

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



Untersuchung des Förderverhaltens makrodrallbehafteter Dichtungsgegenläufigen

Felix Schiefer, M.Sc., Dr.-Ing. Matthias Baumann, Dr.-Ing. Frank Bauer,
Institut für Maschinenelemente (IMA), Universität Stuttgart, Deutschland

1 Einleitung

Die Dichtungsgegenläufigenfläche ist ein wichtiger Bestandteil des tribologischen Systems „Radial-Wellendichtung“. Dieses besteht im Kern aus dem Radial-Wellendichtungsring (RWDR), der Dichtungsgegenläufigenfläche und dem abzudichtenden Fluid. Die Dichtungsgegenläufigenfläche bestimmt mit ihren Eigenschaften maßgeblich über die Reibung, den Verschleiß und die Dichtheit der Radial-Wellendichtung [1].

Dynamische Dichtheit wird im Betrieb durch eine aktive Öl-Förderwirkung des RWDR von der Luftseite zur Ölseite bewirkt. Auf Seiten der Dichtungsgegenläufigenfläche kann es aufgrund von schräg gerichteten Oberflächenstrukturen (auch Drall genannt) ebenfalls zu einer Förderwirkung kommen, siehe Bild 1. Diese überlagert sich mit der Öl-Förderwirkung des Dichtrings und kann je nach Drallausprägung und in Abhängigkeit der Wellendrehrichtung zu sofortiger Leckage oder zu Mangelschmierung führen.

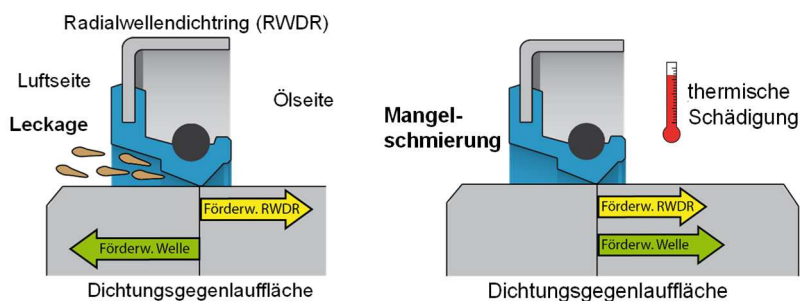


Bild 1: links: Leckage aufgrund entgegengesetzter Förderwirkung;
rechts: Mangelschmierung aufgrund gleichgerichteter Förderwirkung

Das Ergebnis ist ein frühzeitiges Versagen der Dichtfunktion. Erhebliche Reparaturkosten mit einhergehenden Umweltbelastungen können die Folge sein. Drallbehaftete Dichtungsgegenläufigenflächen sind somit kritisch für die Dichtheit eines Radialwellen-Dichtsystems.

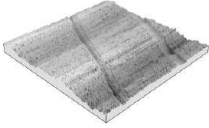
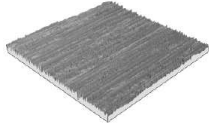
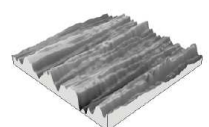
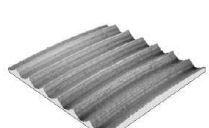
Auf Dichtungsgegenauflflächen existieren unterschiedliche Drallausprägungen. Eine davon ist der sogenannte Makrodrall. Hiermit sind axial periodische, in Umfangsrichtung mit einem axialen Vorschub umlaufende Strukturen ähnlich einem Schraubengewinde gemeint. Eine Untersuchungsmethode um Makrodrallstrukturen zu erfassen ist die Makrodrallauswertung nach der Daimler Werksnorm MBN 31007-7 /2/. Mit dieser Methode werden verschiedene Makrodrall-Kenngrößen wie die Gängigkeit, der Drallwinkel und die Periodenlänge ermittelt. Die Kenngrößen werden zur Charakterisierung von makrodrallbehafteten Dichtungsgegenauflflächen genutzt. Bislang sind die exakten Zusammenhänge zwischen den Makrodrall-Kenngrößen und der durch die Dichtungsgegenauflfläche ausgelösten Fluidförderwirkung nur vage bekannt. Es existieren bislang keine veröffentlichten empirisch begründeten Modelle, welche die Funktion beschreiben und eine Ableitung von Toleranzgrenzen ermöglichen.

