

Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Mario Stoll

Entwicklung und Funktionsanalyse rückenstrukturierter Manschettendichtringe aus PTFE-Compound

Bericht Nr. 192

D 93 ISBN 978-3-936100-93-8

Institut für Maschinenelemente Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 9 70569 Stuttgart Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Entwicklung und Funktionsanalyse rückenstrukturierter Manschettendichtringe aus PTFE-Compound

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Mario Stoll, M.Sc.

aus Laupheim

Hauptberichter: Mitberichterin: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas (i. R.) Prof. Dr.-Ing. Corinna Salander

Tag der mündlichen Prüfung:

27.11.2019

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart 2019

meiner Frau Kathrin gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas, ehemaliger Leiter des Bereichs Dichtungstechnik am Institut für Maschinenelemente sowie seinem Nachfolger Dr.-Ing. Frank Bauer für die Ermöglichung und Betreuung dieser Arbeit. Das mir entgegengebrachte Vertrauen und die großen wissenschaftlichen Freiräume und Chancen haben die Entstehung dieser Arbeit erst ermöglicht.

Frau Prof. Dr.-Ing. Corinna Salander, Leiterin des Bereichs Schienentechnik am Institut für Maschinenelemente, danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, dem Leiter des Instituts für Maschinenelemente, danke ich für sein Vertrauen und die Förderung des familiären Institutsklimas.

Grundlage dieser Arbeit bildete eine gemeinsame Erfindung mit meinen Kollegen Herrn Nino Dakov, M.Sc. und Herrn Dipl.-Ing. Lothar Hörl. Für die zahlreichen, intensiven Diskussionen, kreativen Anmerkungen und die ausgezeichnete Teamarbeit gilt beiden mein besonderer Dank. Des Weiteren danke ich allen Kolleginnen und Kollegen für die fachlichen und persönlichen Gespräche, die große Hilfsbereitschaft sowie die gemeinsamen Aktivitäten, welche für mich die Zeit am IMA unvergesslich machen.

Die Durchführung dieser Arbeit wäre nicht ohne studentische Unterstützung möglich gewesen. Für ihre Mithilfe danke ich den Herren Marco Gohs, Marco Opitz, Martin Sitterer, Jan-Philipp Heimrath, Markus Preisser und Lucas Keckeisen.

Mein herzlichster Dank gebührt meiner Familie. Die fortwährende Unterstützung und der Rückhalt meiner Eltern während der Schulzeit und des Studiums legten die Basis für meine wissenschaftliche Arbeit. Meine Frau Kathrin und meine Tochter Paulina gaben mir die wichtige Unterstützung, Aufmunterung und Motivation zur Fertigstellung dieser Arbeit. Die Rücksicht und Liebe, die sie mir in dieser Zeit bewiesen haben, ist für mich durch nichts zu ersetzen.

Stuttgart im November 2019

Mario Stoll

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen V				
Ał	ostra	ct		IX
1	Einl	eitung		1
2	Gru	ndlage	n und Stand der Technik	3
	2.1	Fluidr	nechanik im Dichtspalt	3
		2.1.1	Hydrostatik	3
		2.1.2	Hydrodynamik	7
		2.1.3	Schleppdruck	9
	2.2	Radia	l-Wellendichtungen	10
		2.2.1	Einordnung	10
		2.2.2	Dichtungsfunktion	11
		2.2.3	Radial-Wellendichtring aus Elastomer	12
	2.3	Welle	ndichtungen aus PTFE	17
		2.3.1	Werkstoff	17
		2.3.2	PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen.	19
		2.3.3	PTFE-Manschetten mit Spiralrille	22
		2.3.4	PTFE-Manschetten mit erhabenen Rückförderstrukturen	23
3	Pro	blemst	ellung und Zielsetzung der Arbeit	27
	3.1	Proble	emstellung	27
	3.2	Zielse	tzung	28
4	Neu	es Dicl	ntungskonzept	31
	4.1	Grundidee		31
		4.1.1	Chemische und thermische Resistenz	31
		4.1.2	Statische Dichtheit	31
		4.1.3	Dynamische Dichtheit	32

		4.1.4	Neuer Ansatz	
	4.2	Funkt	ionsprinzip	
		4.2.1	Dehnung einer Manschette	
		4.2.2	Rechteckige Zugprobe	
	4.3	Rückf	ördermechanismus	
	4.4	Proto	typ	
	4.5	Zusan	nmenfassung des neuen Prototyps	
5	Unt	ersuch	ungseinrichtungen	43
	5.1	Messe	geräte	
		5.1.1	Radialkraft	
		5.1.2	Digitalmikroskop und IMA-Sealobserver	
		5.1.3	IMA-Sealscanner	
		5.1.4	3D-Laser-Mikroskop	
		5.1.5	REM	
	5.2	Prüfst	ände	
		5.2.1	Statische Prüfkammer	
		5.2.2	Dauerlaufprüfstand	
		5.2.3	Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand	51
	5.3	Schne	id- und Gravierlaser	
6	Vor	gehens	sweise und Untersuchungsmethoden	55
	6.1	Simul	ation	56
		6.1.1	Materialmodell	56
		6.1.2	2,5D-Simulation	57
		6.1.3	3D-Simulation	58
	6.2	Herst	ellung der Dichtringe	59
		6.2.1	Aufnahme der PTFE-Manschetten	59
		6.2.2	PTFE-Rohling und Werkstoff	60
		6.2.3	Laserbearbeitung	60
	6.3	Verifi	kation der Dichtringe	62
		6.3.1	Verifikation der Fertigung	62
		6.3.2	Verifikation der Rückförderstrukturausbildung	63
	6.4	Statische Dichtheit		65
	6.5	Dynar	nische Dichtheit	
		6.5.1	Funktionsuntersuchungen	67
		6.5.2	Förderwertuntersuchungen	67
		6.5.3	Standardmäßiger Versuchsablauf	

	6.6	Versu	chsöl und Wellen	70
7	Pro	totyp –	Ergebnisse	73
	7.1	Simula	ation	73
		7.1.1	Simulationsergebnisse	73
		7.1.2	Validierung der Ergebnisse	
		7.1.3	Robustheit	
		7.1.4	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	
	7.2	Exper	imentelle Ergebnisse	
		7.2.1	Statische Dichtheit	
		7.2.2	Dynamische Dichtheit	93
		7.2.3	Einsatzgrenzen des Prototyps	
		7.2.4	Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse	
	7.3	Zusan	nmenfassung der Prototypenergebnisse	
8	Funktionsanalyse und Optimierung		107	
	8.1	Biegel	inie und Anlagebereich	
	8.2	Unidiı	rektional	
		8.2.1	Rückenstrukturen	
		8.2.2	Experimentelle Ergebnisse	
		8.2.3	Zusammenfassung Unidirektional	
	8.3 Bidirektional		ktional	
		8.3.1	Ergebnisse Bidirektional	
		8.3.2	Optimierung Bidirektional	
		8.3.3	Zusammenfassung Bidirektional	
	8.4	Variat	ion des Werkstoffs	
	8.5	Gestal	tungshinweise	127
9	Zusa	ammer	nfassung und Ausblick	133
10	Lite	raturv	erzeichnis	139
11	Anh	ang		147
12	Leb	enslau	f	177

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

ACM	Acrylat-Kautschuk
B3S	Back-Structured Shaft Seal
EDX	energiedispersive Röntgenspektroskopie
EGS	drallfrei geschliffene Oberfläche
FKM	Fluor-Kautschuk
IMA	Institut für Maschinenelemente
IR	Nadellager-Innenring
MVQ	Silikon-Kautschuk
NBR	Nitril-Kautschuk
PTFE	Compoundwerkstoff auf Basis von Polytetrafluorethylen
REM	Rasterelektronenmikroskop
RWDR	Radial-Wellendichtring

Lateinische Formelzeichen

Α	Oberfläche
b	Berührbreite eines Dichtrings auf der Welle
С	Kohlenstoff
Di	Innendurchmesser eines Manschettenrohlings
Dw	Nenndurchmesser der Welle
F	Fluor
F _R	Radialkraft

F'	gemessene Kraft bei einem Radialkraftmessgerät
g	Gewichtskraft
h	Spalthöhe
$h_{ m k}$	Steighöhe in einer Kapillare
$h_{ m hydr}$	Füllstandshöhe
$h_{ m Schmierfilm}$	Schmierfilmhöhe
L	Spaltlänge
$\dot{m}_{\rm L}$	Leckagestrom
<i>ṁ</i> _R	Rückförderstrom
n	Anzahl
р	Druck / Pressung
$p_{ m hydr}$	hydrostatischer Druck
p_1	projizierte Linienpressung
р к	Kapillardruck
$p_{ m Schlepp}$	Schleppdruck
r	Radius
Re	Reynoldszahl
u	Geschwindigkeit
V	Strömungsgeschwindigkeit
W	Arbeit
W	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
Wmax	maximaler Pressungsgradient
X	Koordinate in axialer Richtung

Griechische Formelzeichen

α	fluidseitiger Kontaktwinkel
β	bodenseitiger Kontaktwinkel
η	dynamische Viskosität
Θ	Kontaktwinkel
πe	Filmdruck
σ	Oberflächenspannung
$\sigma_{ m lv}$	Grenzflächenspannung flüssig-dampfförmig
$\sigma_{\rm s}$	Oberflächenenergie eines Festkörpers
$\sigma_{ m sl}$	Grenzflächenspannung fest-flüssig
$\sigma_{ m sv}$	Grenzflächenspannung fest-dampfförmig
$\sigma_{ m lv}$	Grenzflächenspannung flüssig-dampfförmig
τ	Schubspannung
ρ	Dichte
φ	Koordinate in Umfangsrichtung

Abstract

Development and Functional Analysis of Back-Structured Shaft Seals (B3S) made of PTFE-Compound

Many different types of seals are required in each engine and gear unit. One of these is the shaft seal, which must seal oil from the application against the environment under static and dynamic conditions. A leakage-free seal with a long lifecycle is essential for an efficient and reliable application. Therefore, a robust and reliable shaft seal is necessary. As a result of the electrification of the drive train in vehicles, there is a trend towards higher speeds with smaller shaft diameters and an ever-lower use of lubricants. For the shaft seals this results in a significantly higher thermal and chemical load as well as inadequate lubrication or dry running.

Shaft seals need a back-pumping effect to be leak-tight during dynamic operation. Thus, a radial shaft seal can be seen as a small pump when the shaft is rotating and leakage can be pumped back from the air side to the oil side. Commonly, rubber or a compound material based on polytetrafluoroethylene (PTFE) is used as material for rotary shaft seals. The way the back-pumping effect is generated varies depending on the material, which is why the design of shaft seals differs. In conjunction with the geometry the asperities of an elastomeric lip seal create a self-induced back-pumping effect. Hence, using an elastomeric lip seal is common when static and dynamic leak tightness is necessary. Due to the demand for a higher thermal or chemical resistance, higher grade material like PTFE must be used. In contrast to an elastomeric lip seal, a smooth PTFE shaft seal cannot create a self-induced back-pumping effect. Instead, back-pumping with PTFE lip seals is realised by a spiral groove or macroscopic sealing aids in the sealing contact. Unfortunately, these sealing aids often lead to static leakage or are unreliable due to tight required production tolerances.

Scrutinizing the challenges described above, a new approach to achieve a statically and dynamically leak tight PTFE shaft seal is examined in this thesis. The objective is a chemically and thermally resistant, reliable and easy to manufacture seal that is universally useable regardless of the operating conditions. A PTFE lip seal without sealing aids served as starting point for the new seal. A PTFE lip seal without sealing aids already shows a high chemical and thermal resistance and a good static leak tightness. In order to achieve dynamic leak tightness, a back-pumping effect is required, which was formerly achieved by macroscopic sealing aids in the sealing contact. In order to maintain the static leak tightness of a PTFE lip seal without sealing aids, the sealing contact of the new seal should not be impaired. Confronting this challenge, a new approach was chosen in this thesis to create the necessary back-pumping effect.

The basic idea of the new approach is to influence locally the stiffness of a component through structures and finally strain the component. Figure 1 illustrates the basic idea using a smooth and a structured specimen. Due to the heterogeneous stiffness, the material is constricted unevenly, creating new structures. With this approach, coarsely manufactured structures can be used to produce significantly finer structures, which are not subject to wear.



Figure 1: Basic idea illustrated with a smooth and a structured specimen

Applied to sealing technology, the new approach is evident in the positioning of the structures (sealing aids). In contrast to previous approaches, the manufactured structures were not positioned inside the sealing contact, but on the back of the PTFE lip seal. The aim was to influence the pressure distribution in the smooth sealing contact area through changes in the stiffness, thus generating a back-pumping mechanism for dynamic leak tightness. This back-pumping mechanism was to be generated by the seal itself during assembly. The new sealing approach is named Back-Structured Shaft Seal (B3S).

In line with the new sealing approach, a prototype was developed for a shaft diameter of 80 mm with 60 sickle-shaped back structures on the otherwise smooth PTFE lip

seal, Figure 2. In theory, the strain and constriction during the assembly of the prototype is concentrated in areas where the sleeve was structured on the back. As a result, the PTFE lip seal locally lifts itself from the shaft and microscopically flat, tilted channels are formed, creating an active back-pumping mechanism.

Simulative and experimental analyses were performed to verify the new sealing approach. The prototypes have tilted channels in the sealing contact, which are self-induced during assembly. The measured channel heights of these back-pumping structures in the sealing contact are very low with a maximum of 50 μ m.



Figure 2: Prototype – new PTFE lip seal with sickle-shaped back structures

In sealing technology such microscopically flat, back-pumping structures have so far only been manufactured for mechanical face seals. A major advantage of the Back-Structured Shaft Seals over mechanical face seals is their simple and cost-effective production. The manufacturing of back structures in the scale of a tenth of a millimetre leads to self-induced back-pumping structures in the micrometre scale in the sealing contact.

Prior to this work, the manufacturing and use of such microscopically flat back-pumping structures in the sealing contact of PTFE lip seals were nearly impossible. The reason for this is the complex production and rapid wear of these structures during operation. Since the microscopically flat back-pumping structures of the new sealing approach are formed by the stiffness influence of the back structures, they are retained even if the PTFE lip seal is worn during operation.

In the simulation changes in the position and depth of the sickle-shaped back structures or different overlaps between the lip seal and the shaft showed little influence on the back-pumping structures generated in the sealing gap. Thus, the prototype with sickle-shaped back structures can also be reliably used even with large manufacturing and assembly tolerances due to the robust design.

On the test rig the sickle-shaped prototype achieved the static leak tightness of a smooth PTFE sleeve. The measured pumping rates indicate that the prototype has an effective back-pumping mechanism, which leads to very good dynamic leak tightness even at high speeds (tested up to 18000 rpm) or eccentricity. The self-induced back-pumping structures are superior to the previously used macroscopic sealing aids in the sealing contact. This is due to the better length to eight ratio, which is why the microscopically flat structures are hydrodynamically more effective. Even with long-term test rig runs over 1000 h at 6000 rpm no leakage or loss of the back-pumping mechanism due to wear could be detected.

The characteristics of the new prototype with sickle-shaped back structures in short:

- Self-induced forming of microscopically flat back-pumping structures in the smooth sealing contact, which are hydrodynamically highly effective.
- No wear of the back-pumping structures the structures remain intact due to local differences in stiffness even if wear occurs.
- Simple production manufacturing back structures in a scale of a tenth of a millimetre self-induces back-pumping structures in the micrometer scale.
- Robust seal design reliable use also with large manufacturing, assembly and operating tolerances possible.
- Static and dynamic leak tightness.

With the development of a new PTFE lip seal with sickle-shaped back structures, the objective was achieved.

The main disadvantage of the prototype with sickle-shaped back structures is the pumping mechanism in reverse running. If the shaft rotates in reverse direction, the prototype actively pumps oil to the air side and leakage occurs. This is due to the less than ideally shaped back-pumping structures, which do not have a closed contact area on the oil side between the PTFE lips seal and the shaft.

To optimize the prototype, further back structures were developed, of which three different variants were analysed on the test rig. Despite different back structures, all variants showed zero or only very low leakage. This result confirms the robustness of the new sealing approach. With the sawtooth-shape a new back structure was developed which leads to tilted back-pumping structures with an uninterrupted circumferential contact line on the oil side. In contrast to the sickle-shaped prototype, sawtooth shaped back structures can also withstand a temporary reverse run of the shaft.

Besides unidirectional shaft seals, bi-directional Back-Structured Shaft Seals for use in both directions of shaft rotation and lip seals made of elastomer with the aim of frictionless operation were examined. First test rig runs show promising results for both approaches. For an ideally functioning bi-directional or frictionless seal further research is required.

The advantages of the newly developed sealing approach in short:

- Chemical and thermal resistance due to PTFE.
- Self-induced back-pumping effect due to back-structured PTFE lip.
- High back-pumping capability.
- Wear-resistance.
- Robust and reliable design.
- Easy and cheap to produce.
- Static and dynamic leak tightness.

1 Einleitung

Durch die steigenden Anforderungen im Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau werden Dichtsysteme vor neue und immer größere Herausforderungen gestellt. Der Bereich des Fahrzeugbaus ist derzeit durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs im starken Wandel. Dieser Wandel wird getrieben durch die Strafen der Europäischen Union. Ab 2020 beträgt die Strafzahlung für Automobilhersteller pro zugelassenes Fahrzeug 95 € je Gramm CO₂ bei Überschreitung des Flotten-Emissionsgrenzwerts von 95 g CO₂/km [1]. Durch die Elektrifizierung geht der Trend zu höheren Drehzahlen bei kleineren Wellendurchmessern bei gleichzeitig verringertem Einsatz von Schmierstoffen. Des Weiteren werden zur Reduzierung der Umweltbelastung synthetische oder biologisch abbaubare Schmierstoffe und neue Additive eingesetzt. Neben dem Fahrzeugbau trifft dieser Trend auch für viele andere Bereiche der Technik zu. Für die Abdichtung von Wellenaustrittsstellen bedeutet dies eine deutlich höhere thermische und chemische Belastung sowie vermehrter Einsatz bei Mangelschmierung oder im Trockenlauf.

Zur Abdichtung von Wellenaustrittsstellen hat sich der Radial-Wellendichtring (RWDR) aus Elastomer in der Praxis etabliert. Der Elastomer-RWDR besitzt sowohl eine gute statische als auch dynamische Dichtheit in beide Drehrichtungen der Welle. Die Einsatzgrenzen des Elastomer-RWDR setzt der Werkstoff. Bei sehr hohen chemischen oder thermischen Anforderungen ist der Betrieb eines Dichtrings aus Elastomer nicht mehr möglich. Aus diesem Grund kommt es vermehrt zum Einsatz von Wellendichtungen aus Compoundwerkstoffen auf Basis von Polytetrafluorethylen (PTFE). Dichtringe aus PTFE besitzen hervorragende thermische und chemische Eigenschaften sowie eine gute Trockenlauffähigkeit. Im Gegensatz zum Elastomer-RWDR bilden Wellendichtringe aus PTFE selbständig keinen mikroskopisch aktiven Rückfördermechanismus aus. Zur Verbesserung der dynamischen Dichtheit werden deshalb makroskopische Rückförderstrukturen in den Dichtspalt der Wellendichtungen aus PTFE fertigungstechnisch eingebracht. Bis heute gibt es jedoch keine im Markt erhältlichen Wellendichtungen aus PTFE mit makroskopischen Rückförderstrukturen, welche sowohl dynamisch als auch statisch im überfluteten Zustand eingesetzt werden können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich deshalb mit einer neuen Herangehensweise zur Erzielung einer statisch und dynamisch einsetzbaren Wellendichtung aus PTFE.

Die Grundidee besteht darin, die Steifigkeit des Dichtrings lokal zu beeinflussen. Hierzu sollen makroskopische Strukturen, im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, nicht innerhalb, sondern außerhalb des Dichtspalts fertigungstechnisch ein- oder aufgebracht werden. Durch den Steifigkeitsverlauf und die Verformung bei der Montage soll die Dichtung selbständig feine, flach verlaufende Förderstrukturen im Dichtspalt ausbilden. Diese flachen Förderstrukturen sollen gegenüber bisherigen Förderstrukturen hydrodynamisch wirksamer sein und aufgrund der lokalen Steifigkeitsunterschiede nicht verschleißen.

Ziel ist eine statisch und dynamisch funktionierende Dichtung, welche unabhängig von den Einsatzbedingungen möglichst universell und zuverlässig eingesetzt werden kann.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Fluidmechanik im Dichtspalt, zum Verständnis benötigte Begriffe sowie die Einordnung von Wellendichtringen im Bereich der Dichtungstechnik erläutert. Der Fokus liegt hierbei auf den beiden am häufigsten eingesetzten Wellendichtringen aus Elastomer und PTFE sowie deren Wirkprinzipien zum Abdichten rotierender Wellen. Abschließend wird der Stand der Technik und Forschungsarbeiten im Bereich PTFE-Manschettendichtringen als Grundlage und Ausgangssituation dieser Arbeit dargelegt.

2.1 Fluidmechanik im Dichtspalt

Die Fluidmechanik im Dichtspalt setzt sich aus den beiden Gebieten der Hydrostatik und der Hydrodynamik zusammen.

2.1.1 Hydrostatik

Die Hydrostatik ist die Lehre von unbewegten und strömungsfreien Flüssigkeiten. Im Bereich der Dichtungstechnik ist die Hydrostatik insbesondere bei statischen Dichtsystemen oder bei dynamischen Dichtsystemen im Stillstand relevant.

Die Kohäsion beschreibt dabei die Bindungskräfte die zwischen gleichartigen, benachbarten Molekülen innerhalb einer Flüssigkeit wirken [2]. Da die Kohäsionskräfte innerhalb einer Flüssigkeit in alle Richtungen wirken, heben sich diese Bindungskräfte zwischen den Molekülen gegenseitig auf [3]. An der Grenzfläche der Flüssigkeit können sich diese Bindungskräfte nicht mehr gegenseitig aufheben. Daraus resultiert eine Kraft, welche senkrecht zur Grenzfläche nach innen gerichtet ist, und für den Zusammenhalt der Flüssigkeit sorgt, Abbildung 2.1.



Abbildung 2.1: Bindungskräfte in einer Flüssigkeit nach [3]

Die Kraft wirkt einer Vergrößerung der Grenzfläche und somit der Flüssigkeitsoberfläche entgegen. Um die Oberfläche einer Flüssigkeit zu vergrößern muss Arbeit verrichtet werden. Die benötigte Arbeit dW steht dabei im Verhältnis zur Oberflächenveränderung dA. Die Oberflächenspannung σ ist dabei der Proportionalitätsfaktor:

$$\sigma = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}A} \tag{2.1}$$

Eine Flüssigkeit strebt somit stets den Zustand der kleinsten Oberfläche im Verhältnis zum Volumen an. Die natürliche Form einer freien Flüssigkeit stellt daher die Kugel dar.

An der Grenzfläche zwischen einer Flüssigkeit und einer weiteren Substanz wirken ebenfalls Kräfte, welche die Moleküle an der Grenzfläche zusammenhalten. Diese Kräfte werden Adhäsionskräfte genannt. Um die Flüssigkeit von der anderen Substanz zu trennen, müssen die Adhäsionskräfte durch Arbeit aufgehoben werden. [2]

In der Realität haben wir immer ein Zusammenspiel zwischen Kohäsionskräften und Adhäsionskräften. Ob sich eine Flüssigkeit auf einer Oberfläche ausbreiten möchte ist daher von dem Verhältnis beider Kräfte abhängig. Sind die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte so breitet sich die Flüssigkeit auf einer Oberfläche aus. Dieser Vorgang wird auch Benetzung genannt. Ein Maß für die Benetzung ist der Kontaktwinkel θ , Abbildung 2.2. Je nach Kontaktwinkel wird dabei zwischen Benetzung (Spreiten, $\theta = 0^\circ$), teilweiser Benetzung ($\theta < 90^\circ$) und keiner Benetzung ($\theta > 90^\circ$) unterschieden. [4]



Abbildung 2.2: Benetzung – wirkende Oberflächenspannungen nach [5]

Young [6] beschreibt den Zusammenhang der Grenzflächenspannung flüssig-dampfförmig σ_{lv} , des Kontaktwinkels Θ gegenüber der Oberflächenenergie eines Festkörpers σ_s , der Grenzflächenspannung fest-flüssig σ_{sl} und des Filmdrucks π_e mit folgender Gleichung:

$$\sigma_{\rm lv} \cdot \cos \Theta = \sigma_{\rm s} - \sigma_{\rm sl} - \pi_{\rm e} \tag{2.2}$$

Für niederenergetische Kunststoffe, wie sie in der Dichtungstechnik eingesetzt werden, kann dabei der Filmdruck π_e vernachlässigt werden [7].

Der Einfluss der Benetzung im Bereich der Dichtungstechnik kann sehr gut an einer Kapillare beobachtet werden, Abbildung 2.3. Eine benetzende Flüssigkeit bildet beim Eintauchen einer Kapillare einen konkaven Meniskus ($\theta < 90^{\circ}$) aus und die Flüssigkeit steigt in der Kapillare nach oben (Kapillaraszension). Eine nicht benetzende Flüssigkeit hingegen bildet einen konvexen Meniskus ($\theta > 90^{\circ}$) aus und sinkt in der Kapillare ab (Kapillardepression). [2]



Abbildung 2.3: Kapillareffekt nach [2]

Der Druck Δp_K mit der eine Flüssigkeit in einen Kapillarspalt vordringt wurde von Young und Laplace mit Hilfe des Krümmungsdrucks wie folgt beschrieben:

$$\Delta p_{\rm K} = \frac{2}{r} \cdot \sigma_{\rm lv} \cdot \cos \Theta \tag{2.3}$$

Je kleiner der Radius r und der Kontaktwinkel Θ , desto größer wird der Druck, mit der die Flüssigkeit in einen engen Spalt oder eine Kapillare drängt. In engen Querschnitten ist folglich die wirkende Kapillarkraft höher und die Flüssigkeit kann sich schneller ausbreiten.

Anschaulich zeigt sich der Kapillareffekt anhand der Steighöhe einer Flüssigkeit in einer Kapillare. Der Kapillardruck wirkt hierbei gegen den hydrostatischen Druck der Flüssigkeit. Die Steighöhe $h_{\rm K}$ kann mit der Gewichtskraft g und der Dichte ρ berechnet werden:

$$h_{\rm K} = \frac{2 \cdot \sigma_{\rm lv} \cdot \cos \Theta}{r \cdot g \cdot \rho} \tag{2.4}$$

Im Bereich der Wellendichtsysteme verlaufen die Kapillarspalte in der Regel horizontal und nicht vertikal. Somit wirkt der hydrostatische Druck in dieselbe Richtung wie der Kapillardruck, wenn es sich um ein überflutetes Dichtsystem handelt. Der Druck Δp , mit dem die Flüssigkeit in diesem Fall in den Dichtspalt drängt, setzt sich aus dem hydrostatischem Druck Δp_{hydr} des abzudichtenden Fluids und dem Kapillardruck Δp_{K} zusammen:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{hydr}} + \Delta p_{\text{K}}$$
$$= \rho \cdot \mathbf{g} \cdot h_{\text{hydr}} + \frac{2}{r} \cdot \sigma_{\text{lv}} \cdot \cos \Theta$$
(2.5)

Je kleiner der Dichtspalt und je höher das abzudichtende Fluid vor dem Dichtspalt ansteht ($h_{\rm hydr}$), desto stärker drängt das Fluid in den Dichtspalt. Eine weitere Vergrößerung der Kraft, mit der das Fluid in den Dichtspalt drängt, erfolgt durch einen abzudichtenden Differenzdruck, welcher an dieser Stelle nicht mitbetrachtet wurde.

Eine konstruktive Maßnahme zur Reduzierung eines kapillarbedingten Flüssigkeitsstroms ist die luftseitige Austrittstelle der Kapillare. Je plötzlicher und größer der Übergang zum Außendurchmesser im Verhältnis zum Kapillardurchmesser, desto stärker wird der Flüssigkeitsstrom durch die Kapillare abgebremst. Dieser Effekt wird auch Stop Groove genannt. [8]

2.1.2 Hydrodynamik

Die Hydrodynamik ist die Lehre der Strömung von bewegten Flüssigkeiten. Im Bereich der Dichtungstechnik ist die Hydrodynamik bei dynamischen Dichtsystemen zur Abdichtung von Flüssigkeiten relevant. Wie bei der Hydrostatik haben Kohäsions- und Adhäsionskräfte hierbei eine hohe Relevanz.

Der Einfluss der Kohäsion auf die Strömung wird dabei durch die Viskosität (Zähigkeit) der Flüssigkeit erfasst. Die Strömung im Dichtspalt ist laminar solange die Kraftübertragung durch die Viskosität innerhalb des Fluids deutlich größer als die Trägheitskräfte ist. Eine laminare Strömung ist kennzeichnet durch Strömungsschichten, welche sich vorwiegend in dieselbe Richtung bewegen. Eine Durchmischung innerhalb des Fluids findet somit nicht statt. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten oder geringer Viskosität des Fluids kann eine turbulente Strömung entstehen. Eine turbulente Strömung ist dabei durch ein dreidimensionales Strömungsfeld gekennzeichnet, welches zeitlich und räumlich variieren kann. Durch die Verwirbelungen in einer turbulenten Strömung kommt es zu einer hohen Durchmischung des Fluids. [9]

Reynolds fasste den Einfluss der Zähigkeits- und Trägheitskräfte auf die Strömung mit Hilfe der mittleren Strömungsgeschwindigkeit *w*, der Spalthöhe *h*, der Dichte ρ und der dynamischen Viskosität η in einer dimensionslosen Zahl zusammen:

$$Re = \frac{w \cdot 2 \cdot h \cdot \rho}{\eta} \tag{2.6}$$

Überschreitet die Reynoldszahl *Re* einen gewissen Wert muss mit turbulenter Strömung gerechnet werden. Dieser Wert wird auch als kritische Reynoldszahl bezeichnet. In glatten Spalten liegt die kritische Reynoldszahl im Bereich von 2000 bis 4000. In einem sehr rauen Spalt oder in Spalten mit Absätzen kann eine turbulente Strömung bereits bei einer Reynoldszahl von 500 bis 1000 auftreten. [9]

Die Spalthöhen bei Wellendichtungen sind sehr klein. Beispielhaft seien hier die Messungen von Van Leeuwen [10] und Poll et al. [11] genannt. Beide ermittelten experimentell die Dichtspalthöhen bei RWDR aus Elastomer. Die gemessenen Spalthöhen betrugen 1,2 µm bis 9,5 µm. Diese engen Dichtspalten führen zu einer sehr geringen Reynoldszahl. Im Dichtspalt kann somit von einer laminaren Strömung ausgegangen werden.

Die Strömung im Dichtspalt von Wellendichtsystemen entsteht durch Druck- und Schleppströmungen. Eine Schleppströmung entsteht bei einer Wellendichtung durch die sich drehende Welle. Im Folgenden soll die drehende Welle vereinfacht als flache, bewegte Wand betrachtet werden. Durch Adhäsionskräfte haftet das Fluid an den angrenzenden Wänden. An der bewegten Wand wird das Fluid entsprechend der Wandgeschwindigkeit mitgeschleppt, während es sich an der stehenden Wand nicht bewegt. Durch die Reibung innerhalb des Fluids werden angrenzende Fluidschichten beeinflusst. Für newtonsche Fluide gilt dabei nachfolgendes Reibungsgesetz:

$$\tau = \eta \cdot \frac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}h} \tag{2.7}$$

Die Schubspannung τ ist demnach proportional zur Scherrate dv/dh. Der Proportionalitätsfaktor ist die dynamische Viskosität η des Fluids.

Durch die Haftbedingung und das newtonsche Verhalten bildet sich zwischen einer bewegten und einer unbewegten Wand bei reiner, laminarer Schleppströmung ein dreiecksförmiges Geschwindigkeitsprofil aus.

Bei einer reinen Druckströmung haftet das Fluid an den stehenden Wänden. Die Strömung erfolgt hierdurch größtenteils in der Mitte des Strömungskanals. Bei einer laminaren Strömung bildet sich ein parabelförmiges Strömungsprofil aus.

Bei einer Überlagerung von Schlepp- und Druckströmung kann das Superpositionsprinzip angewendet werden. Abbildung 2.4 zeigt die Strömungsprofile einer Schlepp- (a) und Druckströmung (b) sowie die positive (d) und negative (c) Überlagerung beider Strömungsformen.



Abbildung 2.4: Strömungsprofile und Superpositionsprinzip nach [12]

2.1.3 Schleppdruck

Die hydrostatischen und hydrodynamischen Effekte haben einen großen Einfluss auf die Funktionsweise von Dichtsystemen. Gegebene und in der Regel nicht beeinflussbare Größen sind dabei die Kapillarkräfte sowie der an der Dichtung anstehende Druck. Eine Beeinflussung ist somit hauptsächlich durch das Mitschleppen des Fluids möglich. Hierbei wird bei Wellendichtsystemen versucht, durch Förderstrukturen im Strömungsbereich das Fluid in gewünschter Art und Weise zu steuern. Diese Förderstrukturen werden gefertigt oder können von der Dichtung durch eine gezielte Auswahl von Dichtringform und Material selbstständig gebildet werden. Trifft das mitgeschleppte Fluid auf eine Förderstruktur so bildet sich dort ein Schleppdruck aus. Das Fluid weicht infolgedessen seitwärts diesem Druckanstieg aus. Durch eine schräge Anordnung der Förderstruktur wird die Richtung, in die das Fluid ausweicht, vorgegeben und der Fluidstrom gezielt umgelenkt. Diese Beeinflussung der Fluidströmung kann sowohl durch Vertiefungen als auch durch Erhebungen erfolgen. Abbildung 2.5 stellt den Fluidstrom an einer zur Schlepprichtung schräg angeordneten Förderstruktur (Kanal) dar.



Abbildung 2.5: Fluidtransport durch einen schräg angeordneten Kanal nach [9]

Das Verständnis des Schleppdrucks ist somit für die Funktionsweise von dynamischen Dichtsystemen elementar, weshalb an dieser Stelle eine Betrachtung des Extremfalls eines Schleppdruckaufbaus erfolgen soll. Wird ein Fluid in einen abgeschlossenen Spalt oder Kanal geschleppt, kann dieses nur entgegen der Schlepprichtung ausweichen. Das Strömungsprofil entspricht dabei Strömung c) in Abbildung 2.4. Der entstehende Schleppdruck $\Delta p_{Schlepp}$ berechnet sich dabei aus der Viskosität η des Fluids, der Spaltlänge *L* sowie der Spalthöhe *h*:

$$\Delta p_{\rm Schlepp} = \frac{6 \cdot \eta \cdot L}{h^2} \tag{2.8}$$

Lange und im Verhältnis vor allem niedrige Spalten können somit sehr hohe Schleppdrücke erzeugen. Diesen Effekt machen sich in der Dichtungstechnik beispielsweise strukturierte Gleitringdichtungen zunutze, welche durch sehr feine Kanalstrukturen im Mikrometerbereich durch den Schleppdruck auf einem Gasfilm aufschwimmen können.

2.2 Radial-Wellendichtungen

Im Folgenden werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Dichtringe im Bereich der Dichtungstechnik eingeordnet. Des Weiteren werden grundlegende Funktionen und Begriffe von Wellendichtungen erläutert. Eine vertiefte Betrachtung erfolgt dabei für Radial-Wellendichtungen aus Elastomer, die am häufigsten eingesetzte Dichtringart im Bereich der Wellendichtungen.

2.2.1 Einordnung

Abbildung 2.6 zeigt die Einteilung von Dichtstellen nach Haas [13]. Grundsätzlich können Dichtstellen in zwei Hauptbereiche eingeteilt werden. Diese Hauptbereiche sind die statischen und die dynamischen Dichtstellen. Die dynamischen Dichtstellen werden dabei entsprechend ihrer Bewegungsart in rotatorisch/drehend bewegt oder translatorisch/linear bewegt unterteilt. Eine weitere Einteilung von Dichtstellen kann in berührend oder berührungsfrei erfolgen.



