

20th ISC

Stuttgart, Germany
Oct. 10 – 11, 2018



International Sealing Conference *Internationale Dichtungstagung*

Eine Kooperation von



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



Kann ein Hydraulikdichtring Strukturen auf der Stangenoberfläche auswischen? – Viskoelastische FE-Untersuchungen an einem PU-Nutring auf unterschiedlichen Stangenoberflächen

Oliver Feuchtmüller, M.Sc., Mario Stoll, M.Sc., Dipl.-Ing. Lothar Hörl, Dr.-Ing. Frank Bauer, Institut für Maschinenelemente (IMA), Universität Stuttgart, Deutschland

1 Einleitung

Die Oberflächenstruktur der Hydraulikstange hat großen Einfluss auf Reibung, Leckage und Verschleiß der Stangendichtung. Für ein funktionstüchtiges und zuverlässiges Dichtsystem muss deshalb nicht nur das einzelne Dichtelement, sondern auch die Stangenoberfläche ausgelegt werden /1/2/3/4/5/6.

Stangendichtungen sind Zukaufteile spezialisierter Dichtungshersteller und werden in verschiedenen Varianten angeboten. Je nach speziellem Anwendungsfall muss ein geeignetes Dichtelement ausgewählt werden. Die Dichtungsgegenauflfläche wird aber zumeist vom Produkthersteller selbst gefertigt. Jeder Hersteller versucht die für seine Anforderungen optimale Stangenoberfläche zu gestalten.

Steigende Anforderungen führen dazu, dass die Nachfrage nach alternativen und günstigeren Beschichtungen sowie Fertigungsverfahren wächst. Jedoch gibt es keine allgemein gültigen Kriterien zur Bewertung und Gestaltung optimaler Stangenoberflächen. Das liegt unter anderem daran, da der Oberflächeneinfluss auf den Dichtmechanismus und Wechselwirkungen zwischen Stange, Fluid und Dichtelement noch nicht gänzlich erforscht wurden /3/.

Das vorliegende Paper trägt hierzu einen Teil bei, indem Wechselwirkungen zwischen Stangenoberfläche und Dichtring anhand der Folgefähigkeit eines PU-Nuttrings bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturen untersucht werden. Unter dem Begriff Folgefähigkeit wird die Fähigkeit des Dichtrings verstanden in Unebenheiten auf der Stangenoberfläche einzudringen und diese auszuwischen. Eine experimentelle Untersuchung der Folgefähigkeit, also eine Betrachtung des Dichtspalts im Mikrometerbereich ist nicht möglich. Deshalb gibt eine FE-Analyse einen ersten Einblick.

2 Oberflächeneinfluss von Hydraulikstangen auf Leckage

Im BMWi/AiF Forschungsvorhaben Nr. 18054 N/1 „Einfluss der Oberflächenrauheit von Hydraulikstangen auf Reibung und Leckage“ (folgend experimentelle Versuche genannt) wurden 14 Hydraulikstangen mit verschiedenen Fertigungsverfahren und Fertigungsparameter hergestellt. Die Stangen mit einem Außendurchmesser von \varnothing 50 mm wurden geschliffen, gehont, poliert oder gedreht, um bewusst sehr unterschiedliche Oberflächenstrukturen zu erzeugen. Der Einfluss der Stangenoberfläche auf Reibung, Verschleiß und Förderwert wurde experimentell untersucht. Zudem wurde in einem Dauerlauf die Leckage über 75.000 Hübe erfasst. Druck, Temperatur und das Geschwindigkeitsprofil wurden über die gesamte Versuchszeit konstant gehalten. Bild 1 stellt die kumulierte Leckage der Stangendichtungen im Dauerlauf bei unterschiedlichen Stangenoberflächen gegenüber.

