

# 20<sup>th</sup> ISC

Stuttgart, Germany  
Oct. 10 – 11, 2018



## International Sealing Conference *Internationale Dichtungstagung*

Eine Kooperation von



Fluidtechnik

20<sup>th</sup> 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](mailto:christian.geis@vdma.org)  
Internet [www.vdma.org/fluid](http://www.vdma.org/fluid)

## Förderwirkung von Fehlstellen im Dichtsystem Radial-Wellendichtung



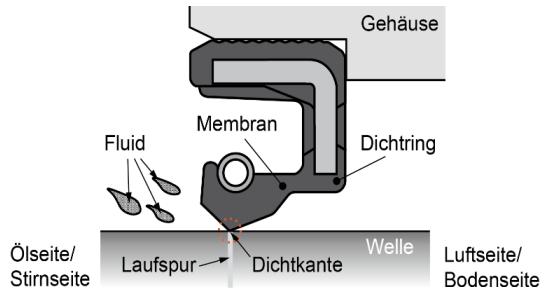
Dipl.-Ing. Jan Totz, Dr.-Ing. Matthias Baumann, Dr.-Ing. Frank Bauer, Institut für Maschinenelemente (IMA), Universität Stuttgart, Deutschland

### 1 Einleitung und Hintergrund

Dichtungsgegenauflflächen für RWDR (Radial-Wellendichtringe) werden standardmäßig gehärtet und anschließend im Einstich geschliffen. Der Härtingsprozess ist aufwändig und muss bei kleineren Unternehmen sogar häufig extern durchgeführt werden. Daher wird seit einigen Jahren vermehrt versucht, diesen Prozessschritt zu umgehen und weichgeschliffene Dichtungsgegenauflflächen einzusetzen. Grundsätzlich lassen sich weichgeschliffene Wellen in vielen Fällen problemlos als Dichtungsgegenauflflächen für RWDR aus NBR einsetzen. Dies haben beispielsweise die Untersuchungen im Forschungsprojekt „weiche Dichtungsauflflächen III“ [1] gezeigt. Weil sie eine geringere Härte aufweisen sind weichgeschliffene Wellen jedoch sehr anfällig gegenüber Fehlstellen, weshalb diese nun verstärkt in den Fokus geraten. Beispiele für Fehlstellen sind dabei insbesondere handhabungsbedingte Kratzer, die in der Praxis nur schwer verhindert werden können. Hinzu kommen Schleifkommata, die zu den fertigungsbedingten Fehlstellen gezählt werden können. Schleifkommata treten zwar auch bei hartgeschliffenen Wellen auf, sind bei weichgeschliffenen Wellen jedoch meist erheblich stärker ausgeprägt. Schleifkommata und Kratzer stehen schon seit längerem im Verdacht Leckage bzw. den Ausfall von Radial-Wellendichtungen zu verursachen. Der Einfluss von Fehlstellen auf die Dichtfunktion wird daher in dieser Arbeit untersucht und quantitativ beschrieben. Hierzu wird die Förderwirkung von Wellen mit unterschiedlichen Kratzern und Schleifkommata in Dichtsystemen mit RWDR aus NBR ermittelt. So können Kriterien für singuläre Fehlstellen abgeleitet werden, die als kritisch für das Dichtsystem angesehen werden müssen.

## 2 Grundlagen

Radial-Wellendichtungen werden eingesetzt um rotierende Wellen gegen stehende Maschinenteile abzudichten. Eine Radial-Wellendichtung setzt sich zusammen aus dem RWDR, der Welle und dem abdichtenden Fluid, *Bild 1*. Die Dichtkante des RWDR steht dabei in direktem Kontakt mit der rotierenden Welle. Dieser Dichtkontakt stellt ein sensibles tribologisches System dar und ist abhängig von den Betriebsbedingungen.

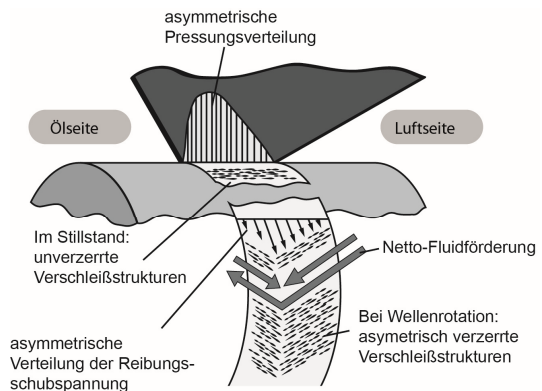


*Bild 1: Aufbau einer Radial-Wellendichtung [2]*

### 2.1 Funktionsweise von Radial-Wellendichtungen

Der RWDR aus Elastomer bildet im dynamischen Betrieb einen Rückfördermechanismus aus und fördert dadurch aktiv Fluid von der Luftseite in den abdichtenden Raum. Der Rückfördermechanismus ist auf die asymmetrische Pressungsverteilung im Dichtkontakt zurückzuführen. Ursache für die asymmetrische Pressungsverteilung sind die asymmetrischen Dichtkantenwinkel. Zur Erklärung der Förderwirkung wurden verschiedene Förderhypothesen entwickelt. Zu nennen ist die Verzerrungshypothese nach Kammüller [3], die Seitenstromhypothese nach Müller [4] oder die Wischkantenhypothese nach Jenisch [5].