Abbildung 2.6: Einteilung von Dichtsystemen [12]

Im Rahmen dieser Arbeit werden Manschettendichtringe untersucht. Diese werden der Kategorie der dynamischen Dichtstellen zugeordnet. Es handelt sich somit um eine berührende, drehende Wellendichtung.

2.2.2 Dichtungsfunktion

Die grundlegende Funktion einer Dichtung ist das Trennen zweier Räume. Im Folgenden sollen die dynamisch-berührenden Dichtstellen näher betrachtet werden. Das Dichtsystem setzt sich aus drei Komponenten zusammen. Diese sind das abzudichtende Fluid, die Gegenlauffläche sowie der Dichtkörper.

Eine statische Abdichtung erfolgt, indem der Dichtkörper mit Kraft auf die Gegenlauffläche gepresst wird. Hierdurch wird der Leckagestrom unter der Dichtung gedrosselt. Wird der Dichtkörper derart auf die Gegenlauffläche gedrückt, dass sich eine geschlossene Pressungslinie ausbildet, kann im Idealfall der Leckagestrom unterbunden werden. Hierzu muss das Pressungsmaximum am gesamten Umfang höher als der abzudichtende Fluiddruck sein.

Im dynamischen Betrieb wird stets etwas Fluid unter den Dichtkörper geschleppt. Es bildet sich ein fluidgefüllter Dichtspalt zwischen Dichtkörper und Gegenlauffläche aus, auf welchem der Dichtkörper teilweise oder gänzlich aufschwimmt. Vorteil des fluidgefüllten Dichtspalts ist ein verringerter Verschleiß des Dichtkörpers sowie ein besserer Abtransport der Reibungswärme aus dem Dichtspalt. Nachteil ist der entstehende Leckagestrom $\dot{m}_{\rm L}$, welcher von einer passiven Dichtung nur gedrosselt aber nicht vollständig unterbunden werden kann, Abbildung 2.7.



Abbildung 2.7: Leckage- und Rückförderstrom bei passiven und aktiven Dichtsystemen [12]

Um bei einem dynamischen Dichtsystem ein Austreten des Leckagestroms zu unterbinden, wird ein aktiver Rückfördermechanismus benötigt. Dieser Rückfördermechanismus generiert einen Rückförderstrom m_R , welcher dem Leckagestrom entgegenwirkt. Für eine funktionierende dynamische Dichtung muss der Rückförderstrom m_R größer als der Leckagestrom m_L sein.

Absolute dynamische oder statische Dichtheit kann von keiner Dichtung erzielt werden. Ab wann von einem dichten System gesprochen wird ist deshalb abhängig von der jeweiligen Definition und kann sich von System zu System unterscheiden.

2.2.3 Radial-Wellendichtring aus Elastomer

Der Radial-Wellendichtring aus Elastomer nach DIN 3760 [14] und DIN 3761 [15] ist der am häufigsten eingesetzte Dichtring zur drucklosen Abdichtung überfluteter oder bespritzter Wellendurchtrittsstellen. Grund hierfür ist die sehr gute statische und dynamische Dichtheit durch den weichen Werkstoff und den sich selbstausbildenden, aktiven Rückfördermechanismus.

Aufbau

Der klassische RWDR besteht aus Elastomer, welches in der Regel an einem Versteifungsring vulkanisiert wird. Abbildung 2.8 zeigt den Aufbau eines RWDR und benennt die wichtigsten Grundelemente.



Abbildung 2.8: Grundelemente des Radial-Wellendichtrings [9]

Die Dichtkante ist über eine Membrane mit dem Versteifungsring verbunden. Die Kraft, welche den Dichtring auf die Welle presst, wird beim Aufweiten des Dichtrings
auf die Welle erzeugt. Diese sogenannte Radialkraft setzt sich beim RWDR aus der Zugspannung im Elastomer sowie der Aufweitung einer metallischen Zugfeder zusammen. Die Kraft sorgt für die statische Dichtheit, indem sämtliche Kanäle im Dichtspalt durch die Anpressung der Dichtkante verschlossen werden.

Die Dichtkante eines RWDR wird in der Regel einseitig abgestochen. Daraus resultiert eine im Neuzustand geringe Berührbreite von etwa 0,1 mm. Im Laufe eines regulären Betriebs kann sich die Berührbreite auf bis zu 0,35 mm erhöhen.

Der fluidseitige Kontaktwinkel α ist mit 40° bis 50° etwa doppelt so groß ausgeführt wie der bodenseitige Kontaktwinkel β . Die unterschiedlichen Kontaktwinkel erzeugen einen über der Berührbreite *b* asymmetrischen Pressungsverlauf im Dichtspalt. Auf dieser Asymmetrie basieren die am weitesten verbreiteten Wirkprinzipien eines RWDR.

Dynamischer Dichtmechanismus

Um eine dynamische Dichtheit bei Wellendichtungen zu erreichen wird ein aktiver Rückfördermechanismus benötigt, welcher dem Leckagestrom entgegengerichtet ist. Dieser Rückfördermechanismus bildet sich beim Elastomer-RWDR aufgrund der asymmetrischen Pressungsverteilung im Dichtspalt selbständig aus. Die Wirkweise wird hauptsächlich durch die drei folgenden Wirkprinzipien von Kammüller [16], Müller [17] und Jenisch [18] erklärt:

- Verzerrungsprinzip
- Seitenstromprinzip
- Oszillationsprinzip

Das von Kammüller und Müller aufgestellte Verzerrungs- und Seitenstromprinzip basieren auf Strukturen auf der Oberfläche des Elastomers im Dichtspalt, Abbildung 2.9.

Das Verzerrungsprinzip bezieht sich auf axiale Verschleißstrukturen, welche Schallamach [19] anhand von Tribometerversuchen bei Elastomer gezeigt und Kawahara [20] durch eine Glasholwelle im Dichtspalt beobachten konnte. Durch Reibungsschubspannungen werden die axialen Verschleißstrukturen in Bewegungsrichtung verzerrt. Die Form der Verzerrung entspricht dabei der asymmetrischen Pressungsverteilung im Dichtspalt [16]. Die Schleppströmung im Dichtspalt wird an diesen Strukturen axial umgelenkt. Es entstehen zwei gegensinnige Förderströme in Richtung der maximalen Pressung im Dichtspalt. Auf Grund des flacheren Dichtkantenwinkels β sind die luftseitigen Strukturen länger als die fluidseitigen Strukturen. Daraus ergibt sich ein Nettofluidstrom und somit ein aktiver Rückfördermechanismus in Richtung Fluidseite. Das Seitenstromprinzip basiert auf einem ähnlichen Effekt wie das Verzerrungsprinzip. Die Förderwirkung der Seitenstromhypothese bezieht sich dabei auf stochastisch verteilte Rauheitserhebungen, welche die Schleppströmung axial umlenken [17], [21]. Vor jeder Rauheitserhebung steigt der Druck, wodurch das Fluid lokal das Pressungsmaximum des Dichtrings überqueren kann. Durch den flacheren Dichtkantenwinkel β überquert statistisch mehr Fluid das Pressungsmaximum in Richtung Fluidseite als umgekehrt. Daraus resultiert ein aktiver Rückfördermechanismus in Richtung Fluidseite.



Abbildung 2.9: Verzerrungs- und Seitenstromprinzip nach [9]

Das von Jenisch aufgestellte Oszillationsprinzip [18] beruht ebenfalls auf der asymmetrischen Pressungsverteilung im Dichtspalt. Im Gegensatz zum Verzerrungs- und Seitenstromprinzip werden für die Förderwirkung keine speziellen Strukturen auf der Oberfläche des Elastomers im Dichtspalt benötigt. Grundlage für das Oszillationsprinzip ist die inverse Reynoldsgleichung. Mit Hilfe der inversen Reyndoldsgleichung kann die Schmierfilmhöhe $h_{\text{Schmierfilm}}$ berechnet werden, welche axial unter einem Dichtring hindurch geschleppt wird:

$$h_{\rm Schmierfilm} = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot u}{9 \cdot w_{\rm max}}}$$
(2.9)

Die Schmierfilmhöhe wird neben der Viskosität η und der axialen Geschwindigkeit u durch den maximalen Pressungsgradienten w_{max} des Dichtrings beeinflusst. Aufgrund

der asymmetrischen Pressungsverteilung eines Dichtrings ist der fluidseitige Pressungsgradient größer als der luftseitige. Bei einer axial-oszillierenden Bewegung kann somit mehr Fluid von der Luft- zu der Fluidseite gelangen als umgekehrt. Daraus resultiert die gewünschte Förderwirkung. Dieser Effekt bildet die Grundlage des Verständnisses von axial bewegten Hydraulikstangendichtungen. Bei einem Elastomer-RWDR kommt es bei Wellenrotation in der Theorie zu keiner axialen Dichtungsbewegung. Wird jedoch der Dichtring leicht verkippt eingebaut oder weist die Wellenachse zur Dichtringachse eine Exzentrizität auf, entsteht eine breitere Laufspur, siehe Abbildung 2.10. Eine Rotation der Welle erzeugt in diesem Fall die benötigte axiale Relativbewegung zwischen Dichtring und Welle.



Abbildung 2.10: Oszillationsprinzip nach [9]

Eine weitere Erhöhung der dynamischen Förderwirkung kann durch Aufbringen von Rückförderstrukturen auf der Luftseite eines RWDR erfolgen. Diese von Jenisch [18] Drallrippen oder Drallstege genannten Strukturen bilden mit der Dichtkante einen Keilspalt, siehe Abbildung 2.11.

Bei Wellenrotation wird Fluid von der Welle in Umfangsrichtung mitgeschleppt. Trifft die Schleppströmung auf eine Rückförderstruktur, wird das Fluid axial in Richtung Dichtkante abgelenkt. Im Keilspalt vor der Dichtkante bildet sich ein hydrodynamischer Druck (siehe Kapitel 2.1.3), welcher die Dichtkante lokal etwas anhebt. Hierdurch kann das abgelenkte Fluid von der Luft- zur Fluidseite strömen.

Die Rückförderstrukturen werden in zwei Kategorien eingeteilt. Diese sind zum einen einseitige Rückförderstrukturen, welche nur in eine Wellendrehrichtung wirken, zum anderen beidseitige Rückförderstrukturen, welche in beide Wellendrehrichtungen aktiv Fluid zurück fördern können. Der Förderwert bei RWDR mit einseitigen Rückförderstrukturen liegt bis zu 100-mal und der von beidseitigen Förderstrukturen um etwa 10-mal höher gegenüber einem RWDR ohne zusätzliche Förderstrukturen.



Abbildung 2.11: Rückförderstrukturen bei RWDR aus Elastomer nach [9]

Werkstoff und Einsatzgrenzen

In den Normen DIN 3760 [14] und DIN 3761 [15] werden vier synthetische Kautschuk-Gruppen für RWDR genannt. Diese sind der Nitril-Kautschuk (NBR), der Acrylat-Kautschuk (ACM), der Silikon-Kautschuk (MVO) und der Fluor-Kautschuk (FKM). Als Standard haben sich dabei die beiden Werkstoffe NBR und FKM etabliert. Die Einsatzgrenzen des Elastomer-RWDR werden hauptsächlich durch den Dichtringwerkstoff erreicht. Ein Einsatz in der chemischen Industrie mit aggressiven Fluiden ist aufgrund der geringen chemischen Beständigkeit der eingesetzten Werkstoffe nicht möglich. Ein weiteres Problem sind die hohen Belastungen des Dichtrings im Betrieb. Neben der Umgebungstemperatur führen hohe Drehzahlen zu hohen Laufgeschwindigkeiten und einer extremen spezifischen Reibleistung im Dichtspalt. Kann diese Reibungswärme nicht schnell genug aus dem Dichtspalt transportiert werden, kommt es zu einer Überhitzung und Ölkohlebildung. Der Werkstoff wird thermisch zerstört, versprödet oder reißt, wodurch es zu einem Versagen des Dichtsystems kommt [22]. Abbildung 2.12 zeigt eine Empfehlung der zulässigen Umfangsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Wellendurchmessern sowie die Einsatzgrenzen der jeweiligen Werkstoffe. Vereinfacht gelten Temperaturen bis 130 °C oder Umfangsgeschwindigkeit bis 30 m/s als Obergrenze für den Einsatz von RWDR aus Elastomer [9]. Werden die Einsatzgrenzen von Elastomer erreicht, muss ein beständigeres Material verwendet werden.



Abbildung 2.12: Empfohlene Einsatzgrenzen für Elastomer-RWDR [9]

2.3 Wellendichtungen aus PTFE

Im Bereich der Dichtungstechnik werden bei hohen Anforderungen an die thermische oder chemische Resistenz Werkstoffe auf Basis von Polytetrafluorethylen als alternativer Dichtungswerkstoff zu Elastomer eingesetzt.

2.3.1 Werkstoff

Das teilkristalline Polymer Polytetrafluorethylen entsteht durch die Polymerisation des Monomers Tetrafluorethylen. Das erzeugte Molekül aus Kohlenstoff- und Fluoratomen weist einen unverzweigten, linearen Aufbau auf und wird den Thermoelastenen zugeordnet, Abbildung 2.13.



Abbildung 2.13: Polymerisation von Tetrafluorethylen zu Polytetrafluorethylen

Nachteile von Polytetrafluorethylen sind die schlechten mechanischen Eigenschaften. Polytetrafluorethylen neigt unter Belastung zum Kriechen (Kaltfließen) und besitzt eine geringe Abriebfestigkeit.

Die sehr gute thermische und chemische Resistenz von Polytetrafluorethylen entsteht durch die hohe Bindungsenergie zwischen dem Kohlenstoff- und den Fluoratomen. Öle, Benzin, Alkohole oder Ketone können Polytetrafluorethylen nicht lösen. Polytetrafluorethylen kann in einem weiten Temperaturbereich von -270 °C bis + 260 °C eingesetzt werden. Weitere Vorteile von Polytetrafluorethylen sind die guten Gleiteigenschaften mit geringen Reibwerten. Aufgrund nahezu identischer Haft- und Gleitreibungswerten besitzt Polytetrafluorethylen eine sehr geringe Stick-Slip Neigung. Tabelle 2.1 fasst die positiven und negativen Eigenschaften von Polytetrafluorethylen zusammen.

	Positiv:		Negativ		
•	weiter Temperaturbereich	•	schlecht bearbeitbar		
٠	hohe chemische Beständigkeit	•	Kriechneigung unter Belastung		
•	sehr gute Gleiteigenschaften	•	geringe Abriebfestigkeit		
•	geringe Stick-Slip Neigung				

 Tabelle 2.1:
 positive und negative Eigenschaften von Polytetrafluorethylen

Durch die positiven Eigenschaften ist Polytetrafluorethylen der ideale Werkstoff für Dichtungen, wenn Elastomere an ihre Einsatzgrenzen stoßen. Aufgrund seiner nachteiligen Eigenschaften wird Polytetrafluorethylen regulär nicht in Reinform, sondern in Verbindung mit Füllstoffen als Compound eingesetzt. Durch die Beimischung geeigneter Füllstoffe können gezielt die Gleiteigenschaften, Abriebfestigkeit, Zugfestigkeit und Kriechneigung optimiert werden. Im Bereich der Dichtungstechnik werden dabei häufig Kohlenstoff, Glas oder Bronze als Partikel oder Fasern beigemischt. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über gängige Füllstoffe, deren Mischungsanteil und Einfluss auf die Eigenschaften des Compounds.

Ein Nachteil von Compoundwerkstoffen auf Basis von Polytetrafluorethylen in der Produktion ist, dass die Werkstoffe trotz Aufschmelzen der kristallinen Struktur nicht fließfähig genug werden, um thermoplastisch verarbeitet werden zu können. [23] Deswegen werden Dichtringe auf Basis von Polytetrafluorethylen nicht gespritzt oder extrudiert. Die Herstellung erfolgt in der Regel durch spanende Bearbeitung von pressgesinterten oder ramextrudierten Halbzeugen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Compoundwerkstoffe auf Basis von Polytetrafluorethylen vereinfacht als PTFE bezeichnet.

Füllstoff	Masseanteil %	Eigenschaft
Clasfacorn	5 bis 40 %	höhere Druck- und Verschleißfestigkeit
Gidsidsern		bessere Wärmeleitfähigkeit
	5 bis 25 %	geringe Deformation unter Last
Kohlenstofffasern		gute Verschleißbeständigkeit
		hohe Wärmeleitfähigkeit
	bis 35 %	hohe Druckfestigkeit und Härte
Kohlenstoffpulver		gute Gleit- und Verschleißbeständigkeit
		gute Wärmeleitfähigkeit
Graphit	bis 15 %	gute Gleiteigenschaft
Graphic		gute Wärmeleitfähigkeit
Molyhdändigulfid	bis 10 %	gute Gleit- und Verschleißfähigkeit
worybuanuisuniu		gute Trockenlaufeigenschaften (mit Bronze)
	bis 20 %	gute Gleit- und Verschleißfestigkeit
Bronzo		besseres Fließverhalten
DI UTIZE		gute Wärmeleitfähigkeit
		hohe Druckfestigkeit

Tabelle 2.2: Eigenschaften unterschiedlicher PTFE Füllstoffe [24]

2.3.2 PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen

Die erste Realisierung einer PTFE-Dichtung von Sekulich [25] in Form eines klassischen Elastomer-RWRD erwies sich als nicht funktionsfähig.

Bis heute wurden unterschiedlichste Bauformen von Wellendichtringen aus PTFE entwickelt. Viele davon wurde im FKM-Forschungsprojekt "PTFE-Dichtungen" [26] untersucht. Dabei zeigte die Manschettenform, deren Geometrie von den ursprünglichen Ledermanschetten abstammt, bei den untersuchten Betriebsbedingungen mit hohen Geschwindigkeiten die beste Funktion [26]. Stand heute ist die Manschettenform die am häufigsten eingesetzte Wellendichtung aus PTFE.

Aufbau und Montage

Ein PTFE-Manschettendichtring besteht meist aus einer PTFE-Dichtlippe, welche zwischen zwei Stahlringe geklemmt wird, Abbildung 2.14. Alternativ kann die PTFE-Dichtlippe auch nach entsprechender Vorbehandlung an einen Versteifungsring angeklebt werden.



Abbildung 2.14: glatter PTFE-Manschettendichtring

Die PTFE-Dichtlippe erhält ihre endgültige Form bei der Montage auf die Welle. Hergestellt wird die PTFE-Dichtlippe meist als einfache Scheibe, deren Innendurchmesser Di kleiner als der Nenndurchmesser Dw der Welle ist. Diese Differenz zwischen Innendurchmesser und Wellendurchmesser wird als Überdeckung bezeichnet. Die Montage erfolgt über einen Montagedorn mit Einfahrschrägen. Durch die Einfahrschrägen wird die PTFE-Dichtlippe umgestülpt und auf den Nenndurchmesser der Welle aufgedehnt, Abbildung 2.15.



Abbildung 2.15: Montage einer PTFE-Manschettendichtung

Statische Dichtheit

Durch das Umstülpen und Aufdehnen während der Dichtungsmontage entstehen Biege- und Umfangsspannungen in der PTFE-Dichtlippe, welche die PTFE-Dichtlippe auf die Welle pressen. Die Gesamtheit der im Kontaktbereich wirkenden Pressung zwischen PTFE-Dichtlippe und Welle wird als Radialkraft bezeichnet. Die Radialkraft sorgt für die statische Dichtheit, indem sämtliche Kanäle im Dichtspalt durch die Anpressung der PTFE-Dichtlippe verschlossen werden.

PTFE-Compounds sind im Vergleich zu Elastomeren steif und besitzen eine raue Oberfläche. Ferner zeigen Beobachtungen von Haiser [27] ein schnelleres Verschleißen der PTFE-Matrix im Betrieb, wodurch die Füllstoffe weiter herausstehen, Abbildung 2.16. Hierdurch liegt die PTFE-Dichtlippe mit den Füllstoffen auf der Welle auf und potentielle Leckagekanäle entstehen. Aufgrund dessen benötigt eine PTFE-Manschettendichtung im Gegensatz zum Elastomer-RWDR eine vielfach höhere Radialkraft um diese Kanäle zu schließen und statische Dichtheit zu erreichen.



Abbildung 2.16: Oberfläche eines PTFE-Compounds [27]

Dynamische Dichtheit

PTFE-Manschettendichtungen ohne zusätzliche Rückförderstrukturen werden auch als glatte PTFE-Manschettendichtungen bezeichnet.

Im Gegensatz zum Elastomer-RWDR bildet eine glatte PTFE-Manschettendichtung selbständig keinen aktiven Rückfördermechanismus aus [28]. Ohne aktiven Rückfördermechanismus kann bei rotierender Welle keine sichere Dichtwirkung erreicht werden [29]. Glatte PTFE-Manschettendichtungen neigen deshalb im Betrieb teilweise unvorhersehbar zu erhöhter Leckage. Hoffmann [30] führte dieses Verhalten auf Partikel zurück, welche den Dichtspalt örtlich vergrößern und zu einer erhöhten Leckage führen. Des Weiteren zeigen glatte PTFE-Manschettendichtungen meist einen sprunghaften Anstieg der Leckagemenge ab einer bestimmten Drehzahl [26]. Gölz [31] bezeichnete diese Geschwindigkeit als "kritische Geschwindigkeit" und begründet die erhöhte Leckage durch ein hydrodynamisches Aufschwimmen des Dichtrings.

Glatte PTFE-Manschettendichtungen wirken somit lediglich als Drossel und können keine vollständige dynamische Dichtheit garantieren.

2.3.3 PTFE-Manschetten mit Spiralrille

Um bei PTFE-Manschettendichtungen dynamische Dichtheit zu erreichen, wird ein aktiver Rückfördermechanismus benötigt. Hierzu werden Rückförderstrukturen im Dichtkontakt eingesetzt. Diese Rückförderstrukturen fördern austretendes Fluid in Richtung abzudichtenden Raum zurück, bevor das Fluid als Leckage aus dem Dichtspalt austreten kann. Die am häufigsten eingesetzte Rückförderstruktur bei PTFE-Manschettendichtungen ist die Spiralrille, welche in die PTFE-Manschette eingeschnitten oder eingeprägt wird, Abbildung 2.17.



Abbildung 2.17: PTFE-Manschette mit Spiralrille

Dreht sich die Welle wird stets Fluid in Umfangsrichtung mitgeschleppt. Trifft das mitgeschleppte Fluid auf die Rückförderstruktur, so bildet sich dort ein Schleppdruck aus. Das Fluid weicht infolgedessen seitlich diesem Druckanstieg aus. Durch die Steigung der Spiralrille wird die Richtung, in die das Fluid ausweicht, vorgegeben und der Fluidstrom gezielt axial umgelenkt. Hierdurch kann Fluid entsprechend einer Gewindewellendichtung in den abzudichtenden Raum zurück gefördert werden. Diese Rückförderfähigkeit ermöglicht ein sehr gutes, dynamisches Abdichtvermögen in eine Drehrichtung.

Die dynamische Funktion und Zuverlässigkeit durch die hohe Rückförderfähigkeit von PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten untersucht und bestätigt [18], [30], [32]-[36]. Eine mögliche Gefahr für die Betriebssicherheit von PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille stellt die Ölkohlebildung durch hohe Temperaturen im Dichtspalt dar [22], [37]. Setzt sich Ölkohle in der Spiralrille ab, verschlechtert sich die Rückförderfähigkeit. Dies kann zum Versagen des Dichtrings führen. Der guten dynamischen Dichtheit der Spiralrille steht die unzureichende statische Dichtheit bei (Teil-) Überflutung als Nachteil gegenüber. Grund hierfür ist der Kanal der Spiralrille, welcher bei Wellenstillstand zu Leckage führt [28], [29]. Bauer [36] beobachtet dabei ein Fortschreiten der Flüssigkeit auch über den Flüssigkeitsspiegel hinweg. Zurückzuführen ist dies auf Kapillarkräfte, welche die Flüssigkeit in die engen Kanäle der Spiralrille ziehen. Deswegen können PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille nicht in gefluteten oder teilweise gefluteten Anwendungen eingesetzt werden.

2.3.4 PTFE-Manschetten mit erhabenen Rückförderstrukturen

Eine Verbesserung der statischen Dichtheit bei PTFE-Manschettendichtung mit geprägter Spiralrille soll durch das Verschließen der Spiralrille an ein oder mehreren Stellen erzielt werden. Die Unterbrechungen in der Spiralrille werden Dichtstege genannt. Die Dichtstege sollen neben der statischen Flüssigkeitsdichtheit auch die Luftabdichtfähigkeit erhöhen [38]. Hierdurch soll die Durchführung eines Kalttests (Luftleckagetest) am Ende einer Montagelinie zur Überprüfung einer korrekten Montage ermöglicht werden.

Statische Dichtheitsuntersuchungen von Bauer [36] zeigen, dass die Dichtstege in einer Spiralrille einen negativen Einfluss auf die statische Dichtheit haben. In Abbildung 2.18 ist das zeitliche Eindringen von Öl in eine geprägte Spiralrille bei Wellenstillstand dargestellt. Anstatt am Dichtsteg zu stoppen, fließt das Öl axial über den Dichtsteg in den nächsten Gewindegang und beschleunigt so das Austreten von Leckage. Grund hierfür ist die Kapillarbrücke, welche durch den Dichtsteg gebildet wird.



Abbildung 2.18: Benetzung einer Spiralrille mit Dichtsteg bei Wellenstillstand [36]

Bauer [36] empfiehlt für eine deutliche Verbesserung der statischen Dichtheit einen geschlossenen, erhabenen Ring auf der Fluidseite der Spiralrille. Diese optimierte PTFE-Manschettendichtung ist in Abbildung 2.19 schematisch (vor dem Umstülpen) und im Querschnitt (Harzeinguss) abgebildet.



Abbildung 2.19: Spiralrille mit geschlossenem Ring von Bauer [36]

Für eine gute Funktion sind schmale Dämme mit glatten Oberflächen sowie tiefe und breite Rillenquerschnitte von Vorteil [36]. Hierdurch wird eine Stop Groove (siehe Kapitel 2.1.1) gebildet. Ein Fortschreiten des Fluids aufgrund von Kapillarkräften unter dem geschlossenen Ring hindurch soll so durch die Oberflächenspannung unterbunden werden.

Eine Problematik bei diesem Ansatz stellt der von Kletschkowski [39] als "Glockenmäulchen" beschriebenen Effekt bei PTFE-Manschettendichtungen dar, welcher zu einem fluidseitigen Abheben der Manschette führt. Grund für das Auftreten des Glockenmäulcheneffekts sind interne Spannungen in der Manschette, welche durch plastische Verformungen während des Montagevorgangs entstehen. Das fluidseitige Abheben der Manschette führt zu einer Verschlechterung der statischen Dichtheit durch Verringerung der Kontaktpressung des geschlossenen Rings auf der Welle. Bauer eliminierte das Abheben durch eine lokale Verdickung der Manschette auf der Fluidseite. Die PTFE-Manschette mit Spiralrille und geschlossenem Ring erweitert den bisherigen Einsatzbereich eines Manschettendichtrings mit Spiralrille deutlich. Eine vollständige statische und dynamische Dichtheit konnte von Bauer experimentell jedoch nicht erzielt werden.

Rückförderstrukturen für beide Wellendrehrichtungen

Die bisher vorgestellten PTFE-Manschettendichtungen mit Förderstrukturen wurden für den Betrieb in eine Drehrichtung entwickelt. Bei umgekehrter Drehrichtung wirkt der Fördermechanismus entgegengesetzt, wodurch aktiv Fluid in die Umgebung gefördert wird. Hierdurch ist der Einsatzbereich dieser Dichtungen stark eingeschränkt. Aus diesem Grund sind PTFE-Manschettendichtungen für beide Drehrichtungen erstrebenswert, welche auch als bidirektional oder doppeltwirkend bezeichnet werden.

Über PTFE-Manschettendichtungen mit bidirektionalen Rückförderstrukturen sind nur wenige dokumentierte Arbeiten verfügbar. Am häufigsten zu finden sind solche Dichtungen in Patentschriften, welche die Funktionsmechanismen nicht weiter erläutern [40]-[51].

Hoffmann [30] analysierte erstmals die Funktion von bogenförmigen und dreiecksförmigen, vertieften Rückförderstrukturen für den bidirektionalen Einsatz. Diese Förderstrukturen zeigten experimentell einen aktiven Rückfördermechanismus, wenn ihnen luftseitig Öl zur Verfügung gestellt wurde. Das Rückfördervermögen war dabei vergleichbar mit dem Rückfördervermögen einer Spiralrille. Trotz verifiziertem Rückfördermechanismus konnte Hoffmann keine dynamische Dichtheit mit bidirektionalen Rückförderstrukturen erzielen.

Gölz und Goujavin bearbeiteten zwei Forschungsprojekte im Bereich PTFE-Manschettendichtungen mit bidirektionalen Rückförderstrukturen [26], [52]. Goujavin [53] beschäftigte sich dabei simulativ und Gölz [31] experimentell mit der Funktionsweise und Entwicklung von bidirektionalen Rückförderstrukturen. Untersucht wurden unterschiedliche erhabene Rückförderstrukturen, welche mit einem ölseitigen, geschlossenen Ring einen doppelt konvergenten Spalt bilden. Alle untersuchten Varianten zeigten Leckage im Betrieb [31]. Statische und dynamische Dichtheit konnte von Gölz [31] erst durch einen zusätzlichen geschlossenen Ring auf der Luftseite erzielt werden, Abbildung 2.20.



Abbildung 2.20: bidirektionale PTFE-Manschettendichtung nach Gölz [31]

Robustheit

PTFE-Manschettendichtungen mit bidirektionalen Rückförderstrukturen können durch einen zweiten geschlossenen Ring auf der Luftseite statische und dynamische

Dichtheit erreichen [31]. Trotz dieser Erkenntnis sind bis heute keine solcher Dichtringe auf dem Markt verfügbar. Ein Grund hierfür ist die geringe Robustheit von PTFE-Manschettendichtungen mit Rückförderstrukturen für den statischen und dynamischen Einsatz. Hervorgerufen wird dies durch das steife PTFE-Compound, welches eine hohe Maßhaltigkeit der Dichtung und somit sehr geringe Fertigungs- und Montagetoleranzen voraussetzt. Bereits kleine Abweichungen im Fertigungs- oder Montageprozess beeinflussen die korrekte Anlage der Manschette auf der Welle und beeinflussen das Abdichtverhalten negativ. Dieses Verhalten trat auch bei den von Gölz [31] untersuchten bidirektionalen PTFE-Manschetten auf, deren Rückförderstrukturen nicht immer ideal auf der Welle auflagen, Abbildung 2.21. In den Arbeiten von Bauer [36] zeigte sich die Problematik in Form des Glockenmäulcheneffekts, welcher je nach Montageprozess unterschiedlich stark auftreten kann. Für einen erfolgreichen Einsatz dieser Dichtungen im Markt wird ein robuster Ansatz benötigt, welcher größere Fertigungs- und Montagetoleranzen erlaubt.



Abbildung 2.21: Harzeinguss einer abhebenden Rückförderstruktur [31]

Manschettendichtungen aus Elastomer

Neben PTFE werden heutzutage auch Manschettendichtungen aus Elastomer hergestellt und eingesetzt. Solche Elastomer-Manschettendichtungen zeichnen sich in der Regel durch sehr geringe Radialkräfte aus. Der Vorteil von Elastomer-Manschettendichtungen sind die daraus resultierenden, niedrigen Reibungsverluste. Deshalb werden sie bevorzugt zur Steigerung des Wirkungsgrads und der Energieeffizienz einer Maschine anstelle von klassischen Elastomer-RWDR eingesetzt. Gegenüber PTFE-Manschettendichtungen besitzen Elastomer-Manschettendichtungen eine geringere thermische und chemische Resistenz, weshalb diese Dichtringe in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

3 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Ausgehend von den Grundlagen der Dichtungstechnik und dem vorgestellten Stand der Technik wird im Folgenden die Problemstellung zusammengefasst und die Zielsetzung der Arbeit definiert.

3.1 Problemstellung

Die Anforderungen an Leistung und Wirkungsgrad im Anlagen- und Maschinenbau steigen stetig. Der Trend geht zu höheren Drehzahlen bei kleineren Wellendurchmessern. Hierdurch kommt es bei tribologischen Systemen zu höheren Reibverlusten und einer schlechteren Wärmeabfuhr. Deutlich höhere Temperaturen im Reibkontakt sind die Folge.

Zur Abdichtung von Wellenaustrittstellen werden in der Regel Elastomer-RWDR eingesetzt. Elastomer-RWDR zeichnen sich durch ihr sehr gutes statisches und dynamisches Abdichtvermögen aus. Grund hierfür ist der dynamische Rückfördermechanismus, welchen die Dichtringe aus Elastomer bei korrekter Auslegung selbständig erzeugen. Erfolgt eine Abdichtung bei hohen Temperaturen oder gegen chemisch aggressive Fluide, werden die Einsatzgrenzen von Elastomer-RWDR überschritten.

Zur erfolgreichen Abdichtung bei diesen Bedingungen muss ein beständigeres Material für das Dichtelement eingesetzt werden. In der Regel wird hierbei PTFE aufgrund seiner hervorragenden thermischen und chemischen Resistenz gewählt. Dichtringe aus PTFE werden als Manschetten gefertigt, welche ihre endgültige Form erst bei der Montage auf die Welle erhalten. PTFE-Manschettendichtungen haben gegenüber Elastomer-RWDR einen entscheidenden Nachteil. Eine PTFE-Manschettendichtung ohne zusätzliche Rückförderstrukturen kann selbständig keinen Rückfördermechanismus erzeugen. Deshalb sind PTFE-Manschettendichtungen ohne Rückförderstrukturen dynamisch nicht vollständig dicht.

Um bei PTFE-Manschettendichtungen dynamische Dichtheit zu erreichen, werden Rückförderstrukturen im Dichtkontakt eingebracht. Die am meisten eingesetzte Rückförderstruktur ist dabei die Spiralrille, welche in eine Manschette geschnitten oder eingeprägt wird. Dreht sich die Welle, kann austretendes Fluid entsprechend einer Gewindewellendichtung zurück gefördert werden. Diese Rückförderfähigkeit ermöglicht ein sehr gutes, dynamisches Abdichtvermögen in eine Drehrichtung. Der Nachteil einer PTFE-Manschettendichtung ist die fehlende statische Dichtheit. Grund hierfür ist der Kanal der Spiralrille, welcher bei Wellenstillstand zu Leckage führt. Deswegen können PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille nicht in gefluteten oder teilweise gefluteten Anwendungen eingesetzt werden.

Eine verbesserte statische Dichtheit kann durch den Einsatz eines erhabenen, geschlossenen Rings auf der Fluidseite vor der Spiralrille oder durch umlaufende Rückförderstrukturen im Dichtkontakt erreicht werden. Diese statisch und dynamisch dichte PTFE-Manschettendichtungen mit Rückförderstrukturen werden bisher jedoch nur selten eingesetzt. Ursache hierfür ist die mangelnde Robustheit und damit die Zuverlässigkeit der Dichtungen. Bereits kleine Abweichung durch Fertigungs- oder Montagetoleranzen können zu einer fehlerhaften Anlage der Dichtung auf der Welle führen. Eine zuverlässige statische und dynamische Dichtwirkung ist in diesem Fall nicht mehr gewährleistet.

3.2 Zielsetzung

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen Dichtung, welche folgende Eigenschaften in sich vereint:

- statische Dichtheit
- dynamische Dichtheit
- thermische und chemische Resistenz
- Robustheit gegenüber Fertigungs- und Montagetoleranzen

Erreicht werden sollen diese Eigenschaften durch eine neue Herangehensweise, bei der die Steifigkeit des Dichtrings lokal beeinflusst wird. Hierzu sollen makroskopische Strukturen, im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, nicht innerhalb, sondern außerhalb des Dichtspalts fertigungstechnisch ein- oder aufgebracht werden. Ziel ist es, dass die Dichtung durch den Steifigkeitsverlauf und die Verformung bei der Montage selbständig feine, flach verlaufende Förderstrukturen im Dichtspalt ausbildet. Diese flachen Förderstrukturen sollen gegenüber bisherigen Förderstrukturen hydrodynamisch wirksamer sein und aufgrund der Steifigkeitsunterschiede nicht verschleißen.