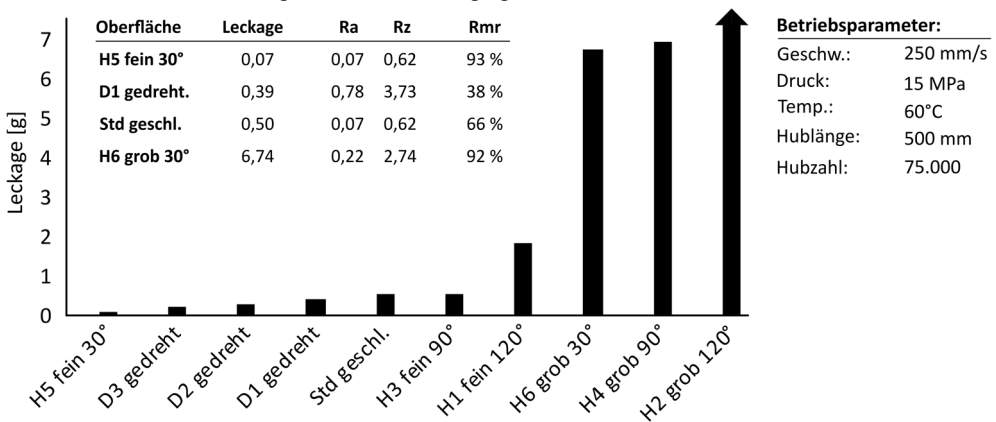


Bild 1: Oberflächeneinfluss von Hydraulikstangen auf Leckage /3/

Erwartungsgemäß zeigten die gehonte Stange H5 und die geschliffene Stange Std gute Ergebnisse bezüglich Leckage. Die Rauheitswerte dieser Oberflächen entsprechen branchenüblichen Vorgaben. Im Vergleich dazu führen die bewusst grob gehonten Stangen (H2, H4, H6) durchweg zu hoher Leckage. In Anbetracht der hohen Rz-Werte war das zu erwarten. Die gehonten Stangen (H1-H6) zeigen zudem einen deutlichen Zusammenhang zwischen Honwinkel und Leckage. Je größer der Honwinkel, desto höher die erfasste Leckage. Trotz der hohen Rz-Werte und des geringen Materialtraganteils Rmr der gedrehten Stangen (D1, D2, D3) bewährten sich diese im Dauerlauf. Die erfasste Leckage war geringer als die der branchenüblichen Stange Std. Hier wird die Unvollkommenheit der herkömmlichen Bewertungskriterien deutlich. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurde deshalb nach neuen Oberflächenkennwerten gesucht. Dabei wurde festgestellt, dass Vorgaben für Hydraulikstangenoberflächen, die ausschließlich auf Oberflächenkennwerten basieren nicht zielführend sind. Je nach Betriebsbedingungen beeinflussen bestimmte Oberflächenstrukturen das Dichtverhalten positiv oder

negativ. Eine Kombination aus Betriebsbedingungen und Oberflächenkennwerten könnte hier Abhilfe schaffen /3/.

3 These

Experimentelle Untersuchungen bestätigen einen deutlichen Einfluss der Hydraulikstangenoberfläche auf das Leckageverhalten der Dichtung. Dieser Zusammenhang kann nicht allein durch hydrodynamische Vorgänge, wie sie durch die inverse Form der Reynoldsgleichung beschrieben werden, erklärt werden. Folgende Erläuterungen vernachlässigen hydrodynamische Vorgänge bewusst, um differenziert einen weiteren Effekt im Dichtspalt zu untersuchen.

Es ist anzunehmen, dass ein Dichtring Unebenheiten mit steilen Flanken, zum Beispiel scharfkantige Poren und Riefen, schlecht folgen bzw. auswischen kann. Im Gegensatz dazu können Unebenheiten mit flachen Flanken, zum Beispiel Riefen, wie sie beim Drehen entstehen, besser ausgewischt werden.

Beim Überfahren der Unebenheiten benötigt der Dichtring eine gewisse Zeit, um der Stangenoberfläche in radialer Richtung zu folgen. Ab einem bestimmten Flankenwinkel und einer bestimmten Stangengeschwindigkeit kann der Nutring der Stange nicht mehr folgen und Unebenheiten nicht gänzlich auswischen. Auf der gegenüberliegenden Flanke der Unebenheit trifft der Dichtring erneut auf die Stangenoberfläche, wodurch ein bestimmtes Ölvolumen zwischen Dichtring und Stange eingeschlossen wird. Bild 2 skizziert diesen Prozess beim Ausfahren der Hydraulikstange.

