

18th ISC

Stuttgart, Germany
Oct. 8-9, 2014



International Sealing Conference *Internationale Dichtungstagung*

Eine Kooperation von



Fluidtechnik

18th ISC

International Sealing Conference
Internationale Dichtungstagung

Stuttgart, Germany
October 08–09, 2014

Sealing Technology –
Hidden High Tech

*Dichtungstechnik –
Hightech im Verborgenen*

Copyright VDMA Fluidtechnik, 2014

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

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

Gesamtherstellung:
Leithner's Shop UG

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

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

ISBN 978-3-00-046879-7

Messung, Analyse und Bewertung von Dichtungsgegenläufigkeiten für das Tribo-System Radial-Wellendichtung

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

1 Einleitung

Radial-Wellendichtungen mit Dichtringen aus Elastomer-Materialien finden in heutigen Maschinen und Anlagen millionenfach Anwendung. Immer häufiger jedoch führen Unwissen in Kombination mit dem Drang zur Effizienzsteigerung in der Fertigung zu Dichtheitsproblemen. Verantwortlich für diese Probleme ist entgegen häufiger Vermutungen oft nicht ein fehlerhaftes oder für die jeweilige Problemstellung falsch gewähltes Dichtelement, sondern die Fertigung der Dichtungsgegenläufigkeit in der eigenen Produktion. Gängige Normen [1][2][3][4] für Radial-Wellendichtringe fordern drallfreie Dichtungsgegenläufigkeiten. Diese werden in der Regel mit dem Standardfertigerungsverfahren Schleifen im Einstich und mittels sehr langer Ausfunktzeiten (>30 Sekunden) erzielt. Um jedoch die Kosten zu senken werden gerade die Ausfunktzeiten häufig drastisch reduziert. Das Resultat ist Drall auf der Dichtungsgegenläufigkeit. Unter Drall werden aus dichtungstechnischer Sicht alle Oberflächen- und Rauheitsstrukturen auf Dichtungsgegenläufigkeiten zusammengefasst, welche eine axial gerichtete Fluidförderwirkung im Dichtspalt induzieren und damit die Dichtsiherheit wesentlich verringern.

Eine messtechnische Erfassung von Drall und somit eine Qualitätskontrolle für Dichtungsgegenläufigkeiten ist auf dem derzeitigen Stand der Technik nicht umfassend möglich und demnach nicht zufriedenstellend. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, müssen verschiedene, hoch spezialisierte Drallauswertungsmethoden angewandt werden. Messungen sowohl mit taktilen als auch mit optischen Messgeräten sind hierfür erforderlich. Dies setzt hohes Expertenwissen und diverse, teure Messtechnik voraus. Beides wird in Unternehmen nur allzu oft vernachlässigt oder ist schlicht nicht verfügbar.

Wie Drall umfassend, praxisnah und auf Basis kommerziell verfügbarer optischer Topographiemessgeräte erfasst und analysiert werden kann zeigt dieser Tagungsbeitrag.

2 Das tribologische System Radial-Wellendichtring

Das Dichtsystem Radial-Wellendichtring besteht aus den drei Hauptkomponenten Dichtelement, abzudichtendes Fluid und Dichtungsgegenläufige, Bild 1.

