

Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Frank Bauer

PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille -Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen

Bericht Nr. 126

D 93 ISBN 3-936100-27-6

### Institut für Maschinenelemente

Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

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

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

# PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille -Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Frank Bauer

geboren in Stuttgart

Hauptberichter: Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. W. Haas Prof. Dr.-Ing. Th. Maier

Tag der Einreichung:30.01.2008Tag der mündlichen Prüfung:28.04.2008

Institut für Maschinenelemente

2008

Meiner Frau und Eltern

#### Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart. Die Untersuchungen waren Teil eines im Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM e. V.) durchgeführten Projekts.

Meinen herzlichen Dank an Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas, Leiter des Bereichs Dichtungstechnik am Institut, für die Ermöglichung dieser Arbeit. Im Besonderen für die fachliche und menschliche Unterstützung, die zahlreichen Diskussionen und die ständige Hilfsbereitschaft.

Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Maier, Leiter des Forschungs- und Lehrgebiets Technisches Design am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Direktor am Institut für Maschinenelemente, danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Allen ehemaligen und derzeitigen Kollegen und Freunden am Institut danke ich für die Unterstützung, die Hilfe beim Prüfstandsaufbau, den intensiven fachlichen Diskussionen und für unser "IMA-Klima".

Dank an alle wissenschaftlichen Hilfskräfte und Studienarbeiter, insbesondere meinem "Dauerhelfer" seit Projektbeginn.

Stuttgart, April 2008

Frank Bauer

# Inhaltsverzeichnis

A	AbstractIV		
A	bkürzungen und Formelzeichen	VI	
1	Ausgangssituation	1	
2	Grundlagen, Stand der Technik und Forschung	2	
	2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik	2	
	2.1.1 Strömungsmechanik	2	
	2.1.2 Grundlegende Mechanismen und Begriffe	5	
	2.1.3 Abdichtung drehender Wellen	6	
	2.2 Stand der Technik	9	
	2.2.1 PTFE als Dichtungswerkstoff	11	
	2.2.2 Herstellung, Lieferung und Montage	12	
	2.3 Stand der Forschung	16	
3	Problemstellung und Zielsetzung	18	
4	Untersuchungseinrichtungen	19	
	4.1 Optische Einrichtungen	19	
	4.2 Radialkraftmessgerät	20	
	4.3 Universalprüfstand zur Reibmomentmessung	21	
	4.4 Universalprüfstand zur Förderwertmessung	23	
	4.5 Dauerlaufprüfstand	24	
	4.6 Statische Ölkammern	25	
	4.7 Strömungsprüfstand		
	4.8 Numerische Simulation		
	4.8.1 Finite Elemente Analyse		
	4.8.2 Strömungssimulation		
5	Untersuchungsmethodik	29	
	5.1 Systemkomponenten	29	
	5.2 Radialkraft		
	5.3 Reibmoment		
	5.4 Förderwerte		
	5.4.1 Olförderwert	34	
	5.4.2 Luftförderwert	35	
	5.5 Dauerlaufuntersuchung		
	5.6 Statische Dichtheit		
	5.7 Analyse der Strömung		
	5.7.1 Methodik bei stillstehender Welle		
	5.7.∠ IVIETNOAIK DEI ARENENAER VVEIIE		
	5.0 INUMERISCHE SIMULATION.	41	
	5.0.1 FINILE Elemente Analyse	41	
		43	

6	Unters	suchungsergebnisse	. 44
	6.1 Dichtringe		
	6.2 Rad	lialkraft	. 48
	6.2.1	Betrachtungen am Einzeldichtring	. 48
	6.2.2	Ergebnisse und Vergleich	. 50
	6.2.3	Mittlere Flächenpressung	. 51
	6.2.4	Temperaturverhalten	. 52
	6.2.5	Zusammenfassende Erkenntnisse	. 53
	6.3 Reit	pmoment	. 53
	6.3.1	Einfluss des Ölfüllstands und der Temperatur	. 54
	6.3.2	Ergebnisse und Vergleich	. 54
	6.3.3	Zusammenfassende Erkenntnisse	. 57
	6.4 Förd	derwerte	. 58
	6.4.1	Ölförderwert	. 58
	6.4.2	Luftförderwert	. 59
	6.4.3	Zusammenfassende Erkenntnisse	. 61
	6.5 Dau	erlaufuntersuchungen	. 61
	6.5.1	Dichtheit	. 61
	6.5.2	Wellenverschleiß	. 61
	6.5.3	Dichtringverschleiß und Ölkohlebildung	. 63
	6.5.4	Zusammenfassende Erkenntnisse	. 65
	6.6 Stat	ische Dichtheit	. 66
	6.6.1	Ergebnisse	. 66
	6.6.2	Zusammenfassende Erkenntnisse	. 69
	6.7 Visu	elle Analyse der Strömung	. 69
	6.7.1	Beobachtungen bei stillstehender Welle	. 70
	6.7.2	Beobachtungen bei drehender Welle	. 75
	6.7.3	Funktion nach Dichtringverschleiß, Ölkohlebildung und Verschmutzung	. 79
	6.7.4	Zusammenfassende Erkenntnisse	. 81
	6.8 Nun	nerische Simulation	. 81
	6.8.1	Finite Elemente Analyse	. 81
	6.8.2	Strömungssimulation	. 85
7	Funkti	onsweise der PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille	. 89
	7.1 Gru	ndgeometrie (Gehäuse, Dichtlippe, Schutzlippe)	. 89
	7.2 Feir	ngeometrie (Spiralrille, Damm, Dichtsteg)	. 90
	7.2.1	Eingangsbereich	. 90
	7.2.2	Berührbereich der Dichtlippe	. 90
	7.2.3	Gewindegänge der Spiralrille und Dämme	. 91
	7.2.4	Dichtsteg	. 92
	7.2.5	Ausgangsbereich	. 93
	7.3 Fun	ktionsmodelle	. 94
	7.3.1	Statische Funktion	. 94
	7.3.2	Dynamische Funktion	. 96

8	Optimierung der Spiralrille und Erweiterung der Einsatzgrenzen	98
	8.1 Optimierung der Spiralrille	98
	8.2 Erweiterung der Einsatzgrenzen durch innovative statische Abdichtung	100
	8.3 Problematik der Gestaltungsvorschläge	102
	8.4 Zusammenfassung	103
9	Gestaltung und Analyse optimierter Dichtringe	104
	9.1 Gestaltung mithilfe der Finiten Elemente Analyse	104
	9.2 Geometrie	106
	9.3 Funktion	108
	9.4 Zusammenfassung	109
10	Zusammenfassung und Ausblick	110
11	Literaturverzeichnis	112

## Abstract

Elastomeric lip seals are used to seal rotating shafts in all areas of mechanical and automotive engineering. The Elastomeric lip seal is a frequent and reliable sealing system in millions of cases. Based on its good static sealing and the active dynamic sealing mechanism it is accepted by the market. However, limits are set to its area of application.

The load on the lip seal during its use, for example at high ambient temperatures and high shaft speeds leads to high temperatures at the seal edge. Also the high specific friction work leads to overheating. This degrades the elastomer and the fluid. Elastomeric lip seals are ageing very fast under such high-loads. An even bigger problem is the comparative low chemical resistance.

For these reasons Elastomeric lip seals are being substituted more and more by sleeve type lip seals made of Polytetrafluorethylene (PTFE) compounds. The PTFE lip seals can be used in a temperature range up to 260 °C and at higher circumferential speeds. Due to their good tribological attributes they can also be used at sparsely oiled sealing areas or for the sealing of poorly lubing fluids. Its universal chemical resistance is another major advantage.

In comparison to an Elastomeric lip seal the plain PTFE lip seal does not have an inward pumping mechanism. Therefore the PTFE lip seal with spiral groove was developed. The spiral groove is connected, analogue to a thread with several convolutions, to the shaft. Thereby it generates an adjusted pump effect on the oil beneath the lip depending on the direction of rotation. The static sealing has to be stated critically due to the fact that fluids can leak through the continuous spiral groove at standstill of the shaft.

The precise functions of the dynamic and the static seal mechanism are not well understood up to now. Therefore today's products were largely developed by empiric procession. Nevertheless, the understanding of the flow is necessary to be able to develop and improve new seals.

This work aimed to analyse and optimise the function and design of the groovegeometry. Therefore the state-of-the-art of market-available PTFE lip seals was investigated. The following behaviours and methods were analysed and used:

- Geometry
- Radial Force
- Friction Torque
- Oil pumping rate
- Air pumping rate
- · Leak tightness, wear and development of oil coal in long-time tests
- Static leak tightness
- Flow in the convolutions due to visual analysis through a glass hollow shaft
- Finite Element Analysis
- Computational Fluid Dynamic Analysis

#### Abstract

With these methods the penetration behaviour, the hydrodynamic flow and the back pumping mechanisms were investigated and exemplarily described for three groove types. The mechanisms in different groove types can now be understood, compared, and optimised. In addition, the influence of entered particles or of an oxidation deposit from degraded oil can be analysed. Furthermore, this knowledge serves the verification of Computational Fluid Dynamic simulations.

Results for the dynamical function are:

- The oil is forwarded circumferentially in the convolutions around the shaft and therefore pumped back. No axial flow takes place.
- The transport of the oil takes also place on the contacting areas, even if the convolutions are not filled.
- → The geometries of the different spiral grooves are working well if the shaft rotates.

Results for the statical function are:

- All PTFE lip seals leak if the oil level reaches the shaft, and therefore the lip.
- The oil flows through the open entry into the groove, around the shaft and even above the oil level. It leaks out at the air side.
- ➔ The geometries of the different spiral grooves do not work sufficiently if the oil level reaches the lip seal at standstill of the shaft.

With this knowledge, the groove geometry was optimized in this dissertation.

- The contacting area has to be small, and the walls of the groove have to be rampant. Therefore the oil can be hold in this area by cohesion forces and the oil does not flow in the convolution.
- The lip seal was innovatively extended with a closed ring at the oil side. This ring closes the open entry of the spiral groove and thus avoids the inflow of oil.
- The radial force and the pressure distribution were optimised with the help of finite element analysis. They were adjusted with newly-created add-ons.

With these optimisations a new, statically leak tight lip seal for the use in all fields of mechanical engineering was developed. It can seal all fluids at temperatures up to 260 °C.

This innovative lip seal prevents choosing a wrong seal, optimises the storage and ensures an optimal function at all operating conditions. The costs are comparable to highgrade Fluorelastomeric lip seals.

# Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung		Beschreibung
RWDR		Radial-Wellendichtring
PTFE		Polytetrafluorethylen
FKM		Fluorkautschuk
NBR		Nitril-Butadien-Rubber
CCD-Sensor		Charge-coupled Device (Bildsensor)
UV-Licht		Ultraviolettes Licht
DIN		Deutsches Institut für Normung
HSK		Hohlschaftkegel
FEM		Finite Elemente Methode
FEA		Finite Elemente Analyse
CFD		Computational Fluid Dynamics (Strömungs- simulation)
Formal-sisk on	Einhait	Decelusi

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
А	mm <sup>2</sup>	Oberfläche der Flüssigkeit
A <sub>b</sub>	mm <sup>2</sup>	Berührfläche der Dämme
A <sub>Gewindegang</sub>	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche eines Gewindegangs
b	mm	Berührbreite der Dichtkante
Е	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul
F <sub>R</sub>	Ν	Radialkraft
F <sub>G</sub>	Ν	Gewichtskraft
F <sub>Reib</sub>	Ν	Reibungskraft
$F_{\sigma}$	Ν	Kraft Oberflächenspannung
g	m/s <sup>2</sup>	Erdschwerebeschleunigung
h	mm	Spalthöhe
h <sub>f</sub>	mm	Federhebelarm
h <sub>steig</sub>	mm	Steighöhe
1	mm	Länge
M <sub>R</sub>	Nm	Reibmoment
m <sub>fl</sub>	g	Masse Flüssigkeit
ṁ	g/min	Massenstrom
m̀ <sub>F</sub>	g/min	Förderwert
ḿ <sub>L</sub>	g/min	Leckagestrom

### Abkürzungen und Formelzeichen

m <sub>R</sub>	g/min	Rückförderstrom
m <sub>sim</sub>	g/min	Simulierter Massenstrom
n	1/min	Drehzahl
р	Pa	Druck
p <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Mittlere Flächenpressung
R <sub>e</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze
R <sub>z</sub>	μm	Gemittelte Rautiefe
r	mm	Radius
V	m <sup>3</sup>	Volumen
v <sub>(h)</sub>	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
	ml/s	Simulierter Volumenstrom
W	J	Arbeit
α	0	Ölseitiger Kontaktwinkel
β	0	Luftseitiger Kontaktwinkel
ε		Dehnung
η	kg/m * s	Dynamische Viskosität
θ	°C	Temperatur
μ		Querkontraktionszahl
ν	mm <sup>2</sup> /s	Kinematische Viskosität
π		Kreiskonstante
Q	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma_{Fk}$	N/mm <sup>2</sup>	Spannung im Festkörper
σ	$J/m^2 = N/m$	Oberflächenspannung
τ	N/mm <sup>2</sup>	Schubspannung
ω	s <sup>-1</sup>	Winkelgeschwindigkeit

# 1 Ausgangssituation

In allen Bereichen des Maschinen- und Fahrzeugbaus werden Elastomer-Radialwellendichtringe (RWDR) zur Abdichtung drucklos bespritzter oder (teil-) gefluteter Wellen verwendet. Mit seiner guten statischen Dichtheit und seinem aktiven Rückfördermechanismus hat er sich in der Praxis bewährt ([1], [2]).

Seinem Einsatzbereich sind jedoch Grenzen gesetzt. Seit einigen Jahren steigt vor allem im Fahrzeugbau die thermische Belastung, zum Beispiel von Kurbelwellenabdichtungen durch die weitere Erhöhung des Wirkungsgrades moderner Verbrennungsmotoren an. Darüber hinaus stellt der Einsatz neuer synthetischer oder biologisch abbaubarer Schmierstoffe und neuer Additive ein Problem dar. Es besteht die Gefahr der Quellung, Versprödung, Zersetzung oder Alterung des Elastomers. Zum Teil versagen sogar die höherwertigen Fluorkautschuk (FKM)-Dichtringe vorzeitig (vergleiche [3]). Häufig kann dabei die Ursache nicht erkannt werden.

Aus diesen Gründen werden zur Kurbelwellenabdichtung seit ca. zwei Jahrzehnten anstatt der Elastomer-RWDR nahezu ausschließlich Manschettendichtringe aus Polytetrafluorethylen (PTFE)-Compounds verwendet. PTFE zeichnet sich vor allem durch seine hohe thermische und universelle chemische Beständigkeit aus.

PTFE-Manschettendichtringe bilden im Gegensatz zu Elastomer- Radialwellendichtringe keine eigenständigen Rückfördermechanismen aus. Deshalb müssen mechanisch Rückförderelemente eingebracht werden. Dabei hat sich die Spiralrille als geeignete Struktur herausgestellt. Im dynamischen Betrieb funktionieren die Dichtringe an der bespritzten Kurbelwelle gut.

Um die Luftabdichtfähigkeit beim sogenannten Kalttest (Drucktest) nach der Motorenmontage [13] und die statische Öldichtheit zu gewährleisten, wird bei geprägten Dichtringen die Spiralrille an einer oder mehreren Stellen mit Dichtstegen verschlossen. Allerdings sind alle auf dem Markt erhältlichen PTFE-Manschettendichtringe schon bei Teilüberflutung statisch undicht. Aus diesem Grund können sie im allgemeinen Maschinenbau nicht sicher verwendet werden.

Die genaue Funktionsweise bei stillstehender und drehender Welle war bisher nicht bekannt. Bisherige Entwicklungen basieren auf empirischem Wissen.

# 2 Grundlagen, Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Dichtungstechnik, der Stand der Technik zu PTFE-Manschetten mit Spiralrille und die wichtigsten Forschungsarbeiten vorgestellt.

### 2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik

Zu den Grundlagen der Dichtungstechnik zählen neben Grundwissen der Strömungsmechanik die grundlegenden Mechanismen der Dichtungstechnik und die speziellen Mechanismen zum Abdichten rotierender Wellen.

### 2.1.1 Strömungsmechanik

Die Strömungsmechanik beschreibt das Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen. Da sich viele ihrer Eigenschaften ihrer Größenordnung nach, aber nicht grundsätzlich voneinander unterscheiden, werden sie als Fluide zusammengefasst. In dieser Arbeit werden nur die realen Flüssigkeiten unter Berücksichtigung der molekularen Reibung behandelt.

### Hydrodynamik

Eine laminare Strömung beschreibt eine gerichtete Bewegung von benachbarten Teilchen in ähnlicher Richtung und Geschwindigkeit. Im Maschinenbau werden meist inkompressible Strömungen behandelt, die sich in weitgehend vordefinierten Geometrien, wie beispielsweise in Gängen oder zwischen relativ bewegten Maschinenelementen befinden.

Eine Strömung kann durch eine Druckdifferenz zwischen Beginn und Ende der Geometrie hervorgerufen werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Flüssigkeit durch eine bewegte Wand anzutreiben oder mitzuschleppen (Bild 2.1). Auch technisch glatte Oberflächen können Flüssigkeiten mitschleppen. Es entsteht eine Schleppströmung, die den Massenstrom  $\dot{m} = dm/dt$  transportiert.



Bild 2.1: Schleppströmung durch bewegte Wand

Reale, reibungsbehaftete, laminare Strömungen zwischen relativ bewegten Wänden bilden nach Isaac Newton (Newtonsches Fluid) ein berechenbares Geschwindigkeitsprofil aus [4]. Diese Annahme geht davon aus, dass die Schubspannung  $\tau$  innerhalb der Flüssigkeit proportional zur Schergeschwindigkeit dv/dh ist, Gl. (2.1). Jede newtonsche Flüssigkeit ist dabei durch eine Proportionalitätskonstante, die dynamische Viskosität  $\eta$  gekennzeichnet.

$$\tau = \eta \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}h} \tag{2.1}$$

Dabei ist  $v_{(h)}$  die Strömungsgeschwindigkeit parallel zur Wand und h die Ortskoordinate normal zur Wand. Gilt die Haftbedingung an einer ruhenden Begrenzungswand, ist dort die Geschwindigkeit  $v_{(h=0)} = 0$ . Gleiches gilt für eine bewegte Wand, hier ist  $v_{(h=1)} = v_{Wand}$ . Zwischen den Wänden bildet sich ein Geschwindigkeitsprofil aus, das durch die inneren Reibungseffekte bestimmt ist (Bild 2.2).



Bild 2.2: Geschwindigkeitsprofil ohne Druckgefälle

Die Reibungskraft  $F_{Reib}$  des Fluids ist nach GI. (2.2) von der Fläche A und der Schubspannung  $\tau = \eta * dv/dh$  abhängig. Das heißt, bei gleicher Geschwindigkeit wird die Reibungskraft mit kleinerer Fläche A und/ oder größerer Spalthöhe h kleiner.

$$F_{\text{Reib}} = A * \eta \frac{dv}{dh}$$
(2.2)

Ändert sich die Geometrie des Strömungskanals über der Hauptrichtung, wird die Strömung durch die feststehende Wand umgelenkt. Dabei kann die Hauptrichtung einer Schleppströmung stark verändert werden. In Bild 2.3 ist eine umgelenkte Schleppströmung dargestellt. Vereinfacht sind dabei die bewegte Wand als ebene Fläche und das Strömungsvolumen als feststehender Gang in einem ebenen Körper dargestellt. Gleiches gilt auch für alle anderen Geometrien wie beispielsweise Zylinder in Hohlzylindern. Dies entspricht den Verhältnissen der Abdichtung rotierender Wellen.



Bild 2.3: Umgelenkte Schleppströmung

#### Hydrostatik

Kräfte, die zwischen gleichartigen Atomen oder Molekülen eines Stoffes wirken, werden Kohäsionskräfte (Zusammenhangskräfte) genannt. Die Kräfte zwischen den Atomen bzw. Molekülen zweier verschiedener Stoffe werden Adhäsionskräfte (Anhangskräfte) genannt [4].

Die zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit wirkenden Kohäsionskräfte heben sich im Innern der Flüssigkeit auf, da jedes Molekül allseitig von gleichartigen Molekülen umgeben ist. An der Oberfläche fehlen die nach außen gerichteten Kräfte (Bild 2.4). Deshalb entsteht eine resultierende Kraft  $F_{res}$  ins Innere der Flüssigkeit. Um Moleküle gegen diese Kraft an die Oberfläche zu bringen, muss die Arbeit W verrichtet werden.



Bild 2.4: Kräfte auf Moleküle

Aus diesem Grund haben auch Moleküle an der Oberfläche einer Flüssigkeit eine potenzielle Energie, die Oberflächenenergie genannt wird. Wird die Arbeit *d*W zur Oberflächenvergrößerung auf die Oberflächenänderung dA bezogen, so ergibt sich nach Gleichung (2.3) die Oberflächenspannung  $\sigma$  mit der Einheit 1 J/m<sup>2</sup> = 1 kg/s<sup>2</sup> = 1 N/m.

$$\sigma = \frac{\mathrm{dW}}{\mathrm{dA}} \tag{2.3}$$

Da ein System immer den Zustand kleinstmöglicher potenzieller Energie einnimmt, sind Flüssigkeitsoberflächen stets Minimalflächen; zum Beispiel hat eine Kugel die kleinste Oberfläche unter allen Körpern gleichen Volumens.

Wenn die Adhäsionskräfte größer sind als die Kohäsionskräfte, tritt bei der Berührung eines Flüssigkeitstropfens mit einem Festkörper (Bild 2.5) eine Benetzung auf. Dabei breitet sich die Flüssigkeit auf der Oberfläche des Festkörpers aus. Es wirken die Oberflächenspannungen  $\sigma_{13}$  zwischen gasförmiger (1) und fester Phase (3),  $\sigma_{12}$  zwischen gasförmiger (1) und flüssiger (2) und  $\sigma_{23}$  zwischen flüssiger (2) und fester Phase (3). Der Winkel zwischen der festen Phase und der Flüssigkeitsoberfläche ist  $\alpha$ .

Benetzungserscheinungen spielen auch eine wichtige Rolle, wenn enge Röhrchen (Kapillaren) in Flüssigkeiten getaucht werden. Wie Bild 2.6 zeigt, steigt die Flüssigkeit in der Kapillare um die Höhe  $h_{steig}$  über den Flüssigkeitsspiegel. Dieser Vorgang wird Kapillaraszension oder kapillare Hebung, im Allgemeinen auch Kapillarität genannt.

Die von der Oberflächenspannung  $\sigma$  herrührende Kraft  $F_{\sigma}$  und die Gewichtskraft der angehobenen Flüssigkeitssäule  $F_{G}$  müssen gleich groß sein:  $F_{\sigma} = F_{G}$ .

Mit  $F_{\sigma} = \sigma l = \sigma 2\pi r$  und  $F_{G} = m_{fl}g = V\varrho g = \pi r^{2}h_{steig}\varrho g$  ergibt sich  $\sigma 2\pi r = \pi r^{2}h_{steig}\varrho g$ . Bei nicht vollständiger Benetzung ist die Steighöhe vom Randwinkel  $\alpha$  abhängig, sodass  $\sigma = \sigma_{12} \cos \alpha$  gesetzt werden muss. Dann ist  $\sigma_{12} \cos \alpha \ 2\pi r = \pi r^{2}h_{steig}\varrho g$ . Somit gilt für die kapillare Steighöhe:

$$h_{\text{steig}} = \frac{2 \,\sigma_{12} \cos \alpha}{\text{ogr}} \tag{2.4}$$

Formel (2.4) zeigt, dass die Hebung umso größer ist, je kleiner der Radius (für andere Geometrien der Querschnitt) der Kapillare ist.





Bild 2.6: Kapillaraszension/ Kapillare Hebung

h<sub>steig</sub>

### 2.1.2 Grundlegende Mechanismen und Begriffe

In nahezu allen Bereichen der Technik, von der Mikropumpe bis zum Großanlagenbau muss abgedichtet werden. Die grundsätzliche Aufgabe der Dichtung ist, zwei Räume (Bild 2.7) in denen sich verschiedene Fluide befinden, voneinander zu trennen.



Bild 2.7: Aufgabe der Dichtung

Die Dichtungen lassen sich gemäß Bild 2.8 in ruhende statische und drehend oder linear bewegte dynamische Dichtstellen einteilen. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist, ob sich die Dichtpartner dabei berühren oder berührungsfrei sind.



Bild 2.8: Übersicht Dichtungstechnik

Im Folgenden werden die dynamischen, berührenden Dichtstellen näher betrachtet. Das tribologische System "Dichtung" besteht aus den Einzelkomponenten Dichtkörper, Gegenlauffläche und dem abzudichtenden Fluid. In Bild 2.9 ist das Prinzip einer Dichtung dargestellt. Der Dichtkörper (DK) wird verdrehgesichert (D) in ein feststehendes Gehäuse (G) aufgenommen. Der Dichtkörper wird mit einer Anlegekraft F auf die bewegte Gegenlauffläche, zum Beispiel eine Stange oder Welle angepresst. Das System Dichtung zeigt im Stillstand eine passive Abdichtung, indem es die Strömung des Fluides in den anderen Raum drosselt und somit den Leckagestrom  $\dot{m}_L$  (Bild 2.10) verringert oder im Idealfall unterbindet. Das System ist dicht.

Im Betrieb bildet sich zwischen den Systempartnern ein dynamischer, fluidgefüllter Dichtspalt aus. Im Idealfall schwimmt der Dichtkörper auf diesem Schmierfilm. Das System ist somit verschleißreduziert. Verfügt der Dichtkörper oder die Gegenlauffläche über einen aktiven Abdichtmechanismus, wird ein Rückförderstrom  $\dot{m}_R$  entwickelt, der den Leckagestrom  $\dot{m}_L$  kompensieren kann. Ist  $\dot{m}_R > \dot{m}_L$ ist das System dicht.





Bild 2.9: System "Dichtung"

Bild 2.10: Massenströme im System

### 2.1.3 Abdichtung drehender Wellen

Zur berührungsfreien Abdichtung drehender Wellen können nach Bild 2.8 Spalt-, Labyrinth-, Sperrluft-, Gewindewellendichtungen und andere eingesetzt werden. Zur berührenden Abdichtung werden neben Filzring, Stopfbuchse und Gleitringdichtung im allgemeinen Maschinen- und Fahrzeugbau hauptsächlich Radialwellendichtringe eingesetzt. Im Folgenden werden die Gewindewellendichtung und der Elastomer-Radialwellendichtring vorgestellt.

### Gewindewellendichtung

Bei der Gewindewellendichtung (Bild 2.11) wird die Dichtwirkung durch mehrgängige spiralförmige Gewindegänge im Gehäuse oder in der Welle oder in beiden gleichzeitig gewährleistet [5]. Der Dichtkörper besteht nicht aus einem zusätzlichen, dritten Bauteil. Im Betrieb erzeugt die Welle eine Schleppströmung (Bild 2.1). Durch die Wand der Gewindegänge wird das Fluid in den abzudichtenden Raum umgelenkt (Bild 2.3) und somit zurückgefördert. Die Gewindegänge wirken dabei wie ein Rückfördergewinde. Die Gewindewellendichtung erzeugt nur in einer Drehrichtung den Rückförderstrom  $\dot{m}_R$ . Ist der Rückförderstrom größer als der Leckagestrom  $\dot{m}_{L}$ , ist die Dichtung dicht. Dabei ist sie nicht über ihre Gesamtlänge L gefüllt. Die flüssigkeitsgefüllte Länge wird Lfl genannt. Um diese Funktion gewährleisten zu können, müssen die Welle und das Gehäuse statisch und dynamisch sehr gut ausgerichtet sein. Im Stillstand ist die Dichtung unwirksam, da Fluid direkt durch den offenen Spalt und die offenen Gewindegänge fliesen kann.



Bild 2.11: Funktionsweise Gewindewellendichtung

#### Elastomer-Radialwellendichtring (RWDR)

Zur berührenden Abdichtung drehender Wellen werden in allen Bereichen des Maschinen- und Fahrzeugbaus Radialwellendichtringe aus Elastomer (Bild 2.12) eingesetzt. Aufgrund seiner guten statischen Dichtheit und des aktiven, dynamischen Rückfördermechanismus hat er sich erfolgreich auf dem Markt durchgesetzt.



Bild 2.12: Elastomer-RWDR

Die Funktionsweise ist in den letzten Jahrzehnten ständig weiter erforscht worden. Die Arbeiten von Müller [1], [2] und Kammüller [6] bilden die Grundlage für das heutige Verständnis des Abdichtmechanismus.

Die Dichtlippe ist an einem Stützring anvulkanisiert. Die Dichtfunktion wird durch eine sehr schmale Dichtkante mit der Berührbreite b erfüllt. Die Dichtkante wird durch Materialaufdehnung der Membran des Dichtkörpers bei der Montage und eine Zugfeder, die sogenannte Wurmfeder mit der Anlegekraft F auf die Welle aufgedrückt. Dadurch verschließt die Dichtkante im Stillstand die Dichtstelle. Die Dichtung ist statisch dicht. Für die dynamische Abdichtung gibt es nach Kammüller [6] drei sich ergänzende Hypothesen, die beschreiben, wie der Rückförderstrom  $\dot{m}_R$  erzeugt wird:

- Verzerrungshypothese
- Seitenstromhypothese
- Wischkantenhypothese

Dabei sind die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  auf der Stirn- und Bodenseite (Öl- und Luftseite) und die Länge des Federhebelarms h<sub>f</sub> für die Funktion entscheidend, da über diese Parameter die Pressungsverteilung unter der Dichtkante beeinflusst wird.

Um die Abdichtwirkung weiter zu verbessern, können auf der Luftseite der Dichtkante sogenannte Drallstege (Bild 2.13) angebracht werden. Im montierten Zustand geht der Drallsteg in die Dichtkante über. Bereits ausgetretenes Fluid wird von der Welle mitgeschleppt (Schleppströmung). Durch die Wände der Drallstege wird das Fluid in Richtung Ölraum umgelenkt. Dabei baut sich in Umfangsrichtung ein Schleppdruck auf. Durch diesen Druck kann das Fluid unter der angepressten Dichtkante zurückfließen. Die im Bild vorgestellten einseitigen Drallstege sind nur für eine Drehrichtung geeignet und erzeugen einen um Faktor 100 höhere Förderwirkung als Dichtringe ohne Drallstege. Andere Ausführungen sind für beidseitigen Einsatz geeignet, zeigen jedoch nur eine um Faktor 10 höhere Förderwirkung als Dichtringe.



Bild 2.13: Elastomer-RWDR mit Drallstegen

Dem Einsatzbereich von Elastomer-Radialwellendichtringen sind jedoch auch Grenzen gesetzt.

Im Betrieb können hohe Belastungen auf die Dichtkante wirken. Hohe Laufgeschwindigkeiten führen zu hoher spezifischer Reibleistung an der schmalen Dichtkante. Dies kann, auch zusammen mit hohen Umgebungstemperaturen leicht zu Überhitzung und Ölkohlebildung führen. Das Elastomer wird dadurch thermisch zerstört und versprödet oder reißt [7].