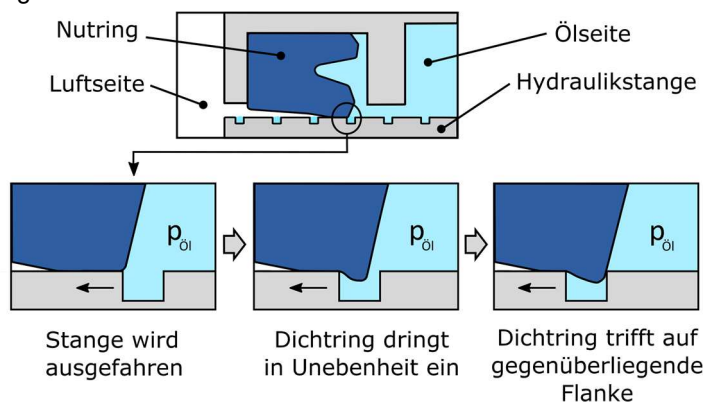


Bild 2: Folgefähigkeit eines Nutrings beim Ausfahren

Bei fortschreitender Stangenbewegung wird das eingeschlossene Ölvolumen durch den Dichtspalt gefördert und gelangt zur Luftseite. Beim Einfahren der Stange wird erneut ein gewisses Ölvolumen eingeschlossen und zurück in den Zylinder gefördert. Sowohl beim Ein- als auch beim Ausfahren wird aufgrund der mangelnden Folgefähigkeit eine gewisse Menge Öl durch den Dichtspalt gefördert. Die Differenz der geförderten Ölvolumina zwischen Ein- und Ausfahren ergibt den Förderwert eines Hubs. Ein negativer Förderwert führt stets zu Leckage. Es wird davon

ausgegangen, dass neben Verfahrensgeschwindigkeit und Dichtringwerkstoff die Flächenpressung im Dichtspalt entscheidend zur Folgefähigkeit beiträgt. Die Flächenpressung wiederum wird maßgeblich von der Dichtringgeometrie und vom Druck im Zylinder bestimmt. Gemäß der inversen Theorie der Reynoldsgleichung werden Stangendichtungen so ausgelegt, dass der Pressungsgradient im Dichtspalt einen asymmetrischen Verlauf vorweist. Demnach gibt es Unterschiede zwischen der Folgefähigkeit des Dichtrings beim Ein- und Ausfahren, sowie Korrelationen zwischen der Folgefähigkeit und dem Betriebsdruck im Zylinder. Je besser der Dichtring beim Ausfahren auswischt, und je schlechter er beim Einfahren auswischt, desto höher ist der Förderwert, bzw. desto geringer die Leckage

Der Druck auf der Luftseite entspricht im Regelfall dem Umgebungsdruck und dieser ist wesentlich niedriger als der Betriebsdruck im Zylinder. Eingeschlossene Ölvolumen expandieren beim Ausfahren aufgrund dieser Druckdifferenz und wölben sich auf der Luftseite auf. Grund dafür ist die Kompressibilität des Hydrauliköls. Mineralöle expandieren bei Druckdifferenzen von 40 MPa um bis zu 4% ihres Volumens /7/. Beim Einfahren der Stange wird ein Teil des aufgewölbten Tropfens dann vom Dichtring abgetrennt und verbleibt als Leckage luftseitig auf der Stange. Bild 3 skizziert den beschriebenen Prozess.