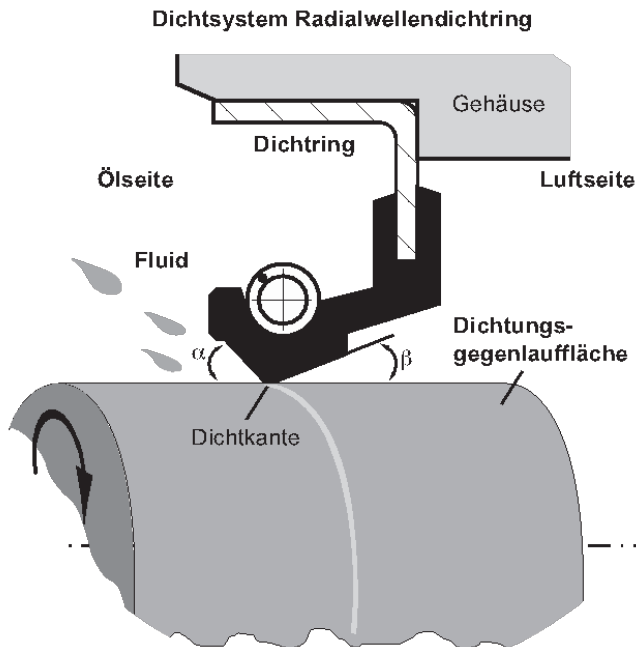


Bild 1: Dichtsystem Radial-Wellendichtring

Im weiteren Umfeld sind auch noch die geometrische Einbausituation sowie Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Alle diese Komponenten stehen in direkten Wechselwirkungen zueinander, beeinflussen sich gegenseitig und können das System in einen kritischen Zustand führen. Dass aber besonders die Dichtungsgegenläufige als kritische Komponente zu sehen ist, erklärt sich durch die Tatsache, dass Dichtelement und Fluid in aller Regel vorgegeben und lediglich eingekauft werden. Unter der Voraussetzung, dass ein, für die vorliegenden Anforderungen geeignetes Dichtelement und ein kompatibles Fluid eingesetzt werden, bleibt die Dichtungsgegenläufige die Komponente mit der höchsten Unsicherheit. In den meisten Fällen wird die Dichtungsgegenläufige vom produzierenden Unternehmen selbst oder von einem Zulieferer gefertigt. Häufig werden hierfür keine definierten Prozessparameter vorgegeben. Aber schon kleinste Änderungen an einem Fertigungsprozess können dazu führen, dass schädlicher Drall entsteht. Dies beinhaltet

nicht nur die konkreten Fertigungsparameter an sich, sondern auch der Wechsel eines erfahrenen Mitarbeiters oder mangelhaftes Bauteilhandling nach der Bearbeitung stellen potenzielle Ursachen für aufkommende Probleme dar.

Entscheidend für die Dichtfunktion eines Radial-Wellendichtringes ist der aktive Rückfördermechanismus der im dynamischen Betrieb des Systems wirkt und von den Dichtringherstellern durch jahrelange geometrische und werkstofftechnische Weiterentwicklungen optimiert wurde. Dieser Mechanismus pumpt kontinuierlich Fluid von der Luftseite zur Ölseite des Dichtringes und verhindert somit das Austreten des abzudichtenden Fluids aus dem System. In einem optimalen Dichtsystem besteht ein Gleichgewicht zwischen in den Dichtspalt eindringendem und vom Dichtring zurückgeführtem Fluid. Dies sorgt zum einen für einen hydrodynamischen Schmierfilm welcher sich günstig auf die tribologischen Eigenschaften im Dichtkontakt auswirkt und zum anderen für einen kontinuierlichen Fluidaustausch, der den Abtransport der entstehenden Reibwärme begünstigt.

Befinden sich nun aber förderfähige Oberflächenstrukturen auf der Dichtungsgegenlaufläche, überlagern sich die Fördermechanismen von Dichtungsgegenlaufläche und Dichtelement. Wirken beide Mechanismen gleichgerichtet von der Luftseite zur Ölseite kommt es zum Trockenlauf der Dichtung und somit zu einer thermischen Schädigung des Dichtelementes. Zeitverzögert tritt dann früher oder später Leckage auf. Wirken beide Mechanismen entgegengerichtet und überwiegt die Förderwirkung der Dichtungsgegenlaufläche so setzt direkt eine Fluidleckage ein.

In welche Richtung Drallstrukturen fördern hängt im Wesentlichen von der Orientierung der Drallstrukturen gegenüber der Wellenumfangsrichtung und der Drehrichtung der Welle im Betrieb ab. Bild 2 zeigt diese Zusammenhänge schematisch.

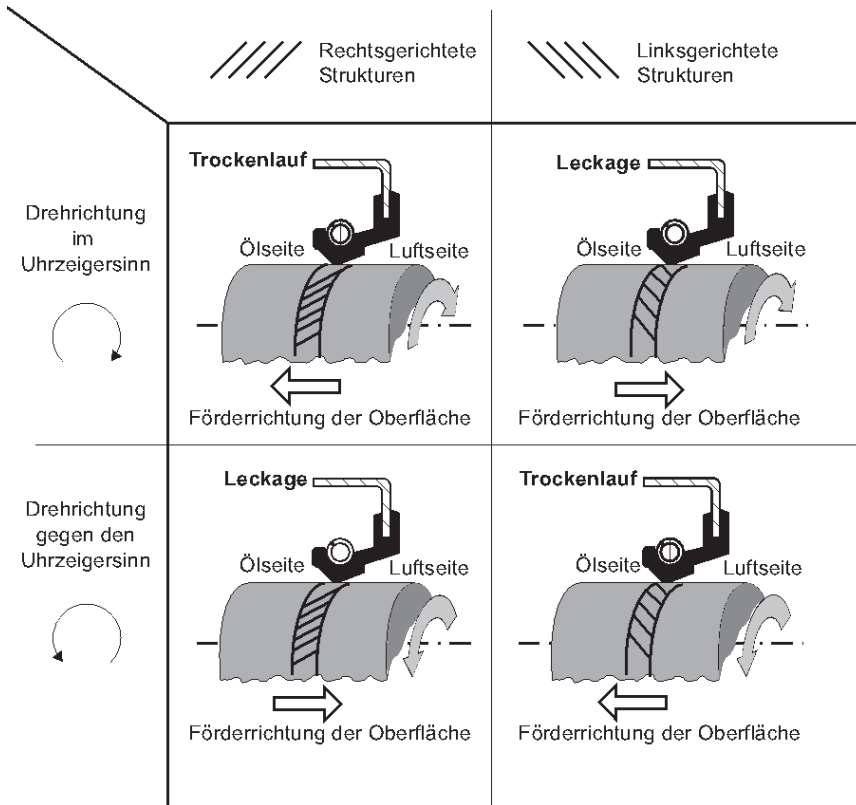


Bild 2: Auswirkungen von Drallstrukturen auf das Dichtsystem

In der Anwendung hat es sich als nützlich erwiesen verschiedene Drallausprägungen in Untergruppen zu kategorisieren. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass Drallstrukturen in unterschiedlichen Größenordnungen auftreten und es jeweils unterschiedlicher Vorgehensweisen zur messtechnischen Erfassung und Auswertung der jeweiligen Strukturausprägung bedarf.