In *Bild 2* ist die Förderwirkung eines RWDR anhand der Verzerrungshypothese [3] dargestellt. Nach der Verzerrungshypothese entstehen während des Einlaufs axiale Verschleißstrukturen. Diese axialen Verschleißstrukturen wirken wie kleine Kanäle und werden infolge der Reibung im Betrieb in Umfangsrichtung verzerrt. Die Verzerrung des Elastomers in Umfangsrichtung verläuft entlang der asymmetrischen Pressungsverteilung. Im Pressungsmaximum wird das Elastomer demnach am stärksten verzerrt. So entstehen Kanäle, die auf der Luftseite länger sind als auf der Ölseite. Die längeren luftseitigen Kanäle fördern mehr Fluid in die Richtung des Pressungsmaximums als die kürzeren



*Bild 2: Verzerrungshypothese [6]*

Die längeren luftseitigen Kanäle fördern mehr Fluid in die Richtung des Pressungsmaximums als die kürzeren

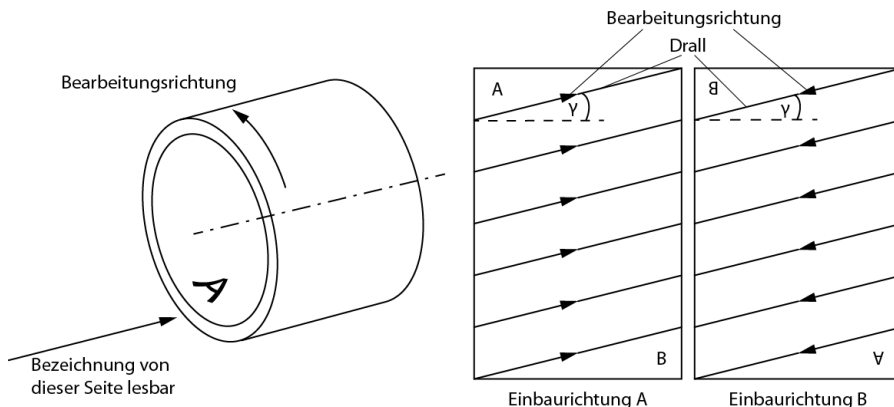
ölseitigen Strukturen. In Summe kommt es zu einer gerichteten Fluidströmung von der Luft- zur Ölseite.

## 2.2 Förderwirkung durch die Wellenoberfläche

Die Wellenoberfläche beeinflusst die Förderwirkung des Dichtsystems und muss daher ebenfalls betrachtet werden. So hängt die Förderwirkung des Dichtrings nach Remppis [7], aufgrund der Konditionierung des Elastomermaterials im Dichtkontakt, unter anderem von der Oberflächenrauheit ab. Davon abzugrenzen sind Strukturen, die eine aktive Förderwirkung der Welle im Dichtkontakt erzeugen. Zu nennen sind hier Mikro- und Makrodrallstrukturen, die nach Baumann [6] zu einer drehrichtungsabhängigen Förderwirkung im Dichtkontakt führen.

### 2.2.1 Drehrichtungsabhängige Fluidförderwirkung der Versuchswellen

Wellenoberflächen können eine drehrichtungsabhängige Förderwirkung aufweisen. Ursache für die drehrichtungsabhängige Fluidförderwirkung sind Drallstrukturen. Diese weisen per Definition eine Winkelabweichung zur Umfangsrichtung auf, die hier mit  $\gamma$  bezeichnet wird. Die Orientierung der Strukturen ist verantwortlich für die Drehrichtungsabhängigkeit der Förderwirkung. Der Drallwinkel  $\gamma$  hängt hierbei jedoch nicht von der Einbaurichtung der Welle ab, *Bild 3*. Dieser Umstand spielt im weiteren Verlauf eine wichtige Rolle und wird daher im folgenden Kapitel weiter ausgeführt.



*Bild 3: Welleneinbaurichtung und Drallorientierung  $\gamma$  [1]*

### 2.2.2 Einbaurichtungsabhängige Fluidförderwirkung der Versuchswellen

Aus dem Schleifprozess mit dem Dichtflächen hergestellt werden resultiert grundsätzlich eine Fertigungsrichtung. In der Regel wird im Gegenlauf geschliffen. Durch die Einbaurichtung der Versuchswellen am Prüfstand kann somit also variiert werden, ob die Welle bei festgelegtem Drehsinn des Dichtsystems in Fertigungsrichtung oder entgegen der Fertigungsrichtung der Versuchswelle betrieben wird. In *Bild 4* ist die Auswirkung dieser Welleneinbaurichtung anhand eines Schleifkommas verdeut-

licht. Je nach Einbausituation bewegt sich das Schleifkomma mit seiner steilen oder seiner flachen Flanke in Wellenumfangsrichtung. Dies entscheidet damit beispielsweise über den hydrodynamischen Druck, welcher im Dichtkontakt durch das Auflaufen von Öl an der Flanke entsteht. Dementsprechend kann der Einfluss eines Schleifkommata auf die Funktion des gesamten Dichtsystems unterschiedlich ausfallen.

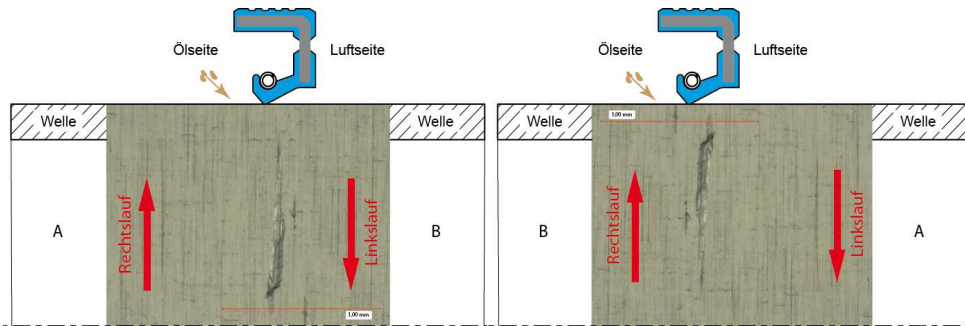


Bild 4: Zusammenhang zwischen Fertigungs- und Einbaurichtung der Welle [1]

### 2.3 Förderwertmessung

Anhand des Förderwerts kann ein Dichtsystem quantitativ beschrieben werden. Auf diese Weise kann ein direkter Vergleich verschiedener Dichtsysteme erfolgen. Um den Förderwert durch einen Versuch zu ermitteln wird die Förderwertmessung eingesetzt. Es sind verschiedene Methoden der Förderwertmessung bekannt. Zu nennen sind die Einspritzmethode, die Zweikammermethode und die Methode des inversen Einbaus, die bspw. von Bekgulyan [8] ausführlich beschrieben werden. In den vorliegenden Untersuchungsergebnissen wurde ausschließlich die Methode des inversen Einbaus eingesetzt, bei der der RWDR invers eingebaut und über eine definierte Messzeit von 10 h betrieben wird, Bild 5 (li.). Im Betrieb fördert das Dichtsystem Fluid aus dem abzudichtenden Raum heraus. Diese Fördermenge wird anschließend erfasst und auf die Versuchszeit bezogen. Die Betriebsbedingungen für die Förderwertmessungen sind in Bild 5 (re.) abgebildet.