Die Vision ist eine neue Wellendichtung zu erhalten, welche nahezu unabhängig von den Einsatzbedingungen eingesetzt werden kann. Hierdurch soll eine Falschauswahl ausgeschlossen und den steigenden Ansprüchen an Dichtungen entsprochen werden.

\setminus		PTFE-Manschette			
Dichtung	Elastomer- RWDR	glatt	Spiralrille	erhabene Rückförder- strukturen	Ziel
Eigenschaft					
statische Dichtheit	+	+	0	+	+
dynamische Dichtheit	+	-	+	+	+
thermische / chemische Resistenz	-	+	+	+	+
Robustheit / Zuverlässig- keit	+	+	+	-	+

Abbildung 3.1: Vor- und Nachteile bestehender Dichtungen und Zielsetzung der Neuentwicklung

4 Neues Dichtungskonzept

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen Dichtung, welche die Vorteile bestehender Wellendichtungen in sich vereint. Da dieses Ziel mit bisherigen Ansätzen nicht erreicht werden konnte, bedarf es einer völlig neuen Herangehensweise. In diesem Kapitel wird die Grundidee für die Entwicklung der neuen Dichtung sowie das neue Arbeitsprinzip vorgestellt.

4.1 Grundidee

Für die Entwicklung der neuen Dichtung wird bereits bekanntes Wissen bestehender Dichtungen und Ansätze genutzt.

4.1.1 Chemische und thermische Resistenz

Zur Erreichung einer resistenten Dichtung hat sich die Verwendung von PTFE als Dichtungsmaterial etabliert. Durch die starke Bindungsenergie zwischen den Kohlenstoff- und Fluoratomen ist PTFE chemisch sehr beständig. Ein weiterer Vorteil von PTFE ist der große Temperaturbereich. Somit wird für die neue Dichtung PTFE als Dichtungsmaterial festgelegt.

4.1.2 Statische Dichtheit

Die einfachste Variante einer Wellendichtung aus PTFE ist die Manschette. Die Manschettendichtung wird als eine flache Scheibe gefertigt, welche einen kleineren Innendurchmesser als der Wellendurchmesser aufweist. Ihre eigentliche Form erhält die Manschettendichtung erst bei der Montage auf die Welle. Während des Montageprozesses wird die Manschette umgestülpt und auf Wellenmaß aufgeweitet, siehe Abbildung 4.1. Bei einer glatten PTFE-Manschette ohne Rückförderstrukturen wird dabei eine umlaufende Pressungslinie im glatten Dichtkontakt erzeugt. Diese umlaufende Pressungslinie verhilft der glatten PTFE-Manschettendichtung zu einer guten statischen Dichtheit.

Die glatte PTFE-Manschette ohne Rückförderstrukturen wird als Grundlage für die neue Dichtung gewählt. Grund hierfür ist die einfache Herstellung sowie die zuverlässige, statische Dichtheit durch den glatten Dichtkontakt.





4.1.3 Dynamische Dichtheit

Ausgangslage für die neue Dichtung ist eine glatte PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen. Diese weist bereits eine hohe chemische und thermische Resistenz und eine gute statische Dichtheit auf.

Der Nachteil der glatten PTFE-Manschettendichtung ist der fehlende Rückfördermechanismus. Ohne aktiven Rückfördermechanismus kann bei einer Wellendichtung keine zuverlässige dynamische Dichtwirkung erzielt werden (s. Kapitel 2.2.2). Bestehende Ansätze lösen diese Problematik durch Einbringen von erhabenen Rückförderstrukturen im Dichtkontakt. Solche Strukturen im Dichtkontakt sind bei der neuen Dichtung nicht möglich. Grund hierfür ist die Vorgabe des glatten und somit unstrukturierten Dichtkontakts entsprechend einer glatten PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen.

4.1.4 Neuer Ansatz

Aufgrund der Vorgabe keine Rückförderstrukturen in den Dichtkontakt einzubringen, bedarf es eines neuen Ansatzes um einen aktiven Rückfördermechanismus für dynamische Dichtheit zu erzeugen. Die Idee von Hörl, Dakov und Stoll entstand 2016 am IMA und wurde im selben Jahr national und 2017 international von der Universität Stuttgart zum Patent angemeldet [78], [79].

Die neue Grundidee besteht darin, durch lokale Beeinflussung der Steifigkeit eines Bauteils und anschließender Dehnung die entstehende, ungleichmäßige Einschnürung des Materials zu nutzen. Mit Hilfe von grob gefertigten Strukturen können durch die Einschnürung deutlich feinere Strukturen erzeugt werden.

Übertragen auf die Dichtungstechnik zeigt sich die Innovation in der Positionierung der Strukturen. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen sollen die gefertigten Strukturen nicht innerhalb des Dichtspalt, sondern auf der Rückseite der PTFE-Manschette auf- oder eingebracht werden, siehe Abbildung 4.2.

Ziel ist es, durch makroskopische Rückenstrukturen die Kontaktpressungsverteilung im glatten Dichtkontakt zu beeinflussen. Hierdurch sollen mikroskopische Rückförderstrukturen generiert werden, welche den benötigten Rückfördermechanismus für dynamische Dichtheit erzeugen. Die mikroskopischen Rückförderstrukturen sollen dabei von der Dichtung bei der Montage durch die Einschnürung selbst erzeugt werden. Aus hydrodynamischer Sicht sind niedrige Rückförderstrukturen besonders vorteilhaft zum Erzeugen eines aktiven Rückfördermechanismus (siehe Kapitel 2.1.3). Deshalb sollte die neue Dichtung gegenüber bisherigen PTFE-Manschetten mit erhabenen Rückförderstrukturen dynamisch überlegen sein.

Infolge der makroskopischen Rückenstrukturen bleiben die Steifigkeitsunterschiede der PTFE-Manschette und somit die mikroskopischen Rückförderstrukturen auch bei einem Verschleißen der Manschette erhalten. Der selbständig erzeugte Rückfördermechanismus sollte daher verschleiß- und dauerfest sein.



Abbildung 4.2: neue PTFE-Manschettendichtung mit Strukturen auf der Rückseite

Aufgrund der Strukturen auf der Rückseite wird der Dichtring als rückenstrukturierter Dichtring (englisch Back-Structured Shaft Seal, Kurzform: B3S) bezeichnet. Tabelle 4.1 fasst die wesentlichen Lösungsmerkmale des neuen, rückenstrukturierten Dichtrings zur Erreichung der gewünschten Dichtungseigenschaften zusammen.

Eigenschaft	Lösung
chem. und therm. Resistenz	Einsatz von PTFE als Dichtungsmaterial
statische Dichtheit	glatter Kontaktbereich zwischen Welle und Dichtelement ent- sprechend einer einfachen, glatten PTFE- Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen
dynamische Dichtheit	neuer Ansatz zur Generierung eines selbsterzeugten Rückför- dermechanismus: Beeinflussung der Manschettensteifig- keit/Kontaktpressung durch Strukturen auf der Rückseite

Tabelle 4.1: Lösungsmerkmale des neuen, rückenstrukturierten Dichtrings

4.2 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip der neuen Dichtung basiert auf gezielten Steifigkeitsveränderungen der PTFE-Manschette. Hierdurch soll die Kontaktpressungsverteilung zwischen PTFE-Manschette und Welle beeinflusst werden.

4.2.1 Dehnung einer Manschette

Grundlage der Kontaktpressung der PTFE-Manschette auf die Welle ist die elastischplastische Verformung während des Montagevorgangs. Eine PTFE-Manschettendichtung wird als einfache Scheibe mit geringerem Innendurchmesser als der Wellendurchmesser gefertigt. Bei der Montage der PTFE-Manschettendichtung kommt es zu einer Biegung und Aufweitung des Materials. Durch die Biegung wird das Material in axialer und radialer Richtung und durch das Aufweiten hauptsächlich in Umfangsrichtung gedehnt. Dehnungen in axialer und radialer Richtung treten an der Manschetteneinspannung und im Bereich der Biegelinie auf. Die Dehnungen in Umfangsrichtung sind am Manschetteninnendurchmesser am größten und nehmen in Richtung Manschetteneinspannung stetig ab. Grund hierfür ist die ursprüngliche flache Scheibenform der Manschette. Je geringer der ursprüngliche Innendurchmesser, desto größer ist die notwendige Dehnung um die Manschette auf den Wellendurchmesser aufzuweiten. Abbildung 4.3 zeigt den prozentualen Verlauf der Umfangsdehnung bei einer glatten PTFE-Manschettendichtung im montierten Zustand. In der Abbildung ist auch das fluidseitige Abheben der Manschette durch den Glockenmäulcheneffekt (siehe Kapitel 2.3.4) erkennbar.



Abbildung 4.3: abnehmende Dehnung der PTFE-Manschette in Umfangsrichtung

Durch die Montage der Manschette auf die Welle wird die Kontaktpressung im Dichtspalt zwischen der Manschette und der Welle erzeugt. Die Kraft, mit der die Manschette auf die Welle drückt, wird als Radialkraft bezeichnet. Die Radialkraft setzt sich aus der Spannung durch das Aufweiten und durch das Biegen zusammen. Bei den in dieser Arbeit untersuchten glatten PTFE-Manschetten für einen Wellendurchmesser von 80 mm beträgt die Radialkraft nach der Montage bei Raumtemperatur etwa 150 N. Während der Prüfstandsuntersuchungen sinkt die Radialkraft durch Relaxation und Kriechen ab. Nach den Untersuchungen beträgt die Radialkraft etwa 50 % des Neuzustands.

4.2.2 Rechteckige Zugprobe

Die dominante Größe im Bereich des Dichtkontakts einer PTFE-Manschettendichtung ist eine Dehnung in Umfangsrichtung. Die Erklärung des Funktionsprinzips einer rückenstrukturierten PTFE-Manschettendichtung kann somit vereinfacht anhand einer rechteckigen Zugprobe erfolgen.

Wird eine Zugprobe gedehnt, so kommt es durch die Querkontraktion zu einer gleichmäßigen Einschnürung der Probe. Wird nun an einer Stelle des Zugstabs Material entfernt, verringert sich dort die Steifigkeit. Bei erneuter Dehnung der Zugprobe konzentriert sich die Dehnung und folglich die Querkontraktion auf den Bereich mit der geringeren Steifigkeit. Die resultierende Einschnürung ist für den eindimensionalen Fall in Abbildung 4.4 dargestellt.



Abbildung 4.4: eindimensionale Verformung einer Zugprobe

Im Folgenden wird die Betrachtung auf den dreidimensionalen Fall ausgeweitet. In Abbildung 4.5 sind drei unterschiedliche Zugproben abgebildet. Die erste Zugprobe ist unstrukturiert, die zweite Zugprobe weist Strukturen in Belastungsrichtung und die dritte Zugprobe schräge Strukturen auf. Die unstrukturierte Zugprobe verformt sich bei einer Belastung gleichmäßig über die gesamte Länge der Probe. Bei beiden strukturierten Zugproben zeigen sich mehrere Bereiche mit einer lokalen Einschnürung. Diese entsprechen in ihrer Anzahl der Zahl der eingebrachten Strukturen. Wie auch in der eindimensionalen Betrachtung, konzentrieren sich die Verformungen durch die Einschnürungen in den Bereichen, in denen die Steifigkeit der Proben verringert ist. Neben der Anzahl an lokalen Einschnürungen kann auch die Ausrichtung der Einschnürung beeinflusst werden. Strukturen in Belastungsrichtung führen zu Einschnürungen in Belastungsrichtung. Werden schräge Strukturen auf die Probe aufgebracht erzeugt dies schräg gerichtete Einschnürungen.

Das Beispiel der Zugprobe zeigt, wie die Kontaktpressung der neuen Dichtung beeinflusst werden kann. In Bereichen, in denen weniger Kontaktpressung gewünscht ist, wird auf der Rückseite der PTFE-Manschette Material entfernt. Hierdurch wird die Steifigkeit der Manschette reduziert, wodurch es zu einer an dieser Stelle höheren Dehnung des Materials bei der Montage kommt. In Bereichen mit erhöhter Dehnung kommt es zu einer stärkeren Einschnürung. Folglich sinkt dort die Kontaktpressung zwischen Welle und Manschette ab und Förderstrukturen entstehen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich Strukturen durch Materialabtrag betrachtet. Grund hierfür ist die einfachere Fertigung der Dichtungen. Eine Beeinflussung der Kontaktpressung ist (reziprok) auch durch Materialauftrag machbar.



Abbildung 4.5: Verformung einer un-, längs- und schrägstrukturierten Zugprobe nach [77]

4.3 Rückfördermechanismus

In Abbildung 4.6 ist ein Ausschnitt einer einfachen PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen in einer Explosionsansicht dargestellt. Auf der Welle ist der Kontaktbereich zwischen Manschette und Welle grau eingefärbt. Dieser Kontaktbereich entspricht bei einer glatten PTFE-Manschette ohne Rückförderstrukturen einer umlaufenden Linie. Der Kontaktbereich verhindert bei Wellenstillstand ein Austreten von Fluid. Dreht sich die Welle, wird Fluid von der Welle mitgeschleppt. Hierdurch wird stets auch Fluid in den Kontaktbereich transportiert. Ohne Rückfördermechanismus kann dieses Fluid nicht mehr zurückgepumpt werden. Sammelt sich genügend Fluid an, tritt dieses zwangsläufig als Leckage auf der Luftseite aus. Aufgrund des fehlenden Rückfördermechanismus weist eine glatte PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen dynamisch Leckage auf.

Die neue PTFE-Manschettendichtung soll auf der Rückseite der Manschette strukturiert werden, indem dort Material entfernt wird. Die Strukturen werden dabei schräg zum Wellenumfang aufgebracht.



Abbildung 4.6: Kontaktbereich und Fluidströmung an einer glatten PTFE-Manschettendichtung

Ziel ist es, durch die gezielten Steifigkeitsveränderungen den in Abbildung 4.7 dargestellten Kontaktbereich zu erhalten. Dieser setzt sich aus einem geschlossenen, linienförmigen Kontakt sowie einzelnen schräg gerichteten Bereichen zusammen. Der geschlossene Kontaktbereich soll ein Austreten von Fluid bei Wellenstillstand entsprechend einer glatten PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen gewährleisten. Dreht sich die Welle, so wird Fluid in Umfangsrichtung von der Welle mitgeschleppt und kann in den Kontaktbereich gelangen. Um dynamische Dichtheit zu erzielen, muss dieses Fluid aktiv zurück gefördert werden.

Aufgrund der Schleppströmung der Welle fließt das Fluid im Dichtspalt hauptsächlich in Umfangsrichtung. Trifft diese Schleppströmung auf einen Kontaktbereich, so bildet sich vor dem Kontaktbereich ein hydrodynamischer Druck (siehe Kapitel 2.1.3). Die Strömungsrichtung des Fluids wird durch den Druckanstieg axial abgelenkt. Durch eine schräge Anordnung des Kontaktbereichs kann die Richtung, in die die Strömung abgelenkt wird, gezielt beeinflusst werden. Diese axiale Ablenkung erfolgt entsprechend der Anzahl der eingebrachten Strukturen an jeder einzelnen, schrägen Kontaktstelle. Somit wird eine kontinuierliche Rückförderung in Richtung Fluidseite erzielt.



Durch den geschlossenen Kontaktbereich und den aktiven Rückfördermechanismus soll bei der neuen Dichtung statische und dynamische Dichtheit erzielt werden.

Abbildung 4.7: Kontaktbereich und Fluidströmung an einer rückenstrukturierten PTFE-Manschettendichtung

4.4 Prototyp

Mit Hilfe des neuen Ansatzes wurden Rückenstrukturen für die ersten Prototypen festgelegt. Die Geometrie der Rückenstrukturen des Prototyps ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

Auf der Rückseite der Prototypen werden am Umfang verteilt 60 Strukturen mit einer Tiefe von etwa 0,4 mm eingebracht. Die Tiefe entspricht somit 50 % der Manschettendicke von 0,8 mm. Die eingebrachten Rückenstrukturen sind schräg zur Umfangsrichtung angeordnet, um den benötigten dynamischen Rückfördermechanismus zu erzeugen. Entsprechend den Simulationsergebnissen von Baitinger [72] wird eine Schrägstellung von etwa 20° für eine optimale Förderwirkung angestrebt.



Abbildung 4.8: Prototyp Geometrie

Die Strukturen sind bogenförmig ausgeführt. Die Bogenform wirkt dabei der im montierten Zustand gebogenen Manschettenform entgegen. Hierdurch soll ein möglichst geradliniger Verlauf der schräggestellten Pressungsverteilung erzielt werden.

Durch die sichelförmig spitz zulaufende Struktur soll der Einfluss der Rückenstruktur auf die Pressung in Richtung Fluidseite verringert werden. Hierdurch soll ein geschlossener Kontaktbereich entsprechend Abbildung 4.7 erhalten bleiben.

Abbildung 4.9 zeigt den fluidseitigen Blick auf zwei mögliche Varianten des Prototypen. Entsprechend der Schrägstellung der Strukturen ist der linke Dichtring für einen Betrieb im Linkslauf und der rechte Dichtring für einen Betrieb im Rechtslauf ausgelegt. Der Schnitt des rechten Dichtrings ermöglicht einen Blick auf die Aufnahme der rückenstrukturierten PTFE-Manschette sowie die eingebrachten Strukturen.

Im Folgenden werden diese PTFE-Manschetten mit sichelförmigen Rückenstrukturen vereinfacht als Prototyp bezeichnet.



Abbildung 4.9: montierter Prototyp (rechts als Schnittansicht)

4.5 Zusammenfassung des neuen Prototyps

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen Dichtung, welche statische und dynamische Dichtheit sowie thermische und chemische Resistenz in einem robusten und zuverlässigen Design vereint.

Grundlage für die neue Dichtung ist eine glatte PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen. Diese weist bereits eine hohe chemische und thermische Resistenz und eine gute statische Dichtheit auf. Zur Erreichung dynamischer Dichtheit wird ein aktiver Rückfördermechanismus benötigt, welcher von bestehenden Ansätzen durch erhabene Rückförderstrukturen im Dichtkontakt erzielt wird. Um die statische Dichtheit der glatten PTFE-Manschette zu erhalten, soll der Dichtkontakt der neuen Dichtung jedoch nicht beeinträchtigt werden. Um dennoch den benötigten Rückfördermechanismus zu erzeugen, wird in dieser Arbeit ein neuer Ansatz zum dynamischen Abdichten verfolgt.

Die Grundidee besteht darin, durch lokale Beeinflussung der Steifigkeit eines Bauteils und anschließender Dehnung die entstehende, ungleichmäßige Einschnürung des Materials zu nutzen. Mit Hilfe von grob gefertigten Strukturen können durch die Einschnürung deutlich feinere Strukturen erzeugt werden. Die feinen Strukturen bleiben auch bei einem Verschleißen des Materials erhalten.

Bezogen auf die neue Dichtung zeigt sich die Umsetzung der Grundidee in der Positionierung der Strukturen. Diese werden im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen auf der Rückseite der PTFE-Manschette eingebracht. Ziel ist es, durch gezielte Steifigkeitsänderungen die Kontaktpressungsverteilung im glatten Dichtkontakt zu beeinflussen. Hierdurch sollen selbständig mikroskopische Rückförderstrukturen generiert werden, welche einen besonders wirksamen und verschleißfesten Rückfördermechanismus erzeugen.

Entsprechend des neuen Dichtungskonzepts wurde ein Prototyp mit 60 sichelförmigen Rückenstrukturen auf der ansonsten glatten PTFE-Manschette entwickelt. Durch die Rückenstrukturen soll sich die Dehnung bei der Montage des Prototyps in Bereichen konzentrieren, in denen die Manschette auf der Rückseite strukturiert wurde. Hierdurch soll eine schräg gerichtete Kontaktpressungsverteilung entstehen, welche einen zuverlässigen Rückfördermechanismus bei gleichzeitiger statischer Dichtheit erzeugt.

5 Untersuchungseinrichtungen

In diesem Kapitel werden die verwendeten Untersuchungseinrichtungen vorgestellt. Diese sind ein Radialkraftmessgerät zur Erfassung der Kraft mit der sich der Dichtring auf die Welle presst sowie diverse optische Messgeräte, welche zur Untersuchung der Dichtringe benötigt werden. Des Weiteren werden die Prüfstände für die eingesetzten statischen und dynamischen Untersuchungen sowie der zur Fertigung eingesetzte Schneid- und Gravierlaser vorgestellt.

5.1 Messgeräte

Im Folgenden werden die Messgeräte vorgestellt, welche für die experimentellen Untersuchungen eingesetzt werden.

5.1.1 Radialkraft

Die Radialkraft ist die Kraft mit der sich ein Dichtring über den gesamten Umfang auf die Welle anpresst. Mathematisch berechnet sich die Radialkraft als Doppelintegral der Pressung über die Berührbreite und über den Umfang:

$$F_{\rm R} = \int_{0}^{b} \int_{0}^{2\pi} p(\varphi, x) \, \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}x$$
 (5.1)

Messtechnisch ist die Erfassung der genauen Pressungsverteilung sehr komplex, weshalb die Radialkraft alternativ nach der Zweibackenmethode entsprechend DIN 3761-9 [15] gemessen wird.

Bei der Zweibackenmethode wird die Radialkraft mittels zweier halbrunder Messbacken ermittelt, eine Messbacke ist dabei ortsfest, die andere kann sich senkrecht zum Trennspalt der Messbacken bewegen. Die bewegliche Messbacke wird in Messrichtung über einen Kraftaufnehmer abgestützt. So kann die Kraft F' ermittelt werden, mit der der Dichtring versucht, die Backen zusammen zu drücken, Abbildung 5.1.



Abbildung 5.1: Messprinzip Zweibackenmethode [54]

Bei der Messung von hohen Radialkräften kommt es zu einer geringfügigen Verformung des Kraftaufnehmers, wodurch der Spalt zwischen den Messbacken verkleinert wird. Somit entspricht der Durchmesser der beiden Backen nicht mehr dem gewünschten Nennmaß und der Dichtring wird zu gering aufgeweitet. Eine Radialkraftmessung in diesem Zustand würde eine zu kleine Radialkraft ergeben. Um diesen Effekt zu kompensieren verfügt das eingesetzte Messgerät über einen Abstandssensor und einen Linearaktuator. Der Abstandssensor detektiert die Abweichung im Spalt zwischen den Messbacken. Der Linearaktuator verfährt automatisiert den Kraftaufnehmer und die bewegte Messbacke, bis das gewünschte Nennmaß zwischen den Messbacken wieder erreicht wird. Somit wird die Kraft F' stets bei Nenndurchmesser erfasst.

Bei der gemessenen Kraft F' handelt es sich noch nicht um die gewünschte Radialkraft F_r , da nur die in Messrichtung projizierte Linienpressung des Dichtrings erfasst wird, siehe Abbildung 5.1. Um aus der gemessenen Kraft F' die gewünschte Radialkraft F_r zu erhalten, muss der Wert noch entsprechend Gleichung (5.2) mit Pi multipliziert werden.

$$F_{\rm r} = F' \cdot \pi \tag{5.2}$$

5.1.2 Digitalmikroskop und IMA-Sealobserver

Zur visuellen Analyse der Dichtringe wird das Digitalmikroskop Keyence VHX-1000 eingesetzt, Abbildung 5.2. Das Mikroskop verfügt über einen CCD-Sensor mit 54 Megapixeln und eine angetriebene Vertikalachse, wodurch automatisch Aufnahmen bei unterschiedlichen Fokusebenen erstellt werden können. Die hierdurch gewonnenen Aufnahmen können zu einem tiefenscharfen zweidimensionalen oder zu einem dreidimensionalen Bild zusammengefügt werden. Mit Hilfe der verfügbaren Auswertesoftware können Winkel- und Längenmessungen durchgeführt werden.



Abbildung 5.2: Keyence Digitalmikroskop VHX-1000 [55]

Bei der Begutachtung von Dichtringen ist in der Regel der Dichtkontakt von besonderem Interesse. Um diesen untersuchen zu können, muss der Strahlengang mittels einer Vorrichtung umgelenkt werden. Dies geschieht mit dem IMA-Sealobserver, Abbildung 5.3. Der IMA-Sealobserver lenkt den Strahlengang mittels Prismas um 90° um. Hierdurch kann eine Betrachtung des Dichtkontakts des Dichtrings erfolgen. Eine integrierte Schwenkvorrichtung bietet die Möglichkeit, den Dichtkontakt senkrecht zum umgelenkten Strahlengang auszurichten. Hierdurch werden bei einer Auswertung von Winkeln oder Längen Winkelfehler unterbunden. Des Weiteren beinhaltet die Vorrichtung ein LED-Array am Prisma, wodurch eine ideale Beleuchtung des Dichtrings erreicht werden kann.



Abbildung 5.3: IMA-Sealobserver mit Messprinzip [56]

5.1.3 IMA-Sealscanner

Zur Analyse des Verschleißes von RWDR wurde der IMA-Sealscanner entwickelt. Das Gerät besteht aus zwei motorisierten Achsen sowie einem Laser-Linien-Triangulationssensor, Abbildung 5.4. Der Dichtring wird für eine Messung in einem Dreibackenfutter auf der Rotationsachse befestigt. Der nach unten ausgerichtete Sensor sowie ein 90°-Umlenkspiegel sind an der Linearachse montiert und können zur Messung vertikal in den Dichtring verfahren werden. Somit kann der Sensor über den Umlenkspiegel das Querschnittsprofil des Dichtrings erfassen. Während eines Messvorgangs rotiert die Rotationsachse mit dem montierten Dichtring um 360°. Während des Rotationsvorgangs wird das Querschnittsprofil an insgesamt 10 000 Stellen am Innenumfang des Dichtrings erfasst. Die gewonnen zweidimensionalen Querschnitte werden anschließend zu einer dreidimensionalen Abwicklung des Dichtrings zusammengefügt.

Für die Messung eines Dichtrings mit einem Durchmesser von 80 mm ergibt sich durch die 10 000 Messungen eine theoretische Auflösung in Umfangsrichtung von 25,1 μ m. Der eingesetzt Sensor LJ-V7060 der Firma Keyence arbeitet mit einer Wellenlänge von 405 nm. Die Auflösung des Sensors beträgt in axialer Richtung des Dichtrings 20 μ m. Die Genauigkeit der gemessenen Höheninformation liegt bei 7,6 μ m.



Abbildung 5.4: IMA-Sealscanner [57], [58]

5.1.4 3D-Laser-Mikroskop

Eine gegenüber dem VHX-1000 exaktere, dreidimensionale Betrachtung der Oberfläche kann mit dem konfokalen Laserscanningmikroskop Keyence VK-9710 durchgeführt werden, Abbildung 5.5.

Das Mikroskop besitzt zur Erfassung der Höheninformation der Oberfläche einen Laser mit einer Wellenlänge von 408 nm sowie eine Kamera, welche ein Farbbild der Oberfläche aufnimmt. Die Oberfläche wird von dem Laserstrahl punktuell an 1024x768 Stellen gemessen. Hierzu wird der Strahl durch eine X-Y-Abtastoptik im Strahlengang abgelenkt und dessen reflektierte Lichtintensität gemessen. Die Erfassung der Oberfläche erfolgt in mehreren Höhenpositionen in dem die Fokusebene durch vertikales Verfahren des Objektivs verändert wird. Anhand des Verlaufs der erfassten Laserintensität kann die Lage der Fokusebene für jede Messstelle ermittelt und ein dreidimensionales Bild der Oberfläche generiert werden. In Kombination mit dem Farbbild der Kamera kann ein dreidimensionales Bild in Echtfarben dargestellt werden. Die theoretisch mögliche Auflösung des Mikroskops beträgt bei einem Messfeld von 280x210 µm lateral 0,3 µm und in der Vertikalen 1 nm.

Während einer Messung wird das zu messende Objekt auf dem Objektivtisch positioniert. Der Objektivtisch ist elektrisch in X-Y-Richtung verfahrbar. Größere Messbereiche können so durch mehrere Einzelmessungen erfasst und nach den Messungen zu einem großen Messbereich zusammengesetzt werden.



Abbildung 5.5: 3D-Laserscanningmikroskop Keyence VK-9710 [59]

5.1.5 REM

Zur genauen Betrachtung der Matrix und der Füllpartikel des eingesetzten PTFE-Compounds im Neuzustand und nach einem Versuchslauf wird das Rasterelektronenmikroskop (REM) der Firma Phenom World B.V. mit der Bezeichnung ProX eingesetzt, Abbildung 5.6. Der Vorteil des REM liegt in dem Niederdruck-Modus, welcher ein Betrachten nichtleitfähiger Proben ohne vorherige Bedampfung ermöglicht. Das REM erlaubt Vergrößerungen von 120-fach bis zu 45 000-fach. Dies entspricht einer maximalen Pixelauflösung von 2,9 nm. Zusätzliche kann eine Materialanalyse mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) durchgeführt werden, welche die enthaltenen Elemente in der Probe detektiert.



Abbildung 5.6: Rasterelektronenmikroskop Phenom ProX [60]

5.2 Prüfstände

Im Folgenden werden die drei Prüfstände vorgestellt, welche für die experimentellen Untersuchungen der Dichtungen eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich um einen Prüfstand für statische sowie zwei Prüfstände für dynamische Versuche am Dichtsystem.

5.2.1 Statische Prüfkammer

Um die statische Dichtheit zu untersuchen werden mehrere Prüfkammern entsprechend der Darstellung in Abbildung 5.7 eingesetzt. Eine statische Prüfkammer besteht aus einer Grundplatte, einem Gehäuse, einer Welle und einem Deckel. Die Welle wird durch den Deckel auf der Grundplatte der Kammer verschraubt. Der Dichtring wird
zunächst in das Kammerngehäuse gepresst und anschließend auf die Welle geschoben und mit der Grundplatte verschraubt. Der montierte Dichtring bildet mit der Welle, der Grundplatte und dem Gehäuse ein geschlossenes Volumen, welches für die statischen Dichtheitsuntersuchungen über eine Öffnung am Gehäuse der Prüfkammer mit Fluid gefüllt werden kann. Die eigentliche Bestimmung der statischen Dichtheit erfolgt visuell oder gravimetrisch, indem der Dichtring auf austretendes Fluid zwischen Dichtring und Welle untersucht wird.



Abbildung 5.7: statische Prüfkammer

5.2.2 Dauerlaufprüfstand

Die dynamischen Dichtheitsuntersuchungen werden am 24-Zellen Dauerlaufprüfstand des IMA durchgeführt. Der Prüfstand besteht aus 12 einzelnen Modulen, welche jeweils eine in Richtung Vorderseite ausgerichtete und eine in Richtung Rückseite ausgerichtete Prüfkammer beinhalten. Jedes Modul besitzt einen separaten Servomotor, welcher über einen Keilrippenriemen die Antriebswelle beider Prüfkammern eines Moduls antreibt. Durch den Keilrippenriemen ist der Motor thermisch entkoppelt und gegen Überlast gesichert. Abbildung 5.8 zeigt den schematischen Aufbau einer Prüfkammer.



Abbildung 5.8: schematischer Aufbau einer Prüfkammer des 24-Zellen Prüfstands nach [61]

Die Antriebswelle tritt von der Rückseite in die Prüfkammer, weshalb eine Nebenabdichtung erforderlich ist. Der Vorteil dieser Anordnung liegt in der freien Zugänglichkeit der Prüfkammer, wodurch ein direkter Blick auf den zu prüfenden Dichtring während des Betriebs möglich ist. Der Dichtring selbst wird in eine scheibenförmige Dichtringaufnahme eingepresst und über einen Zentrierring mit der Prüfkammer verschraubt. Die Aufnahme der Welle erfolgt mittels Wellenaufnehmer über eine Spannzange mit HSK-Schnittstelle, Abbildung 5.9.



Abbildung 5.9: Spannzange mit HSK-Schnittstelle und Welle [31]

Die Prüfkammer beinhaltet elektrische Heizpatronen in der Kammerwand sowie ein PT-100 Temperaturfühler der etwa 30 mm in die Prüfkammer hineinragt. Hierdurch kann das in der Prüfkammer enthaltene Fluid aktiv auf eine eingestellte Temperatur erhitzt werden. Ein möglicher Druckaufbau durch einen Temperaturanstieg wird über eine Entlüftung an der Oberseite der Prüfkammer ausgeschlossen. Das Fluidvolumen der bis zur Wellenmitte gefüllten Prüfkammer beträgt etwa 1,3 l.

Die Steuerung des Prüfstands erfolgt mit dem Programm LabView auf einem separaten PC. Die benötigten Vorgabeparameter für einen Prüflauf beinhalten Drehzahl, Temperatur und Zeitdauer. Dabei können auch mehrere Abschnitte mit unterschiedlichen Vorgabeparametern programmiert werden. Die technischen Daten des 24-Zellen Dauerlaufprüfstands sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1: technische Daten 24-Zellen Dauerlaufprüfstand

max. Drehzahl [1/min]	max. Temperatur [°C]	Prüfkammervolumen [I]
		(Füllstand Wellenmitte)
10000	130	1,3

5.2.3 Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand

Ein Vorteil von PTFE-Manschettendichtungen gegenüber Elastomer-RWDR ist der Einsatz auch bei hohen Gleitgeschwindigkeiten oder Temperaturen. Um dieses Potential auf dem Prüfstand zu untersuchen sind die maximalen 10000 1/min des 24-Zellen Dauerlaufprüfstands nicht ausreichend. Deshalb werden für die experimentellen Untersuchungen bei hohen Drehzahlen der Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand eingesetzt, Abbildung 5.10. Bei diesem Prüfstand ist die Prüfwelle über die HSK-Aufnahme direkt mit einer Hochgeschwindigkeits-Motorspindel verbunden. Hierdurch können Drehzahlen bis zu 24000 1/min erreicht werden. Die prinzipielle Anbindung der Prüfwelle und des Dichtrings sowie die Temperierung und Steuerung entspricht weitestgehend dem Aufbau des 24-Zellen Dauerlaufprüfstands, siehe Kapitel 5.2.2. Neben den höheren Drehzahlen bietet der Prüfstand gegenüber dem 24-Zellen Dauerlaufprüfstand noch den Vorteil einer Reibmomentmessung. Hierzu ist die Prüfkammer in einem aerostatischen Lager befestigt und kann sich somit reibungsfrei drehen. Die Prüfkammer dreht sich somit bei rotierender Prüfwelle durch die Reibung am Dichtring mit. Damit dies nicht geschieht, stützt sich die Prüfkammer über einen definierten Hebelarm auf einem DMS-Kraftaufnehmer ab. Aus der gemessenen Kraft und dem bekannten Hebelarm kann das Reibmoment des Dichtrings ermittelt werden.



Abbildung 5.10: Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand nach [62]

Die technischen Daten des Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstands sind in Tabelle 5.2 aufgelistet.

Tabelle 5.2: technische Daten Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand

max. Drehzahl	max. Temperatur	Prüfkammervolumen [I]	max. Reibmomentmessung
[1/min]	[°C]	(Füllstand Wellenmitte)	[Nm]
24000	180	1,3	50

5.3 Schneid- und Gravierlaser

Zur Beschriftung von Dichtringen und Wellen besitzt das IMA einen Scheid- und Gravierlaser. Bei dem Laser handelt es sich um das Model Speedy 100 flexx der Firma Trotec. Die Bewegung des Laserstrahls erfolgt über einen in horizontaler und vertikaler Richtung verfahrbaren Optikkopf. Der horizontal aus dem Gehäuse austretende Laserstrahl wird im Optikkopf über einen Umlenkspiegel abgelenkt und mit Hilfe einer Linse auf das Werkstück fokussiert, Abbildung 5.11. Die Besonderheit des Lasers liegt in seinen beiden Laserquellen. Gelasert werden kann mit einem 20 W Faserlaser (Metalle) oder alternativ mit einem 60 W CO2-Laser (Kunststoffe, Glas, Textilien, Papier, Acryl, etc.). Der Laser besitzt zur Fertigung zwei unterschiedliche Betriebsmodi.