Es kann grundsätzlich in Mikrodrall, Mikrowelligkeit, Makrodrall und Kratzer unterschieden werden. Beispiele für die unterschiedlichen Strukturausprägungen sind in Bild 3 gegeben.

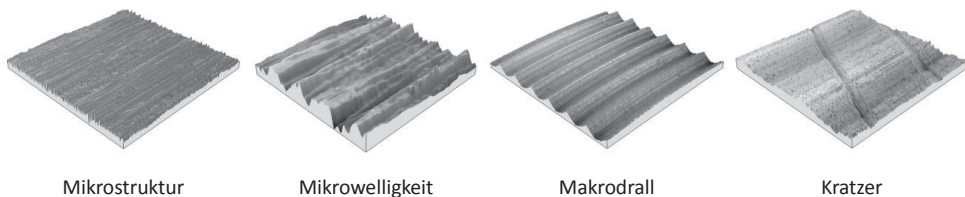


Bild 3: Verschiedene Drallausprägungen auf Dichtungsgegenläufflächen

Geht man vom Industriestandardfertigungsverfahren - Schleifen im Einstich - aus, so besteht Mikrodrall aus feinen stochastisch verteilten Mikrostrukturen, die durch den Korneingriff beim Schleifen entstehen. Diese Mikrostrukturen weisen typischerweise eine laterale Breite von unter 15 μm auf. Die Länge der Strukturen variiert mit dem Wellendurchmesser und damit verbunden mit der Korneingriffsstrecke beim Schleifen der Oberfläche.

Mikrowelligkeit hingegen sind wellige Strukturen mit Strukturbreiten von deutlich über 20 μm . Sie entstehen beim Einstichschleifen durch Abrichtstrukturen auf der Schleifscheibe, welche z. B. beim Abrichten mittels eines Einkorndiamantwerkzeuges entstehen, und sich durch ungünstige Schleifparameter auf die Wellenoberfläche abbilden. Aber auch Strukturen, die beispielsweise beim Kugelstrahlen von Dichtungsgegenaufläichen entstehen, sind der Mikrowelligkeit zuzuordnen. Sie können ungerichtet, gerichtet, in Umfangsrichtung unterbrochen oder auch komplett um den Umfang laufend auftreten. Sind die Strukturen in Umfangsrichtung umlaufend und zudem noch periodisch in axialer Ausprägung, so spricht man von Makrodrall.

Kratzer stellen Beschädigungen der Oberflächen dar, welche meist durch Unachtsamkeit bei der Behandlung von Bauteilen nach dem eigentlichen Fertigungsprozess entstehen. Ihre laterale Größenordnung überschneidet sich mit den Größenordnungen von Mikrodrall und Mikrowelligkeit, was deren messtechnische Erfassung und Auswertung zusätzlich erschwert.

3 Erfassung und Charakterisierung von Drall auf Dichtungsgegenaufläichen

Auf dem derzeitigen Stand der Technik sind zwar bereits diverse Drallauswertungsverfahren kommerziell verfügbar (eine umfassende Übersicht ist in [5] und [6] zu finden), all diesen Verfahren eigen ist aber, dass jedes Verfahren Drall entweder nur qualitativ, oder nur einzelne Drallausprägungen erfassen kann. Eine umfassende Drallauswertung in einem Schritt ist bis heute nicht möglich.

Abhilfe schaffen hier Methoden der digitalen Bildbearbeitung in Kombination mit heute verfügbaren optischen Oberflächenmessgeräten. Als für die Drallmessung besonders geeignetes Messverfahren hat sich beispielsweise die Weißlichtinterferometrie erwiesen. Mit derartigen Messgeräten ist es möglich innerhalb kurzer Zeit große Oberflächenbereiche mit hoher Auflösung sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung zu vermessen. Auch multiple Messungen um den gesamten Wellenumfang werden so in annehmbarer Zeit möglich. Die Messdaten liegen in Form von sogenannten 2,5D Daten vor. 2,5D Daten bestehen aus einer Matrix mit äquidistanten Stützstellen und Höheninformationen als Zellenwerten. Werden die Höheninformationen als Graustufen interpretiert, ermöglicht dies die Anwendung von Algorithmen aus der digitalen Bildbearbeitung auf die Messdaten. Bild 4 zeigt den Ablauf eines solchen strukturbasierten Auswertungsverfahrens, welches am Institut für Maschinenelemente entwickelt wurde.