Im Rahmen dieses Papers werden zuvor gemessene Makrodrall-Kenngrößen dem experimentell ermittelten Förderverhalten im Einstich geschliffener Dichtungsgegenauflflächen gegenübergestellt. Die Grundlage hierfür bilden experimentelle Förderwertuntersuchungen.

2 Grundlagen – Drall

Unter dem Begriff Drall werden nach DIN 3760 /3/ alle Strukturen zusammengefasst, welche durch ihre Drallorientierung auf der Welle eine axiale Fluidförderwirkung auslösen. Auf einer Dichtungsgegenauflfläche kann Drall in unterschiedlichen Ausprägungen vorhanden sein, welche einzeln oder überlagert auftreten. Die Entstehungsursachen der einzelnen Ausprägungen sind dabei unabhängig voneinander. Somit ist eine Kategorisierung sinnvoll, beispielsweise anhand der Größenordnung, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Einteilung von Drall /4/

Drallarten	Darstellung	Einteilung
Kratzer, Dellen, Rost		Fehlstellen beliebiger Ausprägung /5/, /6/
Mikrodrall		stochastisch angeordnete, anisotrope Strukturen, Breite der Strukturen unter $20 \mu\text{m}$, beispielsweise Schleifstrukturen
Mikrowelligkeit		makroskopische Strukturen, Größenordnung der Strukturen $20 \mu\text{m} - 0,8 \text{ mm}$. Stochastisch angeordnete, aperiodische , isotrope oder anisotrope makroskopische Strukturen
Makrodrall		makroskopische Strukturen, Größenordnung der Strukturen $20 \mu\text{m} - 0,8 \text{ mm}$. axial periodische , in Umfangsrichtung umlaufende, makroskopische Strukturen

Die hier untersuchten Oberflächen weisen keine Kratzer, Dellen oder Rost auf, für diesbezügliche Erkenntnisse wird auf /5/ und /6/ verwiesen. Bild 2 veranschaulicht den drehrichtungsabhängigen Einfluss von Mikro- und Makrodrall in Abhängigkeit der Drallorientierung auf der Dichtungsgegenläufigkeit.

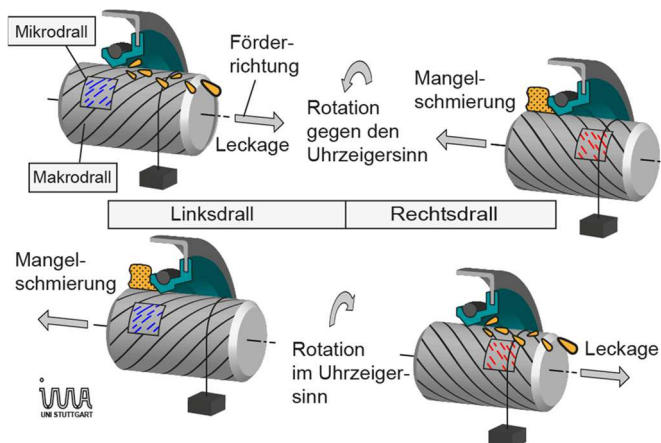


Bild 2: Einfluss von Mikro- und Makrodrall im Betrieb

3 Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7

Für eine Makrodrallauswertung nach der Daimlerwerksnorm MBN 31007-7 [7] werden bislang meistens herkömmliche taktile Rauheitsmessgeräte eingesetzt. Zunehmend finden jedoch auch optische Topographiemessgeräte Anwendung. Das Messverfahren selbst basiert auf axialen Profilschrieben der Wellenoberfläche, welche an 72 Umfangspositionen in je einem 360° und einem 36° Abschnitt gleichmäßig verteilt gemessen werden. Die einzelnen Profile werden dann aneinander gereiht und somit zu einer Pseudo-Topographie zusammengesetzt. Diese weist in Achsrichtung eine hohe Auflösung und in Umfangsrichtung je nach Messraster eine geringe Auflösung von 5° bzw. $0,5^\circ$ -Schritten auf. Durch eine Frequenzauswertung werden im Anschluss periodische Drallstrukturen auf der Topographie identifiziert und mit einer mathematisch generierten Oberfläche angenähert. Hieraus lassen sich charakteristische Makrodrall-Kenngrößen der Dichtungsgegenlauffläche bestimmen, siehe Bild 3.