Ein weiteres Problem ist die relativ geringe chemische Beständigkeit der Elastomerwerkstoffe. Dies ist nicht nur für den Einsatz in der chemischen Industrie mit aggressiven Medien von Bedeutung, sondern auch im allgemeinen Maschinen- und Fahrzeugbau mit hoch additivierten Mineralölen, der Vielfalt der synthetischen Öle oder den sogenannten Bioölen. Die Werkstoffe hochbelasteter Radialwellendichtringe altern durch diese Einflüsse sehr schnell. Häufiges und manchmal unerwartetes Versagen infolge chemischer Einflüsse ist auch mit hochwertigen Elastomeren die Folge. In solch hoch beanspruchten Anwendungsfällen muss auf ein anderes Material ausgewichen werden.

### 2.2 Stand der Technik

Polytetrafluorethylen (PTFE) ist thermisch und chemisch hoch beständig. PTFE eignet sich daher hervorragend zum Einsatz in der Dichtungstechnik. 1970 wurde von Sekulich [8] eine PTFE-Dichtung mit der Geometrie eines Elastomer-Radialwellendichtrings mit Drallstegen vorgestellt. Allerdings war dies ein Irrweg. Die Geometrie der Elastomer-Radialwellendichtringe kann nicht direkt übernommen werden, da PTFE den notwendigen Rückfördermechanismus nicht selbstständig aufbauen kann.

Stattdessen wird nach Kayser [9] auf die Geometrie der ursprünglichen Ledermanschetten zurückgegriffen. Auch diese PTFE-Manschetten können nach Schmidt [10] den notwendigen Rückfördermechanismus nicht selbstständig aufbauen. Es gilt nach Deuring [3] seit 1987 "als gesicherter Stand der Technik, dass PTFE-Manschettenabdichtungen ohne Rückfördergewinde keine sichere Dichtwirkung bei drehenden Wellen haben".

Deshalb ist die PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille (Bild 2.14) entwickelt worden. In die Dichtlippe wird mechanisch ein spiralförmiger Gang, die Spiralrille eingebracht. Die dünne Dichtlippe mit der Spiralrille wird bei der Montage umgestülpt und aufgeweitet. Die zur Erfüllung der Dichtfunktion erforderliche Anpressung wird allein durch die entstandenen Spannungen im Dichtringwerkstoff aufrechterhalten. Die Spiralrille wird im Berührbereich zum Rückfördergewinde, wie der Gang einer Gewindewellendichtung. Das Rückfördergewinde lenkt die durch die Welle erzeugte Schleppströmung um und erzeugt einen drehrichtungsabhängigen Rückförderstrom  $\dot{m}_R$  zur Ölseite.



Bild 2.14: PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille – Begriffsdefinition

Schmidt [10] stellte einen Nachteil der Spiralrille vor, indem er bemerkte, dass Flüssigkeiten bei Komplettüberflutung durch die Spiralrille fließen könnten und dies zu statischer Leckage führen könnte. Deuring [3] erläutert, "der Zwang, die statische Dichtheit zu sichern, begrenzt die Querschnitte der Gewindegänge" und Jenisch [11] erweitert "um bei stehender Welle Dichtheit zu erreichen muss die Drallrille im vordersten Dichtlippenbereich durch die Anpressung auf die Welle so stark zusammengedrückt werden, dass eine am Umfang geschlossene Berührlinie entsteht". Alle berichteten zur damaligen Zeit nur von Dichtlippen mit eingeschnittener Spiralrille.

Der Haupteinsatzbereich der PTFE-Manschettendichtringe mit Spiralrille ist die Abdichtung der Kurbelwelle in Verbrennungsmotoren. Diese ist im Betrieb meist nicht überflutet, sondern nur angespitzt. Bond [12] stellt die Problematik der statischen Leckage an einem anschaulichen Beispiel vor: "...und ist somit - beispielsweise, wenn der Motor stark geneigt wird - empfindlicher gegen statische Leckage". Dies kann beim Parken in Steillage oder beim Autotransport der Fall sein. Stillstandsleckage ist die Folge.

Um statische Öldichtheit und die Luftabdichtfähigkeit beim sogenannten Kalttest (Drucktest) nach der Motorenmontage [13] zu gewährleisten, wird bei geprägten Dichtringen die Spiralrille an einer oder mehreren Stellen mit Dichtstegen verschlossen.

Die genaue Funktionsweise der dynamischen und statischen Dichtwirkung der Spiralrille war bisher noch nicht ausreichend erforscht. Aus diesem Grund sind heute auf dem Markt befindliche Dichtringe größtenteils aus empirischen Entwicklungen entstanden.

Ein Vergleich der Eigenschaften von Elastomer-Radialwellendichtringen und PTFE-Manschettendichtringen mit und ohne Spiralrille gibt Tabelle 2.1.

Tabelle 2 1 <sup>.</sup> '	Veraleich de	r Figenschaften	VOD RWDR UI	nd PTFF-Manso	chettendichtringen
	vergieich ue	a Ligenschalten			Shellendionlingen

Kriterium	Dichtelement		
	RWDR	PTFE	PTFE mit Spiralrille
statische Dichtheit	+	0	-
Rückfördermechanismus	+		$+ \rightarrow ++$
Drehrichtungsunabhängigkeit	++	0	
thermische Belastbarkeit → trockenlauffähig	-	++	++
hohe spezifische Reibleistung (Ölkohlebildung)		0	+
chemische Beständigkeit		++	++

Im Einbauzustand zeigt das Lippenende (Ölseite) in den Ölraum. Diese Dichtringe der 1. Generation (Bild 2.15, links) werden heutzutage immer noch verwendet. Die Dichtringe der 2. Generation werden entgegengesetzt, also mit dem Lippenende zur Luftseite montiert (Bild 2.15, rechts). Derartige Dichtringe werden bisher nicht serienmäßig eingesetzt und befinden sich noch im Prototypenstatus. In [14] wurden diese Ringe untersucht. In [15] werden von einem Hersteller aktuelle Erkenntnisse vorgestellt.



Bild 2.15: Zwei Generationen von Manschettendichtungen

Die Dichtringe sind temperatur- und universell fluidbeständig. Nach Schmitt [7] sind lediglich Verschleiß und Ölkohlebildung die Gefahren für die Betriebssicherheit der Dichtringe. Auch Bock [16] hält die Ölkohlebildung für das Hauptproblem und schlägt vor, die Temperatur unter der Dichtlippe möglichst gering zu halten.

### 2.2.1 PTFE als Dichtungswerkstoff

Polytetrafluorethylen (PTFE) ist ein teilkristallines Polymer, das durch Polymerisation aus monomerem Tetrafluorethylen gewonnen wird. Das dabei entstehende Molekül zeichnet sich durch einen unverzweigten, linearen Aufbau aus. Die Kohlenstoff-Fluorverbindung ist eine der stärksten organischen Bindungen, die zudem chemisch hoch beständig ist. Bild 2.16 zeigt den Polymerisationsvorgang und die chemische Struktur.



Tetrafluorethylen

Polytetrafluorethylen

Bild 2.16: Polymerisation von PTFE

Bei der Verwendung von PTFE als Dichtungswerkstoff stehen vor allem die universelle chemische und thermische Beständigkeit sowie die guten tribologischen Eigenschaften im Mittelpunkt des Interesses [17]. Des Weiteren eignen sich PTFE-Manschettendichtungen aufgrund ihrer guten tribologischen Eigenschaften auch zum Einsatz an wenig geschmierten Dichtstellen oder zur Abdichtung schlecht schmierender Fluide. Eine Übersicht der vorteilhaften Eigenschaften gibt die folgende Auflistung:

- Hohe thermische Beständigkeit, Anwendungsbereich -200 °C bis 260 °C
- Schmelztemperatur bei 327 °C
- Universelle chemische Beständigkeit (Ausnahme sind Fluor, Chlortrifluorid und geschmolzenes Alkalimetall bei Temperaturen im Schmelzbereich)
- Licht- und Witterungsbeständigkeit
- Sehr gute Gleiteigenschaften
- Antiadhäsives Verhalten
- Hohes elektrisches Isoliervermögen und niedriger dielektrischer Verlustfaktor
- Physiologische Unbedenklichkeit (Lebensmittelzulassung und medizinische Verwendbarkeit)

Dem stehen einige nachteilige Eigenschaften gegenüber:

- Kriechneigung bei länger andauernder Belastung (Kaltfließverhalten)
- Geringe Verschleiß- und Druckfestigkeit
- Schlechte Verarbeitbarkeit (urformen, umformen, kleben)

### Eigenschaftsänderungen durch Füllstoffe

Reines PTFE ist als Werkstoff für Dichtringe ungeeignet, da es nicht verschleiß- und druckfest ist. Um den Werkstoff für verschiedene Anwendungsfälle modifizieren zu können, werden dem PTFE verschiedene Füllstoffe beigemischt. Diese Mischung wird als Compound (englisch = Mischung) bezeichnet.

Zur Verbesserung des Verschleißverhaltens werden meist Glas- oder Kohlenstofffasern beigegeben. Dabei muss auf das Mischungsverhältnis geachtet werden, da bei einem zu geringen Füllstoffanteil der PTFE-Dichtring, bei einem zu hohen Anteil die Welle verschleißt [7]. Zur Verbesserung der Gleiteigenschaften erfolgt zudem häufig eine Zugabe von Grafit oder Molybdändisulfid. Tabelle 2.2 zeigt eine Übersicht der meist verwendeten Füllstoffe und deren Einfluss.

Füllstoff	Füllstoffanteil in Gewichts-%	Einfluss auf Compound - Eigenschaften
Glasfasen	5 bis 40 %	<ul> <li>Höhere Druck- und Verschleißfestigkeit</li> <li>Bessere Wärmeleitfähigkeit</li> <li>Niedriger dielektrischer Verlustfaktor</li> </ul>
Kohlenstofffasern	5 bis 25%	<ul> <li>Geringe Deformation unter Last</li> <li>Gute Verschleißbeständigkeit</li> <li>Hohe Wärmeleitfähigkeit</li> <li>Geringe Wärmeausdehnung</li> </ul>
Kohlenstoffpulver	bis 35%	<ul> <li>Hohe Druckfestigkeit und Härte</li> <li>Gute Gleit- und Verschleißfestigkeit</li> <li>Gute Wärmeleitfähigkeit</li> </ul>
Graphit	bis 15%	<ul><li>Gute Gleiteigenschaften</li><li>Gute Wärmeleitfähigkeit</li></ul>
Molybdändisulfid	bis 10%	<ul> <li>Gute Gleit- und Verschleißfestigkeit</li> <li>Gute Trockenlaufeigenschaft in Kombination mit Bronze</li> </ul>
Bronze	bis 20%	<ul> <li>Gute Gleit- und Verschleißfestigkeit</li> <li>Besseres Fließverhalten</li> <li>Gute Wärmeleitfähigkeit</li> <li>Hohe Druckfestigkeit</li> </ul>

Tabelle 2.2: Füllstoffe und ihr Einfluss auf das Werkstoffverhalten [17]

### 2.2.2 Herstellung, Lieferung und Montage

PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrillen können auf verschiedene Weiße hergestellt und montiert werden. Bild 2.17 zeigt 2 Kombinationsmöglichkeiten als Beispiele. Bild 2.18 stellt die verschiedenen aufeinander aufbauenden Schritte in der Übersicht vor.



Bild 2.17: Beispiele zweier Herstellungskombinationen Links: Verklemmte Dichtlippe, geschnittene Spiralrille, teilummantelter Stützring Rechts: Anvulkanisierte Dichtlippe, geprägte Spiralrille, vollummantelter Stützring



Bild 2.18: Herstellungsmöglichkeiten

### Herstellung der Dichtlippe

PTFE fließt bei Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes nicht wie herkömmliche Thermoplaste oder einige Elastomere. Es wird lediglich hochviskos. Dadurch kann es nicht im Spritzgießverfahren urgeformt werden. Das PTFE-Compound wird aus dem pulverförmigen Zustand durch Presssintern verarbeitet. Das Pulver wird unter hohem Druck und Temperatur in einem zylindrischen Werkzeug verdichtet. Der durch das Pressen entstandene Grünling wird anschließend dicht oberhalb der Schmelztemperatur gesintert, wobei sich das PTFE in ein festes Polymer umwandelt. Die Dichtlippe inklusive Dichtringgehäuse können in einem Teil aus der entstandenen Stange hergestellt werden. Meist werden jedoch flache Scheiben, die Dichtlippen abgestochen.

Um sicher abzudichten, muss die Dichtlippe mit der Spiralrille der Wellenbewegung folgen. Von Hoepke wurden in [18] die Anforderungen als Abdichtung des Schwingungssystems Kurbelwelle besprochen. Nach Bock [19] sind moderne PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille als Kurbelwellenabdichtung auch bei Einbau mit statischem Versatz von 1,5 mm und dynamischen Versatz von 0,3 mm dicht. Das bedeutet, die Dichtlippe kann der Welle in diesem Bereich folgen. Diese Eigenschaft wird Folgefähigkeit genannt.

### Vorbehandlung der Oberfläche der Dichtlippe

Da PTFE aufgrund seiner chemischen Beständigkeit nicht direkt verklebt oder anvulkanisiert werden kann, muss die Oberfläche verändert oder aktiviert werden. Dies kann durch drei unterschiedliche Verfahren erreicht werden:

- Nasschemisches Ätzen mit in flüssigem Ammoniak gelöstem Alkalimetall
   → führt zur Braunfärbung der Oberfläche (siehe Dichtringart PLE in Kap. 6.1).
- Plasmabehandlung in einer Niederdruckatmosphäre. Gegenüber dem Ätzen bestehen die Vorteile vor allem in der leichteren Handhabung und einer deutlich geringeren Belastung für die Umwelt [20] (siehe Dichtringart PLF in Kap. 6.1).
- Einbringen von Polymerwerkstoff in die Oberfläche des Halteabschnitts der Dichtlippe.

### Dichtringgehäuse und Befestigung der Dichtlippe

Meist ist die Dichtlippe ein Einzelteil und muss durch ein Gehäuse mit dem System verbunden werden. Dieses Gehäuse besteht aus einem L-förmigen Stützring, der zur besseren Sekundärabdichtung mit einer Elastomerschicht voll oder teilweise umspritzt sein kann. Die Dichtlippe wird durch eine der folgenden Möglichkeiten befestigt:

- Verklemmen der Dichtlippe zwischen Stützring und einem weiteren Ring (siehe Dichtringart PRA in Kap. 6.1)
- Verkleben der Dichtlippe mit dem Stützring oder der Ummantelung
- Anvulkanisieren an der Stützringummantelung

### Herstellung der Spiralrille und des Dichtstegs

Zum Einbringen der Spiralrille in die Dichtlippe stehen die zwei grundlegend verschiedenen Fertigungsarten

- Schneiden mit messerartigem Werkzeug und
- Prägen mit Formwerkzeug

zur Verfügung. Nachteilig beim Einschneiden ist die begrenzte Anzahl an einstellbaren Geometrieparametern. Lediglich Schnitttiefe, Schnittwinkel und Steigung der Spiralrille sind dabei variabel. Zudem kann aufgrund der Füllstoffe ein hoher Verschleiß des Messers und dadurch Qualitätsverlust auftreten.

Beim Prägen ist die Geometrie bis auf Hinterschnitte in der Form frei gestaltbar. Zudem muss die Spiralrille nicht durchgängig geprägt werden. Um die Spiralrille an einer oder mehreren Stellen zu verschließen, bleiben Aussparungen stehen. Diese unterbrechen die Spiralrille und werden Dichtstege genannt. Der Dichtsteg (Bild 2.19) soll neben der statischen Öldichtheit auch die Luftabdichtfähigkeit beim sogenannten Kalttest nach der Motorenmontage (Drucktest) [13] gewährleisten.



Bild 2.19: Dichtsteg am Beispiel der Dichtringart PLE

### Schutzlippe

Die optionale luftseitige Schutzlippe soll das Vordringen von Verschmutzung (Feststoffe oder Fluide) von außen zur Dichtlippe verhindern und bildet entweder einen kleinen Spalt oder überdeckt die Welle. Es gibt drei Möglichkeiten:

- Eine Elastomerschutzlippe, die mit der Ummantelung angespritzt wird
- Ein zusätzlicher PTFE-Ring
- Ein zusätzlicher Filzring

### Lieferzustand

Der Lieferzustand bezieht sich auf die Form der Dichtlippe. Es gibt drei Möglichkeiten:

- Flach
- Vorgeformt
- Aufgezogen auf einen Montagedorn

### Montage

Bei der Montage muss der Dichtring nach vorne umgestülpt werden. Um die empfindlichen Dichtringoberflächen nicht zu beschädigen, muss die Dichtlippe vorsichtig über eine 10°-15°-Einfuhrschräge auf die Welle aufgeschoben werden. Ist der Dichtring nicht vorgeformt, muss er vorsichtig von Hand umgestülpt und aufgeschoben werden. Alternativ kann auch ein Montagedorn mit Einführschräge verwendet werden. Um die Dichtlippe leichter montieren zu können, kann nach Kletschkowski [21] ein Vormontagedorn (VMD) mit Hilfswelle verwendet werden. Auf diesen wird der Dichtring mit Dichtlippe nach hinten aufgezogen und auf die Welle übergeben (Bild 2.20).



Bild 2.20: Montage mit Vormontagedorn und Hilfswelle nach [21]

Des Weiteren können die Dichtringe auch als System mit Anschlussflansch (Bild 2.21), Drehzahlgeber und Montagedorn geliefert werden. Diese werden bei der Montage lediglich über die Kurbelwelle geschoben und festgeschraubt. Ein aufwendiges Einpressen des Dichtringes ist nicht notwendig.



Bild 2.21: Kurbelwelle mit Dichtring im Anschlussflansch

### 2.3 Stand der Forschung

Im Folgenden werden die wichtigsten wissenschaftlichen Arbeiten besprochen.

Britz [22] beschreibt 1988 erstmals in einer wissenschaftlichen Arbeit eine eingeschnittene Spiralrille. Er stellt Ölförderwerte gegen Druck vor. Dabei zeigt er, dass der Dichtring bis 0,25 bar Gegendruck fördert. Bei 1 bar Druck ist der Dichtring unter 250 1/min und bei 2 bar Druck unter 500 1/min undicht. Bei höheren Drehzahlen ist der Dichtring auch bei 2 bar dicht.

Jenisch [11] untersuchte von 1986 - 1991 erstmals auf dem Markt erhältliche PTFE-Manschetten mit Spiralrille. Drei Dichtringarten hatten eingestochene, eine Dichtringart eingeprägte Gewindegänge. Er analysierte Radialkräfte, Reibmomente und Ölförderwerte vor und nach 500 Stunden Dauerläufen (auch mit dynamischer Exzentrizität). Da PTFE-Manschetten zum damaligen Zeitpunkt erst kurz angeboten wurden, war ein sehr inhomogener Entwicklungsstand festzustellen. Der geprägte Dichtring war sogar "unbrauchbar" da der Berührbereich lediglich auf dem vordersten Damm anlag; der Dichtring war undicht. Eine Erkenntnis aus den Dauerläufen war: "Die Eigenschaft einer Dichtlippe Ölkohle anzulagern, dürfte in erster Linie von der Materialzusammensetzung und der Oberflächenrauheit der Berührfläche abhängen".

Des Weiteren untersuchte er Strömungen in der Dichtlippe. Dazu baute er einen Prüfstand mit Glashohlwelle, Umlenkspiegel und Mikroskop auf (Bild 2.22). Aus den Ergebnissen leitet er für zwei Fälle Fördermechanismen ab, die dem Prinzip einer voll- und teilgefüllten Gewindewellendichtung ähneln.



Bild 2.22: Prüfstand mit Glashohlwelle und Messmikroskop

Fritzsche [23] untersuchte 1990 – 1994 ebenfalls Öl- und Luftförderwerte von ein- und mehrgängig eingeschnittenen Spiralrillen. Als Parameter wurden Dichtlippenlänge und Dichtlippendicke variiert. Er stellt einen Modellansatz zur Berechnung der maximalen Ölförderwerte auf. Die Ergebnisse stimmen mit den Messwerten relativ gut überein.

Zur Luftförderwertmessung stellt er eine Einrichtung mit variablem, künstlich erzeugtem Unterdruck vor. Er merkt selbstkritisch an, dass sich dadurch "die Menge der eingesaugten Luft noch um ein Vielfaches vergrößern kann".

Hoffmann [24] befasste sich 1991-1995 mit Radialkräften, Reibmomenten und Temperaturentwicklung unter der Dichtlippe, Öl- und Luftförderwerte und 500 Stunden Dauerlaufuntersuchungen. Es wurden auch abrasive Partikel beigemischt, um das Verschleißverhalten von Welle und Dichtring zu untersuchen. Des Weiteren untersuchte er eigenentwickelte drehrichtungsunabhängige Rückförderstrukturen und stellte hierfür Förderhypothesen vor. Er simulierte äußert erfolgreich mit einem linear elastisch – ideal plastischen Materialansatz verschiedene Lippen- und Schnittvariationen.

Pohl [25] befasste sich 1995-1999 mit Radialkräften und Pressungsverteilungen der Dichtlippen sowie derer Beeinflussung durch Temperaturschwankungen. Des Weiteren analysierte er Reibmomente, Ölförderwerte und die Folgefähigkeit der Dichtlippe. Mithilfe der numerischen Simulation berechnete er Ölförderwerte. Diese sind um den Faktor 2,5 höher als die Messwerte. Er führt dies auf die Kanalgeometriebildung zurück, da sich die Querschnittsfläche durch die Montage auf die Welle verjüngen würde.

Toth, Hatch und Upper [26] veröffentlichten 1993 erste Simulationen des Montageprozesses und der Radialkraftermittlung mit einem nicht-linearen Werkstoffmodell.

Pohl [25], Sui [27], Olbrich [28] und Kletschkowski [21] befassten sich intensiv mit der Erstellung verschiedener Materialmodelle für die Numerische Simulation mithilfe der Finiten Elemente Analyse (FEA). Damit können die Radialkräfte und Pressungsverläufe auch zeitabhängig sehr gut nachgebildet werden. Pohl [25] und Sui [27] simulierten mit Ihren Modellen auch die Folgefähigkeit der Dichtlippe.

Sui [27], Debler [29] und Weber [30] implementierten auf verschiedene Arten Möglichkeiten zum Berechnen des Verschleißes von PTFE-Manschetten.

Haiser [31] hat sich in seiner Arbeit mit den tribologischen Verhältnissen der Tribologiepartner Metallgegenfläche und PTFE-Compound beschäftigt. Mit einem modifizierten Ring-Scheibe-Versuch und mit PTFE-Manschetten im Dauerlauf hat er das Verschleißverhalten verschiedener Kombinationen erforscht und hierfür Modelle aufgestellt. Ein Ergebnis war, dass die Oberflächen im Neuzustand und nach Einlauf und Verschleiß sehr rau sind. Die PTFE-Probekörper und -Manschetten liegen nur auf ihren Füllstoffen auf der Gegenfläche auf. Die PTFE-Matrix ist verschlissen. Dazwischen bilden sich enge Spalte und Flüssigkeitskanäle.

# 3 Problemstellung und Zielsetzung

### Problemstellung

PTFE-Manschettendichtringe mit Spiralrille können aufgrund der vielfältigen Vorteile an bespritzten, einseitig drehenden Wellen verwendet werden. Sie werden als Kurbelwellenabdichtung eingesetzt. Die Grundgeometrien und die Feingeometrien der Spiralrillen basieren weitgehend auf empirisch gewonnenen Kenntnissen. Um in Zukunft neue Geometrien für langzeitfunktionssichere und zuverlässige Dichtringe gezielt entwickeln zu können, ist es notwendig, deren Funktionsweise zu analysieren. Dies ist vor allem dann nötig, wenn sich PTFE-Maschettendichtringe auch im allgemeinen Maschinenbau zur Abdichtung drucklos überfluteter Ölräume etablieren sollen. Alle bisherigen Arbeiten decken jeweils nur Teilbereiche der Gesamtfunktion ab.

Die Radialkräfte, Pressungsverläufe und die Anlage an der Welle sowie die Förderwerte, Reibmomente und Dichtheit wurden in verschiedenen Arbeiten für sich einzeln experimentell untersucht und betrachtet. Die Ermittlung der Radialkräfte, Pressungsverläufe und der Anlage an der Welle mithilfe der Finiten Elemente Analyse gibt auch keine Hinweise auf eine günstige Gestaltung der Rillengeometrie. Untersuchungen zum statischen Verhalten wurden bisher nicht veröffentlicht.

Es fehlt eine umfassende Analyse, die alle Ergebnisse in Übereinstimmung mit der Funktion und Geometrie der Spiralrille bringt.

### Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit war die detaillierte experimentelle und theoretische Analyse der Gesamtfunktion der PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille im statischen und dynamischen Zustand. Im Mittelpunkt standen dabei die Funktionsweise der Spiralrille und deren Optimierung.

Dazu wurden an handelsüblichen Dichtringen und Prototypen umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Besonderen Wert wurde dabei auf die Eigenschaften und Verhalten folgender Punkte gelegt:

- Geometrie
- Radialkräfte
- Reibmomente
- Ölförderwerte
- Luftförderwerte
- Dichtheit, Verschleiß und Ölkohlebildung im Dauerlauf
- Statische Dichtheit bei Teilüberflutung
- Strömung in den Gewindegängen durch visuelle Untersuchungen
- Finite Elemente Analysen
- Strömungssimulationen

### Vision

Mit einem statisch dichten und dynamisch verbesserten PTFE-Manschettendichtring mit Spiralrille wäre ein optimaler Dichtring für den allgemeinen Maschinen-/ Anlagen- und Fahrzeugbau geschaffen, der bei Temperaturen von -100°C bis +250°C und unter allen Chemikalienbelastungen einsetzbar ist. Damit ist eine Falschauswahl ausgeschlossen, die Lagerhaltung minimiert und eine optimale Funktion gewährleistet.
# 4 Untersuchungseinrichtungen

In diesem Kapitel werden die verwendeten Untersuchungseinrichtungen beschrieben und vorgestellt.

## 4.1 Optische Einrichtungen

Für die visuelle Untersuchung der Dichtringe und der Wellen wird eine digitale Farbkamera Jenoptik ProgRes C14 mit Zoomobjektiv oder Mikroskop verwendet. Hiermit können die Bilder hochauflösend aufgenommen werden. Ergänzend wird der in Kap. 4.7 beschriebene Strömungsprüfstand verwendet.

Die ProgRes C14 ist eine hochauflösende, gekühlte digitale Farbkamera, die sich sowohl für mikroskopische als auch makroskopische Anwendungen eignet. Die FireWire-Schnittstelle der Kamera erlaubt die schnelle und verlustfreie Datenübertragung an einen PC. Die Grundauflösung des CCD-Sensors von 1,3 Megapixeln lässt sich durch Microscanning auf echte 12,1 Millionen Bildpunkte erhöhen. Bei diesem Verfahren werden pro Bild mehrere Einzelaufnahmen erstellt und zu einer Gesamtaufnahme zusammengesetzt. Durch die interne Kühlung sind Belichtungs-/ Integrationszeiten von 0,154 ms bis 10 min möglich. Die Farbtiefe von 42 bit RGB sorgt für eine differenzierte Farbaufzeichnung. Der Standardanschluss C-Mount erlaubt die Verwendung verschiedenster Optiken. Zur Aufnahme, Betrachtung, Vermessung, Dokumentation und Archivierung wird die Software "Image Access 2.0" verwendet (Bild 4.1).



Bild 4.1: Image Access, Hauptmenü (links) und Vermessungstool (rechts)

Für makroskopische Aufnahmen wird ein Navitar 12x-Zoom Objektiv verwendet. Kamera und Objektiv werden am Messtisch höhenverstellbar angebracht (Bild 4.2). Die integrierte Beleuchtung ermöglicht zudem eine gute Ausleuchtung. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, direkt am Objektiv eine UV-Ringlampe anzubauen oder Schwanenhals-Kaltlichtquellen zu verwenden. Zur Positionierung wird ein XY-Tisch verwendet.



Bild 4.2: Digitalkamera ProgRes C14 mit Messtisch und Zoomobjektiv

Für mikroskopische Aufnahmen wird ein Mikroskop des Typs OLYMPUS BXFM (Bild 4.3) verwendet. Die Hauptbestandteile bestehen aus der Grundplatte, dem Probentisch, dem Objektivrevolver, dem Belichtungskarussell, den Okularen mit Kameraaufnahme und der Höhenverstellung. Das Mikroskop bietet drei verschiedene Beleuchtungsarten: Hellfeld, Dunkelfeld und DIC (englisch: Differential Interference Contrast). Während im Hellfeld-Modus der Lichtfall des Mikroskops direkt auf die Probe gerichtet ist, fällt das Licht im Dunkelfeld in einem flachen Winkel auf die Probe. Dies führt zu einer Beleuchtung, die ein Bild mit echten Farben liefert. Die Einstellung DIC als der dritte Beleuchtungsmodus erlaubt hingegen eine möglichst kontrastreiche Darstellung des mikroskopierten Objekts. Es stehen Objektive von 1,25- bis 50-facher und Okulare mit 10-facher Vergrößerung zur Verfügung. Somit ist eine Gesamtvergrößerung bis 500-fach möglich.



Bild 4.3: Mikroskop OLYMPUS BXFM

## 4.2 Radialkraftmessgerät

Die Radialkraft wird mit einem Zweibackenradiameter [32] nach DIN 3671 [33] gemessen. Es besteht aus der mechanischen Messeinheit mit austauschbaren Messbacken und der Messelektronik.

Eine der beiden als Halbwellen ausgebildeten Messbacken ist dabei fest mit der Grundplatte der Messeinheit verschraubt. Die andere ist auf einer beweglichen Platte befestigt. Die Kraft, mit der die Dichtlippe die beiden Halbwellen zusammendrückt, ist ein Maß für die Radialkraft. Ihr wirkt die Kraft einer Blattfeder entgegen, die die Grundplatte mit der beweglichen Platte verbindet. Aufgrund der hohen Steifigkeit dieser Feder wird zudem sichergestellt, dass der für die Messung wichtige Abstand zwischen den beiden Messbacken nahezu aufrechterhalten wird. Der Kraftaufnehmer besteht aus der Blattfeder und einem induktiven Wegaufnehmer, der den Federweg in eine für die Messelektronik verwertbare Spannung wandelt (Bild 4.4).



Bild 4.4: Funktionsprinzip der Messeinheit

Die Radialkraft kann kontinuierlich und nach einer bestimmten Messdauer digital angezeigt werden. Gleichzeitig kann eine dem Messwert entsprechende analoge Spannung abgegriffen werden. Bild 4.5 zeigt das Radiameter. Um die empfindlichen Dichtlippen nicht zu beschädigen, ist der obere Abschnitt der Welle wie ein Montagedorn als Kegel mit gerundeten Übergängen ausgeführt.



Bild 4.5: Zweibackenradiameter mit aufgezogenem Dichtring

### 4.3 Universalprüfstand zur Reibmomentmessung

Für Funktionsuntersuchungen (Reibmomente und Förderwerte) steht ein Universalprüfstand (Bild 4.6) zur Verfügung. Seine Hauptbestandteile sind die Antriebseinheit, die Trägerplatte mit einem Messsensor, eine aerostatisch gelagerte Dichtringaufnahme, eine temperierbare Versuchswelle und eine temperierbare Ölkammer.