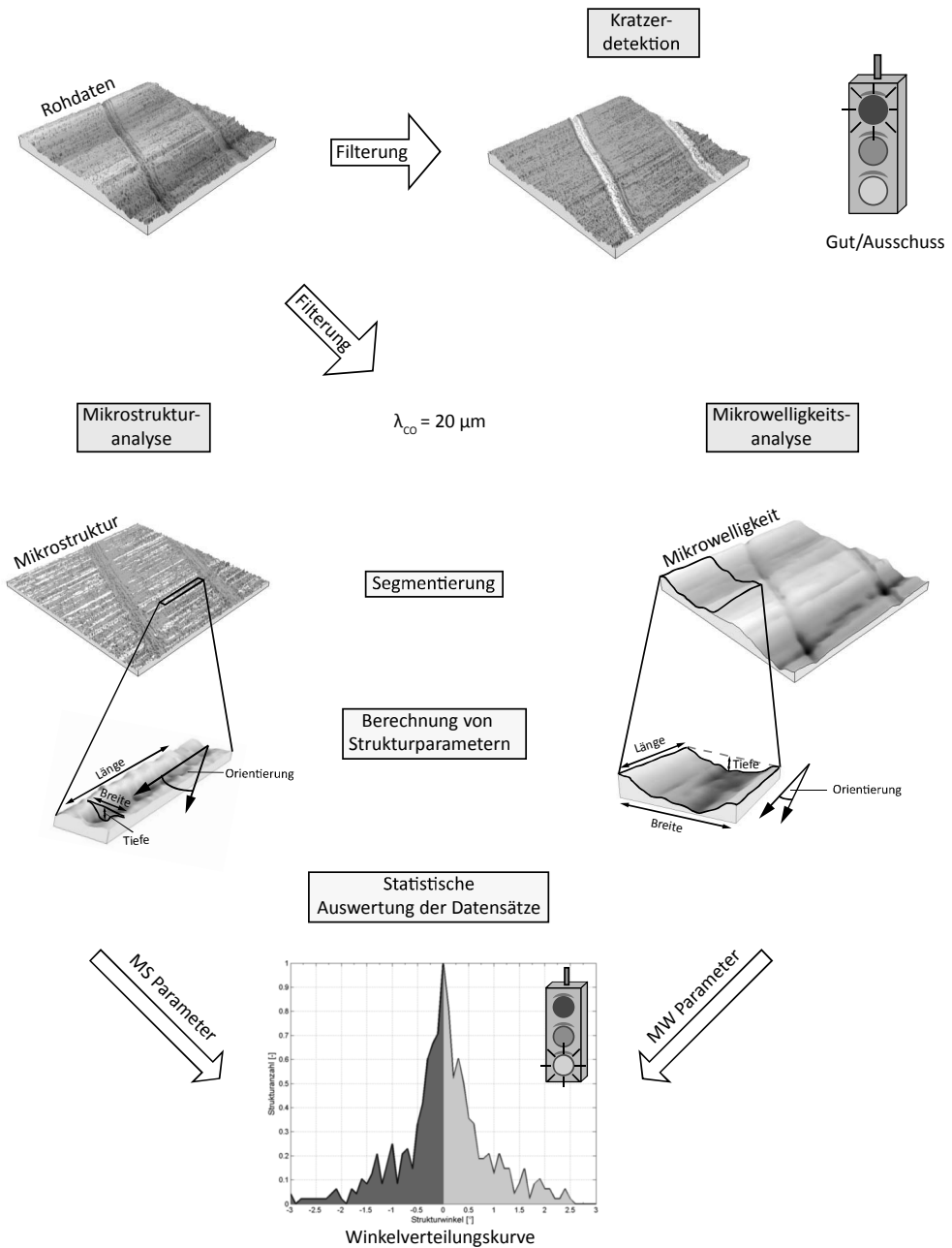


Bild 4: Schematischer Ablauf des strukturbasierten Drallauswertungsverfahrens

Ausgehend von der Rohtopographie werden zunächst mithilfe einer Filterung im Frequenzbereich Kratzer separiert und anschließend erfasst. Sind Kratzer vorhanden führt dies direkt zu einer Ausschussentscheidung. Werden keine Kratzer detek-