Im Graviermodus fährt der Laser zeilenweise die zu bearbeitende Fläche ab. In Bereichen in denen Material abgetragen werden soll, wird der Laser automatisch aktiviert. Dieses Verfahren ist vergleichbar mit der Funktionsweise eines Tintenstrahldruckers. Im Graviermodus kann mit einer eingestellten Auflösung von maximal 1000 dpi gearbeitet werden. Im Schneidmodus verfährt der Laser auf einem vorgegebenen Vektorpfad. Dabei ist der Laser dauerhaft mit einer einstellbaren Laserfrequenz aktiviert. Bearbeitet werden können Werkstücke mit einer maximalen Größe von 610x305 mm und einer maximalen Höhe von 132 mm. Zur Entfernung der entstehenden Stäube und Gase ist der Laser an ein spezielles Absaugsystem mit Taschen- und Aktivkohlefilter angeschlossen.



Abbildung 5.11: Schneid- und Gravierlaser Speedy 100 flexx [63], [81]

6 Vorgehensweise und Untersuchungsmethoden

Im Folgenden werden die Vorgehensweise und die verwendeten Untersuchungsmethoden in dieser Arbeit vorgestellt.

Die Untersuchung der neuen, rückenstrukturierten PTFE-Manschettendichtung beginnt regulär mit der Simulation der Dichtung. Mit Hilfe der Simulation kann schnell und kostengünstig die Wirkung vieler unterschiedlich gestalteter Rückenstrukturen analysiert werden. Rückenstrukturen mit vielversprechenden Simulationsergebnissen werden ausgewählt und für die experimentellen Untersuchungen gefertigt. Die gefertigten Dichtringe werden optisch untersucht und der Kontaktbereich zwischen PTFE-Manschette und Welle gemessen. Somit kann die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit der Realität sowie die Fertigung der Dichtringe verifiziert werden. Anschließend wird die statische und die dynamische Funktion der Dichtringe am Prüfstand untersucht. Die regulären dynamischen Untersuchungen gliedern sich dabei in Förderwert- und Funktionsuntersuchungen bei unterschiedlichen Drehzahlen und einem anschließenden Dauerlauf mit konstanter Drehzahl. Abbildung 6.1 zeigt schematisch die reguläre Vorgehensweise.



Abbildung 6.1: Vorgehensweise bei der Untersuchung von PTFE-Manschettendichtungen

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Vorgehensweise genauer erläutert.

6.1 Simulation

Als erster Schritt bei der Untersuchung neuer, rückenstrukturierter PTFE-Manschettendichtringe wird eine Simulation durchgeführt. Mit Hilfe der Simulation kann die Biegelinie und die Anlage des PTFE-Manschettendichtrings auf der Welle sowie die Pressungs- und Höhenverteilung im Dichtkontakt beurteilt werden. Somit können viele neuen Dichtungsvarianten betrachtet und durch eine gezielte Vorauswahl der experimentelle Versuchsumfang reduziert werden.

6.1.1 Materialmodell

PTFE-Compounds weisen ein hochgradig nichtlineares, visko-plastisches Materialverhalten auf. Für die Simulation von PTFE-Manschetten mit Rückenstrukturen sind Zeiteffekte von untergeordnetem Interesse. Der Grund hierfür liegt in der Auslagerung der Dichtringe vor den Versuchen für 10 Stunden. Olbrich [66] ermittelte zu diesem Zweck aus mehreren Zugversuchen bei unterschiedlicher maximaler Dehnung und einer anschließenden Haltezeit eine Gleichgewichtsfließkurve. Hierdurch können Relaxationsvorgänge in einer einfachen, elastisch-plastischen Simulation berücksichtigt werden. Die Simulationen im Rahmen dieser Arbeit werden zur Auslegung und für einen Vergleich unterschiedlicher PTFE-Manschetten mit und ohne Rückenstrukturen verwendet. Der Nachweis der Funktion erfolgt stets mittels experimentellem Versuch am Prüfstand, Eine einfache Simulation ist daher ausreichend. Zur Gewinnung des Materialmodells des eingesetzten PTFE-Compounds der Firma Garlock mit der Bezeichnung Gylon® Style 3504 werden Zugversuche nach DIN EN ISO 527-1 [64] durchgeführt. Eingesetzt wird dabei die Probengeometrie 5A nach DIN EN ISO 527-2 [65], welche lediglich durch die geringere Materialdicke von 0,8 mm etwas von der Prüfnorm abweicht. Die durchgeführten Simulationsvalidierungen zeigen, dass bereits mit einem mittels einfachem Zugversuch gewonnenem Materialmodell eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität erreicht wird. Die Simulationsergebnisse sind sogar Simulationen mit einer Gleichgewichtskurve nach Olbrich überlegen. Somit wird in der Simulation ein elastisch-plastisches Materialmodell eingesetzt, welches mittels einfachem Zugversuch ermittelt wurde.

Das verwendete Spannungs-Dehnungsdiagramm des PTFE-Materials ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Der elastische Bereich wird mittels eines E-Modul von 372,56 N/mm² beschrieben. Der Übergang in den plastischen Bereich erfolgt bei einer Streckgrenze von 3,47 N/mm².



Abbildung 6.2: Spannungs-Dehnungsdiagramm

Entsprechend den Arbeiten von Olbrich [66] wird in der Simulation eine kombinierte Verfestigungsregel angewandt. Eine gute Übereinstimmung der simulierten Kontaktfläche mit der Kontaktfläche in der Realität wird dabei mit einer Verteilung von 70:30 isotroper zu kinematischer Verfestigung erzielt.

6.1.2 2,5D-Simulation

Die Betrachtung der Biegelinie und der Anlage der PTFE-Manschette auf der Welle erfolgt durch eine 2,5D-Simulation. Hierzu wird eine Montagesimulation durchgeführt, deren Ablauf in Abbildung 6.3 dargestellt ist. Ausgangszustand der Montagesimulation ist die noch unverformte PTFE-Manschette. Diese wird zunächst durch die Dichtringaufnahme geklemmt. Die Montage erfolgt durch das Einschieben eines Montagedorns. In der Simulation und auch in den darauffolgenden experimentellen Untersuchungen wird ein Montagedorn mit einer Montagefase von 15° eingesetzt. Die Dichtringaufnahme und der Montagedorn sind in der Simulation vereinfacht als Starrkörper modelliert. Des Weiteren werden Reibungseffekte in der Simulation nicht berücksichtigt.



Abbildung 6.3: zweidimensionale Montagesimulation

6.1.3 3D-Simulation

Um das dynamische Funktionsverhalten unterschiedlicher rückenstrukturierter PTFE-Manschettendichtringe zu analysieren, wird die Pressungs- und Höhenverteilung im Dichtkontakt benötigt. Durch die lokale Steifigkeitsbeeinflussung der einzelnen Strukturen auf der Manschettenrückseite ist die Pressungsverteilung in Umfangsrichtung nicht konstant und eine 2,5D-Simulation nicht ausreichend. Aufgrund dessen wird eine dreidimensionale Simulation durchgeführt. Hierbei wird ein Ausschnitt von 18° rotationssymmetrisch berechnet. Die allgemeine Vorgehensweise ist dabei analog zu den zweidimensionalen Simulationen, Abbildung 6.4.



Abbildung 6.4: dreidimensionale Montagesimulation

Durch die Kenntnisse des Einflusses unterschiedlicher Rückenstrukturen auf die Pressungs- und Höhenverteilung im Dichtspalt können die Rückenstrukturen gezielt optimiert werden. Rückenstrukturen mit vielversprechenden Simulationsergebnissen können so für die weiteren experimentellen Untersuchungen ausgewählt werden.

6.2 Herstellung der Dichtringe

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Dichtringe für einen Wellendurchmesser von 80 mm und einer Manschettendicke von 0,8 mm betrachtet. Die Überdeckung der PTFE-Manschetten wird nicht variiert und beträgt 10 mm. Somit besitzen die PTFE-Manschetten vor der Montage einen Innendurchmesser von 70 mm.

6.2.1 Aufnahme der PTFE-Manschetten

Die PTFE-Manschetten werden für die experimentellen Untersuchungen in einer Aufnahme montiert. Diese besteht aus zwei Teilen, welche miteinander verschraubt werden. Die PTFE-Manschette wird dabei in die Aufnahme geklemmt. Durch die Klemmung wird die Nebenabdichtung zwischen PTFE-Manschette und Aufnahme gewährleistet. Die Nebenabdichtung der Aufnahme zum Prüfstand erfolgt über einen O-Ring. Der Außendurchmesser der Aufnahme beträgt 100 mm, Abbildung 6.5. Der für die montierte PTFE-Manschettendichtung wichtige Innendurchmesser der Aufnahme beträgt 87 mm. Unterhalb dieses Durchmessers kommt es zu einer Biegung bei der Montage.



Abbildung 6.5: Aufnahme der PTFE-Manschetten mit Manschette im Ausgangszustand

6.2.2 PTFE-Rohling und Werkstoff

Für die Untersuchungen werden PTFE-Rohlinge von der Firma Garlock GmbH eingesetzt. Zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften wird kein reines PTFE, sondern ein PTFE-Compound verwendet. Die Werkstoffbezeichnung des PTFE-Compounds lautet Gylon[®] Style 3504. Hierbei handelt es sich um ein mit Glashohlkugeln gefülltes, gefaltetes und kalandriertes PTFE-Compound. Durch das mehrmalige Falten und Kalandrieren mit Drehung in Querrichtung kommt es während der Fertigung zu einer gleichmäßigeren Durchmischung und einem feinen Lagenaufbau. Hierdurch wird gegenüber herkömmlichen Trocken-Mischverfahren eine höhere Druckstandfestigkeit und somit eine höhere Rückfederung erreicht. [67]

Bei den PTFE-Rohlingen handelt es sich um Scheiben, welche aus gesintertem Plattenmaterial mit einer Dicke von 0,8 mm gefertigt werden. Ab Werk beträgt der Außendurchmesser der PTFE-Rohlinge 98 mm und der Innendurchmesser 65 mm. Tabelle 6.1 fasst die Merkmale der verwendeten PTFE-Rohlinge zusammen.

Tabelle 6.1:	Merkmale der verwendeten	PTFE-Rohlinge
--------------	--------------------------	---------------

Werkstoff	Außendurchmesser	Innendurchmesser	Dicke
	[mm]	[mm]	[mm]
glashohlkugelgefülltes PTFE-Compound	98	65	0,8

6.2.3 Laserbearbeitung

PTFE-Manschettendichtungen mit Rückförderstrukturen werden in der Regel geprägt. Dieser Vorgang ist bei hohen Stückzahlen in der Serienfertigung besonders kostengünstig. Hierfür muss jedoch eine Prägeform hergestellt werden. Da im Rahmen dieser Arbeit viele unterschiedliche Strukturen untersucht werden, müssten viele Prägeformen hergestellt werden. Dies ist neben Kosten- auch aufgrund von Zeitgründen nicht praktikabel. Aufgrund dessen werden die PTFE-Manschettendichtungen gelasert. Hierzu wird der Schneid- und Gravierlaser Speedy 100 flexx (siehe Kapitel 5.3) eingesetzt. Der Laser besitzt zur Fertigung zwei Laserquellen, wobei zur Herstellung von PTFE-Manschettendichtungen die CO2-Laserquelle verwendet wird.

Abbildung 6.6 zeigt den Ablauf der Fertigung der rückenstrukturierten PTFE-Manschetten.



PTFE-Rohling als flache Scheibe

Gravieren der Rückenstrukturen und der Dichtringbezeichnung

Schneiden des Außendurchmessers und der Durchgangslöcher



Schneiden des Innnendurchmessers

Abbildung 6.6: Laserfertigung einer rückenstrukturierten PTFE-Manschette Zu Beginn wird der PTFE-Rohling mit der Rückenseite nach oben auf eine Zentrieraufnahme gelegt und im Laser positioniert. Im ersten Fertigungsschritt werden die gewünschten Rückenstrukturen in die PTFE-Rohlinge eingebracht. In einem zweiten Schritt werden der Außendurchmesser auf das Aufnahmemaß von 96,5 mm verringert und die Durchgangslöcher zur Klemmung der Aufnahme gelasert. Im letzten Schritt wird der Innendurchmesser auf den gewünschten Durchmesser von 70 mm vergrößert. Durch das Fertigen der Strukturen sowie des Innen- und Außendurchmessers in einer Aufspannung ist eine exakte Konzentrizität der rückenstrukturierten PTFE-Manschette in der Aufnahme sichergestellt. Einflüsse durch die manuelle Positionierung der PTFE-Rohlinge im Laser können somit eliminiert werden.

6.3 Verifikation der Dichtringe

Nach der Laserfertigung wird jede PTFE-Manschette in ihrer Aufnahme montiert und die Fertigung sowie die selbständige Ausbildung von Rückförderstrukturen im Dichtspalt verifiziert.

6.3.1 Verifikation der Fertigung

Im ersten Schritt wird die Dichtung vor der Montage gemessen. Dieser Schritt dient zur Verifizierung der korrekten Fertigung der Rückenstrukturen. Insbesondere die Überprüfung der Strukturtiefe ist essentiell. Grund hierfür ist die Fertigungstiefe, welche nur indirekt über die Leistung und der Verfahrgeschwindigkeit des Lasers eingestellt wird. Je nach zu bearbeitendem Material und gewünschter Tiefe müssen diese Parameter vorab experimentell ermittelt werden. Die Rückenstrukturen der Dichtringe werden mit Hilfe des Keyence Laserscanning Mikroskops dreidimensional gemessen.

Abbildung 6.7 zeigt einen Schnitt durch eine rückenstrukturierte PTFE-Manschette sowie die dazugehörige dreidimensionale Messung. Eine solche Messung ermöglicht die Kontrolle der Form und Tiefe der eingebrachten Rückenstrukturen.



Abbildung 6.7: Schnitt durch eine rückenstrukturierte PTFE-Manschette (links) und dreidimensionale Messung mittels Lasermikroskop (rechts)

6.3.2 Verifikation der Rückförderstrukturausbildung

Im zweiten Schritt wird überprüft, ob die Steifigkeitsbeeinflussung durch die Rückenstrukturen den angestrebten Effekt erzielen und sich Rückförderstrukturen im Dichtspalt ausbilden. Dieser Schritt kann neben der Radialkraftmessung der Dichtringe auch zur Verifizierung der Simulationsergebnisse genutzt werden. Vor der Verifikation wird der Dichtring zunächst mit Hilfe des Montagedorns umgestülpt und für 10 h auf einer Welle mit Nenndurchmesser gelagert.

Zur Betrachtung und Verifizierung der selbständig gebildeten Rückförderstrukturen im Dichtspalt wurden zwei optische Methoden angewandt.

Die erste und einfachere Methode betrachtet den Kontaktbereich zwischen der PTFE-Manschette und der Welle. Die Betrachtung wird mit Hilfe des Digitalmikroskops VHX-1000 durchgeführt. Da sich die Rückförderstrukturen erst durch die Aufweitung der PTFE-Manschette bilden, wird der Dichtring zunächst auf einer transparenten Glashohlwelle mit Wellennennmaß montiert. Mit Hilfe eines Umlenkspiegels wird der axiale Strahlengang des Mikroskops radial umgelenkt und der Dichtspalt durch die Glashohlwelle hindurch betrachtet. Dabei empfiehlt sich eine axiale Beleuchtung der Glashohlwelle. Das axial in die Glashohlwelle eingebrachte Licht koppelt im Kontaktbereich aus und macht diesen sichtbar, Abbildung 6.8.



Abbildung 6.8: Betrachtung des Kontaktbereichs mittels Glashohlwelle

Mit Hilfe der Messsoftware des digitalen Mikroskops kann nun der Kontaktbereich zweidimensional gemessen und mit dem simulierten Kontaktbereich verglichen werden. Mit Hilfe dieser Methode können schnell und einfach die Rückförderstrukturen eines rückenstrukturierten Dichtrings sichtbar gemacht und analysiert werden.

Für eine detaillierte Betrachtung der Rückförderstrukturen ist neben dem Kontaktbereich die Höhenverteilung im Dichtspalt von Interesse. Für eine dreidimensionale Betrachtung und Verifizierung der Rückförderstrukturen im Dichtspalt wird die zweite Methode angewandt. Als Messgerät wird hierbei der IMA-Sealscanner (siehe Kapitel 5.1.3) eingesetzt, welcher regulär zur Verschleißmessung bei Elastomer-RWRD eingesetzt wird. Zur Messung der Höhenverteilung im Dichtspalt wird der Dichtring auf einer Glashohlwelle montiert und mittels Dreibackenfutter auf der Rotationsachse des Messgeräts positioniert. Der nach unten ausgerichtete Linienlaser sowie ein 90°-Umlenkspiegel werden zur Messung in die Glashohlwelle gefahren. Somit kann der Sensor durch die Glashohlwelle hindurch das Querschnittsprofil des Dichtrings erfassen, Abbildung 6.9. Während eines Messvorgangs rotiert die Rotationsachse mit dem montierten Dichtring um 360°. Während des Rotationsvorgangs wird das Querschnittsprofil an insgesamt 10 000 Stellen am Innenumfang des Dichtrings vom Sensor erfasst. Die gewonnen zweidimensionalen Querschnitte werden anschließend zu einer dreidimensionalen Abwicklung des Dichtrings zusammengefügt. Die Auswertung erfolgt separat mit Hilfe der Auswertesoftware HommelMap Premium der Firma HommelWerke GmbH.



Abbildung 6.9: Messung der Höhenverteilung im Dichtspalt mittels IMA-Sealscanner

6.4 Statische Dichtheit

Die statische Dichtheit wird mit Hilfe der statischen Prüfkammern (siehe Kapitel 5.2.1) ermittelt. Der montierte Dichtring bildet mit der Welle, der Grundplatte und dem Gehäuse der Prüfkammer ein geschlossenes Volumen, welches für die statischen Dichtheitsuntersuchungen vollständig mit Öl gefüllt wurde. Die Messung der statischen Leckage erfolgte rein visuell über einen Zeitraum von 72 h. Zur Bewertung der Dichtheit wurde eine vereinfachte Variante der P-Methode nach Reichert [68] verwendet. Die P-Methode von Reichert teilt die Dichtheit in 10 unterschiedliche Stadien, wobei P10 die beste und P1 die schlechteste Dichtheitsbewertung darstellt. Da eine rein visuelle Bewertung stets eine hohe Streuung aufweist, wurde die Bewertung der statischen Dichtheit entsprechend Abbildung 6.10 auf 6 Stadien reduziert.

Leckagestadium	Bewertung	Funktion
P6	kein Öl sichtbar	Sehr gut
P5	glitzernder Ring	Gut
P4	leichter Ölfilm < 1 mm	Befriedigend
Р3	tropfenförmiger Ölfilm > 1 mm	Ausreichend
P2	Ansammlung am Einspannring	Mangelhaft
P1	Leckage fließt am Gehäuse ab	Ungenügend



Abbildung 6.10: Einteilung der statischen Leckage

Für die Funktion der Dichtung wird eine statische Dichtheit von mindestens P4 gefordert. Bildet sich entsprechend P4 ein leichter sichtbarer Ölfilm bei Wellenstillstand, kann dieser von einer funktionierenden Dichtung bei drehender Welle wieder hineingefördert werden.

6.5 Dynamische Dichtheit

Die dynamische Dichtheit der rückenstrukturierten Dichtringe wird standardmäßig am 24-Zellen Dauerlaufprüfstand des IMA (Kapitel 5.2.2) untersucht. Zur Überprüfung der dynamischen Funktion der Dichtringe werden sowohl Funktions- als auch Förderwertuntersuchungen durchgeführt.

6.5.1 Funktionsuntersuchungen

Bei den Funktionsuntersuchungen wird der Dichtring wie vorgesehen eingebaut und im Abdichtbetrieb bei unterschiedlichen Drehzahlen getestet. Gemessen wird dabei das Öl, welches zwischen Welle und Dichtring austritt. Das ausgetretene Öl wird durch einen Messbecher aufgefangen oder mittels Papiertuch abgewischt und gravimetrisch ausgewertet. Der Vorteil der Funktionsuntersuchungen im Abdichtbetrieb ist der Messaufbau, welcher dem späteren Betrieb des Dichtrings im Feld entspricht. Tritt im Abdichtbetrieb Fluid aus, so ist im Feld bei identischen Betriebsbedingungen ebenfalls mit Leckage zu rechnen. Als nachteilig erweisen sich Funktionsuntersuchungen an mehreren Dichtringen, wenn keine Leckage im Versuch austritt. Unter diesen Umständen kann keine Aussage getätigt werden, welcher Dichtring eine bessere dynamische Funktion aufweist. Tritt dieser Fall ein, empfiehlt sich eine Förderwertuntersuchung der Dichtringe.

6.5.2 Förderwertuntersuchungen

Bei einer Förderwertuntersuchung wird das aktive Rückfördervermögen überprüft, welches ein Dichtring für eine zuverlässige, dynamische Dichtheit benötigt. Der Förderwert beschreibt, wie viel Fluid ein Dichtring von der Luftseite zurück in Richtung Fluidseite fördern kann. Zur Messung des Förderwerts werden in dieser Arbeit zwei unterschiedliche Messmethoden angewandt.

Bei der ersten Methode nach Kawahara [20] wird der Dichtring verkehrt herum im Prüfstand eingebaut, weshalb diese Methode auch als inverse Förderwertmessung bezeichnet wird. Dem Dichtring wird durch den inversen Einbau auf dessen Luftseite Öl zur Verfügung gestellt, Abbildung 6.11. Dreht sich die Welle, pumpt der Rückfördermechanismus des Dichtrings aktiv Öl aus der Kammer. Das ausgetretene Öl wird bei der Förderwertmessung aufgefangen und die Menge gravimetrisch bestimmt. Der inverse Förderwert berechnet sich aus der gemessenen Fördermenge geteilt durch die benötigte Zeit. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie auch bei hohen Drehzahlen und großen Förderwerten zuverlässig eingesetzt werden kann. Nachteil der Methode ist die inverse Einbaurichtung des Dichtrings und somit der von der Praxis abweichende Betriebs- und Schmierungszustand. Hierdurch kann es zu einer zu hohen Förderwert-

Bei der zweiten Methode wird der Förderwert nach Symons [69] gemessen. Bei dieser Messemethode wird der Dichtring regulär eingebaut betrieben. Mittels Kolbenhubpipette wird dem Dichtring luftseitig 50 µl Öl in den Dichtspalt gespritzt, weshalb diese Methode auch als Einspritzmethode bezeichnet wird, Abbildung 6.11. Durch vi-

suelles Beobachten wird die Zeit bestimmt, welche der Dichtring benötigt, um das eingespritzte Fluid unter dem Dichtspalt hindurch zu fördern. Der Förderwert berechnet sich aus der eingespritzten Fluidmenge dividiert durch die Förderzeit. Vorteil der Methode ist die Durchführung im regulären Betriebszustand. Die Messung kann ohne größeren Aufwand während einer Funktionsuntersuchung im Abdichtbetrieb durchgeführt werden. Der Nachteil der Messung liegt in der Messungenauigkeit bei hohen Förderwerten durch die kurze Förderzeit. Des Weiteren kann diese Methode nur bei geringen Drehzahlen eingesetzt werden, da sonst das eingespritzte Fluid von der Welle weggeschleudert wird.



Abbildung 6.11: inverse Förderwertmessung und Einspritzmethode

6.5.3 Standardmäßiger Versuchsablauf

Die dynamischen Dichtheitsuntersuchungen werden regulär am 24-Zellen Dauerlaufprüfstand des IMA (Kapitel 5.2.2) durchgeführt. Bei allen dynamischen Untersuchungen beträgt die Ölsumpftemperatur in der Prüfkammer 120 °C. Die Prüfkammern werden mit 1,3 l Öl befüllt, was einem Füllstand bis Wellenmitte entspricht. Der standardmäßige Ablauf der Untersuchungen eines Dichtrings setzt sich aus Förderwert-, Funktionsuntersuchungen und einem abschließenden Dauerlauf zusammen.

1. Förderwertuntersuchung

Zuerst wird das aktive Rückfördervermögen überprüft, welches ein Dichtring für eine zuverlässige, dynamische Dichtheit benötigt. Hierfür wird der Dichtring invers eingebaut und der Förderwert gemessen. Die Förderwertmessung erfolgt bei fünf unterschiedlichen Drehzahlstufen von 500 1/min bis 4500 1/min, Abbildung 6.12. Die Zeit je Drehzahlstufe beträgt regulär zwei Stunden. Bei großen Fördermengen über 100 ml

wird die Messung vor Ablauf der Zeit beendet und der Förderwert bestimmt. Hierdurch wird der Einfluss des sinkenden Ölstands in der Prüfkammer auf den gemessenen Förderwert verringert.



Abbildung 6.12: Prüfprogramm Förderwertmessung

2. Funktionsuntersuchung

Nach der Bestimmung des Förderwerts wird die eigentliche Dichtheit des Dichtrings überprüft. Für diese Funktionsuntersuchungen wird der Dichtring gedreht und somit regulär eingebaut. Als erstes wird die Funktion im Abdichtbetrieb bei vier verschiedenen Drehzahlen von 1000 1/min bis 9000 1/min untersucht, Abbildung 6.13.



Abbildung 6.13: Prüfprogramm Funktionsuntersuchung

Hierzu wird die Leckage jeweils nach 2 Stunden Laufzeit je Drehzahlstufe erfasst. Anschließend wird die Drehrichtung der Welle umgekehrt und der Dichtring bei 1000 1/min für 10 min betrieben und danach ebenfalls die Leckagemenge erfasst. Hierdurch wird das Verhalten des Dichtrings bei kurzeitigem Rückwärtsbetrieb erfasst.

3. Dauerlauf mit Förderwertmessung

Abschließend wird ein Dauerlaufversuch durchgeführt, welcher das Funktionsverhalten des Dichtrings über einen Zeitraum von 72 Stunden erfasst. Der Dichtring wird im Abdichtbetrieb bei einer konstanten Drehzahl von 6000 1/min betrieben. Grund für die gewählte Drehzahl ist die Übereinstimmung mit dem von Gölz [31] als "kritische Drehzahl" beschriebenem Bereich für PTFE-Manschettendichtungen. Ab der kritischen Drehzahl ist mit einem drastischen Anstieg der Leckage zu rechnen. Somit wird der Dauerlauf bei möglichst kritischen Betriebsbedingungen durchgeführt. Die Messung der Leckage im Dauerlauf erfolgte alle 12 Stunden.

Alle 24 Stunden wird der Dauerlauf kurz unterbrochen um eine Förderwertmessung durchzuführen. Durch diese Förderwertmessungen wird eine eventuelle Veränderung des Rückfördervermögens erfasst. Somit kann auch bei Dichtringen ohne Leckage eine Aussage über dessen Langzeitverhalten getroffen werden. Damit das Dichtsystem zur Förderwertbestimmung nicht demontiert werden muss, wird die Einspritzmethode angewandt. Die Messung des Förderwerts erfolgt bei einer Drehzahl von 500 1/min.

6.6 Versuchsöl und Wellen

Im Folgenden werden die Versuchswellen und das Versuchsöl für die experimentellen Untersuchungen vorgestellt. In den Untersuchungen von Bauer [35], [36] und Gölz [26], [31] wurden baugleiche Wellen und dasselbe Öl eingesetzt, wodurch eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

Versuchsöl

Bei allen experimentellen Untersuchungen wird ein Versuchsöl verwendet. Bei dem Öl handelt es sich um ein vollsynthetisches Motorenöl der Firma Fuchs Schmierstoffe mit der Bezeichnung Supersyn 0W-30. Das Öl weist gegenüber Getriebeölen eine geringere Viskosität auf, wodurch im Versuch früher mit statischer Leckage zu rechnen ist. Die wichtigsten Kennwerte des Öls können Tabelle 6.2 entnommen werden.

Viskositätsklasse	SAE 0W-30	
Dichte ę bei 15 °C	843	kg/m³
Kinematische Viskosität v bei 40 °C	67,6	mm²/s
Kinematische Viskosität v bei 100 °C	12,1	mm²/s

 Tabelle 6.2:
 Kennwerte des eingesetzten Versuchsöls [70]

Versuchswellen

Bei allen experimentellen Untersuchungen werden Nadellagerinnenringe der Firma Schäffler mit der Bezeichnung INA IR 70x80x54 EGS als Versuchswellen eingesetzt. Die Wellen bestehen aus gehärtetem 100Cr6 Wälzlagerstahl und sind für den Dichtungseinsatz nach DIN 3761 [15] drallfrei im Einstich geschliffen. Da Drall auf der Wellenoberfläche einen starken Einfluss auf die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen hat, werden die Wellen am IMA auf Makrodrall und Mikrodrall untersucht. Die Makrodralluntersuchung erfolgt mittels taktiler Messung nach Daimler Werksnorm MBN31007-7 [71]. Die Untersuchung der Wellenoberfläche auf Mikrodrall wird berührungslos nach der von Baitinger [72] und Baumann [73] am IMA entwickelten Methode durchgeführt. Eingesetzt werden lediglich Wellen, welche sich in beiden Untersuchungen bezüglich Drall als unauffällig zeigen.

7 Prototyp – Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des in Kapitel 4.4 gezeigten Prototyps einer PTFE-Manschette mit sichelförmigen Rückenstrukturen vorgestellt.

7.1 Simulation

Im ersten Schritt wird eine dreidimensionale Montagesimulation der rückenstrukturierten PTFE-Manschette durchgeführt. Diese dient zur Überprüfung der Theorie des neuen Dichtungsansatzes. Entsprechend der Theorie kommt es durch die Strukturen auf der Rückseite der PTFE-Manschette zu einer lokalen Steifigkeitsveränderung, die zur Ausbildung förderfähiger Strukturen im ansonsten glatten Dichtspalt führt.

7.1.1 Simulationsergebnisse

Zu Vergleichszwecken wird zunächst die Montagesimulation einer glatten PTFE-Manschette ohne Rückförderstrukturen betrachtet.

Kontaktbereich

Abbildung 7.1 zeigt die umgestülpte PTFE-Manschette. Die Blickrichtung ist von der Welle radial nach außen auf den Dichtring gerichtet. Grau hervorgehoben ist der simulierte Kontaktbereich zwischen PTFE-Manschette und Welle. Das Umstülpen der PTFE-Manschette auf die Welle erzeugt einen schmalen Kontaktbereich in Umfangsrichtung der Welle.

Dreht sich die Welle, so wird Fluid in Umfangsrichtung von der Welle mitgeschleppt und kann in den Kontaktbereich gelangen. Überwindet das Fluid diese Pressungslinie, kann es von der glatten Manschette nicht mehr zurück gefördert werden. Auf Grund des fehlenden aktiven Rückfördermechanismus kann eine glatte PTFE-Manschette ohne Rückförderstrukturen keine dynamische Dichtheit erreichen.



Abbildung 7.1: Kontaktpressung einer glatten PTFE-Manschette

Im Folgenden wird die Montagesimulation des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen betrachtet. Abbildung 7.2 zeigt den umgestülpten Prototypen in derselben Darstellung wie zuvor die glatte PTFE-Manschette. Die Position der sichelförmigen Strukturen auf der Rückseite der PTFE-Manschette sind zur Orientierung weiß gestrichelt markiert. Im Vergleich zur glatten PTFE-Manschette bildet sich beim Prototyp keine durchgehende Pressungslinie in Umfangsrichtung zwischen PTFE-Manschette und Welle aus. In Bereichen, in denen die PTFE-Manschette rückseitig strukturiert ist, wird der Kontakt unterbrochen. Des Weiteren zeigt sich ein in axialer Richtung schräg gerichteter Kontaktbereich entsprechend dem Verlauf der Rückenstrukturen.



Abbildung 7.2: Kontaktpressung des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen

Dreht sich die Welle, wird Fluid in Umfangsrichtung von der Welle mitgeschleppt und kann in den Kontaktbereich gelangen. An den schräg gerichteten Kontaktbereichen auf der Welle soll von dem mitgeschleppten Fluid ein Schleppdruck aufgebaut werden, wodurch das Fluid axial in Richtung des niedrigeren Drucks ausweicht. Diese axiale Ablenkung erfolgt an jeder einzelnen schrägen Kontaktstelle. Somit sollte eine kontinuierliche Rückförderung in Richtung Fluidseite und damit eine dynamische Dichtheit möglich sein.

Die Simulation des Kontaktbereichs stützt somit die Theorie, dass eine rückenstrukturierte PTFE-Manschette selbständig einen aktiven Rückfördermechanismus ausbilden kann. Der erwünschte ideale Kontaktbereich entsprechend Abbildung 4.7 konnte jedoch nicht erzielt werden. Zwar bildet der Prototyp die gewünschten Rückförderstrukturen im Dichtspalt selbständig aus, jedoch ohne einen geschlossenen Kontaktbereich. Basierend auf dem über den Umfang unterbrochenen Kontaktbereich ist mit einer eingeschränkten statischen Dichtheit des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen gegenüber einer glatten PTFE-Manschette zu rechnen. Eine eindeutige Aussage zur dynamischen und statischen Dichtheit des Prototyps kann erst durch eine experimentelle Untersuchung erfolgen.

Höhenverteilung

Neben dem reinen Kontaktbereich ist für die Fluidströmung im Dichtspalt die Höhenverteilung des Dichtspalts entscheidend. Abbildung 7.3 zeigt die simulierte Höhenverteilung im Dichtspalt des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen. Die Ordinatenachse entspricht der axialen Position ausgehend von der Aufnahme der PTFE-Manschette. Die Abszissenachse entspricht der Abwicklung in Umfangsrichtung. Die Position der sichelförmigen Rückenstrukturen wird durch eine grau gestrichelte Linie dargestellt. Die simulierte Höhenverteilung zeigt den erwarteten Verlauf entsprechend der Biegelinie der Manschette. Die maximale dargestellte Höhe von 3,5 mm entspricht dabei dem Abstand zwischen Welle und Aufnahme der PTFE-Manschette. Ein Abheben der PTFE-Manschette im Dichtspalt zwischen den Kontaktbereichen ist in dieser Darstellung nicht erkennbar. Grund hierfür ist die lineare Skalierung bis 3,5 mm, wodurch feine Strukturen nicht dargestellt werden.

Um auch feine Strukturen im Dichtspalt sichtbar zu machen, wird in der zweiten Darstellung in Abbildung 7.4 eine exponentielle Skalierung der Spalthöhe gewählt. Zusätzlich wird die Darstellung um Isolinien im Bereich von 2 μ m bis 5000 μ m ergänzt. Die Werte der Isolinien entsprechen den dargestellten Werten an der Skala. Eine weitere Optimierung der Abbildung erfolgt durch die gleichzeitige Darstellung der simulierten Höhen- und Pressungsverteilung. Mit Hilfe dieser optimierten Darstellung werden nun Unterbrechungen und Strukturen im Kontaktbereich ersichtlich. Zwischen den Kontaktstellen bilden sich selbstständig schräg gerichtete Kanäle aus. Diese Kanäle sollen zusammen mit der schräg gerichteten Kontaktpressungsverteilung die aktive Rückförderfähigkeit des Dichtrings ermöglichen. Die Kanäle werden deshalb im Folgenden auch als Rückförderstrukturen bezeichnet.

Die simulierten Höhen der Rückförderstrukturen liegen im Bereich von 10 μ m bis 50 μ m. Sie sind im Vergleich zu bislang bekannten PTFE-Manschettendichtungen mit gefertigten, erhabenen Rückförderstrukturen deutlich niedriger und flacher. Gängige PTFE-Manschetten mit Spiralrillen oder PTFE-Manschetten mit erhabenen Rückförderstrukturen im Dichtspalt werden mit einer Tiefe bzw. Höhe im Bereich von 0,4 mm gefertigt. Durch die geringe Höhe und den dadurch bedingten geringen Kanalquerschnitt der Rückförderstrukturen ist von einem vergleichsweise geringen Fördervolumen des Prototyps auszugehen.