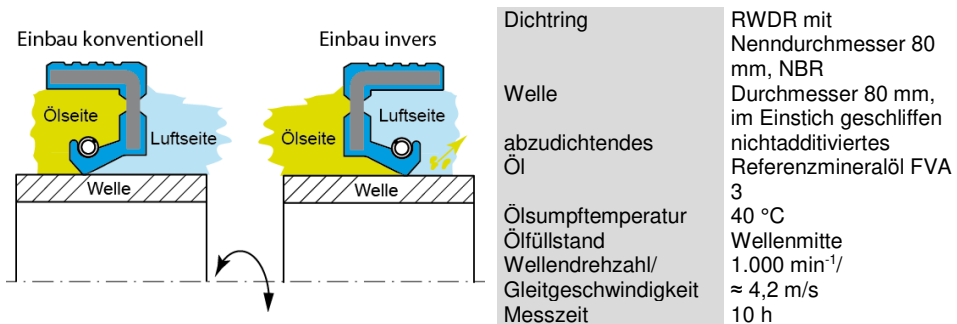


Bild 5: Einbau des Dichtrings (li.) - Betriebsbedingungen für Förderwertmessungen (re.)

### 3 Untersuchungsmethodik

In diesem Abschnitt wird eine Untersuchungsmethodik vorgestellt, um das Förderverhalten von singulären Fehlstellen auf Wellenoberflächen in Dichtsystemen mit RWDR gezielt zu ermitteln. Hierzu wurden zunächst einige Voruntersuchungen zum Verhalten von RWDR aus NBR und von Dichtungsgegenaufläachen durchgeführt. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen werden nachfolgend beschrieben.

#### 3.1 Einfluss von Exzentrizität und Konditionierung auf den Förderwert

Zunächst wurde untersucht, wie lange ein Dichtsystem betrieben werden muss, bis sich aufgrund der Konditionierung der Systemkomponenten ein konstanter Förderwert einstellt. Hierzu wurde je eine Welle mit und ohne Exzentrizität zusammen mit einem neuen, invers montiertem Dichtring über eine Laufzeit von 240 h betrieben. In Intervallen von 12 h wurde hierbei die Fördermenge der Dichtsysteme ermittelt. In *Bild 6* (li.) ist der Verlauf der Fördermenge bei zentrisch montierter Welle abgebildet. Bei den Förderwertmessungen in *Bild 6* (re.) wurde das Dichtsystem mit einer dynamischen Exzentrizität der Welle von 0,3 mm ausgeführt. Es ist deutlich zu sehen, dass sich in beiden Fällen erst nach ca. 4 Tagen eine konstante Förderwirkung einstellt.

Im Anschluss an Messung 16 wurden beide Dichtsysteme demontiert und anschließend wieder montiert. Die darauffolgende Förderwertmessung 17 zeigt, dass der Förderwert bei zentrischem Einlauf des Dichtsystems nach der Demontage deutlich ansteigt. In diesem Fall wird das Dichtsystem durch einen Umbau maßgeblich beeinflusst. Beim Einlauf des Dichtsystems mit dynamischer Exzentrizität der Welle von 0,3 mm bleibt der Förderwert nach der Demontage hingegen etwa konstant. Da für eine gezielte Untersuchung von Fehlstellen vor allem die Welle mehrmals ein- und wieder ausgebaut werden muss, folgt aus diesen Ergebnissen die Konsequenz, dass durch den Einsatz einer exzentrischen Welle das Dichtsystem derartig konditioniert werden kann, dass durch einen Umbau nur ein geringer Einfluss auf den Förderwert entsteht.

Der Einlauf eines Dichtsystems wird in den weiteren Untersuchungen daher mit einer dynamischen Exzentrizität von 0,3 mm und über eine Laufzeit von mindestens 96 h bei invers montiertem RWDR erfolgen. Nur so können Funktionsuntersuchungen mit Umbau der Radial-Wellendichtung erfolgen, ohne die Förderwirkung des RWDR zu beeinflussen.



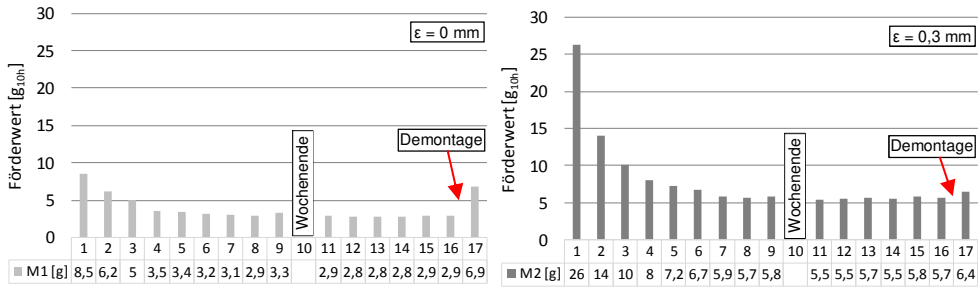


Bild 6: Einlaufverhalten von RWDR und Einfluss der Demontage auf den Förderwert

### 3.2 Einfluss von Wellendrehrichtung auf den Förderwert

Im Anschluss an die zuvor dargestellten Versuche wurde untersucht, ob RWDR aus NBR nach einer Konditionierung in einer Wellendrehrichtung, in beide Wellendrehrichtungen gleich viel fördern, oder ob es zu einer Drehrichtungsabhängigkeit der Förderwirkung kommt. Hierzu wurde mit je einem neuen RWDR eine Konditionierung im Linkslauf und eine im Rechtslauf durchgeführt. Anschließend wurden mit beiden RWDR Förderwertmessungen in und entgegen der Konditionierungsrichtung durchgeführt. Es zeigt sich deutlich, dass der Förderwert des Dichtsystems sowohl bei einer Laufzeit von 96 h (Bild 7 (li.)) als auch bei einer Laufzeit von 240 h (Bild 7 (re.)) in beide Konditionierungsrichtungen größer ist als in der jeweiligen entgegengesetzten Wellendrehrichtung.