tiert, folgt die Auswertung der vorhandenen Mikrostruktur und Mikrowelligkeit. Hierfür wird die Rohtopographie zunächst mithilfe eines zweidimensionalen Gaussfilters und einer Grenzwellenlänge von 20 μm in die entsprechenden Bestandteile getrennt. Um die Eigenschaften jeder einzelnen Struktur erfassen zu können werden Segmentierungsalgorithmen eingesetzt. Aufgrund der stark unterschiedlichen geometrischen Ausprägung von Mikrostrukturen und Mikrowelligkeiten müssen hierfür verschiedene Algorithmen eingesetzt werden. Mikrostrukturen werden mit einem lokalen, dynamischen Schwellwertverfahren [7] und Mikrowelligkeiten mit einer Wasserscheiden-transformation nach DIN 25178 [8] segmentiert. Anschließend werden für jede erkannte Struktur laterale Parameter wie Breite, Länge und Orientierung sowie die Strukturtiefe und das Strukturvolumen berechnet. Im Falle einstichgeschliffener Dichtungsgegenauflähen werden auf diese Weise auf einer Oberflächentopographie mit einem Messbereich von 1x1 mm mehrere 100 Datensätze gewonnen. Diese Datensätze werden mit statistischen Methoden ausgewertet. Die Orientierungen aller Strukturen gegenüber der Umfangsrichtung kann beispielsweise in Form einer Häufigkeitsverteilung dargestellt werden. Anhand solcher Verteilungskurven lassen sich weitere Parameter ableiten, welche Aussagen über die Eignung einer Dichtungsgegenauflähe ermöglichen. So gibt beispielsweise die prozentuale Angabe der Summe linksgerichteter oder rechtsgerichteter Strukturen Aufschluss darüber ob ein Gleichgewicht von links- und rechtsgerichteten Strukturen vorliegt, oder ob überwiegend Strukturen einer Vorzugsrichtung auftreten. Um zwischen Mikrostrukturen und Mikrowelligkeiten unterscheiden zu können, tragen die Kennwerte die Bezeichnungen **MS** für Mikrostrukturanalyse sowie **MW** für Mikrowelligkeitsanalyse. Weitere Parameter die auch im folgenden Verlauf des Textes noch eine Rolle spielen sind die arithmetisch gemittelte Orientierung **MS_{mean}** aller **n** detektierten Mikrostrukturen,

$$MS_{mean} = \frac{1}{n} \sum_1^n Struktur_Orientierung(n)$$

sowie die arithmetische gemittelte Tiefe **MS_t** aller **n** detektierten Mikrostrukturen.

$$MS_t = \frac{1}{n} \sum_1^n Struktur_Tiefe(n)$$

4 Experimentelle Untersuchungen

Um den Nutzen des beschriebenen Drallauswertungsverfahrens aufzuzeigen wurden experimentelle Förderwertuntersuchungen mit gezielt strukturierten Dichtungsgegenauflähen durchgeführt. Da das Ziel der im Folgenden vorgestellten Untersuchungen darin bestand vor allem die Wirkung von Mikrostrukturen zu untersuchen, wurden die Versuchswellen vor der gezielten Strukturierung zunächst poliert. Ausgeprägte Mikrowelligkeiten oder ein Makrodrall liegen daher auf den untersuchten Dich-

tungsgegenauflflächen nicht vor. Dies wird daher auch im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Die Absicht hinter der gezielten Strukturierung der Dichtungsgegenauflflächen bestand darin, möglichst definiert unterschiedliche Strukturcharakteristiken zu erzeugen. Auf insgesamt 34 Versuchswellen wurden daher mithilfe einer CNC Fräsmaschine und unterschiedlichen Schleif- und Polierwerkzeugen Mikrostrukturen erzeugt. Diese schließen mit der Umfangsrichtung der Wellen Strukturwinkel zwischen 1 und 25° ein. Die Rauheit der erzeugten Oberflächen liegt in einem Bereich zwischen Rz 0,3 bis 2,4 µm. Bild 5 zeigt exemplarisch zwei der im Folgenden untersuchten Oberflächen.

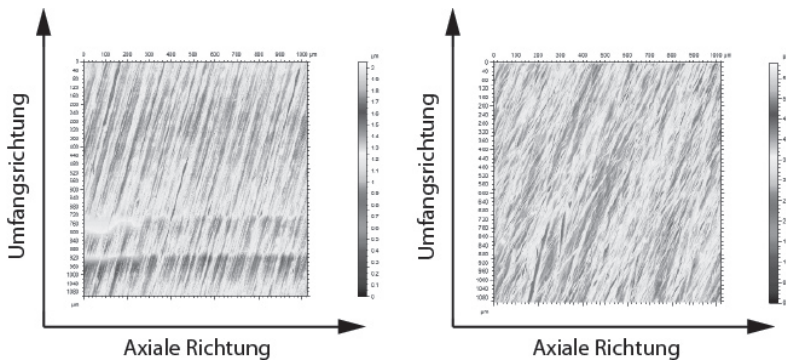


Bild 5: Gezielt strukturierte Dichtungsgegenauflflächen

Einen Überblick über die experimentell ermittelten Wellenförderwerte der Versuchswellen zeigt Bild 6.