Der Außenring des aerostatischen Lagers ist an der Trägerplatte angebracht. Am Innenring ist die Dichtringaufnahme angebracht. Das von der Welle auf den Dichtring übertragene Reibmoment wird mit einem Messsensor abgestützt und am PC dargestellt, aufgezeichnet und ausgewertet. Dieser Aufbau erlaubt die reibungsfreie und dadurch unverfälschte Messung des Reibmoments.



Bild 4.6: Universalprüfstand UPS I

Um bei den Versuchen definierte Temperaturbedingungen zu gewährleisten, wird die Welle von Wärmeträgeröl durchströmt. Das Öl wird in einem externen Heiz-/ Kühlaggregat temperiert. Auf diese Weise ist es möglich, die Temperatur der Welle zu regeln und Wärme aus dem Dichtspalt ab- oder zuzuführen. Der Versuchsring wird so in den Prüfstand eingebaut, dass die Luftseite frei zugänglich bleibt. Für die Reibmomentmessungen kann somit Öl zugeführt werden.

Alternativ kann eine temperierbare Ölkammer (Bild 4.7) angebracht werden. Durch die Anbringung an der Dichtringaufnahme ist auch diese über das aerostatische Lager vom Prüfstand entkoppelt. Die Temperierung des Öls in der Ölkammer erfolgt über eine direkt befestigte Temperiereinheit. Bei dieser Anordnung wird die Welle nicht temperiert.



Messsensor

Temperiermittel-Ablauf

Bild 4.7: Universalprüfstand UPS I mit Ölkammer

Die Temperiereinheit (Bild 4.8) besteht aus einem Ölverteiler mit Zu- und Ablauf. In diesen wird das temperierte Wärmeträgeröl berührungsfrei ein- und ausgeleitet. Über eine Temperierwendel wird das Öl in der Ölkammer temperiert. Zusätzlich steht eine Heizpatrone zur Verfügung. Durch den freien Zu- und Ablauf ist gewährleistet, dass das Reibmoment nicht beeinflusst wird.



Bild 4.8: Temperiereinheit

## 4.4 Universalprüfstand zur Förderwertmessung

Zur Förderwertmessung wird der in Kap. 4.3 bereits beschriebene Universalprüfstand verwendet. Dabei ist die Ölkammer mit Temperiereinheit montiert. Der Dichtring (Bild 4.9) wird falsch herum eingebaut. Dadurch wird der Dauerförderwert bei Teil- oder Komplettüberflutung bestimmt. Die geförderte Ölmenge wird in einem Auffanggefäß gesammelt und mit einem Messsensor und PC dargestellt und aufgezeichnet.



Bild 4.9: Universalprüfstand UPS I (Ansicht hinten)

## 4.5 Dauerlaufprüfstand

Für die Dauerlaufuntersuchungen wurde ein neuer Prüfstand aufgebaut. Er besteht aus einem Grundaufbau mit diversen Schnittstellen zur Messwerterfassung, Heizelementund Kühlwasseranschluss und Schaltschrank. Auf dem Grundaufbau sind 6 Einzelmodule aufgebaut, deren Prinzip auf einem von Nißler [34] konstruierten Zweikammerprüfstand basiert. Die Einzelmodule (Bild 4.10) bestehen aus dem Grundgestell mit Motor und dem Lagergehäuse mit zwei seitlich angebrachten temperierbaren Prüfkammern. Im Lagergehäuse wird die Spindel über zwei Hybridlager präzise gelagert und über einen Rippenriemen vom Motor angetrieben. Der Riemen wird mittels den Motorträgern und einer Spanneinrichtung gespannt. Die Ölkammern sind mit zwei umlaufenden Gängen versehen, durch die Kühlwasser mit einer Eintrittstemperatur von 6 °C zirkuliert. Zur Erwärmung ist eine Heizpatrone mit einer Leistung von 400 Watt in die Prüfkammer integriert. Auf diese Weise wird das Öl indirekt über die Kammerinnenwand temperiert. Dadurch wird eine thermische Schädigung des Öls verhindert. Die Messung der Temperatur erfolgt mit einem Platin-Widerstandsthermometer (PT100) direkt im Ölsumpf. Die Regelung der Temperatur wird durch die Öffnungszeit des Kühlwasserventils und der Heizzeit realisiert.



Bild 4.10: Einzelmodul

Die Dichtringaufnahme (Bild 4.11) wird durch eine Passung zentriert und an der Ölkammer verschraubt. Auf der Luftseite ist die Dichtringaufnahme derart gestaltet, dass der Bereich unmittelbar neben der Berührfläche der Dichtung gut einsehbar ist (Bild 4.12).





Bild 4.12: Luftseite der Dichtung

Zur Beobachtung des Ölraums während des Betriebs kann eine Dichtringaufnahme aus durchsichtigem Kunststoff (z. B. Polycarbonat, siehe Bild 5.17) eingesetzt werden. Als Lauffläche für die Dichtung werden Nadellagerinnenringe verwendet. Der Nadellagerinnenring (Bild 4.13) wird mit einer Wellenaufnahme mit O-Ring zur statischen Abdichtung und einem Deckel verschraubt. Der Schaft der Wellenaufnahme wird mit einer Spannzange im Hohlschaftkegelsystem (HSK) justiert. Durch den HSK wird das System mit der Spindel verbunden und ermöglicht reproduzierbare Rundlaufeigenschaften.



Bild 4.13: HSK-Spannzangensystem mit Lauffläche

## 4.6 Statische Ölkammern

Um das Abdichtverhalten der Dichtringe im Stillstand untersuchen zu können, wurden statische Ölkammern konzipiert und aufgebaut.

In Bild 4.14 sind die Bestandteile Grundplatte, Welle, Gehäuse, Dichtring und Deckel dargestellt. Das Gehäuse wird mit O-Ringen als Nebenabdichtung auf der Grundplatte montiert. Der Dichtring ist dabei so eingebaut, dass er den Ölraum nach außen abdichtet. Dadurch ist die Luftseite der Dichtung von außen einsehbar. Als Wellen werden wie bei allen anderen Untersuchungen Nadellagerinnenringe verwendet.



Bild 4.14: Aufbau der statischen Ölkammer

## 4.7 Strömungsprüfstand

Um die Strömungsvorgänge unter der Dichtlippe und in den Rillen beobachten und analysieren zu können, wurde für dieses Projekt ein Prüfstand konzipiert, konstruiert und aufgebaut. Hauptbestandteil des Prüfstands (Bild 4.15) ist eine Glashohlwelle, die an einer präzise gelagerten Spindel angebracht ist. Diese wird über einen Keilriemen von einem Elektromotor mit Getriebe angetrieben. Dadurch sind Drehzahlen kleiner 0,5 1/min möglich. Koaxial zur Glashohlwelle ist mit einem Klemmflansch die rotierbare Dichtringaufnahme montiert. Das optische System ist axial verfahrbar mit einem Schlittensystem auf der Grundplatte montiert.



Bild 4.15: Strömungsprüfstand

In die Dichtringaufnahme werden drei Dichtringe eingebaut, sodass, wie in Bild 4.16 ersichtlich zwei voneinander getrennte Ölräume entstehen. Ölraum A (Ölseite) und Ölraum B (Luftseite) sind dabei durch den mittleren, den zu untersuchenden Dichtring getrennt. Abhängig von der Füllmenge lässt sich vom Trockenlauf bis zur Ölüberflutung jeder Füllstand am Prüfstand nachbilden.

Das Optiksystem besteht aus einer Digitalfarbkamera und einem Zoomobjektiv. Ein Prisma lenkt den Strahlengang um 90° um. An der Prismaaufnahme sind zur Ausleuchtung des Beobachtungsbereichs Leuchtquellen angebracht. Somit kann die Dichtlippe durch die Glashohlwelle beobachtet werden. Die Einzelbilder und Filme werden per PC aufgezeichnet und weiterverarbeitet.

Um die verschiedenen Bereiche der Dichtlippe sowohl im Ölsumpf, als auch außerhalb untersuchen zu können, kann zum einen das Prisma um 360°, zum anderen die Dichtringaufnahme mit den Dichtringen um 360° gedreht werden. Zur axialen Verstellung wird das Schlittensystem verwendet.

Durch die Kombination der Füll-, Dreh-, Verfahr-, und Zoommöglichkeiten können die Dichtringe unter allen Bedingungen in allen Positionen optimal beobachtet werden.



Bild 4.16: Einbausituation (Schnitt)

Mit dem 12fach-Zoomobjektiv können, wie Bild 4.17 veranschaulicht, verschiedene Vergrößerungsstufen eingestellt werden. Als Beispiel dient links Millimeterpapier und rechts eine Dichtlippe.



Bild 4.17: Übersicht über verschiedene Ausschnittsgrößen

## 4.8 Numerische Simulation

Als leistungsfähige Werkzeuge bei der Entwicklung von Dichtungen tragen die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Computational Fluid Dynamics-Methode (CFD/ Strömungssimulation) zur Reduzierung von Entwicklungszeit und zur Verbesserung der Ergebnisse bei. Bei beiden Methoden werden mathematisch nicht direkt lösbare Probleme in einfache lineare algebraische Lösungsansätze umgewandelt und gelöst. Das Ergebnis ist nicht die mathematische korrekte Lösung, sondern eine möglichst gute Näherungslösung. Um die Qualität der Simulation einschätzen zu können, müssen die Ergebnisse mit bekannten analytischen Ergebnissen abgeglichen werden oder ausreichend Erfahrung vorhanden sein.

### 4.8.1 Finite Elemente Analyse

Die Methode der Finiten Elemente ist ein Verfahren zur Lösung von Rand- und Anfangswertproblemen. Es werden vor allem Deformationen fester Körper aus gegebenen Belastungen und dadurch verursachte Spannungen ermittelt. In der Dichtungstechnik sind die Verformungen, die Normalkräfte auf die Welle (Radialkräfte) und die Pressungsverteilung von Bedeutung.

Da Dichtungen nicht algebraisch berechnet werden können, werden sie in einfache Subkörper, die Finiten Elemente unterteilt (Bild 4.18). Den Elementen werden verschiedene Anfangs- und Randbedingungen sowie Belastungen zugewiesen. In der Simulation werden diese einfachen Körper algebraisch berechnet und verformt.



Bild 4.18: Unterteilung eines Körpers (links) in finite Elemente

Die Modellierung und Vergabe der Randbedingungen (Preprocessing) wurde mit den Programmen MSC.Patran und MSC.Mentat durchgeführt. Das Problem wird mit dem Solver MSC.Marc gelöst und mit MSC.Mentat im Postprocessing aufbereitet.

### 4.8.2 Strömungssimulation

Bei der Lösung von Strömungsproblemen bildet die CFD-Methode neben Theorie und Experiment das dritte Standbein. Die zu simulierenden Fluidvolumina werden modelliert und in Zellen unterteilt. Den Zellen werden verschiedene Anfangs- und Randbedingungen sowie Verhalten zugewiesen.

Die Zellen verformen und verändern sich nicht wie in der FEM, stattdessen wird ortsfest der Fluideingang und –ausgang (Kontinuitätsgleichung) einer Zelle berechnet. Als Ergebnis werden beispielsweise Massenströme, Geschwindigkeits- und Druckverteilungen ausgegeben. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend werden neue durchströmte Geometrien erstellt und simuliert. In dieser Arbeit wurde das Programm ANSYS/ Fluent in Version 6.2 verwendet.

# 5 Untersuchungsmethodik

Sofern bei den Ergebnissen keine weiteren Anmerkungen getroffen sind, werden alle Untersuchungen mit der im Folgenden beschriebenen Methodik durchgeführt.

## 5.1 Systemkomponenten

Für alle Versuche werden die nachfolgend vorgestellten Systemkomponenten Dichtring, Gegenlauffläche und Öl verwendet.

#### Dichtringe

In dieser Arbeit werden drei von fünfzehn analysierten Dichtringarten eines Projekts des Forschungskuratorium Maschinenbau [35] vorgestellt. Mit diesen geometrisch stark unterschiedlichen Dichtringen kann die Funktionsweise aller Dichtringe erläutert werden. Sie stellen jeweils eine eigenständige Kategorie dar. Alle Dichtringe sind für Abdichtdurchmesser 80 mm ausgelegt.

Um die verwendeten Dichtringe unterscheiden zu können, wird jedem Dichtring ein vierstelliger Code zuordnet. Er besteht aus drei Buchstaben, die Werkstoff, Wellendrehrichtung und Dichtringart angeben, sowie einer fortlaufenden Nummerierung je Art (vgl. Tabelle 5.1). Die Kennzeichnung erfolgt mit einem Elektroschreiber auf dem Metallstützring des Dichtrings. Um die Dichtringe mit [35] vergleichen zu können, wird die Kennzeichnung direkt übernommen.

Tabelle 5.1: Kennzeichnungssystematik
---------------------------------------

1. Bu	ichstabe:	2. Buchstabe:		3. Buchstabe:
Werk	stoff	Wellendrehrichtung		Dichtringart
Ρ	PTFE	L Links		A
		R	Rechts	Q

Zur Ermittlung der charakteristischen Geometrien werden die Dichtringe in der realen Einbausituation in eine Eingussform mit Wellenzapfen eingepresst. Anschließend wird die Form mit Epoxidharz ausgegossen und evakuiert. Dem Harz wird ein fluoreszierender Zusatz beigegeben. Nach dem Aushärten des Harzes wird die Form mit einer Trennscheibe (Bild 5.1) in acht jeweils um 45° verdrehte Stücke zerteilt.



Bild 5.1: Erstellen der Profilschnitte mit Trennscheibe

Die Schnittflächen werden anschließend geschliffen und poliert. Bild 5.2 zeigt die zerteilte Eingussform, Bild 5.3 zeigt einen Profilschnitt der Dichtringart PLE im Ganzen. Die visuelle Untersuchung der Schnitte erfolgt mit den in Kapitel 4.1 beschriebenen Messeinrichtungen. Primär kommt hierbei das Zoomobjektiv zum Einsatz. Das Mikroskop wird für einzelne Detailuntersuchungen verwendet. Mithilfe der Software werden die Geometrien detailliert vermessen. Aus den Aufnahmen werden Skizzen erstellt und in diese die Messdaten eingetragen (Bild 5.4). Ergänzend werden mit dem Strömungsprüfstand die an der Glashohlwelle anliegenden Dichtlippen aufgenommen.



Bild 5.2: Aufgeschnittene und polierte Eingussform Bild 5.3: Aufnahme eines Profilschnitt-Eingusses

Bild 5.4: Skizze des Dichtringquerschnitts

Durch die Schnitte ist es möglich, dem Verlauf der Spiralrille zu folgen und sie detailliert zu untersuchen. Neben der Geometrie der Gewindegänge sind die Berührbreite der Dichtlippe, die Berührfläche der Dämme, die Anzahl der anliegenden Gewindegänge und die Gewindesteigung von besonderem Interesse. Des Weiteren kann mit dieser Methode der Eingangsbereich der Dichtlippe untersucht werden. Besonders wichtig ist dies bei den geprägten Lippen, da hier herstellungsbedingt immer ein Anteil des ersten Gewindeganges in den Ölraum offen ist. Auch kann der in der Literatur beschriebene Glockenmäulcheneffekt, bei dem die Ölseite der Dichtlippe von der Welle abhebt, erkannt werden. Zudem können Fehlmontagen der Dichtlippe und Herstellungsungenauigkeiten der Spiralrille erkannt werden. Bild 5.5 zeigt eine Übersicht von acht Schnitten der Dichtringart PLE.



PLE29 270

Bild 5.5: Profilschnitte von Dichtring PLE29

Weiterhin werden die Dichtlippen berührungsfrei vermessen. Hierzu werden mit dem Mikroskop schichtweise Bilder aufgenommen. Die Software ermittelt die scharfen Bereiche jeder Schicht und errechnet mit den Höheninformationen eine 3D-Map. Die scharfen Bereiche jeder Schicht werden zu einem Bild zusammengefügt (Bild 5.6) und über die Map gelegt (Bild 5.7).



Bild 5.6: Mikroskopaufnahme



#### Gegenlauffläche

Um den Einfluss der Gegenlauffläche des Dichtrings auf die Ergebnisse auszuschließen, wird für alle Versuche die gleiche Oberfläche verwendet. Hierzu kommen Nadellagerinnenringe (Bild 4.13) mit definierter Oberfläche zum Einsatz. Alle stammen aus einer Produktionscharge. Die drallfrei geschliffenen Oberflächen entsprechen den Normen DIN 3760 [33] und DIN 3761 [36] für Radialwellendichtringe. Ihre Funktion im System Radialwellendichtung ist hinreichend bekannt ([37], [38]). Für alle Versuche wird jeweils eine neue Laufspur verwendet.

#### Wellenexzentrizität

In den Untersuchungen soll die Funktion und Wirkungsweise der verschiedenen Feingeometrien der Spiralrillen untersucht werden. Hierfür finden alle Untersuchungen unter optimalen Bedingungen, auch bezüglich der Parameter statische und dynamische Exzentrizität statt.

Der Versuchsparameter Exzentrizität steht direkt im Zusammenhang mit der Grundgeometrie der Dichtlippe, deren Befestigung am Dichtringgehäuse und deren Werkstoff. Erkenntnisse über die Zusammenhänge sind bereits ausführlich erforscht und veröffentlicht und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

#### ÖI

Um den Einfluss verschiedener Öle auf die Ergebnisse auszuschließen, wird für alle Versuche das gleiche Öl verwendet. Dieses vollsynthetische Motoröl des Typs Fuchs Titan Supersyn SL SAE 0W-30 wird in Diesel- und Ottomotoren vieler Hersteller verwendet. Die Viskosität ist niedriger als bei den meisten Getriebeölen. Somit stellt dieses Öl für die statischen Versuche die schärfsten Bedingungen dar. Die wichtigsten Kennwerte nach [39] sind in Tabelle 5.2 wiedergegeben.

Tabelle 5.2: Kennwerte Öl

Viskositätsklasse	SAE 0W-30
Dichte ρ	850 kg/ m³
Kinematische Viskosität v bei 40°C	67 mm²/s

## 5.2 Radialkraft

Als Messgerät für die Radialkraft wird das beschriebene Radialkraftmessgerät (Zweibackenradiameter) nach DIN 3761 verwendet.

Die Messungen werden an acht um 45° radial versetzten und markierten Positionen im Neuzustand, nach einer 24-stündigen Lagerung auf einer Welle mit Nennmaß und nach Dauerläufen durchgeführt. Die Messung erfolgt mit der Option "Messen Zeit" mit einer Ansprechschwelle von 4 N und einer Messzeit von 10 Sekunden. Dies bedeutet, dass nach Kontakt des Dichtringes mit den Backen die Messung nach 10 Sekunden stattfindet und der Messwert angezeigt wird. Für jede Messstelle wird der Dichtring entsprechend der Markierung ausgerichtet, rasch aufgezogen und nach der Messung rasch wieder entfernt. Ein Verdrehen des Dichtrings auf den Messbacken findet somit nicht statt. Die Messung wird standardmäßig bei Raumtemperatur nach DIN 50014 [40] durchgeführt.

Bei den Messungen im Neuzustand muss zwischen den einzelnen Messungen ein Zeitabstand eingehalten werden, da die Radialkraft schon durch die 10 sekündige Verweilzeit auf den Messbacken stark abnimmt. In der Wartezeit kann der Dichtring entspannen und erreicht nahezu seinen ursprünglichen Radialkraftwert. Um die jeweilige Wartezeit zu bestimmen, wurden zu jeder Dichtringart Vorversuche durchgeführt. Es wurden acht Messungen an der gleichen Messstelle vorgenommen. Die Wartezeit zwischen den Messungen wurde so lange erhöht, bis keine weitere Abnahme der Radialkraft mehr erkennbar war.

Bild 5.8 zeigt am Beispiel eines Dichtrings der Art PLE wie die Radialkraft bei Messungen im Neuzustand im Messabstand 10 Minuten stetig abnimmt. Der Zeitabstand von 10 Minuten ist also zu kurz und muss für die Messungen vergrößert werden.

Im gleichen Bild sind die Messwerte des Dichtrings nach Lagerung auf der Welle dargestellt.

Dabei erreichen die Dichtringe nahezu konstante Radialkraftwerte. Die Messungen können direkt hintereinander erfolgen. Nach dem Dauerlauf können die Messungen ebenfalls direkt hintereinander erfolgen.



Bild 5.8: Radialkraftmessung an gleicher Stelle bei einem Dichtring der Art PLE

Der Messwert nach Lagerung auf Welle entspricht dem praxisrelevanten Wert, der nach Zusammenbau und Inbetriebnahme von realen Systemen vorliegt.

Für die Radialkraftermittlung bei anderen Temperaturen erfolgen das Aufheizen des Dichtrings und der Messbacken von innen mit einem Heißluftgebläse. Die Temperatur wird dabei mit einem Infrarotpyrometer am Außendurchmesser der Backen kontinuierlich gemessen.

## 5.3 Reibmoment

Die Untersuchung der Reibmomente werden mit dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Universalprüfstand UPSI mit den in Tabelle 5.3 aufgeführten Versuchsparametern durchgeführt. Die Reibmomente werden bei Trockenlauf, bei Benetzung, im "normalen" Abdichtbetrieb und bei Ölförderung gemessen:

1: Trockenlauf

Die Montage erfolgt im trockenen Zustand. Das Reibmoment wird ohne Schmierung mit temperierter Welle gemessen.

2: Benetzt

Mit einer Spritze wird luftseitig Öl angespritzt. Das Reibmoment wird erst nach dem fördern des Öls durch die Gewindegänge gemessen. Dabei ist die Welle temperiert. Die Gewindegänge sind also ölfrei und die Dämme benetzt.

3: Abdichtbetrieb

Das Reibmoment wird mit temperierter Ölkammer bei Füllstand Wellenmitte gemessen. Die Welle ist untemperiert.

4: Förderbetrieb

Das Reibmoment wird mit temperierter Ölkammer bei Füllstand Wellenmitte gemessen. Die Welle ist untemperiert und der Dichtring umgekehrt eingebaut. Die Rillen sind dabei ständig vollständig mit Öl gefüllt und fördern das Öl aus der Kammer.



Tabelle 5.3: Versuchsparameter

Ölfüllstand	Trocken, Benetzt, Wellenmitte und überflutet		
Temperatur [°C]	40 und 70		
Drehzahl [1/min]	250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000		

## 5.4 Förderwerte

Im Folgenden werden die Methoden zur Förderwertermittlung vorgestellt.

### 5.4.1 Ölförderwert

Symons [41] stellte eine Methode zur Förderwertmessung vor, bei der eine definierte Ölmenge mit einer Spritze oder Pipette an der Luftseite (Bild 5.9) des Dichtrings angeboten wird. Durch visuelle Beobachtungen wird die Zeit zum "Durchfördern" ermittelt. Aufgrund der hohen Förderwerte heutiger PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille ist diese Methode nicht geeignet. Stattdessen wird der Dichtring mit der Luftseite in den Ölraum eingebaut (Bild 5.10). Am Dichtring liegt somit ständig temperiertes Öl an. Bei dieser Methode muss beachtet werden, dass die Förderwerte nicht denen im realen Abdichtbetrieb entsprechen, da normalerweise luftseitig kein Öl an der Dichtlippe anliegt. Es wird der Maximalwert des Dichtsystems im Ölförderbetrieb ermittelt.





Bild 5.9: Förderwertmethode Symons

Bild 5.10: Förderwertmethode teilüberflutet

Der geförderte Massenstrom wird nach Eintreten eines Gleichgewichtszustands in einem Messbecher aufgefangen und ausgewogen (Bild 5.11). In Tabelle 5.4 sind die Versuchsparameter aufgeführt.



Bild 5.11: Ölförderung mit Biegebalkenwaage

Tabelle 5.4: Versuchsparameter

Ölfüllstand	Wellenmitte
Temperatur [°C]	40 und 70
Drehzahl [1/min]	250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000

### 5.4.2 Luftförderwert

Jenisch [11] stellte eine Methode zur Luftförderwertmessung bei komplett gefüllter Ölkammer vor. Ziel der Untersuchungen in dieser Arbeit war, die Luftförderwerte bei Ölstand Wellenmitte zu bestimmen. Herkömmliche Messmethoden zur Massenstrombestimmung kommen aufgrund des prinzipbedingten Druckaufbaus nicht in Frage. Auch die von Fritzsche [23] vorgeschlagene Methode scheint aufgrund des angelegten Unterdrucks nicht geeignet, da die Messwerte dadurch beeinflusst werden. Das physikalische Prinzip der Verdrängung von Flüssigkeit durch Luft ist für die Untersuchungen gut geeignet. Die vom Dichtring geförderte Luft dringt in die halbgefüllte Ölkammer ein. Durch einen Schlauch (Bild 5.12) wird die Luft weitergeführt.



Bild 5.12: Aufbau Luftförderung

Die Luft wird durch den Schlauch in ein senkrechtes, flüssigkeitsgefülltes Messglas (Bild 5.13) im Flüssigkeitsbad geleitet. Die von der Dichtung geförderte Luft strömt durch den Schlauch in die Röhre und verdrängt die Flüssigkeit. Das verdrängte Volumen kann an einer Skala direkt abgelesen werden. In etlichen Vorversuchen mit Dichtringen der Art PLE stellte sich heraus, dass der zu überwindende Druck in der Röhre bei kleinen Drehzahlen nicht überwunden werden konnte. Erst ab ca. 1500 1/min konnte Luft das Öl in der Röhre verdrängen. Bei Dichtringen mit kleineren Rillenquerschnitten kann diese Methode daher nicht angewendet werden. Auch im U-Rohr-Manometer entsteht ein Gegendruck, der nach kurzer Zeit zu groß wird. Diese Messmethoden sind also nicht verwendbar.



Bild 5.13: Luftmengenmessung durch Verdrängung

Stattdessen wird der Schlauch mit Öl befüllt und waagrecht auf einem Tisch ausgebreitet. Am Schlauchende fließt das von der Luft verdrängte Öl in einen Messbecher und wird ausgewogen (Bild 5.14). Um sicherzustellen, dass das Öl von der Luft verdrängt wird, und nicht frei ausfließt, ist der Ausfluss ca. 20 mm höher gelegt. Der daraus resultierende hydrostatische Druck von ca. 170 Pascal kann auch bei kleinen Drehzahlen überwunden werden. Die Messung wird nach Einstellen des Gleichgewichtzustandes begonnen.



Bild 5.14: Prinzip der Luftmengenmessung durch Verdrängung

Eine Temperierung der Ölkammer ist für die Luftförderwertmessungen nicht möglich. Dies zeigen zahlreiche Vorversuche. Fällt die Temperatur unter 40 °C, beginnt die Heizpatrone Wärme ins System zu leiten. Dadurch baut sich ein Luftdruck auf, der zusätzlich zur geförderten Luftmenge Öl aus dem Schlauch drückt. Es vergeht eine kurze Zeit bis das Öl im leeren Schlauchende bis zum Ausfluss verdrängt wird. Danach beginnt die Massenzunahme im Auffangbecher auf der Waage. Steigt die Temperatur über 40 °C, stoppt die Heizung und das System wird durch die Kühlwendel gekühlt. Dabei zieht sich das im System befindliche Luftvolumen so stark zusammen, dass ein Unterdruck entsteht. Dadurch wird das Öl im Schlauch wieder zurückgezogen. Das vordere Schlauchende ist nicht mehr gefüllt. Während Unterdruck herrscht, ist anzunehmen, dass zusätzlich Luft durch die Dichtung angesaugt wird. Somit wird die Messung verfälscht. Bild 5.15 zeigt die verdrängte Masse Öl in Abhängigkeit von der Zeit und den Temperierzuständen. Während der gesamten Zeit dreht die Welle mit konstanter Drehzahl und die Dichtung fördert Luft. →Bei den Luftförderwertmessungen wird keine Temperierung verwendet.



Bild 5.15: Luftförderwert in Abhängigkeit des Temperierzustands

Die Untersuchungen finden stattdessen bei der sich selbst einstellenden Temperatur statt. Bild 5.16 zeigt die durch die Luft verdrängte Masse Öl über der Zeit ohne Temperierung. Deutlich können die verschiedenen Steigungen bei verschiedenen Drehzahlen erkannt werden. In Tabelle 5.5 sind die verwendeten Versuchsparameter dargestellt.



Bild 5.16: Luftförderwert in Abhängigkeit der Drehzahl

Tabelle 5.5: Versuchsparameter Luftförderwerte

Ölfüllstand	Wellenmitte
Temperatur	Untemperiert
Drehzahl [1/min]	250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000

## 5.5 Dauerlaufuntersuchung

Ziel der Dauerläufe war es, die Dichtringe auf ihre Abdichtwirkung und ihr Verschleißverhalten zu untersuchen. Im Gegensatz zum bisherigen Einsatzschwerpunkt als Kurbelwellenabdichtung, bei dem die Dichtringe lediglich angespritzt werden, wird in den Dauerläufen ein Ölsumpf bestimmter Überdeckung eingesetzt. In den Versuchen soll die Bildung von Ölkohle provoziert werden, um die Einsatzgrenzen und die Funktionsweise mit verstopften Rillen untersuchen zu können. Nach Schmitt [7] von 1990 "hat man sich bei der Auslegung der Dichtlippe nur noch mit Ablagerungsbildung (Ölkohle) sowie Verschleiß auseinanderzusetzen".

Dazu wird möglichst wenig Öl verwendet. Für die Dauerversuche wurde eine Ölmenge von 700 ml gewählt. Ab dieser Ölmenge (Bild 5.17) hat die Spindel Kontakt mit dem Öl, und die die lagerseitige Abdichtung ist ausreichend geschmiert. Die Prüfwelle taucht dabei ca. 20 mm ein. Die Dichtlippe kann von der Luftseite sehr gut beobachtet werden. Tritt eine größere Leckagemenge aus, wird diese quantitativ erfasst, und nachgefüllt.



Bild 5.17: Ölstand bei Befüllung mit 700 ml Öl

#### Vor- und Nachuntersuchungen

Die Oberfläche der als Welle verwendeten Nadellagerinnenringe wird vor den Versuchen exemplarisch untersucht. Mithilfe eines Öberflächenmessgeräts werden die Oberfläche und die Rauheit in Längsrichtung analysiert. Für jeden Dauerlauf wird eine neue Laufspur verwendet. Nach dem Dauerlauf wird diese vermessen und dokumentiert. Zusätzlich werden die Wellen mit dem Zoomobjektiv fotografiert. Durch den hiermit analysierten Verschleiß der Gegenlauffläche kann das Verschleißverhalten der einzelnen Dichtringarten verglichen werden.

Die Untersuchung des Dichtringverschleißes und die Veränderung (zum Beispiel durch Ölkohlebildung) erfolgt durch Eingüsse und durch weiterführende visuelle Analysen.