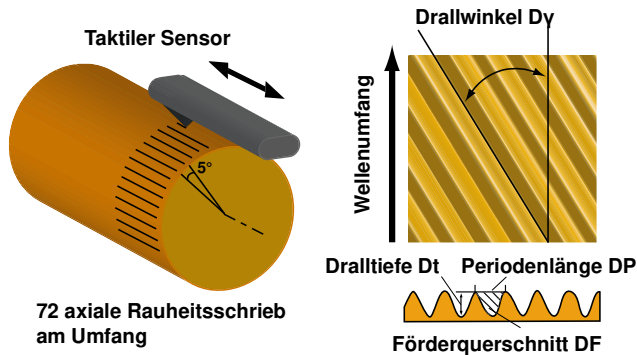


Bild 3: Makrodrallmessung nach MBN 31007-7

Der Drallwinkel D_γ [°] gibt die Abweichung der periodischen Drallstrukturen zur Umfangsrichtung der Dichtungsgegenlauffläche an. Die Gängigkeit D_G bezeichnet die Anzahl der Drallperioden in Umfangsrichtung. Die Dralltiefe D_t [µm] gibt den maximalen Abstand zwischen Wellenberg und -tal der berechneten Dralloberfläche wieder. Die Periodenlänge D_P ist der Abstand zweier aufeinander folgenden Wellenberge oder Wellentälern in axialer Richtung.

Bild 4 zeigt exemplarisch ein Makrodrall-Protokoll der später vorgestellten Versuchswelle DF11. Die Drallkennwerte (1) sind auf der oberen Protokollseite angegeben, darunter folgt die aus 72 Profilen zusammengesetzte Pseudo-Topographie (2). Im unteren Bereich des Protokolls sind die mathematisch generierte Drallstruktur in Detailskalierung (3) und ein Profilschrieb der Ausgangstopographie mit überlagertem Schrieb der periodischen Drallstruktur (4) dargestellt.

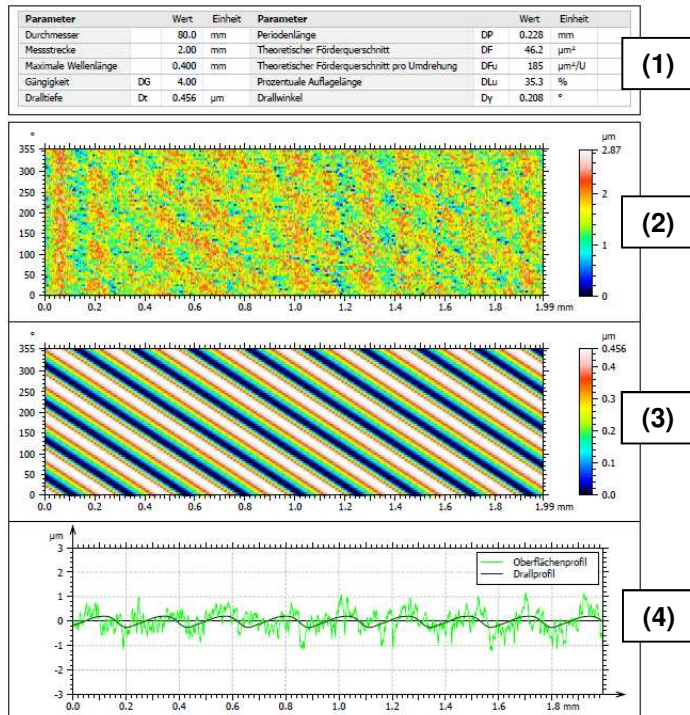


Bild 4: Protokoll einer Makrodrallauswertung, DF11

Problematisch bei der Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7 ist, dass die Ergebnisse stets von einer fachkundigen Person auf Plausibilität untersucht werden müssen. Somit ist die Auswertung vergleichsweise zeitaufwendig. In dem hier dargestellten Protokoll der Dichtungsgegenauflache DF11 sind die ermittelten Kennwerte plausibel. Die ermittelten Strukturen aus der Pseudotopographie entsprechen der Winkelausrichtung der nach der Frequenzfilterung abgebildeten periodischen Drallstruktur in Detailskalierung. Zudem ist der Profilschrieb der Ausgangstopographie vergleichbar mit dem überlagerten Schrieb der periodischen Drallstruktur (Drallprofil).