Abbildung 7.3: simulierte Höhenverteilung im Dichtspalt des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen



Abbildung 7.4: simulierte Höhen- und Pressungsverteilung im Dichtspalt des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen

Um ausgetretenes Fluid zuverlässig zurückfördern zu können ist ein zuverlässiger Schleppdruckaufbau wichtiger als ein hohes Fördervolumen. Je niedriger und länger förderfähige Strukturen im Dichtspalt sind, desto größer ist der mögliche Druckaufbau durch die Schleppströmung der Welle (siehe Kapitel 2.1.3). Diesen Effekt machen sich in der Dichtungstechnik beispielsweise strukturierte Gleitringdichtungen zu Nutze, welche durch sehr feine Kanalstrukturen im Mikrometerbereich durch den Schleppdruck auf einem Gasfilm aufschwimmen können. Somit können die flachen Rückförderstrukturen des Prototyps aufgrund ihrer geringen Höhe zu einer sehr guten dynamischen Dichtheit führen.

Der Einsatz solcher flacher Rückförderstrukturen im Bereich von PTFE-Manschetten war bisher nicht möglich. Grund hierfür ist zum einen der hohe Fertigungsaufwand solch feiner Strukturen. Zum anderen würden diese gefertigten Strukturen schnell verschleißen und ihre hydrodynamische Wirkung verlieren. Hierbei zeigt sich der große Vorteil des neuen Ansatzes. Trotz relativ grober Fertigung im zehntel Millimeter Bereich werden sehr feine Rückförderstrukturen im Mikrometerbereich erzeugt. Da die Strukturen aufgrund der Steifigkeitsveränderungen selbständig entstehen, sollten diese auch bei einem Verschleißen der PTFE-Manschette erhalten bleiben.

7.1.2 Validierung der Ergebnisse

Die Simulationen des Kontaktbereichs und der Dichtspalthöhe stützen die Theorie, dass eine rückenstrukturierte PTFE-Manschette selbständig einen aktiven Rückfördermechanismus ausbilden kann. Im Folgenden soll nun untersucht werden, ob die simulierten Rückförderstrukturen auch in der Realität gebildet werden. Die Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt entsprechend der beiden in Kapitel 6.3.2 vorgestellten Methoden.

Kontaktbereich

Die einfachste Art der Verifizierung der Ergebnisse erfolgt qualitativ über den Kontaktbereich zwischen PTFE-Manschette und Welle. Hierbei wird der rückenstrukturierte Dichtring auf einer transparenten Glashohlwelle montiert. Der Dichtspalt wird über einen Umlenkspiegel durch die Glashohlwelle hindurch betrachtet. Durch eine stirnseitige Beleuchtung der Glashohlwelle koppelt das Licht an den Kontaktbereichen zwischen Dichtring und Glashohlwelle aus, wodurch die Kontaktbereiche sichtbar werden. Abbildung 7.5 zeigt den betrachteten Dichtspalt im Vergleich zum simulierten Dichtspalt in derselben Skalierung. Die allgemeine Position und die schräg gerichtete Form der Kontaktbereiche stimmen im Vergleich mit der Simulation überein. Die Abweichungen zwischen Simulation und Realität sind neben dem vereinfachten Materialmodell auf eine mit Ø 80,3 mm geringfügig zu großer Glashohlwelle und die bei der Montage auf die Glashohlwelle fehlende Einfahrschräge zurückzuführen. Des Weiteren werden die PTFE-Manschetten leicht mit Öl benetzt, damit der Kontaktbereich besser sichtbar wird. Durch das Benetzen werden die Kontaktbereiche tendenziell zu groß dargestellt. Zusätzlich schwankt der reale Kontaktbereich von Struktur zu Struktur etwas. Dies ist auf den relativ inhomogenen und rauen PTFE-Werkstoff sowie die fehlende Zentrierung des Dichtrings zurückzuführen.



Abbildung 7.5: Vergleich der Simulation mit der Kontaktfläche auf einer Glashohlwelle

Höhenverteilung

Eine dreidimensionale Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt über die Höhenverteilung im Dichtspalt. Hierzu wird der Dichtring erneut auf der Glashohlwelle montiert. Als Messgerät wird der IMA-Sealscanner eingesetzt, welcher durch die Glashohlwelle hindurch den Dichtring am gesamten Umfang mittels Lasers dreidimensional erfasst. Abbildung 7.6 zeigt einen Ausschnitt des gemessenen Dichtringumfangs. Entsprechend der Analyse der simulierten Dichtspalthöhe in Abbildung 7.3 ist bei der Betrachtung der Messung nur die gebogene Manschettenform erkennbar. Um die feinen Rückförderstrukturen im Dichtspalt sichtbar zu machen, muss eine detaillierte Betrachtung erfolgen. Da die Auswertesoftware keine exponentielle Darstellung entsprechend der Simulationsauswertung ermöglicht, wird im Folgenden nur der flachere Bereich des Dichtspalts betrachtet. Die Biegeform der Manschette wird hierzu mittels Polynom entfernt. In der Detailansicht sind feine, schräg gestellte Rückförderstrukturen im Dichtspalt ersichtlich. Die gemessenen Höhen der Rückförderstrukturen entsprechen mit bis zu 50 µm den Simulationsergebnissen. Die Untersuchungen bestätigen somit die simulativ gewonnenen Erkenntnisse. Eine rückenstrukturierte PTFE-Manschette bildet durch die Steifigkeitsbeeinflussung selbständig Rückförderstrukturen im Dichtspalt aus. Die experimentellen Ergebnisse zeigen dabei eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen.



Abbildung 7.6:

gemessene Höhenverteilung im Dichtspalt des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen mit Detailansicht

7.1.3 Robustheit

Neben chemischer und thermischer Beständigkeit sowie statischer und dynamischer Dichtheit ist ein robustes und zuverlässiges Dichtungsdesign eine der Anforderungen an die neue Dichtung. Die fehlende Robustheit stellt dabei eine der Hauptprobleme bestehender statisch und dynamisch abdichtender PTFE-Manschettendichtungen mit erhabenen Rückförderstrukturen dar. Schon kleine Abweichungen während des Produktions- oder Montageprozesses beeinflussen die korrekte Anlage bisheriger Dichtungen und führen zu einem Ausfall. Daher wird der Einfluss von Produktions- und Montagetoleranzen auf die neue, rückenstrukturierte PTFE-Manschettendichtung im Folgenden untersucht. Zu diesem Zweck wird die Überlappung, die Tiefe sowie die Position der eingebrachten Rückenstrukturen variiert und mittels Simulation untersucht. Ausgewertet wird der Einfluss der Variationen auf die selbständig erzeugten Rückförderstrukturen im Dichtspalt. Hierzu wird die Veränderung der Höhen- und Pressungsverteilung im Dichtspalt betrachtet.

Die Variation der Überdeckung erfolgt durch Änderungen des Innendurchmessers der flachen PTFE-Scheibe vor der Montage. Der Durchmesser wird von Ø 70 mm bis Ø 72 mm variiert und simuliert. Die Variation der Überdeckung führt zu einer geringfügigen Änderung der Form und Lage der Rückförderstrukturen im Dichtspalt, Abbildung 7.7. Trotz der Veränderungen bleiben bei allen Überdeckungsvarianten schräg gestellte Rückförderstrukturen im Dichtspalt erhalten. Die Funktion der Dichtung sollte von der Veränderung der Überdeckung somit kaum beeinflusst werden.

Im Folgenden wird der Einfluss einer veränderten Tiefe der Rückenstrukturen betrachtet. Zu diesem Zweck wird die Tiefe der Rückenstrukturen im Bereich von 0,2 mm bis 0,5 mm variiert und simuliert. Die Änderung der Tiefe der Rückenstrukturen hat einen Einfluss insbesondere auf die Neigung sowie die Kanalhöhe der Rückförderstrukturen, Abbildung 7.8. Je geringer die Tiefe der Rückenstrukturen, desto weniger geneigt und flacher sind die Rückförderstrukturen im Dichtspalt. Infolgedessen ist mit einem Rückgang der aktiven Rückförderfähigkeit zu rechnen. Dennoch sollte die dynamische Dichtwirkung auch bei einer Halbierung der eingebrachten Strukturtiefe erhalten bleiben.

Die letzte Änderung zur Untersuchung der Robustheit der rückenstrukturierten PTFE-Manschette ist die Variation der Position der eingebrachten Rückenstrukturen. Die Startposition der Sichelform wird hierzu im Bereich von Ø 71 mm bis Ø 74 mm variiert und simuliert. Je nach Position der Rückenstrukturen kommt es zu einer Veränderung der Form der gebildeten Rückförderstrukturen im Dichtspalt, Abbildung 7.9. Die selbständig erzeugten Rückförderstrukturen im Dichtspalten weisen jedoch bei allen Varianten einen schräg gerichteten Bereich auf, welcher ein aktives

Rückfördervermögen erzeugen sollte. Ein dynamisches Versagen der Dichtung ist somit nicht zu erwarten.



Abbildung 7.7: Variation des Innendurchmessers

Insgesamt sind die Ergebnisse der rückenstrukturierten PTFE-Manschettendichtungen sehr positiv zu bewerten. Die Erzeugung aktiver Rückförderstrukturen im Dichtspalt bleibt auch bei großen Veränderungen der eingebrachten Rückförderstrukturen erhalten. Gegenüber bisherigen PTFE-Manschetten mit erhabenen Rückförderstrukturen können die Anforderungen an die Produktions- und Montagegenauigkeit der rückenstrukturierten PTFE-Manschetten deutlich geringer ausfallen, ohne die Funktion der Dichtung wesentlich zu beeinträchtigen. Daher kann von einem sehr robusten und zuverlässigen Ansatz der neuen Dichtung ausgegangen werden.



Abbildung 7.8: Variation der Tiefe der eingebrachten Rückenstrukturen



Abbildung 7.9: Variation der Position der eingebrachten Rückenstrukturen
Neben Produktions- und Montagetoleranzen kann auch durch Verschleiß die Funktion einer Dichtung beeinträchtigt werden. Kommt es bei einer rückenstrukturierten PTFE-Manschettendichtung zu deutlichem Verschleiß, so nimmt die Manschettendicke im Kontaktbereich ab und die Berührfläche nimmt in axialer Richtung zu. Da die Tiefe der Rückenstrukturen in diesem Fall unverändert bleibt, vergrößern sich die Steifigkeitsunterschiede in der Manschette. Hierdurch sollten die selbständig gebildeten Rückförderstrukturen auch bei einem Verschleißen der Manschette erhalten bleiben. Solange der Kontaktbereich in axialer Richtung kleiner als die Rückenstrukturen ist, sollte es zu keinem Verlust des Rückfördermechanismus kommen.

7.1.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die Untersuchungen bestätigen die Theorie des neuen Dichtungsansatzes. Durch Strukturen auf der Rückseite einer PTFE-Manschettendichtung kann die Steifigkeit der Manschette gezielt reduziert werden. In Bereichen, in denen die Manschette geschwächt wurde, wird bei der Montage die Dehnung konzentriert. Infolge dessen hebt sich dort die PTFE-Manschette von der Welle ab und es entsteht ein niedriger Kanal. Aufgrund der sichelförmigen Rückenstrukturen des Prototyps bilden sich mehrere schräge Kanäle aus, welche der Dichtung als Rückförderstrukturen dienen.

Die Untersuchungen zeigen eine gute Übereinstimmung der simulierten und der real gemessenen Rückförderstrukturen. In beiden Fällen wurden sehr feine Rückförderstrukturen mit einer Höhe kleiner 50 μ m nachgewiesen. Diese Rückförderstrukturen sind dabei deutlich flacher als alle bisher bei PTFE-Manschettendichtungen eingesetzten Rückförderstrukturen.

Entsprechend der inversen Reynoldsgleichung (2.9) sind lange und vor allem flache Strukturen hydrodynamisch besonders wirksam. Somit können die Rückförderstrukturen des Prototyps aufgrund ihrer geringen Höhe zu einer sehr guten dynamischen Dichtheit führen.

Ein Vorteil der rückenstrukturierten PTFE-Manschetten liegt dabei in der relativ einfachen Fertigung. Durch Einbringen von Rückenstrukturen im Zehntel Millimeterbereich werden sehr feine Rückförderstrukturen im Mikrometerbereich erzeugt. Diese feinen Rückförderstrukturen sollten auch bei einem Verschleißen der PTFE-Manschette erhalten bleiben, solange die Steifigkeitsunterschiede in der PTFE-Manschette bestehen. Sowohl die aufwändige Fertigung als auch der Verschleiß machten den Einsatz von PTFE-Manschetten mit solch feinen Rückförderstrukturen im Dichtspalt mit den bisherigen Ansätzen unmöglich.

Ein weiterer Vorteil des Prototyps ist das robuste Dichtungsdesign. Veränderungen der Position und Tiefe der eingebrachten, sichelförmigen Rückenstrukturen oder der Überdeckung zeigen einen geringen Einfluss auf die selbständig gebildete Rückförderstrukturen im Dichtspalt. Somit kann der Prototyp mit sichelförmigen Rückenstrukturen auch bei großen Fertigungs- und Montagetoleranzen zuverlässig eingesetzt werden können.

Zusammenfassend ergeben sich aus den Untersuchungen folgende Erkenntnisse:

- rückenstrukturierte PTFE-Manschettendichtungen erzeugen durch die Montage selbständig Förderstrukturen im ansonsten glatten Dichtspalt
- die Rückförderstrukturen im Dichtspalt sind sehr niedrig und flach und dadurch hydrodynamisch besonders wirksam
- feine Rückförderstrukturen bleiben durch Steifigkeitsunterschiede auch bei einem Verschleißen der PTFE-Manschette erhalten
- einfache Fertigung Fertigung der Rückenstrukturen im zehntel Millimeterbereich erzeugt Förderstrukturen im Mikrometerbereich
- robustes Dichtungsdesign zuverlässiger Einsatz auch bei großen Fertigungs- und Montagetoleranzen möglich

7.2 Experimentelle Ergebnisse

Die bisher durchgeführten Untersuchungen bestätigen die Theorie des neuen Dichtungsansatzes. Die Beurteilung des Prototyps erfolgte dabei rein subjektiv über die Form der Rückförderstrukturen im Dichtspalt. Die Funktion der Dichtung im realen Einsatz muss deshalb im Folgenden geklärt werden. Hierzu werden Prüfstandsuntersuchungen mit vier Prototypen mit sichelförmigen Rückenstrukturen durchgeführt, bei denen die statische und dynamische Dichtheit überprüft wird. Die Prüfstandsergebnisse werden mit den Ergebnissen bestehender Dichtringe verglichen. Zu diesem Zweck werden zwei glatte PTFE-Manschetten ohne Rückförderstrukturen, zwei klassische Elastomer-RWDR, zwei PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille sowie zwei bidirektionale PTFE-Manschettendichtungen untersucht.

Als glatte Manschette werden zwei dem Prototyp identische PTFE-Manschette ohne sichelförmige Rückenstrukturen gefertigt. Bei den zwei PTFE-Manschetten mit Spiralrille handelt es sich um die Ausführung PLE, welche bereits in [35] und [36] untersucht wurde. Als Vertreter der RWDR wird ein handelsüblicher RWDR aus FKM mit der Bezeichnung CB 80x100x10 der Firma Stefa und als Vertreter des aktuellen Stands der Technik die bidirektionale PTFE-Manschettendichtung PNJ von Gölz [31] verwendet, Abbildung 7.10.



Abbildung 7.10: PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille PLE (links) [36] und bidirektionale PTFE-Manschette PNJ (rechts) [31]

7.2.1 Statische Dichtheit

Die statischen Untersuchungen werden entsprechend der Vorgehensweise in Kapitel 6.4 an den statischen Prüfkammern des IMA durchgeführt. Die statische Dichtfunktion der Dichtringe wird mit maximal 6 Punkten bewertet. Eine Bewertung niedriger als 4 Punkte wird dabei als statisch undicht gewertet (siehe Kapitel 6.4). Grund hierfür ist die statische Leckage, welche durch den dynamischen Rückfördermechanismus des Dichtrings im Betrieb nicht mehr zurück gefördert werden kann. Alle Dichtringe befinden sich zu Beginn der Untersuchung im Neuzustand. Von jeder Bauart werden zwei Dichtringe untersucht. Gewertet wird das jeweils schlechtere Ergebnis, wobei die Abweichung innerhalb baugleicher Dichtringe maximal einem Bewertungspunkt entsprach.

Neuzustand

Tabelle 7.1 zeigt die Ergebnisse der statischen Dichtheitsuntersuchungen. Die Tabelle ist dabei entsprechend der Dichtheit der Dichtungen geordnet.

Nach einer Versuchszeit von 3 Stunden zeigt der Prototyp erstmals einen glitzernden Ölring im Dichtspalt. Nach 48 Stunden vergrößert sich die sichtbare Leckagemenge zu einem leichten Ölfilm. In diesem Stadium stagniert die Leckage bis zum Versuchsende. Mit einer Bewertung von P4 wird der Prototyp als statisch einsetzbar eingestuft.

Gegenüber der glatten PTFE-Manschette unterscheidet sich der Prototyp durch die zusätzlichen Strukturen auf der Rückseite der ansonsten glatten PTFE-Manschette. Im

direkten Vergleich ist die statische Dichtheit des Prototyps nach 48 Stunden schlechter als die der glatten PTFE-Manschette ohne Rückförderstrukturen. Die glatte PTFE-Manschette weist nach 6 Stunden einen glitzernden Ölring im Dichtspalt auf, welcher sich bis zum Versuchsende nicht weiter vergrößert. Somit ist die statische Dichtheit des Prototyps mit einer Bewertung von P4 gegenüber der glatten PTFE-Manschette mit einer Bewertung von P5 verringert. Grund für die verringerte statische Dichtheit könnte in der um etwa 10 % geringeren Radialkraft liegen. Somit ist die Flächenpressung gegenüber der glatten PTFE-Manschette geringer und statische Leckagekanäle können nicht so gut verschlossen werden. Des Weiteren zeigte sich bereits in der Simulation, dass die Rückförderstrukturen im Dichtspalt nicht wie erhofft einen geschlossenen Kontaktbereich zwischen Manschette und Welle bilden. Somit wirken in den feinen Kanälen der Rückförderstrukturen Kapillarkräfte, welche statische Leckage begünstigen.

Zeit	RWDR	glatte Manschette	Prototyp	Spiralrille	bidirektionale Manschette
1 min	6	6	6	6	6
5 min	6	6	6	5	5
30 min	6	6	6	5	4
1 h	6	6	6	5	4
3 h	6	6	5	4	$> \!$
6 h	6	5	5	4	>
12 h	6	5	5	>*<	>
24 h	6	5	5	>2	
48 h	6	5	4	>2	
72 h	6	5	4		

 Tabelle 7.1:
 statische Dichtheit im Neuzustand

Im Vergleich zur PTFE-Manschette mit Spiralrille und der bidirektionalen PTFE-Manschette ist der Prototyp sehr gut statisch dicht. Die Spiralrille, welche der PTFE-Manschette ihre dynamische Dichtheit verleiht, fungiert im Stillstand als Leckagekanal. Bereits nach 12 Stunden tritt so viel Öl als Leckage aus, dass die PTFE-Manschette mit Spiralrille mit einer Bewertung von P3 als undicht kategorisiert wird. Nach 72 Stunden fließt die Leckage am Gehäuse der Prüfkammer ab (P1). Aufgrund der beiden geschlossenen Ringe im Dichtspalt sollte die statische Dichtheit der bidirektionalen PTFE-Manschette gegenüber der PTFE-Manschette mit Spiralrille überlegen sein. Die Untersuchung der bidirektionalen Manschette ergeben jedoch die schlechteste statische Dichtheit aller getesteten Dichtringe. Bereits nach 3 Stunden wird die bidirektionale PTFE-Manschette mit P3 als undicht eingestuft. Nach 12 Stunden kommt es zu einem Abfließen der Leckage am Gehäuse (P1).

Ein mit P6 ideales Ergebnis erzielt der klassische Elastomer-RWDR, welcher luftseitig kein Öl im Versuch aufweist. Grund hierfür ist das im Vergleich zu PTFE weiche Material, welches zuverlässig statische Leckagekanäle zwischen Dichtring und Welle verschließt.

Einlauf

Die Idee des neuen Ansatzes einer rückenstrukturierten PTFE-Manschette ist es, die statische Dichtheit entsprechend einer glatten PTFE-Manschette zu erzielen. In den durchgeführten Untersuchungen im Neuzustand wurde dieses Ziel nicht erreicht. Erfahrungsgemäß verbessert sich die statische Dichtheit von PTFE-Manschetten im Betrieb durch einen Einlaufverschleiß der Dichtringe. Aufgrund dessen wird eine Wiederholung der statischen Dichtheitsuntersuchung nach einem Einlauf durchgeführt. Hierfür werden die glatte PTFE-Manschette, der rückenstrukturierte Prototyp und die bidirektionale PTFE-Manschette trocken bei 1000 1/min für 3 Stunden im Prüfstand betrieben. Anschließend werden sie erneut in die statischen Dichtheit nach dem Einlauf. Die Vergleichswerte im Neuzustand sind dabei grau gekennzeichnet.

Zeit	glatte Manschette	Prototyp	bidirektionale Manschette
1 min	6	6	6
5 min	6	6	$5 \rightarrow 6$
30 min	6	6	$4 \rightarrow 5$
1 h	6	6	$4 \rightarrow 5$
3 h	6	5 → 6	3 → 5
6 h	$5 \rightarrow 6$	5 → 6	2 → 5
12 h	$5 \rightarrow 6$	5 → 6	1 → 5
24 h	5	$5 \rightarrow 5$	1 → 4
48 h	5	$4 \rightarrow 5$	1 → 4
72 h	5	$4 \rightarrow 5$	1 → 4

 Tabelle 7.2:
 Verbesserung der statischen Dichtheit durch Einlauf

Der Prototyp erreicht durch den Einlauf eine bessere statische Dichtheit. Während des Versuchs zeigt sich lediglich ein glitzernder Ölring im Dichtspalt, welcher bis zum

Versuchsende nicht größer wird. Somit verbessert sich die Bewertung des Prototyps durch den Einlauf von P4 auf P5 und liegt nun auf dem Niveau der glatten PTFE-Manschette.

Bei der glatten PTFE-Manschette zeigt sich durch den Einlauf nur zeitweise eine Verbesserung der Dichtheit nach 6 und 12 Stunden. Die statische Dichtheitsbewertung nach 72 Stunden bleibt mit P5 unverändert. Das Ziel einer statischen Dichtheit des Prototyps auf dem Niveau einer glatten PTFE-Manschette wird somit nach einem Einlauf des Prototyps erreicht.

An dieser Stelle soll die Verbesserung der statischen Dichtheit der bidirektionalen Manschette nicht unerwähnt bleiben. Durch den Einlaufverschleiß ändert sich deren statische Dichtheit um 3 Punkte. Nach 72 Stunden ist luftseitig nur ein leichter Ölfilm sichtbar, wodurch die Dichtung nach dem Einlauf mit einer Bewertung von P4 als statisch funktionsfähig eingestuft wird. Grund für die Verbesserung ist der Verschleiß im Einlauf, wodurch sich vermutlich die Anlage der eingebrachten Strukturen im Dichtspalt verbessert hat. Die drastische Änderung der Funktion der bidirektionalen PTFE-Manschette zeigt gleichzeitig das hauptsächliche Problem dieser Dichtung. Geringfügige Abweichungen von der idealen Anlage führen schnell zu einer Beeinträchtigung der Dichtwirkung.

REM-Aufnahmen

Um den Einfluss des Einlaufs von PTFE-Manschetten im Betrieb auf die statische Dichtheit genauer zu betrachten, werden REM-Aufnahmen der Manschettenoberfläche im Dichtspalt gemacht. Untersucht wird die Oberfläche des Prototyps im Neuzustand, nach einem Trockeneinlauf sowie nach 1000 Stunden Dauerlauf am Prüfstand. In Abbildung 7.11 sind die REM-Aufnahmen der drei Oberflächen dargestellt.

Auf der Oberfläche im Neuzustand sind deutlich Kratzer und Riefen in verschiedene Richtungen und feine Fasern zu erkennen. Außerdem sind Splitterstücke der Glashohlkugeln zu sehen, welche bei der Fertigung des PTFE-Compounds in die PTFE-Matrix eingebracht wurden.

Der Trockeneinlauf glättet die Oberfläche des PTFE-Compounds, wodurch sich die Verbesserung der statischen Dichtheit erklären lässt. Nach dem Einlauf sind nahezu keine Erhebungen, Fasern oder Glassplitter vorhanden. Riefen verlaufen aufgrund der Rotation hauptsächlich in Umfangsrichtung und sind somit für die statische Dichtheit unkritisch. Insgesamt zeigt sich eine deutlich glattere Oberfläche durch den Einlauf, welche lediglich einzelne, abgeschlossene Vertiefungen aufweist.



Abbildung 7.11: REM-Aufnahmen der PTFE-Oberfläche im Dichtspalt nach [83]

Nach einem 1000 Stunden Dauerlauf am Prüfstand zeigt sich eine ähnliche Einglättung der Oberfläche wie beim trockenen Einlauf. Jedoch sind die Vertiefungen nun gefüllt, wodurch die Oberfläche insgesamt noch glatter erscheint. Hierbei handelt es sich um Ölkohle, welche sich durch sehr hohe Temperaturen im Dichtspalt gebildet und in den Vertiefungen abgelagert hat.

Druckprüfung

Zusätzlich zu der drucklosen, statischen Dichtheitsuntersuchung wird eine statische Druckprüfung durchgeführt. Die Druckprüfung, auch Kalttest genannt, wird in der Industrie zur schnellen und kostengünstigen End- und Qualitätskontrolle eingesetzt. Um dieses Verfahren anwenden zu können, muss ein Dichtring gegenüber einem Luftdruck ausreichend abdichten können. Für die Durchführung der Druckprüfung wird die statische Prüfkammer mit einem Luftdruck von 2 bar gefüllt und luftdicht verschlossen. Gemessen wird die Zeit, in der der Luftdruck in der Kammer von 2 bar auf 1 bar abfällt. Die Prüfung wird mit bereits eingelaufenen und leicht benetzten Dichtringen durchgeführt.

In Tabelle 7.3 sind die Ergebnisse der statischen Druckprüfung entsprechend der Dichtwirkung der einzelnen Dichtringe aufgelistet. Beim Prototyp fiel der Druck in der Prüfkammer innerhalb von 21 Minuten auf 1 bar ab. Die mit 1 Stunde 45 Minuten beste Dichtheit erzielt der klassische Elastomer-RWDR, gefolgt von der glatten PTFE-Manschette mit 1,5 Stunden. Somit verliert der rückenstrukturierte Dichtring gegenüber der glatten PTFE-Manschette viermal schneller den Luftdruck.

1 h	45 min	-
1 h	30 min	-
-	21 min	-
-	-	28 s
-	-	15 s
	1 h 1 h - -	1 h 45 min 1 h 30 min - 21 min - - - -

Tabelle 7.3:	Ergebnisse der statischen	Druckprüfung nach	ı Einlauf
	0		

Zur Durchführung einer Endkontrolle oder Qualitätssicherung sollte die kürzere Haltezeit bis der Druck von 2 bar auf 1 bar abfällt ausreichend sein. Vergleicht man das Ergebnis des Prototyps mit der PTFE-Manschette mit Spiralrille oder der bidirektionalen PTFE-Manschette so relativiert sich die kürzere Haltezeit. Die bidirektionale PTFE-Manschette kann den Druck nur 28 Sekunden und die Spiralrille trotz Dichtsteg lediglich für 15 Sekunden halten. Somit ist der rückenstrukturierte Prototyp bei einer Druckprüfung gegenüber einer PTFE-Manschette mit Spiralrille mit Dichtsteg um den Faktor 80 überlegen. Das schlechte Ergebnis der bidirektionalen PTFE-Manschette wurde in dieser Weise nicht erwartet. Möglicherweise wird die Biegung der Manschette durch den Luftdruck derart verändert, dass die beiden geschlossenen Ringe nicht mehr korrekt auf der Welle aufliegen.

Zusammenfassung der statischen Dichtheit

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass der Prototyp statisch dicht ist. Die Dichtheit ist dabei vergleichbar mit einer glatten PTFE-Manschettendichtung. Ein großer Einfluss auf die Dichtheit von PTFE-Manschetten hat die Oberfläche im Dichtspalt. Je glatter die Oberfläche, desto besser ist die statische Dichtheit. Aufgrund dessen verbessert sich die Dichtheit des Prototyps durch einen Einlaufverschleiß im Betrieb. Gegenüber einer Spiralrille mit Dichtsteg kann der Prototyp Druckluft 80-mal besser abdichten. Ein Einsatz des Prototyps bei einer Druckprüfung zur End- oder Qualitätskontrolle ist somit möglich.

7.2.2 Dynamische Dichtheit

Die Beurteilung der dynamischen Dichtheit des Prototyps erfolgte bislang rein subjektiv über die Form der Rückförderstrukturen im Dichtspalt. Um die subjektiven Einschätzungen zur überprüfen wird im Folgenden die Funktion des Prototyps im Betrieb untersucht. Die dynamischen Untersuchungen werden an dem 24-Zellen Dauerlaufprüfstand des IMA durchgeführt. Vorgestellt werden zunächst die Ergebnisse der standardmäßigen Vorgehensweise entsprechend Kapitel 6.5.3. Diese Vorgehensweise gliedert sich in Förderwertmessung, Funktionsuntersuchung und Dauerlauf. Bei allen Messungen werden die Prüfkammern bis Wellenmitte mit Öl befüllt und auf 120 °C temperiert. Zur statistischen Absicherung werden insgesamt vier Prototypen getestet. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden parallel zwei glatte PTFE-Manschetten, zwei PTFE-Manschetten mit Spiralrille und zwei bidirektionale PTFE-Manschettendichtringe mit der identischen Vorgehensweise getestet.

Förderwertmessung

Um dynamische Dichtheit erreichen zu können, benötigen Dichtringe einen aktiven Rückfördermechanismus. Im ersten Schritt wird deshalb überprüft, ob die Rückförderstrukturen im Dichtspalt des Prototyps einen aktiven Rückfördermechanismus ausbilden. Hierzu bietet sich die inverse Förderwertmessung an, welche die Messung eines quantitativen Förderwerts bei unterschiedlichen Drehzahlen ermöglicht.

Abbildung 7.12 zeigt die gemessenen Förderwerte im Drehzahlbereich von 500 1/min bis 4500 1/min. Die Messungen zeigen, dass die Rückförderstrukturen des Prototyps eine sehr hohe Förderwirkung erreichen. Bereits bei 500 1/min werden

2 g/min gefördert. Die Förderwirkung steigt dabei mit der Drehzahl nahezu linear an. Bei einer Drehzahl von 4500 1/min erreicht der Prototyp einen Förderwert von 23 g/min. Die sehr gute Förderwirkung wird im Vergleich zu der getesteten PTFE-Manschette mit Spiralrille ersichtlich. Eine PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille gilt als besonders zuverlässig dynamisch dicht. Grund hierfür ist das hohe Rückfördervermögen der Spiralrille. Gegenüber der Spiralrille sind die gemessenen Förderwerte des Prototyps 4- bis 5-mal höher. Somit sollte der Prototyp aufgrund des hohen Rückfördervermögens eine gut dynamische Dichtheit erzielen können.

Die hohen Förderwerte bestätigen die Theorie, dass flache, lange Strukturen hydrodynamisch besonders wirkungsvoll sind. Ein großer Vorteil gegenüber der Spiralrille ist die Anzahl an Strukturen. Während die Spiralrille lediglich einen förderfähigen Kanal aufweist, besitzt der Prototyp 60 Förderstrukturen im Dichtspalt. An jeder einzelnen Förderstruktur wird konstant ein wenig Fluid umgelenkt. In Summe kann so, trotz eines geringen Förderquerschnitts zwischen zwei einzelnen Rückförderstrukturen, ein hoher Förderwert generiert werden.



Abbildung 7.12: Förderwert des Prototyps im Vergleich zur Spiralrille

Abbildung 7.13 zeigt die Förderwerte der bidirektionalen Manschette und der glatten Manschette. Bereits die um den Faktor 100 geringer gewählte Skalierung weist hier auf den Unterschied zum Prototyp hin. Die Förderwerte der bidirektionalen Manschette sind mit unter 0,1 g/min sehr gering. Die glatte Manschette kann prinzipbedingt keine Förderwirkung aufbauen. Die gemessenen Förderwerte der glatten Manschette zeigen deshalb den konzeptionellen Nachteil der inversen Förderwertmessung. Die inverse Förderwert bidirektionalen Gerine Dichtrings zusätzlich als aktiven Förderwert. Die Messwerte der glatten Manschette sind aufgrund des fehlenden Rückfördervermögens nur auf Leckage zurückzuführen. Die austretende Leckagemenge ist jedoch sehr gering, weshalb dieser Fehler bei den hohen Förderwerten des Prototyps vernachlässigt werden kann.

Zusammenfassend bescheinigen die hohen Förderwerte dem Prototyp einen sehr effektiven Rückfördermechanismus.



Abbildung 7.13: Förderwert der glatten und bidirektionale Manschette

Funktionsuntersuchung

Im zweiten Schritt wird die Funktion des Prototyps überprüft. Ziel ist, dass im Betrieb des Dichtrings keine Leckage austritt und der Prototyp vollständige dynamische Dichtheit erreicht. Für diese Funktionsuntersuchungen werden die Dichtringe nach der Förderwertmessung gedreht eingebaut und die Leckage im Abdichtbetrieb bei unterschiedlichen Drehzahlen gemessen. Abbildung 7.14 zeigt die gemessene Leckage im untersuchten Drehzahlbereich von 1000 1/min bis 9000 1/min.

Bei allen vier getesteten Prototypen konnte in diesem Versuch kein Austreten von Leckage festgestellt werden. Somit erzielt der Prototyp über den gesamten untersuchten Drehzahlbereich vollständige dynamische Dichtheit.

Ebenfalls vollständige dynamische Dichtheit im Versuch erreicht die PTFE-Manschette mit Spiralrille. Die bidirektionale PTFE-Manschette zeigt bis 6000 1/min eine geringe Leckage, welche bei 9000 1/min jedoch deutlich ansteigt. Die glatte PTFE-Manschette erzeugt über den gesamten Drehzahlbereich die meiste Leckage.



Abbildung 7.14: Leckage bei unterschiedlichen Drehzahlen

Dauerlauf 72 h

Im letzten Schritt wird die Funktion des Prototyps im Dauerlauf überprüft. Hierzu werden die Dichtringe im Abdichtbetrieb bei 6000 1/min betrieben und halbtäglich die Leckage erfasst. Alle 24 Stunden wird zusätzlich eine Förderwertmessung nach der Einspritzmethode durchgeführt. Hierdurch können Veränderungen der Dichtwirkung der Dichtringe auch ohne austretende Leckage erkannt werden.

Abbildung 7.15 zeigt die Ergebnisse des Dauerlaufs. Bei keinem der vier getesteten Prototypen tritt während des Dauerlaufs Leckage aus. Ebenfalls vollständig dicht zeigt sich die PTFE-Manschette mit Spiralrille.



Abbildung 7.15: Leckage im Dauerlauf

Sowohl der Prototyp als auch die Spiralrille fördern die 50 μ l der Einspritzmethode bei 500 1/min mit unter 5 Sekunden sehr schnell in die Prüfkammer. Ein Abfall der Förderwirkung mit der Zeit kann nicht festgestellt werden. Die Leckage der glatten Manschette war mit durchschnittlich 70 g/12h sehr hoch.

Neben der glatten Manschette zeigt die bidirektionale Manschette konstant Leckage im Dauerlauf, Abbildung 7.16. Die gemessenen Leckagewerte sind mit durchschnittlich 0,06 g/12h sehr gering.