#### Untersuchungsbedingungen

Bei den Dauerlaufuntersuchungen wurden die Programme 7 und 8 (Bild 5.18) verwendet. Die 24-Stunden-Zyklen weißen Drehzahlen von 1000, 2000, 3000 und 4000 1/min bei einer Ölsumpftemperatur von 120 °C auf. Um den Einfluss von Abkühlphasen auf die Entstehung von Ölkohle untersuchen zu können, beinhaltet Programm 7 eine vierstündige Pause, in der die Welle stillsteht und die Temperierung deaktiviert ist. Der Ölsumpf kühlt auf Raumtemperatur ab. Die Versuchsdauer beträgt standardmäßig 500 Stunden. An einigen Dichtringen wurden 1000-Stunden-Untersuchungen durchgeführt.

7

6

5

4

3

2

1

0

0 4

Drehzahl [ 1000/min]

I

Prüfprogramm 8

8 12 16 20 24

Zeit [h]

140

120

100

80

60

40

20

0

Temperatur [°C]

I





## 5.6 Statische Dichtheit

Um die statische Dichtheit überprüfen zu können, wurden mehrere statische Ölkammern gefertigt. Nach der Montage und dem Einbau des Dichtrings wird die Ölkammer mit Öl befüllt. Bei den Versuchen variieren die radiale Position des eventuell vorhandenen Dichtstegs (unten/ oben) und der Ölfüllstand (Wellenmitte/ überflutet).

Während der Untersuchung wird die gut einsehbare Luftseite der Dichtung regelmäßig beobachtet. So ist es möglich, die Erstleckage und das Fortschreiten der Leckage zu erkennen. Um die Beobachtungsmöglichkeit zu verbessern, wird ein unter UV-Licht fluoreszierendes Pulver beigemischt. Mit einer UV-Lampe kann das Öl vor der Oberfläche der Dichtlippe zum Fluoreszieren gebracht werden.

Zur Bewertung wird die von Reichert [42] eingeführte P-Methode verwendet. Die Bewertungen sind auf die statischen Verhältnisse der Stillstandsleckage von PTFE-Manschetten angepasst. Es erfolgt eine Einteilung in drei Bewertungsbereiche: Übergangsbereich der Dichtlippe, Luftseite der Dichtlippe und Luftseite des Dichtringgehäuses. Je nach Leckagemenge wird gemäß Tabelle 5.6 eine Bewertung festgelegt. Tabelle 5.6: Beurteilungskriterien der P-Bewertung





Punkt	Luftseite des Gehäuses	Luftseite der Dichtlippe	Übergangsbereich der Dichtlippe	Funktion
P8	trocken	trocken	trocken	gut
P7	trocken	trocken	leichter Ölring	
P6	trocken	trocken	starker Ölring	
P5	trocken	leichter Ölring		befriedigend
P4	trocken	starker Ölring		
P3	leichte Tröpfchenleckage			ungenügend
P2	schwere Tröpfchenleckage			
P1	Öl abfließend			

## 5.7 Analyse der Strömung

Mit dem vorgestellten Strömungsprüfstand und der Optik kann die Dichtlippe als Ganzes oder jeder Gewindegang einzeln beobachtet werden. Die Strömungsvorgänge können dabei in den Gewindegängen in Umfangsrichtung, in der Tiefe eines Gewindeganges und in axialer Richtung bei stillstehender oder bei drehender Welle beobachtet werden. Jede der zwei Kammern kann dabei beliebig mit Öl gefüllt werden.

Die Beobachtungen finden in Echtzeit am Monitor oder durch Aufzeichnen der Daten (Einzelbilder, Filme) auf ein Notebook statt. Die Videoaufnahme ist durch die enorm hohe Datenmenge zeitlich begrenzt. Sollen längere Aufnahmen erstellt werden, können automatisiert, in festgelegten Zeitabständen Einzelbilder aufgenommen werden. Diese werden mit dem Videobearbeitungsprogramm Adobe Premiere Pro zu Zeitrafferfilmen zusammengesetzt. Mit dieser Methode können Beobachtungen über mehrere Tage durchgeführt werden.

#### Visualisierung der Strömung

Wird für die Versuche reines Öl verwendet, kann das Vordringen des Öls durch den fortschreitenden Meniskus erkannt werden. Ist ein Gewindegang bereits gefüllt, kann die Strömung durch Luftblasen erkannt werden. Für eine Analyse reichen diese Bedingungen jedoch nicht aus. In etlichen Vorversuchen wurde deshalb eine Methode entwickelt, die Strömung visualisieren zu können, ohne diese dabei zu beeinflussen.

Als beste Methode hat sich die Beimischung von blättrigen Kupferpartikeln (Bild 5.19) erwiesen. Diese sind flach und dadurch sehr leicht. Die Partikel werden durch das günstige Gewicht/ Flächenverhältnis vom Öl mitgeschleppt (Bild 5.20). Es kann keine Beeinflussung der Strömung erkannt werden. Tritt axiale Strömung über die Dämme oder den Dichtsteg hinweg auf, fließen auch hier die Partikel durch den Berührbereich mit. Durch die gute Ausleuchtung können die Partikel optimal beobachtet werden. Letztendlich wird also nicht die reine Fluidströmung, sondern die Partikelströmung beobachtet. Mit dieser

Methode können Strömungsprofile in der Tiefe eines Gewindeganges, wie beispielsweise ein Rückfluss oder die Geschwindigkeitsverteilung, beobachtet werden.



Bild 5.19: Partikel

Bild 5.20: Ölströmung mit Partikeln

Luftblase

### 5.7.1 Methodik bei stillstehender Welle

Statisch, also bei stillstehender Welle wird der stirnseitige Ölraum A mit Öl befüllt. Es wird beobachtet, ob und wie Öl in den ersten geöffneten Gewindegang eindringt und ob es weiter vordringt. Hierzu kann die axiale Beobachtungsposition durch den Verfahrschlitten verstellt werden und dadurch eine axial in die Dichtlippe vordringende Strömung verfolgt werden. Um die Vorgänge an anderen radialen Positionen (zum Beispiel am Ölspiegel oder darüber) beobachten zu können, kann das Prisma mit der Beleuchtung verdreht werden. Durch die drehbare Dichtringaufnahme können verschiedene Bereiche (Ein-/ Ausgang, Dichtsteg, Ölkohleverklumpungen) der Dichtlippe in oder aus dem Ölsumpf gedreht werden.

### 5.7.2 Methodik bei drehender Welle

Die Analyse der Strömungsvorgänge im dynamischen Zustand, also bei drehender Welle, findet durch drei verschiedene Vorgehensweisen statt:

- 1: Der stirnseitige Ölraum A wird mit Öl befüllt und die Welle gedreht. Es wird beobachtet ob, wann, wie und wie weit Öl in die Dichtlippe ein- und vordringt. Diese Verhältnisse entsprechen dem realen Abdichtbetrieb.
- 2: Zuerst wird durch entgegengesetzte Drehrichtung bewusst Öl in die Spiralrille gefördert. Hiernach wird die Strömung in den gefüllten Rillen in Rückförderdrehrichtung beobachtet. Es können die verschiedenen Strömungsprofile und Rückströmungen in der Rillentiefe und axiale Übergänge in den nächsten Gewindegang untersucht werden. Hierzu wird die Welle sehr langsam, mit weniger als einer Umdrehung pro Minute gedreht, da bei höheren Geschwindigkeiten die Partikel nicht mehr eindeutig beobachtet werden können.
- 3: Der luftseitige Ölraum B wird mit Öl befüllt. Danach wird die Drehrichtung in Rückförderrichtung geändert. Somit kann die Rückförderwirkung, wie und wie viel Öl und/ oder Luft durch die Rillen gefördert wird, analysiert werden. Des Weiteren ist entscheidend, ob die gesamte Ölmenge in den Ölraum zurückgefördert werden kann, oder ob Öl auf der Luftseite oder in der Spiralrille verbleibt.

Bei allen Vorgehensweisen sind neben den Vorgängen in den Gewindegängen besonders die Strömungsverhältnisse am Ein- und Ausgangsbereich sowie an "Störstellen" ([43], [44]) wie dem Dichtsteg und an Ölkohleverschmutzungen interessant.

## 5.8 Numerische Simulation

Im Folgenden werden die Vorgehensweisen bei der Finiten Elemente Analyse und bei den Strömungssimulationen vorgestellt.

### 5.8.1 Finite Elemente Analyse

Für die Finite Elemente Analysen werden die Dichtlippen und die Ummantelung modelliert und in Elemente unterteilt. Es wurden die folgenden Vereinfachungen verwendet:

- Die Steifigkeiten der Metallteile sind gegenüber den Kunststoffen um Größenordnungen höher. Aus diesem Grund verformen sie sich bei den vorhandenen Belastungen nicht und können als Starrkörper betrachtet werden. Die Welle wird als Rigid Body modelliert. Der Stützring wird nicht modelliert, stattdessen werden die Randknoten der angrenzenden Kunststoffe als ortsfest definiert.
- Die Dichtringe werden als rotationssymmetrische Modelle nur in der Schnittebene modelliert und von MSC.Marc als 3D-Modell betrachtet. Dadurch wird die Spiralrille als Steifigkeitsvariation am Umfang vernachlässigt und das Modell vereinfacht.

Durch diese Vereinfachungen reduzieren sich die Anzahl der Elemente und die Rechenzeit erheblich. Folgende weitere Einstellungen wurden für die Analysen verwendet:

- Als Elementtyp werden die für die Kontaktberechnung besonders geeigneten Quad (4)-Elemente mit linearer Ansatzfunktion verwendet.
- Die Beschreibung großer Verformungen erfolgt mit den Einstellungen Large Displacement und Updated-Lagrange procedure.

#### Werkstoffmodelle

Für die Finite Elemente Analyse von realen Bauteilen müssen deren Werkstoffverhalten und die entsprechenden Werkstoffkennwerte bekannt und in FEM-Programme integriert sein. Für PTFE-Compounds mit nicht-linearem Spannungs-Dehnungs- und nicht-linearem Zeit- und Temperaturverhalten ist dies nicht der Fall. In den vergangenen Jahren wurden von verschiedenen Wissenschaftlern Materialmodelle entwickelt (siehe Kap. 2.3). Olbrich [28] stellte einige vor (Bild 5.21) und entwickelte drei verschieden komplexe Modelle, die auch die Werkstoffrelaxation berücksichtigen.





In Bild 5.22 wird das Radialkraftverhalten einer PTFE-Manschette vereinfacht in die Phasen Montage und Lagerung unterschieden. Im Einfachmodell A werden diese Phasen nicht komplett simuliert. Es wird lediglich der Gleichgewichtszustand nach Lagerung, also nach Relaxation betrachtet. Das Modell A ist eine Kombination aus Figur III und Figur IV.



Bild 5.22: Radialkraftverlauf einer PTFE-Wellendichtung

#### Werkstoffkennwerte

Die Werkstoffkennwerte für das Modell A müssen für jedes Compound in äußerst aufwendigen Untersuchungen ermittelt werden. Dies war für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Stattdessen wird ein linear elastisches – ideal plastisches Werkstoffmodell (Figur II in Bild 5.21) verwendet. Mit diesem hat Hoffmann [24] erfolgreich Untersuchungen zum Anlageverhalten und zur Pressungsverteilung durchgeführt.

Im linear elastischen Bereich wird für die Berechnungen vereinfachend nach dem Hookschen Gesetz nach Formel (5.1) angenommen, dass der Quotient aus Spannung  $\sigma_{Fk}$  und Dehnung  $\epsilon$  konstant ist. Der Quotient wird als E-Modul bezeichnet.

$$E = \frac{\sigma_{Fk}}{\varepsilon}$$
(5.1)

Der ideal plastische Bereich des Werkstoffmodells ist durch die Streckgrenze R<sub>e</sub> gekennzeichnet. Ab dieser Grenze bleibt die Spannung im Werkstoff trotz Erhöhung der Dehnung konstant. Der Werkstoff beginnt zu fließen und verformt sich plastisch.

Ein weiterer Kennwert ist die Querkontraktionszahl  $\mu$  nach Formel (5.2). Sie ist der Quotient aus Einschnürung und Verlängerung.

$$\mu = \frac{\text{Einschnürung}}{\text{Verlängerung}}$$
(5.2)

Für alle Dichtringarten wurden die von Hoffman genannten Werkstoffkennwerte nach Tabelle 5.7 verwendet.

Tabelle 5.7: Werkstoffkennwert PTFE-Compound nach Hoffman

Dichtringart	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Streckgrenze R <sub>e</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Querkontraktionszahl µ
Alle	300	10	0,45

Die Gummiummantelung, mit der die Dichtlippe verbunden ist, wurde nach dem Stand der Technik und Forschung mit einem nicht linearen Werkstoffmodell nach Mooney-Rivlin berechnet. Die verwendeten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.8: Werkstoffkennwert von Gummi

Werkstoff	Name	C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>
NBR	Nitril-Butadien-Rubber	0,873	1,450

### 5.8.2 Strömungssimulation

Für die Strömungssimulation wurde die Geometrie eines Gewindegangs der Dichtringart PLE modelliert und in Zellen aufgeteilt. Danach wurden den Wänden, der Welle und dem Fluid die jeweiligen Randbedingungen und Eigenschaften zugewiesen. Vereinfachend wurden die folgenden Annahmen getroffen und in der Simulation berücksichtigt:

- Laminare Strömung
- Einphasige Strömung

Für die Simulationen wurden die Einstellungen nach Tabelle 5.9 und die Fluideigenschaften nach Tabelle 5.10 verwendet. Die Simulationen wurden hauptsächlich für Drehzahlen von 3000 1/min durchgeführt.

Tabelle 5.9: Einstellungen des Gleichungslöser

Solver	Segregated
Formulation	Implicit
Space	3D
Time	Steady
Velocity Formulation	Absolute
Gradient Option	Cell-Based
Porous Formulation	Superficial Velocity

Tabelle 5.10: Fludiparameter

Dichte ρ	850 kg/m³
Kinematische Viskosität v bei 40°C	67 mm²/s
Dynamische Viskosität η bei 40°C	0,057 Kg/m*s

# 6 Untersuchungsergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die Untersuchungsergebnisse vorgestellt.

### 6.1 Dichtringe

Alle Dichtringe sind für Wellen mit einem Durchmesser von 80 mm und Dichtringaufnahmen von 100 mm ausgelegt. Zum Schutz vor Fremdpartikeln oder -flüssigkeiten ist an jedem Dichtring eine Elastomer-Schutzlippe an der Luftseite angespritzt. Für die Untersuchungen wird diese entfernt. Einen ersten Überblick der wichtigsten Kenngrößen gibt Tabelle 6.1. Alle Daten beziehen sich auf den Einbauzustand.

	PRA	PLE	PLF
Dicke der Dichtlippe [mm]	0,8	0,9	0,8
Spiralrille	geschnitten	geprägt	geprägt
Rillentiefe [mm]	0,6	0,3	0,1
Querschnitt eines Gewindeganges [mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,08	0,03
Berührbereich [mm]	2,7	2,4	2,0
Anliegende Gewindegänge	4	3	6
Füllstoffe	Glasfaser	Glasfaser	Glasfaser+Grafit

Die Dichtlippe des Dichtrings **PRA** (Bild 6.1, Bild 6.2) ist in einem zweiteiligen, teilweise gummiummantelten Metallgehäuse geklemmt. Die Spiralrille ist 0,6 mm schräg in die 0,8 mm dicke Dichtlippe eingeschnitten. Sie stülpt sich leicht um und liegt über vier Gewindegänge mit einem Berührbereich von ca. 2,7 mm an der Welle an.





Bild 6.1: Dichtring PRA



Bild 6.2: Schnittansicht PRA

Untersuchungsergebnisse

Dichtring **PLE** (Bild 6.3, Bild 6.4) besteht aus einem gummiummantelten Metallstützring. Die Dichtlippe ist chemisch modifiziert, wodurch die Oberfläche braun wird.

Die Dichtlippe ist an die Gummierung anvulkanisiert und somit flexibler verbunden als bei PRA. Sie liegt über drei bis vier Gewindegänge mit einem Berührbereich von ca. 2,4 mm flach an der Welle an. Die Spiralrille und ebenso die Gegenseite der Dichtlippe sind geprägt. Die Querschnittsfläche eines Gewindegangs ist deutlich größer als bei PRA und PLF. Um die Spiralrille im statischen Zustand zu verschließen, hat der Dichtring einen Dichtsteg (Bild 6.5) im dritten Gewindegang. Der Dichtsteg befindet sich im Übergangsbereich der Dichtlippe.





Bild 6.3: Dichtring PLE



Bild 6.4: Schnittansicht PLE





Dichtring **PLF** (Bild 6.6, Bild 6.7) besteht aus einem gummiummantelten Metallstützring. Die Dichtlippe ist durch ein Plasmaverfahren aktiviert und direkt an der Gummierung anvulkanisiert, wodurch sie ebenso wie bei Dichtringart PLE flexibler verbunden ist als bei Dichtringart PRA. Sie liegt über sechs Gewindegänge mit einem Berührbereich von ca. 2,0 mm flach an der Welle an. Die Spiralrille ist geprägt und die Querschnittsfläche ist größer als bei Dichtring PRA und kleiner als Dichtring PLE.

Bei den vorderen fünf Gewindegängen ist die Tiefe und Breite deutlich reduziert. Erst beim Übergang zum Sechsten zeichnet sich ein deutlich ausgeprägter, größerer Querschnitt ab. Bei einem Teil der Profilschnitte ist erkennbar, dass neben dem ersten Gewindegang, auch der zweite Gang nicht an der Welle anliegt. Um die Spiralrille im statischen Zustand zu verschließen, hat der Dichtring zwei um 180° versetzt angeordnete Dichtstege im zweiten und vierten Gewindegang (Bild 6.8). Die Dichtstege sind wie eine Rampe geformt, um bereits ausgetretenes Öl besser rückfördern zu können.



Bild 6.6: Dichtring PLF



Bild 6.7: Schnittansicht PLF



Bild 6.8: Dichtsteg PLF

#### Abweichungen wichtiger Geometriegrößen

Unter Betrachtung der acht vorhandenen Profilschnitte je Dichtring ist es möglich fertigungsbedingte Abweichungen und Schwankungen innerhalb eines Dichtrings zu untersuchen. Im Zentrum steht dabei die Genauigkeit, mit der die Dichtlippe am Metallstützring eingelegt und befestigt ist. Zudem wurde untersucht, ob sich bei einem exzentrisch eingelegten Ring der Biegeradius und der anliegende Dichtbereich ändern. Die Abweichungen der geometrischen Größen werden im Folgenden visuell betrachtet. Dazu wurden für die folgenden Bilder eine Skizze und ein Foto zweier Extremzustände desselben Dichtringes übereinandergelegt. Die Dichtlippen der Fotos sind zur besseren Visualisierung weiß eingefärbt. Auf diese Weise werden die Abweichungen gut sichtbar. Bild 6.9 zeigt die Dichtringart **PRA**. Der Außendurchmesser der Dichtlippe beträgt durchgängig 97 mm. Der äußere Metallring ist rotationssymmetrisch und positioniert die Dichtlippe gut. Der innere Metallring, der die Dichtlippe klemmt, weist unterschiedliche Innendurchmesser auf. Sie schwanken um ca. 1 mm. Die Dichtlippe hat daher am Umfang unterschiedliche Biegedurchmesser. Entsprechend variieren der Biegeradius und die Position des an der Welle anliegenden Berührbereiches. Die Position des Dichtlippe nendes ist bei den acht Schnitten um bis zu 0,3 mm in axialer Richtung verschoben.



Bild 6.9: Schnitt PRA10\_315° (Foto) und PRA10\_135° (Skizze) im Vergleich

Bild 6.10 zeigt die Dichtringart **PLE**. Der Außendurchmesser der Dichtlippe schwankt zwischen 96,0 mm und 96,8 mm. Sie wird bei den Schnitten 90°, 135° und 180° vom Metallstützring umgeknickt, während sie bei 0° und 315° einen Abstand von 0,5 mm aufweist. Dementsprechend ist die Dichtlippe bei den einzelnen Profilschnitten unterschiedlich lang und zeigt andere Biegeradien und Anlageverhalten. Die statische Exzentrizität der Dichtlippe beträgt mehr als 0,4 mm.



Bild 6.10: Schnitt PLE30\_0° (Foto) und PLE30\_90° (Skizze) im Vergleich

Ein ähnliches Ergebnis liefert die Analyse des Dichtrings **PLF**. Es fällt auf, dass der Stützring nicht konzentrisch in der Elastomer-Ummantelung liegt. Der Durchmesser, ab dem die Dichtlippe umbiegt, variiert um 0,3 mm. Der Außendurchmesser der Dichtlippe beträgt zwischen 95,3 mm und 96,0 mm. Bei einzelnen Schnitten liegt die Dichtlippe zudem nicht nur am Stützring an, sondern wird leicht umgebogen.

Das unterschiedliche Umbiegen der Dichtlippe zeigt Bild 6.11. Die Dichtlippe des 90°-Schnitts weist einen größeren Biegeradius auf als die des 315°-Schnitts und liegt axial leicht verschoben an der Welle an.



Bild 6.11: Schnitt PLF18\_315° (Foto) und PLF18\_90° (Skizze) im Vergleich

## 6.2 Radialkraft

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Radialkraftuntersuchungen vorgestellt.

### 6.2.1 Betrachtungen am Einzeldichtring

Jeder Dichtring wird nach einem angepassten Zeitabstand an acht um 45° versetzte Stellen vermessen. Dadurch ist es möglich Schwankungen der Radialkraft am Umfang eines Dichtrings im Neuzustand, nach Lagerung auf einer Welle und nach Dauerlauf zu erkennen. Es zeigen sich große Unterschiede. Bild 6.12 und Tabelle 6.2 zeigt an Dichtring PLE12 beispielhaft für die Dichtringart PLE, wie groß diese Schwankungen sind.



Bild 6.12: Radialkräfte im Neuzustand, nach Wellenlagerung und Dauerlauf

Die Abweichungen des Mittelwerts jedes Zustandes eines Dichtrings liegen innerhalb  $\pm 5$  N. Die prozentuale Abweichung liegt im Neuzustand bei ca.  $\pm 6$  %, nach Lagerung bei ca.  $\pm 9$  % und nach Dauerlauf bei ca.  $\pm 12$  %.

Dichtring PLE12	Neuzustand	nach Lagerung	nach Dauerlauf
1	77,9	58,9	34,8
2	71,3	56,5	30,1
3	71,7	59,4	33,8
4	70,9	62,1	33,2
5	74,0	53,5	33,4
6	73,3	55,9	32,1
7	75,3	55,1	29,4
8	78,2	56,9	36,8
Mittelwert [N]	74,1	57,3	33,0
Maximalwert [N]	78,2	62,1	36,8
Minimalwert [N]	70,9	53,5	29,4
Obere Abweichung [N]	4,1	4,8	3,8
Untere Abweichung [N]	3,2	3,8	3,6
Obere Abweichung [%]	5,6	8,4	11,7
Untere Abweichung [%]	4,3	6,6	10,8

Tabelle 6.2: Radialkräfte [N] des Dichtrings PLE12

Tabelle 6.3 zeigt die Mittelwerte jedes Zustandes aller vermessenen Dichtringe der Art PLE. Die prozentuale Abweichung liegt im Neuzustand und nach Lagerung bei ca.  $\pm$  10 % und nach Dauerlauf bei ca.  $\pm$  7 %.

Tabelle 6.3: Durchschnittliche Radialkräfte [N] und prozentuale Abweichungen

Dichtringart PLE	Neuzustand	nach Lagerung	nach Dauerlauf	
Mittelwert [N]	79,2	53,6	34,1	
Maximalwert [N]	87,2	58,6	36,3	
Minimalwert [N]	73,5	48,3	32,3	
Obere Abweichung [N]	8,0	5,0	2,2	
Untere Abweichung [N]	5,7	5,3	1,8	
Obere Abweichung [%]	10,1	9,3	6,5	
Untere Abweichung [%]	7,2	9,9	5,3	

Die anderen Dichtringarten verhalten sich ähnlich.

#### Erkenntnis

Dies bedeutet, dass eine einzelne Messung nach DIN 3761 einen einzelnen Dichtring beziehungsweise eine Dichtringart nur sehr ungenau beschreibt. Schon innerhalb eines Dichtrings streuen die Messwerte um  $\pm$  12 %. Innerhalb einer Dichtringart streuen die Durchschnitte der Messwerte ebenfalls um  $\pm$  10 %.

### 6.2.2 Ergebnisse und Vergleich

Bild 6.13 und Tabelle 6.4 zeigen die durchschnittlichen Radialkräfte der Dichtringe im Neuzustand, nach Lagerung und nach den Dauerlaufversuchen mit der Schwankungsbreite. Die Radialkräfte liegen im Neuzustand zwischen 80 N bei Dichtringart PLE und bei über 140 N bei der Dichtringart PLF. Auch nach der Wellenlagerung ist eine große Differenz zwischen den einzelnen Dichtringarten feststellbar, bei PLE sinkt die Radialkraft auf ca. 53 N, während sie bei PLF noch bei ca. 92 N liegt. Während der Dauerläufe nimmt die Radialkraft nochmals stark ab. Dabei sinken die Werte bis auf 34 N bei Dichtringart PLF und 46 N bei Dichtringart PLF ab. PRA zeigt immer noch eine Radialkraft von ca. 50 N.



Bild 6.13: Radialkräfte im Neuzustand, nach Wellenlagerung und Dauerlauf

Tabelle 6.4. Durchschnittliche	Radialkräfte	[N] und	prozentuale	Abweichungen
	Naulaikiane	[IN] UNU	prozentuale	Abweichungen

	im Neuzustand			nach Lagerung			nach Dauerlauf		
Art	Mittelwert	Abw-o	Abw-u	Mittelwert	Abw-o	Abw-u	Mittelwert	Abw-o	Abw-u
PRA	111,5	6,6	5,7	72,1	7,2	7,9	49,4	7,9	6,1
PLE	79,2	10,1	7,2	53,6	9,3	9,9	34,1	6,5	5,3
PLF	142,9	3,4	5,2	92,5	7,0	9,3	46,4	11,9	15,9

In Bild 6.14 sind die prozentualen Abnahmen der Radialkräfte vom Neuzustand zum Zustand nach Lagerung und vom Zustand nach Lagerung zum Zustand nach den Dauerläufen aufgetragen. Sämtliche Ringe haben im Neuzustand die höchste Radialkraft, die nach der Wellenlagerung um 30 % bis 55 % abnimmt. Durch die Dauerläufe nehmen die Radialkräfte der Dichtringe um weitere 15 % bis 50 % ab. Die prozentuale Kraftabnahme durch den Dauerlauf ist bei Dichtringart PLF mit 50 % am größten.



Bild 6.14: Prozentualer Radialkraftverlust durch Wellenlagerung und Dauerlauf

### 6.2.3 Mittlere Flächenpressung

Mithilfe der Profilschnitte lässt sich die an die Welle anliegende wahre Berührfläche der Dämme bestimmen. Dabei wird jeder Gang einzeln betrachtet und vermessen. Die auf diese Weise ermittelten Berührflächen zeigt Bild 6.15. Die wahre Berührfläche variiert von 120 mm<sup>2</sup> bei Art PLF über 130 mm<sup>2</sup> bei Art PLE bis 190 mm<sup>2</sup> bei Art PRA.



Bild 6.15: Anliegende Berührfläche Ab

Die mittlere Flächenpressung  $p_m$  der Dichtringe lässt sich nach Formel (6.1) aus der Radialkraft  $F_R$  und der an der Welle anliegenden wahren Berührfläche  $A_b$  herleiten:

$$p_{\rm m} = \frac{F_{\rm R}}{A_b} \tag{6.1}$$

Eine Übersicht der mittleren Flächenpressungen für die unterschiedlichen Zustände zeigt Bild 6.16. Die Werte variieren zwischen 0,25 N/mm<sup>2</sup> nach Dauerlauf und nahezu 1,2 N/mm<sup>2</sup> im Neuzustand.





#### 6.2.4 Temperaturverhalten

Bei höherer Temperatur nimmt die Radialkraft von PTFE-Manschettendichtringen ab. Bild 6.17 zeigt Radialkräfte an Dichtringen nach Lagerung. Die Messtemperaturen betragen 20 °C, 40 °C und 70 °C. Bei noch höheren Temperaturen, wie zum Beispiel der Einsatztemperatur im Dauerlauf bei 120 °C nimmt die Radialkraft noch weiter ab. Dadurch kann unter Umständen die Funktion beeinträchtigt werden.



Bild 6.17: Radialkräfte in Abhängigkeit von der Temperatur

Der gleiche Effekt ist schon bei schwankender Raumtemperatur im Messlabor erkennbar. Am Beispiel der Dichtringart PRA ist in Bild 6.18 erkennbar, wie die Messwerte im Neuzustand zu verschiedenen Jahreszeiten schwanken. Die temperaturbedingte Ab-

#### Untersuchungsergebnisse

nahme der Radialkraft im Sommer, sowie die höhere Radialkraft bei kälteren Temperaturen im Frühling und im Winter ist offensichtlich. Alle 18 (jeweils 3 \* 6 Dichtringe) für dieses Schaubild berücksichtigten Dichtringe stammen aus einer Produktionscharge. Es ist anzumerken, dass alle Messungen innerhalb der Toleranzen der Raumtemperatur nach DIN 50014 (Raumtemperatur = 15 °C bis 35 °C) liegen. Um vergleichbare Werte zu erzielen, muss der Messraum, z. B. auf 23 °C temperiert sein. Diese Erkenntnis stimmt mit Schmitt [7] überein.



Bild 6.18: Radialkraft im Neuzustand bei unterschiedlicher Raumtemperatur (PRA)

### 6.2.5 Zusammenfassende Erkenntnisse

- Die gemessenen Radialkräfte der Dichtringarten sind sehr unterschiedlich. Dies hängt von der Grundgeometrie (Einspannung, Berührbereich, Dichtlippendicke), der Feingeometrie der Spiralrille und vom Compound ab.
- Die Radialkräfte der Dichtringe derselben Art und die Radialkräfte an verschiedenen Stellen eines einzelnen Dichtringes schwanken stark. Dies bedeutet, dass die Radialkraft nicht mit einer Messung ermittelt werden kann. Der Durchschnittswert einer Dichtringart streut um ca. ± 10 %.
- Die Radialkraft, die der Dichtring im Neuzustand zeigt, ist von der Fertigung, der Vordehnung und des Lieferzustandes abhängig. Die für den Einsatz entscheidende Radialkraft ist die Kraft im Lagerzustand. Diese ist 30 % 35 % geringer als im Neuzustand.
- Nach den Dauerläufen sind die Radialkräfte um weitere 30 % 50 % reduziert.
- Die Radialkräfte sind stark temperaturabhängig.

## 6.3 Reibmoment

Im Folgenden wird an der Dichtringart PLE der Einfluss des Ölfüllstands im Abdichtbetrieb bei zwei Temperaturen vorgestellt. Im zweiten Unterkapitel werden die Reibmomente der Dichtringarten bei den Schmierungszuständen Trockenlauf, Benetzt, Abdichtbetrieb und Förderbetrieb bei jeweils 40 °C und 70 °C bei Ölfüllstand Wellenmitte vorgestellt.