RWDR aus NBR können nach der Konditionierung demnach nicht zu Förderwertmessungen in beliebige Drehrichtungen eingesetzt werden. Für eine Förderwertmessung in zwei verschiedenen Wellendrehrichtungen muss daher für jede der beiden Drehrichtungen ein neuer Dichtring eingesetzt werden.

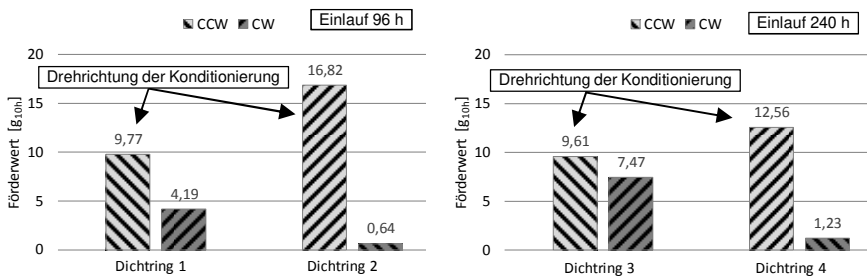
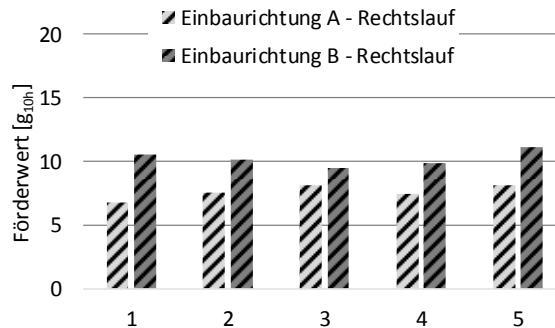


Bild 7: Drehrichtungsabhängige Förderwirkung von RWDR aus NBR

### 3.3 Einfluss von Welleneinbaurichtung auf den Förderwert

Zusätzlich zur Wellendrehrichtung muss auch die Welleneinbaurichtung betrachtet werden. In den Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass sich der Förderwert des Dichtsystems bei gleicher Wellendrehrichtung in die beiden Welleneinbaurichtungen unterscheiden kann. In *Bild 8* sind Förderwerte an 5 verschiedenen Positionen auf einer Wellenoberfläche in je der Einbaurichtung A und der Einbaurichtung B dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Fördermengen in Einbaurichtung B immer größer sind als in Einbaurichtung A. Bei den nachfolgenden Förderwertmessungen von Fehlstellen müssen also nicht nur beide Wellendrehrichtungen, sondern auch beide Welleneinbaurichtungen betrachtet werden.



*Bild 8: Einfluss der Einbaurichtung auf den Förderwert [7]*

### 3.4 Abgeleitete Untersuchungsmethodik für die Förderwertmessung an Fehlstellen

Bei der Durchführung der nachfolgenden Förderwertmessungen werden die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen berücksichtigt. Es hat sich gezeigt, dass eine Dichtringkonditionierung mit dynamischer Exzentrizität der Welle dazu führt, dass sich der Förderwert infolge Demontage nicht mehr ändert. Jedes Dichtsystem wird daher vor der ersten Förderwertmessung einem Einlauf mit invers eingebautem Dichtring und einer dynamischen Exzentrizität der Versuchswelle unterzogen. Für die beiden Drehrichtungen werden zwei separate Dichtringe eingesetzt. Hierzu wird ein Dichtring einem Einlauf im Linkslauf (CCW) und der andere Dichtring einem Einlauf im Rechtslauf (CW) unterzogen. Der Einlauf erfolgt mit einer dynamischen Exzentrizität der Versuchswelle mit 0,3 mm und um einen möglichst konstanten Förderwert zu erzielen über eine Laufzeit von 240 h. Die daran anschließenden Förderwertmessungen werden mit den nachfolgenden Betriebsbedingungen durchgeführt, *Bild 9*. Die Förderwertmessungen erfolgen, um eine Beeinflussung der Funktion zu vermeiden, ohne eine dynamische Exzentrizität der Versuchswellen. Die dynamische Exzentrizität wurde bei jedem Montagevorgang sehr genau eingestellt und gemessen. Die dynamische Exzentrizität der Versuchswelle betrug stets weniger als 0,02 mm, wenn hier von einer zentrischen Welle (Null-exzentrizität) gesprochen wird.

	Einlauf	Förderwertmessung
<b>Dichtring</b>	RWDR mit Nenndurchmesser 80 mm, Werkstoff NBR	
<b>Welle</b>	Wellendurchmesser 80 mm, im Einstich geschliffen	
<b>abdichtendes Öl</b>	nichtadditiviertes Referenzmineralöl FVA 3	
<b>Einbau Dichtring</b>	invers	
<b>Ölumpftemperatur</b>	40 °C	
<b>Ölfüllstand</b>	Wellenmitte	
<b>Wellendrehzahl/ Gleitgeschwindigkeit</b>	1.000 min <sup>-1</sup> / ≈ 4,2 m/s	
<b>Laufzeit/ Messzeit</b>	240 h	10 h
<b>Dynamische Exzentrizität</b>	0,30 mm	Vorgabe: 0 mm Tatsächlich < 0,02 mm

Bild 9: Versuchsteile und Betriebsbedingungen für die Förderwertmessungen

## 4 Ergebnisdarstellung zu den Funktionsuntersuchungen

Die Ergebnisse der Förderwertmessungen werden nachfolgend dargestellt.

### 4.1 Referenzförderwert

Zunächst wird ein Referenzförderwert ermittelt. Hierzu wurden Förderwertmessungen an fünf verschiedenen Positionen auf der Wellenoberfläche durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich keine Fehlstelle im Dichtkontakt befindet. Die fünf Förderwertmessungen wurden in beide Dreh- und Einbaurichtungen der Welle durchgeführt. Für die beiden Wellendrehrichtungen wurde jeweils der Dichtring eingesetzt, der bereits nach den Vorgaben in Abschnitt 3 für die entsprechende Wellendrehrichtung vorkonditioniert wurde. Für die beiden Einbaurichtungen bei gleicher Drehrichtung wurde derselbe Dichtring eingesetzt. Die Ergebnisse der Förderwertmessungen in beide Wellendreh- und einbaurichtungen sind in *Bild 10* dargestellt.