Abbildung 7.16: Leckage im Dauerlauf ohne glatte Manschette

Förderwertmessung nach Dauerlauf

Aufgrund der positiven Resultate des Prototyps in den durchgeführten Untersuchungen wird nach dem Dauerlauf außerplanmäßig die inverse Förderwertmessung wiederholt. Hierdurch soll ein möglicher Einfluss von Verschleiß auf die Funktion des Dichtrings genauer betrachtet werden. Abbildung 7.17 zeigt eine Gegenüberstellung der Förderwerte der vier getesteten Prototypen im Neuzustand und den Förderwerten nach dem Dauerlauf.

Eine durchgehende Verringerung der Förderwerte und damit der Verschlechterung der Dichtwirkung kann nicht identifiziert werden. Bei 2000 1/min und 3000 1/min weisen manche Dichtringe nach dem Dauerlauf sogar höhere Förderwerte als im Neuzustand auf. Lediglich eine Zunahme der Streuung im Vergleich zu den Messungen im Neuzustand ist zu beobachten. Die Zunahme der Streuung ist vermutlich auf die Folgen des häufigen Aus- und Einbaus der Dichtringe zurückzuführen.



Abbildung 7.17: Förderwerte vor und nach Dauerlauf

Zusammenfassung der dynamischen Dichtheit

Zusammenfassend zeigen die dynamischen Dichtheitsuntersuchungen, dass die selbständig gebildeten Rückförderstrukturen des rückenstrukturierten Prototyps hydrodynamisch sehr effektiv sind. Im Versuch förderte der Prototyp sehr viel Öl. Gegenüber einer PTFE-Manschette mit Spiralrille sind die Förderwerte trotz feinerer Rückförderstrukturen 4- bis 5-mal höher. Der Prototyp erzielte im Drehzahlbereich bis 9000 1/min vollständige Dichtheit. Diese Dichtheit blieb auch im Dauerlauf über 72 Stunden bestehen. Der Rückfördermechanismus zeigte auch bei längerem Betrieb keinerlei Anzeichen einer Verschlechterung der Wirkung. Ein Wegverschleißen der feinen Rückförderstrukturen im Dichtspalt im Betrieb findet somit nicht statt.

7.2.3 Einsatzgrenzen des Prototyps

In den bislang vorgestellten dynamischen Dichtheitsuntersuchungen erzielte der Prototyp durchweg positive Resultate. In keinem der dynamischen Versuche konnte Leckage festgestellt werden. Um die Einsatzgrenzen des Prototyps genauer zu identifizieren werden weitere Versuche außerhalb der standardmäßigen Vorgehensweise durchgeführt.

Dauerlauf 1000 h

Um den Einfluss von Verschleiß im Betrieb auf die Funktion des Prototyps genauer zu untersuchen, wird mit zwei der vier untersuchten Dichtringe ein zusätzlicher Dauerlauf über 1000 Stunden durchgeführt. Die Drehzahl im Dauerlauf beträgt 6000 1/min bei einer Ölsumpftemperatur von 120 °C. Nach 100 h, 500 h und 1000 h wurde der Dauerlauf kurz unterbrochen um eine Förderwertmessung bei 500 1/min mit der Einspritzmethode durchzuführen.

Beide Dichtringe zeigen während des gesamten Dauerlaufs keine Leckage und sind dynamisch vollständig dicht. Die Dichtringe benötigen für das Zurückfördern der eingespritzten 50 µl nach 100 h Laufzeit jeweils 3 s und nach einer Laufzeit von 500 h durchschnittlich 4,5 s. Erst am Ende des Dauerlaufs über 1000 h wird eine leichte Verringerung der Förderwirkung gemessen. Durchschnittlich benötigten die beiden Dichtringe am Versuchsende 16 s, um das eingespritzte Fluid zurückzufördern. Bei den benötigten 16 s handelt es sich immer noch um eine im Vergleich mit anderen Dichtungen sehr hohe Förderwirkung des Prototyps. Auf Grund des leckagefreien Betriebs über 1000 h und den am Versuchsende immer noch intakten Rückfördermechanismus kann der rückenstrukturierte Prototyp als dauerfest eingestuft werden. Die ursprünglich getätigte Annahme, dass die feinen Rückförderstrukturen im Dichtspalt trotz Verschleiß erhalten bleiben, werden somit bestätigt. Messtechnisch konnte keine Verringerung der PTFE-Manschettendicke durch den Verschleiß im Dauerlauf erfasst werden. Der Verschleiß zeigt sich lediglich optisch durch eine Einglättung der Manschettenoberfläche im Dichtspalt (siehe Abbildung 7.11).

Geschwindigkeit

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der Prototyp im Drehzahlbereich bis 9000 1/min vollständig dicht ist. Je höher die Drehzahl, desto komplexer wird es für einen Dichtring zuverlässig abzudichten. Grund hierfür sind die steigenden hydrodynamischen Kräfte, wodurch der Dichtring auf einem immer dickeren Schmierfilm aufschwimmt. Des Weiteren steigt durch die hohen Umfangsgeschwindigkeiten die Reibwärme, wodurch gegenüber der Ölsumpftemperatur sehr hohe Temperaturen im Dichtspalt entstehen können. Um die Drehzahlgrenzen des Prototyps auszuloten, werden Versuche am Hochgeschwindigkeitsprüfstand des IMA durchgeführt. Untersucht werden zwei Prototypen. Die Prüfkammer wird im Versuch bis zur Wellenmitte mit Öl gefüllt und auf 120 °C temperiert. Als Wellen werden Nadellagerinnenringe mit einer polierten Oberfläche eingesetzt. Grund hierfür sind Drallstrukturen auf den gelieferten Wellen, welche durch das nachträgliche Polieren egalisiert werden. Durch die glattere Wellenoberfläche kommt es im Vergleich zu geschliffenen Wellen tendenziell zu einer geringeren Hydrodynamik und somit zu einer noch höheren thermischen Belastung im Versuch. Die Drehzahl während des Versuchs wird schrittweise auf bis zu 18000 1/min erhöht und austretende Leckage gemessen.

Im gesamten untersuchten Drehzahlbereich wird bei beiden Dichtringen keine Leckage am Prüfstand erfasst. Der Prototyp ist somit auch bei Drehzahlen bis 18000 1/min beziehungsweise einer Umfangsgeschwindigkeit von 75 m/s vollständig dicht.

Exzentrizität

Neben hohen Drehzahlen stellt die Exzentrizität für Wellendichtringe eine große Herausforderung dar. Deshalb wird der Prototyp in den folgen Versuchen gezielt exzentrisch betrieben und die austretende Leckage erfasst. Die Prüfkammer wird im Versuch bis zur Wellenmitte mit Öl gefüllt und auf 120 °C temperiert. Entsprechend den Hochgeschwindigkeitsversuchen werden geschliffene Nadellagerinnenringe mit nachträglich polierter Oberfläche eingesetzt. Untersucht werden Drehzahlen von 500 bis 6000 1/min.

Die Exzentrizität eines Dichtrings kann in eine statische und dynamische Exzentrizität unterschieden werden. Bei der statischen Exzentrizität ist die Achse des Dichtrings zur Rotationsachse versetzt. Hierdurch ist die Anpressung des Dichtrings auf einer Wellenseite konstant erhöht, während die Anpressung auf der gegenüberliegenden Seite verringert wird. Bei der dynamischen Exzentrizität ist die Wellenachse zur Drehachse versetzt. Im Betrieb resultiert hierdurch für den Dichtring eine ständige Auf- und Abbewegung der Dichtkante durch den unrunden Lauf der Welle. Die Exzentrizität ε entspricht dabei dem Abstand des Achsversatzes, Abbildung 7.18. Somit ergibt eine dynamische Exzentrizität ε eine Bewegung der Dichtkante von 2ε . Untersucht werden statische Exzentrizitäten bis 0,3 mm und dynamische Exzentrizitäten bis 0,5 mm.

Der Prototyp zeigt bei statischer Exzentrizität im Versuch dynamisch keine Leckage. Auch bei den Versuchen mit dynamischer Exzentrizität ist der Prototyp dynamisch dicht. Ab einem dynamischen Achsversatz von etwa 0,3 mm kommt es vereinzelt bei Versuchsbeginn zu einer geringen Leckage, welche in der Regel vom Dichtring mit der Zeit wieder zurückgefördert wird. Grund hierfür liegt in der viskoelastischen Verformung des Dichtrings durch die Stillstandsphasen zwischen den einzelnen Versuchen. Die Verformung des Dichtrings erzeugt ein kurzzeitiges, lokales Abheben der PTFE-Manschette, sobald die Welle zu rotieren beginnt. Hierdurch kann es zu Leckage kommen. Im Betrieb verformt sich der Dichtring wieder zurück, wodurch er seine volle Funktionsfähigkeit wieder erreicht. Derselbe Effekt wurde von Schwenk [74] bei Elastomer-RWDR beobachtet.

Lange Stillstandsphasen sollten daher bei hoher dynamischer Exzentrizität vermieden werden. Durch die starke Bewegung der Manschette aufgrund des Betriebs bei großer dynamischer Exzentrizität steigt der Anteil der plastischen Verformung. Die Radialkraft verringert sich auf etwa 35 N. Als Folge der geringen Radialkraft kommt es zu einer Verschlechterung der statischen Dichtheit des Prototyps.

Die Funktion des Prototyps ist somit auch bei hohen Exzentrizitäten bis 0,5 mm gegeben. Ab einer dynamischen Exzentrizität von > 0,3 mm kann es zu einer Verringerung der statischen Dichtheit oder kurzzeitigen Leckage nach Stillstandsphasen kommen.



Abbildung 7.18: statische und dynamische Exzentrizität

Reibmoment

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen Dichtung, welche statische und dynamische Dichtheit sowie thermische und chemische Resistenz in einem robusten und zuverlässigen Design vereint. Eine Minimierung der Reibungsverluste steht dabei nicht im Fokus der Entwicklung, weshalb auf eine detaillierte Untersuchung und Optimierung der Leistungsverluste verzichtet wird. Zur Einordnung des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen werden einmalig die Reibmomente im Vergleich zu anderen Dichtungen an dem Hochgeschwindigkeits-Universalprüfstand untersucht. Abbildung 7.19 zeigt die bei einer Drehzahl von 6000 1/min gemessenen Reibmomente. Das Reibmoment des Prototyps beträgt bei dieser Drehzahl 0,37 Nm, was einem Leistungsverlust von 232 W entspricht. Gegenüber dem rückenstrukturierten Prototyp erzeugt die PTFE-Manschette mit Spiralrille etwa ein Drittel weniger Reibung, während der Elastomer-RWDR etwa ein Drittel mehr Reibung erzeugt. Die Reibung der gemessenen, glatten PTFE-Manschette ohne Rückförderstrukturen entspricht nahezu der Reibung des Prototyps.



Abbildung 7.19: Reibmoment bei einer Drehzahl von 6000 1/min

Speziell auf Reibungsverluste optimierte Wellendichtringe aus PTFE oder FKM erzeugen bei identischen Bedingungen Reibmomente im Bereich von 0,1 Nm. Vergleichbare, gasgeschmierte Gleitringdichtungen erzielen nochmals geringere Reibmomente im Bereich von 0,025 Nm [75].

Rückwärtslauf

Bei allen bislang gezeigten Untersuchungen wurde die Welle in die für den Prototyp vorgesehene Betriebsrichtung gedreht. In der Realität finden sich solche Einsatzbedingungen beispielsweise bei der Abdichtung von Kurbelwellen bei Verbrennungsmotoren, wo bislang bevorzugt PTFE-Manschetten mit Spiralrille eingesetzt werden. Solche Dichtstellen drehen stets in dieselbe Richtung.

Zur Vergrößerung der Einsatzbereiche, wäre ein möglicher Betrieb des Prototyps auch bei kurzzeitigem Rückwärtslauf wünschenswert. Um den Einsatz im Rückwärtslauf zu untersuchen, werden die Dichtringe aus der standardmäßigen Untersuchung kurzzeitig im Rückwärtslauf betrieben und die Leckage erfasst. Dieser Rückwärtslauf erfolgt zwischen der Funktionsuntersuchung und dem Dauerlauf.

Abbildung 7.20 zeigt die Leckage im Rückwärtslauf bei -1000 1/min. Erwartungsgemäß tritt bei der glatten Manschette aufgrund ihrer guten Drosselwirkung und bei der bidirektionalen Manschette aufgrund ihrer Auslegung für beide Drehrichtungen nur geringfügig Leckage aus. Ein kurzzeitiger Einsatz im Rückwärtslauf wäre bei diesen Dichtringen unbedenklich.



Abbildung 7.20: Leckage im Rückwärtslauf bei -1000 1/min

Bei dem Prototyp und der PTFE-Manschette mit Spiralrille kommt es im Rückwärtslauf schnell zu einer deutlichen Leckage. Grund hierfür sind die Rückförderstrukturen, welche die dynamische Dichtheit erzeugen. Dreht sich die Welle rückwärts, so saugen diese Rückförderstrukturen Öl an und pumpen dies aktiv in Richtung Luftseite, Abbildung 7.21. Ein Einsatz des Prototyps im Rückwärtslauf ist somit nicht möglich.





7.2.4 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen bestätigen die Theorie des neuen Dichtungsansatzes. Durch die Strukturierung der PTFE-Manschette auf der Rückseite bleibt der Dichtspalt nahezu glatt. Hierdurch erreicht der rückenstrukturierte Prototyp im Versuch die geforderte statische Dichtheit einer glatten PTFE-Manschettendichtung. In den statischen Versuchen zeigte sich dabei, dass die Güte der Dichtheit insbesondere von der Oberfläche der PTFE-Manschette abhängig ist. Je glatter die Oberfläche im Dichtspalt, desto besser ist die statische Dichtheit. Aufgrund dessen verbessert sich die Dichtheit von PTFE-Manschetten durch einen Einlauf im Betrieb. Aufgrund seiner ausreichenden statischen Dichtheit kann der rückenstrukturierte Prototyp auch bei einer Luftdruckprüfung zur End- oder Qualitätskontrolle eingesetzt werden.

Die dynamischen Untersuchungen bestätigen die subjektiven Einschätzungen, welche bereits mit Hilfe der Simulationsergebnisse getätigt wurden. Die feinen schräg gerichteten Rückförderstrukturen im Dichtspalt des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen sind hydrodynamisch äußerst effektiv. Die gemessenen Förderwerte konstatieren dem Prototyp einen aktiven Rückfördermechanismus, welcher einer PTFE-Manschette mit Spiralrille überlegen ist. Der wirkungsvolle Rückfördermechanismus verhilft dem rückenstrukturierten Prototyp zu einer sehr guten dynamischen Dichtheit auch bei hohen Drehzahlen oder Exzentrizität. Der Prototyp zeigte selbst bei 18000 1/min (75 m/s Gleitgeschwindigkeit) keine Leckage. Die feinen Rückförderstrukturen bleiben auch bei einem Verschleißen der PTFE-Manschette im Dauerlauf erhalten. Somit kam es auch im Dauerbetrieb über 1000 h zu keinem Verlust des Rückfördervermögens.

Zusammenfassend ergeben sich aus den experimentellen Untersuchungen folgende Vorteile des rückenstrukturierten Prototyps:

- gute statische Dichtheit vergleichbar mit einer glatten PTFE-Manschette
- statische Druckprüfung zur End- oder Qualitätskontrolle möglich
- wirkungsvoller Rückfördermechanismus mit hohen Förderwerten
- Dichtheit auch bei hohen Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten
- Funktion auch bei statischer und dynamischer Exzentrizität
- Dauerfest kein Verlust des Rückfördermechanismus im Dauerlauf

Als Nachteil stellte sich der Betrieb im Rückwärtslauf heraus. Dreht sich die Welle rückwärts, so saugt der Fördermechanismus des Prototyps aktiv Öl an. Dieses Öl wird im Folgenden durch den Dichtspalt gepumpt und tritt als Leckage auf der Luftseite des Dichtrings aus. Ein Einsatz des Dichtrings ist bei einem Rückwärtsbetriebs der Welle somit nicht möglich. Des Weiteren ist der Prototyp nicht bezüglich Reibung optimiert. Werden möglichst geringe Reibungsverlust gewünscht, ist der Einsatz des Prototyps in der derzeitigen Form nicht empfehlenswert.

7.3 Zusammenfassung der Prototypenergebnisse

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen Dichtung, welche statische und dynamische Dichtheit sowie thermische und chemische Resistenz in einem robusten und zuverlässigen Design vereint.

Erreicht werden sollte dieses Ziel mit Hilfe eines neuen Dichtungsansatzes. Der neue Ansatz besteht darin, Strukturen auf der Rückseite einer ansonsten glatten PTFE-Manschette einzubringen. Ziel ist es durch gezielte Steifigkeitsänderungen die Kontaktpressungsverteilung im glatten Dichtkontakt zu beeinflussen. Hierzu wurde ein Prototyp mit 60 sichelförmigen Strukturen auf der Rückseite der ansonsten glatten PTFE-Manschette entwickelt und untersucht.

Die simulativen und experimentellen Ergebnisse bestätigen die Theorie des neuen Dichtungsansatzes. Durch Strukturen auf der Rückseite einer PTFE-Manschettendichtung kann die Steifigkeit der Manschette gezielt geschwächt werden. In Bereichen, in denen die Manschette geschwächt wird, wird bei der Montage die Dehnung und Einschnürung konzentriert. Infolge dessen wird dort die Anpressung verringert, oder es hebt sich die PTFE-Manschette von der Welle ab und es entsteht ein Kanal. Die Untersuchungen zeigen, dass schräge Kanäle im Dichtspalt des Prototyps selbständig bei der Montage erzeugt werden. Die gemessenen Kanalhöhen im Dichtspalt sind dabei mit maximal 50 µm sehr gering. Die Idealvorstellung der Pressungsverteilung im Dichtspalt entsprechend Abbildung 4.7 wurde durch den Prototyp nicht erzielt. Sowohl in der Simulation als auch in der Realität kommt es im Dichtspalt zu keinem am gesamten Umfang geschlossenen Kontaktbereich.

Im Versuch erzielte der Prototyp trotz unterbrochenem Kontaktbereich die gewünschte statische Dichtheit einer glatten Manschette. Die Güte der statischen Dichtheit zeigte sich dabei abhängig von der Oberfläche der Manschette. Je glatter die Oberfläche, desto besser ist die statische Dichtheit. Aufgrund dessen verbessert sich die Dichtheit des Prototyps durch einen Einlaufverschleiß im Betrieb. Anders als bestehende PTFE-Manschetten mit Rückförderstrukturen kann der Prototyp auch bei einer statischen Luftdruckprüfung zur End- oder Qualitätskontrolle eingesetzt werden.

Als Vorteil der rückenstrukturierten PTFE-Manschetten erweist sich die einfache Fertigung. Durch Einbringen von Rückenstrukturen mit Tiefen im zehntel Millimeterbereich werden bei der Montage sehr feine Kanäle im Mikrometerbereich erzeugt. Dieser Effekt verhilft dem Prototyp auch zu seinem robusten und zuverlässigen Design. Veränderungen der Position und Tiefe der eingebrachten, sichelförmigen Rückenstrukturen oder der Überdeckung zeigen in der Simulation einen geringen Einfluss auf die erzeugten Rückförderstrukturen im Dichtspalt. Somit kann der Prototyp mit sichelförmigen Rückenstrukturen auch bei großen Fertigungs- und Montagetoleranzen zuverlässig eingesetzt werden. Die gemessenen Förderwerte weisen dem Prototyp einen wirkungsvollen Rückfördermechanismus zu, welcher zu einer sehr guten dynamischen Dichtheit auch bei hohen Drehzahlen oder Exzentrizität führt. Der Prototyp zeigte selbst bei 18000 1/min (75 m/s Gleitgeschwindigkeit) keine Leckage. Der Grund für die ausgezeichnete dynamische Dichtheit liegt in den flachen Rückförderstrukturen. Flache und im Verhältnis lange Strukturen sind hydrodynamisch besonders effektiv. Der Einsatz solch feiner Strukturen im Dichtspalt von Elastomer- oder Kunststoffdichtungen war bislang nicht möglich. Grund hierfür ist die aufwendige Fertigung, die erforderlich ist, um solch feine Strukturen im Dichtspalt aufzubringen. Des Weiteren würden diese feinen Strukturen schnell verschleißen und ihre Wirkung verlieren.

Im Dauerbetrieb über 1000 h zeigte der Prototyp keine Leckage und kein Verlust des Rückfördervermögens. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die feinen Rückförderstrukturen des Prototyps auch bei einem Verschleißen der PTFE-Manschette erhalten bleiben, solange die Steifigkeitsreduzierung infolge der Rückenstrukturen bestehen bleibt.

Zusammenfassend konnte mit dem rückenstrukturierten Prototyp das Ziel einer statisch und dynamisch dichten sowie thermisch und chemisch resistenten Dichtung in einem robusten und zuverlässigen Design verwirklicht werden.

8 Funktionsanalyse und Optimierung

Die Zielsetzung dieser Arbeit wurde durch die Entwicklung des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen erreicht. Die positiven Ergebnisse des Prototyps zeigen ein großes Potential des neuen Dichtungsansatzes mit rückenstrukturierten PTFE-Manschetten. Im Folgenden Kapitel werden das Funktionsverhalten unterschiedlich geformter Rückenstrukturen sowie Optimierungsmöglichkeiten zur Ausweitung des Einsatzbereiches betrachtet. Des Weiteren wird überprüft, ob die Funktion des neuen Dichtungsansatzes auch beim Einsatz anderer Werkstoffe möglich ist. Zum Schluss werden Gestaltungshinweise für die Entwicklung von Rückenstrukturen gegeben.

8.1 Biegelinie und Anlagebereich

Für die Untersuchung des Funktionsverhaltens unterschiedlicher Rückenstrukturen wird zunächst die Biegelinie und Anlage der PTFE-Manschette angepasst. Grund hierfür ist der nur 2,5 mm breite Anlagebereich des Prototyps. Je schmäler der Analgebereich, desto eingeschränkter ist die mögliche Erzeugung und Gestaltung unterschiedlicher Rückförderstrukturen im Dichtkontakt durch unterschiedliche Rückenstrukturen. Um für die Gestaltung und Funktionsanalyse neuer Förderstrukturen mehr "Spielraum" zu erhalten, wird ein breiterer, flach anliegender Kontaktbereich angestrebt.

Die Beeinflussung der Biegelinie und Anlage der PTFE-Manschette kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. In der Regel geschieht dies durch Anpassungen der Überdeckung und der Manschettendicke oder durch lokalen Materialauf- oder abtrag an der Manschette. Am häufigsten eingesetzt werden umlaufende Nuten und Rillierungen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Biegelinie durch umlaufende Nuten beeinflusst. Der Vorteile dieser Methode ist, dass keine unterschiedlichen PTFE-Rohlinge benötigt werden und die umlaufenden Strukturen im selben Arbeitsschritt mit den Rückenstrukturen gefertigt werden können.

Die Auslegung der umlaufenden Nuten erfolgt mit Hilfe von 2D-Simulationen der Biegelinie. Zunächst werden Manschetten mit einer einzelnen umlaufenden, 0,4 mm tiefen Nut betrachtet. Variiert wird der Abstand der Nut vom Innendurchmesser des Rohlings. Abbildung 8.1 zeigt die Biegelinie der Manschette je nach Position der umlaufenden Nut.



Abbildung 8.1: Biegelinien mit einer einzelnen umlaufenden Nut nach [84]

Als geeignet erscheint eine einzelne umlaufende Nut mit einem Abstand von 4,25 mm vom Innendurchmesser. Die Manschette knickt an dieser Nut ein, wodurch ein flacher, 4 mm breiter Anlagebereich erzeugt wird. Jedoch wird die Manschette an der einzelnen umlaufenden Nut stark geschwächt. In der Realität kommt es an der einzelnen Nut durch das extreme Knicken zu einem Versagen der Dichtung im Nutgrund.

Um das extreme Knicken im Nutgrund zu unterbinden, werden weitere Varianten mit zwei Nuten untersucht. Die erste Nut stellt den flachen, breiten Anlagebereich sicher. Die zweite Nut gestaltet den Biegebereich flacher und entlastet somit die erste Nut. Abbildung 8.2 zeigt die simulierten Biegelinien bei unterschiedlicher Positionierung der beiden umlaufenden Nuten. Die Ergebnisse führen zu zwei Erkenntnissen. Wenn die beiden Nuten zu weit außen liegen, wird nicht der gewünschte flache Anlagebereich generiert. Werden die beiden Nuten zu weit innen platziert, so bildet sich an der zweiten Nut ein starker Knick aus. Die als Grundlage für das weitere Vorgehen ausgewählte mittlere Variante mit 3,75 mm Abstand vom Innendurchmesser weist eine relativ gleichmäßige Biegung in beiden Nuten auf.

Da die Biegekräfte in der Manschette von außen nach innen abnehmen, ist eine Zweifachnut mit zwei gleich tiefen Nuten nicht zielführend. Aufgrund dessen werden unterschiedlich tiefe Nuten untersucht. Dabei zeigen sich zwei Extremfälle. Ist die innere Nut im Verhältnis zur äußeren Nut zu tief, kommt es zu einem zu starken Knicken an der inneren Nut. Ist die äußere Nut im Verhältnis zur inneren Nut zu tief, so wird der gewünschte flache Anlagebereich nicht generiert, Abbildung 8.3.



Abbildung 8.2: Biegelinie mit zwei umlaufenden Nuten nach [84]

Für den gewünschten flachen und breiten Anlagebereich können PTFE-Manschetten mit einer Innen- zu Außennuttiefe von (0,4/0,3), (0,4/0,2) oder (0,3/0,2) eingesetzt werden. Aufgrund der geringeren Schwächung der Manschette werden als Grundlage für die Optimierung der rückenstrukturierten Manschette eine Zweifachnut mit einer Nuttiefe von 0,3 mm innen und 0,2 mm außen gewählt, Abbildung 8.4.



Abbildung 8.3: Beeinflussung des Anlagebereichs durch Zweifachnuten mit unterschiedlichen Nuttiefen nach [84]



Abbildung 8.4:Biegelinie des Prototyps und der modifizierten Manschette mit Zweifachnut
(0,3 mm / 0,2 mm)

Die Simulationsergebnisse von drei oder mehr Nuten zeigen, dass die beiden Nuten mit größtem und kleinstem Durchmesser den größten Teil der Biegung aufnehmen, während die mittleren Nuten nahezu keine Funktion haben. Werden viele Nuten eingesetzt, so wird ein gleichmäßiger Biegeradius erzeugt, welcher nicht zu der gewünschten Verbreiterung des Anlagebereichs führt. Neben dem Einbringen von Strukturen auf der Manschette könnte der Anlagebereich auch durch einen gezielten Montageprozess beeinflusst werden. Einfluss kann hierbei über die Geometrie des Montagedorns sowie einer Verkleinerung des Durchmessers der Einspannung der Manschette genommen werden. Als geeignete Variante erweist sich dabei eine Verkleinerung des Einspanndurchmessers sowie ein Montagedorn mit stark verkürzter Einfahrschräge [85].

8.2 Unidirektional

Im Folgenden wird eine Optimierung des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen durchgeführt. Zielsetzung der Optimierung ist eine Reduzierung der Leckage im Rückwärtslauf. Die optimierte Dichtung soll im Gegensatz zum Prototyp auch bei einem kurzzeitigen Rückwärtsbetrieb eingesetzt werden können. Hierfür wird ein geschlossener Kontaktbereich entsprechend Abbildung 8.5 angestrebt. Der ölseitig geschlossene Kontakt soll die Pumpwirkung des Dichtrings im Rückwärtslauf und somit die austretende Leckage minimieren.



Abbildung 8.5: Kontaktbereich des Prototyps sowie idealer Kontaktbereich

Bei der erstmaligen Montage eines PTFE-Rohlings auf einer Welle wird die Manschettenform durch Biegung und Aufweitung des Rohlings erzeugt. Die dabei erzeugten Spannungen nehmen von der Manschettenspitze in Richtung Manschetten-Einspannung ab (siehe Abbildung 4.3). Grund hierfür ist die stärkere Aufweitung des Rohlings auf Wellenmaß durch die größere Überdeckung an der Manschettenspitze. Durch die großen Verformungen bei der Montage wird die PTFE-Manschette lokal plastisch verformt.

Bei der Auslegung neuer Rückenstrukturen kann der Einfluss einer Rückenstruktur auf die erzeugte Pressungs- und Höhenverteilung im Dichtspalt nicht für sich isoliert betrachtet werden. Grund hierfür ist, dass der Einfluss einer Rückenstruktur durch die lokale Steifigkeitsverringerung von der Gesamtsteifigkeit der Manschette abhängig ist. Deshalb müssen bei der Auslegung neuer Rückenstrukturen stets alle Rückenstrukturen am Umfang gesamtheitlich betrachtet werden.

Die genannten Eigenschaften der PTFE-Manschette erschweren eine gezielte Optimierung der Rückenstrukturen. Da bisher keine Kenntnisse vorhanden sind, wie Rückenstrukturen die Pressungs- und Höhenverteilung beeinflussen, werden viele Simulationen mit unterschiedlichen Rückenstrukturen durchgeführt. Simuliert werden zunächst einfache Geometrien und deren Auswirkung auf die Höhen- und Pressungsverteilung im Dichtspalt wird betrachtet. Mit dem Wissen aus diesen Simulationen erfolgt die gezielte Entwicklung optimierter Rückenstrukturen. Aus der Vielzahl der neuen Rückenstrukturen können nur wenige experimentell untersucht werden. Ein Großteil der hier nicht besprochenen Simulationen sind deshalb im Anhang dieser Arbeit abgebildet. Des Weiteren werden die wichtigsten Erkenntnisse zur Gestaltung von Rückförderstrukturen in Kapitel 8.5 erläutert.

8.2.1 Rückenstrukturen

Neben dem Prototyp mit sichelförmigen Rückenstrukturen werden drei optimierte Varianten experimentell untersucht. Abbildung 8.6 zeigt die simulierte Höhen- und Pressungsverteilung der drei Varianten im Vergleich zum Prototyp.

Die erste neue Variante ergänzt die 60 sichelförmigen Rückenstrukturen des Prototyps um zwei umlaufende Nuten (Tiefe 0,3 mm / 0,2 mm). Diese Änderung führt zu einer Verbreiterung der Kontaktfläche und zu längeren Kanälen im Dichtspalt. Im Vergleich mit dem Prototyp kann somit untersucht werden, inwiefern ein breiterer Analgebereich und längere Kanäle die Funktion des Dichtrings beeinflussen. Aufgrund der hohen Förderwerte des Prototyps wird die Tiefe der Rückenstrukturen um 0,1 mm auf 0,3 mm verringert

Die Rückenstrukturen der zweiten Variante sind wie ein Sägezahn geformt. Die Rückenstruktur ist am Innendurchmesser breiter und wird nach außen hin schmäler. Diese Form wird aufgrund der von innen nach außen abnehmenden Umfangsdehnung der montierten PTFE-Manschette gewählt. Je schmäler der abgetragene Bereich in Umfangsrichtung, desto fokussierter ist die Einschnürung im Bereich der Rückenstruktur. Folglich erhöht sich die Kanalhöhe der Rückförderstrukturen im Dichtspalt. Somit erzeugt eine Sägezahnstruktur einen Kanal im Dichtspalt, der zur Luftseite hin höher wird. Eine dritte umlaufende Nut nahe des Innendurchmessers der Manschette sorgt für ein ölseitiges Schließen des Kanals. Durch einen geschlossenen ölseitigen Kanal soll ein aktives Fördern des Dichtrings im Rückwärtslauf unterbunden und die Dichtwirkung im Rückwärtslauf verbessert werden. Im Vergleich zum Prototyp und der ersten Variante werden nur 20 Sägezahnstrukturen am Umfang der Dichtung eingebracht. Die Tiefe der Sägezahnstrukturen beträgt 0,3 mm.

Die dritte Variante entspricht weitestgehend der Sägezahnform der Variante zwei. Der Unterschied liegt hauptsächlich in der Anzahl der eingebrachten Sägezahnstrukturen, welche auf 40 Stück verdoppelt wird. Je mehr Rückenstrukturen auf einer Manschette vorhanden sind, desto geringer ist die Gesamtsteifigkeit der Manschette. Hierdurch vermindert sich die einschnürende Wirkung an jeder einzelnen Rückenstruktur. Daher ist die erzeugte Kanalhöhe einer Rückenstruktur im Vergleich zur Variante zwei geringer.



Abbildung 8.6: simulierte unidirektionale Rückenstrukturen

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Dichtringe entsprechend ihrer Rückenstrukturen wie folgt benannt:

- Prototyp: Sichel
- Variante 1: breite Sichel
- Variante 2: Sägezahn
- Variante 3: doppelter Sägezahn

Die exakten Maße der unterschiedlichen Rückenstrukturen sowie die mittels Glashohlwelle real erfassten Kontaktbereiche im Dichtspalt sind in Kapitel 11 dargestellt.

8.2.2 Experimentelle Ergebnisse

Die drei neuen Varianten werden experimentell am Prüfstand untersucht. Hierzu werden von jeder Variante vier Dichtringe gefertigt und statisch und dynamisch geprüft. Durchgeführt wird der Versuchsablauf entsprechend Kapitel 6.4 und Kapitel 6.5.3. Dieser Versuchsablauf setzt sich aus statischer Dichtheitsuntersuchungen, Förderwertuntersuchung, Funktionsuntersuchung und Dauerlauf zusammen.

Statische Dichtheit

Alle drei Varianten zeigen im Vergleich zum Prototyp im Neuzustand eine verringerte, ungenügende statische Dichtheit. Bei den beiden sägezahnförmigen Varianten zeigt sich nach der Versuchszeit von 72 Stunden ein tropfenförmiger Ölfilm, weshalb diese beiden Varianten mit einer statischen Dichtheit von P3 beurteilt werden. Bei der Variante mit breiter Sichel kommt es im Versuch bereits nach 24 Stunden zu einem Abfließen der Leckage am Gehäuse und der schlechtesten statischen Dichtheitsbewertung von P1.

Der Grund für die deutliche Verschlechterung der statischen Dichtheit gegenüber dem Prototyp liegt in der Verbreiterung des Anlagebereichs. Durch den breiteren Anlagebereich verteilt sich die Radialkraft auf eine größere Fläche, wodurch sich die Kontaktpressung verringert. Somit können Kratzer und Riefen auf der Manschettenoberfläche schlechter verschlossen werden und statische Leckagekanäle entstehen.

Aufgrund der ungenügenden Ergebnisse wird mit den Dichtringen ein trockener Einlauf über 3 Stunden bei 1000 1/min durchgeführt und die statische Dichtheitsmessung wiederholt. Erfahrungsgemäß glättet sich durch einen Einlauf die Oberfläche im Kontaktbereich ein, wodurch sich statische Dichtheit verbessert (siehe Kapitel 7.2.1). Wie bereits beim Prototyp verbessert sich die statische Dichtheit aller Dichtringe nach dem Einlauf. Die beiden sägezahnförmigen Varianten erzielen nun eine Bewertung von P5 und entsprechen der statischen Dichtheit des Prototyps. Die Variante mit breiter Sichel verbessert sich auf eine Bewertung von P4, wodurch sie ebenfalls als statisch dicht eingestuft werden. Tabelle 8.1 zeigt die Ergebnisse der statischen Dichtheitsuntersuchung nach dem Trockeneinlauf. Im Neuzustand abweichende Dichtheitsbewertung werden dabei in grau dargestellt.