4 Versuchsdurchführung

Zur Analyse des Förderwerts von makrodrallbehafteten Dichtungsgegenläufflächen (DGLF) wurden Förderwertuntersuchungen an einem Mehrzellenprüfstand durchgeführt. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Versuchsparameter der Förderwertmessung

Umfangsgeschwindigkeit	4,2 m/s	Durchmesser der DGLF	80 mm
Versuchsoil	FVA 3	Dichtring	FKM BAUM5X7
Ölsumptemperatur	40 °C	Drehrichtungswechsel nach	3h, 2h, 2h, 2h
Umgebungsdruck	Prüfkammer entlüftet	Versuchsdauer	9 h

Zur Förderwertmessung wurde das Verfahren nach Raab /8/ verwendet, hierbei wird der Dichtring „verkehrt herum“ in die Prüfkammer montiert, so dass er aktiv Fluid aus dem Ölgehäuse heraus fördert. Die Fördermenge wird aufgefangen und gewogen. Unter Ausnutzung der drehrichtungsabhängigen Förderwirkung der Dichtungsgegenläuffläche kann mit Hilfe eines geeigneten Drehzahlkollektives mit mehreren Drehrichtungswechseln eine Unterscheidung in einen Dichtring- und einen Wellenförderwert erreicht werden, siehe Bild 5. Die ersten 5 Stunden dienen zum Einlaufen (konditionieren) des Dichtrings. Die ermittelten Förderwerte werden aus den letzten 4 Stunden (2 Stunden je Drehrichtung) gemittelt.

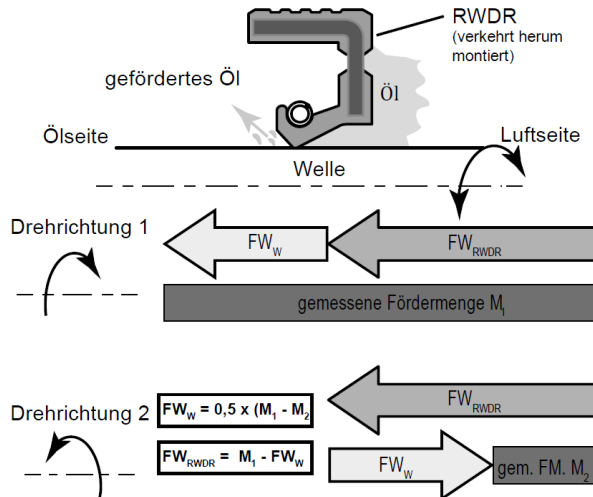


Bild 5: Schematische Darstellung der Förderwertmessung

5 Hypothesen zum Einfluss von Makrodrall auf den Förderwert der Dichtungsgegenlauffläche

Der Einfluss von Makrodrall auf das Förderverhalten von Dichtungsgegenlaufflächen ist bislang noch nicht ausreichend wissenschaftlich erforscht. Exakte empirische Zusammenhänge werden benötigt um Toleranzgrenzen für eine Qualitätskontrolle von Dichtungsgegenlauffläche zu ermöglichen.

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass die Rauheit der Dichtungsgegenlauffläche einen Einfluss auf den Wellenförderwert hat /4/. Hieraus resultiert in Bezug auf Makrodrall folgende **Hypothese 1**: Je höher die Rauheit, umso größer der Wellenförderwert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Makrodralltiefe D_t ein äquivalentes Verhalten zeigt, Bild 6 links. Ebenfalls naheliegend ist, dass ein großer Drallwinkel zu einem hohen Wellenförderwert führt (**Hypothese 2**), Bild 6 Mitte. Hierdurch wird verstärkt Fluid abgelenkt, was mehrere Untersuchungen von beispielsweise JUNG bestätigen /9/. Darüber hinaus zeigten bereits Simulationen /4/, dass eine zunehmende Anzahl von Drallstrukturen im Dichtkontakt zu einer Erhöhung des Wellenförderwertes führt. Hieraus lässt sich vermuten, **Hypothese 3**, dass geringe Periodenlänge D_P zu hohen und hohe Periodenlängen D_P zu geringen Wellenförderwerten führen, Bild 6 rechts.