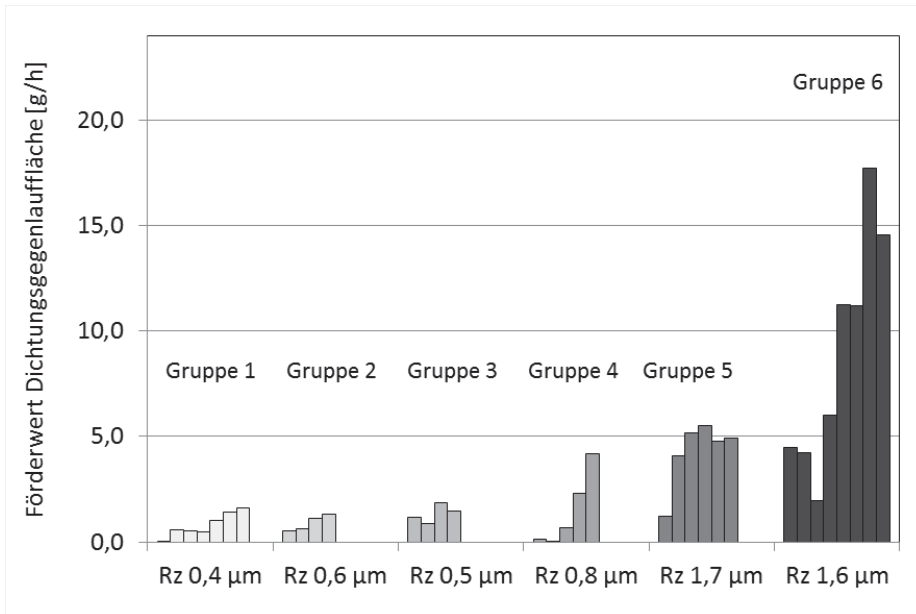


Bild 6: Übersicht experimentell bestimmter Wellenförderwerte

Die Versuchswellen wurden entsprechend der, zur Strukturierung eingesetzten Werkzeuge in 6 Gruppen eingeteilt. Auf der Abszisse des Diagrammes ist der mittlere Rz Wert für jede Gruppe aufgetragen. Die Rz Werte innerhalb der Gruppen liegen jeweils auf einem ähnlichen Niveau. Die Oberflächen aus den Gruppen 1 – 4 weisen Rauheiten von $Rz < 1 \mu\text{m}$, die Oberflächen der Gruppen 5 und 6 Rauheiten von $Rz > 1 \mu\text{m}$ auf. Die Wellenförderwerte aller Oberflächen liegen zwischen förderneutralen 0 g/h und 18 g/h. Die Ergebnisse zeigen damit klar, dass der Wellenförderwert mit steigender Oberflächenrauheit zunimmt. Dies bestätigt sich auch im abgebildeten Diagramm Bild 7 in dem der Wellenförderwert jeder Versuchswelle in aufsteigender Reihenfolge sortiert und den Kennwerten MS_{mean} und MS_t gegenübergestellt ist.

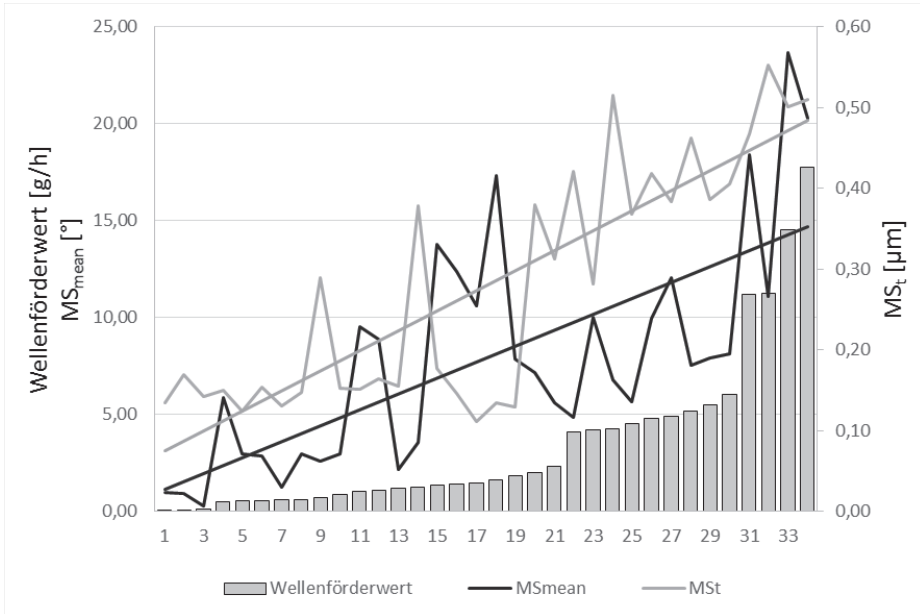


Bild 7: Gegenüberstellung Wellenförderwert - Mikrostrukturparameter MS_{mean} und MS_t

Sowohl mit steigender Strukturorientierung MS_{mean} als auch mit steigender Mikrostrukturtiefe MS_t nimmt der Wellenförderwert zu. Legt man einen linearen Korrelationskoeffizient als Maß für die lineare Abhängigkeit zweier Größen zugrunde (*Wertebereich von 0 – 1, wobei 0 für keine Abhängigkeit und 1 für vollkommene Übereinstimmung steht*), so ergibt sich für die Kombination Wellenförderwert und MS_{mean} sowie für die Kombination Wellenförderwert und MS_t jeweils ein linearer Korrelationskoeffizient von ca. 0,7. In den Untersuchungen waren dies die höchsten Korrelationskoeffizienten die einzelne Oberflächenparameter erzielen. Hierbei wurden nicht nur alle, für die vorgestellte Auswertungsmethode neu definierten MS Parameter, sondern auch Oberflächenparameter nach DIN 25178 berücksichtigt.