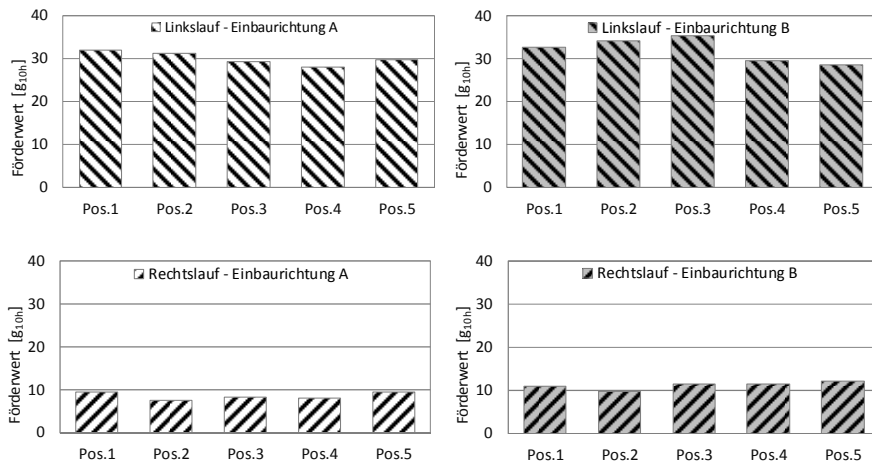
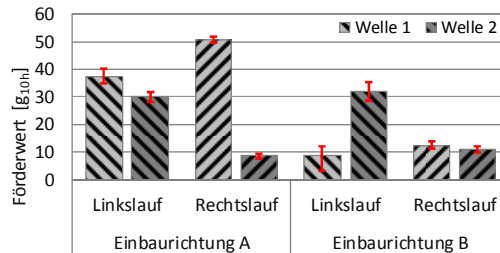


Bild 10: Ergebnisse der Förderwertmessungen mit Welle 2

Für die weitere Darstellung wird für jede Dreh- und Einbaurichtung ein Referenzförderwert durch Mittelwertbildung der 5 Förderwertmessungen ermittelt.

Die Referenzförderwerte sind in *Bild 11* dargestellt. Zusätzlich ist die maximale Abweichung der fünf zugrundeliegenden Messungen als Fehlerbalken eingezeichnet. Sowohl die Dichtsysteme mit Welle 1 als auch die Dichtsysteme mit Welle 2 weisen eine deutliche drehrichtungsabhängige Förderwirkung auf. Welle 1 weist im Gegensatz zu Welle 2 jedoch auch eine deutliche einbaurichtungsabhängige Förderwirkung auf.



*Bild 11: Referenzförderwert der Dichtsysteme mit Welle 1 und Welle 2*

#### 4.2 Förderwertmessung bei Schleifkommata

Die Ergebnisse der Förderwertmessungen sind in *Bild 12* und *Bild 13* als absolute Fördermenge in der Messzeit 10 h und normalisiert dargestellt. Zusätzlich ist die Fluidströmungsrichtung im Dichtkontakt für jede Fehlstelle bzw. jede Dreh- und Einbaurichtung abgebildet. Die Strömungsrichtung ist immer entgegen der Wellendrehrichtung gerichtet. Die Darstellung zeigt, dass die Fördermengen mit Fehlstelle im Dichtkontakt durchweg größer sind als an den entsprechenden Referenzpositionen ohne Fehlstellen. Es spielt dabei scheinbar nur eine untergeordnete Rolle, welche geometrische Form die Fehlstelle aufweist. Keine der Fehlstellen ist jedoch durchgängig durch den Dichtkontakt.