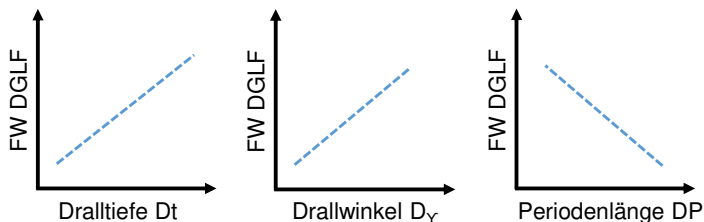


Bild 6: Einfluss der Dralltiefe (Hypothese 1), des Drallwinkels (Hypothese 2) und der Drall-Periodenlänge (Hypothese 3) auf den Förderwert

6 Überblick Versuchswellen

Die Förderwertmessungen wurden an 16 Dichtungsgegenlaufflächen durchgeführt. Die gemessenen Makrodrallkenngößen der Dichtungsgegenlaufflächen sind in Tabelle 3 dargestellt. Die normgerecht in Achsrichtung gemessenen Rauheitswerte R_z der Oberflächen betragen 2,05 bis 5,28 μm und sind nach aufsteigenden Werten aufgelistet. Bis auf drei Dichtungsgegenlaufflächen (DF2, DF8, DF12) weisen alle eine positive Gängigkeit auf. Nach Definition bewirken positive Werte Rechtsdrall. Es liegt somit bei 13 Oberflächen Makro-Rechtsdrall vor.

Die gemessenen Makrodralltiefen D_t betragen 0,27 bis 2,39 μm . Die meisten Dichtungsgegenlaufflächen können in eine Gruppe mit der Periodenlänge D_P von 0,07 mm, ~0,16 mm und 0,23 mm eingeteilt werden. Die Gängigkeit und der Drallwinkel bedingen sich gegenseitig. D. h. die drei Dichtungsgegenlaufflächen mit Gängigkeit 0, haben ebenfalls einen Drallwinkel von 0° . Die restlichen Oberflächen haben einen Drallwinkel von $0,06^\circ$ bis $1,20^\circ$.

Tabelle 3: Ergebnisse der Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7

DGLF	DF1	DF2	DF3	DF4	DF5	DF6	DF7	DF8	DF9	DF10	DF11	DF12	DF13	DF14	DF15	DF16
R_z [μm]	2,05	2,13	2,13	2,14	2,19	2,21	2,22	2,23	2,47	2,49	2,57	2,58	2,77	3,52	3,60	5,28
Gängigkeit [-]	19	0	4	4	4	4	4	0	4	4	4	0	20	10	21	19
Dralltiefe [μm]	0,47	0,35	0,33	0,31	0,35	0,33	0,27	0,47	0,34	0,39	0,46	0,43	1,01	1,74	1,69	2,39
Periodenlänge [mm]	0,19	0,33	0,07	0,07	0,07	0,23	0,07	0,16	0,23	0,23	0,23	0,15	0,07	0,13	0,07	0,06
Drallwinkel [$^\circ$]	1,20	0,00	0,06	0,06	0,06	0,21	0,06	0,00	0,21	0,21	0,21	0,00	0,29	0,29	0,30	0,26

Die Dichtungsgegenauflflächen wurden zudem mit der IMA-Mikrodrall®Analyse untersucht und sind in diesem Zusammenhang unauffällig. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Mikrodrall kann daher ausgeschlossen werden.

7 Ergebnisse

Förderwerte:

In nachfolgendem Bild 7 sind die im Versuch ermittelten Förderwerte der Dichtungsgegenauflflächen (FW DGLF) dargestellt. Sie reichen von 0,09 g/h bis 2,3 g/h. Die gestrichelte Linie zeigt die Toleranzgrenze der Messgenauigkeit an. Die beiden niedrigsten Förderwerte von etwa 0,09 g/h und 0,11 g/h wurden bei den zwei Dichtungsgegenauflflächen (DF8, DF12) mit Gängigkeit 0 (Drallwinkel 0°) gemessen. Den größten Förderwert mit 2,32 g/h zeigt DF16, diese Oberfläche zeichnet sich durch einen hohen Drallwinkel D_y von $0,26^\circ$ mit hoher Rauheit und korrespondierender hoher Dralltiefe aus.