Zeit	Prototyp	breite Sichel	Sägezahn	doppelter Sägezahn
1 min	6	6	6	6
5 min	6	6	6	6
30 min	6	$5 \rightarrow 6$	6	6
1 h	6	$4 \rightarrow 6$	5 → 6	5
3 h	$5 \rightarrow 6$	3 → 6	$4 \rightarrow 6$	5
6 h	5 → 6	3 → 5	$4 \rightarrow 5$	5
12 h	$5 \rightarrow 6$	2 → 5	$4 \rightarrow 5$	5
24 h	$5 \rightarrow 5$	1 → 5	$4 \rightarrow 5$	$4 \rightarrow 5$
48 h	$4 \rightarrow 5$	1 → 4	3 → 5	3 → 5
72 h	$4 \rightarrow 5$	1 → 4	3 → 5	3 → 5

 Tabelle 8.1:
 Verbesserung der statischen Dichtheit durch Einlauf

Förderwertuntersuchung

Im Folgenden werden die Dichtringe dynamisch untersucht. Hierzu werden die Dichtringe für die Förderwertuntersuchung zunächst invers am Prüfstand montiert. Somit wird den Dichtringen luftseitig Öl zur Verfügung gestellt, welches durch den Fördermechanismus des Dichtrings zur eigentlichen Ölseite gefördert wird. Abbildung 8.7 zeigt die ermittelten Förderwerte der unterschiedlichen Varianten. Die verbreiterte Sichelform fördert bis 3000 U/min geringfügig weniger und ab 4500 U/min mehr als der sichelförmige Prototyp mit schmalem Anlagebereich. Ein Grund für den höheren Förderwert bei 4500 U/min könnte darin liegen, dass der Dichtring bei höheren Drehzahlen auf einem höheren Fluidfilm aufschwimmt. Hierdurch verringert sich die Drosselwirkung durch den breiteren Anlagebereich. In Folge dessen können die längeren Rückförderstrukturen ihre besseren hydrodynamischen Eigenschaften entfalten. Insgesamt betrachtet liegt das Förderverhalten der beiden sichelförmigen Rückförderstrukturen auf ähnlichem Niveau. Beim Vergleich des Diagramms der sichelförmigen Varianten mit dem Diagramm der sägezahnförmigen Varianten muss die verringerte Skala beachtet werden. Gegenüber dem sichelförmigen Prototyp weist die sägezahnförmige Rückenstruktur mit 2,3 g/min eine um den Faktor 10 geringere Förderleistung auf. Ein Grund hierfür liegt in der deutlich reduzierten Anzahl von Strukturen auf einem Dichtring. An jeder einzelnen Rückförderstruktur wird Öl axial umgelenkt. Aus der Summe der Umlenkung aller Rückförderstrukturen ergibt sich der Förderwert. Je geringer die Anzahl an Strukturen, desto geringer ist folglich der Förderwert des Dichtrings. Darüber hinaus führt der geschlossene Anlagebereich auf der Ölseite zu einer Drosselung, wodurch der Förderwert reduziert wird. Eine Halbierung des Förderwerts zeigen die Ergebnisse der doppelten Sägezahnform. Hierbei bewirkt die Verringerung der Kanalhöhe einen großen Einfluss auf die Förderwirkung, welche trotz doppelter Anzahl aufgebrachter Strukturen nicht kompensiert werden kann. Ob die geringe Förderwirkung der sägezahnförmigen Rückförderstrukturen ausreichend ist, um dynamische Dichtheit zu erzielen, kann nur mit Hilfe der Funktionsuntersuchungen geklärt werden.

An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass ein hoher Förderwert nicht nur Vorteilhaft für ein Dichtsystem ist. In der Regel verbessert sich durch ein hohen Förderwert die dynamische Dichtheit. Gleichzeitig fördert die Dichtung jedoch mehr Schmutz und Fluid von außen in das Dichtsystem und den abzudichtenden Bereich, wodurch es zu einem Versagen des Dichtsystems oder der Maschine kommen kann.



Abbildung 8.7: Förderwerte unterschiedlich strukturierter PTFE-Manschetten

Funktionsuntersuchung und Dauerlauf

Nach den Förderwertuntersuchungen werden die Dichtringe für die Funktionsuntersuchungen am Prüfstand gedreht und wie vorgesehen betrieben. Untersucht werden die unterschiedlichen Dichtringe bei 1000 1/min bis 9000 1/min für jeweils zwei Stunden.

Während den Funktionsuntersuchungen tritt bei keinem der untersuchten Dichtringe Leckage aus. Bei dem anschließenden Dauerlauf bei 6000 1/min über 72 Stunden kommt es bei einer Variante vereinzelt zu Leckage, Abbildung 8.8. Undicht sind zwei der vier untersuchten Dichtringe mit doppelter Sägezahnform als Rückenstruktur. Nach einer Laufzeit von über 36 Stunden kann auch bei diesen Dichtringen keine Leckage festgestellt werden.

Die Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der Förderwertmessung. Die doppelte Sägezahnform besitzt das geringste Rückfördervermögen aller getesteten Varianten. Das Rückfördervermögen ist gegenüber der Sägezahnform nur halb so groß. Gegenüber der Sichelform beträgt des Rückfördervermögen etwa ein Zwanzigstel. Somit erhöht ein zu geringes Rückfördervermögen eines Dichtrings die Gefahr von dynamischer Leckage. Aufgrund der anfänglichen Leckage und der erreichten Dichtheit nach 36 Stunden Laufzeit kann das Fördervermögen der doppelten Sichelform als Grenzwert zur Erzielung dynamischer Dichtheit betrachtet werden.



Abbildung 8.8: Leckage im Dauerlauf unterschiedlich strukturierter PTFE-Manschetten

Rückwärtslauf

Zielsetzung der Optimierung der Rückenstrukturen ist eine Reduzierung der Leckage im Rückwärtslauf. Die Dichtung soll dahingegen optimiert werden, dass auch ein kurzzeitiger Einsatz im Rückwärtslauf über 15 Minuten bei -1000 1/min ermöglicht wird. Der sichelförmige Prototyp pumpt im Rückwärtslauf im Schnitt 1 g/min. Ein Betrieb im Rückwärtslauf ist somit nicht möglich. Grund hierfür sind die Rückförderstrukturen im Dichtspalt, welche zur Ölseite hin sehr ausgeprägt sind.

Die Rückförderstrukturen der breiten Sichelform sind auf der Ölseite gegenüber dem Prototoyp deutlich flacher. Mit gemessenen 0,16 g/min wird deutlich weniger Öl im Rückwärtslauf gefördert, Abbildung 8.9. Für einen zuverlässigen Einsatz im Rückwärtslauf über 15 Minuten ist jedoch auch diese Menge zu groß.

Die beiden Sägezahnvarianten zeigen in der Simulation immer flacher werdende Rückförderstrukturen in Richtung Ölseite. Die reale Betrachtung des Anlagebereichs im Dichtspalt mittels Glashohwelle attestiert beiden Varianten sogar einen ölseitig geschlossenen Anlagebereich. Hierdurch wird von den Rückförderstrukturen im Rückwärtslauf kein Öl aktiv in den Dichtspalt gesaugt. Dies zeigt sich auch in den experimentellen Messungen. Im Rückwärtslauf wird bei den sägezahnförmig strukturierten Dichtringen sehr geringe Leckagewerte von unter 0,02 g/min gemessen. Beide sägezahnförmige Varianten können das bei einem Rückwärtslauf über 15 Minuten ausgetretene Öl im Vorwärtslauf wieder vollständig hineinfördern. Folglich ist ein leckagefreier Betrieb im Rückwärtslauf mit diesen Rückenstrukturen möglich.

Die Optimierung der Dichtwirkung im Rückwärtslauf konnte somit durch eine sägezahnförmige, rückenstrukturierte PTFE-Manschettendichtung erzielt werden.



Abbildung 8.9: Leckage im Rückwärtslauf unterschiedlich strukturierter PTFE-Manschetten

8.2.3 Zusammenfassung Unidirektional

Der Prototyp mit sichelförmigen Rückenstrukturen erreichte bereits das Entwicklungsziel einer statisch und dynamisch dichten, thermisch und chemisch resistenten sowie robusten und zuverlässigen Dichtung. Die selbständig generierten Rückförderstrukturen im Dichtspalt des Prototyps entsprechen jedoch nicht der gewünschten Vorstellung. Ideal wären schräg gerichtete Rückförderstrukturen, welche ölseitig einen geschlossenen Kontaktbereich aufweisen. Nachteilig wirkt sich dies im Rückwärtslauf aus. Aufgrund des fehlenden ölseitigen Anlagebereichs wird Öl durch die Rückförderstrukturen des Prototyps aktiv angesaugt und viel Leckage im Rückwärtslauf erzeugt. Deshalb wurden neue, diesbezüglich optimierte Rückenstrukturen entwickelt und untersucht. Zielsetzung der Optimierung ist eine Reduzierung der Leckage im Rückwärtslauf.

Aufgrund fehlender Gestaltungskenntnis wurden viele unterschiedliche Rückenstrukturen generiert und simuliert. Mit der Sägezahnform wurde eine neue Rückenstruktur entwickelt, welche schräg gerichtete Rückförderstrukturen mit einem geschlossenen ölseitigen Anlagebereich erzeugt. Im Gegensatz zum Prototyp kann ein PTFE-Manschettendichtring mit sägezahnförmigen Rückenstrukturen auch bei kurzzeitigem Rückwärtslauf erfolgreich eingesetzt werden. Somit kann das Funktionsverhalten einer strukturierten PTFE-Manschette gezielt auf einen bestimmten Betriebszustand oder ein bestimmtes Einsatzgebiet optimiert werden.

Insgesamt wurden vier unterschiedliche Rückenstrukturen am Prüfstand untersucht. Die optimierten Rückenstrukturen wiesen nach einem Einlauf am Prüfstand eine gute statische Dichtheit entsprechend der statischen Dichtheit des Prototyps auf. Trotz völlig unterschiedlich geformter Rückenstrukturen waren dabei alle getesteten Dichtringe spätestens nach 36 Stunden dynamisch dicht. Dies unterstreicht die hohe Robustheit des neuen Dichtungsansatzes und stärkt die Idee der rückseitig strukturierten PTFE-Manschettendichtungen.

Als kritisch bezüglich dynamischer Leckage zeigten sich die Variante mit dem geringsten Fördervermögen. Für eine zuverlässige Dichtheit sollte ein Förderwert von mindestens 0,025 g pro Meter Gleitstrecke erzielt werden. Dies entspricht einem Förderwert von 1 g/min bei 4500 U/min und einem Wellendurchmesser von 80 mm. Je nach Einsatzbedingungen, Wellenoberfläche, Exzentrizität, Werkstoff etc. kann ein höherer Förderwert erforderlich sein. Hier zeigt sich der Zielkonflikt, welcher stets bei der Entwicklung neuer Dichtringe besteht. Ein hoher Förderwert garantiert in der Regel eine hohe dynamische Dichtsicherheit. Wird die Rückenstruktur für ein anderes Einsatzgebiet, zum Beispiel ein kurzer Rückwärtslauf oder erhöhte statische Dichtheit optimiert, verringert sich das Fördervermögen. Daraus folgt eine Verringerung der dynamischen Dichtsicherheit. Für einen optimalen Einsatz einer Dichtung müssen deshalb die späteren Einsatzbedingungen in die Entwicklung mit einbezogen werden.

8.3 Bidirektional

Bisher wurden nur unidirektionale Dichtungen, also Dichtungen mit optimierten Förderstrukturen für nur eine Drehrichtung betrachtet. Im Folgenden wird untersucht, ob das neue Dichtungskonzept auch bidirektional, also für beide Drehrichtungen einsetzbar ist. Untersucht werden dabei die Sichelstruktur (Prototyp) sowie die Sägezahnstruktur, welche beide unidirektional sehr gut funktionierten. Für den bidirektionalen Einsatz werden die Rückenstrukturen jeweils abwechselnd für den Rechtsund Linkslauf aufgebracht, Abbildung 8.10.

Abbildung 8.11 und Abbildung 8.12 zeigen die simulierten Höhen- und Pressungsverteilungen beider bidirektionaler Varianten. Aufgrund der längeren Rückenstruktur ist der Maßstab der Sägezahnstruktur gegenüber der Sichelstruktur verringert.

8.3.1 Ergebnisse Bidirektional

Die beiden bidirektionalen Varianten werden experimentell am Prüfstand untersucht. Hierzu werden von jeder Variante zwei Dichtringe gefertigt und geprüft. Durchgeführt wird der standardmäßige Versuchsablauf entsprechend Kapitel 6.5.3. Dieser Versuchsablauf setzt sich aus Förderwertuntersuchung, Funktionsuntersuchung und Dauerlauf zusammen.

Durch die bidirektionalen Rückenstrukturen sind die Fördereigenschaften der Dichtringe jeweils in beide Drehrichtungen identisch, Abbildung 8.13. Gegenüber den bisher getesteten unidirektionalen Rückenstrukturen sind die Förderwerte deutlich niedriger. Der Förderwert der bidirektionalen Sägezahnform beträgt mit 1,25 g/min bei 4500 1/min nur die Hälfte und der Förderwert der bidirektionalen Sichelstruktur mit 0,75 g/min nur ein Dreißigstel im Vergleich zu ihren unidirektionalen Pendants.

In den Funktionsuntersuchungen zeigt sich, dass der Rückfördereffekt zu schwach ist, um dynamische Dichtheit zu erreichen, Abbildung 8.14. Bei hohen Drehzahlen kommt es bei beiden bidirektionalen Varianten zu Leckage. Die bidirektionale Sichelstruktur ist nur bis 3000 1/min und die bidirektionale Sägezahnstruktur nur bis 6000 1/min dicht.


Abbildung 8.10: Bidirektionale Sichel- und Sägezahnstruktur



Abbildung 8.11: Höhen- und Pressungsverteilung der bidirektionalen Sichelstruktur



Abbildung 8.12: Höhen- und Pressungsverteilung der bidirektionalen Sägezahnstruktur



Abbildung 8.13: Förderwerte der bidirektionalen Rückenstrukturen



Abbildung 8.14: Leckage der bidirektionalen Rückenstrukturen im Abdichtbetrieb

Auch im Dauerlauf über 72 h bei 6000 1/min tritt bei beiden Varianten Leckage aus. Auffallend ist hierbei der ähnliche Verlauf der Leckagewerte beider Varianten, Abbildung 8.15. Beide Versuche wurden unabhängig voneinander an unterschiedlichen Prüfkammern durchgeführt, weshalb ein Prüfstandseinfluss auf den Verlauf ausgeschlossen wird. Durchschnittlich wird bei der bidirektionalen Sichelform 2,0 g/12h Leckage gemessen. Die bidirektionale Sägezahnform funktioniert mit durchschnittlich 0,2 g/12h deutlich besser. Einer der beiden Dichtringe mit bidirektionalen Sägezahnstruktur ist im Versuch in den ersten 24 h vollständig dicht.

Die Ergebnisse der bidirektionalen Sägezahnstruktur sind somit auf dem Niveau der in Kapitel 7.2.2 getesteten erhabenen bidirektionalen PTFE-Manschette nach Gölz.



Abbildung 8.15: Leckage der bidirektionale Rückenstrukturen im Dauerlauf

Aufgrund der auftretenden Leckage in den dynamischen Prüfstandsuntersuchungen werden keine statischen Prüfstandsuntersuchungen durchgeführt.

8.3.2 Optimierung Bidirektional

Durch eine bidirektionale Anordnung der Sichel- und Sägezahnstruktur konnte somit keine vollständig hydrodynamische Dichtheit erzielt werden. Im Vergleich zu den unidirektionalen Pendants fallen vor allem die deutlich geringeren Förderwerte auf.

Ein Grund für die schlechtere Performance liegt dabei in der deutlich reduzierten Anzahl an Strukturen pro Dichtring. Da die bidirektionalen Strukturen breiter sind, können nur 20 bidirektionale Sichelstrukturen oder 10 bidirektionale Sägezahnstrukturen auf einen Dichtring aufgebracht werden. Die Anzahl der Rückenstrukturen beträgt somit bei der Sichelform nur noch ein Drittel und bei der Sägezahnform nur die Hälfte im Vergleich zu den unidirektionalen Pendants. Je weniger Strukturen auf einem Dichtring sind, desto geringer ist der Förderwert.

Ein weiterer Grund für die geringeren Förderwerte liegt in der bidirektionalen Anordnung. Ein Teil der Rückförderstrukturen erzeugt die gewünschte positive Rückförderung, während der andere Teil durch die gespiegelte Anordnung Öl ansaugt und in die entgegengesetzte Richtung pumpt (negative Förderwirkung). Dies zeigt sich anschaulich bei der Betrachtung der simulierten Höhen- und Pressungsverteilung im Dichtspalt der bidirektionalen Sichelstruktur, Abbildung 8.16.



Abbildung 8.16: Höhen- und Pressungsverteilung der bidirektionalen Sichelform

Für eine Verbesserung der bidirektionalen Funktion wäre ein ölseitig geschlossener Anlagebereich, entsprechend einer bidirektionalen Sägezahnstruktur mit einer erhöhten Anzahl an Rückenstrukturen, wünschenswert. Somit kann von dem entgegengesetzt wirkenden Teil der bidirektionalen Rückenstruktur weniger Öl angesaugt und dennoch ein ausreichend großer Rückförderwert generiert werden. Eine dahingehend optimierte bidirektionale Variante ist in Abbildung 8.17 dargestellt, welche im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht experimentell validiert wurde.



Abbildung 8.17: Form, Höhen- und Pressungsverteilung einer optimierten bidirektionalen Rückenstruktur

8.3.3 Zusammenfassung Bidirektional

Zusammenfassend zeigt sich, dass bidirektional rückenstrukturierte Dichtringe in beide Drehrichtungen einen aktiven Rückfördermechanismus erzeugen. Experimentell wurde eine bidirektionale Sichelstruktur und eine bidirektionale Sägezahnstruktur untersucht. Vollständige Dichtheit konnte dabei bei keiner der beiden Varianten erzielt werden. Gründe hierfür sind die geringe Anzahl an Strukturen auf einem Dichtring. Des Weiteren fördert ein Teil der bidirektionalen Strukturen stets in die entgegengesetzte Richtung. Aufgrund dessen kommt es zu geringen Förderwerten, wodurch ein zuverlässiges Abdichten erschwert wird. Ein einfacher bidirektionaler Einsatz von funktionsfähigen, unidirektionalen Rückenstrukturen ist nicht zielführend.

Ohne zusätzliche Optimierung erreichte die bidirektionale Sägezahnstruktur bereits eine Dichtheit auf dem Niveau bisheriger PTFE-Manschettendichtung mit erhabenen bidirektionalen Förderstrukturen im Dichtspalt. Dies zeigt das Potential von PTFE-Manschetten mit bidirektionalen Rückenstrukturen auf.

8.4 Variation des Werkstoffs

Bisher wurden nur rückenstrukturierte Manschettendichtringe aus PTFE betrachtet. Ob das neue Dichtungskonzept auch bei anderen Dichtungswerkstoffen angewendet werden kann wird im Folgenden untersucht.

Zu diesem Zweck werden zwei rückenstrukturierte Dichtringe aus FKM gefertigt. Die Form der eingebrachten Rückenstrukturen entspricht der Sichelform des Prototyps. Im Gegensatz zum PTFE-Rohling weist der FKM-Rohling mit 0,5 mm eine um 0,3 mm geringere Dicke auf.

Abbildung 8.18 zeigt die simulierten Höhen- und Pressungsverteilungen der rückenstrukturierten FKM-Manschette. Wie bei den Dichtringen aus PTFE werden auch bei der FKM-Manschette durch die Rückenstrukturierung feine Kanäle im Dichtspalt erzeugt. Die erzeugten Förderstrukturen entsprechen der Idealvorstellung von schräg gerichteten Kanälen in Kombination mit einem ölseitig geschlossenen Kontaktbereich. Der Grund hierfür liegt in dem Materialverhalten. Gegenüber PTFE ist das verwendete FKM deutlich elastischer. Während der Montage der FKM-Manschette kommt es zu keiner plastischen Verformung. Dies vereinfacht die gezielte Erzeugung der Förderstrukturen im Dichtspalt.

Die während der Montage erzeugte Pressung zwischen FKM-Manschette und Welle ist dabei sehr gering. Dies äußert sich in einer sehr geringen Radialkraft von lediglich 8 N im Neuzustand. Eine rückenstrukturierte PTFE-Manschette mit einer Dicke von 0,8 mm weist im Vergleich eine 15-mal höhere Radialkraft auf.



Abbildung 8.18: simulierte Höhen- und Pressungsverteilung einer FKM-Manschette mit sichelförmigen Rückenstrukturen

Um die Funktion der rückenstrukturierten FKM-Manschette zu prüfen werden zwei Dichtringe entsprechend dem standardmäßigen Versuchsablauf (Kapitel 6.5.3) untersucht. Dieser Versuchsablauf setzt sich aus Förderwertuntersuchungen bis 4500 1/min, Funktionsuntersuchungen bis 9000 1/min und einem Dauerlauf bei 6000 1/min zusammen.

Der Förderwert der FKM-Manschette ist mit 0,35 g/min bei 4500 1/min deutlich geringer als alle bislang untersuchten Dichtungen. Trotz des geringen aktiven Rückfördervermögens tritt in den Funktionsuntersuchungen und im Dauerlauf über 72 h keine Leckage aus. Grund hierfür ist das gegenüber PTFE deutlich weichere und homogenere Material, welches der Welle besser folgen kann. Somit kommt weniger Öl in den Dichtspalt, welches wieder aktiv zurück gefördert werden muss.

Zusammenfassung Werkstoff

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass das Dichtungskonzept auch bei von PTFE weit abweichenden Dichtungswerkstoffen erfolgreich eingesetzt werden kann. Ein elastischeres Materialverhalten vereinfacht dabei deutlich die gezielte Gestaltung der Förderstrukturen im Dichtspalt. Dabei kann zum Beispiel mit einer sichelförmig rückenstrukturierten FKM-Manschette trotz geringer Radialkraft vollständige statische und dynamische Dichtheit erzielt werden.

8.5 Gestaltungshinweise

Für die Auslegung und Gestaltung von rückenstrukturierten Manschetten gab es bisher keinerlei Erfahrungen. Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse zur Gestaltung von rückenstrukturierten Manschetten als Hinweise für zukünftige Auslegungen zusammengefasst. Diese basieren auf den simulierten Spalthöhen- und Pressungsverteilungen vieler bisher nicht besprochener, unterschiedlich geformter Rückenstrukturen. Ein Teil dieser Simulationen sind im Anhang dargestellt. Die Ergebnisse im Anhang geben einen guten Überblick, wie die Förderstrukturen durch unterschiedlich geformte Rückenstrukturen beeinflusst werden können.

Ziel der Entwicklung neuer Rückenstrukturen ist die Erzeugung idealer Förderstrukturen im Dichtspalt. Durch die Aufdehnung der Manschette beim Montieren auf die Welle konzentriert sich die Einschnürung der Manschette im Bereich der Rückenstrukturen. Grund ist die verringerte Manschettensteifigkeit. Hierdurch wird lokal die Kontaktpressung zwischen Manschette und Welle vermindert oder unterbrochen und die gewünschten Förderstrukturen werden erzeugt. Diese Förderstrukturen bleiben auch bei einem Verschleißen der Manschette erhalten.

Steifigkeit

Für die Entstehung der Förderstrukturen sind somit die Steifigkeit der Manschette und die Dehnung der Manschette bei der Montage verantwortlich. Je geringer die lokale Manschettensteifigkeit im Verhältnis zur Gesamtsteifigkeit am Umfang, desto deutlicher wird eine Förderstruktur im Dichtspalt gebildet. Eine größere Höhe der Förderstrukturen kann somit durch tiefere und schmälere Rückenstrukturen sowie durch eine insgesamt steifere Manschette erzielt werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei der Auslegung nicht eine einzelne Rückenstruktur für sich betrachtet werden darf, sondern stets die gesamte Manschette betrachtet werden muss. Wird beispielsweise die Anzahl an Rückenstrukturen erhöht, verringert sich die Gesamtsteifigkeit der Manschette. Folglich verringert sich die erzeugte Größe jeder einzelnen Förderstruktur. In Kapitel 8.2.1 ist dieser Effekt beim Vergleich der Spalthöhen der Sägezahnform und der doppelten Sägezahnform gezeigt worden.

Dehnung

Neben der Steifigkeit ist die Dehnung der Manschette in Umfangsrichtung ein wichtiges Kriterium für die Erzeugung von Förderstrukturen. Die Dehnung der Manschette wird durch die Überdeckung des Rohlings bei der Montage auf die Welle hervorgerufen. Aufgrund der Scheibenform des Rohlings wird der Innendurchmesser am stärksten in Umfangsrichtung gedehnt. Nach außen hin nimmt die Dehnung der Manschette ab, Abbildung 4.3. Diese abnehmende Dehnung beeinflusst die Erzeugung der Förderstrukturen. Eine streifenförmige Rückenstruktur erzeugt deshalb eine Förderstruktur, deren Höhe sich in Richtung Luftseite tendenziell verringert. Dieser Effekt zeigt sich beispielsweise in Simulation 62 in Kapitel 11. Um diesem Effekt entgegenzuwirken empfiehlt sich eine Rückenstruktur, welche nach außen hin tiefer wird. Eine andere Möglichkeit ist, eine von der Öl- in Richtung Luftseite sich verjüngende Form der Rückenstruktur, wie dies bei der Sägezahnform realisiert wurde, Abbildung 8.19. Durch die Verjüngung steigt die Umfangssteifigkeit der Manschette und die Einschnürung konzentriert sich auf die Verjüngung. Hierdurch kann eine Förderstruktur erzielt werden, deren Höhe zur Luftseite hin zu nimmt.



Abbildung 8.19: Verbesserung des Höhenverlaufs der Förderstrukturen durch eine in Richtung Luftseite spitz zulaufende Rückenstruktur

Plastische Verformung

Die Auslegung von Rückenstrukturen für PTFE-Manschetten gestaltet sich gegenüber Manschetten aus Elastomer deutlich komplexer. Zurückzuführen ist dies auf die geringe Elastizität von PTFE und die dadurch hervorgerufene plastische Verformung der PTFE-Manschette bei der Montage. Abbildung 8.20 vergleicht die simulierte Höhenund Pressungsverteilung im Dichtspalt einer PTFE-Manschette gegenüber einer Manschette aus FKM. Obwohl in beiden Fällen sichelförmige Rückenstrukturen eingesetzt werden, unterscheiden sich die erzeugten Förderstrukturen im Dichtspalt. Der Anlagebereich der PTFE-Manschette ist deutlich schmäler. Neben der flacheren Biegelinie der PTFE-Manschette sind hierfür die plastischen Verformungen während der Montage verantwortlich. Hierdurch kommt es zum ölseitigen Abheben der PTFE-Manschette. Dieser Effekt wird von Kletschkowski [39] auch als "Glockenmäulchen" bezeichnet. Grund für das Auftreten des Glockenmäulcheneffekts sind interne Spannungen in der Manschette, welche durch plastische Verformungen während des Montagevorgangs entstehen. Für die Entwicklung von Rückenstrukturen bedeutet dies, dass stets der gesamte Montageprozess betrachtet werden muss. Ein geeignetes Mittel zur Vereinfachung der Auslegung neuer Rückenstrukturen ist die gezielte Schwächung der Manschette durch konzentrische Nuten.



Abbildung 8.20: simulierte Höhen- und Pressungsverteilung im Dichtspalt zweier sichelförmig, rückenstrukturierter Manschetten aus PTFE und FKM

Mit Hilfe dieser Nuten können die negativen Effekte bei der Montage der PTFE-Manschette besser kontrolliert werden, wodurch die Auslegung neuer Rückenstrukturen vereinfacht wird. Abbildung 8.21 verdeutlicht dies anhand einer Sägezahnstruktur mit und ohne umlaufender Nuten.

Kürzester Weg und große Strukturen

Die durch die Montage auf der Welle erzeugten Förderstrukturen nehmen stets den kürzesten Weg von der Luft- zur Ölseite. Dabei werden kleine Strukturen oder Ecken einfach übersprungen. Abbildung 8.22 zeigt diesen Effekt anhand einer Streifenstruktur, welche zur Verbesserung der Anlage um eine weitere umlaufende Nut ergänzt wird. Zu komplexe oder sehr nah beieinanderliegende Rückenstrukturen sind deshalb nicht zielführend, da die Rückförderstrukturen deren Verlauf nicht folgt. Ein flacher, breiter Anlagebereich bietet dabei deutlich mehr "Spielraum" zur Erzeugung der gewünschten Rückförderstrukturen im Dichtspalt.



Abbildung 8.21: simulierte Höhen- und Pressungsverteilung im Dichtspalt zweier rückenstrukturierter Manschetten - ohne / mit umlaufenden Nuten



Abbildung 8.22: simulierte Höhen- und Pressungsverteilung im Dichtspalt zweier Manschetten mit streifenförmiger Rückenstrukturierung

Neben zu komplexen oder nah beieinanderliegenden Rückenstrukturen sind sehr große oder breite Rückenstrukturen zu vermeiden. Ab einer gewissen Größe der Rückenstruktur legt sich die Manschette wieder mittig zwischen zwei Steifigkeitssprüngen an. Abbildung 8.23 verdeutlicht dies anhand einer breiten Streifenstruktur.



Abbildung 8.23: simulierte Höhen- und Pressungsverteilung im Dichtspalt einer Manschette mit sehr breiter Rückenstrukturierung

Zusammenfassung Gestaltungshinweise

Zusammenfassend müssen bei der Gestaltung neuer Rückenstrukturen die Steifigkeit und die Dehnung der Manschette beachtet werden. Beide Größen beeinflussen die Erzeugung der Rückförderstrukturen im Dichtspalt.

Die generierten Rückförderstrukturen im Dichtspalt sind dabei nicht nur von der Form und Tiefe einer Rückenstruktur abhängig. Wichtiger ist das Verhältnis der Steifigkeitsverringerung im Bereich einer Rückenstruktur im Verhältnis zur gesamten Steifigkeit der Manschette in Umfangsrichtung. Deshalb sind Förderstrukturen weniger stark ausgeprägt, wenn die Anzahl an Rückenstrukturen an einer Manschette erhöht wird. Höhere Förderstrukturen können dagegen durch tiefere Rückenstrukturen oder eine in Umfangsrichtung steifere Manschette erzielt werden.

Neben der Steifigkeit werden die Rückförderstrukturen maßgeblich von der Dehnung in Umfangsrichtung durch die Montage auf die Welle erzeugt. Die Umfangsdehnung ist dabei aufgrund des scheibenförmigen Rohlings nicht konstant. Die Umfangsdehnung nimmt vom Innendurchmesser der Manschetten nach außen hin sukzessive ab. Je geringer die Dehnung, desto schwächer sind die erzeugten Rückförderstrukturen. Aufgrund der abnehmenden Dehnung verringert sich tendenziell die Spalthöhe der Rückförderstrukturen von der Öl- in Richtung Luftseite. Eine Gegenmaßname sind sägezahnförmige Rückenstrukturen, welche sich in Richtung Luftseite verjüngen. Hierdurch erhöht sich die Steifigkeit der Manschette am Umfang und die Einschnürung konzentriert sich auf den verjüngten Bereich.

Die Auslegung von Rückenstrukturen für PTFE-Manschetten gestaltet sich gegenüber Manschetten aus Elastomer deutlich komplexer. Zurückzuführen ist dies auf das steifere Materialverhalten und die dadurch unerwünschte, plastische Verformung der PTFE-Manschette bei der Montage. Bei der Gestaltung neuer Rückförderstrukturen für Werkstoffe mit geringer Elastizität muss deshalb stets der gesamte Montageprozess mit betrachtet werden. Idealerweise wird die Manschette gezielt geschwächt, um den Bereich der plastischen Dehnung bei der Montage zu kontrollieren und einen möglichst breiten und flachen Anlagebereich zu erhalten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dabei zwei umlaufende Nuten zusätzlich zu den Rückförderstrukturen in die PTFE-Manschette eingebracht.

Die erzeugten Rückförderstrukturen bilden einen möglichst kurzen Weg zwischen Öl- und Luftseite. Zu komplexe oder sehr nah beieinanderliegende Rückenstrukturen sind deshalb nicht zielführend, da die Rückförderstrukturen deren Verlauf nicht folgt. Des Weiteren legt sich die Rückförderstruktur bei sehr großen oder breiten Rückenstrukturen wieder auf der Welle an, weshalb auch sehr große oder breite Strukturen nicht zielführend sind.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden das Vorgehen und die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Des Weiteren werden im Rahmen eines Ausblicks ausstehende Untersuchungen und mögliche Optimierungen vorgestellt.

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer neuen Dichtung, welche statische und dynamische Dichtheit sowie thermische und chemische Resistenz in einem robusten und einfach zu fertigenden Design vereint.

Als Ausgangslage für die neue Dichtung wurde eine einfache PTFE-Manschettendichtung ohne Rückförderstrukturen gewählt. Diese weist bereits eine hohe chemische und thermische Resistenz und eine gute statische Dichtheit auf. Zur Erreichung dynamischer Dichtheit wird ein Rückfördermechanismus benötigt, welcher von bisherigen Ansätzen durch erhabene Rückförderstrukturen im Dichtkontakt erzielt wird. Um die statische Dichtheit der glatten PTFE-Manschette zu erhalten, sollte der Dichtkontakt der neuen Dichtung jedoch nicht beeinträchtigt werden. Um dennoch den benötigten Rückfördermechanismus zu erzeugen, wurde in dieser Arbeit ein neuer Ansatz verfolgt.

Die Grundidee des neuen Ansatzes besteht darin, durch lokale Beeinflussung der Steifigkeit eines Bauteils und anschließender Dehnung die entstehende, ungleichmäßige Einschnürung des Materials zu nutzen. Mit Hilfe von grob gefertigten Strukturen können durch die Einschnürung deutlich feinere Strukturen erzeugt werden, welche nicht verschleißen.

Übertragen auf die Dichtungstechnik zeigt sich der neue Ansatz in der Positionierung der Strukturen. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen wurden die gefertigten Strukturen nicht innerhalb des Dichtspalts, sondern auf der Rückseite der PTFE-Manschette eingebracht. Ziel war es, durch gezielte Steifigkeitsänderungen die Kontaktpressungsverteilung im glatten Dichtkontakt zu beeinflussen. Hierdurch sollte ein Rückfördermechanismus für dynamische Dichtheit generiert werden. Dieser Rückfördermechanismus sollte dabei von der Dichtung bei der Montage selbst erzeugt werden.

Entsprechend des neuen Dichtungsansatzes wurde ein Prototyp mit 60 sichelförmigen Rückenstrukturen auf der ansonsten glatten PTFE-Manschette entwickelt. In der Theorie konzentriert sich die Dehnung bei der Montage des Prototyps in Bereichen in denen die Manschette auf der Rückseite strukturiert wurde. Infolge dessen hebt sich lokal die PTFE-Manschette von der Welle ab und feine Kanäle entstehen, welche einen aktiven Rückfördermechanismus erzeugen.

Die durchgeführten simulativen und experimentellen Untersuchungen bestätigen die Theorie des neuen Dichtungsansatzes. Die Prototypen weisen schräge Kanäle im Dichtspalt auf, welche von der Dichtung selbständig bei der Montage erzeugt werden. Die gemessenen Kanalhöhen dieser Rückförderstrukturen im Dichtspalt sind mit maximal 50 µm sehr gering.

Im Bereich der Dichtungstechnik werden solch feine, gezielt eingebrachte Rückförderstrukturen bislang nur im Bereich der Gleitringdichtungen eingesetzt. Großer Vorteil der rückenstrukturierten Manschetten gegenüber Gleitringdichtungen ist dabei die einfache und kostengünstige Fertigung. Durch Einbringen von Rückenstrukturen im Zehntel Millimeterbereich werden bei der Montage sehr feine Rückförderstrukturen im Mikrometerbereich im Dichtspalt erzeugt.

Die Fertigung und der Einsatz solch feiner Rückförderstrukturen im Dichtspalt von PTFE-Manschetten war bislang nicht möglich. Grund hierfür ist die komplexe Fertigung und das schnelle Verschleißen feiner Rückförderstrukturen im Betrieb. Da sich die feinen Rückförderstrukturen des neuen Dichtungsansatzes durch die Steifigkeitsbeeinflussung der Rückenstrukturen selbständig ausbilden, bleiben diese auch bei einem Verschleißen der PTFE-Manschette im Betrieb erhalten.