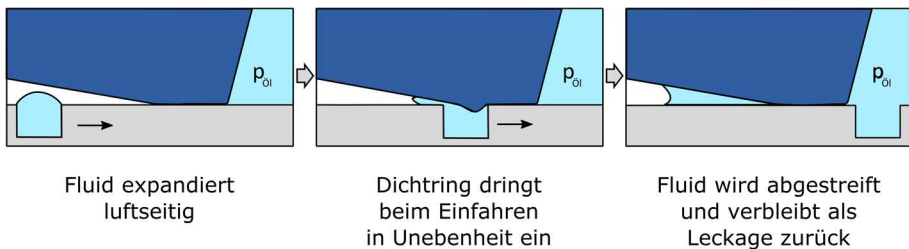


Bild 3: Folgefähigkeit eines Nuttrings beim Einfahren

Je nach Fertigungsverfahren entstehen auf der Stangenoberfläche unterschiedliche Strukturen. Die Stangen aus den experimentellen Versuchen zeigen charakteristische Riefen und Poren. Es ist davon auszugehen, dass geometrische Ausprägungen der Unebenheiten (Flankensteigung, Tiefe, Orientierung) die Folgefähigkeit des Dichtrings beeinflussen. Besonders tiefe Poren mit steilen Flanken können nicht vollständig ausgewischt werden. Gestützt wird diese These durch experimentelle Versuche. Die grob gehonten Stangen weisen vergleichsweise tiefe Riefen und Poren auf und führten zu erhöhter Leckage. Die Versuche zeigen einen deutlichen Einfluss des Honwinkels auf das Dichtverhalten. Riefen längs zur Bewegungsrichtung der Stange führten zu erhöhter Leckage. Die gedrehten Stangen zeigen ebenfalls tiefe Riefen, aber in Umfangsrichtung. Gedrehte Stangen führten zu deutlich weniger Leckage. Gegebenenfalls weil der Dichtring Riefen mit flachen Flanken in Umfangsrichtung sehr gut folgen und damit auswischen kann. Beim Ausfahren verbleibt deutlich weniger Fluid auf der Stange.

4 Aufbau des FE-Simulationsmodells

Die Folgefähigkeit des Dichtelements wurde auf unterschiedlichen Gegenläuflächen untersucht. Das nichtlineare Materialverhalten des Dichtrings wurde unter Berücksichtigung der Viskoelastizität modelliert. Reibung, hydrodynamische Effekte und Temperaturgradienten wurden vernachlässigt. Die Nut und die Gegenläufläche wurden als Starrkörper modelliert.

4.1 Modellierung der Stangenoberflächen

Es wurden die gedrehten Stangenoberflächen aus den experimentellen Versuchen modelliert und in das Simulationsmodell implementiert. Charakteristisch für die gedrehten Stangen sind annähernd rotationssymmetrische Oberflächen mit einheitlichen Riefen. Die Steigung des Drehvorschubs kann im ersten Schritt vernachlässigt werden. Bild 4 zeigt dreidimensionale Oberflächenaufnahmen der gedrehten Stangen aus den experimentellen Versuchen. Die unterschiedlichen Amplituden und Wellenlängen der Riefen werden deutlich.

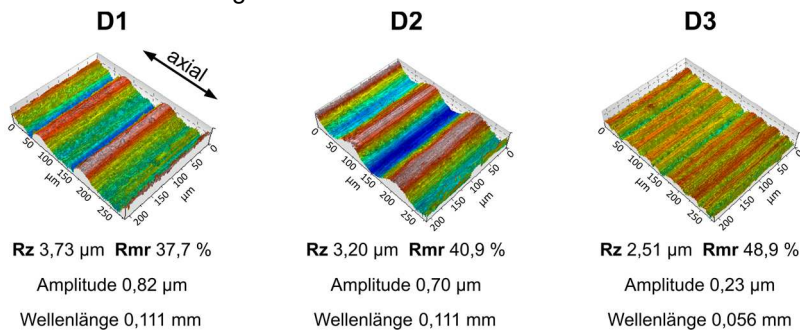


Bild 4: Oberflächenaufnahmen gedrehter Hydraulikstangen /3/

Aufgrund der Rotationsymmetrie können die Stangenoberflächen im Zweidimensionalen abgebildet und untersucht werden. Durch diese Vereinfachung wird die benötigte Rechenzeit deutlich reduziert.

4.2 Modellierung des Nutrings

Für die Simulationen wurde der gleiche Nutring, wie in den experimentellen Versuchen, verwendet. Um die Folgefähigkeit zu untersuchen müssen Bereiche des Nutrings, z.B. die Dichtkante, im Submikrometerbereich vernetzt werden, vgl. Bild 5.

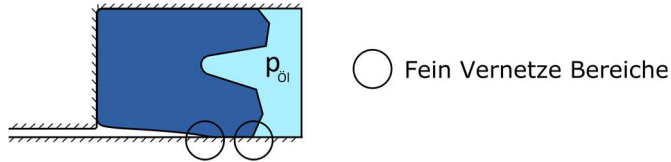


Bild 5: Fein vernetzte Bereiche des Nuttrings

Erstellt wurden mehrere zweidimensionale Netze, die an entsprechenden Stellen fein vernetzt sind. Die Netze bestehen Plattenelementen mit linearer Ansatzfunktion. Im eingesetzten FE-System MSC.MARC wurden Elemente vom Typ 82 gewählt, da sich diese besonders bei rotationssymmetrischen Kontaktsimulationen mit inkompressiblem Materialverhalten eignen /8/.