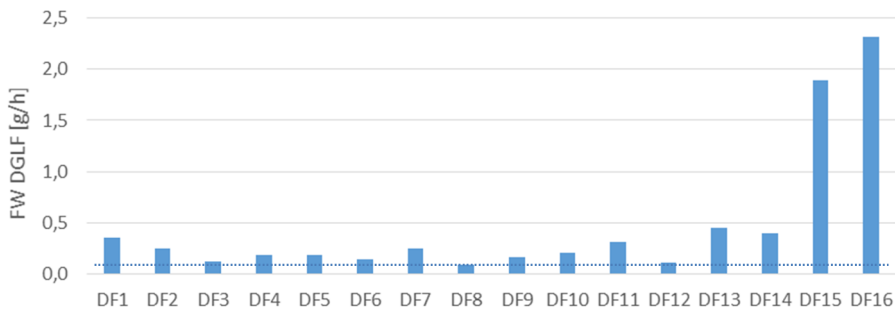
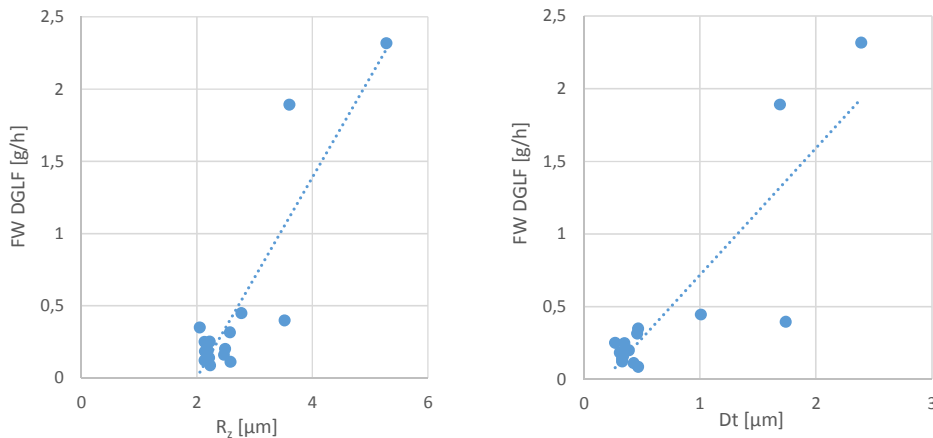


Bild 7: Gemessene Förderwerte

Einfluss der Rauheit R_z / Dralltiefe D_t auf den Wellenförderwert FW DGLF:

In Bild 8 sind die Kenngrößen R_z und D_t über den Förderwerten aller 16 Dichtungsgegenauflflächen abgebildet. Mit zunehmender Rauheit und Dralltiefe nimmt der Förderwert zu.



*Bild 8: links: Einfluss von R_z auf den FW DGLF
rechts: Einfluss von D_t auf den FW DGLF*

Der vermutete Einfluss der Rauheit und Dralltiefe auf den Wellenförderwert ist somit vorhanden, Hypothese 1 bestätigt sich. Es zeigt sich, dass die Rauheit und die Dralltiefe einen deutlichen Einfluss auf die Förderwirkung der Oberfläche haben. Je größer die Rauheit und die Dralltiefe bei vorhandenem Makrodrall (Drallwinkel), umso größer wird der Querschnitt einer Oberflächenstruktur und dementsprechend umso höher der Wellenförderwert.

Einfluss der Periodenlänge DP auf den Wellenförderwert FW DGLF:

In Bild 9 sind die Rauheitskenngrößen R_z zweier Gruppen von Dichtungsgegenläufigen dem Wellenförderwert FW DGLF gegenübergestellt. Die betrachteten Dichtungsgegenläufigen weisen zwar eine gleiche Gängigkeit von 4 auf, Periodenlänge DP und Drallwinkel D_γ unterscheiden sich jedoch. In der ersten Gruppe beträgt die Periodenlänge DP 0,07 mm und der Drallwinkel D_γ 0,06°. In der zweiten Gruppe liegt eine höhere Periodenlänge von DP 0,23 mm und ein höherer Drallwinkel $D_\gamma \approx 0,21^\circ$ vor.

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass der Anstieg der Trendlinien bei geringerer Periodenlänge von DP 0,07 mm steiler ausfällt, als bei größerer Periodenlänge DP 0,23 mm. Zudem erreichen die Dichtungsgegenläufigen mit kleiner Periodenlänge bereits bei kleinerer Oberflächenrauheit R_z ähnlich hohe Förderwerte wie die Dichtungsgegenläufigen mit hoher Periodenlänge. Dies obwohl bei den Dichtungsgegenläufigen mit hoher Periodenlänge ein größerer Drallwinkel von 0,21° vorliegt.