Bei genauerer Betrachtung der Kurvenverläufe in Bild 7 fällt ein antizyklisches Verhalten beider Kurven auf. Dies legt die Vermutung nahe, dass durch eine Kombination der Parameter MS_{mean} und MS_t ein noch höherer Korrelationsgrad erreicht werden kann. Dies bestätigt sich in Bild 8 in dem der Wellenförderwert zusammen mit dem Produkt der Parameter MS_{mean} und MS_t dargestellt ist.

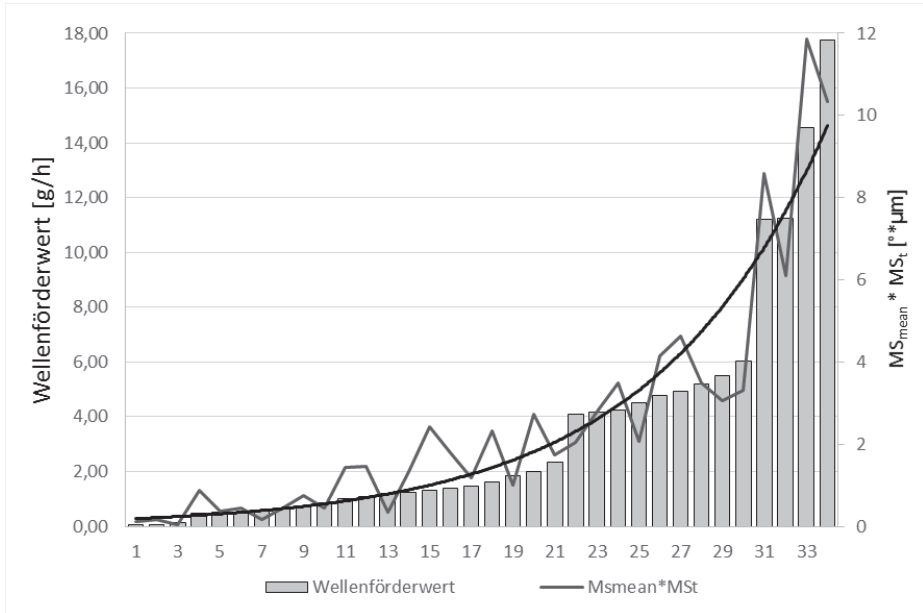


Bild 8: Gegenüberstellung von Wellenförderwerten und dem Produkt aus den Parametern MS_{mean} und MS_t

Der Zusammenhang beider Größen ist im Diagramm klar zu erkennen. Der lineare Korrelationskoeffizient beträgt 0,9, was eine ausgezeichnete Korrelation beider Größen darstellt.

Mit den vorgestellten Erkenntnissen und unter Berücksichtigung von Bild 9 lässt sich eine Modellvorstellung für das Förderverhalten von Mikrostrukturen ableiten. Bild 9 zeigt, dass der Wellenförderwert stärker mit der Strukturorientierung ansteigt, je höher die Oberflächenrauheit der jeweiligen Dichtungsgegenauflfläche ausfällt. Für möglichst förderneutrale Dichtungsgegenauflflächen sollte demnach nicht nur darauf geachtet werden, dass keine stark von der Umfangsrichtung abweichend orientierten Strukturen vorliegen. Eine steigende Oberflächenrauheit verstärkt gleichzeitig die Förderwirkung von orientierten Oberflächenstrukturen und trägt damit zu einem höheren Leckagerisiko bei. Dies muss bei der Auswahl geeigneter Dichtungsgegenauflflächen entsprechend berücksichtigt werden.