Zur Beschreibung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens dient das hyperelastische Mooney-Rivlin Modell unter Einbeziehung viskoelastischer Effekte. Die dafür erforderlichen Parameter wurden aus Ergebnissen einer dynamisch mechanischen Analyse (DMA) abgeleitet. Für das Mooney-Modell wurden die zwei Parameter $C_{01} = 69,2$ MPa und $C_{10} = 17,3$ MPa bestimmt. Die Viskoelastizität wird durch das Maxwell-Wiechert Modell beschrieben. Bild 6 vergleicht den approximierten Verlauf des Speichermoduls mit den Messwerten aus der DMA über der Frequenz.

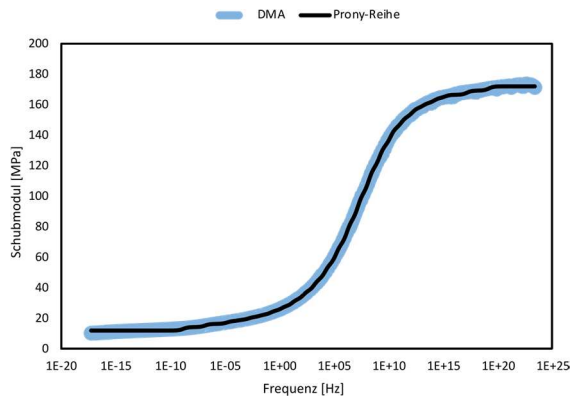


Bild 6: Modellierung der Viskoelastizität

4.3 Ablauf der Simulation

In Bild 7 wird der Ablauf der durchgeführten Simulationen skizziert. Die Simulationen gliedern sich in drei Phasen:

1. Montage des Dichtrings
2. Druckaufbau im Zylinder
3. Ein- bzw. Ausfahren der Stange

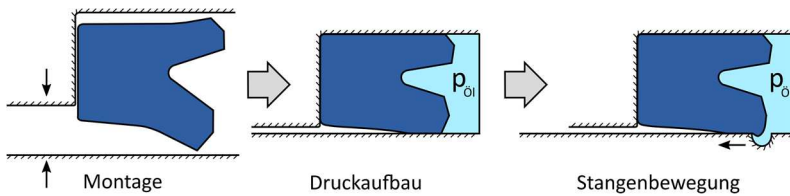


Bild 7: Ablauf der Simulationen zur Folgefähigkeit

In der ersten Phase wird der Dichtring in die Nut gesetzt. Das wird simulativ durch die Aufweitung des Stangendurchmessers auf Nennmaß umgesetzt. Anschließend wird der Druck im Zylinder erhöht, indem eine entsprechende Linien- bzw. Flächenpressung auf das FE-Netz aufgebracht wird. Vor der dritten Phase wird die zu untersuchende Oberflächenstruktur in das Simulationsmodell implementiert und dann die Stange axial mit definierter Geschwindigkeit verschoben.

5 Simulationsergebnisse

Vorab wurden Simulationen an einer synthetischen Endlosriefe mit unendlicher Tiefe und Breite, sowie einer Flankensteigung von 90° durchgeführt. Anhand der Endlosriefe konnte allgemein der Einfluss der Geschwindigkeit und des Betriebsdrucks auf die Folgefähigkeit untersucht werden. In weiteren Simulationen wurde die Folgefähigkeit des Dichtrings bei gedrehten Stangen untersucht.

5.1 Voruntersuchungen an der Endlosriefe

Die Endlosriefe, als Kante modelliert, stellt eine Riefe mit unendlicher Tiefe und Breite dar. In der Simulation wird die Endlosriefe schrittweise axial verschoben. Dabei dringt der Dichtring radial in die Endlosriefe ein. Die Eindringtiefe des Nuttrings (y) nimmt relativ zur Verschiebung der Endlosriefe (x) zu, vgl. Bild 8. Im Folgenden wird deshalb von einer relativen Eindringtiefe (y/x) gesprochen.