Strukturen, deren Orientierung von der Umfangsrichtung abweichen, lenken Fluid in axialer Richtung um. Eine kleinere Periodenlänge DP erhöht dabei die Anzahl an Strukturen im Dichtkontakt. Mehr Strukturen können somit ein häufigeres Umlenken von Fluid im Betrieb bewirken. Die Förderwirkung der Oberfläche wird mit geringer Periodenlänge DP und somit mehr Strukturen im Dichtkontakt größer. Somit zeigt sich, dass auch Hypothese 3 begründet ist.

DP = 0,07 mm;
Gängigkeit 4; Drallwinkel 0,06°

DP = 0,23 mm,
Gängigkeit 4; Drallwinkel 0,21°

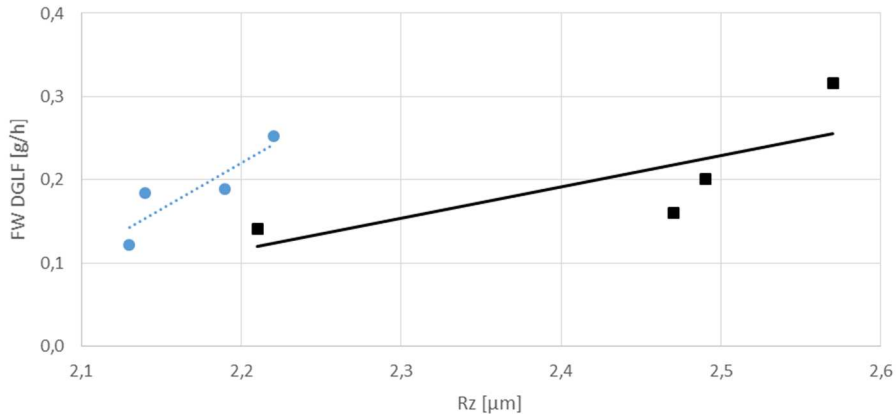


Bild 9: Einfluss der Rauheit auf den Förderwert der Dichtungsgegenlauffläche bei verschiedenen Periodenlängen von 0,23 mm und 0,07 mm°

Kombinierter Einfluss der Dralltiefe, der Periodenlänge und des Drallwinkels:

Aus obigen Ergebnissen zeigt sich, dass die Makrodrall-Kenngrößen ganzheitlich den Förderwert der Dichtungsgegenlauffläche beeinflussen. Unter Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse lässt sich daher aus den Kenngrößen D_γ , D_t und DP eine Kenngrößenkombination (1) für die Beschreibung des Wellenförderwertes ableiten:

$$\text{Kenngrößenkombination: } \frac{D_\gamma D_t}{DP} \quad (1)$$

In Bild 10 ist die Kenngrößenkombination den Wellenförderwerten gegenübergestellt. Das Diagramm zeigt, dass sich die einzelnen Einflüsse kombiniert betrachtet auf einen nahezu linearen Zusammenhang zurückführen lassen.

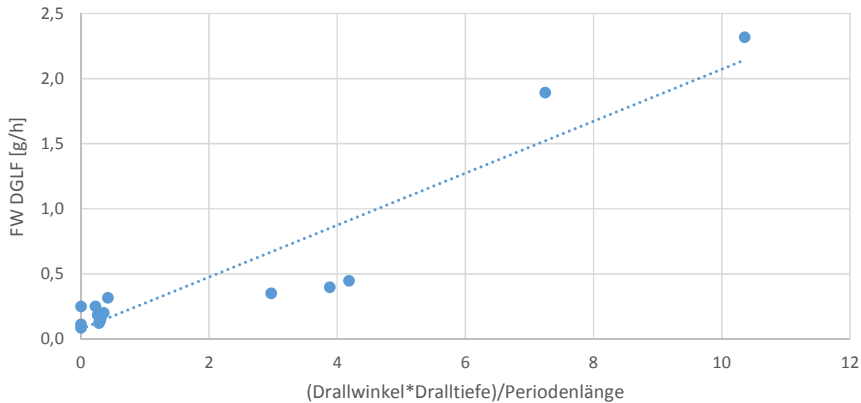


Bild 10: Einfluss der Kenngrößenkombination D_r , D_t und D_P auf den Förderwert

Dies bildet einen guten Ausgangspunkt für eine zukünftige Modellbildung, mit der schlussendlich empirisch fundierte Toleranzgrenzen für Dichtungsgegenläufigkeiten mit Makrodrall abgeleitet werden können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde das Förderverhalten makrodrallbehafteter Dichtungsgegenläufigkeiten im Dichtsystem Radial-Wellendichtung untersucht. Insgesamt 16 Versuchswellen mit unterschiedlicher Makrodrallausprägung wurden hierfür nach der Daimler Werksnorm MBN 31007-7 vermessen und auf einem Mehrzellenprüfstand auf den Wellenförderwert untersucht.