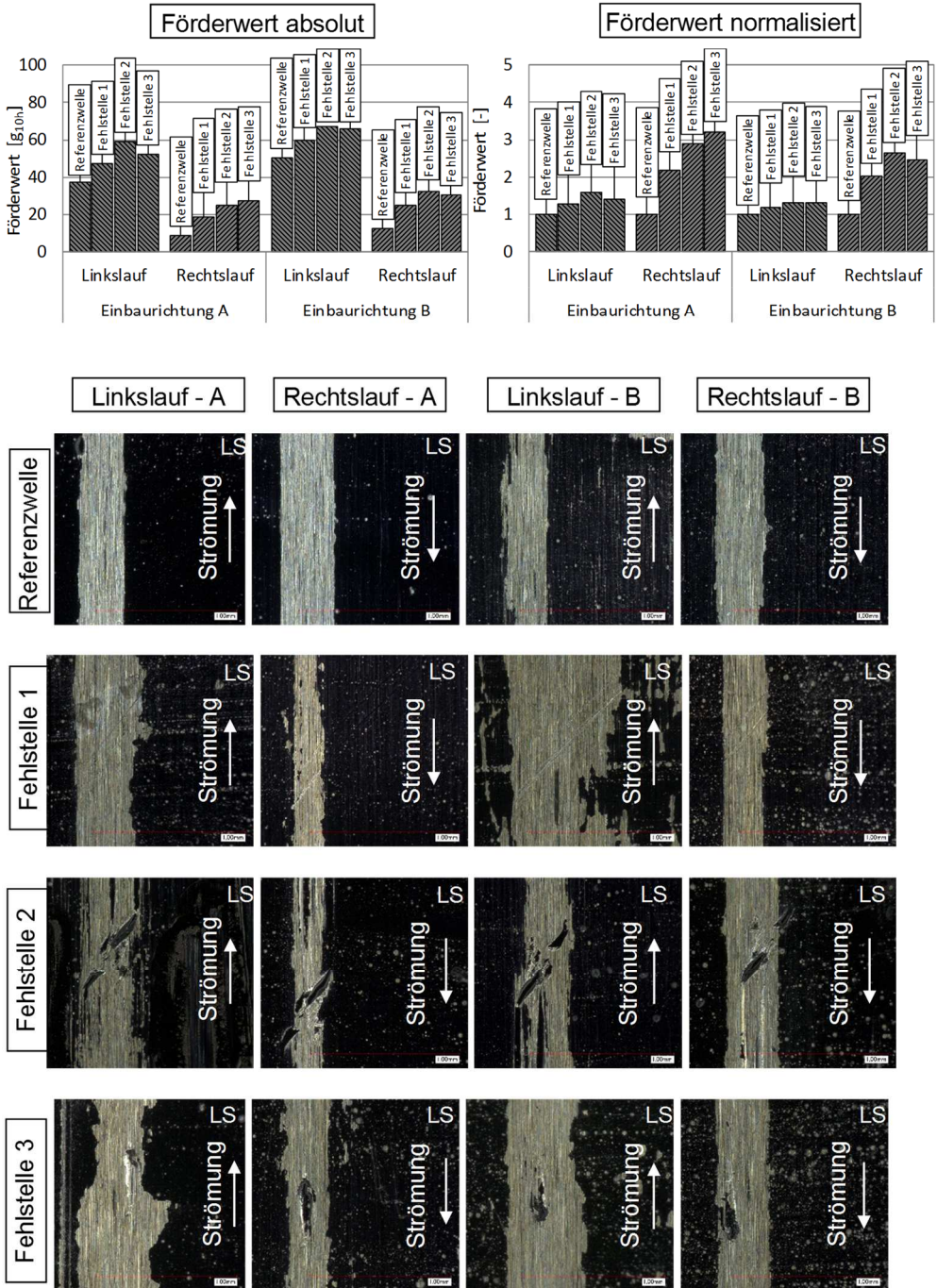


Bild 12: Ergebnisse der Förderwertmessungen mit Welle 1



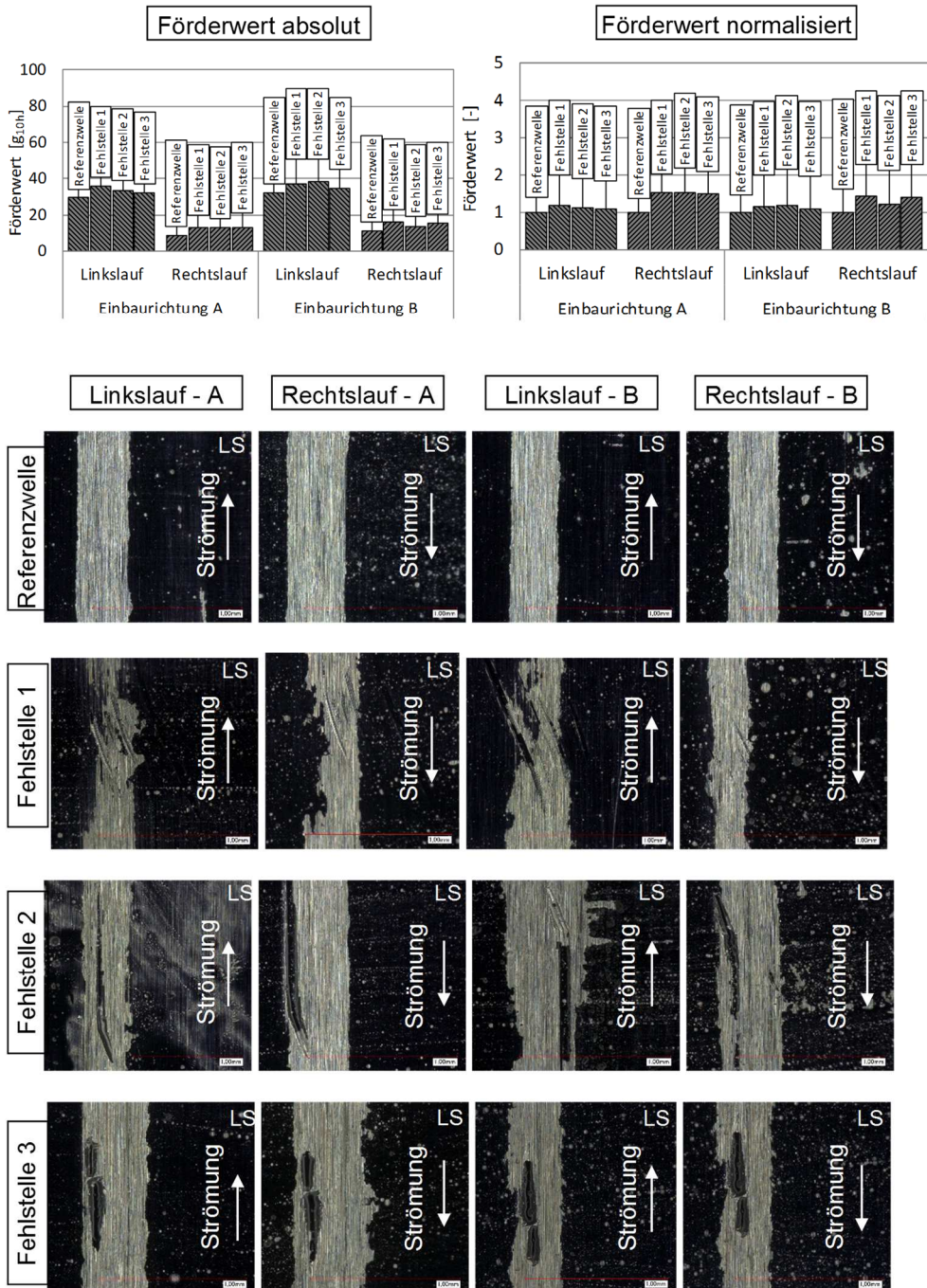


Bild 13: Ergebnisse der Förderwertmessungen mit Welle 2

### 4.3 Förderwertmessung bei Kratzern

Die Aussage zur Förderwirkung von Fehlstellen kann erweitert werden, indem auch Kratzer betrachtet werden. Kratzer sind durch ihre sehr lange Form charakteristisch und können daher gut von den fertigungsbedingten Schleifkommata unterschieden werden. Kratzer weisen aufgrund der ausgeprägten Länge fast immer das Merkmal der Durchgängigkeit unter der Dichtkante auf. Wenn sich ein Kratzer im Dichtkontakt befindet, der eine Winkelabweichung zur Umfangsrichtung aufweist, bewirkt dieser eine erhebliche drehrichtungsabhängige Förderwirkung. Aus den Erkenntnissen des Forschungsprojekts Stochastische Strukturen ist bekannt, dass die drehrichtungsabhängige Förderwirkung sowohl von der Fehlstellentiefe als auch von der Winkelabweichung in Bezug zur Umfangsrichtung abhängt. Bei der Festlegung der Kratzertiefe und des Kratzerwinkels wurden die Erkenntnisse aus [9] und [10] berücksichtigt. In *Bild 14* sind die Fördermengen zweier Wellen mit je einer markanten Fehlstelle in Form von Kratzern absolut und normalisiert dargestellt.