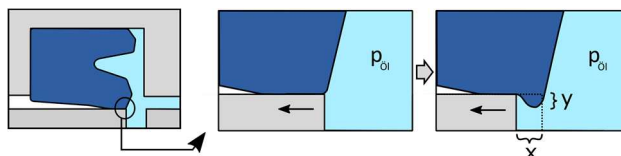


Bild 8: Relative Eindringtiefe beim Ausfahren (Eindringtiefe y und Riefenbreite x)

Die relative Eindringtiefe kann auch beim Einfahren der Hydraulikstange erfasst werden. Beim Einfahren der Stange wird der luftseitige Bereich des Dichtrings betrachtet, vgl. Bild 3. Anhand der relativen Eindringtiefe werden Aussagen über die Folgefähigkeit getroffen. Je tiefer der Nutring in die Endlosriefe eindringt, desto besser ist die Folgefähigkeit bei gegebenen Betriebsparametern.

Bild 9 zeigt die relativen Eindringtiefen des Nutrings beim Einfahren (E) und Ausfahren (A) der Stange in Abhängigkeit der Verfahrgeschwindigkeit. Die Ergebnisse stammen aus Simulationen mit einem Betriebsdruck von 15 MPa und 60°C.

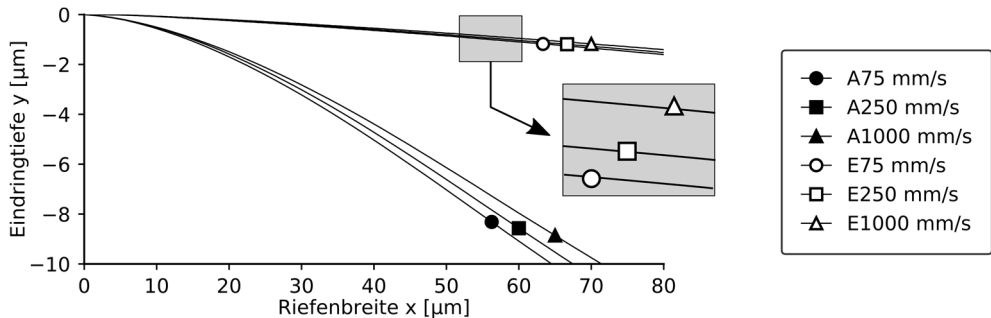


Bild 9: Relative Eindringtiefe des Nutrings bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Sowohl beim Ein- als auch beim Ausfahren ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Verfahrgeschwindigkeit und der relativen Eindringtiefe zu erkennen. Je geringer die Verfahrgeschwindigkeit, desto tiefer dringt der Nutring in die Endlosriefe ein. Daraus folgt, dass mit steigender Geschwindigkeit die Folgefähigkeit abnimmt und Unebenheiten schlechter ausgewischt werden. Aufgrund der Trägheit des Materials, benötigt der Nutring eine gewisse Zeit um Unebenheiten zu folgen. Je schneller die Stange verfahren wird, desto weniger Zeit hat der Nutring, um in die Endlosriefe einzudringen. Bild 9 zeigt zudem Unterschiede der Folgefähigkeit zwischen Ein- und Ausfahren der Stange. Die Folgefähigkeit beim Ausfahren ist stets besser als beim Einfahren. Demnach werden Unebenheiten beim Ausfahren besser ausgewischt, als beim Einfahren. Gemäß der These ist das Grundvoraussetzung für einen positiven Förderwert und leakagefreien Betrieb.

Bild 10 zeigt die relativen Eindringtiefen des Nutrings bei unterschiedlichen Drücken für das Einfahren (E) und das Ausfahren (A) bei 250 mm/s und 60°C.

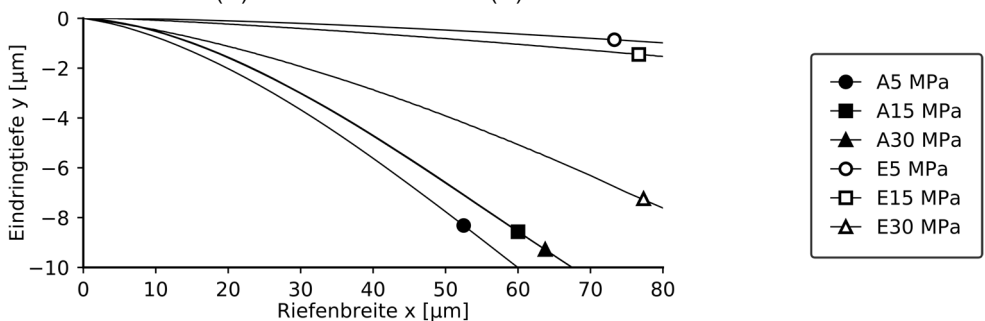


Bild 10: Relative Eindringtiefe des Nutrings bei unterschiedlichen Drücken

Der Druck im Zylinder beeinflusst die relative Eindringtiefe beim Aus- und Einfahren unterschiedlich. Beim Ausfahren nimmt die relative Eindringtiefe mit steigendem