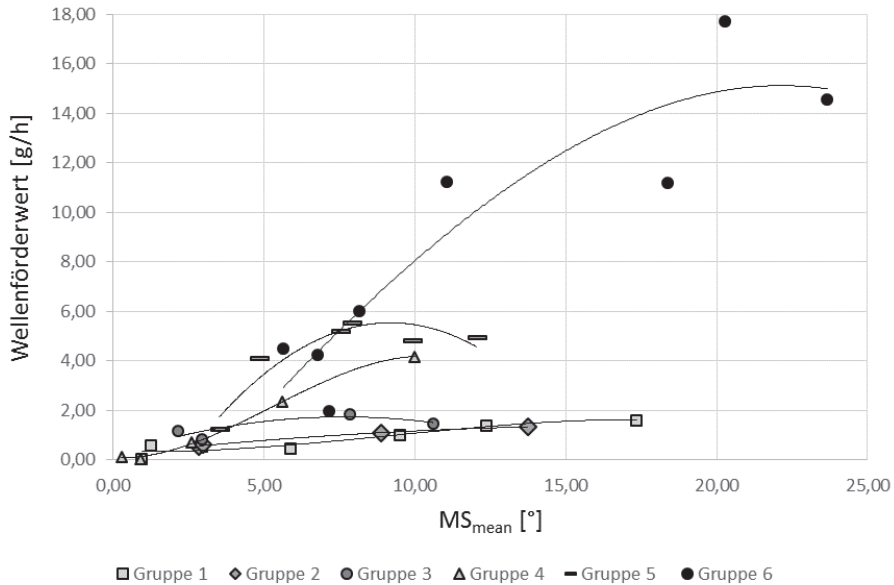


Bild 9: Wellenförderwerte der untersuchten Dichtungsgegenläufigkeiten in Abhängigkeit der mittleren Strukturorientierung MS_{mean}

5 Zusammenfassung

In diesem Tagungsbeitrag wurde ein strukturbasierter Ansatz vorgestellt mit dem Drall auf Dichtungsgegenläufigkeiten umfassend und mithilfe eines einzigen optischen Topographiemessgerätes erfasst und quantifiziert werden kann. Hierbei werden alle relevanten Drallausprägungen wie Mikrodrall, Mikrowelligkeit, Makrodrall und Kratzer in einem Schritt berücksichtigt. Der Bedarf an vielen unterschiedlichen Drallauswertungsmethoden und diverser teurer und zusätzlich benötigter Hardware entfällt auf diese Weise. Basis der vorgestellten Auswertung sind optisch gemessene Topographiedaten, welche mittels Methoden der digitalen Bildbearbeitung aufbereitet und analysiert werden.

Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen an gezielt strukturierten Dichtungsgegenläufigkeiten konnte weiter nachgewiesen werden, dass die definierten Oberflächenparameter die Förderwirkung von Mikrostrukturen im Dichtkontakt treffend beschreiben. Eine Kombination aus der Strukturorientierung und der Strukturtiefe, ausgedrückt durch die im Text definierten Parameter MS_{mean} und MS_t , liefert hierfür einen ausgezeichneten Ansatz.

6 Ausblick

In naher Zukunft werden Schritte unternommen die vorgestellte Methode in ein, auch für den Laien anwendbares Verfahren zu überführen. Um dies zu erreichen wird eine Messstrategie entwickelt die multiple Messungen um den Umfang einer Welle beinhaltet. Die korrekte Wellenausrichtung wird anhand der ermittelten Messdaten und mit Hilfe von „Fitting Algorithmen“ sichergestellt. Hierdurch wird ein Anwendereinfluss beim Aufspannen der Bauteile auf dem Messgerät ausgeschlossen, was quasi Voraussetzung für eine praxisnahe Anwendung der Methode ist. Zeitgleich hierzu erfolgen weitere Untersuchungen welche zeigen sollen, dass sich die vorgestellten Erkenntnisse zum Förderverhalten von Mikrostrukturen auch auf herkömmliche in der Praxis eingesetzte Dichtungsgegenaufläichen übertragen lassen. Anhand einer Auswahl geeigneter Versuchswellen werden dann mit Dauerlaufversuchen Parametergrenzwerte ermittelt und verifiziert. Diese werden als Kriterium für die Auswahl geeigneter Dichtungsgegenaufläichen benötigt. Gelingt dieses Vorhaben sind alle Voraussetzungen für eine für die praktische Anwendung geeignete und verlässliche Qualitätskontrolle für Dichtungsgegenaufläichen erfüllt.

7 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17138 N/1 des Forschungskuratoriums Maschinenbau e. V. wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

8 Literaturhinweise

- [1] DIN 3760: Radial-Wellendichtringe, Deutsches Institut für Normung eV, September 1996
- [2] DIN 3761: Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge, Deutsches Institut für Normung eV, Januar 1984
- [3] ISO 6194-1: Rotary shaft lip-type seals incorporating elastomeric sealing elements, Part1: Nominal dimensions and tolerances, International Organization for Standardization, 2007
- [4] RMA OS-1-1_ Shaft Finish Requirements for Radial Lip Seals, Technical Bulletin, (revised 2004), Rubber Manufacturers Association, Washington, DC, USA
- [5] Baumann, M.; Haas W.: Radial-Wellendichtungen analysieren und beurteilen. Jahrbuch Dichtungstechnik 2013. Friedrich Berger/Sandra Kiefer (Hrsg.) IS-GATEC GmbH, 2012, ISBN: 978-3-9811509-6-4
- [6] Baumann, M.; Baitinger, G.; Bauer, F. ;Haas, W.: How to measure lead in sealing technology; Sealing Technology; Elsevier Ltd.; 07/2013; S. 8-12; ISSN 1350-4789
- [7] Baitinger, G.: Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenaufläichen (Dissertation 2011), Universität Stuttgart, Institutsbericht Nr. 115
- [8] ISO 25178: Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal', International Organization for Standardization, September 2012