### 6.3.1 Einfluss des Ölfüllstands und der Temperatur

Bild 6.19 zeigt die Reibmomente der Dichtringart PLE im Abdichtbetrieb bei Ölstand Wellenmitte und bei Ölstand Überflutet bei 40 °C und 70 °C. Dabei sinken die Reibmomente bei Temperaturerhöhung von 40 °C auf 70 °C bei beiden Ölfüllständen um ca. 0,05 Nm ab.

Die Reibmomente bei beiden Füllständen steigen bis ca. 1500 1/min parallel und linear an. Ab 1500 1/min steigen die Reibmomente bei Überflutung parallel und linear weiter. Bei Füllstand Wellenmitte flacht die Kurve bei ca. 1500 1/min ab und verläuft parallel ansteigend weiter.



Bild 6.19: Reibmoment PLE in Abhängigkeit von Ölstand und -temperatur

#### Erkenntnis:

Bis 3000 1/min hat eine Temperaturänderung von 40 °C auf 70 °C einen größeren Einfluss auf das Reibmoment als die Verringerung des Ölfüllstands. Über 3000 1/min ist dieser Einfluss kleiner als eine Verringerung des Ölfüllstands.

### 6.3.2 Ergebnisse und Vergleich

In den folgenden Darstellungen sind alle Schmierungszustände einer Dichtringart jeweils bei 40 °C und 70 °C über der Drehzahl aufgetragen. Bei den Zuständen Trockenlauf und Benetzt ist jeweils die Welle temperiert, im Abdichtbetrieb und Förderbetrieb ist das Öl in der Ölkammer temperiert. Bei den einzelnen Dichtringarten stellen sich sehr unterschiedliche Einflüsse der Schmierungszustände auf die Reibmomente heraus. Allen ist jedoch gleich, dass die Reibmomente bei 70 °C deutlich geringer sind als bei 40 °C. Bei Dichtringart **PRA** kann bei beiden Temperaturen ein deutlicher Unterschied zwischen Abdicht- und Förderbetrieb einerseits und Trockenlauf und Benetzt andererseits festgestellt werden. Im benetzten und trockenen Zustand sind die Reibmomente wesentlich kleiner. Das bedeutet, dass die durch das Öl übertragenen Schubspannungen einen erheblichen Anteil am Reibmoment ausmachen. Weiterhin kann dadurch erkannt werden, dass sich im Abdichtbetrieb viel Öl zwischen den Dämmen und der Welle befinden muss.


Bild 6.20: Reibmomente PRA 40 °C



Bild 6.21: Reibmomente PRA 70 °C

Bei Dichtringart **PLE** kann bei beiden Temperaturen ein deutlicher Unterschied der Reibmomente zwischen Abdicht- und Förderbetrieb festgestellt werden. Das Reibmoment im Förderbetrieb mit vollständig gefüllten Rillen ist um ca. 2/3 größer. Die Reibmomente im benetzten und trockenen Zustand nähern sich ab ca. 1000 1/min dem Reibmoment des Abdichtbetriebs an. Das bedeutet, dass die durch das Öl übertragenen Schubspannungen einen erheblichen Anteil am Reibmoment ausmachen. Weiterhin kann dadurch erkannt werden, dass sich im Abdichtbetrieb kaum Öl zwischen den Dämmen und der Welle befindet. Dadurch sind die Reibmomente im trockenen und benetzten Zustand gleich groß, wie im Abdichtbetrieb.



Bild 6.22: Reibmomente PLE 40 °C



Bild 6.23: Reibmomente PLE 70 °C

Bei Dichtringart **PLF** kann bei beiden Temperaturen ein deutlicher Unterschied der Reibmomente zwischen Abdicht- und Förderbetrieb festgestellt werden. Das Reibmoment im Förderbetrieb mit vollständig gefüllten Rillen ist um fast 50 % größer. Die Reibmomente im benetzten und trockenen Zustand liegen jeweils dazwischen.

Die Reibmomente im Abdichtbetrieb sind also geringer als bei den anderen Zuständen. Hier kann nicht wie bei PLE argumentiert werden, dass die Gewindegänge ölfrei sind. Sonst müsste sich ein ähnliches Reibmoment einstellen wie bei Trockenlauf und im benetzten Zustand. Vielmehr verringert sich bei Dichtringart PLF das Reibmoment im Abdichtbetrieb, ähnlich wie bei Elastomer-Radialwellendichtringen deutlich. Das Öl baut unter der Dichtlippe einen Schmierfilm auf, der die Dichtlippe gegen die große Radialkraft anhebt. Dadurch wird die Berührung der harten Füllstoffe des PTFE-Compounds mit der Welle vermieden. Das Reibmoment des vom Öl übertragenen Schubspannungsanteils ist geringer als das Reibmoment des direkten Kontakts der Dichtlippe mit der Welle. Die Reibmomente im Abdichtbetrieb sind dabei jedoch immer noch deutlich größer als bei Dichtringart PLE.



Bild 6.24: Reibmomente PLF 40 °C



Bild 6.25: Reibmomente PLF 70 °C

# 6.3.3 Zusammenfassende Erkenntnisse

- Die Reibmomente bei 70 °C sind deutlich geringer als bei 40 °C Öltemperatur.
- Die Reibmomente bei Ölstand Wellenmitte sind geringer als bei Überflutung.
- Die Reibmomente hängen stark von der Radialkraft und dem Compound ab.
- Der stärkste Einflussparameter ist die Feingeometrie der Spiralrille und der Dämme und dadurch der Schmierungszustand unter der Dichtlippe.

# 6.4 Förderwerte

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Öl- und Luftförderwerte vorgestellt.

# 6.4.1 Ölförderwert

Während des Abdichtbetriebs wird eingedrungenes Öl durch die Spiralrille auf die Ölseite zurückgefördert. Wenn sich ein Gleichgewicht einstellt oder  $\dot{m}_R > \dot{m}_L$  ist, ist das System dicht. Dieser Rückförderwert  $\dot{m}_R$  kann jedoch nicht gemessen werden. Stattdessen wird die in Kap. 5.4.1 vorgestellte Methode des Ölförderbetriebs mit umgedrehtem Dichtring angewendet. Die so gemessenen Förderwerte sind ein Maß für die maximale Förderwirkung des Systems Dichtung.

In Bild 6.26 sind die Ölförderwerte bei einer Ölsumpftemperatur von 40 °C und bei 70 °C und Ölfüllstand Wellenmitte dargestellt. Die Förderwerte der einzelnen Dichtringe sind kaum temperaturabhängig. Bei den Dichtringarten PLE und PLF sind die Ölförderwerte mit der Drehzahl linear ansteigend. Bei Dichtringart PRA weichen die Messwerte bei 5000 1/min sehr stark und untypisch voneinander ab, sodass hier keine gesicherte Aussage getroffen werden kann.

Im Vergleich der Dichtringarten **PLE** ( $A_{Gewindegang} = 0,08 \text{ mm}^2$ ) und **PLF** ( $A_{Gewindegang} = 0,03 \text{ mm}^2$ ) zeigt sich, dass der Einfluss der Querschnittsfläche direkt in die Förderwerte eingeht. Die Querschnittsfläche und der Ölförderwert der Dichtringart PLE ist jeweils um Faktor 2 größer als bei Dichtringart PLF. Auffällig ist Dichtringart **PRA**. Die Querschnitte der Gewindegänge im anliegenden Berührbereich ( $A_{Gewindegang} = 0,01 \text{ mm}^2$ ) sind verglichen mit den anderen Dichtringarten sehr klein. Dagegen sind die Ölförderwerte um Faktor 2 (PLE) und 4 (PLF) größer.



Bild 6.26: Vergleich der Ölförderwerte aller Dichtringarten bei 40°C und bei 70°C

Untersuchungsergebnisse

Eine Erklärung hierfür ist, dass in den Dichtringarten PLE und PLF die Spiralrille mit einem bzw. zwei Dichtstegen verschlossen ist. Dadurch kann das Öl nicht ungehindert durch die Spiralrille fließen. Werden die Ergebnisse aus den Luftförderwertmessungen (Kap. 6.4.2) mit betrachtet so wird ersichtlich, dass es noch einen weiteren Einflussfaktor geben muss.

Die hohen Ölförderwerte der geschnittenen Dichtringart **PRA** stehen im Zusammenhang mit der Herstellungsart der Spiralrille. Die Dichtlippe wird beim Aufschieben auf die Welle umgestülpt. Dabei weiten sich die geschnittenen Gewindegänge im luftseitigen Übergangsbereich stark auf (Bild 6.27, links). Der förderfähige Querschnitt der Gewindegänge wird in diesem Bereich von ca. 0,01 mm<sup>2</sup> auf über 0,1 mm<sup>2</sup> erheblich vergrößert. Zusätzlich stehen die Wände der Gewindegänge nahezu senkrecht zur Welle. Durch die hohe Viskosität wird das Öl von der Welle mitgeschleppt und bildet am Übergangsbereich der Dichtlippe am gesamten Umfang ein Ölangebot. Die steilen Wände lenken das Öl in den großen Gewindegängen in die Dichtlippe um. Dort kommt es wahrscheinlich zu einem Druckanstieg, der die Dichtlippe anhebt und die große Ölmenge durchfördert. Die Hauptförderwirkung wird wahrscheinlich im luftseitigen Übergangsbereich erzeugt.

Die Querschnitte der geprägten Dichtringarten PLE (Bild 6.27, rechts) und PLF bleiben auch im Übergangsbereich gleich groß. Des Weiteren stehen die Wände der Gewindegänge lediglich schräg oder sogar parallel zur Welle und haben somit keine große Umlenkwirkung.



Bild 6.27: Vergleich der Rillenquerschnitte im luftseitigen Übergangsbereich

## 6.4.2 Luftförderwert

Der Luftförderwert ist wie der Ölförderwert von vielen Faktoren abhängig. In den nachfolgenden Betrachtungen wurden der Ölfüllstand und die Drehgeschwindigkeit variiert. Alle durchgeführten Luftförderwertmessungen wurden ohne Temperierung im Abdichtbetrieb gemessen.

#### Einfluss des Ölfüllstands auf den Luftförderwert

In Bild 6.28 ist der Luftförderwert der Dichtringart PLE in Abhängigkeit vom Ölfüllstand bei verschiedenen Drehzahlen dargestellt. Bei beiden Ölständen ist ein linearer Verlauf des Förderwertes erkennbar. Die Luftförderwerte bei überflutetem Dichtring sind kleiner als bei Ölstand Wellenmitte. Das Öl stellt einen Widerstand dar und beeinflusst die Pumpleistung des Dichtrings. Bei überflutetem Dichtring konnten erst ab Drehzahlen von 750 1/min Ergebnisse erzielt werden. Bei Drehzahlen von 250 1/min und 500 1/min konnte keine Luftförderung gemessen werden. Dies bestätigt die Vermutung des Widerstands. Bei 5000 1/min konnte bei gefüllter Kammer ein Luftförderwert von ca. 26 g<sub>öl</sub>/min und bei Ölstand Wellenmitte ein Wert von ca. 33 g<sub>öl</sub>/min gemessen werden.



Bild 6.28: Luftförderwerte PLE bei Ölstand WM und komplett überflutet

#### **Ergebnisse und Vergleich**

Die nachfolgenden Untersuchungsergebnisse wurden bei Ölstand Wellenmitte ermittelt. Bei den geprägten Dichtringarten steht der Luftförderwert in direktem Zusammenhang mit der Querschnittsfläche der Gewindegänge. Die beste Förderwirkung zeigt PLE mit den größten Querschnittsflächen. Während mit den anderen Dichtringarten Messungen erst ab 1000 1/min möglich waren, konnte die Dichtringart PLE schon bei 250 1/min Luft gegen den Widerstand des Öls in die Ölkammer fördern. Bei einer Drehzahl von 5000 1/min fördern die Dichtringe der Art PLE 33 gö<sub>l</sub>/min, PRA 16 gö<sub>l</sub>/min und PLF lediglich 6 gö<sub>l</sub>/min.



Bild 6.29: Luftförderwerte aller Dichtringearten bei unbeheiztem Ölbad

Bei der Dichtringart **PLE** ist der Dichtsteg am Übergangsbereich appliziert. Somit kann die Luft nahezu ohne Widerstand in die Spiralrille eindringen und im großen Querschnitt durch die Schleppwirkung der Welle gefördert werden.

Im Gegensatz zu den Ölförderwerten sind die Luftförderwerte der Dichtringart **PRA** um Faktor 2 kleiner als bei Dichtringart PLE. Durch die wesentlich geringere Viskosität des Fluides Luft ist der Einfluss der Wände der Gewindegänge im Übergangsbereich unerheblich. Die Luft wird nur von den Gewindegängen nahe dem Berührbereich in die Spiralrille geleitet.

Bei Dichtringart **PLF** ist die Spiralrille im anliegenden Bereich der sehr kleinen Gewindegänge durch zwei Dichtstege verschlossen. Dadurch wird zum einen im Kalttest nach der Montage verhindert, dass der Druck nach außen (Luftseite) entweichen kann, zum anderen wird auch sehr wenig Luft nach innen (Ölseite) gefördert.

## 6.4.3 Zusammenfassende Erkenntnisse

- Bei geprägten Dichtringen stehen die Öl- und Luftförderwerte im direkten Zusammenhang mit dem Rillenquerschnitt.
- Entgegen den Erwartungen ist der Ölförderwert der geschnittenen Dichtringart PRA am größten. Die Gewindegänge im luftseitigen Übergangsbereich beeinflussen die Ölförderwerte sehr stark.
- Die Dichtstege im anliegenden Dichtlippenbereich beeinflussen die Öl- und Luftförderwerte.
- Die mit dieser Methode gemessenen Ölförderwerte sind ein Maß für die maximale Förderwirkung der Dichtsysteme. Sie dienen dem Vergleich der Dichtringarten und sind nicht mit Messmethoden anderer Arbeiten vergleichbar.
- Die Messung der Luftförderwerte ist konstruktionsbedingt nur untemperiert möglich.
- Die vorgestellte Methode zur Messung des Luftförderwertes durch Verdrängung von Öl in einem flach liegenden Schlauch hat sich als geeignet herausgestellt.

# 6.5 Dauerlaufuntersuchungen

In den Dauerlaufuntersuchungen wurden die Dichtheit, der Wellenverschleiß, der Dichtringverschleiß und die Ölkohlebildung in den Spiralrillen der Dichtringe untersucht.

# 6.5.1 Dichtheit

Alle untersuchten Dichtringe waren in den 500 Stunden Dauerläufen bei 120 °C mit Laufgeschwindigkeiten bis zu 16,7 m/s bei teilüberfluteter Welle dicht. Auch Dichtringe, in deren Gewindegängen sich Ölkohle gebildet hat, waren dicht.

#### Erkenntnis

Handelsübliche Dichtringe sind hinsichtlich ihrer dynamischen Funktion zuverlässig.

## 6.5.2 Wellenverschleiß

Die Wellen zeigen im Vergleich zu früheren Untersuchungen (zum Beispiel von Jenisch [11]) kaum Verschleiß. Im Folgenden wird zu den Dichtringarten jeweils die Welle mit dem stärksten Verschleiß als Rauheitsschrieb und als Aufnahme dargestellt. Zusätzlich werden die Mittelwerte der Radialkräfte angegeben, welche zusammen mit dem Compound und der Geometrie den Wellenverschleiß beeinflussen.



Bild 6.30: Beispielhafter Messschrieb und Laufspur der Dichtringart PRA

Tabelle 6.5: Durchschnittliche Radialkräfte PRA





49,4 N

Bild 6.31: Beispielhafter Messschrieb und Laufspur der Dichtringart PLE

Tabelle 6.6: Durchschnittliche Radialkräfte PLE



Bild 6.32: Beispielhafter Messschrieb und Laufspur der Dichtringart PLF

Tabelle 6.7: Durchschnittliche Radialkräfte PLF

Nach Lagerung auf Welle: 92,5 N Nach Dauerlauf: 46,4 N

#### Erkenntnisse

Alle Wellen sind gering und unauffällig stark verschlissen. PLF zeigt tendenziell stärkeren Verschleiß der Welle, der auch durch die hohe Radialkraft bedingt ist. Der Verschleiß durch herkömmliche Elastomer-Radialwellendichtringe ist meist stärker.

## 6.5.3 Dichtringverschleiß und Ölkohlebildung

Der **Dichtringverschleiß** ist im Vergleich zu früheren Untersuchungen ([11], [24]) sehr gering. Die geplante Vorgehensweise, den Verschleiß der Dichtlippen mit Hilfe von Eingüssen zu vermessen kann daher nicht angewendet werden. Stattdessen wird der Verschleiß visuell analysiert und qualitativ bewertet.

Ein Ziel der Dauerlaufversuche war es **Ölkohlebildung** durch scharfe Betriebsbedingungen (wenig Öl, hohe Temperaturen) zu provozieren und die Veränderung der Funktionsweise dadurch zu analysieren.

Die Untersuchungsprogramme unterschieden sich durch eine vierstündige Pause mit Stillstand der Welle und Abkühlung des Öls. Ziel war es, den Einfluss der Pause auf die Ölkohlebildung zu untersuchen.

• Eine vierstündige Pause im 24-Stunden-Zyklus zeigt keinen ersichtlichen Einfluss auf die Ölkohlebildung.

#### Ergebnisse

Bei den weißen, glasfasergefüllten Dichtringen der Art **PRA** tritt kaum Verschleiß auf. Die Differenz der durch den Verschleiß veränderten Berührbreite ist so klein, dass sie nicht vermessen werden kann. An einigen Stellen ist der Damm etwas breiter als im Neuzustand. In den Gewindegängen können nach den Dauerläufen kleinste und freischwebende Ölkohlepartikel im Öl erkannt werden. Meist zeigen sich die Gewindegänge jedoch wie in Bild 6.33 dargestellt völlig frei.



Bild 6.33: Dichtringart PRA nach Dauerlauf

Bei der Dichtringart **PLE** kann der Verschleiß am besten erkannt werden. Die Oberflächen sind durch das Anätzen des weißen, glasfasergefüllten PTFE's braun gefärbt. Wird diese Oberfläche minimal verschlissen, kann dies durch die Farbänderung erkannt werden. An den Dämmen sind bei nahezu allen Dichtringen weiße Oberflächen erkennbar. Einen Anhaltspunkt über den durchschnittlichen Verschleiß gibt Bild 6.34.



Bild 6.34: Durchschnittlicher Verschleiß an mehreren Dämmen der Dichtringart PLE

Bild 6.35 und Bild 6.36 zeigen einen anderen Dichtring an zwei verschiedenen Positionen. Deutlich kann die unterschiedliche Abnützung auf dem ersten und dem dritten Damm erkannt werden. Dies ist auf die unterschiedliche Anlage und Pressungsverteilung durch den exzentrischen Einbau der Lippen zurückzuführen (siehe Kap. 6.1).





Bild 6.36: Verschleiß des ersten Dammes

Lediglich ein Dichtring dieser Art zeigte in den Versuchen Ölkohlebildung. Der Grund hierfür konnte nicht gefunden werden. Bild 6.37 zeigt, wie ein Gewindegang beim Dichtsteg vollständig mit Ölkohle gefüllt ist. Dadurch ist die Funktion der gesamten Spiralrille deutlich beeinflusst. In Kap. 6.7.3 wird die Funktionsweise nach Verschleiß und mit Ölkohle vorgestellt.



Bild 6.37: Ölkohleverklumpung beim Dichtsteg

Bei der Dichtringart **PLF** kann der Verschleiß durch leichte Farbänderungen erkannt werden. Durch die gute Öl-Schmierung im vorderen Bereich (Ölseite) der Dichtlippe (siehe Kap. 6.3.2 und 6.7.2) ist der Verschleiß relativ gering. Im hinteren, luftseitigen

Bereich kann teilweise geringer Verschleiß erkannt werden. Die vorderen Gewindegänge 1-4 auf der Ölseite sind teilweise mit Ölkohleverklumpungen gefüllt. Die hinteren Gewindegänge (5-7) auf der Luftseite sind meist komplett mit Ölkohle gefüllt (Bild 6.38).



Bild 6.38: Ölkohle in mehreren Gewindegängen eines Dichtrings der Art PLF

#### Erkenntnisse

Der Verschleiß der Dichtringe ist so gering, dass er quantitativ nicht vermessen werden kann. Es gilt für alle Dichtringarten, dass im untersuchten Zeitraum die Funktion der Spiralrille als Rückförderelement durch Verschleiß nicht beeinträchtigt wird.

Die glasfasergefüllten Dichtringe PRA und PLE zeigen bei einem einzigen Dichtring Ölkohlebildung. Alle anderen sind vollkommen ölkohlefrei.

Alle untersuchten Dichtringe der Art PLF zeigen sehr starke Ölkohlebildung bis hin zur völligen Füllung einzelner Bereiche oder mehrerer Gewindegänge.

Bei den Untersuchungen anderer Dichtringarten [35] hat sich gezeigt, dass auch bei Dichtringarten mit größeren Gewindegängen und niedrigeren mittleren Pressungen die Dichtringe mit Füllstoffen aus Kohlenstoff (z. B. in Form von Kohlenstofffasern, Kohlepulver, Grafit, Ruß,...) anfällig für Ölkohlebildung waren. Die Dichtringarten, welche lediglich mit Glasfasern gefüllt waren, zeigten keine Ölkohlebildung:

• Das Compound hat einen größeren Einfluss auf Ölkohlebildung, als die Feingeometrie der Spiralrille und die Radialkraft/ die Pressungsverteilung.

Diese Erkenntnis deckt sich mit Jenisch [11].

## 6.5.4 Zusammenfassende Erkenntnisse

- Handelsübliche Dichtringe sind bei dynamischen Untersuchungen dicht.
- Die Wellen und die Dichtringe zeigen kaum Verschleiß. Die Grundgeometrien und Compounds sind gut aufeinander abgestimmt. Der geringe Verschleiß verändert in einigen Fällen die Auflagefläche der einzelnen Dämme, beeinflusst aber nicht erkennbar Funktion und Lebensdauer der Spiralrille.
- Compounds mit Kohlenstoff (z. B. in Form von Kohlenstofffasern, Kohlepulver, Grafit, Ruß,...) scheinen, die sich im Entstehen befindenden Ölkohlepartikel besser haften und "wachsen" zu lassen. Dies kann zur vollständigen Füllung der Spiralrille führen.
- Dichtringe, welche nur mit Glasfasern gefüllt sind, zeigen nur in einem Fall Ölkohlebildung.
- Ölkohle sammelt sich am Dichtsteg und beginnt dort zu "wachsen".
- Kleinere Rillenquerschnitte setzen sich schneller mit Ölkohle zu als Größere.
- Eine Pause im 24-Stunden-Zyklus hat keinen Einfluss auf die Ölkohlebildung.

# 6.6 Statische Dichtheit

Die statische Dichtheit wurde mit den in Kap. 4.6 beschriebenen statischen Ölkammern untersucht und gemäß der in Kap. 5.6 beschriebenen P-Bewertung dokumentiert. Für das statische Verhalten interessieren dabei hauptsächlich drei Kriterien: Wann ist auf der Luftseite das erste Öl erkennbar (Zustand P7: leichter Ölring am Übergangsbereich), ab wann gilt das Abdichtverhalten als ungenügend (P3) und wann tritt der Zustand P1 in Form von abfließendem Öl auf?

Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass bis zur Leckage längere Zeiträume vergehen. Die Ölkammern konnten nicht kontinuierlich, sondern vorzugsweise tagsüber beobachtet und dokumentiert werden. Dadurch können die Messungen unter den einzelnen Dichtringen nicht stundengenau verglichen werden.

# 6.6.1 Ergebnisse

In Bild 6.39 ist der Leckageverlauf zweier geschnittener Dichtringe der Art **PRA** dargestellt. Bei beiden Dichtringen bei beiden Ölfüllständen zeigt sich der erste Ölfilm (P7) bereits nach wenigen Stunden. Ist die Kammer komplett geflutet, fließt bereits im Zeitraum bis 24 Stunden bzw. kurz danach Öl über das Dichtring-Gehäuse ab. Ist die Kammer bis Wellenmitte gefüllt, dauert es bis zum Abfließen 144 Stunden (6 Tage).



Bild 6.39: Statische Dichtheit PRA

Ein ähnlicher Verlauf ergibt sich für den geprägten Dichtring **PLF** (Bild 6.40). Die Dichtringe sind immer so eingebaut, dass sich ein Dichtsteg oben und einer unten befindet. Bereits nach kurzer Zeit dringt Öl durch den Dichtring und sammelt sich am Übergangsbereich. Ist die Kammer komplett geflutet, fließt bereits im Zeitraum bis 24 Stunden bzw. kurz danach (im Schaubild am nächsten Tag beobachtet) Leckage ab. Ist die Kammer bis Wellenmitte gefüllt, dauert es bis zum Abfließen 50 bzw. 65 Stunden.



Bild 6.40: Statische Dichtheit PLF

Die geprägten Dichtringe der Art **PLE** haben einen Dichtsteg. Neben dem Ölfüllstand wurde auch der Einfluss der Position des Dichtstegs (oben/ unten) untersucht. Bei allen Kombinationen tritt der erste Ölfilm sehr schnell aus. Bei Überflutung der Kammer tritt der Zustand P3 und letztendlich P1 wesentlich schneller ein, als bei Füllstand Wellenmitte. Bei beiden Ölfüllständen ist des Weiteren feststellbar, dass die Position des Dichtstegs einen erheblichen Einfluss auf die Zeitdauer bis zum Durchdringen hat. Bei Überflutung tritt der Zustand P1 bei unten liegendem Stopper doppelt so schnell ein als bei oben liegendem Stopper. Bei Ölfüllstand Wellenmitte kann das gleiche Verhalten erkannt werden. Bild 6.42 zeigt zur Verdeutlichung den Zustand P2 (Öl kurz vor dem Abfließen auf das Prüfkammergehäuse) beispielhaft für einen Dichtring PLE.



Bild 6.41: Statische Dichtheit PLE



Bild 6.42: Leckage bei einem Dirchtring der Art PLE (Zustand P2)

Um den Einfluss des Dichtstegs auf die Kapillarkräfte und die Zeit bis zur statischen Leckage untersuchen zu können, wurde der Dichtsteg in [45] bei einigen Dichtringen der Dichtringart PLE entfernt. Eine Dichtlippe mit entferntem Dichtsteg ist in Bild 6.43 dargestellt.



Bild 6.43: PLE nach Entfernung des Dichtstegs

Mit dem Strömungsprüfstand wurde das Durchdringen der Dichtlippe bei stillstehender Welle bei Vollüberflutung beobachtet. In Bild 6.44 ist das Fortschreiten des Öls bei einem Dichtring mit und einem Dichtring ohne Dichtsteg im Vergleich dargestellt. Die Zeitdauer bis zum Erreichen der Position des Dichtsteges ist nahezu identisch.

Beim Dichtring mit Dichtsteg fließt das Öl über den Dichtsteg auf den vierten Damm. Beim Dichtring ohne Dichtsteg fließt das Öl auf dem Damm und im Gewindegang um die Welle auf den vierten Damm. Bis das Öl gleich weit vorgedrungen ist, vergehen weitere 2,5 Minuten. Durch die Entfernung des Dichtsteges konnte die Zeit bis zur statischen Leckage nachweislich verlängert werden.



Bild 6.44: PLE: Statische Dichtheit bei entferntem Dichtsteg

# 6.6.2 Zusammenfassende Erkenntnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse gut reproduzierbar sind:

- Alle Dichtringe sind schon bei Teilüberflutung statisch undicht.
- Je höher der Ölstand, desto schneller tritt Leckage aus.
- Ist der Dichtsteg unten, tritt die Leckage schneller aus, als wenn er oben ist.
- Der Dichtsteg beeinflusst das statische Dichtverhalten negativ.
- Der Einfluss des Ölstands ist größer als der Einfluss der Dichtstegposition.

#### Bemerkung

Schmidt [10] stellte einen Nachteil der Spiralrille vor, indem er bemerkte, dass Flüssigkeiten durch die Spiralrille fließen könnten und dies zu statischer Leckage führen könnte. Er schrieb weiter, dass dies nur für den Fall der Komplettüberflutung gilt. Ist der Ölspiegel unter der obersten Wellenkante, existiert das Problem nicht mehr.

Diese Einschränkung wurde in den Untersuchungen widerlegt. Sogar wenn der Ölspiegel nur knapp über der untersten Wellenkante liegt, sind die Dichtringe statisch undicht. Lediglich die Zeit bis zum vollständigen Durchdringen verlängert sich.

# 6.7 Visuelle Analyse der Strömung

Die visuelle Analyse der Strömung in der Spiralrille ist der wichtigste Bestandteil zum Verstehen der Funktionsweise der Dichtung. Für die nachfolgenden Untersuchungen sind in Tabelle 6.8 die wichtigsten Geometrieparameter nochmals dargestellt.

Tabelle 6.8: Hauptunterscheidungskriteren der Dichtringarten

PRA	Durchgängig geschnittene Spiralrille ohne Dichtsteg
PLE	Groß geprägte Spiralrille mit einem Dichtsteg im Übergangsbereich
PLF	Klein geprägte Spiralrille mit zwei Dichtstegen im anliegenden Berührbereich

# 6.7.1 Beobachtungen bei stillstehender Welle

Bei den Untersuchungen wird das Verhalten des Öls mit Partikeln bei stillstehender Welle beobachtet. Zu Beginn aller Versuche wird Öl in die Kammer A (Ölseite) eingefüllt. Dies zeigt das Verhalten des Systems in den statischen Prüfkammern, während der vierstündigen Pause im Dauerlaufversuch und letztendlich in Verbrennungsmotoren und Maschinen. Kurbelwellen in Verbrennungsmotoren werden im Betrieb zwar meist nur angespitzt, können aber beim Parken in Steillage oder beim Autotransport auch (teil-) überflutet sein. In Kap. 5.7.1 wurden die hierzu verwendeten Vorgehensweisen beschrieben. Im Wesentlichen sind folgende Fragestellungen interessant:

- Wie verhält sich Öl das ölseitig an der Dichtlippe anliegt?
- Wie verhält sich das Öl an den Berührflächen (Dämmen)?
- Werden die Gewindegänge komplett mit Öl gefüllt?
- Dringt Öl axial, also über die Dämme hinweg in die Dichtlippe vor?
- Dringt Öl in den Gewindegängen über den Ölspiegel vor?
- Wie verhält sich Öl am Dichtsteg?
- Wie und wo läuft Öl aus?

## Ergebnisse

Bild 6.45 zeigt die Ölseite eines Dichtrings der Art **PRA** mit anliegendem Öl und Partikeln. In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass es bei geschnittenen Dichtringen keinen definierten "Eingang" in die Spiralrille gibt, sondern vielmehr der gesamte erste Gewindegang wie eine Art Trichter wirkt. Dieser Effekt ist in der Literatur als Glockenmäulcheneffekt beschrieben. Dies ist auf dem Bild andeutungsweise durch den Ölmeniskus des eingedrungenen Öles im ersten Gewindegang sichtbar. Dabei hebt die Dichtlippe allerdings nicht komplett ab, sondern die Anpressung ist zu schwach, um das Öl am Eindringen zu hindern. Das Öl wird jedoch am direkten Einfließen in den ersten Gewindegang gehindert. Durch die Schnitte ist der freie Rillenquerschnitt im vorderen Berührbereich sehr klein. Nach der Benetzung des ersten Dammes folgen die Partikel mit dem nachfließenden Öl. Es bildet sich eine Strömung aus.