Druck ab und nähert sich einem Grenzwert. Es ist nahezu kein Unterschied zwischen der relativen Eindringtiefe bei 15 MPa und 30 MPa zu erkennen. Im Gegensatz dazu nimmt die relative Eindringtiefe beim Einfahren mit steigendem Druck deutlich zu.

Das gegensätzliche Verhalten wird wie folgt erklärt. Die Pressung im Dichtspalt wird maßgebend vom Betriebsdruck im Zylinder beeinflusst. Je höher der Druck, desto höher ist die Pressung im Dichtspalt. Das gilt sowohl im luftseitigen als auch im ölseitigen Kontaktbereich. Bild 11 zeigt qualitativ den Pressungsverlauf im Dichtspalt p_{Spalt} bei 0 MPa und 15 MPa Betriebsdruck $p_{\text{Öl}}$ im Zylinder.



Bild 11: Asymmetrischer Pressungsverlauf eines Nutrings im Dichtspalt

Aufgrund dieser erhöhten Pressung dringt der Dichtring beim Einfahren und bei höheren Drücken tiefer in die Unebenheit ein. Die Folgefähigkeit wird dadurch verbessert. Beim Ausfahren wird die Dichtkante jedoch beim Lösen von der Stangenoberfläche vom Öldruck gestützt und das Eindringen in die Unebenheit gehemmt, siehe Bild 12.

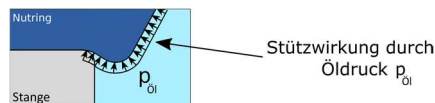
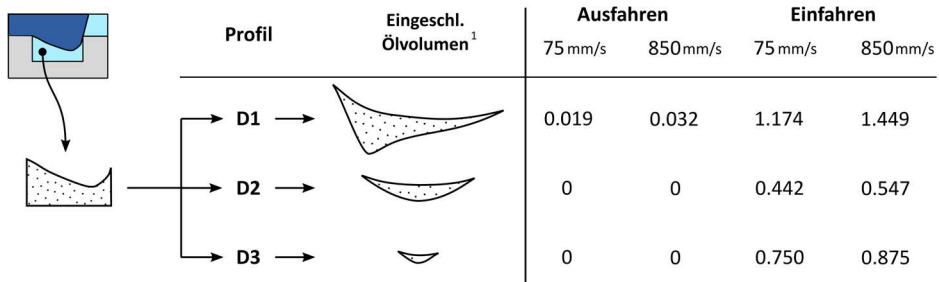


Bild 12: Stützwirkung der Druckflüssigkeit beim Ausfahren

Je höher der Druck im Zylinder, desto stärker tritt die Stützwirkung des Fluiddrucks in Erscheinung. Das Resultat ist eine schlechtere Folgefähigkeit beim Ausfahren und höheren Drücken. Dadurch gelangt unter dem Fluiddruck beim Ausfahren mehr Öl zur Luftseite. Beim erneuten Einfahren der Stange werden die mit Öl gefüllten Unebenheiten besser ausgewischt als bei niedrigen Drücken. Folglich sinkt der Förderwert bei höheren Drücken, wodurch die Anfälligkeit für Leckage steigt. Dieses Verhalten wurde auch in den experimentellen Versuchen beobachtet.

5.2 Untersuchungen an realen Strukturen

Die regelmäßige Struktur der gedrehten Stangen (vgl. Bild 4) eignet sich sehr gut, um eingeschlossene Ölvolumina zwischen Stange und Dichtring zu berechnen. Hierfür wurde genau der Zeitschritt, zu dem der Dichtring die Unebenheit abschließt, also die gegenüberliegende Flanke berührt, betrachtet. Bild 13 vergleicht die eingeschlossenen Ölvolumina einer Riefe bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, einem Betriebsdruck von 15 MPa und einer Temperatur von 60°C.



