ablesen, ob diese innerhalb oder außerhalb der Toleranz ist. Zum ersten Mal besteht auf diese Weise eine fundierte, auf empirischer Basis hergeleitete Möglichkeit, Drallgrenzwerte für ein bekanntes Radial-Wellendichtsystem abzuleiten.

Inwieweit der hier vorgestellte Ansatz der empirischen Modellierung auf alternative Dichtsysteme, andere Temperaturen und Nenndurchmesser sowie weitere Radial-Wellendichtringe oder Materialien übertragen werden kann, wurde bislang noch nicht untersucht. Es ist aber nicht anzunehmen, dass sich das zugrunde liegenden Funktionsverhalten drall-behafteter Dichtungsgegenaufläachen sowie das des Radial-Wellendichtringes für alternative Komponenten grundsätzlich ändert. Vielmehr zeigen bereits durchgeführte Experimente [9], dass alternative Radial-Wellendichtsysteme zwar vom Betrag her abweichende Förderkapazitäten aufweisen, das zugrunde liegende Systemverhalten aber beibehalten. Demnach besteht das Ziel weiterer Untersuchungen darin, ein Vorgehensschema abzuleiten, mit welchem mit möglichst geringem experimentellem Aufwand die empirische Basis für weitere Radial-Wellendichtsysteme geschaffen werden kann. Diese Modelle gilt es dann für einen Einsatz in der Praxis zu validieren.

6. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein empirisches Regressionsmodell für die drall-induzierte Fluidförderwirkung von Dichtungsgegenläufigen vorgestellt. Mit diesem ist es bislang möglich für ein bekanntes Referenzdichtsystem konkrete Parametergrenzen für einen tolerierbaren Drall auf der Dichtungsgegenläufigen abzuleiten. Somit wird ein bereits seit langem in der Praxis bestehendes Problem im Ansatz gelöst. Eingangsgrößen für das Modell sind die Oberflächenrauheit (S_z) sowie der Drallwinkel (MS_{mean}) der Dichtungsgegenläufigen. Diese werden mittels optischer Topographiemessungen der Dichtungsgegenläufigen ermittelt.

Die Gültigkeit der vom Modell vorhergesagten Grenzen wurde mittels Funktionsuntersuchungen experimentell bestätigt. Hierbei ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung für eine überwiegende Mehrheit, der im Versuch betrachteten Versuchswellen. Für höhere Dichtsicherheiten ermöglicht das Modell somit erstmals einen in Bezug auf Drall abgesicherten, Leckage-freien Betrieb von Radial-Wellendichtsystemen. Eine Übertragbarkeit des vorgestellten Modells auf weitere Radial-Wellendichtsysteme wird zukünftig in weiteren experimentellen Versuchen verfolgt und auf Realisierbarkeit überprüft.

Das IGF-Vorhaben 18186 N/1 des Forschungskuratoriums Maschinenbau 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. Literatur

- [1] Lein, J.: Mechanische Untersuchungen an Dichtungsringen für rotierende Wellen. Berlin, Heidelberg 1954.
- [2] Baumann, M.; Baitinger, G.; Bauer, F.; Haas, W.: How to measure lead in sealing technology. In: Sealing Technology (2013) 03/2013.
- [3] Baitinger, G.; Haas, W.: Drallmessung in der Dichtungstechnik. In: Antriebstechnik 40 (2011) 12, S. 44–47.
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 3760: Radial-Wellendichtringe (1996) DIN 3760. Berlin.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 3761: Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge (1983).
- [6] Rubber Manufacturers Association: RMA OS-1-1: Shaft Finish Requirements for Radial Lip Seals (2004) RMA OS-1-1.

- [7] International Organization for Standardization: ISO 6194: Rotary shaft lip-type seals incorporating elastomeric sealing elements (2007) 6194.
- [8] Baumann, M.; Haas, W.: Strukturanalyse II - Ganzheitliche, funktionale Bewertung von Dichtungsgegenauflflächen mittels Strukturanalyse unter Einbeziehung der Wirkung von Strukturen auf die Förderwirkung der Welle, Abschlussbericht FKM Forschungsvorhaben Nr. 298. Frankfurt/Main 2014.
- [9] Remppis, M., Bauer, F., Haas, W.: Rechnerische Abschätzung der Dichtgüte von Radial-Wellendichtungen durch Kenntnis der Systemparametereinflüsse, Abschlussbericht FVA-Forschungsvorhaben Nr. 617. Frankfurt/Main 2013.
- [10] Baitinger, G.; Haas, W.: Strukturanalyse – Drall- und Mikrostrukturanalyse zur Funktionalen Bewertung von Dichtringgegenauflflächen, Abschlussbericht FKM Forschungsvorhaben Nr. 285. Frankfurt/Main 2011.
- [11] Baumann, M.; Bauer, F.; Haas, W.: Messung Analyse und Bewertung von Dichtungsgegenauflflächen für das Tribo-System Radial-Wellendichtung: 18th International Sealing Conference.
- [12] Remppis, M.: Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer. Stuttgart 2016.