Bild 6.45: Ölseite mit Partikel im Ölsumpf

In Bild 6.46 ist der erste Gewindegang bereits komplett überspült. Die Partikel sind in den zweiten Gewindegang eingespült. Das Bild zeigt einen Ausschnitt der Dichtlippe über dem Ölstand Wellenmitte. Dazu ist das Prisma und dadurch das Bild verdreht. Das Öl ist bereits bis zum vierten Gewindegang vorgedrungen und hat die Dämme benetzt. Die Tiefen der Gewindegänge dazwischen sind noch ölfrei. Werden die Abstände vom Meniskus auf dem flach ansteigenden vorderen Damm zum Meniskus auf dem nächsten Damm zu klein, "springt" das Öl über. Somit findet axiale Strömung statt und die Zeit bis zum Durchdringen wird verkürzt.

Auf den tieferen hinteren Dämmen kann dieser Vorgang nicht beobachtet werden. Zur Luftseite werden die Querschnitte größer. Es dauert länger, bis diese gefüllt sind. Dadurch wird die Zeit bis zum Zustand P7 und P6 deutlich verlängert.





Bild 6.47 zeigt die Dichtlippe mit eingedrungenem Öl in der Übersicht. Das Öl mit den Partikeln ist hier schon auf die Luftseite vorgedrungen. Die Zeitdauer bis zu diesem Zustand ist gleich mit denen der Versuche mit den statischen Prüfkammern (Stahlwellen) und ist auch hier abhängig vom Ölstand.



Bild 6.47: Überfluteter Kontaktbereich eines Dichtrings der Art PRA

Bei **PLE** und PLF ist ein Teil des ersten Gewindeganges herstellungsbedingt stets geöffnet, da hier die Spirale über den Innendurchmesser der Dichtlippe weitergeführt wird, und so die Spiralrille in den Ölraum geöffnet ist. Diese Bereiche des ersten Gewindeganges dienen als "Saugtrichter". Das Öl kann direkt in den ersten (PLE) bzw. fast schon in den zweiten (PLF) Gewindegang eindringen.

In den folgenden Bildern wird der Eindringvorgang veranschaulicht. In Bild 6.48 sind die ersten drei Gewindegänge eines Dichtrings der Art PLE zum Zeitpunkt "Sechs Sekunden" nach dem Öleinfüllen dargestellt. Die Beobachtungsposition ist dabei unten im Ölsumpf. In Bild 6.49 1-6 ist der markierte Bildausschnitt mit jeweils sechs Sekunden Zeitunterschied dargestellt. Das fortschreitende Eindringen des Öles ist in den Bildern 1-4 dargestellt. Danach wird die Luftblase vom eindringenden Öl (von links) verdrängt. In Bild 6 (t = 36 s) wird der Gewindegang vom Öl von links weiter geflutet. Nach ca. 40 Sekunden ist der erste Gewindegang bereits komplett gefüllt.



Bild 6.48: Drei Gewindegänge mit anstehendem Öl



Bild 6.49: Eindringverhalten nach verschiedenen Zeiten in PLE

Die Benetzung und die Strömung in den Gewindegängen findet jedoch nicht nur im Bereich unter dem Ölspiegel statt. Bei Dichtringart PLE tritt diese Beobachtung am deutlichsten auf, da hier die Gewindegänge und die Dämme gut voneinander getrennt sind. Deutlich kann das Fortschreiten der Dammbenetzung durch das Öl mit Partikeln nach oben verfolgt werden. Dabei fließt es auf dem Damm um die Welle herum in den nächsten Gewindegang. Es tritt keine axiale Strömung auf. Der Gewindegang, der die zwei Dämme voneinander trennt, bleibt ölfrei. Nach dem fortschreitenden radialen Benetzen des Dammes kann eine Strömung auf dem Damm beobachtet werden. Der benetzte Bereich dehnt sich wie in Bild 6.49 gezeigt weiter aus. Letztendlich folgt das Öl im Gewindegang, auch über den Ölspiegel hinweg, und fließt um die Welle herum in den nächsten Gewindegang.

Diese Vorgänge werden mit Bild 6.50 veranschaulicht. Die Beobachtungsposition ist auf Höhe Wellenmitte. Der Ölstand ist auch Wellenmitte. Zur besseren Visualisierung sind die benetzten Bereiche markiert. Im linken Bild ist der erste Damm an der Ölseite bereits komplett benetzt. Schon 66 s nach Einfüllen des Öls ist der zweite Damm auf Höhe des Ölstandes benetzt.

Der Gewindegang dazwischen ist ölfrei. Nach 282 s ist der Damm und zusätzlich der Flache Bereich des Gewindeganges benetzt. Das Öl folgt im zweiten Gewindegang nach oben. Dabei fließt das Öl in den bereits benetzten Bereichen kontinuierlich weiter. Im rechten Bild ist der dritte Damm benetzt und das Öl folgt bereits im zweiten Gewindegang. Das Öl fließt direkt über den Dichtsteg zum Damm des vierten Gewindeganges. Der Dichtsteg dichtet also nicht statisch ab, sondern wirkt als Brücke. Er beschleunigt das Durch- und Austreten von Öl bei stillstehender Welle. Diese Beobachtungen decken sich mit den Erkenntnissen der statischen Leckage aus Kap. 6.6.



Bild 6.50: Benetzungs- und Strömungsverhältnisse PLE

In Bild 6.51 ist das überschreiten des Gewindeganges in axialer Richtung über den als Brücke fungierenden Dichtsteg in der Beobachtungsposition unten dargestellt. Der vierte Gewindegang nach dem Dichtsteg befindet sich im Übergangsbereich der Dichtlippe von der Welle. Das Öl fließt durch die Gewindegänge radial um die Welle herum auf die Luftseite. Das Öl fließt aus der Dichtung aus. Die kontinuierliche Strömung ist auch durch die relativ große, bereits ausgetretene Ölmenge in Bild 6.42 ersichtlich.

#### 74 Untersuchungsergebnisse



Bild 6.51: Statischer Dichtsteg PLE als Brücke

Beim Dichtring **PLF** tritt das Öl wesentlich schneller in die Dichtlippe ein. In den ersten Gewindegängen werden die Dämme axial unterströmt. Die Dämme werden nicht ausreichend angepresst. Diese Beobachtungen decken sich mit den Erkenntnissen aus Kap. 6.7.2. Da der Dichtring zwei gegenüberliegende Dichtstege hat, wird einer sehr schnell erreicht, und der Transport findet über diesen statt. Bild 6.52 zeigt einen geschlossenen benetzten Bereich, welcher nicht durch die Dämme getrennt ist. Das Öl erreicht den Dichtsteg axial nach 96 Sekunden.

Auch bei PLF fließt das Öl in den Gewindegängen nach oben. Da bereits ein Bereich mehrerer Gewindegänge axial überflutet ist, fließt das Öl von beiden Seiten in mehreren Gewindegängen nach oben, bis es sich in der Mitte trifft. Im Gegensatz zu PLE folgt die Strömung in den Gewindegängen der Benetzungsströmung auf den Dämmen ohne erkennbaren Abstand, also gleichzeitig.

Ab dem sechsten Gewindegang sind die Querschnitte deutlich größer und tiefer ausgeprägt. Hier verhält sich das Öl wie bei Dichtringart PLE. Das Öl strömt radial in den Gewindegängen um die Welle herum. Es tritt hier keine axiale Strömung auf.



Bild 6.52: Statischer Dichtsteg PLF als Brücke

#### Erkenntnisse

 Die Beobachtungen und Zeitabstände bis zur Leckage bei stillstehender Glaswelle stimmen mit denen des statischen Dichtheitsversuchs mit Stahlwelle überein. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Oberfläche der Glaswelle die statische Strömung wie sie in der Realität herrscht, nicht verfälscht.

- Das Öl fließt bei den geprägten Dichtringen direkt in den ersten offenen Gewindegang.
- Die Dämme werden zuerst benetzt.
- Das Öl fließt danach auf den Dämmen radial um die Welle herum.
- Das Öl folgt in den Gewindegängen und fließt in diesen um die Welle herum.
- Alle Dichtringe sind bei anliegendem Öl statisch undicht.
- Bei Dichtringart PLF tritt aufgrund der geringen ölseitigen Pressung der Dämme axialer Fluidtransport über mehrere Gänge auf.
- Der Dichtsteg verhindert nicht das Durchtreten des Öls, vielmehr dient er als Brücke über den Gewindegang und beschleunigt das axiale Durchtreten von Öl.

# 6.7.2 Beobachtungen bei drehender Welle

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Untersuchungen wird hier die Strömung bei sich drehender Welle beobachtet. Im Wesentlichen sind folgende Fragestellungen interessant:

- Dringt Öl in die Dichtlippe ein?
- Wird eingedrungenes Öl zurückgefördert, und wen ja wie?
- Wie sieht die Strömung in den Rillen aus (Strömungsprofile) ?
- Wird bereits durchgedrungenes Öl in den Ölraum zurück gefördert?
- Wie verhält sich das an der Oberfläche der Wände haftende Öl, welches nicht in Kontakt mit der Glashohlwelle steht?
- Wie verhält sich bereits ausgetretenes Öl?

### Ergebnisse

Zu Beginn der Versuche wird Öl in die Kammer eingefüllt. Gleichzeitig wird die Welle in Rückförderrichtung gedreht.

**PRA** lässt im Abdichtbetrieb kein Öl durchdringen, ist also dynamisch dicht. Bild 6.53 zeigt Öl, welches durch die statischen Versuche oder absichtlich durch Förderung auf die Luftseite vorgedrungen ist. Das Öl mit Partikeln ist bis zum vierten Gewindegang vorgedrungen.



Bild 6.53: Rückförderung PRA I

Wird nun die Welle gedreht, wird das Öl sehr schnell und gründlich zurückgefördert. Bild 6.54 zeigt eine Vergrößerung der gefüllten Rillen bei sich drehender Glashohlwelle. Im zweiten und dritten Gewindegang sind Luftblasen zu erkennen. Nach wenigen weiteren Umdrehungen ist das Öl mit den Partikeln komplett zurückgefördert. Eine axiale Fluidströmung über die Dämme hinweg ist bei drehender Welle nicht erkennbar.



Bild 6.54: Vergrößerung dreier eingeschnittenen Rillen PRA

Bild 6.55 zeigt das Rückfördervermögen. Die hinteren Gewindegänge sind ölfrei und fördern Luft. Die Dämme bleiben benetzt. Dies beeinflusst den Verschleiß positiv und das Reibmoment sinkt im Gegensatz zu gefüllten Gewindegängen (Förderbetrieb) ab. Auf den vorderen beiden Dämmen wird das Öl in Richtung Ölseite gefördert. Da zwischen dem ersten und zweiten Damm kein tiefer und breiter Gewindegang ist, tritt Öl auch immer axial auf den zweiten Damm über.

Bei PRA zeigen sich bei Drehzahlen langsamer als 1 1/min Rückströmungen in den tieferen Gewindegängen. Bei höheren Drehzahlen zeigt sich eine turbulente Strömung, deren Hauptrichtung in den Ölraum zurückfördert.



Bild 6.55: Rückförderung PRA II

PLE fördert ein-/ durchgedrungenes Öl ebenfalls sehr gut und zuverlässig zurück.

Nach wenigen Umdrehungen sind die Gewindegänge leer gepumpt. Die Blickrichtung in Bild 6.56 und Bild 6.57 ist seitlich in Höhe des Ölstand Wellenmitte. Im Bildmittelpunkt ist im dritten Gewindegang der Dichtsteg erkennbar, danach beginnt die Dichtlippe abzuheben. Vor dem Versuch wurde die Welle entgegen der eigentlichen Drehrichtung gedreht, um Öl durch die Dichtung zu fördern. In Bild 6.56 ist Öl bis zum sechsten Gewindegang ausgetreten. Es hat sich auf der Luftseite zwischen der Welle und der Dichtlippe ein Ölmeniskus gebildet.

Wird die Welle nun gedreht wird das Öl, welches sich in den Gewindegängen befindet zurück in den Ölraum gepumpt. Das bereits ausgetretene Öl wird in die Spiralrille "gesaugt" und wird ebenfalls zurückgepumpt. Über den Dichtsteg wird Öl axial vom vierten auf den dritten Gewindegang gefördert. Nach kurzer Zeit sind die Gewindegänge leergepumpt.

Bei Drehzahlen kleiner als 1 1/min zeigen sich Rückströmungen in den tieferen Gewindegängen. Bei höheren Drehzahlen zeigt sich eine turbulente Strömung, deren Hauptrichtung in den Ölraum zurückfördert. Für den Abdichtbetrieb ist dies jedoch nicht entscheidend, da die Gewindegänge ölfrei sind.

Das Öl im flacheren Bereich der Gänge wird weiter in Richtung Ölraum transportiert. Auf den Dämmen tritt eine Mikroströmung auf. Das verbliebene Öl wird weiterhin in Richtung Ölraum gefördert.

Das Öl, welches nicht die Welle berührt, also zum Beispiel an den Wänden der Gewindegänge haftet, läuft in den Gewindegängen nach unten und sammelt sich. Sind die Volumina groß genug einen Teil des jeweiligen Gewindeganges zu füllen, kommt das Öl wieder in Kontakt mit der Welle und wird auch zurückgepumpt. Bild 6.57 zeigt die luftgefüllte Spiralrille. Das komplette Öl ist bis zum ersten Damm zurückgefördert.



**PLF** zeigt im dynamischen Zustand ein ähnliches Verhalten wie im statischen Zustand. Bild 6.58 zeigt das weitere Vordringen im statischen Zustand als Fortsetzung zu Bild 6.52. Deutlich ist der breite benetzte Bereich bis zum Meniskus unter der Dichtlippe erkennbar.

Wird nun die Welle gedreht, bleibt im vorderen Bereich der Dichtlippe ein Ölfilm ständig erhalten. Das Öl wird in diesem Bereich nicht in den Ölraum zurückgefördert. Bild 6.59 zeigt diesen Bereich bei drehender Welle. Dringt Öl bis in den gut ausgebildeten luftseitigen sechsten und siebten Gewindegang vor, wird es von dort in den vorderen Bereich zurückgefördert. Der benetzte Bereich bis zum vierten Gewindegang bleibt ständig erhalten. Die Dichtlippe schwimmt auf dem Ölfilm auf. Die Dämme berühren nicht mehr die Welle. Dadurch reduziert sich die Reibung (→vergleiche Kap. 6.3). Das Reibmoment ist im Abdichtbetrieb kleiner als bei Benetzung, bei Trockenlauf und bei Ölförderung. Weiterhin können mit diesen Beobachtungen die geringen Öl- und Luftförderwerte erklärt werden. Das Öl wird im Bereich bis zum fünften Gewindegang nicht zurückgefördert. Lediglich die Gewindegänge im Übergangsbereich erzeugen eine Förderwirkung. Der benetzte Bereich bildet weiterhin einen Widerstand für das eindringende Fluid Luft. Dadurch wird weniger Luft gefördert. In den Untersuchungen waren nur einzelne Luftblasen erkennbar, wohingegen bei der Dichtringart PLE und PRA weite Teile der Spiralrille ölfrei, also luftgefüllt waren.



#### Erkenntnisse

- In Dichtringart PRA und PLE wird das Öl am Umfang entlang in den Rillen vollständig in den Ölraum zurückgepumpt. Es tritt keine axiale Strömung auf.
- In Dichtringart PLF wird das Öl nur in den tieferen Gewindegängen um die Welle gefördert. In den flachen Gewindegängen (Ölseite der Dichtlippe) findet auch axialer Fluss statt. Es bleibt ein geschlossener Ölfilm bestehen.
- Wenn die Welle rotiert, wird das bereits ausgeströmte (noch anhaftende) Öl in die Dichtlippe gesaugt und zurückgepumpt.
- Die Dämme bleiben stets benetzt.

# 6.7.3 Funktion nach Dichtringverschleiß, Ölkohlebildung und Verschmutzung

Der **Dichtringverschleiß** durch die Dauerlaufversuche ist so gering, dass er innerhalb der Herstell- bzw. Messtoleranz liegt. Qualitativ kann der Verschleiß bei der Dichtringart PLE aufgrund der anderen Oberflächenfarbe sehr gut bestimmt werden. In Bild 6.60 sind die verschlissenen Dämme (weiß) sichtbar. Es gilt für alle Dichtringarten, dass im untersuchten Zeitraum die Funktion der Spiralrille als Rückförderelement durch Verschleiß nicht beeinträchtigt wird. Lediglich die Berührflächen der Dämme werden bei einigen Dichtringen breiter. Dadurch wird die Funktionsweise nicht beeinträchtigt.



Bild 6.60: Verschleiß der Dichtringart PLE

Ölkohlebildung und Verschmutzung stellt ein wesentlich größeres Problem dar. Nach den Dauerläufen sind die Rillen einiger Dichtringarten sehr stark mit Ölkohle zugesetzt. Je größer hierbei der Rillenquerschnitt ist, desto länger bleiben die Dichtringe funktionssicher.

Bild 6.61 zeigt den gereinigten Dichtring aus Bild 6.60. Im Bildausschnitt ist in der Mitte der Dichtsteg zu erkennen. An ihm hat sich Ölkohle angelagert. Der Gewindegang ist vor und nach dem Dichtsteg komplett mit Ölkohle aufgefüllt. Am Übergang zum vierten Gewindegang (rechts) ist der Dichtsteg mit einer Schicht Ölkohle überzogen. Die Ölkohle hebt die Dichtlippe über die Welle an und ermöglicht axialen Fluidaustausch im statischen und dynamischen Zustand.



Bild 6.61: Ölkohlebildung an einem Dichtsteg der Dichtringart PLE

Auf Bild 6.62 ist eine festgesetzte Ölkohleverklumpung im ersten Gewindegang zu erkennen. Hier haben sich während der Strömungsbeobachtung sehr schnell dem Öl zugesetzte Kupferpartikel angelagert. Im Einsatzfall hätten sich hier Schmutzpartikel ansammeln können. Da die Bereiche vor und nach der Störstelle nicht verschmutzt sind, ist davon auszugehen, dass diese Verklumpung am Dichtsteg entstanden ist, sich gelöst und hier verklemmt hat. Im statischen und dynamischen Zustand wirkt die Stelle wie der Dichtsteg; Öl kann direkt axial übertreten.



Bild 6.62: Verklumpung mit Partikeln in PLE

Die Gewindegänge der Art PLF (Bild 6.63) sind alle stark mit Ölkohle zugesetzt. Trotzdem waren alle Dichtringe in den Dauerlaufversuchen dicht.

Der erste Gewindegang an der Ölseite ist frei. Dieser Bereich hat keinen Kontakt zur Welle. Es findet ein ständiger Ölaustausch statt. Im zweiten Gewindegang vor dem Dichtsteg sammelt sich die gebildete Ölkohle und verstopft diesen. Die zwei Nächsten sind frei, wobei die Gewindegänge 5 und 6 komplett mit fester, anhaftender Ölkohle zugesetzt sind. Über diesen Bereich bildet sich im dynamischen Zustand ein komplett geschlossener benetzter Bereich, der das Öl nicht mehr gerichtet fördert. Der gesamte vordere Berührbereich der Dichtlippe wird angehoben, die Spiralrille erfüllt nicht ihre Funktion als Förderstruktur. Im siebten, deutlich ausgebildeten Gewindegang wird das Öl optimal zurückgefördert. Es tritt somit keine Leckage aus.



Bild 6.63: Mehrere ölkohleverstopfte Gewindegänge der Dichtringart PLF

#### Erkenntnisse

- Ölkohleverklumpungen wirken im statischen Zustand als Störstelle (ähnlich dem Dichtsteg) und verkürzen die Zeit bis zum Austreten von Öl.
- Am Dichtsteg sammelt sich die Ölkohle und "wächst" dort an.
- Ölkohleverklumpungen stören die Rückförderung im dynamischen Zustand, da die Spiralrille teilweise oder vollständig verstopft ist.
- Bei starker Ölkohlebildung kann die Dichtlippe angehoben und somit die Funktion stark gestört werden.

# 6.7.4 Zusammenfassende Erkenntnisse

- Die Beobachtungen und Zeitabstände bis zur Leckage bei stillstehender Glaswelle stimmen mit denen des statischen Dichtheitsversuchs mit Stahlwelle überein.
- Das Öl fließt bei geprägten Dichtringen direkt in den ersten offenen Gewindegang.
- Die Dämme werden zuerst benetzt.
- Das Öl fließt danach auf den Dämmen radial um die Welle herum.
- Das Öl folgt in den Gewindegängen und fließt in diesen um die Welle herum.
- Alle Dichtringe sind bei anliegendem Öl statisch undicht.
- Der Dichtsteg verhindert nicht das Durchtreten des Öls, vielmehr dient er als Brücke über den Gewindegang und beschleunigt das axiale Durchtreten von Öl.
- In gut ausgebildeten Gewindegängen wird das Öl am Umfang entlang vollständig in den Ölraum zurückgepumpt. Es tritt keine axiale Strömung auf.
- Wenn die tiefen Bereiche der Spiralrille leer gepumpt sind, findet auf den Dämmen ein Mikrotransport des verbleibenden Öls in Richtung Ölraum statt.
- Wenn die Welle rotiert, wird das bereits ausgeströmte (noch anhaftende) Öl in die Dichtlippe gesaugt und zurückgepumpt.
- Die Dämme bleiben stets benetzt.
- Ölkohleverklumpungen wirken als Störstelle (ähnlich dem Dichtsteg).
- Am Dichtsteg sammelt sich Ölkohle und "wächst" dort an.

# 6.8 Numerische Simulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der numerischen Simulationen vorgestellt.

# 6.8.1 Finite Elemente Analyse

Die Dichtringe wurden mit den beschriebenen Vereinfachungen modelliert und simuliert. Da die Materialkennwerte der einzelnen Compounds nicht bekannt waren, wurden die Werte von Hoffmann (Tabelle 6.9) verwendet.

Dichtringart	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Streckgrenze R <sub>e</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Querkontraktionszahl µ
Alle	300	10	0,45

Tabelle 6.9: Werkstoffkennwert PTFE-Compound nach Hoffman

Die Radialkraft ist wie in früheren Untersuchungen deutlich zu groß. In Tabelle 6.10 ist die simulierte Radialkraft der Dichtringart PLE mit dem Messwert nach Lagerung und Relaxation gegenübergestellt. Der Wert stellt den Gleichgewichtszustand nach Lagerung wie in Bild 5.22 dar.

Tabelle 6.10: Vergleich der gemessenen und simulierten Radialkräfte

Dichtringart	Radialkraft Simulation [N]	Gemessene Radialkraft Lagerung [N]
PLE	159	56

Um eine bessere Angleichung der Radialkraft und somit auch der Gesamtsimulation zu erlangen, wurde der passende E-Modul empirisch ermittelt. Der Wert wurde so lange angepasst, bis die Radialkraft der Simulation mit der Radialkraft der Messung nach Lagerung gut übereinstimmte. Der E-Modul ist also ein E-Modul<sub>Gleichgewichtszustand</sub>. In Tabelle 6.11 ist der verwendete Kennwert angegeben.

#### Montage

In den vorangehenden Simulationen und in früheren Arbeiten wurde der Montageprozess immer realitätsnah durch das Verschieben der Welle realisiert. Dieses Verfahren ist notwendig, falls die Belastungen und die Verformungshistorie im Materialmodell berücksichtigt werden können und von Interesse sind. Mit dem hier verwendeten Modell wird jedoch nur der quasi Gleichgewichtszustand nach Verformung und Lagerung simuliert. Die Montagehistorie ist uninteressant.

Durch das Verschieben der Welle und die daraus folgende Verformung der Dichtlippe mit ihren Gewindegangprägungen oder –einschnitten können numerische Probleme am Übergang von Einfuhrschräge und Welle auftreten. Die Knoten der Elemente können die Kontaktanforderungen nicht mehr erfüllen und die Berechnung bricht ab.

Mit der Methode des Verschiebens konnte nur die Dichtringart PLE simuliert werden.

Um die Simulation zu vereinfachen, wurde überprüft, ob die Verformung durch eine Rotation der Welle erfolgen kann und wie sich die veränderte Montage auf Verformung, Pressungsverteilung und Radialkraft auswirkt.

In Bild 6.64 sind die Ergebnisse beider Methoden am Beispiel der Dichtringart PLE dargestellt. Die Radialkraft ist gleich und die Geometrie und die Pressungsverteilung sind nahezu identisch.



Bild 6.64: Vergleich der Geometrie und Pressungsverteilung nach Montage

#### Erkenntnis

Für ein linear elastisch - ideal plastisches Werkstoffmodell im Gleichgewichtszustand nach Lagerung kann die Welle in der Simulation ohne Genauigkeits- oder Informationsverlust gedreht werden. Dadurch können numerische Probleme verhindert werden.

Alle weiteren Untersuchungen wurden mit der Montagemethode "Drehen" durchgeführt.

Für die anderen Dichtringarten wurde ebenfalls der Werkstoffkennwert ermittelt und in Tabelle 6.11 dargestellt. Die hiermit simulierten Radialkräfte sind im Vergleich mit den gemessenen Radialkräften in Tabelle 6.12 dargestellt.

Dichtringart	E-Modul <sub>Gleichgewichtszustand</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Streckgrenze R <sub>e</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Querkontraktionszahl $\mu$
PRA	75		
PLE	50	10	0,45
PLF	55		

Tabelle 6.11: Empirisch ermittelte Werkstoffkennwerte für den Gleichgewichtszustand

Tabelle 6.12: Vergleich der gemessenen und simulierten Radialkräfte

Dichtringart	Radialkraft Simulation [N]	Gemessene Radialkraft Lagerung [N]
PRA	71	72
PLE	56	56
PLF	95	92

Die Kennwerte sind auf die Dehnung im jeweiligen Modell angepasst. Es ist also nicht zulässig stark unterschiedliche Geometrien und Verformungen zu simulieren. Da die Messwerte innerhalb einer Dichtringart um  $\pm$  10 % schwanken, können die Kennwerte für ähnliche Geometrien für vergleichende Untersuchungen verwendet werden.

#### Simulationsergebnisse

Die simulierten Verformungen nach Montage zeigen im Vergleich zu den Profilschnitten sehr gute Übereinstimmungen. In Bild 6.65 ist die Dichtringart PRA dargestellt. Die ersten drei Dämme liegen eng aneinander auf der Welle. Zwischen dem dritten und vierten Damm bildet sich der Gewindegang schmal aus und zwischen dem vierten und fünften Gang ist dieser deutlich und in sehr guter Übereinstimmung ausgebildet. Der fünfte Damm berührt nur noch sehr spitz und mit kleiner Anlagefläche die Welle.



Bild 6.65: Geometrievergleich Simulation - Profilschnitt Dichtringart PRA

In Bild 6.66 ist die Dichtringart PLE dargestellt. Die ersten drei Dämme liegen auf der Welle an. Danach beginnt der Übergangsbereich mit der abhebenden Dichtlippe. Der vierte Gang liegt wie in der Realität nicht mehr an.



Bild 6.66: Geometrievergleich Simulation - Profilschnitt Dichtringart PLE

In Bild 6.67 ist die Dichtringart PLF dargestellt. Die ersten sechs Dämme mit den klein ausgebildeten Gewindegängen liegen auf der Welle an. Danach beginnt der Übergangsbereich mit den größeren Gewindegängen und der abhebenden Dichtlippe. Der siebte Gewindegang liegt wie in der Realität nicht mehr an. Die vorderen zwei Dämme liegen in der Realität aufgrund von Verzerrungen und ungünstig geprägter Dämme nicht an. Diese Situation kann in Finite Elemente Simulationen nicht nachgebildet werden.



Bild 6.67: Geometrievergleich Simulation - Profilschnitt Dichtringart PLF

#### Erkenntnisse:

- Das linear elastisch ideal plastische Modell eignet sich für Geometrieanalysen sehr gut. Diese Erkenntnis deckt sich mit Hoffmann [24].
- Die Materialkennwerte für ähnliche Verformungszustände können mithilfe eines Vergleichs der realen Radialkräfte empirisch angepasst werden.
- Für den Montagprozess kann die Welle gedreht werden. Die Abweichung der Radialkraft ist kleiner als 1 %. Dies liegt weit unter der Abweichung der realen Radialkräfte und ist damit vernachlässigbar.

## 6.8.2 Strömungssimulation

Bei allen numerischen Simulationen hat die Genauigkeit und die Anzahl der Elemente/ Zellen einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses. Aus diesem Grund wurde anhand eines Gewindeganges der Dichtringart PLE überprüft, wie fein das Gitter gestaltet sein muss. Im 3-dimensionalen Raum besteht das Gitter aus dem 2dimensionalen Netz der Querschnittsfläche und deren Extrusion in den 3-dimensionalen Raum mit dem Gitterabstand des Volumennetzes.

In Bild 6.68 ist das verwendete Modell dargestellt. Es sind drei Windungen mit senkrechtem Ein- und Ausgangsbereich modelliert. Der Eingang befindet sich unten im Ölsumpf und es steht Öl zur Verfügung. Am Ausgang herrscht Umgebungsdruck. Ein ähnliches Modell mit einem Gewindegang hat auch Pohl [25] verwendet.



Bild 6.68: Modell mit drei Gewindegängen der Dichtringart PLE

In Bild 6.69 und in Tabelle 6.13 sind drei Gittervariationen und deren Einfluss auf die Berechnungsergebnisse dargestellt. Im Gitter 1 wurde die Querschnittsfläche mit 257 Zellen diskretisiert und mit einem Gitterabstand von 0,1 extrudiert. Im Gitter 2 wurde die Querschnittsfläche mit 159 Zellen diskretisiert und mit einem Gitterabstand von 0,2 so-wohl 0,4 im Gitter 3 extrudiert.

Der Förderstrom wird für eine Drehzahl von 3000 1/min (12,6 m/s) berechnet. Anhand der Ergebnisse des Förderstroms ist die ausreichende Genauigkeit aller drei Gitter zu erkennen. Die Rechendauer verkürzt sich aufgrund der Zellenreduzierung von Gitter 1 auf Gitter 3 erheblich.

Um für spätere Geometrieerweiterungen ein geeignetes Gitter verwenden zu können, wird für die folgenden Untersuchungen Gitter 2 verwendet. Dieses bietet einen guten Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenzeit. Eine weitere Simulation des Förderstroms unter Berücksichtigung der Schwerkraft hat ebenfalls den Wert 0,510 ml/s ergeben. Die Schwerkraft hat demzufolge bei einer Drehzahl von 3000 1/min keinen Einfluss auf den Förderstrom.

Das Grundmodell mit einer Windung wurde auf drei Windungen erweitert.

Der Vergleich beider Modelle zeigt neben einer Erhöhung der Rechenzeit eine Übereinstimmung der Fluidförderung. Diese Ergebnisse lassen sich durch das Verhältnis von Reibung und Masse erklären. Während die dreifache Masse zu bewegen ist und die dreifache Reibung an der Dichtungsoberfläche der Bewegung entgegenwirkt, steigt die durch Reibung an der Wellenoberfläche verursachte antreibende Kraft ebenso auf den dreifachen Wert an. Für beide Modelle stehen Reibungs- und Trägheitskräfte in gleichem Verhältnis zueinander.