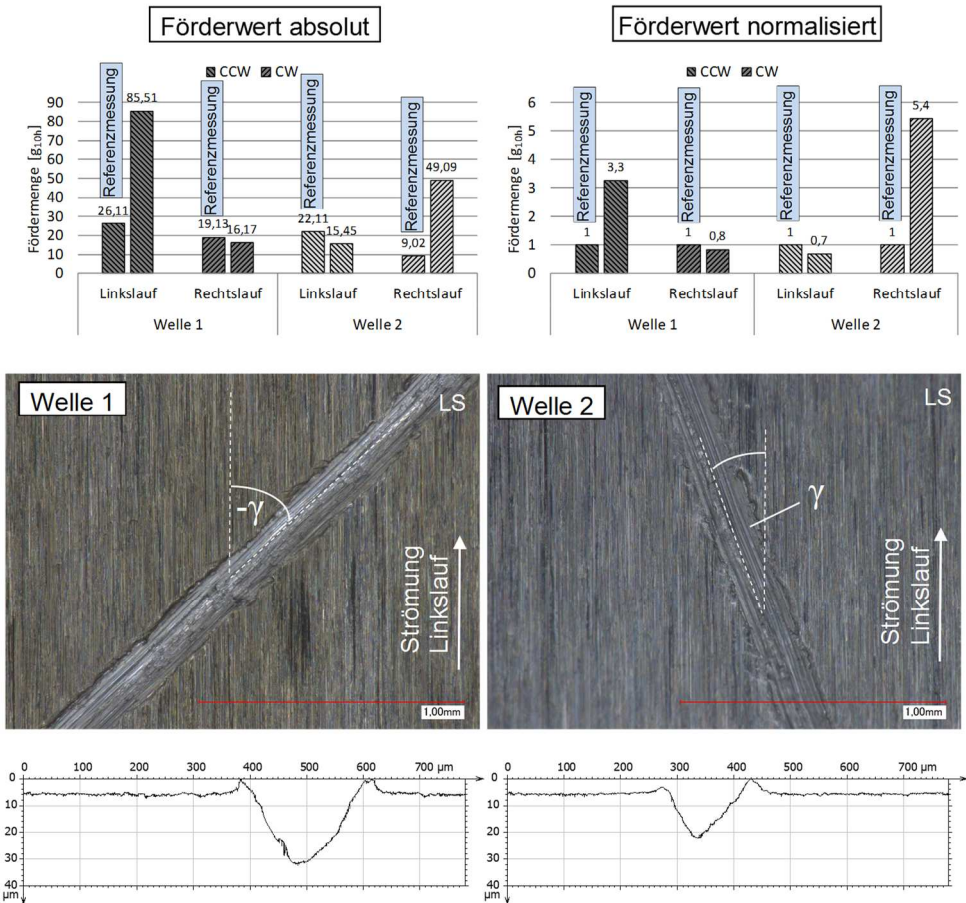


Bild 14: Drehrichtungsabhängige Förderwirkung von Kratzern unter verschiedenen Winkeln

Zusätzlich sind die beiden Fehlstellen entsprechend abgebildet. Die Kratzer unterscheiden sich hauptsächlich durch deren Orientierung und deren Tiefe. Die Fehlstelle auf Welle 1 ist nach rechts gerichtet und die Fehlstelle auf Welle 2 ist nach links gerichtet. Die Winkelabweichungen zur Umfangsrichtung  $\gamma$  in entgegengesetzter Richtung führen dazu, dass die drehrichtungsabhängige Förderwirkung bei beiden Wellen in entgegengesetzter Richtung größer ist. Welle 1 fördert im Linkslauf (CCW) aus dem abzudichtenden Raum heraus. Welle 2 hingegen fördert im Rechtslauf (CW) aus dem abzudichtenden Raum heraus. Der betragsmäßig geringere Winkel  $\gamma$  von Welle 2 bewirkt auch einen geringeren Förderwert als der größere Winkel  $\gamma$  im Dichtsystem mit Welle 1. Der Kratzer auf Welle 1 ist mit einer Tiefe von etwa  $30\ \mu\text{m}$  größer als der Kratzer auf Welle 2 mit einer Fehlstellentiefe von etwa  $20\ \mu\text{m}$ . Aufgrund der größeren Fehlstellentiefe des Kratzers auf Welle 1 ist auch ein größerer Förderwert zu erwarten. Außerdem ist zu erkennen, dass die Kratzer keine betragsmäßig bzw. prozentual gleich große Förderwirkung in beide Wellendrehrichtungen aufweisen. Die Förderwertmessungen bei Schleifkommata zeigten durchweg eine größere Förderwirkung, unabhängig von der Dreh- und Einbaurichtung. Der Effekt, dass eine Fehlstelle die Förderwirkung unabhängig von der Dreh- und Einbaurichtung erhöht, tritt hier also auch auf. So lässt sich erklären, dass die Förderwirkung in Förderrichtung des Dichtrings immer größer ist als in die entgegengesetzte Wellendrehrichtung.

#### 4.4 Förderwert nach der Versuchsdurchführung

Die Ergebnisse der Förderwertmessungen sind nicht auf Veränderungen im Dichtringförderwert über der Versuchsdauer zurückzuführen.