Veränderungen der Position und Tiefe der eingebrachten, sichelförmigen Rückenstrukturen oder der Überdeckung zeigten in der Simulation einen geringen Einfluss auf die erzeugten Rückförderstrukturen im Dichtspalt. Somit kann der Prototyp mit sichelförmigen Rückenstrukturen auch bei großen Fertigungs- und Montagetoleranzen aufgrund des robusten Designs zuverlässig eingesetzt werden. Im Versuch erzielte der Prototyp die statische Dichtheit einer glatten PTFE-Manschette. Die gemessenen Förderwerte konstatieren dem Prototyp einen wirkungsvollen aktiven Rückfördermechanismus, welcher zu einer sehr guten dynamischen Dichtheit auch bei hohen Drehzahlen oder Exzentrizität führt. Die selbsterzeugten Rückförderstrukturen zeigen sich gegenüber den bislang eingesetzten erhabenen Rückförderstrukturen überlegen. Zurückzuführen ist dies auf das bessere Längen zu Höhen Verhältnis, weshalb die feinen Strukturen hydrodynamisch besonders wirksamer sind. Auch im Dauerbetrieb über 1000 h konnte keine Leckage oder ein Verlust des Rückfördervermögens aufgrund von Verschleiß festgestellt werden.

Zusammenfassend ergeben sich durch den neuen Dichtungsansatz folgende Vorteile des sichelförmigen Prototyps:

- Selbständige Erzeugung von feinen Förderstrukturen im glatten Dichtspalt, welche hydrodynamisch besonders wirksam sind.
- Kein Verschleiß der Rückförderstrukturen Strukturen bleiben aufgrund der Steifigkeit auch bei Verschleiß an der Manschette erhalten.
- Einfache Fertigung Fertigung der Rückenstrukturen im Zehntel Millimeterbereich erzeugt Förderstrukturen im Mikrometerbereich.
- Robustes Dichtungsdesign zuverlässiger Einsatz auch bei großen Fertigungs-, Montage- und Betriebstoleranzen möglich.
- Gute statische und dynamische Dichtheit.

Mit der Entwicklung einer neuen PTFE-Manschette mit sichelförmigen Rückenstrukturen wurde die Zielsetzung der Arbeit erreicht.

Als größter Nachteil des Prototyps mit sichelförmigen Rückenstrukturen zeigte sich in den Untersuchungen die Dichtwirkung im Rückwärtslauf. Dreht die Welle rückwärts, so pumpt der Prototyp aktiv Öl auf die Luftseite und Leckage entsteht. Grund hierfür sind die nicht ideal geformten Rückförderstrukturen im Dichtspalt, welche ölseitig keinen geschlossenen Kontaktbereich zwischen PTFE-Manschette und Welle besitzen.

Zur Optimierung des Prototyps wurden weitere Rückenstrukturen entwickelt, wovon drei unterschiedliche Varianten experimentell untersucht wurden. Trotz unterschiedlicher Rückenstrukturen zeigten alle untersuchten Varianten auf Anhieb keine oder nur sehr geringe Leckage. Dieses Ergebnis unterstreicht die Robustheit des neuen Dichtungsansatzes. Mit der Sägezahnform wurde dabei eine neue Rückenstruktur entwickelt, welche schräg gerichtete Rückförderstrukturen mit einem geschlossenen ölseitigen Anlagebereich erzeugt. Im Gegensatz zum sichelförmigen Prototyp kann mit sägezahnförmigen Rückenstrukturen auch bei zeitweisem Rückwärtslauf erfolgreich abgedichtet werden.

Folglich kann der neue Dichtungsansatz für spezielle Einsatzbedingungen optimiert werden, in dem die Rückenstrukturen angepasst werden. Eine solche Optimierung ist jedoch stets ein Zielkonflikt. Die Sägezahnform erzeugte zwar gegenüber dem sichelförmigen Prototyp keine Leckage bei zeitweisem Rückwärtslauf, gleichzeitig verringerte sich jedoch auch das Rückfördervermögen. Vorteil des geringeren Rückfördervermögens ist das weniger Schmutz und Fluid von außen in das abzudichtende System gefördert wird. Nachteil des geringeren Rückfördervermögens ist die erhöhte Gefahr von Leckage im Betrieb, weshalb die dynamische Dichtsicherheit der sägezahnförmigen Rückenstruktur gegenüber dem Prototyp geringer ist.

Ausblick

Zur Verringerung des Versuchsraums wurden in dieser Arbeit stets Manschetten mit derselben Dicke und derselben Überdeckung eingesetzt. Beide Parameter können die Anpressung, Anlage und Funktion einer Manschettendichtung wesentlich beeinflussen. Aufgrund dessen sollte deren Einfluss auf die Funktion der rückenstrukturierten PTFE-Manschettendichtung genauer betrachtet werden. Interessant ist hierbei, in wie weit die Radialkraft und damit die Anpressung auf die Welle reduziert werden kann, ohne den aktiven Rückfördermechanismus oder die statische Dichtheit zu beeinträchtigen.

Alle untersuchten Dichtringe wurden für einen Wellendurchmesser von 80 mm ausgelegt. In wie weit diese Rückenstrukturen auch bei größeren oder kleineren Wellendurchmessern eingesetzt werden können, sollte zukünftig betrachtet werden. Insbesondere PTFE-Manschetten mit Rückenstrukturen für deutlich kleinere Wellendurchmesser sind, aufgrund des inhomogenen Werkstoffs mit geringer Elastizität, Grenzen gesetzt.

Neben unidirektionalen Dichtringen, also Dichtringen für eine Drehrichtung, wurden auch bidirektionale, rückenstrukturierte PTFE-Manschetten experimentell getestet. Hierzu wurden sichelförmige oder sägezahnförmige Rückenstrukturen spiegelbildlich gefertigt. Die bidirektionalen PTFE-Manschetten zeigten einen aktiven Rückfördermechanismus in beide Drehrichtungen. Vollständige Dichtheit konnte bei keiner der beiden Varianten erzielt werden. Ein Grund hierfür sind die gewählten Rückenstrukturen, welche sich für den bidirektionalen Einsatz als nicht ideal erwiesen. Ohne zusätzliche Optimierung erreichte die gespiegelte Sägezahnform bereits eine gegenüber PTFE-Manschettendichtungen mit erhabenen bidirektionale Förderstrukturen vergleichbare Dichtheit. PTFE-Manschetten mit bidirektionalen Rückenstrukturen weisen somit ein hohes Entwicklungspotential auf. Wie eine optimierte Rückenstruktur für bidirektionale PTFE-Manschetten aussehen könnte wurde simulativ anhand einer Rückenstruktur aufgezeigt. Für eine voll funktionsfähige, bidirektionale PTFE-Manschette sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

Die Auslegung neuer Rückenstrukturen für PTFE-Manschetten gestaltet sich sehr komplex. Zurückzuführen ist dies auf die geringe Elastizität des Werkstoffs und die dadurch unerwünschte, plastische Verformung der PTFE-Manschette bei der Montage. Bei der Gestaltung neuer Rückförderstrukturen muss deshalb stets der gesamte Montageprozess mit betrachtet werden. Um schneller geeignete Rückenstrukturen zu finden, welche die gewünschten Rückförderstrukturen im Dichtspalt bilden, wäre deshalb eine computerbasierte Topologieoptimerung interessant. Idealerweise wäre hierbei nicht nur die Vorgabe des gewünschten Pressungsverlaufs, sondern die automatische Optimierung der Förderwirkung durch eine Kopplung mit einer elasto-hydrodynamischen Simulation.

Die Rückenstrukturen der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Dichtringe wurden alle mittels Laser eingraviert. Zur Optimierung der Herstellungskosten werden PTFE-Manschettendichtringe mit Förderstrukturen in der Regel geprägt. Als nächster Schritt wäre die Untersuchung von geprägten rückenstrukturierten PTFE-Manschetten sinnvoll. Vorteil des Prägens gegenüber der Laserfertigung sind die größeren, gestalterischen Möglichkeiten. Neben vertieften Rückenstrukturen können auch erhabene Strukturen oder eine Kombination aus vertieften und erhabenen Strukturen mittels Prägen hergestellt werden. Hierdurch ergeben sich völlig neue Möglichkeiten zur Gestaltung der Rückförderstrukturen im Dichtspalt und der Verbesserung der Anlage der Manschette auf der Welle. Interessant für eine weitere Optimierung sind hierbei insbesondere dreidimensionale Rückenstrukturen, welche keine konstante Höhe/Tiefe besitzen, sondern einen Höhen-/Tiefenverlauf aufweisen. Beispielsweise könnten entsprechend der inversen Reynoldsgleichung durch einseitig steile und flache Pressungsgradienten der eine Teil einer Rückförderstruktur in die eine Drehrichtung und der andere Teil in die andere Drehrichtung hydrodynamisch wirksamer gestaltet werden. Hierdurch könnte eine bidirektional funktionierende rückenstrukturierte PTFE-Manschettendichtung erzielt werden.

Ein weiteres mögliches Fertigungsverfahren ist die additive Fertigung, welche auch als 3D-Druck bekannt ist. Die additive Fertigung bietet sich aufgrund der hohen Variabilität besonders im Bereich der Einzelteil- und Prototypenfertigung an. Für einen wirtschaftlichen Einsatz in der Serienfertigung sind derzeit die Fertigungszeiten und damit die Herstellungskosten zu hoch. Die additive Fertigung ermöglicht gegenüber dem Prägen die Herstellung von sehr komplexen Bauteilen, welche auch Hinterschneidungen oder Hohlräume aufweisen können. Denkbar sind dabei auch Hohlräume, welche mit einem weiteren Material gefüllt werden. Somit kann die Steifigkeit eines additiv gefertigten Dichtrings gegenüber einem geprägten oder gelaserten Dichtring noch vielfältiger beeinflusst werden. Besonders interessant sind dabei die jüngsten Entwicklungen, welche das additive Fertigen von Bauteilen aus PTFE mittels Stereolithografie ermöglichen [76].

Die Funktion der Rückenstrukturen wurde experimentell auch bei Manschetten aus Elastomer nachgewiesen. Hierbei konnte trotz sehr geringer Radialkraft statisch und dynamisch erfolgreich abgedichtet werden. Ein Einsatz einer solchen Manschette wäre in der Praxis vorteilhaft, wenn geringe Reibungsverluste von Interesse sind. Durch die sehr feinen Rückförderstrukturen ist dabei ein Aufschwimmen des Dichtrings auf einem Luftpolster entsprechend einer gasgeschmierten Gleitringdichtung denkbar. Hierdurch könnte mit dem neuen Dichtungsansatz eine günstige, verschleißfreie, reibungsarme und trockenlauffähige Dichtung erzeugt werden, welche statisch und dynamisch sehr gut dicht ist.

Zusammenfassend erwies sich die Grundidee, durch lokale Beeinflussung der Steifigkeit eines Bauteils und anschließender Dehnung die entstehende, ungleichmäßige Einschnürung des Materials zu nutzen, als sehr vielversprechend. Die kostengünstige und einfache Erzeugung feiner Strukturen, welche zudem nicht verschleißen, bietet auch außerhalb der Dichtungstechnik großes Potential. In der Tribologie sollte der neue Ansatz zur Erzeugung feiner Strukturen im Kontaktbereich zur dauerhaften Reibungs- Temperatur- oder Verschleißminimierung weiterverfolgt werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Union: Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. April 2009; 2009.
- [2] Tipler, P.; Mosca, A.: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure; Heidelberg: Springer Spektrum, 7. Auflage 2015, ISBN 978-3-642-54165-0.
- [3] Wolf, K. L.: Tribologie und Fluidverhalten in der Dichtzone von Radial-Wellendichtringen unter der Berücksichtigung makromolekularer Bestandteile der Schmierfluide; Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2003.
- [4] Lauth, G.; Kowalczyk, J.: Einführung in die Physik und Chemie der Grenzflächen und Kolloide; Heidelberg: Springer Spektrum, 1. Auflage, 2016, ISBN 978-3-662-47017-6.
- [5] Kaelble, D. H.: Pyhsical Chemistry of Adhesion; John Wiley and Sons, 1971, ISBN 0-471-45411-7.
- [6] Young, T.: An Essay on the Cohesion of Fluids; Philosophical Transactions of the Royal Society of London 95, 1805.
- [7] Fowkes, F. M.; Attractive Forces at Interfaces; Industrial and Engineering Chemistry 56, 1964.
- [8] Schomburg, W. K.: Introduction to Microsystem Design; Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2015, ISBN 978-3-662-47022-0.
- [9] Müller, H. K.; Haas, W.: Dichtungstechnik; Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Vorlesungsmanuskript, 9. Auflage, 2015.
- [10] Leeuwen, H. van: The Sealing and Lubrication Principles of Plain Radial Lip Seals: An Experimental Study of Local Tangential Deformations and Film Thickness; Leeuwen, H. van: Elastodydrodynamics 1996, Elsevier Science B.V., 1997.

- [11] Poll, G.; Gabelli, A.: Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part II – A new Measuring Principle for Lubricant Film Thickness; Journal of Tribology 114, 1992.
- [12] Haas, W.: Basics der Dichtungstechnik; Institut f
 ür Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2016, ISBN 078-3-936-10061-7.
- [13] Haas, W.: Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter Berücksichtigung der Fanglabyrinthe, Habilitation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1991.
- [14] DIN: DIN 3760 Radial-Wellendichtringe; Deutsches Institut f
 ür Normung, Berlin, 1996.
- [15] DIN: DIN 3761 Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge Teil 1-16; Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1984.
- [16] Kammüller, M.: Zum Abdichtverhalten von Radialwellendichtringen; Dissertation, Universität Stuttgart, 1986.
- [17] Müller, H. K.: Concepts of Sealing Mechanism of Rubber Lip Type Rotary Shaft Seals; 11th International Conference on Fluid Sealing, 1987.
- [18] Jenisch, B.: Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen; Dissertation, Universität Stuttgart, 1991.
- [19] Schallamach, A.: How does Rubber slide?; Wear 17, 1971.
- [20] Kawahara, Y.: A Study of Sealing Phenomena on Oil Seals; ASLE/ASME Lubrication Conference, American Society of Lubrication Engineers , 1977.
- [21] Kammüller, M.: FKM-Heft 122 Radial-Wellendichtringe I Dichtverhalten von Radial-Wellendichtringen, Forschungsheft, 1986.
- [22] Schmitt, W.: Motorabdichtungen mit Radialwellendichtringen (RWDR), Motoren, 1990.
- [23] Hellerich, W.; Harsch, G.; Bauer, E.: Werkstoff-Führer Kunststoffe; Hanse: München, 10. Auflage, 2010, ISBN 978-3-446-42436-4.
- [24] Elring Klinger Kunststofftechnik GmbH: Elring-PTFE Eigenschaften und Anwendung eines außergewöhnlichen Werkstoffes; Firmenschrift, Bietigheim-Bissingen.
- [25] Sekulich, S.: Fortschritte bei den radialen Lippen-Dichtungen aus << Teflon>>, The Journal of Teflon Vol. 11 No. 1, DuPont, 1970.

- [26] Gölz, J.; Bauer, F.; Haas, W.: Wellendichtungen aus PTFE-Compounds für außergewöhnliche Betriebsanforderungen - FKM-Heft 327 - FKM-Vorhaben Nr. 303; Forschungsheft, Frankfurt/Main, 2015.
- [27] Haiser, H. B.: PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen; Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- [28] Schmidt, W.: Radial Shaft Seal with PTFE Sealing Lip; SAE Technical Paper Series 852347, 1985.
- [29] Deuring, H.: Abdichtung von Kurbelwellen für Dieselmotoren, Goetze AG, 1987.
- [30] Hoffmann, C.: Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen; Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [31] Gölz, J.: Manschettendichtringe aus PTFE-Compounds Funktionsmechanismus von PTFE-Manschettendichtungen und Entwicklung von Rückförderstrukturen für beidseitig drehende Wellen; Dissertation, Universität Stuttgart, 2017.
- [32] Britz, S.: Ein Beitrag zur Erfassung der Funktionsprinzipien dynamischer Wellendichtungen unter besonderer Berücksichtigung des Radialwellendichtrings, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1988.
- [33] Fritsche, R.: Ein Beitrag zur Untersuchung des Verhaltens von Radialwellendichtringen aus Elastomer- und Polytetrafluoräthylen-Material bei speziellen Betriebsbedingungen; Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994.
- [34] Pohl, H.: Computerunterstützte und experimentelle Untersuchungen von Manschettendichtungen aus glasfaserverstärktem PTFE-Compound; Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 1999.
- [35] Bauer, F.; Haas, W.: PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille Funktionsweise und Alternativen – FKM-Vorhaben Nr. 262; Forschungsheft, Frankfurt/Main, 2005.
- [36] Bauer, F.: PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen; Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.
- [37] Bock, E.; Guth, W.: Temperaturabsenkung im Dichtspalt von Radialwellendichtringen, Dichtungstechnik Heft 1, 1999.

[38]	Uhrner, KJ.; Gust, H.: Innovative Dichtungslösungen im Antriebsstrang; 2. CTI Fachkonferenz Dichtungen im Antriebsstrang, Mannheim, 2006.
[39]	Kletschkowski, T.: Finite Thermoviskoplastizität von Kompositen aus Polytet- rafluorethylen mit Zug-druck-asymmetrie und plastischem Gedächtnis; Dis- sertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 2004.
[40]	Patent: US 3984113 A – Bi-Directional Hydrodynamic Polytetrafluorethylene Seal; 1976.
[41]	Patent: US 4118856 A – Bi-Directional Hydrodynamic Shaft Seal Method; 1987.
[42]	Paten: EP 0128645 A2 – Bi-Directional Hydrodynamic Seal; 1984.
[43]	Patent: DE 101 54 788 C5 – Wellendichtring; 2007.
[44]	Patent: US 7494130 B2 – Bi Directional Pattern for Dynamic Seals; 2009.
[45]	Patent: DE 10 2013 207 029 B4 – Radialwellen-Dichtungsanordnung; 2016.
[46]	Patent: US 9709173 B2 – Sealing Assembly; 2017.
[47]	Patent: US 5692757 – Bidirectional Shaft seal with Intersecting Spiral Grooves, 1997.
[48]	Patent: DE 37 39 403 C2 – Bidirektionale Dichtung; 1987.
[49]	Patent: US 3984113 – Bidirectional Hydrodynamic Polytetrafluorethylene Seal; 1976.
[50]	Patent: US 4118856 – Bi-Directional Hydrodynamic Shaft Seal Method; 1978.
[51]	Patent: US 7494130 B2 – Bi-Directional Pattern for Dynamic Seals; 2009.
[52]	DFG-Projekt HA 2251/20-1: Abdichtung beidseitig drehender Wellen durch PTFE-Manschettendichtungen mit eingeprägten drehrichtungsunabhängigen Rückförderelementen; Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2012.
[53]	Goujavin, W.: Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds mit Rückförderstruktu- ren; Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.
[54]	Stiegler, B.: Konstruktive Ermittlung der Radialkraft von Entlasteten Wellen- dichtringen; unveröffentlichte Studienarbeit, Universität Stuttgart, 1992.

- [55] Keyence Deutschland GmbH: Ein neuer Maßstab für die Mikroskopie VHX-1000; Firmenschrift Nr. 622165, 2010.
- [56] Institut für Maschinenelemente: TechSheet #102070 Sealobserver; Firmenschrift, Universität Stuttgart, Stand 04.06.2019.
- [57] Baumann, M.; Bauer, F.: Moderne visuelle Untersuchungsmethoden für die Verschleißanalyse am Beispiel Radial-Wellendichtring; 20th Internationale Sealing Conference, Fachverband Fluidtechnik im VDMA e.V., Stuttgart, 2018, ISBN 978-3-8163-0727-3.
- [58] Institut f
 ür Maschinenelemente: TechSheet #102050 V1 IMA-Sealscanner[®]; Firmenschrift, Universit
 ät Stuttgart, Stand 17.07.2019.
- [59] Color 3D Laser Microscope VK-9710, User's Manual; Firmenschrift, Keyence Corporation, 2008.
- [60] Phenom-World B.V.: Phenom Desktop-Elektronenmikroskope; Produktinformationen, Darmstadt, 2013.
- [61] Eipper, A.: Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung; Dissertation, Universität Stuttgart, 2018.
- [62] Jung, S.: Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenlaufflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung; Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.
- [63] Trotec Laser GmbH: Lasergravurmaschine Speedy 100 flexx; Produktinformation, https://www.troteclaser.com/de/lasermaschinen/lasergravurmaschine-speedy/, Stand 23.08.2019.
- [64] DIN: DIN EN ISO 527-1 Kunststoffe Bestimmung der Zugeigenschaften Teil 1: Allgemeine Grundsätze; Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2012.
- [65] DIN: DIN EN ISO 527-2 Kunststoffe Bestimmung der Zugeigenschaften Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen; Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2012.
- [66] Olbrich, M.: Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen; Dissertation, Institut f
 ür Maschinenelemente, Universit
 ät Stuttgart, 2002.

- [67] Güldenberg, F.: PTFE ist nicht immer gleich PTFE Dauerhafte Sicherheit gewährleistet; Interview, https://prozess-technik.industrie.de/chemie/anlagen-chemie/armaturen-rohre-schlaeuche/dauerhafte-sicherheit-gewaehrleistet/, 2006, Stand 04.06.2019.
- [68] Reichert, J.: Radialwellendichtringe für den Einsatz in Kraftfahrzeugen, Entwicklungs- und Prüfmethoden; Seminar der Technischen Akademie Wuppertal: Elastomere als Dichtungsmaterialien, Altdorf, 1999.
- [69] Symons, J. D.: Elastohydrodynamic Sealing Systems; SAE Technical Paper Series 730049, 1973.
- [70] Fuchs Schmierstoffe GmbH: TITAN Supersyn LONGLIFE SAE 0W-30; Produktdatenblatt PI60524, Mannheim, Stand 11.04.2016.
- [71] Mercedes-Benz: MBN 31007-7: Geometrische Produktspezifikationen (GPS)
 Oberflächenbeschaffenheit Mess- und Auswerteverfahren zur Bewertung von drallreduzierten dynamischen Dichtflächen; 2008.
- [72] Baitinger, G.: Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenlaufflächen; Dissertation, Universität Stuttgart, 2011.
- [73] Baumann, M.: Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenlaufflächen Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen; Dissertation, Universität Stuttgart, 2017.
- [74] Schwenk, C.: Untersuchung der Folgefähigkeit von RWDR-Dichtlippen mittels FEM-Simulation; unveröffentlichte Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2018.
- [75] Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG: Levitex Revolutioniert die Motordichtungen – Gasgeschmierte Gleitringdichtung für die Kurbelwelle reduziert die Reibung um 90 % und die CO2-Emissionen um 0,5 – 1 g/km; Whitepaper, Weinheim, 2016.
- [76] Patent: US 2019/0030795 A1 Additive Processing of Fluoropolymers; 2019.

Veröffentlichungen des Autors im Rahmen dieser Arbeit

- [77] Stoll, M.; Dakov, N.; Hörl, L.; Bauer, F.: A New Innovative Design for Shaft Seals; 24th International Conference on Fluid Sealing, BHR Group, Manchester, 2018, ISBN 978-1-85598-1638.
- [78] Hörl, L.; Dakov, N.; Stoll, M.; Bauer, F.: Vorrichtung zur Abdichtung eines Gegenstands, Anmeldetag 15.12.2016, Offenlegungstag 21.06.2018, Offenlegungsschrift DE 10 2016 124 457 A1.
- [79] Hörl, L.; Dakov, N.; Stoll, M.; Bauer, F.: Device for Sealing an Object, Anmeldetag 23.11.2017, Offenlegungstag 21.06.2018, Aktenzeichen PCT/EP2017 /080186, Offenlegungsschrift WO 2018/108478 A1.
- [80] Stoll, M.; Dakov, N.; Hörl, L.; Bauer, F.: Functional Behaviour of Different Back Structures for PTFE Shaft Seals; 20th ISC, Stuttgart, Fachverband Fluidtechnik im VDMA e.V., 2018, ISBN 978-3-8163-0727-3.

Im Rahmen dieser Arbeit vom Autor betreute Studienarbeiten

- [81] Opitz, M.: Simulative und experimentelle Analyse neuartiger Rückförderstrukturen von PTFE-Manschettendichtungen; unveröffentlichte Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2017.
- [82] Sitterer, M.: Experimentelle Optimierung von innovativen Rückförderstrukturen an PTFE-Manschettendichtungen; unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2018.
- [83] Heimrath, J. P.: Analyse und Verbesserung der statischen Dichtheit von indirekt und direkt strukturierten Wellendichtringen; unveröffentlichte Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2018.
- [84] Gohs, M.: Simulative Optimierung von innovativen Rückförderstrukturen an PTFE-Manschettendichtungen; unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, 2018.
- [85] Preisser, M.: Analyse und Optimierung des Montageprozesses von PTFE-Manschettendichtringen, unveröffentlichte Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2019.

11 Anhang

1. Experimentell untersuchte Dichtringe

Dargestellt werden alle experimentell untersuchten Dichtringe.

Sichel - Prototyp
 breite Sichel
 Sägezahn
 doppelter Sägezahn
 Sichel aus 0,5 mm FKM
 bidirektionale Sichel
 bidirektionaler Sägezahn

Abgebildet ist jeweils die Form und Tiefe der Rückenstrukturen, die Maße der Rückenstrukturen, die simulierte Höhen- und Pressungsverteilung sowie der mit Hilfe der Glashohlwelle real gemessene Kontaktbereich der Dichtringe.

2. Simulationen

Dargestellt werden in der Arbeit nicht besprochene Simulationen mit unterschiedlichen Rückenstrukturen. Diese sind wie folgt gegliedert:

- 8 bis 34: Sichelstrukturen
- 35 bis 57: Sägezahnstrukturen
- 58 bis 78: schräge Streifenstrukturen
- 79 bis 82: bidirektionale Strukturen
- 83 bis 90: gerade Streifenstrukturen
- 91 bis 99: dreieckige Strukturen
- 100 bis 106: diverse Strukturen

Abgebildet ist jeweils die simulierte Höhen- und Pressungsverteilung der Dichtringe.


























































12 Lebenslauf

Persönliche Daten

Anschrift	Mario Alexander Stoll
	Hölderlinstraße 55
	70193 Stuttgart
Geboren	19.05.1988 in Laupheim
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	verheiratet mit Kathrin Daria (2015)
Kinder	Paulina Louise (2018)
Schulbildung	
1994 - 1998	Anna-von-Freyberg-Grundschule in Laupheim
1998 - 2007	Carl-Laemmle-Gymnasium in Laupheim
Ersatzdienst	
07/2007 - 04/2008	Werkstatt für behinderte Menschen in Laupheim
Studium	
10/2008 - 03/2012	Universität Stuttgart, Studiengang: Maschinenbau Abschluss: Bachelor of Science
04/2012 - 05/2014	Universität Stuttgart, Studiengang: Maschinenbau
	Abschluss: Master of Science
10/2014 - 09/2015	Friedrich-Schiller-Universität in Jena, Studiengang: Ge-
	werblicher Rechtsschutz
	Abschluss: Patent-Ingenieur
Beruf	
05/2014 – heute	Akademischer Mitarbeiter am Institut für Maschinenele-
	mente, Universität Stuttgart, Bereich Dichtungstechnik

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden
2	W Passara	wellen Konzentrisch laufande Gewinde Wellen Dichtung im lamingron Parsish
2	w. rassera	Konzentrische Donnelgewinde wellendichtung im laminaren Bereich
2	K. Kalow	Die Kreiszulinderschelendichtung: Eine Avieleneltdichtung mit druckehbängiger Speltweite
3	W. Sommon	Die Kreiszynnerschalendichtung. Eine Axiaispandichtung init diuckabiangiger Spanweite
	w. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Beruhrungstreie weitendichtungen mit nochviskosen
4	IZ 11-14-1	Sperifiussigkeiten
4	K. Hellel	dervallen diektungen im Jemingenen Dersich
5	V U Uirschmann	Deitrag zur Derschnung der Geometrie von Evolventenverzehnungen
6	U Döublo	Durah fluß und Druelgezeilauf im radial durahaträmtan Diahtanalt hai nulsiarandam Druek
7	II. Dauble	Einhaitligha Darachnung von Schnaidrödern für Außen, und Innenverzehnungen. Deitrag zu
/	J. KyUak	Eingriffsstörungen heim Hohlrad-Verzahnen mittels Schneidräder
8	D Franz	Pachnargastütztas Entwarfan von Varianten auf dar Grundlage gesammelter Erfahrungs
0	D. FIdilZ	werte
9	F Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10	L. Lauster	Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. DrIng. K. Talke
11	G Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reihverhalten von Radialwellen-
	0.011	dichtringen
12	F Fuchs	Untersuchung des elastahydradynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hachdruck-
12	L. I della	dichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsontischer Bilder
14	W Wolf	Programmsvstem zur Analyse und Ontimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenver-
		zahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten
		Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmen-
		genschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-
		Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. DrIng. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	KH.Hirschmann;	
•	B. Bertsche	
30	HJ. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluor-
	YZ YZI 1 1	äthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflan-
22	D Z	kenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinaten-
	P I 1	tasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Krattianrzeugen durch Fahrsimulation
34 25	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprufmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
30	A. Holderlin	verknuprung von reconcerunterstutzter Konstruktion und Koordinatenmelstechnik
30	J. Kurtess	Addichten von Flussigkeiten mit Magnetilussigkeitsdichtungen
31	G. Borenius	Zur rechnerischen Schadigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugfeilen bei
20	E. Enite	stocnastischer Belastung mit Variabler Mittellast
38 20	E. FIIZ	Addictioning von waschinenspindeln
39	HK Müllor	berunnungsmeie Spindelabdichtungen im werkzeugmäschinenbau. Konstruktionskatalog
	TILIX. IVIUNCI	

2.1	** 0	2015 J
Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrko-
		ordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung
		von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	WE. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und
- 1	N / To 11	Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Kochling	Beitrag zur Auslegung von geradverzahnten Stirnradern mit beliebiger Flankenform
55	M. Hildebrandt	Schadenstruherkennung an Walzkontakten mit Korperschall-Referenzsignalen
54	H. Kalser	Konstruieren im verbund von Experiensystem, CAD-System, Datenbank und wiedernotteil-
55	N Stanger	suonsysioni Barührungefrai abdichten hai klainem Bauraum
55	R Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beisniel PKW Automatikgetriebe
57	H. Naunhaimar	Baitrag zur Entwicklung von Stufanlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G Neumann	Thermografische Traghilderfassung an ratierenden Zahnrädern
59	G Wüstenhagen	Reitrag zur Ontimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur System-
00	I. Diodocek	berechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-
		dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnradpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnradpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und An-
		wendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
/1	S. King	Anwendung der Verzähnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des werkzeug-
70	M Klynfen	schleitens
72	M. Klopfer	Lostoilgaräusaha von Fahrzauggatriahan
73	W Hoos	Losiengerausene von Famzeuggenreben Darührungsfraige Abdighten im Meschingnhau unter besonderer Derücksightigung der Fang
/4	w. 11dds	labyrinthe
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W Flser	Reitrag zur Ontimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen
		Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräser-
		herstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-
		Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnradpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produkt-
		entwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer
		Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-
		Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeug-
		maschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die
100	II D	Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Kuppert	CAD-integrierte Zuverlassigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Killan	Entwicklung norndynamisch beansprüchter Flachendichtverbindungen
104	A. Flaig	Simulation
105	B Luo	Uberprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlössigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels
105	D. Luo	Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Frhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässig-
100	E. Senappennader	keit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper - und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring. Gegenlauffläche und
		Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte
	U	technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Losteilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksich-
		tigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der
		Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven
		Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffi-
		zient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenlauf-
		flächen

Nr	Verfasser	Titel
	, 9110504	
136	I Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen hei Zuverlässigkeitsanalvsen
137	Ch Maisch	Barücksichtigung der Ölalterung hei der Labensdauer, und Zuverlässigkeiterragnass von
137	Cii. Iviaiscii	Getriehen
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von
		PTFE-Manschettendichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	St. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenlaufflächen auf das tribologi-
	0	sche System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungsmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung
		mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungsgeräusche am Beispiel von Pkw-Lenkungen – Analyse und Abhilfemaßnahmen
146	S. Kiefer	Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtun-
		gen II S
147	P. Fietkau	Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben
148	B. Klein	Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik
149	M. Klaiber	Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel
		von additivierten synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle
151	M. Kopp	Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden
152	M. Narten	Abdichten von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen - Reibungsmin-
		derung durch Makrostsrukturierung der Dichtungsgegenlauffläche
153	P. Schuler	Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung
154	A. Romer	Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vor-
		wissen
155	A. Daubner	Analyse, Modellierung und Simulation von Verschleiß auf mehreren Skalen zur Betriebs-
		dauervorhersage von Wellendichtringen aus PTFE-Compound
156	J. Rowas	Okologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn
157	D. J. Maier	Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugma-
1.50	I D D II .	schinen
158	JP. Reibert	Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik
159	M. Sommer	Einfluss des Schmierfetts auf das tribologische System Radial-wellendichtung – Betriebs-
1.0	W/ H	verhalten und Funktionsmodell
160	W. Haas	Basics der Dichtungstechnik
161	C. M. Nauhangan	Entwieldung einer gegessehmierten Cleitringelichtung für den Eingetz im Verkrennungeme
162	S. M. Neuberger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmo-
162	W. Goujavin	101 Strömungsmachanische Untersuchungen zur Eunktionsweise von Menschettendichtungen
105	w. Obujavili	aus DTEE Compounds mit Rückförderstrukturen
164	K Mutter	aus FTFE-Compounds mit Ruckforderstrukturen Simulation der Zuverlössigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beisniel Fahrkomfort
165	S. Sanzanbachar	Paduziarung von Getriebageräuschen durch Körnerschallminderungsmaßnahmen
166	O Koller	Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang
167	M Remnnis	Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtringen aus
107	Mi. Remppis	Flastomer
168	M Baumann	Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenlaufflächen – Messung Analyse, Bewertung und
100	in Duanani	Grenzen
169	M. Schenk	Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebstrangerprobung
170	J. Gölz	Manschettendichtringe aus PTFE-Compounds, Funktionsmechanismus von PTFE-
		Manschettendichtungen und Entwicklung von Rückförderstrukturen für beidseitig drehende
		Wellen
171	J. Kümmel	Schmutzabdichtung mittels Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen
172	S. Bader	Gehäusedichtungen unter korrosiver Last
173	J. Juskowiak	Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeits-
		prognosen
174	F. Jakob	Nutzung von Vorkenntnissen und Raffungsmodellen für die Zuverlässigkeitsbestimmung
175	N. P. Tonius	Klauenschaltelemente in Stufenautomatgetrieben
176	V. Schweizer	Berücksichtigung und Bewertung streuender Einflussgrößen in der Zuverlässigkeitssimulation
177	F. Bosch	Abdichtung trockener Stäube mit fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen
178	M. Botzler	Präventive Diagnose abnutzungsabhängiger Komponentenausfälle
179	C. Fehrenbacher	Förderverhalten im Dichtsystem Radial-Wellendichtung

Nr.	Verfasser	Titel
180	B. Heumesser	Optimierung des Klapper- und Rasselgeräuschverhaltens bei Doppelkupplungsgetrieben
181	A. Eipper	Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung
182	Alexander Buck	Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleiß an Hydraulikstangendichtungen
183	Andrea Buck	Simulation und Optimierung der Instandhaltung unter Berücksichtigung sich ändernder Be-
		lastungen mittels Petrinetzen
184	St. Kemmler	Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten
185	T. Rieker	Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme mit stochastischen Netzverfahren
186	M. Bartholdt	Kunden- und kostenorientierte Zuverlässigkeitszielermittlung
187	V.Warth	Systematische Synthese und Bewertung von Stufenlosgetrieben
188	N. Nowizki	Funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit in frühen Phasen der Produktentwicklung
189	F. Schiefer	Additive Fertigung von Radial-Wellendichtringen
190	M. Dazer	Zuverlässigkeitstestplanung mit Berücksichtigung von Vorwissen aus stochastischen Le-
		bensdauerberechnungen
191	J. Totz	Funktionsuntersuchungen an Dichtsystemen mit weichgeschliffenen Dichtungsgegenlaufflä-
		chen und Radial-Wellendichtringen aus NBR