Auf Grundlage der ermittelten Makrodrall-Kenngrößen wurden 3 Hypothesen zur Förderwirkung von Makrodrall aufgestellt. Hypothese 1 besagt, dass je höher die Rauheit und die Dralltiefe, umso größer der Wellenförderwert. Hypothese 2 bezieht sich auf den Drallwinkel, wonach ein großer Drallwinkel ebenfalls einen hohen Wellenförderwert bewirkt. Hypothese 3 stützt sich auf Überlegungen, dass eine hohe Periodenlänge D_P zu geringen Wellenförderwerten führt.

Die Gegenüberstellung der ermittelten Makrodrall-Kenngrößen mit den gemessenen Förderwerten zeigt, dass die zuvor aufgestellten Hypothesen grundsätzlich durch die Ergebnisse bestätigt werden. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang jedoch, dass für eine empirisch fundierte statistische Auswertung bis lang noch zu wenig Dichtungsgegenläufigkeiten untersucht wurden.

Aus den bisher erlangten Ergebnissen konnte jedoch mittels einer Kombination der Makrodrall-Kenngrößen D_r , D_t und D_P ein linearer Zusammenhang mit dem Wellenförderwert hergestellt werden. Dies bildet eine gute Grundlage für eine zukünftige Modellbildung, mit deren Hilfe weiter Toleranzgrenzen für Makrodrall auf Dichtungsgegenläufigkeiten abgeleitet werden.

Aufbauend auf den bereits gewonnenen Erkenntnissen werden zukünftig weitere Untersuchungen mit einer höheren Anzahl an Dichtungsgegenaufläichen für eine empirische Absicherung und einen erweiterten Parameterraum angestrebt. Einerseits werden hierdurch die bestehenden Ergebnisse validiert, ein größerer Parameterraum aufgespannt und die Aussagefähigkeit der Ergebnisse verstärkt. Zudem werden weitere Betriebseinflussgrößen, wie beispielsweise die Wellenumfangsgeschwindigkeit oder die abzudichtenden Fluide berücksichtigt.

9 Nomenklatur

Variable	Beschreibung	Einheit
D_γ	Drallwinkel	°
D_t	Dralltiefe	µm
DP	Periodenlänge	mm

10 Literaturverzeichnis

- /1/ Jackowski, R.: *Shaft Finish Requirements for Rotary Lip Seals*. In: SAE (1999), Nr. 1999-01-0888
- /2/ Seewig, J.; Hercke, T.: *2nd Generation Lead Measurement*. In: XIX IMEKO World Congress, 2009
- /3/ DIN 3760: *Radial-Wellendichtringe*, Berlin. September 1996.
- /4/ Baumann, M.: *Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenaufläichen - Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen*. Dissertation 2017, Universität Stuttgart.
- /5/ Leis, A.; Hollen, J. v.: *Stochastische Strukturen – Auswirkungen stochastischer Strukturen von Gegenaufläichen auf die Funktion von Radialwellendichtringen*, Forschungskuratorium Maschinenbau, Nr. 281, 2009
- /6/ Matus, M.: *Stochastische Strukturen – Auswirkungen stochastischer Strukturen von Gegenaufläichen auf die Funktion von Radialwellendichtringen*, Forschungsvereinigung Antriebstechnik, Nr. 1211, 2017
- /7/ Norm MBN 31007-7: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit Mess- und Auswerteverfahren zur Bewertung von drallreduzierten dynamischen Dichtfläichen*. September 2008
- /8/ Raab, H.: *Wellenaufläichen. Einfluß der Wellenaufläiche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtringen*. Abschlussbericht FKM Vorhaben Nr. 211, AiF-Nr. 10670, Frankfurt am Main: FKM, 1998.
- /9/ Jung, S.: *Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenaufläichen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung*. Dissertation 2013, Universität Stuttgart.