¹beim Einfahren 850 mm/s (nicht maßstabsgetreu)

Bild 13: Eingeschlossene Ölvolumina in ml beim Aus-/Einfahren gedrehter Hydraulikstangen (Hublänge 500 mm, Volumen mit 100 multipliziert)

Die eingeschlossenen Volumina bei den Profilen D2 und D3 sind deutlich geringer als bei D1. Die flacheren Profile D2 und D3 können beim Ausfahren vollständig ausgewischt werden. Unterschiede der Folgefähigkeit zwischen Aus- und Einfahren werden deutlich. Je höher die Geschwindigkeit desto größer die Differenz eingeschlossener Ölvolumina zwischen Aus- und Einfahren. Folglich kann bei höheren Geschwindigkeiten mehr Öl in den Zylinder gefördert werden. Ähnliches Verhalten wurde auch bei den experimentellen Versuchen mit den drei gedrehten Stangen beobachtet.

6 Fazit

Die durchgeführten Simulationen zeigen den Einfluss verschiedener Betriebsparameter auf die Folgefähigkeit eines PU-Nuttings. Es gibt einen Unterschied der Folgefähigkeit zwischen Ein- und Ausfahren der Stange. Je höher die Verfahrensgeschwindigkeit der Stange, desto schlechter können Unebenheiten beim Ein- und Ausfahren ausgewischt werden. Je höher der Betriebsdruck, desto schlechter werden Unebenheiten beim Ausfahren ausgewischt. Im Gegensatz dazu werden Unebenheiten beim Einfahren und hohen Drücken besser ausgewischt. Riefen gedrehter Stangen mit flachen Flanken können beim Ausfahren nahezu vollständig ausgewischt werden. Beim Einfahren wird bei den untersuchten Strukturen ein bestimmtes Ölvolumen eingeschlossen, wodurch ein positiver Förderwert entsteht. Den Erkenntnissen zu Folge können Riefen mit flachen Flanken, die in Umfangsrichtung verlaufen, den positiven Förderwert eines Dichtsystems erhöhen. Solche Strukturen wurden bereits mit gedrehten Stangen experimentell untersucht und dabei hohe Förderwerte erfasst. Die Aussagen aus Experiment und Simulation stimmen überein.

7 Nomenclature

Variable	Description	Unit
$p_{\text{ö1}}$	Fluiddruck im Zylinder	[MPa]
p_{Spalt}	Pressung im Dichtspalt	[MPa]
C_{01}	Materialparameter des Mooney-Rivlin-Modells	[-]
C_{10}	Materialparameter des Mooney-Rivlin-Modells	[-]
x	Riefenbreite auf Hydraulikstange	[μm]
y	Eindringtiefe des Dichtrings in Unebenheit	[μm]

8 References

- /1/ Müller, H.K., Nau, B.S., *Abdichtung bewegter Maschinenteile*, www.fachwissen-dichtungstechnik.de, visited on June 04, 2018
- /2/ Nißler, U., *Betriebsgerecht gestaltete Hydraulikdichtringe*, Abschlussbericht, BMWi/AiF Vorhaben-Nr. 13326 N/1, 2005
- /3/ Stoll, M., *Einfluss der Oberflächenrauheit von Hydraulikstangen auf Reibung und Leckage*, Abschlussbericht, BMWi/AiF Vorhaben Nr. 18054 N/1, 2017
- /4/ Buck, A., *Untersuchung des Einflusses von verschiedenen hergestellten Stangenoberflächen und Hydraulikölen auf Dichtheit, Reibung und Lebensdauer ausgewählter Hydraulikdichtungen*, Abschlussbericht, BMWi/AiF Vorhaben Nr. 15526 N/1, 2011
- /5/ Hoppermann, A., *Einfluss von Oberflächengestaltung und Werkstoffwahl auf das tribologische Verhalten von Gleit- und Dichtungskontakten*, Dissertation, Aachen, Techn. Hochsch., 2005
- /6/ Steep, F., Wüstenhagen, G.J., *Counter Surfaces of Hydraulic Sealing Systems for Heavy-Duty Applications*, 15. ISC, Stuttgart, VDMA Fluidtechnik, 2008
- /7/ Watter, H., *Hydraulik und Pneumatik: Grundlagen und Übungen – Anwendungen und Simulation*, Springer, Berlin, Germany, 2015
- /8/ MSC Software, *Marc 2015 – Volume B: Theory and User Information*, MARC MENTAT Manual, 2015