Bild 6.69: Gittervariationen

Tabelle 6.13: Vergleich der Simulationen bei 3000 1/min

Windungen	1	1	1	3
	Gitter 1	Gitter 2	Gitter 3	Gitter 2
Gitterabstand	0.1	0.2	0.4	0.2
Elemente auf Querschnittsfläche	257	159	159	159
Zellen	646.869	200.022	100.011	600.066
Iterationen	117	80	80	82
Rechenzeit [min]	25	15	10	40
Förderstrom [ml/s]	0,512	0,510	0,510	0,511

Bild 6.70 zeigt das Strömungsprofil im Gewindegang am Ausgang. Aufgrund der Haftbedingung liegt die Strömungsgeschwindigkeit zwischen 12,6 m/s und 0 m/s, die Geschwindigkeit fällt dabei kontinuierlich zur Wand ab. Die höchsten Geschwindigkeiten stellen sich an der Welle im Bereich der Profilmitte ein. Nahe den unbewegten Wänden und vor allem im tiefen Abschnitt des Gewindegangs fällt die Geschwindigkeit deutlich ab.



Bild 6.70: Strömungsprofil des Austritts – dreidimensional

In Bild 6.71 werden die Ergebnisse mit den Förderwertmessungen bei 40 °C und Drehzahl 3000 1/min verglichen. Der simulierte Volumenstrom von 0,51 ml/s kann nach Formel (6.2) in einen Massenstrom von 26,0 g/min umgerechnet werden. Verglichen mit dem Messwert von 9,8 g<sub>öl</sub>/min ist der simulierte Förderwert um Faktor 2,5 größer. Dieses Ergebnis hat schon Pohl [25] bei seiner numerischen Simulation des Förderwerts erhalten.



$$\dot{m}_{sim} = \dot{v}_{sim} * \rho * 60 \frac{s}{min}$$
(6.2)

Bild 6.71: Simulierter und gemessener Ölförderwert der Dichtringart PLE

Die Differenz wirft die Frage auf, welche Faktoren für die deutliche Abweichung von Messwert und Simulationsergebnis verantwortlich sind. Pohl führte Änderungen in der Kanalgeometrie in der Realität auf. Für geprägte Dichtringe tritt dies jedoch nur in äußerst geringem Maß auf.

Vielmehr führen die Vereinfachungen des Modells zur Verfälschung des Ergebnisses. Folgende Punkte scheinen den größten Einfluss auf das Ergebnis zu haben, konnten jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtig werden:

- In der Realität strömt das Fluid nicht senkrecht in den Gewindegang ein. Lediglich ein Anteil der Schleppströmung, der von den äußeren Wänden umgelenkt wird, dringt ein.
- Im 3. Gewindegang im abgehobenen Bereich der Dichtlippe befindet sich ein Dichtsteg. Dieser verschließt nahezu einen Gewindegang und verringert so den ein- und durchdringenden Volumenstrom.
- Die hohe Oberflächenrauigkeit in den Gewindegängen wurde in der Simulation nicht berücksichtigt. In den visuellen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass dadurch Turbulenzen entstehen können.
- Weiterhin wurden Rückströmungen in der Rillentiefe erkannt, welche in der Simulation nicht auftreten.
- In der Realität geförderte Luft wurde in der Simulation ebenfalls nicht berücksichtigt. Dadurch verringert sich der Ölförderwert.

Zur physikalisch korrekten Modellierung und Simulation ist ein geeignetes Berechnungsgebiet mit vollständiger Dichtlippe und Ölkammer (Bild 6.72) zu modellieren. Des Weiteren müssen Mehrphasenströmungen (Öl und Luft) mit freien Oberflächen und die Interaktion des Fluids mit der Struktur der Dichtlippe berücksichtigt werden. Derzeit existiert in kommerziellen Programmen keine Möglichkeit, diese Anforderungen in Verbindung mit PTFE und seinen spezifischen nicht-linearen Eigenschaften zu simulieren.



Bild 6.72: CAD-Modell eines zielführenden Berechnungsgebiets

# 7 Funktionsweise der PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille

Ziel der Untersuchungen dieser Arbeit war die Analyse der Funktionsweise der Spiralrille. Die PTFE-Manschettendichtringe mit Spiralrille lassen sich in zwei Hauptbereiche einteilen. Zur Grundgeometrie zählen das Dichtringgehäuse (Metallstützring mit optionaler Gummiummantelung), die Befestigung der Dichtlippe am Gehäuse, die geometrische Form der Dichtlippe an sich und die Schutzlippe. Zur Feingeometrie zählt die Geometrie der Spiralrille, der Dämme und des Dichtstegs. In Bild 7.1 sind die Begriffe definiert.



# 7.1 Grundgeometrie (Gehäuse, Dichtlippe, Schutzlippe)

Frühere Untersuchungen haben sich bereits ausführlich mit dem Gehäuse, der Befestigung der Dichtlippe und der Dichtlippe selbst beschäftigt. Durch Änderung der Länge der Dichtlippe kann der Berührbereich der Dichtlippe an der Welle eingestellt werden. Durch die Befestigung und die Variation der Länge und der Dicke der Dichtlippe kann die Radialkraft eingestellt werden. Diese hat maßgeblichen Einfluss auf das Reibmoment. Mit diesen Möglichkeiten muss ein Mittelweg zwischen Anpressung und Verschleiß der Welle und des Dichtrings selbst gefunden werden. Die Hauptaufgabe der Schutzlippe besteht darin, Schmutz und Fluide von außen am Vordringen bis zur Dichtlippe zu hindern. Des Weiteren bildet die Schutzlippe mit der Welle und der Dichtlippe einen Volumenraum. Hierin wird bis zu einer bestimmten Menge Leckage gesammelt und kann nach Wiederanlauf der Welle zurückgefördert werden. Dadurch wird Undichtheit der Dichtlippe bis zu einem bestimmten Maß nicht erkannt.

# 7.2 Feingeometrie (Spiralrille, Damm, Dichtsteg)

Die Feingeometrie der Spiralrille, der Dämme und des Dichtstegs beeinflussen auch die Radialkraft und das Anlageverhalten der Dichtlippe. Dies kann jedoch durch Wahl der Lippendicke und Befestigung ausgeglichen werden.

Aus diesem Grund muss bei der Auswahl und Gestaltung der Feingeometrie nicht auf die äußeren Bedingungen (Einstellung der Radialkraft, Anlageverhalten) Rücksicht genommen werden. Die Feingeometrie der Spiralrille kann auf ihre Funktion als Rückförderelement ausgelegt und optimiert werden. Dabei lässt sich die Feingeometrie in fünf Bereiche einteilen.

## 7.2.1 Eingangsbereich

Der ölseitige Eingangsbereich der Dichtringe ist bei geschnittenen Spiralrillen meist gut geschlossen, sodass das Öl nicht direkt eindringen kann.

Bei geprägten Dichtringen ist dieser Bereich herstellungsbedingt stets weit geöffnet. Die Spiralrille wird mit einem Werkzeug in die Dichtlippe geprägt. Dabei läuft die Spiralrille über den Innendurchmesser der Dichtlippe aus. Im Bild 7.2 ist die Dichtlippe im Urzustand flach dargestellt. Der grau dargestellte Damm läuft an der Innenseite der Dichtlippe, die bei der Montage in den Ölraum umgestülpt wird, aus. Die schwarz dargestellte Spiralrille ist somit am Ende des anliegenden Damms in den Ölraum offen (rot). Somit ist der Eingangsbereich immer geöffnet und Öl kann direkt einfließen.



Bild 7.2: Offener Eingang in die Spiralrille

# 7.2.2 Berührbereich der Dichtlippe

Bei den geschnittenen Dichtringen berührt der vorderste Damm die Welle. Es ist bei keinen der untersuchten Dichtringe ein eindeutiges Abheben der Dichtlippe, der sogenannte Glockenmäulcheneffekt zu erkennen. Es bilden sich durch Verzerrung der Dichtlippe und der Dämme relativ kleine Querschnitte im Gewindegang. Zum abhebenden Bereich, dem Übergangsbereich hin werden die Querschnitte der Gewindegänge immer größer.
Bei den geprägten Dichtringen berührt der Damm die Welle nach dem offenen Eingangsbereich. Bei PLE ist dies direkt vorne an der Stirnseite, bei PLF ist der erste bis zweite Damm nicht vollständig ausgebildet, bzw. die Dichtlippe ist zu lang. Dadurch hebt die Dichtlippe stirnseitig ab. Mit diesem Hilfsmittel wird während des Betriebs eine Mangelschmierung verhindert.

### 7.2.3 Gewindegänge der Spiralrille und Dämme

Durch den offenen Eingangsbereich benetzt das Öl den ölseitigen Damm und es dringt direkt in den ölseitigen, offenen Gewindegang ein. Dieser wird zuerst bis zum Ölspiegel gefüllt. Das Öl folgt in den Gewindegängen der fortlaufenden Benetzung auf den Dämmen, auch über den Ölspiegel um die Welle herum in die nächsten Gewindegänge, bis es letztendlich austritt.

In Bild 7.3 ist das Füllen der Spiralrille beispielhaft an Dichtringart PLE in Höhe des Ölspiegels dargestellt. Im linken Bild ist der erste Damm benetzt und der Zweite wird von unten benetzt. Der erste Gewindegang dazwischen ist ölfrei. Im mittleren Bild wird bereits der erste Gewindegang von unten durchflutet. Im rechten Bild ist das Öl auf den Dämmen und durch den ersten Gewindegang bereits zum zweiten Gewindegang durchgedrungen. Der dritte Damm ist schon komplett benetzt.



Bild 7.3: Benetzungs- und Strömungsverhältnisse PLE

Geschnittene Dichtringe (PRA) haben eine große Dammauflagefläche und kleine Rillenquerschnitte. Das Öl kann von einem benetzten Damm die sehr kleine Lücke, die die Spiralrille bildet, leicht überwinden, und fließt bis zum Austritt axial weiter. Die komplette Dichtlippe wirkt dabei als enger Spalt, durch den Kapillarkräfte das Öl transportieren. Auch hier wandert gleichzeitig das Öl auf dem Damm und in den Rillen radial um die Welle herum.

Bei **drehender** Welle wird das Öl durch die von der Welle erzeugte Schleppströmung von der Spiralrille in Richtung Ölraum abgelenkt und somit zurückgefördert. Auch bereits ausgelaufenes, noch an der Dichtlippe anhaftendes Öl wird zurückgesaugt und zurückgefördert. Ist die Spiralrille leergepumpt, findet auf den Dämmen weiterhin eine Mikroförderung statt, die das Restöl zurück in den Ölraum fördert. Das in den Gängen befindliche Restöl läuft in diesen nach unten, sammelt sich und wird ebenfalls zurück-

gepumpt. Bei Dichtringen mit kleinem Rillenquerschnitt wird das Öl nicht komplett zurückgefördert. Hier bleibt ein benetzter Bereich auch im Betrieb bestehen.

Bei geschnittenen Dichtringen sind die luftseitigen Gewindegänge aufgrund der Biegelinie größer und fördern Öl in den ölseitigen Bereich. Das Öl tritt also im dynamischen Zustand nicht aus.

### 7.2.4 Dichtsteg

In den geprägten Dichtringen ist die Spiralrille mit einem oder zwei Dichtstegen verschlossen. Der Dichtsteg (Bild 7.4) soll neben der statischen Dichtheit des Öls auch die Luftabdichtfähigkeit beim sogenannten Kalttest nach der Motorenmontage (Drucktest) [13] gewährleisten.

Stattdessen fließt das Öl auf dem Dichtsteg genauso wie auf den Dämmen in alle Richtungen, also auch axial über einen Gewindegang auf den nächsten Damm. Der Dichtsteg fungiert als Brücke zwischen zwei Dämmen, der das "Hindernis Spiralrille" übergeht. Dadurch wird das Austreten von Öl bei stillstehender Welle beschleunigt.

In Bild 7.5 tritt gerade Öl axial über den Dichtsteg hinweg auf den nächsten Damm und von dort nach außen.



Bild 7.4: Statischer Dichtsteg am Beispiel der Dichtringart PLE



Bild 7.5: Statischer Dichtsteg PLE als Brücke

In den Untersuchungen zur statischen Dichtheit mit dem Strömungsprüfstand (Glashohlwelle) und nach den Dauerläufen (Stahlwelle) hat sich gezeigt, dass die Dichtungen schon nach kurzem Stillstand undicht werden. Um diese Vorgänge näher untersuchen zu können, wurden statische Prüfkammern mit Stahlwelle aufgebaut. Die Dichtlippe ist wie bei den Dauerlaufprüfständen gut einsehbar. So ist es möglich die Erstleckage und das Fortschreiten der Leckage, lange bevor der erste Tropfen fällt, zu erkennen. Die Leckage wird mit den Kriterien des von Reichert [42] vorgestellten P&K-Test bewertet. Während des Versuchs wird die einsehbare Luftseite der Dichtung regelmäßig beobachtet und die Leckage entsprechend der Kategorien des auf statische Verhältnisse angepassten P-Tests dokumentiert. In Bild 7.6 variieren die Position des Dichtstegs und die Füllmenge (Wellenmitte = 25 ml und Überflutung = 50 ml). P8 bedeutet vollständig trocken. Deutlich ist die fortlaufende Leckage zu erkennen. Bis zu P1 (= abfließendes Öl) dauert es bei verschiedenen Ölständen und Dichtstegpositionen zwischen 40 und 160 Stunden.



Bild 7.6: Statische Dichtheit PLE

# 7.2.5 Ausgangsbereich

Am Ausgang, dem Übergang des anliegenden zum abhebenden Bereich der Dichtlippe sammelt sich das Öl und fließt nach unten ab, bis es abtropft. Wird die Welle in Bewegung gesetzt, wird das noch anhaftende Öl eingesaugt und zurückgefördert.

# 7.3 Funktionsmodelle

Im Folgenden werden für die statische und die dynamische Funktion physikalisch begründete Modelle aufgestellt. Mit diesen lassen sich alle Vorgänge im Detail erklären und veranschaulichen.

### 7.3.1 Statische Funktion

Bei stillstehender Welle dringt Öl durch die offene Spiralrille direkt ein. Dabei werden die Dämme zuerst benetzt. Die Dämme berühren die Welle nicht vollflächig, wie bei einem Elastomer-Radialwellendichtring, der sich der Wellenkontur sehr gut anpasst. Vielmehr liegen die aus dem Matrixwerkstoff des Compounds (das PTFE) herausstehenden Füllstoffe auf der Welle auf (siehe hierzu Bild 8.8 und [31]). Zwischen dem Matrixwerkstoff und der Welle bilden sich enge Spalte. Je größer die Radialkraft der Dichtringe, und damit die Pressung am Damm, desto kleiner ist der Spalt. Das Öl dringt in den Spalt ein und benetzt diesen. Das Öl fließt auf den Dämmen in alle Richtungen. Durch Kapillar-kräfte (Energie aus der Wechselwirkung des Öls und der Oberfläche des Dichtrings im engen Spalt) fließt das Öl auch über den Ölspiegel hinweg nach oben um die Welle herum auf den Damm des nächsten Gewindegangs. Der Damm kann ein axiales Fortschreiten des Öls nicht verhindern.

#### Benetzungsvorgänge der Dämme

Liegen die Dämme mit einem breiten Bereich an und folgt ein kleiner Querschnitt des Gewindegangs mit flach ansteigender Wand, wirkt dieser wie ein enger Spalt. Die Oberflächenenergien wirken eine Kapillarkraft auf das Öl unter dem Damm aus, welche größer ist als die Kohäsionskraft im Öl. Diese Kraftdifferenz ist groß genug um die Oberfläche des Meniskus an der flach ansteigenden Wand kontinuierlich zu vergrößern. Dadurch strömt das Öl in den Gewindegang und füllt diesen komplett (Bild 7.7). Auf diese Weise wird die Dichtlippe auch axial durchströmt. Gleichzeitig wandert das Öl auf dem Damm radial um die Welle herum auf den nächsten Gewindegang.

Liegen die Dämme jedoch mit einem schmalen Bereich an und folgt ein großer Querschnitt des Gewindegangs mit steil ansteigender Wand, bildet sich durch die Oberflächenspannung im Öl ein Meniskus am Übergang (Bild 7.8). Es wirken Kohäsionskräfte, die die Ölpartikel zusammenhalten. Die Kapillarkraft ist kleiner als die Kohäsionskräft. Es steht nicht genügend Energie zur Verfügung, um die Oberfläche des Meniskus zu vergrößern. Die Oberflächenspannung hindert das Öl am ausfliesen in den Gewindegang. Es dringt also kein Öl in den nebenstehenden Gewindegang ein.



Bild 7.7: Benetzung kleiner Gänge

Bild 7.8: Benetzung großer Gänge

In Bild 7.9 können diese Vorgänge kombiniert dargestellt werden. Zuerst benetzt das Öl den dritten Damm radial in eine Richtung (nach oben). An der flach ansteigenden Wand rechts, die wie ein enger Spalt wirkt, fließt Öl in den rechten Gewindegang. Dadurch wird der Gewindegang axial gefüllt, das Öl tritt zum nächsten Damm über und benetzt wiederum diesen. An der steil ansteigenden Wand links fließt kein Öl in den linken Gewindegang. Hier hindert der Meniskus das Öl am übertreten.



Bild 7.9: Benetzung an steilen (links) und flachen (rechts) Wänden

Nach der Benetzung der Dämme und Füllung der Gewindegänge strömt das Öl auch in den Gewindegängen radial um die Welle herum.

Bei den geschnittenen Dichtringen mit großer Dammauflagefläche und kleinen Querschnitten kann das Öl von einem benetzten Damm die sehr kleine Lücke, die die Spiralrille bildet, leicht überwinden und fließt bis zum Austritt axial weiter. Die komplette Dichtlippe wirkt dabei als enger Spalt, welcher durch Kapillarkräfte das Öl axial transportiert. Gleichzeitig dringt das Öl auf dem Damm radial um die Welle weiter herum.

# 7.3.2 Dynamische Funktion

Bereits Jenisch [11] beschrieb mit Bild 7.10 die dynamische Funktion für geschnittene Dichtringe (vergleiche **PRA** in dieser Arbeit) für zwei Fälle.

Fall B entspricht dabei dem unrealistischen Fall, dass ein übergroßes Ölangebot auf der Luftseite (Bodenseite) vorliegt. Dies entspricht dem Zustand der Dauerförderung in dieser Arbeit. Er vergleicht diesen Fall mit einer Gewindewellendichtung.

Fall A geht von einem geringen Ölangebot aus, welches die Gewindegänge nicht vollständig füllt. Dies entspricht dem eigentlichen Abdichtbetrieb. Mit den Erkenntnissen aus dieser Arbeit kann sein Schaubild folgendermaßen interpretiert werden.

Beim Eindringen in die Dichtlippe wird das Öl durch die von der Welle erzeugte Schleppströmung von den Wänden der Gewindegänge in den Ölraum umgelenkt und somit zurückgefördert. In der Tiefe der Gewindegänge selbst ist kein Öl vorhanden. In den flachen Bereichen bleiben die breiten Dämme der geschnittenen Dichtringe benetzt, dadurch ist die Auflagefläche A vergleichsweise groß.

Nach GI. (2.2) ist damit die Reibungskraft  $F_{Reib} = A * \eta * dv/dh$ , beziehungsweise das Reibmoment ebenfalls vergleichsweise groß.

Die Messungen in dieser Arbeit ergaben, dass die Reibmomente im Abdichtbetrieb wesentlich größer sind, als bei Trockenlauf und bei Benetzung und denen der Dauerförderung sehr ähnlich sind. Jenisch's Modell wird dadurch bestätigt.



Bild 7.10: Dynamische Funktion nach Jenisch [11]

Fall A kann auch für die geprägte Dichtringart **PLE** mit schmalen Dämmen und breiten Gewindegängen verwendet werden. Während des Abdichtbetriebs ist die Spiralrille komplett ölfrei, das Öl benetzt lediglich die Dämme. Durch die schmaleren Dämme ist die Auflagefläche A wesentlich kleiner als bei Dichtringart PRA. Dadurch ist nach Gl. (2.2) auch die Reibungskraft kleiner.

Dies wird durch die Reibmomentmesswerte bestätigt. Die Reibmomente im Abdichtbetrieb sind dabei wesentlich geringer als bei Dauerförderung mit gefüllter Spiralrille und liegen bei 2000 1/min in der gleichen Größenordnung wie bei Trockenlauf und Benetzung.

Für die Dichtringart **PLF** kann Fall B verwendet werden. Im luftseitigen Bereich der Dichtlippe mit den tieferen Gewindegängen wird das Öl in Richtung Ölraum zurückgepumpt. Der vordere Teil des Berührbereiches der Dichtlippe bleibt komplett mit Öl gefüllt. Dadurch schwimmt die gesamte Dichtlippe auf dem Ölfilm auf und ist dadurch gut geschmiert. Die Dämme berühren die Welle nicht mehr. Die Auflagefläche A ist vergleichsweise groß. Somit ist auch die Fluidreibung vergleichsweise groß. Dahingegen fällt die Festkörperreibung im vorderen Bereich weg.

Das gemessene Reibmoment liegt im Abdichtbetrieb deutlich unter dem Reibmoment bei Trockenlauf und Benetzung.

# 8 Optimierung der Spiralrille und Erweiterung der Einsatzgrenzen

Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Spiralrille als Rückförderstruktur bei drehender Welle sehr gut geeignet ist. Jedoch sind Dichtringe mit Spiralrille im statischen Zustand undicht. Hier besteht großes Optimierungspotenzial. Die Spiralrille läuft ölseitig spiralförmig aus. Je größer (breiter) der Querschnitt der Spiralrille und je kleiner die Steigung, desto größer ist der dadurch geöffnete Eingangsbereich in den Ölraum. In Kap. 8.1 werden Gestaltungsvorschläge zur Optimierung vorgestellt.

Ein innovativer Ansatz zur statischen Abdichtung ist die Verbindung der funktionssicheren und erforschten Spiralrille mit einem Element, welches das Öl im statischen Zustand am Eindringen in die Spiralrille hindert. Dieses Element muss die Spiralrille am ölseitigen Lippenende teilweise oder vollständig schließen. In Kap. 8.2 werden hierzu Gestaltungsvorschläge vorgestellt.

Der einfachen Realisierung dieser Gestaltungsvorschläge stehen jedoch einige Problematiken hinsichtlich des Compounds und deren Oberflächen gegenüber, die in Kap. 8.3 besprochen werden.

# 8.1 Optimierung der Spiralrille

Die analysierten Dichtringe wurden auf die Bedürfnisse der Automobilindustrie und deren spezifischen Testanforderungen ausgelegt. Zur Anpassung der Biegeradien und Radialkraft wird oftmals die Spiralrille "missbraucht".

Aus den durchgeführten Untersuchungen und Beobachtungen lassen sich für die funktionsgerechte Auslegung der Spiralrille für den dynamischen Betrieb, aber auch zur Verbesserung des statischen Zustandes bei Teilüberflutung nachfolgende Gestaltungsvorschläge ableiten:

- Wenige schmale Dämme
- Tiefe und breite Rillenquer- schnitte mit steilen Wänden
- Um die Öltransportmenge in axialer und radialer Richtung im Stillstand zu minimieren und die lokale Pressung zu erhöhen.
- Um ein "überspringen" des Öls von einem Damm auf den nächsten zu verhindern, und eine langzeitfunktionssichere Spiralrille (Verschleiß, Füllung mit Ölkohle) zu erhalten.
  - Ist die Querschnittsfläche groß genug, wird ein Fluidtransport in den Gewindegängen im statischen Zustand verhindert, da die Kapillarkraft nicht mehr ausreichend groß ist (Kap. 2.1.1).
- Verzicht auf den Dichtsteg
- Um axiales Übertreten über den Dichtsteg und Ölkohleansammlung zu vermeiden.
- Verzicht auf kohlenstoffba- 

   sierte Füllstoffe
- Um Ölkohlebildung zu vermeiden und dadurch die Funktion der Spiralrille zu gewährleisten.

Die Steigung der Spiralrille ergibt sich aus der Breite der Gewindegänge und der Dämme. Die Breite des Berührbereiches ergibt sich aus der Anzahl der anliegenden Dämme. Nach Festlegung der Geometrie der Spiralrille, des Compounds und der gewünschten Radialkraft können die Länge und die Dicke der Dichtlippe mithilfe der Finite-Elemente-Analyse berechnet werden.

#### Gestaltungsvorschlag für einen Dichtring mit 80 mm Abdichtdurchmesser

In Bild 8.1 ist ein Gestaltungsvorschlag für eine funktionsgerecht optimierte Geometrie der Spiralrille vorgestellt.

Der Damm ist 0,15 mm breit und am Berührbereich mit einem Radius von 0,075 mm abgerundet. Dadurch wird eine schmale Berührbreite und relativ hohe Pressung erreicht. Auf dem schmalen Damm findet nur noch ein deutlich reduzierter statischer Volumenstrom um die Welle herum statt.

Anschließend steigt die Wand des ersten Gewindegangs senkrecht an. Dadurch wird verhindert, dass das Öl in die Spiralrille fließt. Der Gewindegang ist 0,4 mm breit. Dadurch wird verhindert, dass die geringe Ölmenge welche trotz der Oberflächenspannungen axial in den Gang fließt, diesen füllt. Zumindest verlängert die große Querschnittsfläche die Zeit bis zum Volllaufen des Ganges und damit ein Übertreten zum nächsten Damm. Es folgen drei weitere Dämme, die ein Durchdringen verlangsamen.

Ist der Querschnitt groß genug, reicht die Kapillarkraft nicht mehr aus, um Öl in der Spiralrille um die Welle über den Ölspiegel hinweg zu transportieren. Damit kann statische Dichtheit erreicht werden. Der ölseitige erste Gewindegang ist teilweise geöffnet. Bei drehender Welle reichen die zwei weiteren Gewindegänge für eine sichere Rückförderung und Abdichtung aus.



Bild 8.1: Geometrievorschlag für 80mm Dichtring

Die Dichtstelle darf nicht komplett überflutet sein. Sonst fließt das Öl aufgrund des hydrostatischen Drucks durch die Spiralrille. Um auch in diesem Einsatzfall sicher abdichten zu können, muss die Spiralrille um eine innovative statische Abdichtung ergänzt werden.

# 8.2 Erweiterung der Einsatzgrenzen durch innovative statische Abdichtung

Die Spiralrille ist gut geeignet Fluid dynamisch am Austreten zu hindern [46]. Mit den Gestaltungsvorschlägen kann die Dichtung funktionsgerecht optimiert werden. Dadurch verbessert sich das Verhalten sowohl bei drehender als auch bei stillstehender Welle. Zur weiteren Optimierung und für den Einsatz an teilüberfluteten Dichtstellen (allg. Maschinenbau) ist jedoch anstatt des Dichtstegs eine innovative statische Abdichtung notwendig.

Die nachfolgenden Beobachtungen treffen sowohl für bespritzte als auch für teilüberflutete Dichtstellen zu und verdeutlichen den Eindringvorgang:

Im Bild 8.2 ist ein Dichtring (PLE) in Höhe Wellenmitte abgebildet. Das Bild ist nach Stillstand der Welle aufgenommen. Öl läuft rechts am Rand des ersten Dammes in den Ölsumpf nach unten. Dieser Bereich ist der noch offene Bereich (Bild 8.3) des ersten Gewindeganges. Das Öl dringt direkt in den ersten Gang ein. Danach dringt es auf den Dämmen und in den Gewindegängen radial um die Welle herum bis zum Dichtsteg vor, über diesen hinweg, und nach außen.

 $\rightarrow$  Statische Leckage ist mit einer Spiralrille nicht vermeidbar.

Lediglich die Menge und die Zeitdauer sind beeinflussbar.



Ende des anliegenden Damms

Bild 8.3: Offener Eingang in die Spiralrille

Würde der Dichtring im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau in drucklos überfluteten Dichtstellen zum Einsatz kommen, liegt ein großer offener Bereich der Spiralrille im Ölsumpf. Es dringt ständig Öl in die Spiralrille ein. Bei den Untersuchungen konnte ein dauerhaftes Fortschreiten der statischen Leckage erkannt werden.

→Um das Eindringen zu verhindern, muss die Spiralrille ölseitig geschlossen sein [47]. Der erste Damm muss als geschlossener Ring (Bild 8.4) ausgeführt sein, der dicht abschließt. Dazu muss er ebenso wie die Dämme schmal und mit einer hohen Pressung ausgelegt sein.



Bild 8.4: Dichtring mit geschlossenem Ring

Der Übergang zur Spiralrille muss so gestaltet sein, dass bei drehender Welle bereits eingedrungenes Öl durch den geschlossenen Ring zurückgefördert wird. Dafür kann der erste Damm der Spiralrille in den geschlossenen Ring direkt übergehen (Bild 8.5) oder ohne den Ring zu berühren (Bild 8.6) kurz vorher enden. Alternativ, aber ungünstiger, könnte ein definierter, sehr kleiner Eingang im Ring zum Einsatz kommen, der immer oben eingebaut sein muss.

Die Geometrie des Gestaltungsvorschlags aus Kap. 8.1 kann für den geschlossenen Ring und für die Dämme direkt übernommen werden.





Bild 8.5: Zusammenlaufender Übergang

Bild 8.6: Getrennter Übergang

# 8.3 Problematik der Gestaltungsvorschläge

Problematisch sind jedoch die charakteristischen Eigenschaften des PTFE-Matrixwerkstoffes und seiner Füllstoffe. Es ist fertigungstechnisch schwierig eine für Fluide "dichte" Fläche, wie dies beispielsweise beim Elastomer-Radialwellendichtring möglich ist, herzustellen.

Bild 8.7 verdeutlichet die Erkenntnisse mit einer Beobachtung unter der Glashohlwelle. Im oberen Bereich ist der erste Damm einer teilweise verschlissenen Dichtlippe nach Dauerlauf zu sehen. Die dunklere (braune) Oberfläche ist herstellungsbedingt gegeben. Die hellen, weißen Bereiche sind verschlissene Dammbereiche mit Glasfasern. Es ist zu erkennen, dass dieser Damm nicht durchgängig verschlissen ist. Die braunen Bereiche hatten während des Dauerlaufs keinen Kontakt zur Welle und wurden nicht verschlissen. An diesen Stellen tritt im Stillstand Öl in den ersten Gewindegang ein. Diese Beobachtung gilt für den vordersten anliegenden Damm oder den geschlossenen Ring. Beim Prägen müssen diese besser ausgeformt und wenn möglich geglättet werden.



Bild 8.7: Erster Damm mit Einlaufstellen

Bild 8.8 zeigt einen verschlissenen Damm und zwei Gewindegänge der Dichtringart PLE. Es ist die raue, unregelmäßig strukturierte Oberfläche mit den "herausstehenden" Glasfasern auf dem Damm und in den Gewindegängen zu erkennen. Die Oberfläche in den Gewindegängen zeigt den Stand der Herstellungstechnik und der Damm zeigt die Oberfläche nach Verschleiß. Bild 8.9 zeigt eine stark vergrößerte PTFE-Oberfläche in der 3D-Darstellung.