Dichtkantenverschleiß oder ähnliche Phänomene können bei den kurzen Messzeiten praktisch vernachlässigt werden. Als Nachweis für die näherungsweise konstante Förderwirkung des Dichtrings über die gesamte Versuchsdurchführung wurde vor und nach den Untersuchungen eine Förderwertmessung an einer fehlerfreien Position auf der Versuchswelle durchgeführt. Die Förderwerte vor und nach der Versuchsdurchführung unterscheiden sich nur geringfügig, Bild 15.

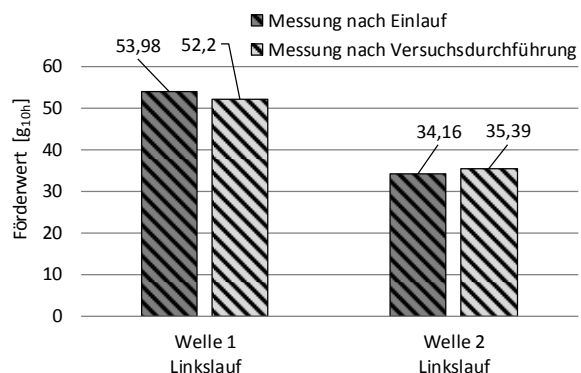


Bild 15: Fördermenge vor und nach der Versuchsdurchführung



## 5 Bewertung von Fehlstellen in der Praxis

Fehlstellen können eine Förderwirkung im Dichtsystem hervorrufen. Dies kann zu Leckage und damit zu einem Ausfall der Dichtung führen. Das maßgebliche Kriterium zur Fehlstellenbewertung ist die Durchgängigkeit durch den Dichtkontakt. Wenn Fehlstellen durchgängig sind und damit quasi einen Kanal durch den Dichtkontakt bilden, dann ist die drehrichtungsabhängige Förderwirkung stark ausgeprägt. Die Winkelabweichung zur Umfangsrichtung und die Fehlstellentiefe beeinflussen dann maßgeblich die drehrichtungsabhängige Förderwirkung. Dieses Ergebnis bestätigt die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt Stochastische Strukturen [10].

Wenn sich Fehlstellen ausschließlich innerhalb des Dichtkontakts befinden, führt dies zu einer Erhöhung der Förderwirkung des Dichtsystems. Die dreh- und einbau- richtungsabhängige Komponente der Förderwirkung ist dann nur noch gering ausgeprägt. Da selbst sehr stark ausgeprägte Schleifkommata in der Regel nicht größer sind als die Berührbreite im Dichtkontakt zwischen Dichtring und Welle, führen Schleifkommata tendenziell zu einer größeren Förderwirkung des Dichtsystems und damit nicht zu Abdichtproblemen.

Die Untersuchungsergebnisse führen zu der praxisrelevanten Aussage, dass Kratzer als kritisch für die Abdichtfunktion eingestuft werden müssen. Ob letztlich tatsächlich Leckage im Abdichtbetrieb auftritt, hängt dann von der Beschaffenheit (Tiefe, Winkel etc.) des Kratzers ab. Schleifkommata hingegen führen in der Regel nicht zu einem Versagen des Dichtsystems, weil sie in der Praxis fast nie das Kriterium der Durchgängigkeit durch den Dichtkontakt aufweisen.

## 6 Ausblick

Die entwickelte Untersuchungsmethodik ermöglicht eine gezielte Untersuchung der Systemeinflüsse von Fehlstellen. Dies wird weiter genutzt, um systematisch die Förderwirkung von Fehlstellen mit unterschiedlichen Ausprägungen zu untersuchen. So kann etwa der Einfluss mehrerer Fehlstellen im Dichtkontakt und weiter auch der Einfluss der Dichtringbauform oder des Dichtringwerkstoffs ermittelt werden.

## 7 Nomenklatur

- $\varepsilon$  = dynamische Exzentrizität
- $\gamma$  = Drallwinkel bzw. Winkelabweichung bei Kratzern
- A/B = Welleneinbauart
- CW/CCW = Wellendrehrichtung Rechtslauf/ Wellendrehrichtung Linkslauf

## 8 Literaturverzeichnis

- /1/ TOTZ, Jan: Einfluss weichgeschliffener Gegenauflflächen auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen. FVA-Heft Nr. 1230. IGF-Vorhaben 18479 N1. Frankfurt/Main. 2017.
- /2/ EIPPER, Axel: Lastkollektive RWDR. Forschungsvereinigung Antriebstechnik 696 I, IGF-Vorhaben 17580 N. 2015.
- /3/ KAMMÜLLER, Matthias: Zur Abdichtwirkung von Radialwellendichtringen. Universität Stuttgart. Dissertation. 1986. ISBN: 3-921920-19-1
- /4/ MÜLLER, H. K.: Abdichtung bewegter Maschinenteile. Waiblingen: Medienverlag Müller. 1990. ISBN: 3920484002
- /5/ JENISCH, Bernhard: Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen. Universität Stuttgart. Dissertation. 1991. ISBN: 3-921920-40-X
- /6/ BAUMANN, Matthias: Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenauflflächen - Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen. Universität Stuttgart. Dissertation. 2017. ISBN: 978-3-936100-69-3
- /7/ REMPPIS, Marco: Rechnerische Abschätzung der Dichtgüte von Radial-Wellendichtringen durch Kenntnis der Systemparametereinflüsse. FVA-Heft Nr. 1066. IGF-Vorhaben 16402 N. Frankfurt/Main. 2013.
- /8/ BEKGULYAN, Sumbat: Rechnerische Abschätzung der Dichtgüte von Radial-Wellendichtringen durch Kenntnis der Systemparametereinflüsse II. FVA-Heft Nr. 1259. IGF-Vorhaben 17938 N/1. Frankfurt/Main. 2017.
- /9/ LEIS, Alexander; VON HOLLEN, Jan: Auswirkungen stochastischer Strukturen von Gegenauflflächen auf die Funktion von Radialwellendichtringen. Heft 307. AiF-Nr. 15168 N. Frankfurt am Main. 2010
- /10/ MATUS, Mark: Stochastische Strukturen. FVA-Heft Nr. 1211. IGF-Vorhaben 17812 N. Frankfurt/Main. 2017