→ Auch wenn der Damm vollflächig aufliegt und verschlissen ist, ist die Oberfläche rau und gut benetzbar. Öl dringt unter den Damm und benetzt diesen komplett.

➔ Um die beschriebenen Problematiken zu verbessern oder zu verhindern müssen neue Compounds entwickelt werden, die im Neuzustand und nach Dauerlauf glatter sind, als die bisher verwendeten.





Bild 8.9: 3D-Oberfläche

→ Um statisch sicher abzudichten, müssen insbesondere der ölseitig geschlossene Ring und die Dämme derart ausgebildet sein, dass sie eine schmale, glatte Berührfläche mit hoher und in Umfangsrichtung gleichmäßiger Pressung erreichen. Durch die Kohäsionskräfte wird das Öl am direkten Eindringen in den nachfolgenden Gewindegang gehindert.

# 8.4 Zusammenfassung

Mit

- einem stirnseitig geschlossenen Ring,
- schmalen Dämmen,
- deren Oberflächen im Berührbereich glatt sind,
- tiefen und breiten Rillenquerschnitten und
- angepasster Radialkraft

können Manschettendichtringe aus PTFE-Compounds mit günstigen dichtungstechnischen Eigenschaften für den allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau geschaffen werden. Mit geeigneten Werkstoffen lassen sich perfekte Dichtungen realisieren.

# 9 Gestaltung und Analyse optimierter Dichtringe

In diesem Kapitel wird die Gestaltung und Analyse einer neuen, optimierten Dichtringart vorgestellt. Diese wurde mit den bisher vorgestellten Erkenntnissen und mithilfe der Finiten Elemente Analyse gestaltet, von einem Dichtungshersteller gefertigt und am Institut für Maschinenelemente untersucht.

# 9.1 Gestaltung mithilfe der Finiten Elemente Analyse

Mithilfe der Erkenntnisse und den Werkstoffkennwerten der Dichtringart PLF (gleiches Compound wie neue Dichtringart) wurde ein optimierter Dichtring gestaltet. Hauptaugenmerk lag auf den gut definierten, abgerundeten Dämmen und tiefen und breiten Gewindegängen mit steilen Wänden. Ölseitig ist ein geschlossener Ring angebracht. Im Gegensatz zum Gestaltungsvorschlag aus Bild 8.1 dürfen die Wände nicht senkrecht stehen, sondern müssen leicht schräg sein. Sonst können die Gewindegänge nicht geprägt und ausgeformt werden. Die luftseitigen Wände sind steiler, um das Öl durch den Meniskus halten zu können. Die ölseitigen Wände sind flacher ausgebildet, um dem Damm eine breitere und stabilere Auflage zu bieten. Das Hauptziel der Simulation war die Auflage mehrerer Dämme auf der Welle. Weiterhin sollte der größte Teil der Radialkraft auf dem vorderen Ring anliegen. Damit wird dieser gut gegen die Welle gepresst und kann mit seiner abgerundeten Geometrie eine hohe Linienpressung aufbauen. Um diese Ziele zu erreichen, wurden umfangreiche Parametervariationen durchgeführt. Die variierten Parameter sind:

- Länge und Dicke der Dichtlippe
- Position des geschlossenen Rings
- Abstand der Dämme

Mit diesen Parametern konnte jedoch kein optimales Ergebnis erzielt werden. Wird die Geometrie so ausgelegt, dass die Pressung auf dem vorderen Ring/ Damm am größten ist, so liegen die nachfolgenden Dämme nicht mehr auf der Welle an. Dies trifft auch auf einen in [45] untersuchten realen Dichtring (PLN) zu.

Wird die Geometrie so ausgelegt, dass mehrere Dämme anliegen, so ist die Pressung auf dem vorderen Ring/ Damm klein. Dies trifft auch auf Dichtringart PLE (Bild 6.66) zu. Um die Anlage mehrerer Dämme auf der Welle und die größte Pressung auf dem vorderen Ring zu gewährleisten, wurde die Geometrie innovativ erweitert (Bild 9.1). Durch einen ölseitigen Aufsatz (Verstärkung der Dichtlippendicke im vorderen Bereich) wird die Anzahl der anliegenden Dämme variiert. Durch einen ölseitigen Vorsatz (Erweiterung der Dichtlippe in den Ölraum) wird die Pressungsverteilung so beeinflusst, dass die größte Pressung auf dem geschlossenen Ring liegt. Die Längen dieser Geometrieerweiterungen wurden ebenfalls umfangreich variiert.

#### Ergebnisse

In Bild 9.2 ist die Auflage des geschlossenen Ringes und der Dämme auf der Welle in Vergrößerung zu Bild 9.1 dargestellt. In Bild 9.3 sind die Zahlenwerte der Einzelknoten-Radialkräfte und die Radialkräfte je Damm dargestellt. Die ölseitigen drei Dämme mit dem geschlossenen Ring liegen durch den Vorsatz und den Aufsatz sehr gut auf der Welle an. Auch der vierte Damm berührt fast die Welle. Die höchste Radialkraft liegt auf dem ölseitig geschlossenen Ring. Die simulierte Gesamtradialkraft beträgt 92 N nach Lagerung. Diesen Wert weisen auch die Messergebnisse der Dichtringart PLF auf. Damit ist die vorgestellte Geometrie der bestmögliche Kompromiss und erfüllt gut die Vorgaben.



Bild 9.1: Dichtringart PLP – Gesamtansicht mit Variationsparameter



Bild 9.2: Dichtringart PLP - Detailansicht



Bild 9.3: Simulierte Radialkraftverteilung der Dichtringart PLP

# 9.2 Geometrie

Mit den bisher erlangten Erkenntnissen und den Optimierungsergebnissen der Finite Elemente Analyse wurden mehrere gleiche Prototypen hergestellt. Bei diesem Dichtring der Art PLP ist der vorderste Damm als geschlossener Ring ausgebildet. Die Spiralrille läuft gemäß Bild 8.5 am Übergang in den Ring. In Bild 9.4 ist der Dichtring dargestellt.



Bild 9.4: Dichtring PLP

In Bild 9.5 ist der Querschnitt der Dichtlippe am Übergang des ersten Dammes dargestellt. Vorne ist der geschlossene Ring ersichtlich. Aus ihm geht der erste Damm der Spiralrille hervor. In Bild 9.6 ist der Dichtring um 120° gedreht dargestellt. Der erste Gewindegang dazwischen ist noch nicht vollständig ausgebildet. Bild 9.7 zeigt die gleiche Position in der 3-dimensionalen Darstellung. In dieser Ansicht ist auch die gute und nahezu glatte Oberfläche der Dämme sichtbar.



Bild 9.5: Querschnitt PLP 0°



Bild 9.6: Querschnitt PLP 120°



Bild 9.7: Übergang vom geschlossenen Ring in die Spiralrille PLP

In Bild 9.8 ist der Dichtring in Einbaulage dargestellt. Bild 9.9 zeigt den anliegenden Berührbereich in der Vergrößerung. Der geschlossene Ring/ erste Damm und die Dämme zwei bis vier liegen über 2,5 mm sehr gut an und die Gewindegänge sind breit und tief ausgeprägt. Im Gegensatz zur Simulation ist die Dichtlippe statt 0,5 mm auf 0,9 mm Dicke und der Vorsatz statt 0,5 mm auf 0,8 mm Länge verändert worden.



Bild 9.8: Dichtringart PLP in Einbaulage



Bild 9.9: Berührbereich der Dichtringart PLP

# 9.3 Funktion

Der Dichtring hat im Neuzustand eine Radialkraft, die über dem Messbereich des Messgerätes von ca. 260 N liegt. Nach Lagerung hat der Dichtring noch eine äußert große Radialkraft von ca. 170 N. Der Wert stimmt nicht mit der Finiten Elemente Analyse überein. Dies liegt an der abweichenden Geometrie der Dichtringart-Prototypen von der berechneten Lösung.

Dadurch ergibt sich für die Montage auf den verschiedenen Untersuchungseinrichtungen und Prüfstände ein Problem. Schon am Radialkraftmessgerät kann erkannt werden, wie der Dichtring durch die zwei Backen mit Schlitz seine Form verändert. Um die Dichtringe nicht zu beschädigen, sind die Kanten am Schlitz mit einem Radius von 3 mm abgerundet. Mit dem Schlitz ist die fehlende Auflagefläche somit 7 mm lang. Der Dichtring verformt sich während der Montage und der 10-sekündigen Wartezeit in diesen Bereich. Nach der Demontage verformt sich die Dichtlippe teilweise, jedoch nicht vollständig zurück.

Durch die hohe Radialkraft werden die schmalen Dämme und der Ring sehr stark auf die Welle gepresst. Bei der Montage werden diese zusätzlich in Längsrichtung über die Welle gezogen. Dadurch können die Dämme und der geschlossene Ring leicht verformt oder beschädigt werden.

#### **Statische Funktion**

Bei Untersuchungen mit dem Strömungsprüfstand zeigte sich, dass das Öl durch den geschlossenen ölseitigen Ring nicht direkt in die Spiralrille eindringen kann. Der Dichtring ist so eingebaut, dass der Übergang vom geschlossenen Ring zum ersten Damm oben liegt. Der Ölstand ist Wellenmitte. Der Ring wird langsam benetzt und das Öl verteilt sich auf dem ganzen Ring, also auch über den Ölspiegel. An der steilen Wand vom geschlossenen Ring in den ersten Gewindegang wird das Öl durch den sich bildenden Meniskus gehalten. Es fließt kein Öl in den Gewindegang ein.

- → Der Dichtring erfüllt seine Funktion und ist statisch dicht.
- Diese Beobachtung stützt die bisherigen Erkenntnisse und das aufgestellte Modell für die statische Funktion.

Oben, am berührenden Übergang vom Ring in den ersten Damm wird die Benetzung jedoch fortgesetzt. Öl tritt vom Ring auf den ersten Damm über und benetzt diesen. Durch den Ring fließt im Vergleich zu dem offenen Eingang herkömmlicher PTFE-Manschetten mit Spiralrille kaum Öl nach. Die fortschreitende Benetzung findet daher

sehr langsam und mit äußerst geringem Ölvolumen auf den Dämmen statt. Auch Öl, welches die Dämme bereits benetzt hat, fließt aufgrund der Oberflächenspannung nicht in den nebenliegenden Gewindegang.

➔ Mit dem stirnseitig geschlossenen Ring, den schmalen und glatten Dämmen und den tiefen und breiten Rillenquerschnitten wurde eine wesentliche Verbesserung der statischen Dichtheit erreicht.

Eine vollständige physikalische Dichtheit kann mit einem in den Ring übergehenden Damm nicht erreicht werden. Hierfür müsste der erste Damm wie in Bild 8.6 kurz vor dem Ring enden.

Bei einigen Dichtringen wurde der Übergangsbereich mit dem Skalpell entfernt. Dabei kann eine Beschädigung des Ringes und des nächsten Dammes nicht verhindert werden. Die Untersuchungen zeigen trotzdem erfolgversprechende Ergebnisse.

→ Damit wäre eine statische Dichtheit bei überfluteten PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille erreicht. Die innovative Geometrie unterstützt den Abdichtmechanismus "Oberflächenspannung" des Öls. Weitere Untersuchungen müssen mit industriell gefertigten Dichtringen ohne Übergang von Ring zu Damm erfolgen.

#### **Dynamische Funktion**

In Funktionsuntersuchungen ist der Dichtring bei drehender Welle dicht. Es zeigt sich kein Ölnebel auf der Luftseite. Wird von außen Öl zugegeben wird dieses sofort zur Ölseite gefördert. Diese Beobachtungen stimmen bei Untersuchungen mit Stahlwellen und mit der Glashohlwelle überein. Sogar das Öl im vorderen Gewindegang wird komplett in den Ölraum zurückgefördert. Der geschlossene Ring und die Dämme bleiben benetzt. Die Gefahr, dass der Ring trocken läuft, besteht daher nicht.

Für die statische Dichtheit müsste der erste Damm kurz vor dem geschlossenen Ring enden. Die dynamische Dichtheit ändert sich dadurch nicht, da die luftseitigen Gewindegänge das Öl zurückfördern und dadurch ölfrei sind. Diese Aussage wurde mit Dichtringen überprüft, bei denen der Übergangsbereich mit dem Skalpell entfernt worden ist.

# 9.4 Zusammenfassung

- Der Dichtring ist bei drehender Welle dicht und fördert hervorragend Öl in der Ölraum zurück.
- Würde der erste Damm vor dem geschlossenen Ring enden, würde die statische Dichtheit vermutlich gewährleistet sein. Die dynamische Dichtheit wird dadurch nicht beeinflusst.

# 10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Analyse der Geometrie und der Funktionsweise unterschiedlicher PTFE-Manschettendichtringe. Hierzu wurden Radialkräfte, Reibmomente, Förderwerte von Öl und Luft und das statische Dichtverhalten untersucht. In zahlreichen Dauerlaufversuchen wurden die Dichtfunktion und das Verschleißverhalten der Welle und des Dichtrings, sowie die Anfälligkeit und die Folgen von Ölkohlebildung untersucht. Ein Hauptbestandteil der Analyse war die visuelle Beobachtung des Eindringverhaltens und der Strömungsvorgänge in den Spiralrillen. Hierzu wurde ein Prüfstand mit einer Glashohlwelle konzipiert und aufgebaut. Mit einer hochauflösenden digitalen Farbkamera und einem Zoomsystem wurden die Vorgänge in allen Bereichen der Dichtringe analysiert. Die Dichtringe können dabei verdreht werden, sodass sich verschiedene Bereiche (z. B. der Dichtsteg) in oder außerhalb des Ölsumpfes befinden.

#### Untersuchungsergebnisse:

- Die Geometrien der Spiralrillen und der Dichtlippen handelsüblicher Dichtringe variieren sehr stark.
- Durch die Geometrievariationen und die verschiedenen Compounds variieren die Radialkräfte, Reibmomente und die Förderwerte ebenfalls sehr stark.
- Die vorgestellte Methode zur Messung des Luftförderwertes durch Verdrängung von Öl in einem flach liegenden Schlauch hat sich als geeignet herausgestellt.
- Die Dichtringe sind dynamisch dicht.
- In gut gestalteten Spiralrillen wird das Öl im dynamischen Zustand durch die Gewindegänge zurückgepumpt. Das bereits ausgetretene, aber noch an der Dichtlippe anhaftende Öl wird eingesaugt und zurückgepumpt.
- Gut gestaltete Gewindegänge sind während des Betriebs weitgehend leer und die Dämme fördern das eingedrungene Öl zurück.
- Alle Dichtringe sind bei anliegendem Öl statisch undicht. Der Ölfüllstand beeinflusst die Dauer bis zur Leckage.
- In gut gestalteten Gewindegängen fließt das Öl im statischen Zustand hauptsächlich auf den Dämmen und in den Gewindegängen um die Welle herum. Das Öl fließt dabei auch über den Ölspiegel nach oben.
- Der Dichtsteg wirkt als Störstelle und beeinflusst die Leckagemenge und die Zeit bis zur Leckage negativ. Auf dem Dichtsteg fließt Öl axial über den jeweiligen Gewindegang auf den nächsten Damm.
- Mithilfe der Finiten Elemente Analyse lassen sich die Verformungen mit einem linear elastisch – ideal plastischen Materialmodell gut vorherbestimmen. Durch Vergleich mit Radialkraftmesswerten kann die Simulation gut an die Realität angepasst werden.
- Mithilfe einer Weiterentwicklung der Grundgeometrie durch Verstärkungen können die Gesamtanlage und die Pressungsverteilung der Dichtlippe und der Dämme wesentlich besser angepasst werden, als dies seither möglich war.
- Strömungssimulationen sind derzeit aufgrund der starken nicht-linearen Werkstoffeigenschaften und der nötigen Fluid-Struktur-Kopplungen mit herkömmlicher Standardsoftware nicht möglich.

Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis dieser Ergebnisse und Erkenntnisse wurden Gestaltungsvorschläge erstellt, die einen Einsatz im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau funktionssicher ermöglichen. Nach den Gestaltungsvorschlägen wurde ein Prototyp gefertigt und analysiert. Dieser Dichtring hat einen durchgehenden geschlossenen Ring auf der Ölseite. Dadurch dringt das Öl nicht direkt in die Spiralrille ein. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen die Gestaltungsvorschläge.

Die Ziele, die Funktionsweise der Spiralrillen zu analysieren, zu verstehen und diese zu optimieren, wurden erreicht. Die umfassenden Untersuchungen ergeben: Mit

- einem stirnseitig geschlossenen Ring,
- schmalen Dämmen,
- deren Oberflächen im Berührbereich glatt sind,
- tiefen und breiten Rillenquerschnitten und
- angepasster Radialkraft

können Manschettendichtringe aus PTFE-Compounds mit günstigen dichtungstechnischen Eigenschaften für eine Vielzahl von Betriebsbedingungen geschaffen werden.

Mit dieser Optimierung und Erweiterung der Einsatzgrenzen wurde ein wesentlicher Fortschritt in der Dichtungstechnik für den allgemeinen Maschinen-/ Anlagen- und Fahrzeugbau erreicht.

Diese bei allen Betriebsbedingungen dichten PTFE-Manschettendichtungen ermöglichen Wellendichtsysteme, die von -100 °C bis +250 °C funktionieren und bei denen die chemischen Eigenschaften des abzudichtenden Fluides keine Rolle spielen. Dies ist heute und in der absehbaren Zukunft auch mit den hochwertigsten Elastomer-Radialwellendichtungen nicht möglich.

Damit wird eine Falschauswahl des Dichtrings ausgeschlossen, die Lagerhaltung minimiert und eine optimale Funktion gewährleistet. Die Herstellungskosten sind mit denen hochwertiger Radialwellendichtringen aus Fluorelastomeren vergleichbar.

In weiteren Arbeiten muss die Gesamtradialkraft des Dichtringprototyps PLP verringert werden. Dazu muss die reale Geometrie an die Simulation angenähert werden. Dieser optimale Dichtring wird ausführlich untersucht und die Ergebnisse veröffentlicht.

Mit neuen Werkstoffen, die auch nach Verschleiß glatt bleiben, kann so ein perfekter Dichtring entwickelt werden.

# 11 Literaturverzeichnis

- [1] Müller, H. K.: Dichtungstechnik Abdichtung bewegter Maschinenteile, Waiblingen, 2002
- [2] Müller, H. K.: Nau, B. S.: www.fachwissen-dichtungstechnik.de, Internet 2007
- [3] Deuring, H.: Abdichtung von Kurbelwellen für Dieselmotoren, Goetze AG, 1987
- [4] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, VDI Verlag, 4. Auflage, 1992
- [5] Heitel, K: Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich, Dissertation Universität Stuttgart, 1977
- [6] Kammüller, M.: Zum Abdichtverhalten von Radialwellendichtringen, Dissertation Universität Stuttgart, 1986
- [7] Schmitt, W.: Motorabdichtungen mit Radialwellendichtringen (RWDR), Motoren, 1990
- [8] Sekulich, St.: Fortschritte bei den radialen Lippen-Dichtungen aus <<Teflon>>, The Journal of Teflon Vol 11 No. 1, DuPont, 1970
- [9] Kayser, E.: Überblick über die Entwicklung von Radial-Wellendichtringen, O+P 21 Nr. 6, 1977
- [10] Schmidt, W.: Radial Shaft Seal with PTFE Sealing Lip, SAE Technical Paper Series 852347, 1985
- [11] Jenisch, B.: Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen, Dissertation Universität Stuttgart, 1991
- [12] Bond, R.: Entwicklungen auf dem Gebiet der Kurbelwellenabdichtungen, Motortechnische Zeitschrift 46 7/8, 1985
- [13] Uhrner, K.-J.; Gust, H.: Innovative Dichtungslösungen im Antriebsstrang, 2. CTI Fachkonferenz Dichtungen im Antriebsstrang, Mannheim, 11. und 12. Dez. 2006
- [14] Kletschkowski, T.; Schomburg, U.: Experimentelle Untersuchungen von PTFE-Manschettendichtungen mit luftseitig montierten Lippenende, 12th International Sealing Conference, Stuttgart, 2002, S. 156-166
- [15] Kurth, J.: PTFE Kurbelwellendichtung der 4. Generation, CTI Fachkonferenz "Dichtungen im Antriebsstrang", München 2005
- [16] Bock, E.; Guth, W.: Temperaturabsenkung im Dichtspalt von Radialwellendichtringen, Dichtungstechnik, Heft1, Juni 1999
- [17] Firmenschrift ElringKlinger Kunststofftechnik GmbH: Elring-PTFE Eigenschaften und Anwendungen eines außergewöhnlichen Werkstoffes. Bietigheim-Bissingen, 2003
- [18] Hoepke, E.: Motor und Kurbelwelle als Schwingungssystem und deren Einfluss auf die Kurbelwellen-Dichtungen, Motortechnische Zeitschrift 42 7/8, 1981
- [19] Bock, E.: Dichtmechanismus von Dichtungen in Verbrennungsmotor und Antriebsstrang, CTI Fachkonferenz "Dichtungen im Antriebsstrang", München 2005
- [20] Reichert, J.; Yvon, J.–B.: Dichtsysteme für Kurbelwellen-Abdichtungen mit integriertem Sensor und Multipolrad. VDI-Berichte Nr. 1579, 2000, S.177-187
- [21] Kletschkowski, T.: Finite Thermoviskoplastizität von Kompositen aus PTFE mit Zug-Druck-Asymmetrie und plastischem Gedächtnis, Dissertation Universität der Bundeswehr Hamburg, 2004
- [22] Britz, St.: Ein Beitrag zur Erfassung der Funktionsprinzipien dynamischer Wellendichtungen unter besonderer Berücksichtigung des Radialwellendichtrings, Dissertation Universität Kaiserslautern, 1988
- [23] Fritzsche, R.: Ein Beitrag zu Untersuchung des Verhaltens von Radialwellendichtringen aus Elastomer- und Polytetrafluoräthylen-Material bei speziellen Betriebsbedingungen, Dissertation Universität Kaiserslautern, 1994
- [24] Hoffmann, Ch.: Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen, Dissertation Universität Stuttgart, 1995
- [25] Pohl, H.: Computerunterstützte und experimentelle Untersuchungen von Manschettendichtungen aus glasfaserverstärktem PTFE-Compound, Dissertation Universität der Bundeswehr Hamburg, 1999
- [26] Toth, D.; Hatch, F.; Upper, G.: Advanced Analytical Techniques for the Optimization of PTFE Seals, SAE Technical Paper Series 930531, 1993

- [27] Sui, H.: Beitrag zur Simulation von PTFE-Wellendichtmanschetten in Verbrennungsmotoren, Dissertation Universität der Bundeswehr Hamburg, 1999
- [28] Olbrich, M.: Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen, Dissertation Universität Stuttgart, 2002
- [29] Debler, Ch.: Bestimmung und Vorhersage des Verschleißes für die Auslegung von Dichtungen, Dissertation Universität Hannover, 2005
- [30] Weber, D.: Haas, W.: Untersuchung und Simulation des Verschlei
  ßverhaltens an PTFE-Manschettendichtungen mit unterschiedlich gestalteten Dichtkanten, 14th ISC, Stuttgart, 10.-11. Oktober 2006
- [31] Haiser, H. B.: PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt, bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen, Dissertation Universität Stuttgart, 2001
- [32] Firmenschrift Freudenberg Dichtungs- und Schwingungstechnik KG: Technische Beschreibung Radiameter nach DIN 3761, Weinheim, 1997
- [33] Deutsches Institut für Normung: DIN 3760, Radial-Wellendichtringe, 1996
- [34] Nißler, U.: Konstruktion einer Einzeleinrichtung für Radialwellendichtringe, unveröffentlichte Studienarbeit, Institut für Maschinenelemente, Uni-Stuttgart, 2000
- [35] Bauer, F.; Haas, W.: PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille Funktionsweise und Alternativen, FKM-Forschungsheft 291, Frankfurt/Main 2006
- [36] Deutsches Institut für Normung: DIN 3761, Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge, 1984
- [37] Kunstfeld, Th.: Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen, Dissertation Universität Stuttgart, 2005
- [38] Buhl, St.: Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenlauffläche und Fluid, Dissertation Universität Stuttgart, 2006
- [39] Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH: Sicherheitsdatenblatt Titan Supersyn SAE 0W-30. Mannheim, 2004
- [40] Deutsches Institut für Normung: DIN 50014, Normalklimate, 1985
- [41] Symons, J. D.: Elastohydrodynamic Sealing Systems, SAE Technical Paper Series, 730049, 1973
- [42] Reichert, J.: Radialwellendichtringe für den Einsatz in Kraftfahrzeugen, Entwicklungs- und Prüfmethoden, Seminar der Technischen Akademie Wuppertal: Elastomere als Dichtungsmaterialien, 17.03 –18.03,1999 Altdorf b. Nürnberg
- [43] Bauer, F.; Haas, W.: PTFE lip seals with spiral groove The penetration behaviour, hydrodynamic flow and back pumping mechanisms, BHR-Group, 18th Int. Conference on Fluid Sealing, Antwerp, Belgium, 12 - 14 Oct. 2005
- [44] Bauer. F.; Haas, W.: Moderne Untersuchungsmethoden f
  ür Radialwellendichtringe am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille, Dichtungstechnik Jahrbuch 2006, H
  üthig-Verlag
- [45] Daubner, A.: Grundlagenuntersuchungen an Kurbelwellenabdichtungen, unveröffentlichte Studienarbeit, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2006
- [46] Bauer, F.; Haas, W.: PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille Funktions- und Wirkungsweise, VI. Hamburger Dichtungstechnisches Kolloquium: Dynamische Dichtungen, 08./ 09. Juni 2006
- [47] Bauer, F.; Haas, W.: Erweiterung der Einsatzgrenzen von PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille, 14th International Sealing Conference, VDMA, Stuttgart, Oct. 10-11, 2006

#### Lebenslauf

Frank Bauer
23.08.1975, Stuttgart
Deutsch
Verheiratet
Rolf Bauer
Durda Bauer, geb. Varović

#### Schulbildung

08/1992 - 06/1995	Naturwissenschaftlich Technisches Gymnasium
	Kerschensteinerschule Stuttgart
06/1995	Abschlüsse: Fachgebundene Hochschulreife
	Staatlich geprüfter Physikalisch-technischer Assistent

#### Ersatzdienst

07/1995 - 09/1996 Ev. Diakonissenkrankenhaus Stuttgart

#### Studium

10/1996 - 02/2002	Universität Stutte	gart
	Fachrichtung:	Maschinenwesen
	Schwerpunkte:	Konstruktionstechnik und Kunststoffkunde
	Diplomprüfung:	19.02.2002

#### **Beruflicher Werdegang**

Seit 03/2002 Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Maschinenelemente (IMA)/ Universität Stuttgart

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	HK Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufen-
1	TI.IX. Wuller	den Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszylinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger
		Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hoch- viskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	KH. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Bei-
		trag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnen mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfah- rungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. DrIng. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellen-
12	E Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hoch-
12	L. I dello	druckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außen- verzahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestütz- ten 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 Ontimieren und Identifizieren von Mehrkörnersys-
21	III IIuong	temen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsop-
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE- Wellendichtungen
26	P Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
20	Hirschmann II a	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr. Ing. Kurt Talke
28	B Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenhau-Produkten
29	G Lechner	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	KH.Hirschmann; B. Bertsche	
30	HJ. Prokon	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytet-
	r,r,	rafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Ein- flankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordina- tentasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation

Nr.	Verfasser	Titel
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfas-
		sung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugtei-
		len bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz: W. Haas:	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenhau, Konstruktionska-
07	H.K. Müller	talog
40	B Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Flastomer und Polytetrafluorethylen
40	G Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
41 12	$\Delta$ Herzog	Frweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von
72	A. Heizog	Mahrkoordinatanmaßgarätan
13	T Roser	Wissanshasiartas Konstruiaran am Baisnial von Gatriahan
43	D Wäschle	Entlestete Wellendichtringe
44	7 Wu	Unralaich und Entwicklung von Mathodan zur Zuwarlägsigkaiteanaluse von Systeman
45	Z. Wu W. Dichtor	Nichtwiederhelberer Schlag von Wölzlagereinheiten für Festnlettenleufwerke
40	R Durst	Rechnerunterstützte Nuterofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Opti
47	K. Duist	miarung von Gowindowarkzougon
19	C S Müller	Des Abdishtverhelten von Gleitringdishtungen aus Siliziumkerhid
40	W. E. Kriog	Untersuchungen en Cehöuseebdichtungen von hechhelesteten Getrieben
49 50	WE. KIIEg	Zur Krümmungetheorie von Hüllflöchen und ihrer Anwendung hei Werkzeugen und
30	J. OIIII	Zur Krunnnungsmeone von Hunnachen und mier Anwendung ber werkzeugen und
51	M In the	Verzählungen
51	M. Jackle M. Köchling	Entitutiung von Getrieden Deitreg zur Auslagung von gerechterzehnten Stimprödern mit helighiger Flankenform
52 52	M. Koching	Seheder of stream and Wäleker takter wit Kärner shall Deference and
55	M. Hildebrandt	Schadenstrunerkennung an walzkontakten mit Korperschall-Keierenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im verbund von Experiensystem, CAD-System, Datenbank und wieder-
= =	N. Changen	nonensuchsystem
55	N. Stanger	Zuundinginei aluiteen alue uun hannalanan Suuteman am Deisniel DKW Automotilee
30	K. Lelik	zuverlassigkensanaryse von komplexen Systemen am Deispier PKw-Automatikge-
57	U Naunhaimar	uicoc Baitrag zur Entwicklung von Stufanlosgatrichen mittels Febrsimulation
58	G Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrödern
50	G. Wijstenhagen	Beitrag zur Ontimierung des Entlasteten Wellendichtrings
5) 60	D. Wustenhagen D. Brodback	Experimentalle und theoretische Untersuchungen zur Beuteilzuverlössigkeit und zur
00	I. DIOUDEEK	Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch Hoffmann	Untersuchungen an PTEE Wellendichtungen
62	V Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flä
02	v. Hettien	chendichtungen
63	K Riedl	Pulsationsontimierte Außenzahnradnumpen mit ungleichförmig übersetzenden Rad-
05	IX. Iticul	naaren
64	D Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnradnumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgehaute Fahrzeugtriebstränge
05	1. 50011	und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Ontimierung der Produktaualität
67	K. Housel	Qualitätestaigerung von Planetangetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
60 60	H Zelßmann	Ontimierung des Batriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	F Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S Ring	Anwendung der Verzähnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Work
/1	5. King	zaugschleifans
72	M Klönfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverhindungen von Getriebegehäusen
73	C-H Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetriehen
74	W Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenhau unter besonderer Berücksichtigung der
/ T	··· <b>1100</b>	Fanglabyrinthe
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben

Nr.	Verfasser	Titel
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit un-
		scharfen 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 Wälz-
		fräserherstellung 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
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 tech-
		nischer 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 Bau-
		teile
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 Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels
		Simulation
105	B. Luo	Uberprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau
		mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuver-
		lässigkeit 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 Vorkenn-
		tnissen
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
		technischer Systeme

Nr.	Verfasser	Titel
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 Be-
		rücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube