

Mathias Klaiber

**Betriebs- und Benetzungseigenschaften  
im Dichtsystem Radial-Wellendichtung  
am Beispiel von additivierten  
synthetischen Schmierölen**

**D 93**  
**ISBN 978-3-936100-50-1**

**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







# **Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additivierten synthetischen Schmierölen**

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

Vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Mathias Klaiber**  
geboren in Ichenhausen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Juli 2013

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart  
2013



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart. Ein Teil der Untersuchungen war Bestandteil eines durch das Forschungskuratorium Maschinenbau e. V. geförderten Forschungsprojekts.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas, Leiter des Bereichs Dichtungstechnik am Institut für Maschinenelemente. Sein mir entgegengebrachtes Vertrauen, das Fordern und Fördern waren die Grundlage, auf welcher diese Arbeit entstanden ist.

Herrn Professor Dr.-Ing. Stefan Böttinger, stellvertretender geschäftsführender Direktor des Instituts für Agrartechnik an der Universität Hohenheim, danke ich für sein Interesse, für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Maschinenelemente bedanke ich mich für Ihre Unterstützung und den freundschaftlichen Umgang miteinander. Diesen teilweise weit über das kollegiale Miteinander hinausgehenden, nicht selbstverständlichen Umgang habe ich stets sehr geschätzt.

Bedanken möchte ich mich auch bei den wissenschaftlichen Hilfskräften und Studierenden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hervorzuheben ist hierbei der langjährige, verlässliche Einsatz von Herr Thier.

Meiner Partnerin Anja danke ich ganz besonders herzlich. Zu sehen, wie Sie eigene Interessen zurückstellt und mich vorbehaltlos unterstützt, war Verpflichtung und Antrieb, dieses Arbeit ohne Ablenkung, zeiteffizient zu verfassen.

Bachhagel, im August 2013

Mathias Klaiber



# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Formelzeichen und Abkürzungen.....</b>  | <b>III</b> |
| <b>Abstract .....</b>  | <b>VI</b>  |
| <b>1 Einleitung .....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Zielsetzung.....   | 2          |
| 1.2 Aufbau der Arbeit.....   | 3          |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Technik .....</b>  | <b>5</b>   |
| 2.1 Das Dichtsystem Radial-Wellendichtung .....  | 5          |
| 2.1.1 Der Radial-Wellendichtring aus Elastomer .....   | 5          |
| 2.1.2 Die Gegenlaufläche .....   | 8          |
| 2.1.3 Das abzudichtende Fluid.....   | 9          |
| 2.2 Aktive Förderwirkung des Dichtsystems .....  | 12         |
| 2.3 Reibung und Fluidfilmhöhe .....  | 17         |
| 2.4 Benetzung .....  | 20         |
| 2.5 Oberflächenkennwerte .....   | 27         |
| <b>3 Prüfeinrichtungen.....</b>  | <b>30</b>  |
| 3.1 Versuchseinrichtungen.....   | 30         |
| 3.1.1 Dauerlaufprüfstand.....  | 30         |
| 3.1.2 Einzeldichtungsprüfstand mit Reibmomentmesseinrichtung.....                              | 32         |
| 3.1.3 Behälter zur Einlagerung von Oberflächenproben zur Bestimmung des Benetzungsfaktors..... | 33         |
| 3.2 Messgeräte und Hilfsmittel .....   | 34         |
| 3.2.1 Radialkraftmessgerät .....   | 34         |
| 3.2.2 Kontaktwinkelmessgerät.....  | 35         |
| 3.2.3 Digitalkamerasystem .....  | 37         |
| 3.2.4 Optisches Oberflächenmessgerät.....  | 37         |
| 3.2.5 Taktiles Rauheitsmessgerät .....   | 39         |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.3      | Oberflächenreinigungsgerät .....   | 40         |
| <b>4</b> | <b>Untersuchungen und Ergebnisse .....</b>                                 | <b>42</b>  |
| 4.1      | Komponenten der untersuchten Dichtsysteme .....                            | 42         |
| 4.2      | Voruntersuchungen an Komponenten der Dichtsysteme .....                    | 45         |
| 4.3      | Reibmomentmessungen .....  | 47         |
| 4.4      | Förderwertmessungen .....  | 52         |
| 4.5      | Verschleißuntersuchungen .....   | 58         |
| 4.6      | Bestimmung der Benetzungseigenschaften .....                               | 65         |
| 4.6.1    | Bestimmung des Kontaktwinkels .....  | 65         |
| 4.6.2    | Bestimmung des Benetzungsfaktors .....                                     | 70         |
| <b>5</b> | <b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>                                     | <b>85</b>  |
| 5.1      | Betrachtung der Einflussfaktoren der Untersuchungen .....                  | 85         |
| 5.2      | Grundlage der Korrelationen .....  | 89         |
| 5.3      | Korrelationen zwischen den Betriebseigenschaften .....                     | 90         |
| 5.3.1    | Korrelation zwischen Reibmoment und Förderwert .....                       | 90         |
| 5.3.2    | Korrelation zwischen Förderwert und Verschleiß .....                       | 92         |
| 5.3.3    | Korrelation zwischen Reibmoment und Verschleiß .....                       | 93         |
| 5.4      | Korrelationen zwischen den Betriebs- und den Benetzungseigenschaften ..... | 94         |
| 5.4.1    | Korrelation zwischen Reibmoment und Benetzungsfaktor .....                 | 95         |
| 5.4.2    | Korrelation zwischen Förderwert und Benetzungsfaktor .....                 | 96         |
| 5.4.3    | Korrelation zwischen Verschleiß und Benetzungsfaktor .....                 | 97         |
| 5.4.4    | Korrelation zwischen Reibmoment und Kontaktwinkel .....                    | 99         |
| 5.4.5    | Korrelation zwischen Förderwert und Kontaktwinkel .....                    | 100        |
| 5.4.6    | Korrelation zwischen Verschleiß und Kontaktwinkel .....                    | 101        |
| 5.4.7    | Korrelation zwischen Benetzungsfaktor und Kontaktwinkel .....              | 102        |
| 5.5      | Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationen .....                     | 103        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                                  | <b>112</b> |
| <b>7</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>116</b> |
| <b>8</b> | <b>Anhang .....</b>  | <b>123</b> |

## Formelzeichen und Abkürzungen

| <b>Zeichen</b>       | <b>Einheit</b>           | <b>Bedeutung</b>                       |
|----------------------|--------------------------|--|
| $A$                  | $\text{m}^2$             | Fläche                                 |
| $b$                  | $\text{mm}$              | Berührbreite des RWDR                  |
| $BF$                 | -                        | Benetzungsfaktor                       |
| $d$                  | $\text{mm}$              | Systemdurchmesser des Dichtsystems     |
| $F_r$                | $\text{N}$               | Radialkraft                            |
| $FW_{RWDR}$          | $\text{g/h}$             | Förderwert des RWDR                    |
| $FW_{\text{System}}$ | $\text{g/h}$             | Förderwert des Dichtsystems            |
| $FW_{\text{Welle}}$  | $\text{g/h}$             | Förderwert der Welle                   |
| $f$                  | -                        | Reibungszahl                           |
| $G$                  | -                        | Gümbelzahl                             |
| $h$                  | $\mu\text{m}$            | Mittlere Fluidfilmhöhe                 |
| $l_r$                | $\text{mm}$              | Einzelmessstrecke nach DIN EN ISO 4287 |
| $l_t$                | $\text{mm}$              | Taststrecke nach DIN EN ISO 4287       |
| $M_R$                | $\text{Nm}$              | Reibmoment des Dichtsystems            |
| $n$                  | $1/\text{min}$           | Drehzahl der Welle                     |
| $P$                  | $\text{W}$               | Reibleistung des Dichtsystems          |
| $p_m$                | $\text{N}/\text{mm}^2$   | Mittlere Flächenpressung               |
| $R_a$                | $\mu\text{m}$            | Arithmetischer Mittenrauwert           |
| $R_{\text{max}}$     | $\mu\text{m}$            | Maximale Rautiefe                      |
| $R_z$                | $\mu\text{m}$            | Gemittelte Rautiefe                    |
| $S$                  | -                        | Benetzungskoeffizient                  |
| $S_{mr}(c)$          | %                        | Materialanteil in der Höhe c           |
| $S_{pd}$             | $1/\text{mm}^2$          | Spitzendichte der Oberfläche           |
| $S_z$                | $\mu\text{m}$            | Maximale Höhe der Oberfläche           |
| $W$                  | $\text{J}$               | Arbeit                                 |
| $\alpha$             | $^\circ$                 | Ölseitiger Kontaktflächenwinkel        |
| $\beta$              | $^\circ$                 | Luftseitiger Kontaktflächenwinkel      |
| $\eta$               | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ | dynamischen Viskosität                 |

|          |                    |                                 |
|----------|--------------------|---------------------------------|
| $\theta$ | °                  | Kontaktwinkel                   |
| $\nu$    | mm <sup>2</sup> /s | Kinematische Viskosität         |
| $\sigma$ | J/m <sup>2</sup>   | Oberflächenenergie              |
| $\omega$ | 1/s                | Winkelgeschwindigkeit der Welle |

| <b>Indices</b> | <b>Bedeutung</b>               |
|----------------|--------------------------------|
| <i>gl</i>      | gasförmig/flüssig (gas/liquid) |
| <i>gs</i>      | gasförmig/fest (gas/solid)     |
| <i>l</i>       | flüssig (liquid)               |
| <i>ls</i>      | flüssig/fest (liquid/solid)    |
| <i>s</i>       | fest (solid)                   |

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>                                    |
|------------------|---|
| ACM              | Acrylat-Kautschuk                                   |
| AF               | Anti Foam   |
| Al               | Aluminium   |
| AO               | Anti Oxidant  |
| AW               | Anti Wear   |
| BF               | Benetzungsfaktor                                    |
| C                | Kohlenstoff   |
| CAD              | Computer Aided Design                               |
| CARMEN           | Computer Aided Roughness Measurement and Evaluation |
| Cr               | Chrom   |
| Cu               | Kupfer  |
| EP               | Extreme Pressure                                    |
| FM               | Friction Modifier                                   |
| FPM              | Fluor-Kautschuk                                     |
| FW               | Förderwert  |
| HRC              | Hardness Rockwell Cone (nach DIN EN ISO 6508-1)     |
| HSK              | Hohlschaft-Kegel (nach DIN 69893)                   |
| KW               | Kontaktwinkel                                       |
| MBN              | Mercedes-Benz Norm                                  |



---

|          |                           |
|----------|---------------------------|
| Mn       | Mangan                    |
| Mo       | Molybdän                  |
| NBR      | Nitril-Butadien-Kautschuk |
| Ni       | Nickel                    |
| P        | Phosphor                  |
| PAO      | Polyalphaolefin           |
| PG       | Polyglycol                |
| RM       | Reibmoment                |
| RWDR     | Radial-Wellendichtring    |
| S        | Schwefel                  |
| Si       | Silizium                  |
| Std.abw. | Standardabweichung        |
| V        | Verschleißverhalten       |
| VI       | Viskositäts Index         |
| VMQ      | Silikon-Kautschuk         |

## Abstract

The sealing system of a radial shaft seal consists of three components: the shaft surface, the radial shaft seal and the fluid. These kind of sealing systems have been used since more than 70 years. During the last decades the fluids have changed more and more. An increasing usage of synthetic base oils, which contain an increasing number of additives, can be recognized. The influence of these fluids as part of the sealing systems on the functional behavior of the systems is not known.

One goal of this thesis was to determine the influence of synthetic fluids and their additives onto the functional properties of a sealing system. These functional properties are the friction torque, the pumping rate and the wear of the radial shaft seal. All investigations have been done with radial shaft seals made from NBR and FPM. Another goal of this thesis was to quantify the wetting behavior of the fluids. Therefore two wetting properties have been examined: the contact angle and the wetting factor. The contact angle was measured with the fluids on the surface of the radial shaft seals made from both elastomers. Therefore wetting interactions between the fluid and the elastomeric surfaces were detected. The wetting factor was measured with the fluids on the flat surface of a sample made from steel. The wetting factor describes the change of the wetting area after a period of some hours. In this investigations the time was at least two to a maximum of 20 hours. There was also the possibility to do these investigations at different temperatures between 20 and 90°C. The wetting factor was used to represent the wetting interactions between the fluids and the shaft surface, made from steel.

Synthetic fluids have been used in all investigations. Their base oil is polyglycole or polyalphaolefine. Each fluid contains of a base oil and one single additive. Additionally the base oils without any additive have been used. In sum 19 different fluids were part of the investigations. The results of the investigations of the named functional und wetting properties show an influence of the base oils. Higher friction torques, pumping rates and wear of the radial shaft seal was measured with fluids based on polyglycole. The contact angles were also higher and the wetting factors were lower with this kind of base oil. Apart from the influence of the base oils, the single additives have shown an influence on the properties. Some additives have always an increasing influence on one property, others always have a decreasing influence.

The main goal was to describe all connections between the five functional and wetting properties. All results have been evaluated regarding to the different fluids. This final step was based on the results of the previous investigations, which had been done separately for every property. The first result is that the characteristic of every connection between two properties is similar, despite of the different elastomers.

In sum there are five different properties. Looking at three arbitrary properties, there are also three connections between them. Assumed that the characteristics of two connections are known, the characteristic of the unknown third connection must follow a constraint. All determined results have led to an internally consistent overall context. Because of this the results confirm each other.

The characteristics of the connections between the friction torque, the pumping rate, the wear of the radial shaft seal and the contact angle are equal. The characteristic of the connection of the wetting factor is opposed to all the named properties. While the friction torque, the pumping rate, the wear and the contact angle increases, the wetting factor decreases at the same rate. The characteristic of the connection of the contact angle and the wetting factor is opposed. Both properties are describing the endeavor of a fluid of wetting a surface. The higher the endeavor of a fluid is, the lower must be the contact angle and the higher must be the wetting factor. The opposed characteristic of their connection is conclusive. This result is remarkable because of the different materials of the surfaces. Different fluids have different endeavors of wetting a surface, but they respectively show the same endeavor on both surfaces which are made from different materials.

The friction torque and the wear are dependent on the thickness of the fluid film in the sealing contact. A high pumping rate should reduce the thickness of the fluid film. Finally the assumption can be formulated, that the endeavor of a fluid of wetting a surface is the opponent of the pumping rate. Then the thickness of the fluid film and at the end the friction torque and the wear of the radial shaft seal, are dependent on the wetting properties of the fluid.



# 1 Einleitung

Wellendurchtrittsstellen von rotierenden Wellen müssen in unterschiedlichsten technischen Anwendungen abgedichtet werden. Hierfür werden oftmals Radial-Wellendichtringe aus Elastomer verwendet. Deren Hauptaufgabe ist das Austreten des abzudichtenden Fluids zu verhindern. Weiterhin ist oftmals das Eindringen von Feuchtigkeit und Schmutz zu unterbinden /1/.

Der Radial-Wellendichtring wird in seiner grundsätzlichen Form aus Elastomer bereits seit 1936 hergestellt /2/. Ein Zeichen für die weite Verbreitung von Bauteilen ist zumeist, wenn sich die Normung mit diesen befasst. So sind Radial-Wellendichtringe Inhalt der DIN 3760 /3/. Diese Norm geht auf das Jahr 1962 beziehungsweise ursprünglich auf die DIN 6503 aus dem Jahre 1950 zurück /4/. Man kann also bei Radial-Wellendichtringen getrost von Standardbauteilen sprechen, welche bereits seit Jahrzehnten Anwendung finden.

Auf dem Gebiet der Schmieröle, welche im Regelfall das abzudichtende Fluid im Dichtsystem darstellen, ist in der jüngeren Vergangenheit eine enorme Dynamik zu verzeichnen /5/. Die Hauptaufgabe dieser Fluide ist die Schmierung von Metall-Metall-Reibpaarungen, wie beispielsweise in Wälzlagern oder in Zahnradstufen. Für diese Aufgabe werden die Fluide optimiert. Ein größerer Teil des Leistungspotenzials von Aggregaten kann durch die Verwendung von hochwertigeren, synthetischen Grundölen ausgeschöpft werden /6/. Eine weitere Leistungssteigerung wird durch die Additivierung der Schmierstoffe realisiert /7/. Hierzu werden unterschiedliche Additive gezielt eingesetzt, um einzelne Eigenschaften der Schmierstoffe zu verbessern. Durch diese Trends ist eine immer größere Vielzahl an unterschiedlichen Fluiden im Einsatz.

Für die Funktion eines Radial-Wellendichtrings ist das Zusammenspiel mit dem abzudichtenden Fluid unabdingbar. Das Fluid muss am Austritt gehindert werden. Gleichzeitig dient dieses aber auch als Schmierstoff im Reibkontakt zwischen dem Radial-Wellendichtring und der Gegenauflfläche. Ohne das Fluid wäre der Betrieb des Radial-Wellendichtrings nur kurzzeitig möglich. Der Aufbau eines Schmierfilms im Reibkontakt ist demnach essenziell /8/.

Durch die beinahe unüberschaubare Menge an unterschiedlichen Fluiden ist es kaum möglich, den Einfluss von allen auf das Dichtsystem Radial-Wellendichtung zu untersuchen. Stattdessen kann die Lösung des Problems darin gefunden werden, dass einzelne Fluide mit einer bekannten Zusammensetzung untersucht werden. Damit ausgehend von

den Ergebnissen mit diesen Fluiden, ein weitreichendes Verständnis abgeleitet werden kann, sollen diese Fluide jeweils aus einem Grundöl und einem einzelnen Additiv bestehen.

Bedingt durch ihren chemischen Aufbau sind Additive im Regelfall polare Moleküle. Dadurch haben sie das Bestreben, sich an metallischen Oberflächen anzulagern /9/. Bei einigen Additiven ist diese Adsorption an der Oberfläche Grundlage ihres Wirkmechanismus. Dadurch soll ein stabilerer Schmierfilm aufgebaut werden /10/. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Anlagerung auch an der Gegenlauffläche des Dichtsystems vonstatten geht. Inwiefern die unterschiedlichen Additive den Aufbau des Schmierfilms unter der Dichtkante des Radial-Wellendichtrings beeinflussen, ist bisher nicht bekannt. Nachdem die Additive oberflächenaktiv sind, stellt sich ferner die Frage, wie diese die Benetzungseigenschaften der Fluide, in welchen sie gelöst sind, beeinflussen. Ausgehend davon eröffnet sich die Frage, wie die Benetzungseigenschaften in Zusammenhang mit den grundsätzlichen Betriebseigenschaften des Dichtsystems Radial-Wellendichtung stehen.

## 1.1 Zielsetzung

Abgeleitet von der beschriebenen Ausgangssituation ergibt sich die Zielsetzung für die vorliegende Arbeit. Es soll geklärt werden, wie sich synthetische, additivierte Fluide auf die grundsätzlichen Betriebseigenschaften des Dichtsystems Radial-Wellendichtung auswirken. Diese grundsätzlichen Betriebseigenschaften sollen durch das Reibmoment, den Förderwert und das Verschleißverhalten des Dichtsystems beschrieben werden.

Die Benetzungseigenschaften der Fluide sollen erfasst werden. Hierzu wird der Kontaktwinkel zwischen Fluid und Oberfläche gemessen. Die Fähigkeit der Fluide, eine Oberfläche über einen längeren Zeitraum zu benetzen, soll ebenfalls bewertet werden. Hierzu wird eine eigenständige Untersuchungsmethode angewendet, deren Eignung zuvor bestätigt werden muss. Das Ergebnis der Untersuchungen soll ein Benetzungsfaktor sein, welcher die Benetzungsfähigkeit eines Fluids angibt.

Die Arbeit hat das Ziel, die Zusammenhänge zwischen den grundsätzlichen Betriebseigenschaften des Dichtsystems und den Benetzungseigenschaften des Fluids zu bestimmen. Dies sind im Einzelnen die Zusammenhänge zwischen dem Förderwert, dem Reibmoment und dem Verschleißverhalten untereinander und jeweils zwischen diesen und den Benetzungseigenschaften. Die Benetzungseigenschaften werden durch den Benetzungsfaktor und den Kontaktwinkel erfasst. Abbildung 1.1 stellt diese Zusammenhänge anschaulich dar.

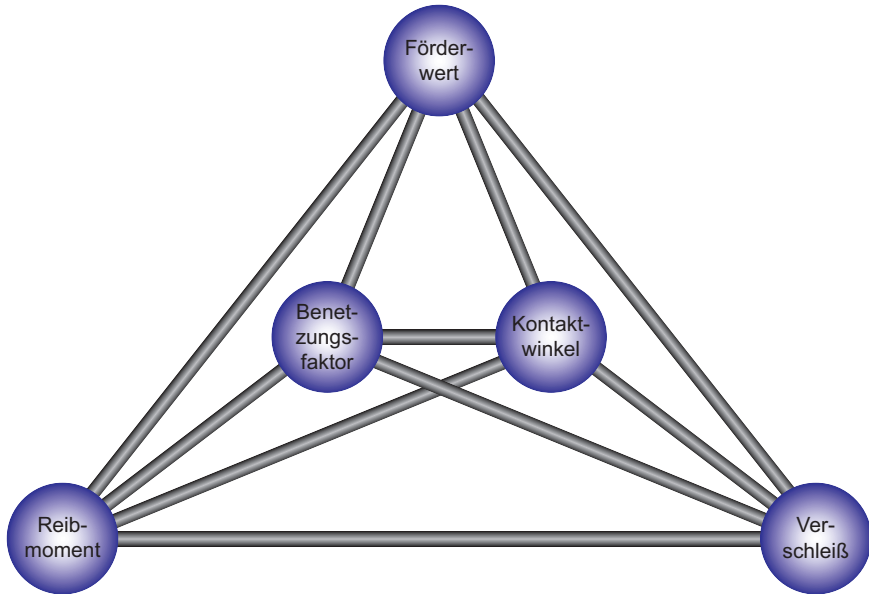


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Zusammenhänge der untersuchten Eigenschaften

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die Herangehensweise um das formulierte Ziel zu erreichen, entspricht grundsätzlich der inhaltlichen Abfolge dieser Arbeit. Es werden zunächst die Grundlagen und der Stand der Technik erörtert. Dies beinhaltet die einzelnen Komponenten des Dichtsystems Radial-Wellendichtung und die relevanten Betriebs- und Benetzungseigenschaften.

Nach der Vorstellung der verwendeten Prüfeinrichtungen werden die durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse vorgestellt. Diese dynamischen Untersuchungen an realen Dichtsystemen sind alle getrennt voneinander, mit einer jeweils eigenständigen Zielsetzung durchgeführt worden. Diese separate Durchführung ist notwendig, weil sich beispielsweise die Einbausituation des Dichtsystems bei den Förderwertmessungen von jener bei den Reibmomentmessungen grundlegend unterscheidet. Der Prüfstands Aufbau für die Reibmomentmessungen unterscheidet sich aufgrund anderer Anforderungen von dem der Verschleißuntersuchungen, welche grundsätzlich Dauerlaufuntersuchungen sind. Die jeweils verwendeten Dichtsysteme, mit den Komponenten Radial-Wellendichtring, Gegen-

lauffläche und abzudichtendes Fluid, wurden durchgängig artgleich gewählt. Die jeweiligen Dichtsysteme setzten sich aus unbenutzten, gleichen Komponenten zusammen - sind artgleich - aber es handelt sich nie um ein und dasselbe Dichtsystem. Dadurch ist die notwendige Grundlage gegeben, um die Ergebnisse untereinander vergleichen zu können. Dies erfolgt in der Diskussion der Ergebnisse. Die Gliederung der zentralen Inhalte dieser Arbeit zeigt Abbildung 1.2.

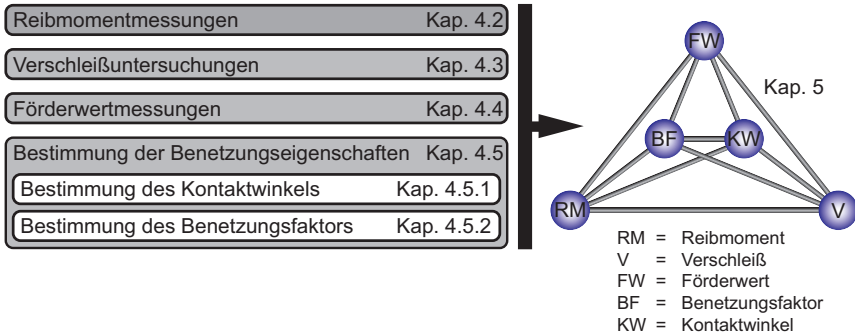


Abbildung 1.2: Gliederung der zentralen Inhalte der Arbeit



## **2 Grundlagen und Stand der Technik**

Der Aufbau des Dichtsystems Radial-Wellendichtung ist Inhalt der folgenden Abschnitte. Ausgehend davon werden die Funktionsweise und die tribologischen Grundlagen aufgegriffen. Darin eingebettet werden die Grundlagen der Benetzungseigenschaften der Fluide erörtert.

### **2.1 Das Dichtsystem Radial-Wellendichtung**

Im Folgenden wird die Funktion des Dichtsystems Radial-Wellendichtung erörtert. Das Dichtsystem besteht im Wesentlichen aus vier Komponenten. Diese sind der Radial-Wellendichtring (RWDR), die Gegenauflfläche, das abzudichtende Fluid und das Dichtungsumfeld. Das Dichtungsumfeld stellt hierbei eine sehr anwendungsspezifische Komponente dar. Gemeint sind Bauteile, welche in direkter Umgebung zum RWDR angeordnet sind. Beispielsweise können dies Wälz- oder Gleitlager, Zahnradstufen oder auch das Gehäuse in ihrer jeweiligen grundsätzlichen Gestaltung sein. Diese Bauteile können die Funktions des Gesamtsystems stark beeinflussen /11/. Durch die Fokussierung dieser Arbeit auf den Erkenntnisgewinn im Bereich des Schmierstoffeinflusses, kommt dem Dichtungsumfeld eine untergeordnete Rolle zu. Deshalb wird das Dichtungsumfeld in sämtlichen dynamischen Untersuchungen vereinheitlicht. In der Prüfstands Umgebung sind keine relevanten Bauteile in der Nähe der Dichtzone angeordnet. Die Funktionsweise des Gesamtsystems wird damit so wenig wie möglich und vor allem immer gleich beeinflusst. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf nicht näher auf das Dichtungsumfeld eingegangen. Die anderen drei Komponenten des Dichtsystems – der RWDR, die Gegenauflfläche und das abzudichtende Fluid - werden nachfolgend näher erörtert.

#### **2.1.1 Der Radial-Wellendichtring aus Elastomer**

Die unterschiedlichen Ausführungen von RWDR folgen grundsätzlich einem immer ähnlichen Aufbau, siehe Abbildung 2.1. Ein Versteifungsring dient als stabilisierendes Element. Daran anvulkanisiert und / oder diesen ganz umschließend, ist die Membran angeordnet. Der Aufbau der Membran erlaubt es der Dichtkante Bewegungen der Gegenauflfläche zu folgen. Durch radiale Aufweitung der Membran wird ein Teil, der für die Dichtfunktion

notwendigen Radialkraft aufgebracht. Eine Spiralfeder sorgt dafür, dass die Dichtkante im Stillstand ausreichend radial an die Gegenlauffläche gepresst wird. Im dynamischen Betrieb soll die Spiralfeder die Dichtkante der Gegenlauffläche nachführen und die Radialkraft, auch unter wechselnden thermischen Bedingungen und zunehmendem Verschleiß der Dichtkante, aufrecht erhalten.

Im Neuzustand ist die Dichtkante eines RWDR, im Rahmen der fertigungstechnischen Möglichkeiten, geometrisch als scharfe Kante ausgeführt. Durch das Aufschieben auf die Welle wird diese etwas abgeplattet. Während des Betriebes wird durch Verschleiß eine Verschleißfläche ausgebildet. Deren Breite bei RWDR mit einem Systemdurchmesser von 80 Millimeter, beispielsweise wenige Zehntel Millimeter beträgt. Durch den anfänglichen Verschleiß bilden sich auf der Verschleißfläche des RWDR hydrodynamisch förderfähige Strukturen aus. Dieser Einlaufvorgang, auch Konditionierung genannt, ist ein für die Funktionsweise eines derartigen Dichtsystems notwendiger Vorgang.

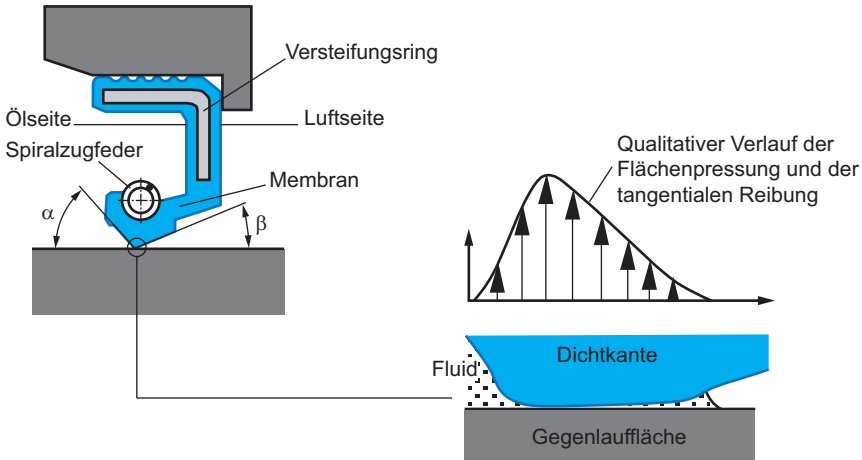


Abbildung 2.1: Das Dichtsystem Radial-Wellendichtung und der qualitative Verlauf der Flächenpressung und der tangentialen Reibung unter der Dichtkante

Die Dichtkante ist mit den unterschiedlichen Kontaktflächenwinkeln  $\alpha = 40^\circ \dots 50^\circ$  und  $\beta = 20^\circ \dots 30^\circ$  ausgebildet /1/. Diese ungleichen Kontaktflächenwinkel sind maßgeblich dafür verantwortlich, dass sich unter der Dichtkante eine asymmetrische Flächenpressung ausbildet. Das Pressungsmaximum ist zur Ölseite hin verschoben. Der Pressungsgradient ist dementsprechend auf der Ölseite größer. Analog zu dieser Verteilung der radialen Pressung, bildet sich im dynamischen Betrieb eine Verteilung der tangentialen, durch Reibung hervorgerufenen Schubspannungen aus /8/.

RWDR werden meist für Anwendungen zur drucklosen Abdichtung eingesetzt. Darüber hinaus gibt es Sonderausführungen, welche gegen verhältnismäßig geringe Drücke von bis zu fünf bar abdichten können /1/. Eine weitere Variationsmöglichkeit sind RWDR mit einer Schutzlippe aus Elastomer. Dieser im Querschnitt zumeist kegelige Ansatz, welcher auf der Luftseite des RWDR angebracht sein kann, hat die Aufgabe äußeren Schmutz / Staub und Fremd-Flüssigkeiten von der Dichtkante fern zu halten. In die Reihe der Sonderausführungen reihen sich auch RWDR mit sogenannten hydrodynamischen Dichthilfen ein. Dies sind luftseitig angebrachte, erhabene Strukturen, sogenannte Drallstege aus Elastomer. Die Strukturen reichen zumeist bis unmittelbar an die Dichtkante heran. Im dynamischen Betrieb sollen diese dafür sorgen, dass gegebenenfalls auftretende geringe Leckage zur Dichtkante hin abgelenkt wird. Dort wird ein gewisser Schleppdruck aufgebaut und das Fluid strömt zurück zur Ölseite. Die genannten Sonderausführungen sind allesamt sehr herstellere-spezifisch und nicht Bestandteil dieser Arbeit /12/, /13/. Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

### **Werkstoffe von RWDR**

Von dem Versteifungsring und der Spiralzugfeder abgesehen, werden RWDR aus Elastomer hergestellt. Dieses Material bildet mit der Gegenlauffläche den Dichtspalt und ist damit maßgeblich für die Eigenschaften des tribologischen Systems verantwortlich. Als Ausgangsstoff für Elastomerwerkstoffe dienen verschiedenartige Basispolymere. Diese bestimmen im Wesentlichen die Eigenschaften des späteren Elastomerwerkstoffs /12/. Den Basispolymeren werden im Regelfall Füllstoffe, Weichmacher, Verarbeitungshilfsmittel, Vulkanisationsmittel, Beschleuniger und andere Zusatzstoffe beigemischt /14/.

In der Normung (DIN 3761 /15/) werden zur Herstellung von RWDR vier Elastomere als Standardwerkstoffe genannt. Es handelt sich um Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR), Acrylat-Kautschuk (ACM), Silikon-Kautschuk (VMQ) und Fluor-Kautschuk (FPM). Diese unterscheiden sich z. B. in ihrer Beständigkeit gegen unterschiedliche Substanzen (zumeist Fluide) und durch die unterschiedlichen Einsatztemperaturen. Unter der Voraussetzung einer ausreichenden Schmierstoffversorgung der Dichtstelle, kann eine Vorentscheidung der Werkstoffauswahl auf Grundlage der Umfangsgeschwindigkeit an der Dichtstelle erfolgen. Abbildung 2.2 zeigt die zulässigen Bereiche für RWDR, aus den unterschiedlichen Werkstoffen, in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit und dem Wellendurchmesser. Die hauptsächlich lagerhaltigen und dementsprechend in der praktischen Anwendung verwendeten RWDR, sind aus NBR und aus FPM /12/, /13/. FPM ist hierbei der leistungsfähigere und teurere Werkstoff /16/.

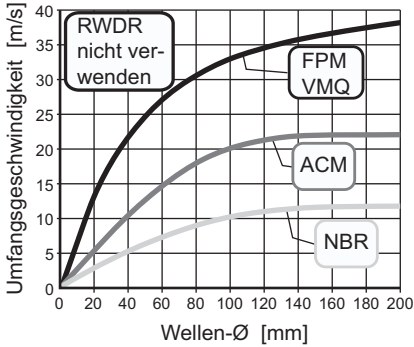


Abbildung 2.2: Empfohlene Einsatzgrenzen für RWDR aus Standardwerkstoffen /1/

### 2.1.2 Die Gegenlauffläche

Als Gegenlauffläche wird die zylindrische Fläche einer Welle verstanden, welche im tribologischen Kontakt mit dem RWDR steht. Die Welle selbst muss gewisse Rundheits- und Maßtoleranzen aufweisen /3/. Abgesehen von dieser geometrischen Formtoleranz, sollte die Oberfläche frei von Beschädigungen wie Poren, Kratzern oder Korrosionsspuren sein. Die Oberfläche muss eine ausreichende Härte aufweisen. Hier sind die Betriebsbedingungen (Schmutzbeaufschlagung und Umfangsgeschwindigkeit) ausschlaggebend für die Mindestanforderung. Es werden Werte von 45 HRC /3/ über 55 HRC /1/ bis 60 HRC /12/ genannt.

Für die elementare Funktion des Dichtsystems ist die mikroskopische Oberflächenbeschaffenheit der Gegenlauffläche jedoch wichtiger. Die gemittelte Rautiefe der Gegenlauffläche sollte zwischen  $R_z = 1 \dots 5 \mu\text{m}$  beziehungsweise der arithmetische Mittenrauwert zwischen  $R_a = 0,2 \dots 0,8 \mu\text{m}$  liegen. Auch sollte die maximale Rautiefe  $R_{max} = 6,3 \mu\text{m}$  nicht überschreiten /3/. Diese Bereiche haben sich empirisch als geeignet erwiesen, um eine Konditionierung des RWDR zu ermöglichen, ohne das im Dauerbetrieb ein zu großer Verschleiß des RWDR auftritt. Über diese, in Profilschnitten ermittelbaren Größen hinaus, ist die Orientierung der Strukturierung einer Gegenlauffläche zu beachten. Eine Gegenlauffläche sollte eine drallfreie Oberfläche aufweisen. Dies bedeutet, dass die vorhandenen Strukturen im Mittel rechtwinklig zur Wellenachse und damit parallel zur Berührfläche orientiert sind. Bei einer davon abweichenden Orientierung muss von einer Beeinflussung der aktiven Förderwirkung des gesamten Dichtsystems ausgegangen werden, siehe Kapitel 2.2. Dies kann bis zum Ausfall des Dichtsystems führen /17/, /18/.

### 2.1.3 Das abzudichtende Fluid

Das abzudichtende Fluid kann sehr unterschiedlich sein. In der Normung des RWDR werden sowohl unterschiedliche synthetische und mineralische Öle und Fette, als auch wässrige Lösungen in unterschiedlichen Ausprägungen genannt /3/, /19/. Für das Dichtsystem Radial-Wellendichtung ist die Abdichtung von Schmierölen die am weitesten verbreitete Anwendung. Innerhalb dieser Arbeit wurde gezielt der Einfluss des Fluids auf das tribologische Verhalten des Dichtsystems bewertet. Im Untersuchungsumfang wurden ausschließlich unterschiedliche synthetische Schmieröle berücksichtigt. Nachfolgend werden der Aufbau und die Eigenschaften der Komponenten von synthetischen Schmierölen erörtert. Ein solches gebrauchsfertiges Schmieröl besteht aus einem Grundöl und einem Additivanteil. Reines synthetisches Grundöl, ohne jegliche Zugabe von Additiven, wird in keiner praktischen Anwendung verwendet. Ein Grundöl alleine kann die vielfältigen, an ein Schmieröl gestellten Anforderungen nicht erfüllen /20/.

Zur Herstellung von Grundöl muss hochtoxisches Rohöl aufbereitet werden. In diesem notwendigen Prozessschritt werden dem Fluid schmierwirksame Elemente wie Schwefel und Stickstoff entzogen /21/. Zur Verbesserung der Schmiereigenschaften werden anschließend gezielt Additive zugegeben. Reine Grundöle unterliegen einer hohen Alterung (Oxidation). Um diese einzuschränken müssen spezielle Additive zugegeben werden /22/. Abgesehen von diesen beiden grundlegenden Anforderungen, werden unterschiedlichste Additive zur gezielten Verbesserung der Eigenschaften eingesetzt. Heutige Schmieröle bestehen aus etwa 75 bis 80 Prozent Grundöl und dementsprechend zu etwa 20 bis 25 Prozent aus unterschiedlichen Additiven /23/.

#### **Grundöle**

Abhängig von der verfahrenstechnischen Herangehensweise, werden mineralische und synthetische Grundöle hergestellt. Die Molekülgrößenverteilung eines synthetischen Grundöles ist besser einstellbar und einheitlicher als dies bei der heterogenen Mischung an Molekülen eines mineralischen Grundöls sein kann /24/. Deshalb sind die Eigenschaften von synthetischen Grundölen besser und variabler einstellbar. Es ergeben sich beispielsweise Vorteile im Viskositäts-Temperatur-Verhalten (Viskositäts-Index), in der thermischen und oxidativen Stabilität und demzufolge bezüglich der Einsatztemperatur /25/. Trotz höherer Herstellungskosten war in den letzten Jahren eine stetige Zunahme des Marktanteils von synthetischen Schmierölen zu verzeichnen /25/, /26/.

Synthetische Grundöle lassen sich in die folgenden vier wichtigsten Gruppen einteilen: synthetische Kohlenwasserstoffe, Polyglycol, Carbonsäureester und Phosphorsäureester. Polyglycol (PG) und Polyalphaolefin (PAO), welches der Gruppe der synthetischen Kohlenwasserstoffe zugeordnet wird, sind die am häufigsten verwendeten synthetischen Grundöle /25/, /20/. Um mit dieser Arbeit für die praktische Anwendung möglichst ver-

wertbare Ergebnisse zu erzielen, wurden für die Untersuchungen ein PG und ein PAO als Grundöl ausgewählt. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Eigenschaften dieser zwei synthetischen Grundöle gegeben.

### ***Polyglycol (PG)***

PG wird aus den Zwischenprodukten Ethylenoxid und Propylenoxid hergestellt. Das Mischungsverhältnis dieser Komponenten ist entscheidend für die späteren Eigenschaften des PG. So ist es möglich eine Löslichkeit in Wasser zu erreichen. Eine Verträglichkeit mit Mineralölen ist nicht gegeben. PG weist ein Lösungsvermögen hinsichtlich Farben und Lacken auf. Im Bereich des Festkörperkontakts erzeugen Grundöle auf Basis von PG niedrigere Reibungskoeffizienten als beispielsweise Mineralöle. Deshalb werden diese Fluide oftmals für die Schmierung von Getrieben eingesetzt, bei welchen Gleitbewegungen im Verhältnis zu Abwälzbewegungen vorrangig sind, z.B. Kegelrad- und Schneckengetriebe. Die erreichbare Bandbreite der kinematischen Viskosität bei 40°C liegt zwischen  $\nu = 15 \dots 1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ . PG hat einen Marktanteil an den synthetischen Grundölen von etwa 15 Prozent /25/, /20/, /27/.

### ***Polyalphaolefin (PAO)***

Die leicht kontrollierbaren Eigenschaften (Molekularmasse, Größe der Seitenketten) sowie ihre chemische Stabilität, machen PAO zur Grundlage vielseitig einsetzbarer Produkte. PAO besitzt keine leicht flüchtigen Anteile, was sich in Anwendungen bei höheren Temperaturen positiv auswirkt. PAO ist mischbar mit mineralischen Ölen. Der Anwendungsschwerpunkt liegt bei Motorenölen und Industrieschmierölen (Kompressorenöl, Hydrauliköl, Lageröl). Die erreichbare Bandbreite der kinematischen Viskosität bei 40°C liegt zwischen  $\nu = 15 \dots 1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ . PAO hat einen Marktanteil an den synthetischen Grundölen von etwa 45 Prozent /25/, /20/, /27/.

### ***Additivierung***

Additive sind zumeist oberflächen- oder grenzflächenaktive, öllösliche Stoffe. Diese werden Grundölen zugegeben. Dadurch lassen sich die Eigenschaften des Schmieröls gezielt verändern. Ziel ist hierbei nicht allein die Verbesserung der tribologischen Eigenschaften. Ein moderner Schmierstoff soll beispielsweise eine lange Lebensdauer haben, Aggregate vor Korrosion schützen und Ablagerungen verhindern. Die Typisierung der Additive erfolgt üblicherweise nach dem zu erzielenden Effekt. Diese Effekte können in oberflächenschützende, ölverbessernde und ölschützende unterteilt werden, siehe Tabelle 2.1. Einzelne Additive vom gleichen Typ können aus chemisch sehr unterschiedlichen Stoffen aufgebaut werden. Ein Großteil der Fachliteratur im Bereich der Additivierung ist englischsprachig geprägt. Die sehr weit verbreitete englischsprachige Namensgebung einzelner Additivtypen wird nachfolgend genannt /22/, /28/, /29/.

Tabelle 2.1: Einteilung von Additiven

| Typ   | Wirkung              | Funktion   |
|---|----------------------|--|
| Detergentien<br>engl.: Detergants   | oberflächenschützend | Verhindern von beziehungsweise lösen von bestehenden Ablagerungen  |
| Dispergentien<br>engl.: Dispersants   |                      | Dispergieren (in Schweben halten) von Ruß, Alterungsprodukten und sonstigen Fremdstoffen; Agglomerieren (zusammenballen und ausfallen) von Schmutzpartikeln verhindern                               |
| Hochdruck- & Verschleißschutz-Additive<br>engl.: Extreme Pressure EP & Anti Wear AW |                      | Aktivierung/chemische Bindung durch reibungsbedingte Temperaturerhöhung; Aufbau von Gleitschichten durch Adhäsion und dadurch Reduzierung von Reibung und Verschleiß von Metall-Metall-Reibpaarungen |
| Korrosionsschutzadditive<br>engl.: Corrosion Inhibitors                             |                      | Neutralisation von korrosiv wirkenden Säuren; Adsorption an der Metalloberfläche und dadurch Verhinderung des Zutritts von Sauerstoff und Wasser an die Oberfläche                                   |
| Reibungsveränderer<br>engl.: Friction Modifier FM                                   |                      | Veränderung der Reibung durch Adsorption an Metalloberflächen  |
| Viskositätsindex – Verbesserer<br>engl.: VI-Improver                                | ölverbessernd        | Verbesserung des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens; Temperaturabhängige Erhöhung der Viskosität durch Entknäulung von sehr langkettigen Kohlenwasserstoffmolekülen                                   |
| Pourpoint – Verbesserer<br>engl.: Pourpoint Depressant                              |                      | Verzögerung der Bildung von Paraffinkristallen bei tiefen Temperaturen, dadurch bleibt der Schmierstoff länger fließfähig  |
| Alterungsschutzadditive<br>engl.: Antioxidant AO                                    | ölschützend          | Verzögerung von Alterungsvorgängen; Zersetzung von Ölalterungsprodukten  |
| Antischaummittel<br>engl.: Anti-Foam-Additive AF                                    |                      | Veränderung der Oberflächenspannung des Schmierstoffs und dadurch schnellerer Schaumzerfall  |

## 2.2 Aktive Förderwirkung des Dichtsystems

Bei rotierender Welle baut sich ein hydrodynamischer Schmierfilm zwischen Dichtkante und Gegenauflfläche auf. Aufgrund der Rauheit und Welligkeit der beiden Oberflächen kommt es zu lokalen Spaltverengungen. In diesen Spaltverengungen drückt das mitgeschleppte Fluid die beiden Oberflächen auseinander. Ist dies der Fall, so besteht idealerweise kein Festkörperkontakt zwischen der Dichtkante und der Gegenauflfläche. Die Dichtkante wird nicht abrasiv verschlissen. Die Reibleistung muss als Wärme abgeführt werden und ist als Verlust anzusehen. Trotz des mit Fluid gefüllten Dichtspalts tritt auf der Luftseite der Dichtkante kein Fluid aus. Der Grund dafür liegt in einem aktiven Rückfördermechanismus, welcher von diesen Dichtsysteimen ausgebildet wird. Dieser kann durch eine gezielte Zugabe von Fluid, unter gleichzeitiger Betrachtung des Reibmoments, quantifiziert werden. Das Fluid wird an der Luftseite der Dichtkante zugegeben und von dieser aus auf die Ölseite gefördert. Zu Beginn dieses Fördervorgangs fällt das Reibmoment auf einen geringeren Wert ab und steigt am Ende wieder auf den Ausgangswert an /30/.

Durch das Zusammenwirken der Berührfläche des RWDR und der Gegenauflfläche wird eine gerichtete Förderwirkung generiert. Der Wert dieser Förderwirkung ist der Systemförderwert  $FW_{System}$ , welcher sich aus dem Förderwert des RWDR  $FW_{RWDR}$  und dem Förderwert der Gegenauflfläche  $FW_{Gegenauflfläche}$  zusammensetzt.

$$FW_{System} = FW_{RWDR} + FW_{Gegenauflfläche} \quad \text{Gl. (2-1)}$$

Der Förderwert der Welle hängt in großem Maße von der Topographie, von makroskopischen und von mikroskopischen Drallstrukturen ab /18/. Diese sind, im Gegensatz zu den Elastomerstrukturen des RWDR, starr und deshalb ist ihre Wirkung von der Drehrichtung abhängig. Der Förderwert der Welle kann dem des RWDR entgegenwirken oder sich zu diesem addieren.

Der Förderwert ist eine quantifizierbare Größe. Im Rahmen dieser Arbeit wird der umgekehrte Einbau des RWDR zur Bestimmung des Förderwerts durchgeführt /31/. Hierzu steht in dynamischen Untersuchungen auf der Luftseite eines Dichtsysteims das eigentlich abzudichtende Fluid an. Bei rotierender Welle bildet sich eine Förderwirkung unter der Dichtkante von der Luft- zur Ölseite aus. Die geförderte und gemessene Fluidmenge, ist der Systemförderwert. Wenn die Welle einen Förderwert aufweist, so ändert sich der Systemförderwert bei Änderung der Drehrichtung. Die Fluidifferenz ist der doppelte Wert des Förderwerts der Welle, siehe Abbildung 2.3. Mit dieser Methode können die einzelnen Komponenten des Systemförderwerts empirisch bestimmt werden /32/.



Die Entstehung des Förderwerts eines RWDR lässt sich durch unterschiedliche Hypothesen erklären. Am wahrscheinlichsten ist hierbei die Annahme, dass alle Wirkmechanismen dieser Hypothesen in unterschiedlichen Anteilen gleichzeitig auftreten. Alle diese Hypothesen basieren auf der asymmetrischen Pressungsverteilung und der Konditionierung des RWDR. Die vom Autor als am wichtigsten erachteten drei Förderhypothesen werden im Folgenden vorgestellt.

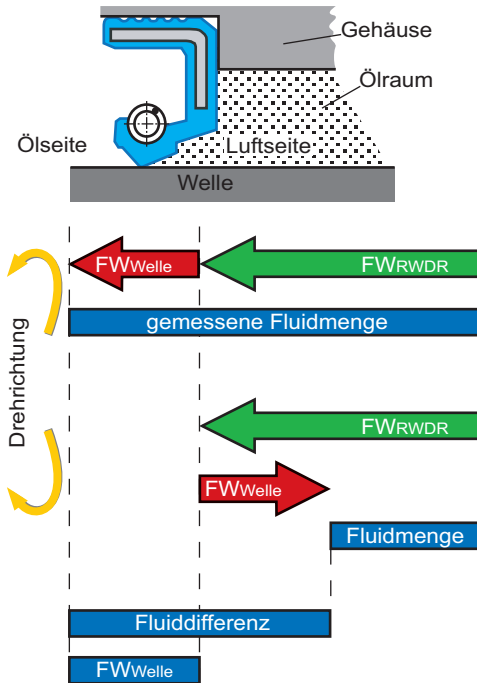


Abbildung 2.3: Zusammensetzung des Systemförderwerts

### Die Verzerrungshypothese

Nach der Konditionierung eines RWDR sind auf dessen Berührfläche, durch den initialen Verschleiß, oftmals axial verlaufende, wellenförmige Mikrostrukturen entstanden. Diese quer zur Gleitrichtung orientierten Strukturen werden entsprechend ihrem Entdecker auch „Schallamach-Wellen“ genannt. Die Strukturen können mit einer Abfolge von „Kämmen und Tälern“ verglichen werden /1/.

Wird die Welle in Rotation versetzt, stellt sich entsprechend der radialen Flächenpressung eine tangentiale Reibung ein. Die wellenförmigen Strukturen auf der Berührfläche des RWDR werden durch die tangentialen Reibkräfte verzerrt. Letztlich entsteht aufgrund der asymmetrischen Flächenpressung ein asymmetrisches Verzerrungsbild der wellenförmigen Strukturen, siehe Abbildung 2.4. Die Kämmen und Täler verlaufen nicht mehr gerade, sondern sind im Bereich des Pressungsmaximums abgeknickt. Von dort zur Luftseite sind entsprechend längere und zur Ölseite hin kürzere Strukturen vorhanden. Im Bereich des asymmetrisch angeordneten Pressungsmaximums werden diese Strukturen stärker abgeplattet. Zu den Rändern des Dichtspalts hin sind die Strukturen weniger stark abgeplattet.

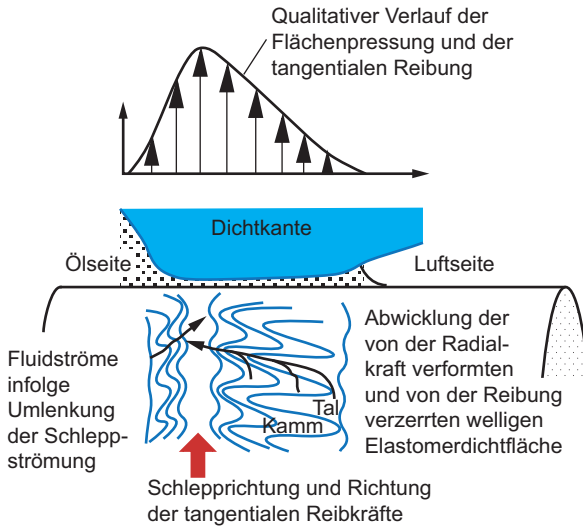


Abbildung 2.4: Fluidförderung eines RWDR nach der Verzerrungshypothese

Bei rotierender Welle bildet sich nicht nur das genannte Verzerrungsbild der Verschleißfläche, sondern auch der hydrodynamische Schmierfilm. Das Fluid wird von den wellenförmigen Strukturen, speziell von den Flanken der „Kämme“, abgelenkt. Auf beiden Seiten wird Fluid zum Pressungsmaximum gefördert. Dieses Verhalten kann mit dem von gegeneinander fördernden Gewindewellendichtungen mit axial veränderlicher Gewindetiefe verglichen werden. Die Förderwirkung der längeren luftseitigen Kämmen ist jedoch größer als die der kürzeren ölseitigen Kämmen. Solange luftseitig die Täler mit Fluid gefüllt sind, entsteht ein Strömungsüberschuss in Richtung Ölseite. Aufgrund dieses Strömungsüberschusses verringert sich die Menge des Fluids, welches in den luftseitigen Tälern ist. Dies ge-

schiebt solange, bis sich ein Strömungsgleichgewicht zwischen Luft- und Ölseite einstellt /33/.

### Die Seitenstromhypothese

Bei gelaufenen RWDR sind nicht immer und nicht nur durchgängige, quer zur Gleitrichtung verlaufende wellenförmige Strukturen auf der Verschleißfläche zu erkennen. Stochastisch verteilte, kurze, nicht axial gerichtete Rauheitserhebungen sind immer vorhanden. Aufgrund der asymmetrischen Flächenpressung stellt sich bei einer rotierenden Welle eine asymmetrisch verteilte tangentiale Reibung ein.

Bei einer rotierenden Welle wird Fluid unter die Rauheitserhebungen geschleppt. Es bildet sich lokal ein sehr dünner hydrodynamischer Schmierfilm aus. An jeder Rauheitserhebung, unabhängig ob diese axial ausgeprägt ist, wird das in Umfangsrichtung geschleppte Fluid axial abgelenkt. Ein Teil des Fluids wird somit in Richtung des Pressungsmaximums abgelenkt, siehe Abbildung 2.5.

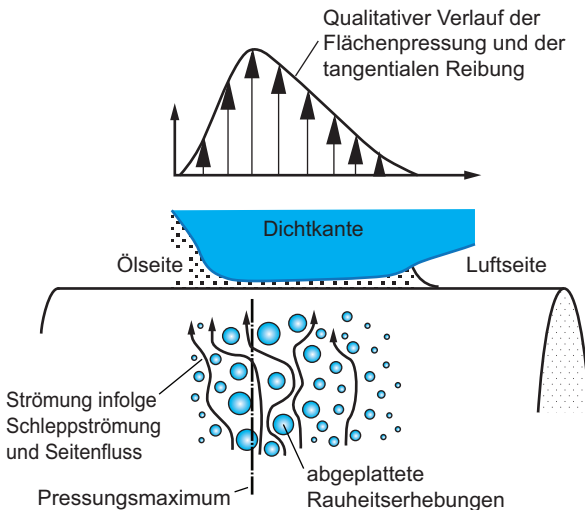


Abbildung 2.5: Fluidförderung des RWDR nach der Seitenstromhypothese

In Strömungsrichtung betrachtet, erweitert sich im dynamischen Betrieb hinter den abgeplatteten Rauheitserhebungen der Dichtspalt und Kavitationszonen entstehen. In diese strömt Flüssigkeit nach und der Seitenfluss vergrößert sich. Die Rauheitserhebungen sind innerhalb des Dichtspalts in Kontakt mit der Gegenauflfläche. Somit gibt es nur im Dicht-

spalt Kavitationszonen. Das Fluid ist bestrebt in diese zu strömen und wird daran hindern den Dichtspalt luftseitig zu verlassen.

Die Seitenstromhypothese beruht darauf, dass sich die axiale Umlenkung kaskadenartig fortsetzt. Dafür sind alleine axial nicht gerichtete, kuppenartige Strukturen auf der Verschleißfläche notwendig. Das Pressungsmaximum wird ständig axial in beiden Richtungen von Teilen des Fluids überquert. Auf dem vom Pressungsmaximum der Luftseite zugewandten Bereich der Berührfläche, sind mehr abgeplattete Rauheitserhebungen ständig im Kontakt mit der Gegenauflfläche. Hier besteht dementsprechend ein größeres Potential zur Fluidförderung als auf der Ölseite. Solange luftseitig Fluid nachströmt und durch die abgeplatteten Rauheitserhebungen abgelenkt wird, ist ein Förderstrom von der Luft- zur Ölseite zu verzeichnen. Dadurch weicht das Fluid luftseitig zurück in den Dichtspalt. Dies geschieht solange, bis sich ein Gleichgewicht zwischen den entgegengesetzt wirkenden Strömungen einstellt /34/.

### **Die Wischkantenhypothese**

Die Wischkantenhypothese begründet die Förderwirkung eines RWDR durch dessen, relativ zu einem Punkt auf der Gegenauflfläche, wischende axiale Bewegung, siehe Abbildung 2.6.

Diese Bewegung, senkrecht zur eigentlichen Gleitrichtung, kann durch unterschiedliche Sachverhalte verursacht werden. Bezogen auf die Wellenachse bewirkt eine verkippte Einbaulage des RWDR eine Schrägstellung der Berührspur des RWDR. Auch eine Exzentrizität zwischen RWDR und Wellenachse verursacht diesen Sachverhalt. Die Membran des RWDR ist über den Umfang verteilt nicht gleichmäßig ausgelenkt. Eine stärkere radiale Auslenkung der Membran geht einher mit einer axialen Verschiebung der Dichtkante, siehe Abbildung 2.6. Die Folge ist erneut eine, auf die Wellenachse bezogene, Schrägstellung der Berührspur des RWDR. In beiden Fällen wird aus der schmalen, schräg stehenden Berührspur eine breitere Laufspur. Bei rotierender Welle tritt, relativ zu einem Punkt auf der Gegenauflfläche, eine axiale Bewegung der Dichtkante ein, siehe Abbildung 2.6. Es liegt eine Analogie zu Hydraulikstangendichtungen vor. Bei diesen ergibt sich bei Kontaktflächen mit asymmetrischer Flächenpressung, bei axial reversierenden Bewegungen eine gerichtete Pumpwirkung. Es wird Fluid von der Seite mit dem flacheren Pressungsanstieg zur Seite mit dem steileren Pressungsanstieg gefördert. Ein RWDR hat auf seiner Berührfläche ebenfalls eine asymmetrische Flächenpressung mit einem flacheren Pressungsanstieg auf der Luftseite. Das bei Hydraulikstangendichtungen beobachtete Förderverhalten tritt nach gleichem Wirkprinzip auch bei RWDR auf /1/, /35/

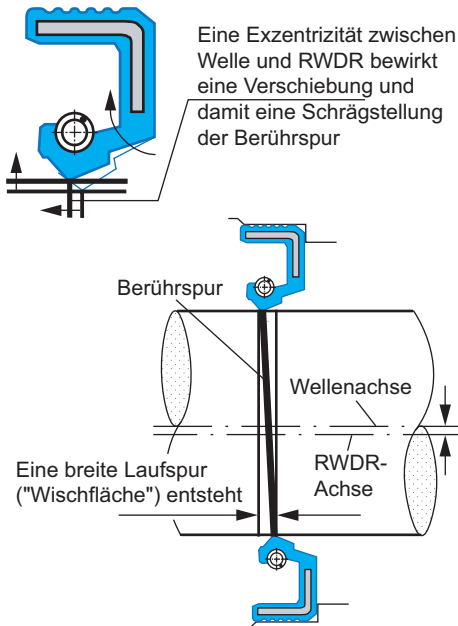


Abbildung 2.6: Fluidförderung infolge Exzentrizität zwischen RWDR-Achse und Wellenachse

## 2.3 Reibung und Fluidfilmhöhe

Durch die Relativbewegung zwischen den einzelnen Komponenten des Dichtsystems Radial-Wellendichtung tritt Reibung auf. Die Reibung wird von vielen Einflussgrößen mitbestimmt. Der, aus einer Komponente der Gegenauflfläche und des RWDR zusammengesetzte Förderwert des Systems beeinflusst den Reibungszustand, siehe Kapitel 2.2. Weitere Einflussgrößen sind die Viskosität und die Art des Fluids, die Relativgeschwindigkeit zwischen Gegenauflfläche und Dichtkante des RWDR, sowie der Werkstoff und die Radialkraft des RWDR. Die einzelnen Einflussgrößen stehen dabei in ständiger Wechselwirkung zueinander und bestimmen den Reibungszustand im Dichtspalt und damit das messbare Reibmoment /36/.

Der tribologische Zustand im Dichtspalt des Dichtsystems mit förderneutral geschliffener Gegenauflfläche aus Stahl, wird durch die Gümbelzahl  $G$  charakterisiert /37/. Sie ist ei-

ne dimensionslose, hydrodynamische Kennzahl und wird gebildet aus der dynamischen Viskosität  $\eta$  des Fluids im Dichtspalt, der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der Welle (proportional zur Drehzahl  $n$ ) und der mittleren Flächenpressung  $p_m$  der Berührfläche auf der Gegenlauffläche, siehe Gl. (2-2).

$$G = \frac{\eta \cdot \omega}{p_m} \quad \text{Gl. (2-2)}$$

Die mittlere Flächenpressung  $p_m$  resultiert aus der auf die Berührfläche wirkenden Radialkraft  $F_r$ . Die Berührfläche ergibt sich als das Produkt aus der Berührbreite  $b$  und dem Umfang der Berührfläche (Umfang der Gegenlauffläche =  $\pi \cdot d$ ), siehe Gl. (2-3) /1/.

$$p_m = \frac{F_r}{\pi \cdot d \cdot b} \quad \text{Gl. (2-3)}$$

Während des Betriebs ändern sich die Radialkraft  $F_r$  und die Berührbreite  $b$  des RWDR, durch Alterung und Verschleiß. Dadurch ändert sich der Reibungszustand /36/.

Die Gümbelzahl  $G$  kann bei bekannter temperaturabhängiger Betriebsviskosität abgeschätzt werden. In der Abschätzung wird die Oberflächenrauheit der Wellenoberfläche nicht berücksichtigt. Diese beeinflusst aber den tribologischen Zustand. Deshalb ist der Bereich, in dem die tatsächliche Reibungszahl liegt, auch bei bekannter Gümbelzahl sehr breit /38/.

Abbildung 2.7 zeigt das Gümbelzahl-Diagramm, welches die Reibungszahl  $f$  als Funktion der Gümbelzahl  $G$  angibt. Der Verlauf entspricht prinzipiell dem Stribeck-Diagramm für hydrodynamische Gleitlager. Der Bereich der Reibungszahl wurde in zahlreichen Versuchen mit verschiedenen RWDR und unterschiedlichen Betriebszuständen experimentell ermittelt. Aus dem Gümbelzahl-Diagramm kann die Reibungszahl und der vorherrschende Reibungszustand abgeschätzt werden. Das Reibungsminimum liegt bei  $G = (2...3) \cdot 10^{-7}$  und damit im Bereich des Übergangs von Misch- zu Flüssigkeitsreibung /1/, /38/.

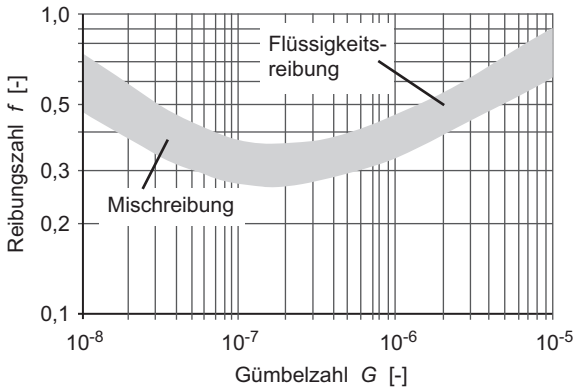


Abbildung 2.7: Gümbelzahl-Diagramm nach /1/

Die Reibleistung eines Dichtsystems sollte möglichst niedrig sein, da sie Verlustleistung ist. Die Reibleistung wird in Wärme umgewandelt. Dieser lokal auf die schmale Berührbreite konzentrierte Wärmeeintrag, mindert im Regelfall die Lebensdauer des Dichtsystems. Speziell das Elastomer des RWDR wird stark beeinflusst. Die Reibleistung eines Dichtsystems  $P$  ergibt sich aus dem Produkt des Reibmoments  $M_R$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , siehe Gl. (2-4). Das Reibmoment  $M_R$  ist durch die Faktoren Radialkraft  $F_r$ , Systemdurchmesser  $d$  und die Reibungszahl  $f$  gegeben, siehe Gl. (2-5), /1/, /38/.

$$P = M_R \cdot \omega \quad \text{Gl. (2-4)}$$

$$M_R = f \cdot F_r \cdot \frac{d}{2} \quad \text{Gl. (2-5)}$$

In der bisherigen Betrachtung wurde die Fluidfilmhöhe zwischen Gegenauflfläche und Berührfläche des RWDR nicht berücksichtigt. Das Reibmoment des Dichtsystems hängt auch von dieser Größe ab. Unter der Annahme dass reine Fluidreibung ( $G > 5 \cdot 10^{-7}$ ) herrscht, kann basierend auf dem Newtonschen Reibungsgesetz, die mittlere Fluidfilmhöhe  $h$  bestimmt werden, siehe Gl. (2-6). Dies erfolgt unter der Annahme, dass die Fluidgeschwindigkeit an der stehenden Berührfläche Null ist und bis an die Gegenauflfläche linear auf die Umfangsgeschwindigkeit ansteigt. Diese Bestimmung der mittleren Fluidfilmhöhe  $h$  nach Gl. (2-6) ist auf die Petroffsche Gleichung für Gleitlager zurückzuführen /39/.

Unter Berücksichtigung der genannten Annahme findet diese Gleichung Anwendung zur Abschätzung der Fluidfilmhöhe im Dichtsystem Radial-Wellendichtung /40/, /41/.

Gl. (2-6) zeigt den Zusammenhang, dass innerhalb der genannten Grenzen der Anwendbarkeit und bei sonst gleichbleibendem Dichtsystem, mit steigender Fluidfilmhöhe  $h$  das Reibmoment  $M_R$  sinkt. Dieser Zusammenhang wurde grundsätzlich auch unter einem wirksamen Anteil an Dünnschichtreibung im Dichtspalt bestätigt /42/.

$$h = \frac{\eta \cdot d^3 \cdot \pi^2 \cdot b \cdot n}{2 \cdot M_R} \rightarrow M_R = \frac{\eta \cdot d^3 \cdot \pi^2 \cdot b \cdot n}{2 \cdot h} \quad \text{Gl. (2-6)}$$

Erste Ansätze für die Messung des Reibmoments an einem realen Dichtsystem, mit einer Lagerung der Prüfkammer in Rillenkugellagern, liegen bereits Jahrzehnte zurück /43/. Weiter verbesserte Verfahren mit einer aerostatischen Lagerung der Prüfkammer folgten seither /44/, /45/. Das Reibmoment kann nach aktuellem Stand der Technik für unterschiedliche Betriebsbedingungen zuverlässig und genau bestimmt werden.

Die Messung der Fluidfilmhöhe im Dichtsystem Radial-Wellendichtung ist grundsätzlich möglich. Gleichzeitig sind diese Messungen nur unter zum Teil deutlichen Einschränkungen der realen Rahmenbedingungen möglich /46/. Durch Verwendung eines magnetischen Fluids, bei einer deutlichen Reduzierung der Radialkraft des RWDR und einer verbreiterten Dichtzone, sind Messungen möglich. Hierbei kann aber nur ein geringer Drehzahlbereich untersucht werden ( $n = 0 \dots 250$  1/min bei  $d = 110$  mm) /47/. In anderen Untersuchungen ist die Messung nur möglich wenn eine Glashohlwelle als Gegenauflfläche zum Einsatz kommt /48/. Eine Glashohlwelle weicht jedoch im Hinblick auf die Wärmeleitfähigkeit und die Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) deutlich von einer Gegenauflfläche aus Metall ab.

Die Fluidfilmhöhe im Dichtspalt hat einen Einfluss auf das Reibmoment des Dichtsystems. Auch die Benetzungseigenschaften eines Fluids beeinflussen das Reibmoment im Dichtsystem /49/. Hierzu sind aktuell keine quantifizierbaren Ergebnisse verfügbar.

## 2.4 Benetzung

Der Kontakt eines Gases oder einer Flüssigkeit mit einem Festkörper wird als Benetzung dieses Festkörpers verstanden. Hierbei verdrängt das benetzende Gas beziehungsweise die benetzende Flüssigkeit das bisher auf der Oberfläche des Festkörpers angelagerte Gas beziehungsweise die angelagerte Flüssigkeit /50/. Im Dichtsystem Radial-Wellendichtung ist die Benetzung durch eine Flüssigkeit maßgeblich. Die Benetzung er-



folgt immer in einer umgebenden Gasphase und nicht im Vakuum. Die folgenden Erörterungen beziehen sich deshalb alle auf Benetzungszustände mit einer umgebenden Gasphase.

Dass die Benetzungseigenschaften einen Einfluss auf die Funktion des Dichtsystems haben können, wurde in unterschiedlichen Untersuchungen festgestellt. Diese Untersuchungen liegen zum Teil bereits etliche Jahrzehnte zurück /51/. In der jüngeren Vergangenheit widmeten sich mehrere Arbeiten diesem Fachgebiet /42/, /49/, /52/, /53/, /54/. Die Herangehensweisen unterscheiden sich im Detail. Die Ergebnisse sind zum Teil kontrovers und oftmals mit wenig anwendungstechnischem Nutzen. Im Folgenden werden die wichtigsten Grundlagen der Benetzung dargestellt.

### **Bindungskräfte**

Als Kohäsionskräfte werden die Bindungskräfte zwischen Molekülen einer Substanz bezeichnet. Adhäsionskräfte sind dagegen die Bindungskräfte zwischen den Molekülen zweier unterschiedlichen Substanzen. Diese Adhäsionskräfte wirken in den Grenzflächen zwischen Substanzen. Ausgeprägte Grenzflächen bilden sich zwischen Substanzen unterschiedlicher Aggregatzustände. Also jeweils zwischen gasförmigen (gas), flüssigen (liquid) und festen (solid) Substanzen, siehe Abbildung 2.8. Die Benetzung eines Festkörpers durch eine Flüssigkeit hängt wesentlich vom Verhältnis der Kohäsionskräfte der Flüssigkeit und den Adhäsionskräften zwischen Flüssigkeit und Festkörper ab.

### **Oberflächenspannungen von Flüssigkeiten**

Im Volumen einer Flüssigkeit wirken die Kohäsionskräfte isotrop in alle Richtungen auf die Moleküle. An der Grenzfläche einer Flüssigkeit zur Gasphase hin fehlen einseitig die gleichartigen Moleküle. Es bildet sich eine resultierende Kraft in Richtung des Volumens mit der höheren Konzentration an gleichartigen Molekülen aus. Von Gas umgebene Flüssigkeiten sind deshalb bestrebt die Oberfläche zu minimieren. Dadurch erklärt sich das Bestreben einer Flüssigkeit kugelförmige Tropfen zu bilden /55/.

Um die Oberfläche einer Flüssigkeit um die Fläche  $dA$  zu vergrößern ist die Arbeit  $dW$  notwendig. Dies gilt bei konstantem Volumen, konstanter Temperatur und konstanter Anzahl der Moleküle. Die Oberflächenspannung  $\sigma$  ist der Quotient aus der aufzubringenden Arbeit  $dW$  und der Änderung der Fläche  $dA$ , siehe Gl. (2-7). Die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit gibt Auskunft über die Kohäsionskräfte zwischen deren Molekülen. Die Oberflächenspannung ist die auf Flüssigkeiten bezogene Oberflächenenergie. Im Folgenden wird diese auch Oberflächenenergie von Flüssigkeiten genannt.

$$\sigma_l = \frac{dW}{dA}$$

Gl. (2-7)

### **Oberflächenenergien von Festkörperoberflächen**

Die Oberflächenenergie einer Festkörperoberfläche kann nicht direkt gemessen werden. Die Benetzungseigenschaften einer Festkörperoberfläche werden maßgeblich durch deren Oberflächenenergie vorgegeben. Durch die quantitative Erfassung der Benetzungseigenschaften ist somit eine indirekte Bestimmung der Oberflächenenergie möglich. Dies kann durch das Benetzen der Festkörperoberfläche mit unterschiedlichen Testtinten, mit jeweils bekannter Oberflächenenergie, durchgeführt werden. Die Oberflächenenergie jener Testtinte, welche die Oberfläche gerade noch benetzt, entspricht ungefähr der Oberflächenenergie der Festkörperoberfläche. Eine weitere Möglichkeit der indirekten Bestimmung der Oberflächenenergie ist die Messung des Kontaktwinkels auf einer Festkörperoberfläche. Hierbei wird die Festkörperoberfläche mit unterschiedlichen Flüssigkeiten mit jeweils bekannter Oberflächenenergie benetzt. Durch Kenntnis der Kontaktwinkel zwischen Festkörperoberfläche und genannten Flüssigkeiten, kann durch ein Berechnungsverfahren die Oberflächenenergie der Festkörperoberfläche bestimmt werden. Die unterschiedlichen Berechnungsverfahren beruhen grundsätzlich auf der Youngschen Gleichung, siehe Gl. (2-8), /52/, /56/. Weiterführend berücksichtigen diese Berechnungsverfahren die Bindungskräfte auf molekularer Ebene.

### **Grenzflächenspannung**

Zwischen Substanzen unterschiedlicher Aggregatzustände befinden sich Grenzflächen. Also jeweils zwischen gasförmigen (gas), flüssigen (liquid) und festen (solid) Substanzen. Durch die Wechselwirkungen der beteiligten Substanzen tritt in den Grenzflächen eine Grenzflächenspannung auf. Diese ist spezifisch für die jeweilige Stoffpaarung. Die grundsätzliche Benennung erfolgt anhand der verbreiteten englischsprachigen Namensgebung.  $\sigma_{ls}$  bezeichnet beispielsweise die Grenzflächenspannung zwischen einer Flüssigkeit und einem Festkörper. Abbildung 2.8 zeigt die unterschiedlichen auftretenden Grenzflächenspannungen beim Absetzen eines Tropfens Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche, während das umgebende Medium Gas ist.

In der hier zugrunde liegenden Betrachtung wird die Grenzfläche als scharf abgegrenzter Bereich verstanden. Dies ist makroskopisch betrachtet korrekt. Mikroskopisch betrachtet gibt es in der Größenordnung der einzelnen Moleküle einen Übergangsbereich in der Grenzfläche. Weiterhin ist der „Precursor-Film“ zu nennen. Dabei handelt es sich um einen, der benetzenden Flüssigkeit vorauseilenden Fluidfilm, dessen Fluidfilmhöhe weniger als 0,1  $\mu\text{m}$  beträgt /57/. Dieser vorauseilende Fluidfilm kann nur beobachtet werden, wenn ein

Fluid eine Oberfläche selbstständig benetzt (Benetzungskoeffizient  $S > 0$ ). Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die makroskopischen Gegebenheiten thematisiert und messtechnisch erfasst. Die mikroskopischen Wirkungsmechanismen sind selbstverständlich nicht abzustellen. Deren Einfluss wird als untergeordnet bewertet und durch gleichbleibende Rahmenbedingungen bestmöglich konstant gehalten.

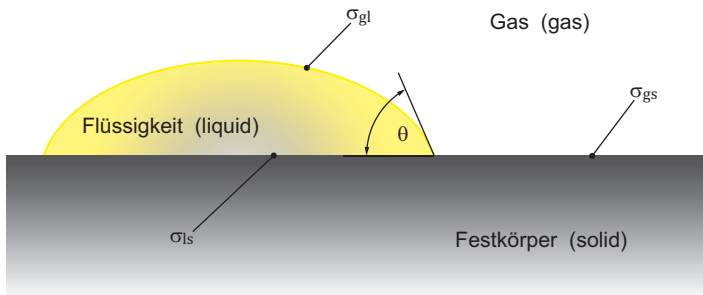


Abbildung 2.8: Grenzflächenspannungen und Kontaktwinkel am Beispiel eines Tropfens auf einer Festkörperoberfläche umgeben von Gas

### **Kontaktwinkel**

Ein auf einer Festkörperoberfläche ruhender Tropfen Flüssigkeit bildet die Form eines Kugel- beziehungsweise Ellipsoid-Abschnitts. Die Form ist dabei abhängig von der Benetzung. Um den Benetzungszustand zu beschreiben, werden der Tropfen und die Festkörperoberfläche im Querschnitt betrachtet. Als Kontaktwinkel  $\theta$  wird der Winkel bezeichnet, den eine Tangente an die Tropfenkontur im drei-Phasen-Punkt zur Festkörperoberfläche bildet, siehe Abbildung 2.8.

Der Kontaktwinkel kann theoretisch zwischen  $\theta = 0^\circ$  und  $\theta = 180^\circ$  liegen. Bei einem Kontaktwinkel  $\theta = 0^\circ$  herrscht vollständige Benetzung. Aufgrund von Gravitationseinflüssen wird ein Kontaktwinkel von  $\theta = 180^\circ$  nicht erreicht. Der Kontaktwinkel kann mit optischen Mitteln betrachtet und gemessen werden, siehe Kapitel 3.2.2. Um die Benetzung einer Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche zu beschreiben, ist der Kontaktwinkel eine gut geeignete und zuverlässig zu ermittelnde Größe [52]. Je kleiner der Kontaktwinkel ist, desto größer ist die Migrationswilligkeit eines Fluids auf der Festkörperoberfläche.

Wie eingangs beschrieben, setzt sich das Benetzungsverhalten aus den Eigenschaften der beteiligten Substanzen zusammen. Die Youngsche Gleichung setzt den Kontaktwinkel  $\theta$  in Relation zu der Oberflächenspannung der Flüssigkeit  $\sigma_l$ , der Oberflächenenergie der Festkörperoberfläche  $\sigma_s$  und der Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Fest-

körperoberfläche  $\sigma_{ls}$ , siehe Gl. (2-8). Dabei ist  $\sigma_s - \sigma_{ls}$  ein Maß für die Stärke der Bindung der Flüssigkeit an die Festkörperoberfläche. Je größer dieser Wert ist, umso kleiner sind die Kontaktwinkel.

$$\sigma_l \cdot \cos\theta = \sigma_s - \sigma_{ls} \quad \text{Gl. (2-8)}$$

### **Benetzungskoeffizient**

Der Benetzungskoeffizient  $S$  ist eine Größe, um anzugeben wie eine, auf einer Festkörperoberfläche aufgebrauchte Flüssigkeit, diese benetzt. Der Benetzungskoeffizient  $S$  wird gebildet aus der Oberflächenspannung der Flüssigkeit  $\sigma_l$ , der Oberflächenenergie der Festkörperoberfläche  $\sigma_s$  und der Grenzflächenspannung  $\sigma_{ls}$  zwischen diesen beziehungsweise über den Kontaktwinkel  $\theta$ , siehe Gl. (2-9), /58/. Dieser Zusammenhang geht letztlich auf die Youngsche Gleichung zurück, siehe Gl. (2-8).

$$S = \sigma_l + \sigma_s - \sigma_{ls} = \sigma_l \cdot (1 + \cos\theta) \quad \text{Gl. (2-9)}$$

Ein negativer Wert des Benetzungskoeffizienten bedeutet, dass eine Flüssigkeit eine Festkörperoberfläche nicht selbstständig benetzen wird. Ein positiver Wert bedeutet, dass eine Flüssigkeit eine Festkörperoberfläche selbstständig gleichmäßig benetzt /59/, /60/.

### **Neue Größe - Der Benetzungsfaktor**

Die Bewertung des Wertes des Benetzungskoeffizienten ist anschaulich möglich. Die Ermittlung des Wertes des Benetzungskoeffizienten ist hingegen nur indirekt mit erheblichem Messaufwand möglich. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit eine andere Größe gesucht. Die Größe sollte ebenfalls anschaulich bewertet, aber deutlich anwendungsbezogener ermittelt werden können. Es wurde der sogenannte Benetzungsfaktor  $BF$  definiert. Die neu gebildete Größe - der Benetzungsfaktor - gibt an, um welchen Faktor sich der Flächeninhalt einer, durch eine Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche benetzten Fläche ändert. Der Flächeninhalt der Benetzungsfäche ist eine zeitlich veränderliche und temperaturabhängige Größe. Dementsprechend wird der Benetzungsfaktor in Abhängigkeit von diesen Einflussfaktoren angegeben. Die Nomenklatur folgt grundsätzlich folgendem Aufbau  $BF_{(Verweildauer, Einlagerungstemperatur)}$ . Der Benetzungsfaktor mit den Parametern *Verweildauer* = 2 h und *Einlagerungstemperatur* = 70°C, wird dementsprechend folgendermaßen angegeben  $BF_{(2\text{ h}, 70^\circ\text{C})}$ .

Verdoppelt sich beispielsweise der Flächeninhalt der Benetzungsfläche, so ist der Wert des Benetzungsfaktors zwei. Es ist dadurch möglich die Werte des Benetzungsfaktors anschaulich zu bewerten. Gleichzeitig ist die Ermittlung des Benetzungsfaktors direkt möglich. Es sind minimal zwei Messungen des Flächeninhalts der Benetzungsflächen notwendig. Die erste Messung erfolgt zehn Sekunden nach der Absetzung eines Tropfens auf einer Festkörperoberfläche. Die zweite Messung entsprechend nach der angestrebten Verweildauer. Die Durchführung der Messungen wird in Kapitel 4.6.2 erörtert.

Der Benetzungskoeffizient und der Benetzungsfaktor haben eine ähnliche Aussage. Beide beziehen sich auf die Willigkeit einer Flüssigkeit, eine Festkörperoberfläche zu benetzen. Eine Bewertung der sogenannten Migrationswilligkeit ist dadurch möglich. Eine Umrechnung der Größen ineinander ist nicht möglich.

### ***Vergleich zwischen Kontaktwinkel und Benetzungsfaktor mit Bezug auf das Dichtsystem Radial-Wellendichtung***

Der Kontaktwinkel und der Benetzungsfaktor sind beides Größen, welche die Benetzungseigenschaften einer Paarung aus Flüssigkeit und Festkörperoberfläche angeben. Dennoch kann es zielführend oder teilweise zwingend notwendig sein, gezielt den einen oder den anderen zu bestimmen und zu bewerten.

Innerhalb des Dichtsystem Radial-Wellendichtung ist eine gute Benetzung des abzudichtenden Fluids auf der Gegenauflfläche anzustreben /49/. In der praktischen Anwendung sind Schmieröle sehr häufig und im Rahmen dieser Arbeit durchgängig das abzudichtende Fluid. Diese breiten sich zunächst relativ dynamisch und dann mit abnehmender Geschwindigkeit auf einer Gegenauflfläche aus - Benetzungskoeffizient  $S > 0$ . Die Messung des Kontaktwinkels erfolgt wenige Sekunden nach der Absetzung des Fluids auf der Festkörperoberfläche. In diesem Zeitbereich breitet sich das Fluid auf einer Gegenauflfläche relativ dynamisch aus. Es ist nicht unterscheidbar, inwiefern diese dynamische Benetzung durch die physikalischen, also maßgeblich die gravitationsbedingten, oder die chemischen Zusammenhänge bestimmt wird. Es ist nicht möglich den Kontaktwinkel in einem späteren Benetzungszustand zu bestimmen. Der Kontaktwinkel ist dann bereits so gering, dass er mit herkömmlichen Messmitteln nicht mehr erfasst werden kann. Es ist grundsätzlich möglich den Kontaktwinkel eines Schmieröls auf einer Gegenauflfläche zu bestimmen. Aus den genannten Gründen ist das Ergebnis aber nicht verwertbar.

Die Messung des Benetzungsfaktors kann, im Gegensatz zu der Messung des Kontaktwinkels, nach einer größeren Verweildauer des Fluids auf der Festkörperoberfläche durchgeführt werden. Die oberflächenaktiven Additive im Fluid können innerhalb dieser Verweildauer ihre Wirkung gegebenenfalls entfalten.

Auf einer Festkörperoberfläche aus Elastomer breiten sich die Fluide nicht fortwährend aus - Benetzungskoeffizient  $S < 0$ . Hier ist es nicht zielführend den Benetzungsfaktor zu

bestimmen. Der kurzzeitig bestimmte und sich dann wenig ändernde Kontaktwinkel, ist hier die aussagekräftigere Größe.

### ***Einflussfaktoren auf die Benetzung***

Die bisherigen Betrachtungen haben die Beschaffenheit der Festkörperoberfläche nicht mit einbezogen. Die Rauheit und mögliche Verunreinigungen der Festkörperoberfläche haben beispielsweise einen Einfluss auf die Benetzung.

Jede technische Oberfläche hat eine gewisse Rauheit. Gegenauflflächen im Dichtsystem Radial-Wellendichtung sollen eine gemittelte Rauhtiefe  $R_z = 1 \dots 5 \mu\text{m}$  aufweisen, siehe Kapitel 2.1.2. Durch die Rauheit weicht die tatsächliche Oberfläche von der geometrisch perfekten ebenen Oberfläche ab. Die technische Oberfläche besteht mikroskopisch betrachtet aus Erhebungen und Vertiefungen mit Flanken zwischen diesen. Dadurch ist die tatsächliche Oberfläche stets mindestens so groß, im Regelfall aber größer als die projizierte Oberfläche. Der Einfluss der größeren Oberfläche wird in der Wenzelschen Gleichung aufgegriffen /57/. Mit der Zunahme der Rauheit kann die Benetzbarkeit einer Oberfläche zunehmen. Dies gilt bei einem Kontaktwinkel  $\theta < 90^\circ$ , was im Rahmen dieser Arbeit stets der Fall ist.

Ein weiterer Effekt der durch die Rauheit der Oberfläche beeinflusst wird, ist der Einschluss von Luft in den Vertiefungen der Oberfläche. Dieser im Sub- $\mu\text{m}$  Bereich ablaufende Effekt kommt dadurch zustande, dass die Flüssigkeit die Luft nicht in jeder einzelnen Vertiefung vollständig verdrängen kann. Der Sachverhalt wird im Cassieschen Gesetz erfasst /57/. Je mehr Luftsinschlüsse es gibt, desto schlechter benetzt die Flüssigkeit die Oberfläche. Letztlich ergibt sich für den Fall einer Benetzung durch eine Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche der Zusammenhang, dass eine rauere Oberfläche gegebenenfalls schlechter benetzt.

Die Rauheit der Oberfläche beeinflusst auf unterschiedliche Weise das Benetzungsverhalten eines Fluids auf dieser. Anhand der beiden aufgezeigten Effekte wird der gegenläufige Einfluss der Rauheit der Oberfläche deutlich. Welcher Effekt wie stark zum Tragen kommt hängt davon ab, wie viel der durch Rauheit vergrößerten Oberfläche, durch die Flüssigkeit vollständig benetzt werden kann. Das wiederum wird durch die Migrationswilligkeit der Flüssigkeit bestimmt.

Eine Verunreinigung einer Oberfläche ist eine fremde Substanz, welche dort bewusst oder unbewusst aufgebracht wurde. Durch die Verunreinigung einer Oberfläche sinkt deren Oberflächenenergie und die messbaren Kontaktwinkel werden größer /52/. Im Rahmen der Ermittlung der Benetzungseigenschaften muss sichergestellt werden, dass Verunreinigungen einer Oberfläche durch Reinigung beseitigt werden. Die Reinigung muss möglichst rückstandsfrei erfolgen. Eine chemisch perfekt reine Oberfläche kann an Umgebungsluft nicht existieren. Wenigstens einzelne Atome aus der Umgebung adsorbieren an der Ober-

fläche. Deshalb sollte die Oberfläche zumindest technisch rein sein. Verunreinigungen durch Fremdstoffe (Öl, Fett, Staub,...) müssen rückstandsfrei entfernt werden.

Der Einfluss von Verunreinigungen auf die Benetzungseigenschaften ist relevant. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass eine Messung der Benetzungseigenschaften unter chemisch perfekt reinen Bedingungen praktisch nicht möglich ist. Ein gleiches und möglichst gutes Niveau der Reinigung der Oberflächen ist für vergleichende Messungen der Benetzungseigenschaften notwendig.

## 2.5 Oberflächenkennwerte

Die Beschaffenheit von technischen Oberflächen wird mit Oberflächenkennwerten beschrieben. Die Oberflächenkennwerte einer Gegenauflfläche eines Dichtsystems Radial-Wellendichtung müssen innerhalb vorgegebener Grenzen liegen, siehe Kapitel 2.1.2. Trotz der gängigen Anwendung einzelner Oberflächenkennwerte (Rauheitsangaben), wird deren alleinige Aussagekraft im Hinblick auf eine dichtungstechnisch relevante Beschreibung von Gegenauflflächen in Frage gestellt /61/, /62/. Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine gezielte Variation der Oberflächenbeschaffenheit der Gegenauflflächen durchgeführt. Das Augenmerk liegt mehr bei dem abzudichtenden Fluid, als bei der Gegenauflfläche. Dennoch sollen an dieser Stelle die verwendeten Oberflächenkennwerte kurz erörtert werden.

Jede technische Oberfläche weicht von der geometrisch idealen Gestalt ab. Diese Gestaltabweichungen werden ihrer Größenordnung nach absteigend nach DIN 4760 in unterschiedliche Ordnungen eingeteilt /63/. Gestaltabweichungen 1. Ordnung sind Formabweichungen. Die 2. Ordnung bezieht sich auf die Welligkeit. Maßgeblich für die Ermittlung der Oberflächenkennwerte sind die Gestaltabweichungen der 3. und 4. Ordnung. Die 3. Ordnung beschreibt die Rauheit, welche im Herstellungsprozess beispielsweise durch die Form der Werkzeugschneide erzeugt wurde. Die 4. Ordnung beschreibt die Rauheit in einer nochmals feineren Größenordnung. Hierbei ist beispielsweise der, in der Herstellung stattfindende Vorgang der Spanbildung prägend. Die Gestaltabweichungen der 5. und 6. Ordnung beziehen sich auf Abweichungen der Gefügestruktur. Diese sind für die Oberflächenkennwerte in der Größenordnung, in welcher sie beim Dichtsystem Radial-Wellendichtung zu erwarten sind, nicht relevant.

Die Oberflächenbeschaffenheit kann durch 2- oder 3-dimensionale Oberflächenkennwerte beschrieben werden. Maßgeblich ist hierbei, ob ein Profilschrieb oder eine flächenhafte Vermessung der Oberfläche stattgefunden hat. In beiden Fällen werden von den ermittelten Oberflächendaten durch Filterung die Gestaltabweichungen 1. und 2. Ordnung abgezogen. Die im Folgenden benannten Oberflächenkennwerte beziehen sich auf die Rauheit (Gestaltabweichungen 3. und 4. Ordnung).

### **2-dimensionale Oberflächenkennwerte**

Konventionell werden die 2-dimensionalen Oberflächenkennwerte durch Profilschriebe nach DIN EN ISO 4287 ermittelt /64/. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein taktiles Rauheitsmessgerät verwendet, siehe Kapitel 3.2.5. Die Länge der Taststrecke  $l_t$  ist abhängig von der Rauheit der Oberfläche in der genannten Norm vorgegeben. Die Taststrecke  $l_t$  wird in sechs gleich lange Einzelmessstrecken  $l_i$  unterteilt. Zur Auswertung werden fünf Einzelmessstrecken herangezogen. Die Länge einer halben Einzelmessstrecke wird jeweils zu Beginn und am Ende der Taststrecke als nicht bewertete Vorlauf- beziehungsweise Nachlaufstrecke deklariert. Im Folgenden werden drei 2-dimensionale Oberflächenkennwerte vorgestellt. Es gibt noch eine Vielzahl weiterer derartiger Oberflächenkennwerte, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wurden.

Der **arithmetische Mittenrauwert  $R_a$**  ist das arithmetische Mittel der Beträge der Rauheitsabweichungen von der Profilmittellinie innerhalb einer Bezugsstrecke. Die Bezugsstrecke sind fünf aneinandergrenzende Einzelmessstrecken. Durch die betragsweise Ermittlung der Rauheitsabweichungen kann dieser Oberflächenkennwert nicht zwischen Spitzen und Riefen innerhalb eines Profils unterscheiden.

Die **gemittelte Rautiefe  $R_z$**  ist das arithmetische Mittel aus den Einzelrautiefen von fünf aneinandergrenzenden Einzelmessstrecken. Die Einzelrautiefe ist der Abstand zwischen der höchsten Spitze und der tiefsten Senke innerhalb einer Einzelmessstrecke.

Die **maximale Rautiefe  $R_{max}$**  ist die größte Einzelrautiefe aus fünf aneinandergrenzenden Einzelmessstrecken. Bei einer gleichmäßigen Oberfläche sind die Werte von  $R_z$  und  $R_{max}$ , zugehörig zu einer Taststrecke, relativ ähnlich.

### **3-dimensionale Oberflächenkennwerte**

Die flächenbezogenen 3-dimensionalen Oberflächenkennwerte sind durch die DIN EN ISO 25178 genormt /65/. Grundlage für die Bestimmung dieser Oberflächenkennwerte ist eine flächenhafte Vermessung einer Oberfläche. Im Rahmen dieser Arbeit wurden diese mit einem optischen Oberflächenmessgerät durchgeführt, siehe Kapitel 3.2.4. Das Ergebnis dieser Messung sind diskrete, lateral äquidistante Höhendaten, welche weiterverarbeitet werden. Ähnlich wie bei den 2-dimensionalen Oberflächenkennwerten werden die Rauheitsdaten für die 3-dimensionale Bewertung segmentiert und bewertet.

Die Interpretation der 3-dimensionalen Oberflächenkennwerte im Hinblick auf das Dichtsystem Radial-Wellendichtung ist bisher noch nicht abschließend geklärt. Einzelne Ansätze dazu wurden erarbeitet /66/, /67/. Im Folgenden werden drei 3-dimensionale Oberflächenkennwerte vorgestellt. Es gibt noch eine Vielzahl weiterer derartiger Oberflächenkennwerte, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wurden.

Die **maximale Höhe der Oberfläche  $S_z$**  gibt den Abstand zwischen der höchsten Spitze und der tiefsten Senke innerhalb eines Auswertebereichs an. Die maximale Höhe der Ober-



---

fläche  $S_z$  entspricht damit einer flächig gemessenen maximalen Rautiefe  $R_{max}$ . Bei einer homogenen Oberflächenbeschaffenheit sollten die Werte von  $R_z$  und  $S_z$  ähnlich sein.  $S_z$  gehört zu der Gruppe der Höhenparameter /65/.

Die **Spitzendichte der Oberfläche**  $S_{pd}$  gibt die Anzahl der Spitzen pro  $\text{mm}^2$  an.  $S_{pd}$  gehört zu der Gruppe der Elementparameter. Diese Gruppe unterscheidet sich von der zuvor genannten dadurch, dass eine funktionale Zerlegung der Oberfläche vorgenommen wird. Die erhaltenen Gebiete werden danach für die Kennwertberechnung herangezogen.

Der **flächenhafte Materialanteil der Oberfläche**  $S_{mr}(c)$  gibt den prozentualen Anteil des Materials, relativ zur Fläche des gesamten Auswertebereichs, in einer gewissen Höhe  $c$  an. Die Höhe  $c$  wird ebenfalls in Prozent angegeben. 100 Prozent entspricht der Höhe der höchsten Spitze im Auswertebereich und Null Prozent entsprechend der tiefsten Senke. Der Materialanteil  $S_{mr}(c)$  ist ein flächig bezogener Traganteil.  $S_{mr}(c)$  gehört zu der Gruppe der räumlichen Parameter.

## 3 Prüfeinrichtungen

Im Folgenden werden der Aufbau und die Aufgaben der verwendeten Versuchseinrichtungen und Messgeräte erörtert.

### 3.1 Versuchseinrichtungen

Für die dynamischen Untersuchungen an den realen Dichtsystemen wurden zwei unterschiedliche Prüfstände verwendet, siehe Kapitel 3.1.1 und 3.1.2. Um den Benetzungsfaktor bestimmen zu können, mussten die Oberflächenproben mit abgesetzten Fluidtropfen in geeigneter Weise eingelagert werden. Hierfür wurde ein Behälter konstruiert, siehe Kapitel 3.1.3.

#### 3.1.1 Dauerlaufprüfstand

Der Prüfstand verfügt über acht Prüfzellen für Radial-Wellendichtsysteme, siehe Abbildung 3.1. Jede Prüfzelle befindet sich in einem eigenständigen Aufbau. Insgesamt acht dieser Module können gleichzeitig und unabhängig voneinander in dem Prüfstandaufbau betrieben werden. Die einzelnen Prüfzellen sind so aufgebaut, dass die Dichtstelle ohne Beeinflussung durch das ölseitige Dichtungsumfeld betrieben werden kann. Luftseitig ist ein freier Blick auf die Dichtstelle möglich. Dies ermöglicht eine genaue Feststellung von gegebenenfalls auftretender Leckage. Die Temperatur unmittelbar an der Dichtkante kann mithilfe eines Thermografiesystems erfasst werden. Der Förderwert eines Dichtsystems kann durch die freie Zugänglichkeit gemessen werden. An diesem Prüfstand wurden die Förderwertmessungen und die Verschleißuntersuchungen durchgeführt, siehe Kapitel 4.4 und 4.5.

Die Parameter Ölsumpftemperatur, Drehzahl und Drehrichtung können für jede Prüfzelle unabhängig voneinander, zeitlich veränderlich vorgegeben werden. Der Prüfstand kann bis zu einer geregelten Ölsumpftemperatur von 130°C betrieben werden. Die Temperierung erfolgt über Kühlkanäle und eine Heizpatrone, die in das Gehäuse der Prüfzelle integriert sind. Der Riementrieb erlaubt in seiner Standardkonfiguration eine Drehzahl der Prüfspin-  
del von bis zu 10 000 1/min.

Die Wellenhülse als Gegenlauffläche wird über einen Adapter in einer sogenannten HSK-Spannzange aufgenommen, siehe Kapitel 4.1. Dieses aus dem Werkzeugmaschinenbereich stammende Bauteil ermöglicht eine axial variable Einspannung bei einer Rundlaufabweichung von maximal 0,003 mm. Um die Laufspuren aus mehreren Prüfläufen auf einer Wellenhülse zu platzieren, wurde der Adapter mit der Wellenhülse axial in der HSK-Spannzange verschoben. Die Prü fzellen sind zur Umgebung hin druckentlüftet. Abbildung 3.2 zeigt schematisch eine Prü fzelle im Querschnitt. Für die Füllung einer Prü fzelle bis zur Wellenmitte (Durchmesser der Wellenhülse 80 mm) werden etwa 1,1 Liter Fluid benötigt.



Abbildung 3.1: 8-Zellen Dauerlaufprüfstand

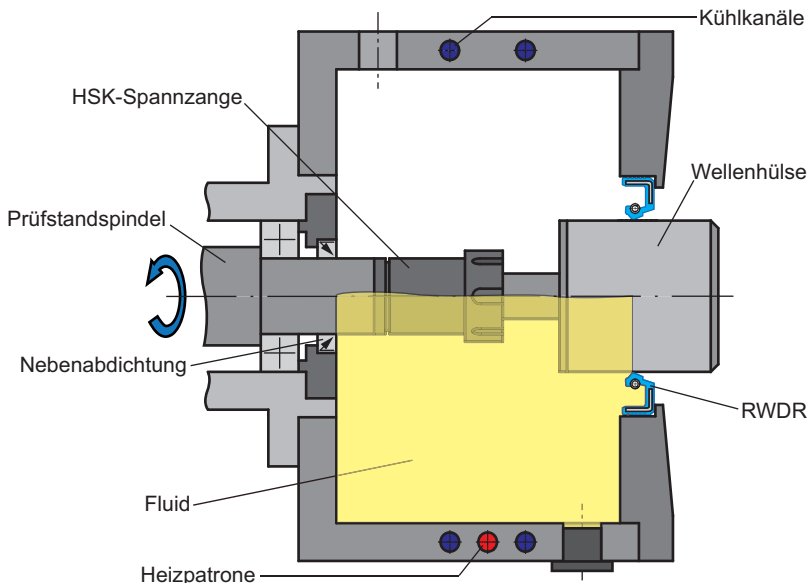


Abbildung 3.2: Prinzipskizze einer Prü fzelle des 8-Zellen Dauerlaufprüfstands

### 3.1.2 Einzeldichtungsprüfstand mit Reibmomentmesseinrichtung

Die Reibmomentmessungen wurden an einem Einzeldichtungsprüfstand durchgeführt. Abbildung 3.3 zeigt schematisch den Prüfstand im Querschnitt. Die Prüfzelle wird in eine Aufnahme eingepresst und diese an die Prüfvorrichtung montiert. Die Prüfvorrichtung ist in einem aero-statischen Lager gelagert und auf einem Kraftaufnehmer abgestützt. Durch die Luftlagerung ist die Kammer rotatorisch reibungsfrei gelagert. Aus der ermittelten Kraft am Kraftaufnehmer wird das, auf die Prüfvorrichtung wirkende Drehmoment berechnet. Dieses Drehmoment wird zum größten Teil aus dem innerhalb des Dichtsystems wirkenden Reibmoment erzeugt. Zu einem kleineren Teil wird es aus dem durch Fluidströmung in der Prüfvorrichtung erzeugten Planschmoment gebildet. Dieser Anteil ist drehzahl- und temperatur-beziehungsweise viskositätsabhängig. Diese Parameter werden innerhalb einer Messreihe nicht verändert, womit der Einfluss der Fluidströmung konstant ist. Die ermittelten Werte sind damit direkt von den Reibverhältnissen an der Prüfvorrichtung abhängig.

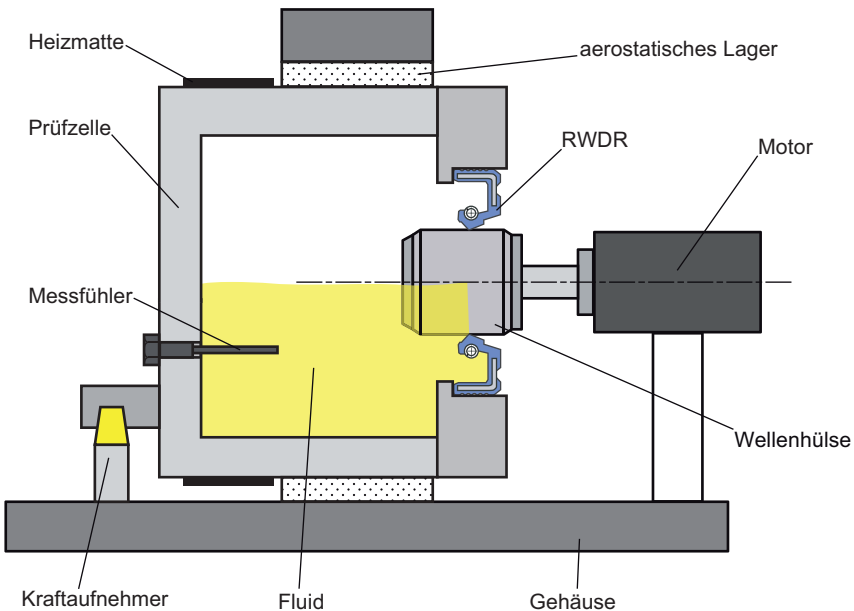


Abbildung 3.3: Prinzipskizze des Einzeldichtungsprüfstands

Die Beheizung der Prüfvorrichtung erfolgt über eine außen umlaufend angebrachte Heizmatte. Die Ölsumpttemperatur in der Prüfvorrichtung wird mit einem Messfühler gemessen und durch

---

eine Regelung eingestellt. Die Wellenhülse ist an der Antriebsspindel befestigt und wird von einem Drehstrommotor angetrieben. Die Drehzahl lässt sich stufenlos zwischen 10 und 5000 1/min einstellen. Für eine Füllung der Prü fzelle bis zur Wellenmitte (Durchmesser der Wellenhülse 80 mm) werden etwa 1,1 Liter Fluid benötigt.

### **3.1.3 Behälter zur Einlagerung von Oberflächenproben zur Bestimmung des Benetzungsfaktors**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Benetzungsfaktor von unterschiedlichen Fluiden bestimmt. Der Benetzungsfaktor gibt die zeitliche Veränderung der Benetzungsfläche eines Fluids auf einer Oberfläche an. Eine detaillierte Beschreibung der Messgröße und Erläuterungen zu der Durchführung der Messungen erfolgt in Kapitel 4.6.2. Daraus leiten sich die Eigenschaften des Behälters ab, welche im Folgenden beschrieben werden.

Eine Oberflächenprobe hat folgende Abmessungen: 300 mm lang, 50 mm breit und eine Dicke von 1 mm. Der Behälter ermöglicht es, die Oberflächenproben waagrecht einzulagern. Diese können über die Dauer der Einlagerung zur Umgebung hin luftdicht abgeschlossen werden. Der Innenraum des Behälters kann mithilfe einer Vakuumpumpe auf ein Druckniveau unterhalb des Umgebungsdrucks versetzt werden. Es gibt eine Möglichkeit zur Einbringung von Silika-Granulat. Damit wird die Feuchtigkeit der im Behälter verbleibenden Luft gebunden. Hierfür sind unterhalb der Auflageflächen der Oberflächenproben Vertiefungen vorgesehen. Die Oberflächenproben können während der Vermessung der Benetzungsfläche in dem Behälter verbleiben. Die genannten Eigenschaften tragen dazu bei, dass eine Beeinflussung durch das umgebende Medium Luft minimiert und für jede Messung möglichst gleichbleibend ist.

Der Behälter ist so konstruiert, dass die Möglichkeit besteht, diesen komplett mit darin eingelagerten Oberflächenproben, auf bis zu 110°C zu temperieren. Diese Temperierung wird durch eine Einlagerung des Behälters in einem Wärmeschrank durchgeführt. Eine weitere Rahmenbedingung ist, dass die Vermessung der Benetzungsflächen der Fluide mithilfe des Digitalkamerasystems erfolgen soll, siehe Kapitel 3.2.3. Der Behälter kann so positioniert werden, dass jede Stelle auf den Oberflächenproben betrachtet werden kann.

Für eine zeiteffiziente Durchführung der Messungen können mehrere Oberflächenproben in einem Behälter gleichzeitig eingelagert werden. Um eine zügige Durchführung der Benetzungsmessungen zu realisieren wurden zwei dieser Behälter gefertigt. Abbildung 3.4 zeigt sowohl den Behälter als CAD-Explosionsansicht als auch eine Fotografie eines Behälters.

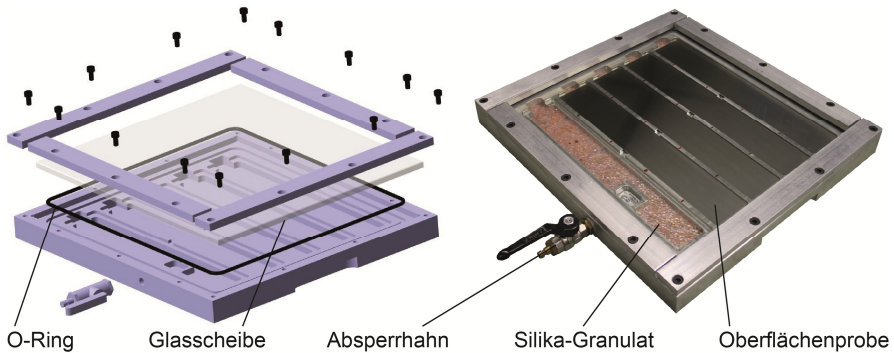


Abbildung 3.4: Behälter zur Einlagerung von Oberflächenproben zur Bestimmung des Benetzungsfaktors; CAD-Explosionsansicht und fotografische Darstellung.

## 3.2 Messgeräte und Hilfsmittel

Der Zustand der Komponenten der Dichtsysteme muss vor, zum Teil während und nach den einzelnen Untersuchungen erfasst werden. Weiterhin muss ein definierter Reinigungszustand der Oberflächenproben vor deren Benetzung erreicht werden. Für diese unterschiedlichen Aufgaben wurden mehrere Messgeräte und ein Hilfsmittel in Form eines Oberflächenreinigungsgerät verwendet. Im Folgenden werden diese vorgestellt.

### 3.2.1 Radialkraftmessgerät

Die Radialkraft der verwendeten RWDR wurde mit einem Zweibackten-Radiometer bestimmt, siehe Abbildung 3.5. Der Aufbau des Messgeräts und die Durchführung der Messung erfolgen nach DIN 3761-9 /68/. Die mechanische Messeinheit besteht aus zwei Messbacken mit halbrunder Außenkontur, siehe Abbildung 3.6. Eine Messbacke ist fest montiert. Die Andere, bewegliche Messbacke wird durch eine Blattfeder mit hoher Federsteifigkeit abgestützt. Wird ein RWDR über die beiden Messbacken aufgeschoben, so verschiebt sich die bewegliche Messbacke minimal auf die andere zu (wenige Mikrometer). Dieser Weg wird induktiv mit einem Messaufnehmer bestimmt, rechnerisch umgewandelt und als Radialkraft ausgegeben. Die Verschiebung der Messbacken ist so gering, dass keine nennenswerte Änderung des Systemdurchmessers (Messdurchmesser) eintritt.

Die Messzeit für die Radialkraftmessung beträgt zehn Sekunden. Dies bedeutet, dass ein Messwert der Radialkraft immer dem Momentanwert der Radialkraft zehn Sekunden nach

dem Aufschieben des RWDR auf die Messbacken entspricht. Den Startzeitpunkt legt dabei die erste gemessene Auslenkung fest. An jedem RWDR wurden fünf, jeweils um  $90^\circ$  am Umfang versetzte Messungen durchgeführt. Die erste und die fünfte Messung werden an der gleichen Messposition durchgeführt. Der erste Messwert weicht in der Regel noch deutlich nach oben ab. Der Wert, der einem RWDR zugeordnet wird, ist der Mittelwert aus den Einzelmessungen, wobei die erste Messung nicht mit einbezogen wird.



Abbildung 3.5: Radialkraftmessgerät nach DIN 3761-9

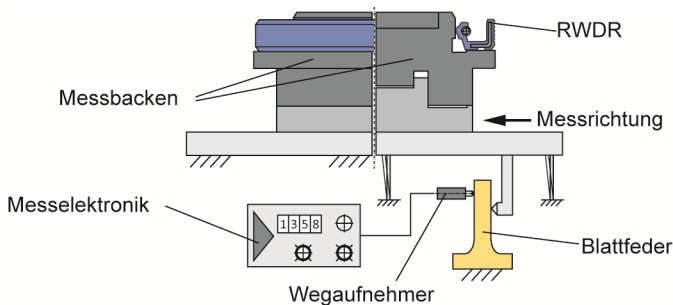


Abbildung 3.6: Schematischer Aufbau des Radialkraftmessgeräts

### 3.2.2 Kontaktwinkelmessgerät

Die Messung der Kontaktwinkel erfolgte mit einem OCA 20 Messgerät der Firma Dataphysics. Die grundsätzliche Funktion besteht darin, eine geringe Menge einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche abzusetzen. Eine im Messgerät integrierte Dosiereinheit ermöglicht das Bemessen des Fluids im angestrebten Bereich von wenigen  $\mu\text{l}$ . Die Flüssigkeit bil-

det eine Tropfenkontur auf der Oberfläche des Probenkörpers aus, welche durch eine Beleuchtung mit Gegenlicht gut erkennbar wird. Diese Tropfenkontur wird von einer Kamera mit digitalem Bildausgang aufgenommen und softwareseitig vermessen, siehe Abbildung 3.7. Entsprechend dieser Funktionen ergibt sich der Aufbau des Messgeräts, siehe Abbildung 3.8. Der genaue Handlungsablauf einer Messung wird in Kapitel 4.6.1 beschrieben.

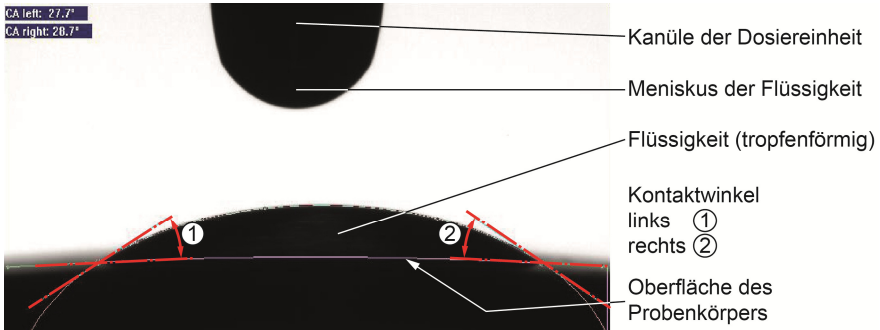


Abbildung 3.7: Kontaktwinkelmessung an einer Oberfläche

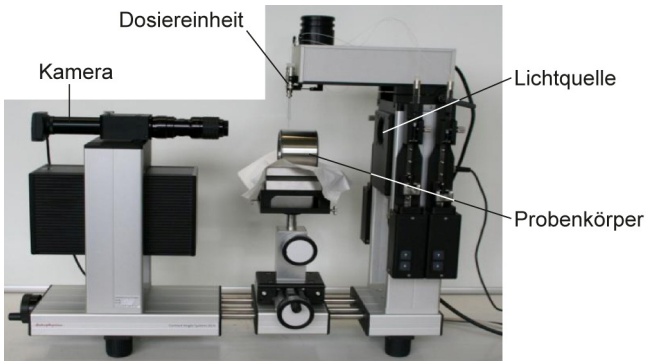


Abbildung 3.8: Kontaktwinkelmessgerät OCA 20 der Firma Dataphysics



### 3.2.3 Digitalkamerasystem

Für die optische Begutachtung von RWDR und für die Vermessung der Benetzungsflächen wurde ein Digitalkamerasystem eingesetzt. Dieses besteht im Wesentlichen aus einem elektrisch verfahrbaren Stativ, einer Kamera (Jenoptik ProgRes® C14) und einem Vergrößerungsobjektiv (Navitar).

Mit dem Digitalkamerasystem wurden Bildausschnitte der Dichtkanten aufgenommen. Die Blickführung wird hierzu durch einen Spiegel umgelenkt und erfolgt radial nach außen, siehe Abbildung 3.9. Schadstellen können gefunden und photographisch festgehalten werden. Nach den dynamischen Untersuchungen wird so auch die Verschleißbreite der RWDR erfasst. Durch eine Messsoftware ist es möglich in einer Bildaufnahme Maße zu bestimmen. Die Verschleißbreite ist am Umfang eines RWDR nicht zwangsläufig gleichbleibend. Deshalb wird die Verschleißbreite an vier, gleichmäßig am Umfang verteilten Positionen bestimmt. Die einem RWDR zugeordnete Verschleißbreite ist hier eine Mittelwertbildung aus vier Einzelmessungen.

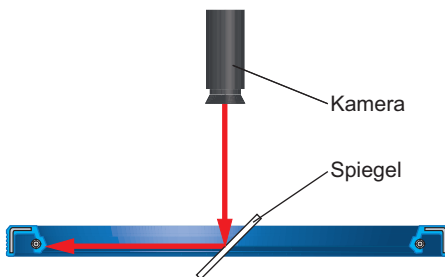


Abbildung 3.9: Blickführung bei der Betrachtung eines RWDR am Digitalkamerasystem

Für die Vermessung der Benetzungsflächen der Fluide auf den Oberflächenproben wurde das Digitalkamerasystem ebenfalls eingesetzt. Die Blickführung erfolgt hierbei senkrecht auf die Oberflächenprobe. Durch die bereits genannte Messsoftware ist es möglich die Fläche, die ein Fluid benetzt zu vermessen. Weiterführende Informationen und eine durch das Digitalkamerasystem aufgenommene Abbildung einer benetzten Oberflächenprobe finden sich in Kapitel 4.6.2.

### 3.2.4 Optisches Oberflächenmessgerät

Die optische Vermessung von Oberflächen wurde mit einem Microprof® Topografiemessgerät der Firma Fries Research & Technologie (FRT) durchgeführt, siehe

Abbildung 3.10. Zentrales Element dieses Messsystems ist ein Sensor, welcher hochgenau den Abstand zur Oberfläche angibt. Während eines Messvorgangs wird das zu vermessende Werkstück mittels eines x-y-Tisches lateral unter dem senkrecht dazu stehenden Sensor hindurchbewegt. Dabei rastert dieser die Oberfläche Punkt für Punkt ab und ermittelt die Höhenwerte.

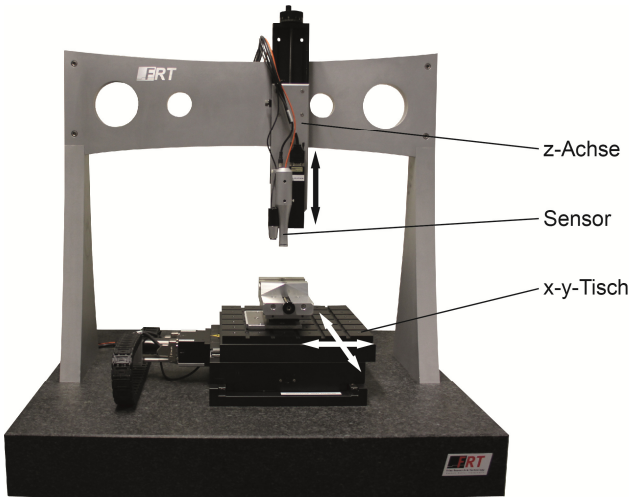


Abbildung 3.10: Topografiemessgerät FRT Microprof<sup>®</sup>

Der Sensor arbeitet nach dem Prinzip der chromatischen Aberration. Die zu vermessende Oberfläche wird mit fokussiertem Weißlicht beleuchtet. Durch eine Linse mit hoher chromatischer Aberration wird der Lichtstrahl aufgefächert und somit in seine Spektralanteile (Farben) zerlegt. Jede Farbe besitzt eine andere Wellenlänge. Je nach Abstand des Sensors von der Oberfläche wird eine dieser Wellenlängen auf der Oberfläche fokussiert und damit optimal von der Oberfläche reflektiert. Das reflektierte Licht wird im Sensor aufgenommen und durch ein Spektrometer analysiert. Anhand einer Kalibriertabelle wird der aktuelle Fokusabstand von Sensor zur Oberfläche bestimmt /69/. Eine maximale Auflösung in z-Richtung von 10 nm lässt sich dadurch erreichen. Weitere technische Daten des verwendeten Messsystems sind in Tabelle 3.1 zu finden.

Tabelle 3.1: Technische Daten Topografiemessgerät FRT Microprofil<sup>®</sup>

| Bezeichnung                         | Wert                       |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Messbereich in z-Richtung           | 300 $\mu\text{m}$          |
| Auflösung in z-Richtung             | 0,01 $\mu\text{m}$ (10 nm) |
| Auflösung in x-y-Richtung (maximal) | 1 $\mu\text{m}$            |

### 3.2.5 Taktiles Rauheitsmessgerät

Die taktile Vermessung der Oberflächen der Gegenläufigen wurde mit einem Rauheitsmessgerät T 8000 der Firma Hommel durchgeführt, siehe Abbildung 3.11.

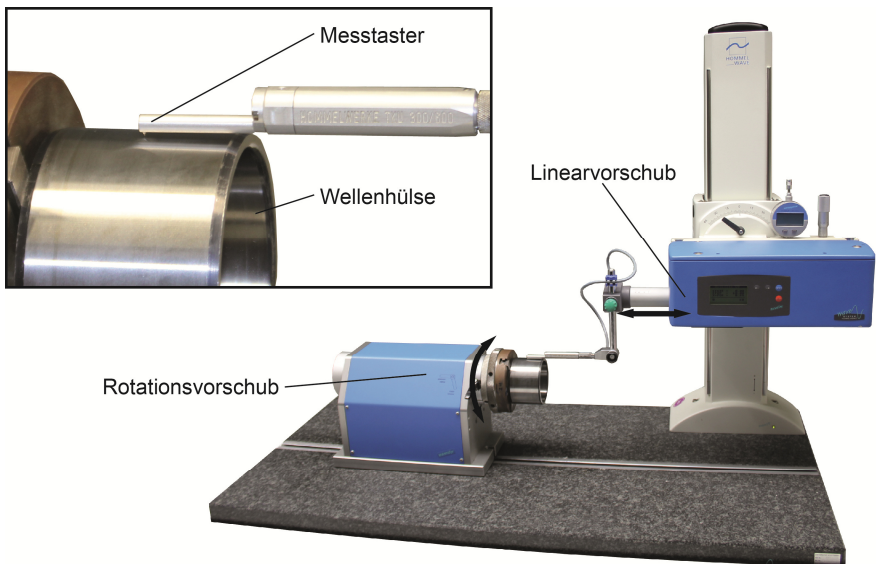


Abbildung 3.11: Rauheitsmessgerät Hommel T8000

Dieses tastet die Oberfläche zweidimensional mit dem Tastschnittverfahren nach DIN EN ISO 3274 ab /70/. Ein Messtaster mit einer vertikal beweglichen Tastspitze (Spitzenradius 2  $\mu\text{m}$ , Spitzenwinkel 90°) wird horizontal mit einer sehr geringen Prüfkraft, mithilfe

eines Linearvorschubs über die Oberfläche bewegt. Aus den gewonnenen Konturschrieben werden sämtliche Oberflächenkennwerte nach DIN EN ISO 4287 bestimmt /64/.

Der Nadellagerinnenring, dessen Außenkontur als Gegenlauffläche dient, wird zur Vermessung auf einen Rotationsvorschub gespannt. Drallstrukturen werden nach der Mercedes-Benz-Norm MBN 31007-7 ermittelt /71/. Dazu werden mehrere einzelne Messungen mit axial identischer Startposition und am Umfang definiert versetzter Winkellage durchgeführt. Periodisch wiederkehrende Drallstrukturen auf der Oberfläche werden so erkannt. Innerhalb des Forschungsprojekts ist es unerlässlich, dass alle verwendeten Gegenlaufflächen drallfrei sind. Dies wurde mittels der genannten Herangehensweise nachgewiesen.

### 3.3 Oberflächenreinigungsgerät

Zur Reinigung von Oberflächen wurde ein Plasmareinigungsgerät vom Typ Piezobrush der Firma Reinhausen Plasma eingesetzt. Der Reinigungseffekt wird durch die Überströmung der zu reinigenden Oberfläche mit einem ionisierten, inerten Gas erreicht. Als Gas wurde in dieser Anwendung Helium verwendet. Das ionisierte Gas bindet auf der Oberfläche angelagerte Fremdatome und -moleküle und transportiert diese weg. In Abbildung 3.12 ist ionisiertes Gas zu sehen wie es auf eine Oberflächenprobe trifft.

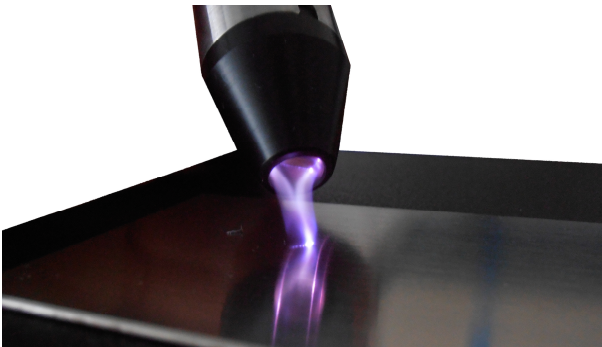


Abbildung 3.12: Anwendung des Oberflächenreinigungsgeräts Piezobrush, ionisiertes Gas trifft auf die Oberfläche

Der Hersteller gibt an, dass mit diesem Reinigungsverfahren grundsätzlich Öle, Fette und auch Tenside in gasförmige Gruppen aufgelöst werden können /72/. Eine eingehende Vorbehandlung der zu reinigenden Oberfläche ist dennoch zweckmäßig. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Oberflächen, welche mit dem Plasmareinigungsgerät gereinigt wurden, zu-

vor mit Reinigungsbenzin vorgereinigt. Diese Herangehensweise lässt eine bessere und effizientere Reinigung mit dem Plasmareinigungsgerät zu.

## 4 Untersuchungen und Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche dynamische und statische Untersuchungen durchgeführt. In diesem Kapitel werden die einzelnen Komponenten der untersuchten Dichtsysteme vorgestellt. Es wird auf die einzelnen Untersuchungen eingegangen und die Ergebnisse daraus werden erörtert.

### 4.1 Komponenten der untersuchten Dichtsysteme

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit untersuchten Komponenten des Dichtsystems (RWDR, Gegenlauffläche, abzudichtendes Fluid) beschrieben.

#### ***RWDR***

Die verwendeten RWDR sind allesamt käuflich zu erwerbende Standardbauteile. Es handelt sich um RWDR mit einem Systemdurchmesser von 80 mm. NBR und FPM sind die am häufigsten verwendeten Werkstoffe für die Herstellung von RWDR /12/. Diese wurden verwendet, um aussagekräftige und anwendbare Ergebnisse erzielen zu können. Die Freudenberg Simirit GmbH & Co. KG stellte die RWDR in den Standardwerkstoffen 72 NBR 902 und 75 FPM 585 zur Verfügung.

Sämtliche untersuchte RWDR haben keine hydrodynamischen Dichthilfen und keine Schutzlippe. Einige RWDR aus NBR hatten im Anlieferzustand eine Schutzlippe. Diese wurde vor den Untersuchungen entfernt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Ergebnisse auf den entscheidenden tribologischen Kontaktbereich der Dichtkante reduziert werden. Es tritt kein, durch eine berührende Schutzlippe verursachter Reibungseinfluss, auf. Die RWDR haben eine gestochene Dichtkante und entsprechen der in der Normung genannten Standardbauform A /3/.

Der RWDR ist eine Komponente, welche die Funktionsweise des gesamten Dichtsystems beeinflusst. Durch Verwendung von baugleichen RWDR wird dieser Faktor konstant gesetzt. Mögliche Veränderungen innerhalb des Dichtsystems können direkt auf das abzudichtende Fluid zurückgeführt werden. Tabelle 4.1 zeigt eine Auflistung der in den unterschiedlichen Untersuchungen verwendeten RWDR.

Tabelle 4.1: Auflistung der verwendeten RWDR

|   |                                  |            |
|---|----------------------------------|------------|
| Hersteller                                    | Freudenberg Simrit GmbH & Co. KG |            |
| Herstellerbezeichnung RWDR                    | BAU 5 X 2                        | BAUM 5 X 7 |
| Herstellerbezeichnung Werkstoff               | 72 NBR 902                       | 75 FPM 585 |
| Benennung und Abmessungen (nach DIN 3670 /3/) | RWDR DIN 3670 A80x100x10         |            |

### **Gegenlauffläche**

Die Anforderungen an eine Gegenlauffläche wurden bereits eingehend erläutert, siehe Kapitel 2.1.2. Nadellagerinnenringe mit einer im Einstich geschliffenen Oberfläche erfüllen sämtliche dieser Anforderungen. Damit ist keine negative Beeinflussung der Funktion des Dichtsystems zu erwarten. Diese Standardbauteile sind in gleichbleibender Qualität verfügbar. Ein die Funktion des Dichtsystems beeinflussender Faktor wird dadurch konstant gesetzt. Mögliche Veränderungen innerhalb des Dichtsystems können direkt auf das abzudichtende Fluid zurückgeführt werden. In dieser Arbeit wurden Nadellagerinnenringe der Schaeffler Technologies AG & Co. KG verwendet. Es handelte sich um Bauteile mit der Bezeichnung IR70x80x54EGS. Diese haben einen Außendurchmesser von 80 mm. Der Innendurchmesser beträgt 70 mm und die Breite 54 mm. Die zylindrische, äußere Oberfläche erfüllt alle Anforderungen an eine Gegenlauffläche. Die Wellenhülsen sind aus dem Stahlwerkstoff 100Cr6 hergestellt.

### **Abzudichtendes Fluid**

Für diese Arbeit ist es entscheidend, exakt zu wissen, welche Additive in den Fluiden enthalten sind. Nur dadurch ist es möglich Veränderungen des Betriebsverhaltens der Dichtsysteme den einzelnen Additiven zuzuordnen. Die Additive wurden praxisnah ausgewählt. Es wurden zehn handelsübliche Additive aus unterschiedlichen chemischen und funktionalen Gruppen ausgewählt. Sämtliche Fluide wurden durch die Firma Klüber Lubrication zur Verfügung gestellt. Es sollten zukunftsweisende Schmierstoffe betrachtet werden. Deshalb wurden zwei unterschiedliche synthetische Grundöle, ein Polyglykol (PG) und ein Polyalphaolefin (PAO), als Basis verwendet. Die Grundöle entsprechen beide der Viskositätsklasse ISO VG 220 /73/. Das PG Grundöl hat bei 40°C eine gemessene Viskosität von 218 mm<sup>2</sup>/s und bei 100°C eine Viskosität von 35 mm<sup>2</sup>/s. Das PAO Grundöl hat bei 40°C eine gemessene Viskosität von 217 mm<sup>2</sup>/s und bei 100°C eine Viskosität von 26 mm<sup>2</sup>/s.

Jedes Fluid enthält genau ein Additiv, dessen Konzentration bekannt ist. Nicht alle Additive lassen sich in den unterschiedlichen Grundölen lösen. Additive, welche in einem Grundöl nicht löslich sind, wurden mit einem „✖“ gekennzeichnet. Die insgesamt 17 löslichen Kombinationen sind mit einem „✓“ gekennzeichnet, siehe Tabelle 4.2.

In allen Untersuchungen wurden jeweils die nicht additvierten Grundöle ebenfalls berücksichtigt. Dadurch sollten die Wechselwirkungen mit den Elastomeren festgestellt werden, welche alleine abhängig von dem Grundöl und unabhängig von der Additivierung sind. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit 19 Fluide in den unterschiedlichen Untersuchungen verwendet.

Tabelle 4.2: In den Untersuchungen verwendete Fluide

| Additiv                     | Konzentration<br>(Massenanteil) | PG | PAO | Typ                          |
|-----------------------------|---------------------------------|----|-----|------------------------------|
| Thiadiazol                  | 1 %                             | ✓  | ✗   | Hochdruckadditiv             |
| Dialkyldithiocarbamat       | 1 %                             | ✓  | ✓   |                              |
| Aminphosphat                | 1 %                             | ✓  | ✓   | Verschleißschutzadditiv      |
| Triarylphosphat             | 1 %                             | ✓  | ✓   |                              |
| Ca-Sulfonat                 | 1 %                             | ✗  | ✓   | Korrosionsschutzadditiv      |
| Benzotriazolderivat         | 0,1 %                           | ✓  | ✓   |                              |
| Sterisch gehindertem Phenol | 1 %                             | ✓  | ✓   | Alterungsschutzadditiv       |
| Alkyl. aromatisches Amin    | 1 %                             | ✓  | ✓   |                              |
| Mo-Dialkyldithiophosphat    | 1 %                             | ✓  | ✓   | Reibungsveränderer           |
| Langkettiges Polymer        | 5 %                             | ✗  | ✓   | Viskositätsindex-Verbesserer |

✗ = Additiv in Grundöl nicht löslich

✓ = Additiv in Grundöl löslich



## 4.2 Voruntersuchungen an Komponenten der Dichtsysteme

Alle Untersuchungen wurden von eingehenden Vor- und Nachuntersuchungen der einzelnen Komponenten der Dichtsysteme begleitet. Einerseits werden dadurch vergleichbare Ausgangsbedingungen sichergestellt, andererseits werden Veränderungen, vergleichend zwischen Ursprungs- und Gebrauchzustand, festgestellt.

### **Radialkraft und Verschleißbreite der RWDR**

An sämtlichen verwendeten RWDR wurde sowohl vor- als auch nach den Untersuchungen die Radialkraft gemessen. Veränderungen der RWDR während der Untersuchung können so gegebenenfalls auf die Wirkungen des Fluids zurückgeführt werden. Die Ergebnisse dieser vergleichenden Messungen sind gegebenenfalls den jeweiligen einzelnen Untersuchungen zugeordnet. Explizit aufgeführt werden diese Ergebnisse bei den Verschleißuntersuchungen, siehe Kapitel 4.5.

Das verwendete Radialkraftmessgerät ist in Kapitel 3.2.1 beschrieben. In Tabelle 4.3 sind die Mittelwerte und die Standardabweichung der Messung der Radialkraft aller verwendeten RWDR aus NBR und FPM angegeben. Nachfolgend eine kurze Zusammenfassung der Messbedingungen. Insgesamt wurden 212 RWDR vermessen und verwendet. Die durchschnittlichen Werte der Radialkräfte für RWDR aus NBR und FPM sind deutlich unterschiedlich. Dieser Umstand ist produktspezifisch durch den Hersteller der RWDR vorgegeben. Das unterschiedliche Niveau der Radialkraft der RWDR aus den beiden Werkstoffen ist der Hauptgrund für die unterschiedlichen Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen. Dies ist der Grund warum die dynamischen Untersuchungen immer getrennt nach den RWDR aus NBR und FPM bewertet werden.

Vorgehen zur Messung der Radialkraft von RWDR (nach DIN 3761-9 /68/)

- Messwerterfassung nach 10 s
- Keine vorhergehende Lagerung der RWDR auf einer Welle
- 5 Messungen am Umfang verteilt (90° Versatz; 1. und 5. Messposition identisch)
- Ergebnis aus Mittelwertbildung aus den letzten 4 Messungen dem jeweiligen RWDR zugeordnet

Tabelle 4.3: Mittelwerte der Radialkraft der verwendeten RWDR

| Werkstoff | Mittelwert der Radialkraft | Standardabweichung |
|-----------|----------------------------|--------------------|
| NBR       | 36,2 N                     | 2,4 N              |
| FPM       | 32,3 N                     | 1,0 N              |

Nach den dynamischen Untersuchungen wird die Verschleißbreite gemessen. Dazu wird das Digitalkamerasystem verwendet, siehe Kapitel 3.2.3. Die Verschleißbreite wird aus einer Mittelwertbildung aus mindestens vier Einzelmessungen gebildet und dem jeweiligen RWDR zugeordnet. Explizit aufgeführt werden diese Ergebnisse bei den Verschleißuntersuchungen, siehe Kapitel 4.5.

### **Oberflächenbeschaffenheit der Gegenlaufflächen**

Die Oberflächen der Nadellagerinnenringe wurden vor der Verwendung in den Untersuchungen taktil vermessen. Die Vermessung erfolgte mit dem Hommel T8000. Ausgehend von den Messergebnissen wurde die Drallfreiheit durch eine Auswertung mit der CARMEN-Methode nach der Mercedes-Benz Norm (MBN) 31007-7 sichergestellt, siehe Kapitel 3.2.5 /71/. Keiner der verwendeten Nadellagerinnenringe weist Drallstrukturen auf, welche die Dichtfunktion beeinflussen können. Ein negativer oder unterschiedlicher Einfluss der Gegenlaufflächen auf die Untersuchungsergebnisse ist dadurch ausgeschlossen.

In der Normung von RWDR werden Vorgaben bezüglich Rauheitskennwerten genannt, siehe /3/. Im Einzelnen sind dies Vorgabebereiche für den arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  und für die gemittelte Rautiefe  $R_z$  und ein oberer Grenzwert für die maximale Rautiefe  $R_{max}$ . In Tabelle 4.4 sind die durchschnittlichen Rauheitskennwerte und die Standardabweichungen der Messungen von allen verwendeten Nadellagerinnenringen angegeben. Sie sind den Vorgaben aus der Normung gegenübergestellt. Sämtliche gemessenen Rauheitskennwerte der Nadellagerinnenringe sind innerhalb der Vorgaben der Normung. Die Mittelwerte liegen im unteren mittleren Bereich der Vorgaben und die Standardabweichungen sind gering. Insgesamt wurden 41 Nadellagerinnenringe vermessen und verwendet.

Tabelle 4.4: Rauheitskennwerte der verwendeten Nadellagerinnenringe

|                                       | Vorgabe laut<br>DIN 3760 /3/ | Mittelwert         | Standard-<br>abweichung |
|---------------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Arithmetischer<br>Mittenrauwert $R_a$ | 0,2...0,8 $\mu\text{m}$      | 0,35 $\mu\text{m}$ | 0,10 $\mu\text{m}$      |
| Gemittelte<br>Rautiefe $R_z$          | 1...5 $\mu\text{m}$          | 2,39 $\mu\text{m}$ | 0,36 $\mu\text{m}$      |
| Maximale<br>Rautiefe $R_{max}$        | 6,3 $\mu\text{m}$            | 2,75 $\mu\text{m}$ | 0,38 $\mu\text{m}$      |

### 4.3 Reibmomentmessungen

Die Reibmomentmessungen wurden an einem Einzeldichtungsprüfstand durchgeführt. Die Messung des Reibmoments beruht grundsätzlich darauf, dass die Prüfwelle rotatorisch reibungsfrei in einem aerostatischen Lager gelagert ist und sich das Reibmoment des Dichtsystems auf einem Kraftaufnehmer abstützt, siehe Kapitel 3.1.2. Während der Untersuchungen war die Prüfwelle bis zur Wellenmitte mit Fluid gefüllt.

Der Prüfstand wurde je Prüflauf 25 Stunden betrieben. Das Lastkollektiv und die einzelnen Abschnitte der Messung sind in Abbildung 4.1 ersichtlich. Abschnitt I ist die Aufwärmphase. Diese dauert eine Stunde. Während dieser Zeit rotiert die Wellenhülse nicht. Die Prüfwelle wird über eine außenliegende Heizmatte temperiert. Nach etwa einer Stunde hat die Ölumpftemperatur die Vorgabe von 90°C erreicht. Die Wellenhülse wird nach einer Stunde auf eine konstante Drehzahl von 1500 1/min beschleunigt. Das Reibmoment steigt sprunghaft an, siehe Abbildung 4.1.

Die Konditionierung des Dichtsystems findet im Anschluss an den Abschnitt I statt. Die Ölumpftemperatur wird auf den gewünschten Betrag von 90°C geregelt. Das Reibmoment steigt im Anschluss an den Abschnitt I nach dem ersten sprunghaften Anstieg weiter an. Es erreicht spätestens ab etwa der 18. Betriebsstunde einen annähernd konstanten Wert. Die Messwertfassung erfolgt während der ganzen Prüfdauer von 25 Stunden. Für die Bewertung des Reibmoments werden die quasistationären Werte im Abschnitt II herangezogen. Der Abschnitt II erstreckt sich von der 22. bis zur 25. Betriebsstunde. Der Mittelwert, der während dieser drei Stunden gemessenen Einzelmesswerte des Reibmoments, wurde als charakteristische Größe dem Dichtsystem zugeordnet. Es wurde im Abstand von fünf Sekunden ein Messwert aufgezeichnet. Für die Bildung des Mittelwertes standen somit 2160 Einzelmesswerte des Reibmoments pro Dichtsystem zur Verfügung.

Sämtliche dieser Messbedingungen und das gesamte Lastkollektiv wurden eingehend in Variations- und Langzeituntersuchungen abgesichert. Die Ermittlung der Reibmomente erfolgte pro Fluid jeweils anhand eines Dichtsystems. Untersucht wurden Dichtsysteme mit RWDR aus NBR und aus FPM.

Für alle folgenden Bewertungen ist die Kenntnis des Zusammenhangs der Radialkraft und des Reibmoments eines Dichtsystems unerlässlich. Die Radialkraft und das Reibmoment eines Dichtsystems folgen einem angenähert linearen Zusammenhang, siehe Abbildung 4.2. Die RWDR aus den unterschiedlichen Werkstoffen mit den unterschiedlichen Radialkräften finden sich gruppiert in dem Diagramm wieder.

Die dargestellten Werte der Radialkraft wurden nach den Reibmomentmessungen ermittelt und entsprechen nicht denen im Neuzustand. Auch können diese zwangsläufig nicht den Werten im temperierten Prüfbetrieb entsprechen.

Mit zunehmender Radialkraft wird tendenziell ein größeres Reibmoment des Dichtsystems gemessen. Dieses Ergebnis wurde auch durch anderweitige Untersuchungen bestätigt /38/.

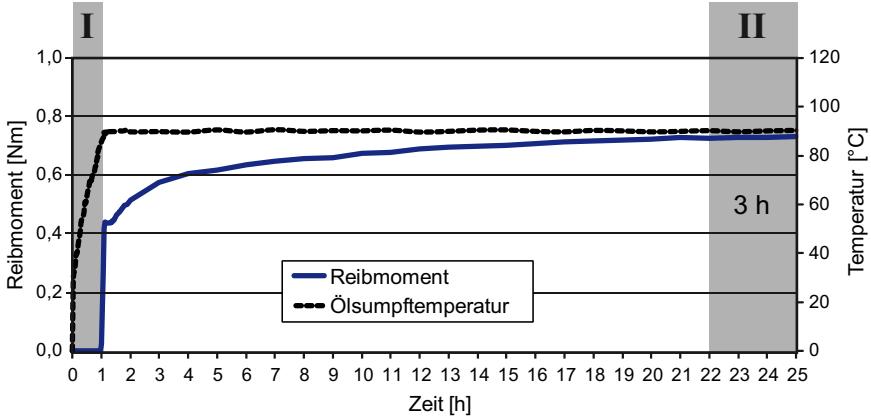


Abbildung 4.1: Ergebnis einer Reibmomentmessung

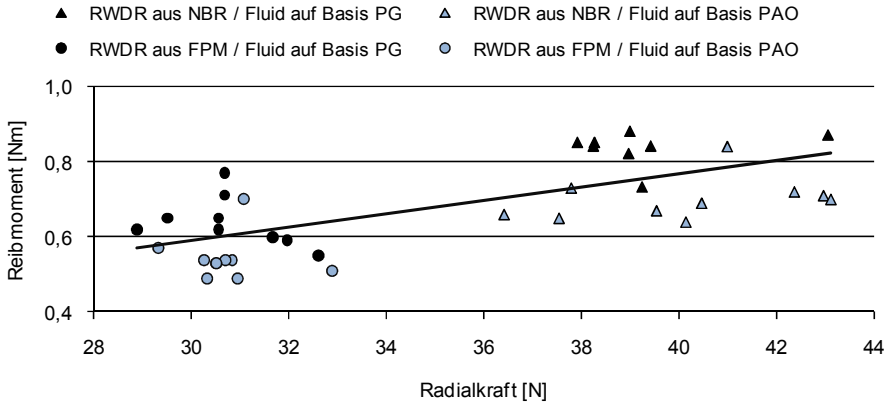


Abbildung 4.2: Zusammenhang zwischen der Radialkraft (nach den Reibmomentmessungen) und dem Reibmoment

Es folgt eine Beschreibung der Einflüsse getrennt nach dem Werkstoff der RWDR, nach dem Grundöl und nach der Additivierung. Die Diagramme sind getrennt nach RWDR Werkstoff aufgeführt, siehe Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4. Da nicht alle Additive in beiden Grundölen löslich sind, fehlen einzelne Balken in den Diagrammen. So ist z. B. nie das Fluid mit Thiadiazol auf Basis von PAO vertreten.

### ***Einfluss des Werkstoffs der RWDR***

Dichtsysteme mit RWDR aus FPM weisen mit durchschnittlich 0,59 Nm ein niedrigeres Reibmoment auf, als Dichtsysteme mit RWDR aus NBR mit durchschnittlich 0,77 Nm. Es ist zu beachten, dass die RWDR aus FPM eine niedrigere Radialkraft haben als die aus NBR. In dieser Untersuchung hatten die RWDR aus FPM vor den Untersuchungen mit durchschnittlich 32,5 N im Vergleich zu den RWDR aus NBR mit durchschnittlich 35,3 N eine um ca. 8 % niedrigere Radialkraft, siehe Tabelle 4.5. Der Einfluss der Radialkraft wurde in Abbildung 4.2 dargestellt. Die dort eingetragene Gerade hat eine Steigung von 0,02 Nm/N. Die Radialkraft der RWDR aus NBR ist durchschnittlich um 2,8 N höher. Daraus würde, entsprechend dem genannten Zusammenhang, ein um durchschnittlich 0,056 Nm höheres Reibmoment resultieren. Tatsächlich ist das Reibmoment der RWDR aus NBR aber durchschnittlich um 0,18 Nm höher, als das der RWDR aus FPM. Die Radialkraft ist folglich nicht der alleinige Grund für das höhere Reibmoment der RWDR aus NBR. Es ist zu beachten, dass die unterschiedlichen RWDR Werkstoffe den aktiven Dichtmechanismus unterschiedlich stark ausbilden. Auf der Verschleißfläche von RWDR aus FPM werden gröbere Strukturen als bei RWDR aus NBR festgestellt. Diese gröberen Strukturen können der Grund für das geringere Reibmoment sein.

### ***Einfluss des Grundöls***

Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PG weisen mit durchschnittlich 0,75 Nm ein höheres Reibmoment auf, als Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PAO mit 0,62 Nm. Die höheren Reibmomente der Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PG sind bereits deutlich bei den nicht additvierten Grundölen zu erkennen, siehe Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4. Auch bei den additvierten Fluiden ist jeweils das höhere Reibmoment bei den Dichtsystemen mit Fluiden auf Basis von PG zu verzeichnen.

### ***Einfluss der Additive***

Einzelne Additive heben sich durch einen Einfluss hervor, der unabhängig vom Grundöl und vom RWDR Werkstoff festzustellen ist. Das Additiv Ca-Sulfonat ist nur in Lösung mit PAO vertreten. Die Dichtsysteme mit diesem Fluid weisen die niedrigsten Reibmomente aller Messungen auf.

Auf niedrigem Niveau liegen die Dichtsysteme mit Fluiden mit dem Additiv sterisch gehindertem Phenol. Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM haben diese immer die

niedrigsten gemessenen Werte. Bei dem Dichtsystem mit dem RWDR aus NBR und dem Grundöl PG trifft dies auch zu. Mit dem Grundöl PAO liegt der Wert auf einem niedrigen Niveau, ist aber nicht der niedrigste Messwert der gesamten Reihe.

Fluide mit dem Additiv Aminphosphat sorgen in den Dichtsystemen immer für die höchsten Reibmomente. Diese hohen Reibmomente der Dichtsysteme mit Fluiden mit Aminphosphat sind eine nennenswerte Ausnahme. Abgesehen davon sind die Veränderungen, welche den Additiven zuzuordnen sind, gering. Ausgehend von dem Niveau des Reibmoments, welches die Dichtsysteme mit den beiden Grundölen jeweils mit den beiden RWDR Werkstoffen aufweisen, wird dies deutlich. Die gemessenen Reibmomente der Dichtsysteme mit additivierten Fluiden auf Basis von PG (Ausnahme Aminphosphat) liegen unter denen, welche mit Dichtsystemen mit dem nicht additivierten Grundöl PG erreicht wurden. Die gemessenen Reibmomente der Dichtsysteme mit additivierten Fluiden auf Basis von PAO (Ausnahme Aminphosphat) liegen bei einer sehr ähnlichen Größenordnung, wie das Reibmoment bei dem Dichtsystem mit dem nicht additivierten Grundöl PAO. Sehr deutlich ist dies bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM. Hier liegt das Reibmoment des Dichtsystems mit dem Grundöl PAO bei 0,53 Nm. Die Spannweite sämtlicher anderer Fluide (Ausnahme Aminphosphat) reicht lediglich von 0,49 bis 0,57 Nm. Schon die herstellungsbedingt nicht auszuschließenden minimalen Schwankungen der Radialkraft der RWDR können hierfür verantwortlich sein.

Signifikanten Einfluss haben die Additive Aminphosphat, Ca-Sulfonat und sterisch gehindert Phenol. Der Einfluss auf das Reibmoment durch sämtliche andere Additive ist geringer. Verglichen mit dem Einfluss durch die unterschiedlichen RWDR Werkstoffe oder die unterschiedlichen Grundöle, werden diese als gering bewertet.

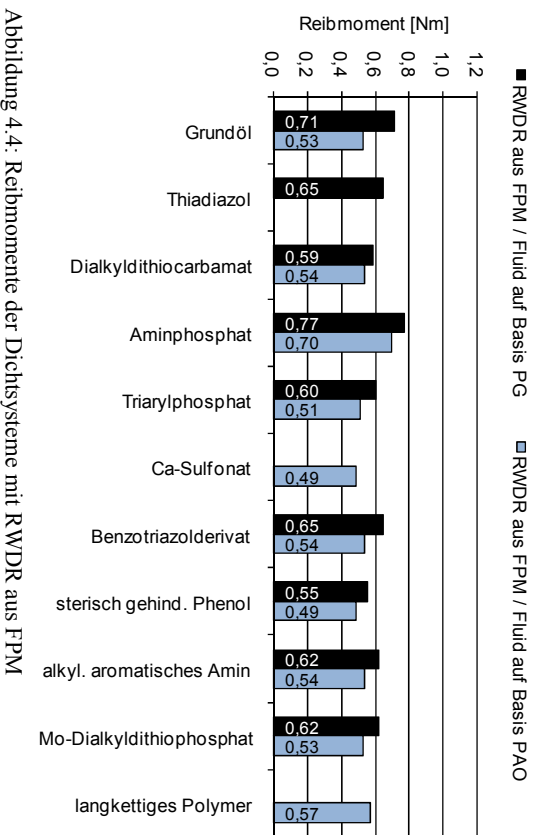
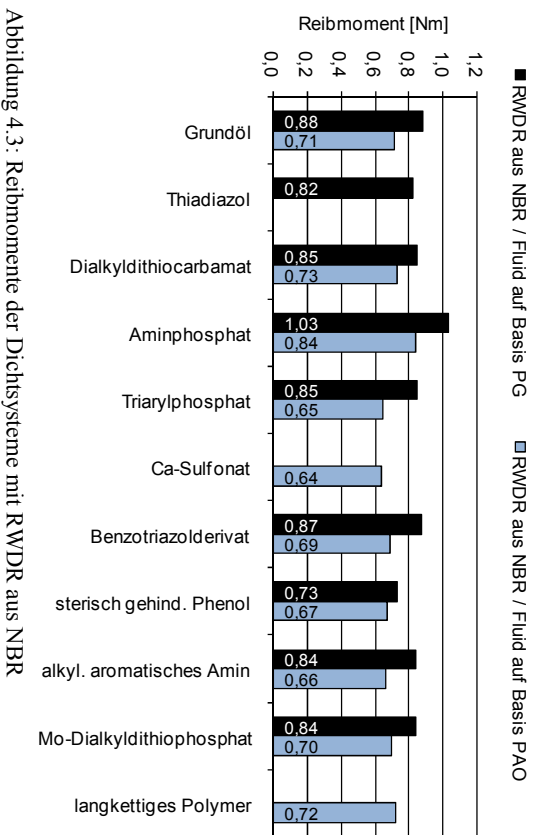


Tabelle 4.5: Mittelwerte der Reibmomente aufgeteilt nach RWDR Werkstoff und Grundöl

|                                  | NBR  |      | FPM  |      |
|----------------------------------|------|------|------|------|
|                                  | PG   | PAO  | PG   | PAO  |
| Mittelwerte der Reibmomente [Nm] | 0,77 |      | 0,59 |      |
|                                  | 0,86 | 0,70 | 0,64 | 0,54 |

### Fazit

Das Reibmoment der Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PG ist in diesen Untersuchungen größer, als das mit Fluiden auf Basis PAO. Dies ist unabhängig von dem RWDR Werkstoff.

An den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR wurden größere Reibmomente ermittelt, als an jenen mit RWDR aus FPM. Hierbei ist allerdings die durchschnittlich etwas höhere Radialkraft der RWDR aus NBR zu beachten.

Der Einfluss der einzelnen Additive auf das Reibmoment des Dichtsystems ist vorhanden. Einige Additive ragen hier besonders hervor (Aminphosphat, Ca-Sulfonat und sterisch gehindertes Phenol). Diese zeigen einen vom RWDR Werkstoff und dem Grundöl unabhängigen, erhöhenden beziehungsweise erniedrigenden Einfluss auf das Reibmoment.

## 4.4 Förderwertmessungen

Die Förderwertmessungen wurden an dem 8-Zellen Dauerlaufprüfstand durchgeführt, siehe Kapitel 3.1.1. Der RWDR wurde „falsch“ herum, das heißt, mit der Luftseite dem Fluid zugewandt, eingebaut, siehe Abbildung 4.5.

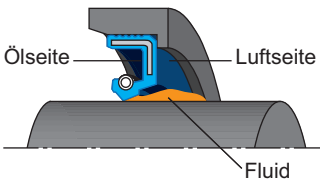


Abbildung 4.5: Anordnung des Dichtsystems bei der Förderwertmessung

Die Prüfzellen waren während den Untersuchungen bis zur Wellenmitte mit Fluid gefüllt. Auf der Luftseite des RWDR ist fortwährend ein Überangebot an Fluid vorhanden.



Der RWDR fördert kontinuierlich Fluid von der Luftseite, unter der Dichtkante hindurch, zur eigentlichen Ölseite.

Der Prüfstand wurde mit einer Drehzahl von 1500 1/min und einer Vorgabe der Ölsumpftemperatur von 100°C über zehn Stunden betrieben. Ausgehend von einer Ölsumpftemperatur von 20°C, erreicht diese den Vorgabewert von 100°C nach rund einer Stunde. Diese Aufwärmphase zählt bereits zur Prüfdauer. Die Fördermenge wurde insgesamt nach zehn Stunden ermittelt. Es erfolgten zwischenzeitlich keine Messungen. Jeglicher hier angegebene Förderwert bezieht sich auf den Zeitraum von zehn Stunden. Bereits nach zwei bis drei Minuten wurde in den Untersuchungen die erste geförderte Fluidmenge festgestellt. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass während der Prüfdauer von zehn Stunden die Aufwärmphase und die Konditionierung ablaufen. Der Förderwert ist während der Prüfdauer nicht konstant. Ein Bezug zu Ergebnissen aus anderen Untersuchungen, welche den Förderwert in Abhängigkeit vom Gleitweg angeben, ist nicht zulässig. Die im Rahmen dieser Arbeit benannten Förderwerte pro zehn Stunden, sind untereinander ohne Einschränkung vergleichbar.

Je Fluid wurden jeweils zwei Dichtsysteme mit RWDR aus NBR und zwei mit RWDR aus FPM untersucht. Es wurden immer zwei benachbarte Laufspuren auf einer Wellenhülse für die artgleichen Untersuchungen gewählt. Durch eine jeweils andere Drehrichtung konnte ein Einfluss der Gegenlauffläche auf das Förderverhalten ausgeschlossen werden. Aus den Werten der einzelnen Untersuchungen mit gleichem Fluid und gleichem Werkstoff des RWDR, ist ein Mittelwert als Förderwert angegeben.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass jedes Dichtsystem individuell einen abweichenden Förderwert aufweisen kann. Zwischen den artgleichen Dichtsystemen (gleiches Fluid, gleicher RWDR Werkstoff) waren Unterschiede des Förderwerts von bis zu 10 g/10 h festzustellen. Ausgehend von einem mittleren Förderwert von rund 32 g/10h entspricht dies bereits einer Abweichung von rund 31%. Wurde der Wert von 10 g/10 h überschritten wurde eine weitere Messung durchgeführt, um die Ergebnisse abzusichern. Bei den Messungen mussten die Systeme in regelmäßigen Abständen und zu Beginn kontinuierlich beobachtet werden, um festzustellen, ob es sich um kontinuierliche Förderung von Fluid oder um unkontrollierte Leckage handelt. Nachfolgend sind das Lastkollektiv und die Messbedingungen kurz zusammengefasst.

#### Lastkollektiv und Messbedingungen der Förderwertmessung

- Ölstand bis Wellenmitte
- Ölsumpftemperatur 100°C (Aufwärmphase während der Untersuchungszeit)
- Drehzahl 1500 1/min (Relativgeschwindigkeit 6,3 m/s)
- Prüfdauer zehn Stunden
- Erfassung der insgesamt geförderten Fluidmenge am Ende der Prüfdauer

- Ergebnisdarstellung auf Grundlage der Mittelwertbildung der geförderten Fluidmengen von mindestens zwei artgleichen Dichtsystemen bei unterschiedlicher Drehrichtung

Die genannten Abweichungen der Förderwerte der artgleichen Dichtsysteme könnten zum Teil auf die nicht auszuschließenden Abweichungen der Radialkraft der RWDR untereinander zurückzuführen sein. Um den Einfluss der Radialkraft auf den Förderwert zu untersuchen wurden RWDR aus FPM so modifiziert, dass diese Radialkräfte in unterschiedlicher Abstufung aufweisen. Um dies zu erreichen wurden die Spiralzugfedern der RWDR gekürzt. Dadurch standen RWDR mit stufenweise gesteigerter Radialkraft für Förderwertmessungen zur Verfügung. Es ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der unterschiedlichen Radialkräfte über den Federhebelarm der RWDR leicht unterschiedliche Kontaktflächenwinkel herrschen können. Dieser Einfluss wird in der Gesamtbetrachtung als untergeordnet bewertet. Abbildung 4.6 zeigt den Zusammenhang zwischen der Radialkraft und dem Förderwert der untersuchten Dichtsysteme. Die Förderwertmessungen wurden alle mit PG Grundöl durchgeführt. Die genannten Radialkraftwerte sind jeweils die vor den Förderwertmessungen ermittelten. Insgesamt ist die Tendenz erkennbar, dass mit steigender Radialkraft der Förderwert abnimmt.

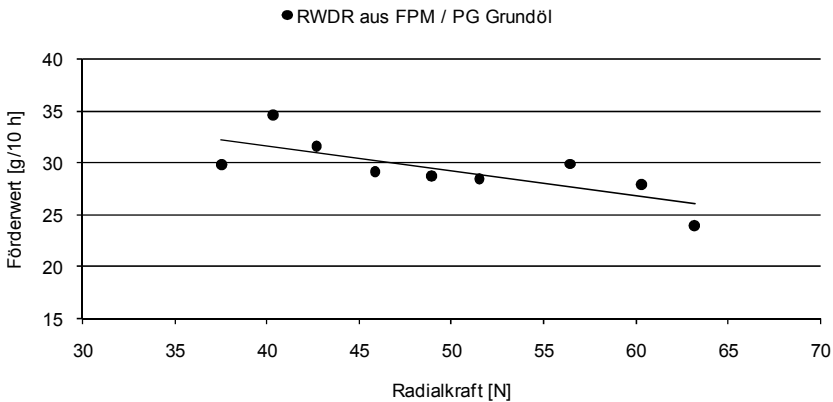


Abbildung 4.6: Zusammenhang zwischen der Radialkraft (vor den Förderwertmessungen) und dem Förderwert

Für alle untersuchten Fluide erfolgt eine Erörterung der Einflüsse getrennt nach dem Werkstoff der RWDR, dem Grundöl und der Additivierung. Die Diagramme sind getrennt nach RWDR Werkstoff aufgeführt, siehe Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8. Da nicht alle

Additive in beiden Grundölen löslich sind, fehlen einzelne Balken in den Diagrammen. So ist z. B. nie das Fluid mit Thiadiazol auf Basis von PAO vertreten.

### ***Einfluss des Werkstoffs der RWDR***

Dichtsysteme mit RWDR aus FPM haben mit durchschnittlich 39,3 g/10 h einen höheren Förderwert, als die Dichtsysteme mit RWDR aus NBR mit 24,8 g/10 h. Hierbei gilt es zu beachten, dass die RWDR aus FPM eine niedrigere Radialkraft hatten, als die aus NBR. In dieser Untersuchung hatten die RWDR aus FPM vor den Untersuchungen mit durchschnittlich 33,1 N im Vergleich zu den RWDR aus NBR mit durchschnittlich 39,4 N eine um 16 % niedrigere Radialkraft. Die Ergebnisse der Untersuchungen mit RWDR mit modifizierter Radialkraft wurden diskutiert und sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Dort geht hervor, dass mit der Zunahme der Radialkraft um 1 N der Förderwert um 0,25 g/10 h abnimmt. Dies drückt die Steigung der Geraden mit  $-0,25 \text{ g/10 h} \cdot \text{N}$  aus. Die Radialkraft der RWDR aus NBR ist durchschnittlich um 6,3 N höher, als die der RWDR aus FPM. Aus dem Einfluss der Radialkraft ist ein um rund 1,6 g/10 h geringerer Förderwert der RWDR aus NBR zu erklären. Der Förderwert der RWDR aus NBR ist aber durchschnittlich um 14,5 g/10 h geringer. Es ist zu beachten, dass die unterschiedlichen RWDR Werkstoffe den aktiven Dichtmechanismus unterschiedlich stark ausbilden. Es ist bekannt, dass RWDR aus FPM im Regelfall einen stärkeren aktiven Dichtmechanismus ausbilden als RWDR aus NBR.

### ***Einfluss des Grundöls***

Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PG haben mit durchschnittlich 36,2 g/10 h einen höheren Förderwert als Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PAO mit 28,3 g/10 h. Die höheren Förderwerte der Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PG sind bereits deutlich bei den nicht additivierten Grundölen zu erkennen, siehe Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8. Auch bei den additivierten Fluiden ist jeweils der höhere Förderwert bei den Dichtsystemen mit Fluiden auf Basis von PG zu verzeichnen.

### ***Einfluss der Additive***

Ausgehend von dem Niveau des Förderwerts, welches die Dichtsysteme mit den beiden Grundölen jeweils mit den beiden RWDR Werkstoffen aufweisen, sind die Veränderungen welche den Additiven zuzuordnen sind, relativ gering. Bei Dichtsystemen mit RWDR aus NBR und Fluiden auf Basis von PG liegen alle Förderwerte unterhalb des Niveaus, beziehungsweise mit dem Additiv Aminphosphat ungefähr auf dem gleichem Niveau, welches mit dem Grundöl erreicht wird. Dies gilt auch für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR und Fluiden auf Basis von PAO. Hier tritt lediglich eine signifikante Ausnahme auf. Der Förderwert der Dichtsysteme mit RWDR aus NBR und dem PAO mit Ca-Sulfonat liegt mit 37,5 g/10 h deutlich über sämtlichen anderen Werten. Dieser Wert wurde in Wiederholversuchen bestätigt.

Bei Dichtsystemen mit RWDR aus FPM und Fluiden auf Basis von PG liegen alle Förderwerte unterhalb des Niveaus, welches mit dem Grundöl erreicht wird. Bei Dichtsystemen mit RWDR aus FPM und Fluiden auf Basis von PAO liegen die Förderwerte auf einem ähnlichen Niveau (29,0 bis 43,7 g/10 h), wie das mit dem Grundöl (38,9 g/10 h) erreichte. Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM erreichen oder übertreffen jene mit dem Einzeladditiv Aminphosphat beziehungsweise Mo-Dialkyldithiophosphat das Niveau der Dichtsysteme mit den beiden Grundölen.

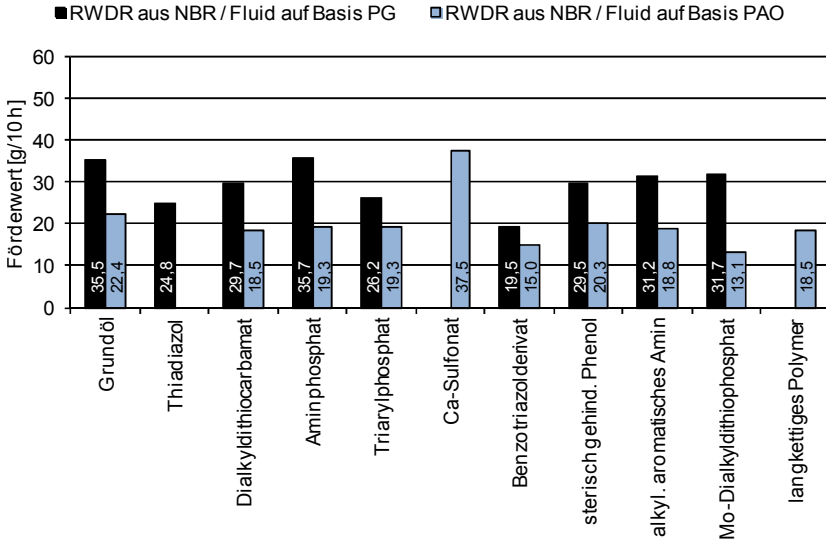


Abbildung 4.7: Förderwertmessung der Dichtsysteme mit RWDR aus NBR

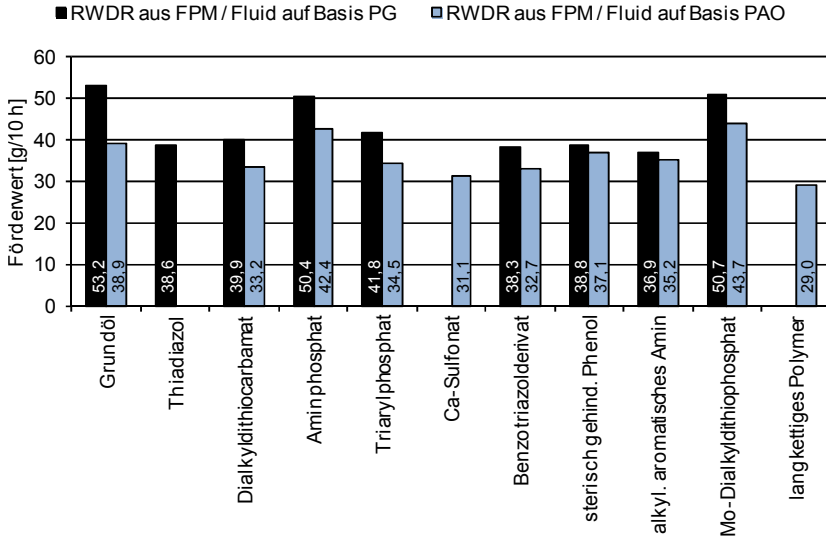


Abbildung 4.8: Förderwertmessung der Dichtsysteme mit RWDR aus FPM

Tabelle 4.6: Mittelwerte der Förderwerte aufgeteilt nach RWDR Werkstoff und Grundöl

|                                     | NBR  |      | FPM  |      |
|-------------------------------------|------|------|------|------|
|                                     | PG   | PAO  | PG   | PAO  |
| Mittelwert des Förderwerts [g/10 h] | 24,8 |      | 39,3 |      |
|                                     | 29,7 | 20,7 | 43,2 | 36,5 |

**Fazit**

Hinweis: Die diskutierten Förderwerte beziehen sich auf eine Prüfdauer von zehn Stunden. Während dieser Prüfdauer finden die Aufwärmphase des Ölsumpfs und die Konditionierung des Dichtsystems statt. Die hier diskutierten Förderwerte beziehen sich nicht auf einen stationären Zustand. Ein Vergleich mit im stationären Zustand ermittelten Förderwerten, dann beispielsweise bezogen auf den Gleitweg, ist nicht zulässig.

Der Förderwert der Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PG ist in diesen Untersuchungen größer, als der mit Fluiden auf Basis PAO. Dies ist unabhängig von dem RWDR Werkstoff.

An den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR wurden geringere Förderwerte ermittelt, als an jenen mit RWDR aus FPM.

Tendenziell liegen die Förderwerte der Dichtsysteme mit additivierten Fluiden unter denen der Dichtsysteme mit nicht additivierten Grundölen. Ein Einfluss der einzelnen Additive auf den Förderwert des Dichtsystems ist vorhanden.

## 4.5 Verschleißuntersuchungen

Die Verschleißuntersuchungen wurden an dem 8-Zellen Dauerlaufprüfstand durchgeführt, siehe Kapitel 3.1.1. Während den Untersuchungen waren die Prüfzellen bis zur Wellenmitte mit Fluid gefüllt. Um verschiedene Schmierzustände nachbilden zu können und um einen realitätsnahen Prüfablauf mit Anfahr- und Stoppvorgängen zu realisieren, wurde ein spezielles Lastkollektiv gewählt. Dieses ist stark an das in der DIN 3760-10 genannte Lastkollektiv angelehnt, siehe /3/.

Eine insgesamt 96 Stunden dauernde Verschleißuntersuchung setzt sich aus einem vierfach durchlaufenen 24-stündigen Einzellastkollektiv zusammen, siehe Tabelle 4.7 und Abbildung 4.9.

In den Abschnitten I und II ist die Temperatur auf einen Sollwert geregelt. Ausgehend von Raumtemperatur dauert es zu Beginn des Abschnitts I etwa eine Stunde bis die Ölsumpftemperatur den Sollwert von 100°C erreicht hat. Zu Beginn des Abschnitts III dauert es etwa drei Stunden bis die Ölsumpftemperatur auf das Niveau der Raumtemperatur abgesunken ist. Dabei erfolgt keine aktive Abkühlung der Prüfzelle durch ein Kühlmedium.

Tabelle 4.7: 24-stündiges Einzellastkollektiv der 96-stündigen Verschleißuntersuchungen

| Abschnitt | Zeitdauer  | Drehzahl   | Ölsumpftemperatur                  |
|-----------|------------|------------|------------------------------------|
| I         | 14 Stunden | 1500 1/min | 100°C                              |
| II        | 6 Stunden  | 500 1/min  | 100°C                              |
| III       | 4 Stunden  | Stillstand | Abkühlphase bis auf Raumtemperatur |

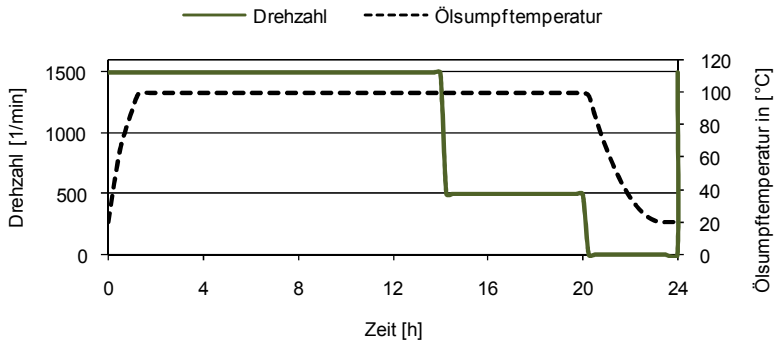


Abbildung 4.9: Messung der Drehzahl und der Ölsumpftemperatur während eines 24-stündigen Einzellastkollektivs der 96-stündigen Verschleißuntersuchungen

Pro Fluid wurden vier einzelne Prüfläufe durchgeführt. Das heißt, es wurden pro Fluid vier artgleiche Dichtsysteme mit RWDR aus dem gleichen Elastomer untersucht. Insgesamt wurden jeweils 76 Dichtsysteme mit RWDR aus NBR und aus FPM untersucht, siehe Abbildung 4.10.

Nach den Prüfläufen wurde die Verschleißbreite der einzelnen RWDR ermittelt, siehe Kapitel 3.2.3. Die Verschleißbreite je RWDR beruht auf dem Mittelwert von vier einzelnen Messungen. Bei vier artgleichen Dichtsystemen werden von den vier RWDR jeweils die Verschleißbreiten ermittelt. Die Verschleißbreite, welche einer Art Dichtsystem zugeordnet wird, setzt sich aus dem Mittelwert der Verschleißbreiten von vier RWDR zusammen (insgesamt 16 einzelne Messungen).

Bei einzelnen Dichtsystemen wurde, vor Ablauf der 96 Stunden Untersuchungsdauer, Leckage festgestellt. Es handelte sich dabei ausschließlich um Dichtsysteme mit RWDR aus NBR. Ein Dichtsystem wird als ausgefallen bewertet, wenn die Leckage luftseitig abtropft. Dass Dichtsysteme ausgefallen sind, hängt maßgeblich mit den verwendeten Fluiden zusammen. Diese sind keine betriebsfertigen Schmieröle. Es handelt sich um gezielt mit einem einzelnen Additiv versehene Fluide, welche so nicht für den praktischen Einsatz geeignet sind. Anhand dieser Modellfluide soll gezielt der Einfluss der einzelnen Additive bewertet werden, siehe Kapitel 4.1.

Die Häufung der Ausfälle bei Dichtsystemen mit RWDR aus NBR kann auf mehrere Sachverhalte zurückgeführt werden. Einerseits ist das Elastomer NBR grundsätzlich weniger resistent gegen synthetische Schmierstoffe und Additive, siehe /12/-/14/, /16/. Andererseits werden die Dichtsysteme mit RWDR aus NBR bei der gegebenen Ölsumpftemperatur von 100°C an ihrer Grenze der vom Hersteller angegebenen, zulässigen Betriebstemperatur betrieben /12/. Die Einsatzgrenze für RWDR aus NBR wird mit der maximalen Drehzahl

von 1500 1/min (6,3 m/s Umfangsgeschwindigkeit) bei einem Systemdurchmesser von 80 mm jedoch nicht erreicht. Dennoch nähert man sich dieser mehr an, als es vergleichsweise bei einem RWDR aus FPM der Fall ist, siehe Abbildung 2.2 /1/.

Von den genannten 76 untersuchten Dichtsystemen mit RWDR aus NBR sind 16 vor Erreichen der 96 Stunden Untersuchungsdauer ausgefallen. Eine Auflistung der untersuchten Dichtsysteme mit Markierung der ausgefallenen ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

Nach den Prüfläufen wurden die Verschleißbreiten der nicht ausgefallenen Dichtsysteme ermittelt, siehe Kapitel 3.2.3. Die RWDR aus FPM weisen durchschnittlich etwas kleinere Verschleißbreiten auf, als die aus NBR (NBR  $\varnothing$  183  $\mu\text{m}$ , FPM  $\varnothing$  172  $\mu\text{m}$ ), siehe Tabelle 4.8. Ein deutlicher Unterschied ist unabhängig vom Werkstoff des RWDR durch das verwendete Grundöl zu verzeichnen. Insgesamt haben RWDR aus Dichtsystemen mit Fluiden auf Basis von PG durchschnittlich eine um rund 31 % größere Verschleißbreite (PG  $\varnothing$  203  $\mu\text{m}$ , PAO  $\varnothing$  151  $\mu\text{m}$ ). Ausgehend von dem Niveau der Dichtsysteme mit den jeweiligen Grundölen ist zu beobachten, dass die Additive einen Einfluss auf den Verschleiß haben. Relativ zu dem Dichtsystem mit dem jeweiligen Grundöl kann sich ein größerer oder ein kleinerer Verschleiß einstellen, siehe Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12.

Vor und nach den Prüfläufen wurde die Radialkraft der einzelnen RWDR ermittelt, siehe Kapitel 3.2.1. Die RWDR aus NBR haben vor den Untersuchungen durchschnittlich eine Radialkraft von 35,8 N. Diese stieg durchschnittlich um 7,8 N auf 43,6 N (Zunahme von rund 22 %). Das Grundöl, welches als Basis für die Fluide verwendet wurde, beeinflusst dieses Verhalten. Bei Dichtsystemen mit Fluiden auf Basis von PG nahm die Radialkraft der RWDR aus NBR durchschnittlich um 6,6 N zu. Bei Dichtsystemen mit Fluiden auf Basis von PAO nahm die Radialkraft der RWDR durchschnittlich um 8,9 N zu, siehe Tabelle 4.8. Die RWDR aus FPM haben vor den Untersuchungen durchschnittlich eine Radialkraft von 32,4 N. Diese fiel durchschnittlich um 1,5 N auf 30,9 N (Abnahme um rund 5 %). Diese Veränderung tritt unabhängig vom Grundöl in dieser Größenordnung bei den Dichtsystemen mit den unterschiedlichen Grundöl-Einzeladditiv-Mischungen auf (PG  $\varnothing$  -1,4 N, PAO  $\varnothing$  -1,6 N).



| Grundöl                     | Additiv                     | NBR     |      |      |      | FPM |  |  |  |
|-----------------------------|-----------------------------|---------|------|------|------|-----|--|--|--|
| Polyglykol                  | Grundöl                     |         |      |      |      |     |  |  |  |
|                             | Thiadiazol                  |         |      |      |      |     |  |  |  |
|                             | Dialkyldithiocarbamat       |         |      |      |      |     |  |  |  |
|                             | Aminphosphat                |         |      | 72 h | 72 h |     |  |  |  |
|                             | Triarylphosphat             |         |      |      |      |     |  |  |  |
|                             | Benzotriazolderivat         |         |      |      | 52 h |     |  |  |  |
|                             | Sterisch gehindertes Phenol |         |      |      |      |     |  |  |  |
|                             | Alkyl. Aromatisches Amin    |         |      |      |      |     |  |  |  |
|                             | Mo-Dialkyldithiophosphat    |         |      |      |      |     |  |  |  |
|                             | Polyalphaolefin             | Grundöl |      |      |      |     |  |  |  |
| Dialkyldithiocarbamat       |                             | 72 h    |      | 24 h |      |     |  |  |  |
| Aminphosphat                |                             | 24 h    | 24 h | 48 h | 24 h |     |  |  |  |
| Triarylphosphat             |                             |         |      |      |      |     |  |  |  |
| Ca-Sulfonat                 |                             |         |      |      |      |     |  |  |  |
| Benzotriazolderivat         |                             |         |      |      |      |     |  |  |  |
| Sterisch gehindertes Phenol |                             |         |      |      | 24 h |     |  |  |  |
| Alkyl. Aromatisches Amin    |                             | 72 h    | 24 h | 24 h | 52 h |     |  |  |  |
| Mo-Dialkyldithiophosphat    |                             |         |      | 48 h | 48 h |     |  |  |  |
| Langkettiges Polymer        |                             |         |      |      |      |     |  |  |  |



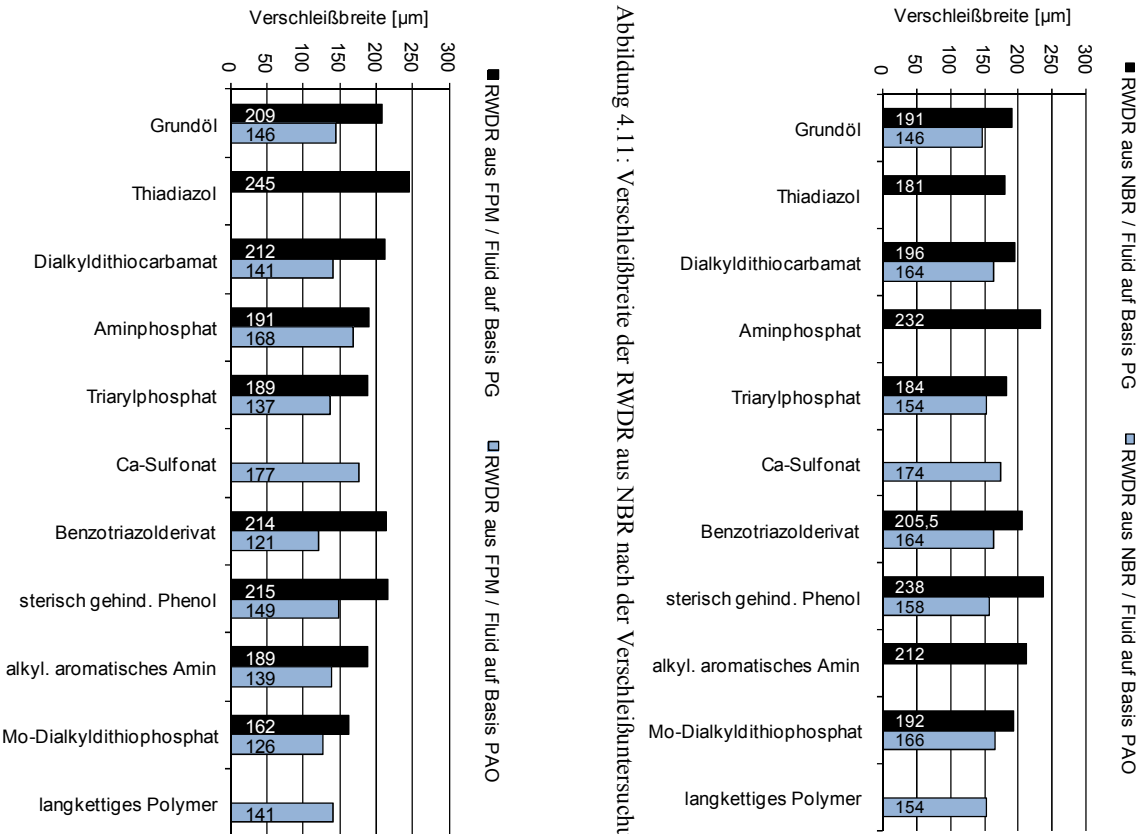
 Dichtsystem nicht ausgefallen  
 Dichtsystem ausgefallen nach x Stunden

Abbildung 4.10: Ausgefallene und nicht ausgefallene Dichtsysteme bei den Verschleißuntersuchungen

Ausgehend von dem Niveau der Dichtsysteme mit den jeweiligen Grundölen ist zu beobachten, dass die Additive Veränderungen der Radialkraft der RWDR hervorrufen. Relativ zu dem Dichtsystem mit dem jeweiligen Grundöl kann sich eine größere oder eine kleinere Veränderung einstellen, siehe Abbildung 4.13 und Abbildung 4.14.



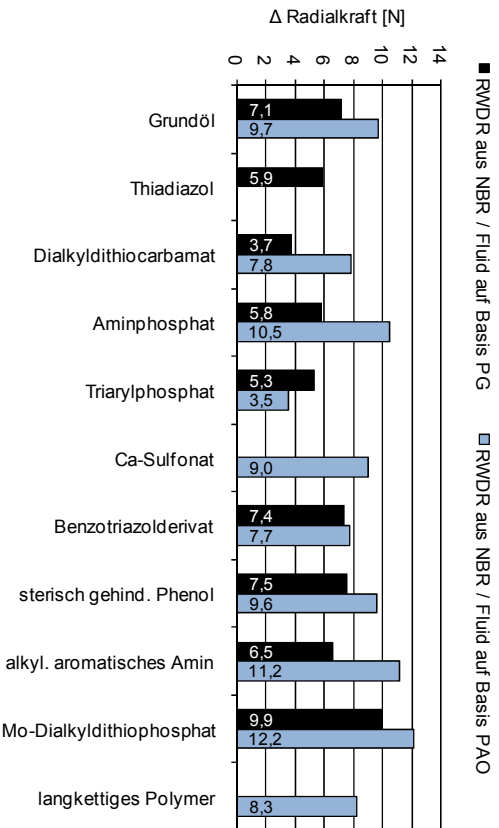


Abbildung 4.13: Veränderung der Radialkraft der RWDR aus NBR nach der Verschleißuntersuchung

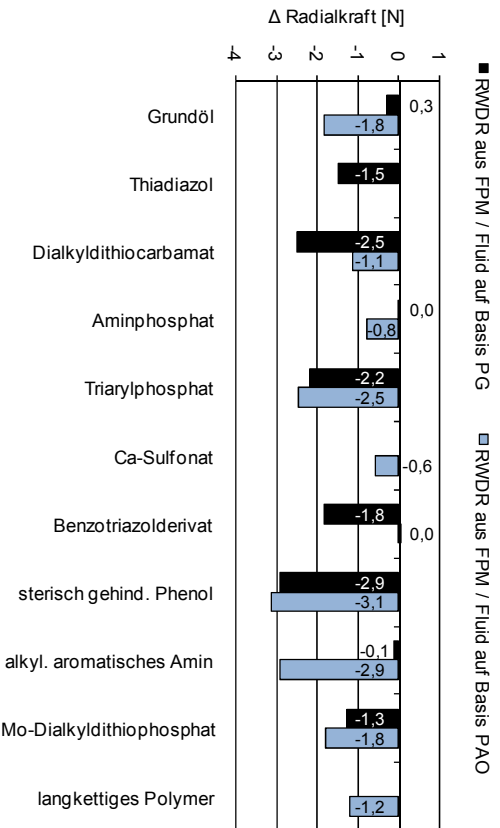


Abbildung 4.14: Veränderung der Radialkraft der RWDR aus FPM nach der Verschleißuntersuchung

Tabelle 4.8: Mittelwert der Veränderungen der Radialkräfte und die Verschleißbreiten der RWDR

|   | NBR  |      | FPM  |      |
|---|------|------|------|------|
|   | PG   | PAO  | PG   | PAO  |
| Mittelwert der Veränderung der Radialkraft [N]    | +7,8 | +8,9 | -1,4 | -1,6 |
| Mittelwert der Verschleißbreite [ $\mu\text{m}$ ] | 183  | 160  | 172  | 144  |

Die unterschiedlichen Verschleißbreiten der RWDR der Dichtsysteme mit gleichen RWDR Werkstoffen, sind nicht auf unterschiedliche Radialkräfte zurückzuführen. Die Radialkräfte der RWDR wurden durch den Versuch verändert. Die Verschleißbreiten sind davon aber weitestgehend unabhängig, siehe Abbildung 4.15. Es kann davon ausgegangen werden, dass die unterschiedlichen Verschleißbreiten der RWDR aus gleichem Werkstoff auch auf die, in den Fluiden gelösten Additive zurückzuführen sind. In Abbildung 4.15 ist die Gruppierung der Werte der Verschleißbreiten nach Grundöl und RWDR Werkstoff ersichtlich. Die Verschleißbreiten der RWDR der Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von PG sind unabhängig von dem Werkstoff der RWDR und deren Radialkraft, höher als die mit Fluiden auf Basis von PAO.

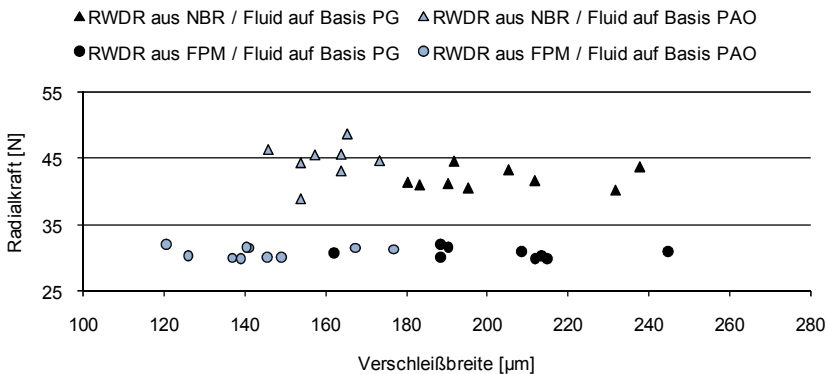


Abbildung 4.15: Zusammenhang zwischen der Verschleißbreite der RWDR und der Radialkraft der RWDR (nach den Verschleißuntersuchungen gemessen)

## **Fazit**

In den Verschleißuntersuchungen hat das Grundöl den größten Einfluss auf den Verschleiß der RWDR. Es tritt größerer Verschleiß an den RWDR bei Dichtsystemen mit Fluiden auf Basis von PG auf. Die unterschiedlichen RWDR Werkstoffe NBR und FPM zeigen hier kein deutlich unterschiedliches Verschleißverhalten. Der Verschleiß der RWDR der einzelnen Dichtsysteme wird durch die einzelnen, in den Grundölen gelösten Additive beeinflusst.

Der größte Einfluss auf die Veränderung der Radialkraft geht auf den Werkstoff der RWDR selbst zurück. Die Radialkraft der RWDR aus NBR nimmt während den Verschleißuntersuchungen deutlich zu, während die der RWDR aus FPM leicht abnimmt. Dieses Verhalten ist unabhängig von dem Grundöl, welches Basis des Fluids der jeweiligen Dichtsysteme ist. Im Einzelnen wird die Höhe der Veränderung der Radialkraft durch die, in den Grundölen gelösten Additive beeinflusst. Dies trifft für die RWDR, sowohl aus NBR als auch aus FPM zu.

Das grundsätzlich etwas andere Niveau der Radialkraft der RWDR aus den unterschiedlichen Werkstoffen, hat hier keine signifikanten Auswirkungen auf die ermittelten Verschleißbreiten.

## **4.6 Bestimmung der Benetzungseigenschaften**

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Benetzungseigenschaften der Fluide anhand zweier unterschiedlicher Messgrößen beschrieben. Einerseits durch den Kontaktwinkel eines Fluids auf der Oberfläche eines Festkörpers. Dieser besteht aus NBR oder aus FPM. Andererseits wird der Benetzungsfaktor eines Fluids auf einer Oberfläche eines Festkörpers bestimmt. Als Probenkörper mit geeigneter Oberfläche werden hierzu metallische Oberflächenproben verwendet. Ein Vergleich der genannten Messgrößen ist in Kapitel 2.4 erörtert.

### **4.6.1 Bestimmung des Kontaktwinkels**

Die Messungen der Kontaktwinkel wurden mit einem Messgerät vom Typ OCA20 der Firma Dataphysics durchgeführt, siehe Abbildung 3.8. Das Fluid wird dabei mit einer, durch das Messgerät geführten Kanüle auf der Oberfläche des Festkörpers abgesetzt und bildet einen Tropfen aus. Von dem Fluidtropfen wird von der Kamera die Tropfenkontur erfasst. Die Tropfenkontur wird im Mess-Rechner als Bitmap-Bild gespeichert. Mit der Auswertesoftware lässt sich der Kontaktwinkel aus dem Bild bestimmen, siehe Abbildung 3.7. Dazu werden die Grenzlinie der Oberfläche des Festkörpers und die der Tropfenkontur bestimmt.

Bei der Kontaktwinkelmessung auf einer Wellenhülse wird deren Oberfläche durch einen Kreisbogen dargestellt. Die Begrenzung der Tropfenkontur wird durch einen Ellipsoidabschnitt angenähert. An diese beiden geometrischen Konturen lassen sich Tangenten anlegen, deren eingeschlossener Winkel den Kontaktwinkel darstellt. Die genannten geometrischen Konturen werden vom Bediener über die am Bildschirm dargestellten Konturen gelegt. Eine gewisse Abweichung kann sich deshalb trotz sorgfältiger Bedienung ergeben. Um diesen individuellen Fehler zu minimieren, wurde jedes Bild einer Tropfenkontur drei Mal vermessen. Der Kontaktwinkel wurde je Bild an beiden Seiten einer Tropfenkontur ermittelt. Wenn im Folgenden der Kontaktwinkel als Ergebnis einer Messung genannt wird, handelt es sich folglich um den Mittelwert aus sechs Einzelmessungen.

Der Kontaktwinkel ist zeitlich veränderlich. Nach dem Absetzen eines Fluidtropfens auf einer Oberfläche beginnt der Tropfen sich auszubreiten, wodurch der Kontaktwinkel abnimmt. Der Vorgang des Absetzens eines Fluidtropfens wurde jeweils mit einer kurzen Videosequenz erfasst. Diese lässt sich schrittweise in einzelne Bilder segmentieren. Dadurch ist es möglich einen Zeitpunkt mit exakt definiertem zeitlichen Abstand zum Loslösen des Fluidtropfens von der Kanüle zu bestimmen und in einem Bild zu bewerten. Für sämtliche Kontaktwinkelmessungen wurde diese Zeitspanne auf fünf Sekunden festgelegt.

Die Messungen der Kontaktwinkel der Fluide wurden auf der Oberfläche eines Festkörpers aus NBR oder FPM durchgeführt. Es hat sich als zielführend erwiesen die RWDR als Probenkörper zu verwenden. Die Kontaktwinkelmessungen auf den RWDR wurden auf der ölseitigen Flanke der Dichtkante durchgeführt. Es wurden unbenutzte RWDR mit gestochener Dichtkante verwendet. Diese entsprechen sämtlichen in dieser Arbeit untersuchten RWDR. Die RWDR wurden so positioniert, dass die Blickrichtung der Kamera parallel zur ölseitigen Flanke der Dichtkante verläuft. Durch die geneigte Positionierung des RWDR konnte der Fluidtropfen auf einer, in Blickrichtung horizontalen Fläche abgesetzt werden, siehe Abbildung 4.16.

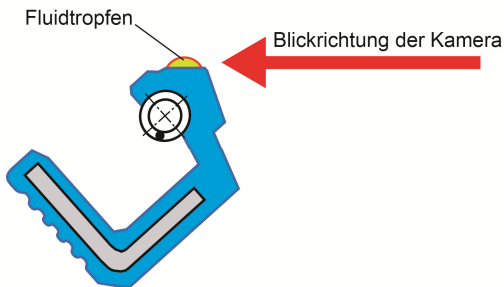


Abbildung 4.16: Prinzip der Kontaktwinkelmessung auf einem RWDR

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Fluide breiten sich auf einer metallischen Oberflächenprobe relativ dynamisch aus, siehe Kapitel 2.4. Innerhalb weniger Sekunden nimmt der Kontaktwinkel soweit ab, dass er mit dem Messgerät nicht mehr vermessen werden kann. Die Vermessung nach fünf oder zehn Sekunden ist möglich und wurde für einige Fluide durchgeführt. Die Ergebnisse für die unterschiedliche Fluide unterscheiden sich wenig. Die Unterschiede liegen annähernd in der Größenordnung der Streuung der Ergebnisse für ein gleiches Fluid. Die vorliegende dynamische Ausbreitung ist gravitationsbedingt und viskositätsabhängig. Die Viskosität der einzelnen Fluide ist näherungsweise gleich. Insgesamt sind die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen, mit diesen Fluiden auf einer metallischen Oberflächenprobe, nicht verwertbar und dementsprechend hier nicht aufgeführt.

Der Einfluss einer vorhergehenden Reinigung der RWDR wurde in separaten Kontaktwinkelmessungen untersucht. Jegliche Reinigung mit Lösungsmitteln verursacht eine Veränderung der Benetzungseigenschaften und damit der gemessenen Kontaktwinkel. Das Elastomer als poröses Material nimmt zwangsläufig einen gewissen Anteil an Lösungsmittel auf. Die zeitlich veränderliche Abgabe dessen ist verantwortlich dafür, dass die Kontaktwinkelmessungen durch eine, nicht vorhersehbare Komponente verfälscht werden. Diese Problematik wurde auch im gemeinsamen Erfahrungsaustausch von der Freudenberg Forschungsdienste KG (Tochtergesellschaft des Dichtungsherstellers) bestätigt /74/. Die Kontaktwinkelmessungen wurden deshalb an zuvor nicht gereinigten RWDR durchgeführt. Die unbenutzten RWDR wurden im Anlieferzustand aus der Verpackung entnommen und zur Kontaktwinkelmessung herangezogen. Der Zustand der RWDR entspricht dadurch jenem, welcher im praktischen Einsatz zu finden ist.

Die gemessenen Kontaktwinkel auf den RWDR unterlagen deutlichen Schwankungen. Diese sind dadurch begründet, dass die Oberfläche nicht durch eine Vorbehandlung auf einen definierten Zustand gebracht werden konnte. Äußere nicht zu beeinflussende Umstände können zum Tragen kommen. Um die Aussagesicherheit zu gewährleisten wurde die Anzahl der Messungen deutlich erhöht. Es wurden mit jedem Fluid, jeweils an einem unbenutzten RWDR, an dessen Umfang verteilt, mindestens 30 Messungen durchgeführt. Bei einem durchschnittlichen Kontaktwinkel von etwa  $50^\circ$  liegt die Standardabweichung der Messwerte bei kleiner  $3^\circ$ . Diese Zahlenwerte sind beispielhaft für Werte der Messreihe der Fluide auf Basis von PG und den Messungen auf RWDR aus NBR.

Es wurden je Fluidtropfen beziehungsweise Tropfenkontur sechs Einzelmessungen der Kontaktwinkel durchgeführt. Damit basiert der genannte Kontaktwinkel jeder einzelnen Kombination aus Fluid und RWDR Werkstoff auf einem Mittelwert aus insgesamt 180 Einzelmessungen. Die als Fluidtropfen abgesetzte Fluidmenge betrug  $3,4 \mu\text{l}$ . Die Fluidmenge wurde so gewählt, dass sich die Tropfenkontur ohne Kontakt zum Randbereich der geometrisch begrenzten Fläche der ölseitigen Flanke der Dichtkante ausbilden kann. Für derartige Kontaktwinkelmessungen werden üblicherweise Fluidmengen zwischen 2 und  $5 \mu\text{l}$  verwendet.

Die Kontaktwinkel der Fluide auf der Oberfläche der RWDR aus NBR sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kontaktwinkel der Fluide auf Basis PG durchweg größer sind als die der Fluide auf Basis PAO ( $\emptyset$  PG  $51,7^\circ$ ,  $\emptyset$  PAO  $38,4^\circ$ ), siehe Tabelle 4.9

Die jeweils mit Fluiden auf Basis eines Grundöls gemessenen Werte der Kontaktwinkel liegen auf einem ähnlichen Niveau. Über die Messreihe hinweg fällt allenfalls das Additiv Ca-Sulfonat auf. Das Fluid mit diesem Additiv gelöst in PAO hat mit rund  $30^\circ$  den mit Abstand geringsten Kontaktwinkel.

Die Kontaktwinkel der Fluide auf der Oberfläche der RWDR aus FPM sind in Abbildung 4.18 dargestellt. Eine nennenswerte Abhängigkeit der Kontaktwinkel von dem Grundöl ist nicht zu erkennen. Alle Werte liegen auf einem ähnlichen Niveau. Die Kontaktwinkel auf RWDR aus FPM sind grundsätzlich größer als auf RWDR aus NBR ( $\emptyset$  NBR  $44,7^\circ$ ,  $\emptyset$  FPM  $67,4^\circ$ ), siehe Tabelle 4.9.

Über die Messreihe hinweg fällt kein Additiv auf, das gelöst im Grundöl für einen stark abweichenden Kontaktwinkel verantwortlich ist. Der geringste Kontaktwinkel wird erneut mit dem Fluid auf Basis PAO und dem Additiv Ca-Sulfonat gemessen.

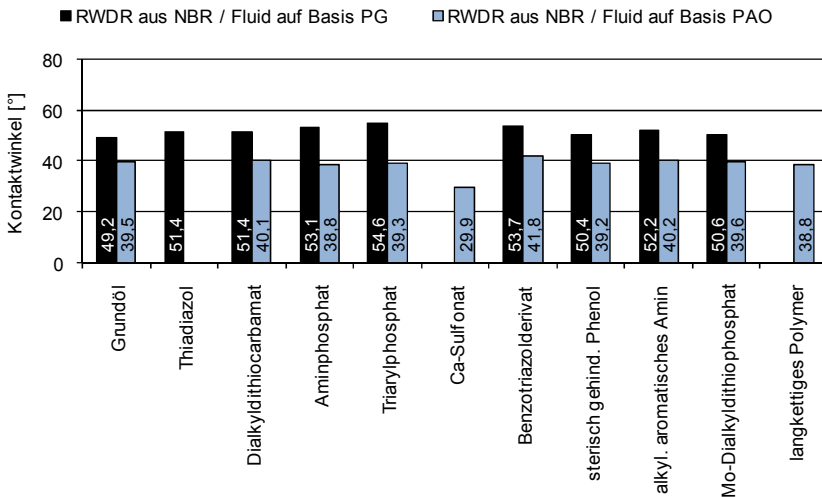


Abbildung 4.17: Kontaktwinkel zwischen Fluid und Oberfläche der RWDR aus NBR



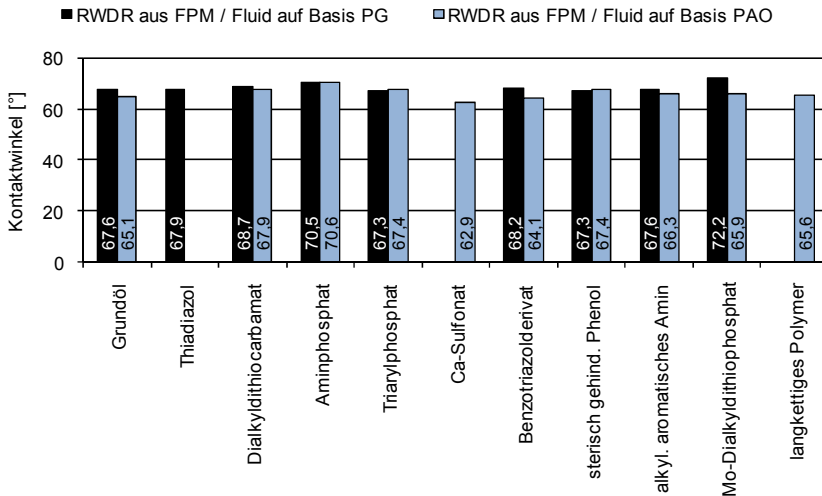


Abbildung 4.18: Kontaktwinkel zwischen Fluid und Oberfläche der RWDR aus FPM

Tabelle 4.9: Mittelwerte der Kontaktwinkel aufgeteilt nach RWDR Werkstoff und Grundöl

|                                  | NBR  |      | FPM  |      |
|----------------------------------|------|------|------|------|
|                                  | PG   | PAO  | PG   | PAO  |
| Mittelwert der Kontaktwinkel [°] | 44,7 | 67,4 | 51,7 | 38,4 |
|                                  | 68,7 | 66,3 |      |      |

**Fazit**

Die Kontaktwinkel der Fluide fallen auf den RWDR aus NBR geringer aus als auf denen aus FPM. Das Grundöl beeinflusst die Kontaktwinkel auf den RWDR aus NBR erheblich. Fluide auf Basis von PAO haben die geringeren Kontaktwinkel. Auf den RWDR aus FPM ist hingegen kein signifikanter Einfluss des Grundöls festzustellen. Die Kontaktwinkel sind für die Fluide auf Basis von PG und PAO sehr ähnlich.

Der Einfluss der einzelnen Additive auf den Kontaktwinkel ist gering. Einzig nennenswert bleibt das Additiv Ca-Sulfonat. Dieses nur in PAO lösliche Additiv weist auf RWDR aus NBR und aus FPM die geringsten Kontaktwinkel auf.

### 4.6.2 Bestimmung des Benetzungsfaktors

Der Benetzungsfaktor ist eine Größe, um die Migrationswilligkeit eines Fluids auf einer Festkörperoberfläche zu quantifizieren. Sowohl die Ähnlichkeit und der Unterschied zu dem Benetzungskoeffizient, als auch die Abgrenzung zum Kontaktwinkel werden in Kapitel 2.4 erörtert. In diesem Kapitel wird zunächst die Herangehensweise zur Bestimmung des Benetzungsfaktors beschrieben. Die einzelnen Komponenten und Parameter der Messungen werden genannt. Im Hinblick auf die verwendeten Versuchseinrichtungen wird auf Teile des Kapitels 3 verwiesen. Abschließend werden die Ergebnisse der Bestimmung des Benetzungsfaktors aufgezeigt.

Der Benetzungsfaktor  $BF$  gibt an, um welchen Faktor sich der Flächeninhalt einer durch eine Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche benetzten Fläche ändert. Die Nomenklatur folgt grundsätzlich folgendem Aufbau  $BF_{(Verweildauer, Einlagerungstemperatur)}$ . Der Benetzungsfaktor, zugehörig zu einer Verweildauer von zwei Stunden und einer Einlagerungstemperatur von  $70^{\circ}\text{C}$ , wird dementsprechend folgendermaßen angegeben  $BF_{(2h, 70^{\circ}\text{C})}$ .

Für die Bestimmung des Benetzungsfaktors sind minimal zwei Messungen der Flächeninhalte der durch ein Fluid eingenommenen Benetzungsflächen notwendig. Die erste Messung erfolgt zehn Sekunden nach dem Absetzen eines Tropfens auf einer Festkörperoberfläche, siehe Abbildung 4.19. Die zweite Messung entsprechend nach der angestrebten Verweildauer, siehe Abbildung 4.20. Verdoppelt sich beispielsweise der Flächeninhalt der Benetzungsfläche, so ist der Wert des Benetzungsfaktors zwei.

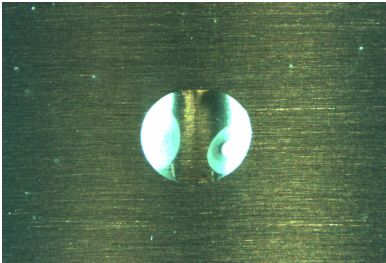


Abbildung 4.19: Fluid zehn Sekunden nach dem Absetzen auf der Oberflächenprobe ( $18,6 \text{ mm}^2$ )

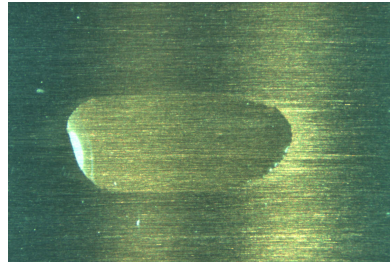


Abbildung 4.20: Fluid nach einer Verweildauer von zwei Stunden auf der Oberflächenprobe ( $55,8 \text{ mm}^2$ )

Die Messung der Benetzungsfläche erfolgt senkrecht zu der Festkörperoberfläche. Zur Erfassung der Bilddaten wird ein Digitalkamerasystem verwendet, siehe Kapitel 3.2.3. Die Software bietet die Möglichkeit, in den Bilddaten Flächen benutzerdefiniert zu umranden.

Deren Flächeninhalt wird dann seitens der Software berechnet und mit angegeben, siehe Abbildung 4.21.

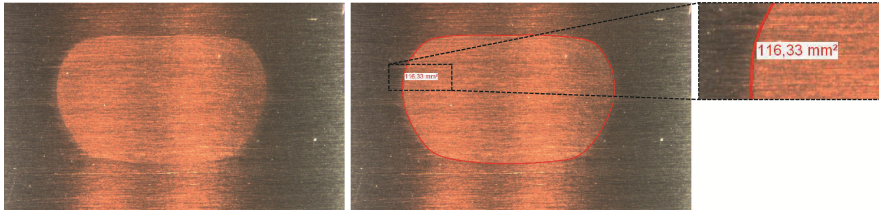


Abbildung 4.21: Fluid nach einer Verweildauer von 20 Stunden auf der Oberflächenprobe, Links: Ausgangsbild, Mitte: vermessene Benetzungsfläche, Rechts: vergrößerte Darstellung der Flächenangabe (116,33 mm<sup>2</sup>)

Das wichtigste Augenmerk bei der Bestimmung des Benetzungsfaktors liegt auf den gleichbleibenden Versuchsbedingungen. Nur wenn diese gewährleistet sind, können die Ergebnisse vergleichend bewertet werden. Diese Zielsetzung schlägt sich in vielen, der im Folgenden genannten Rahmenbedingungen der Messungen nieder.

Die Oberflächenprobe, auf welcher ein Fluid abgesetzt wird, befindet sich fortwährend in einem dafür vorgesehenen Behälter, siehe Kapitel 3.1.3. Zum Absetzen des Fluids auf der Oberflächenprobe ist der Behälter geöffnet. Danach wird dieser, ohne die Oberflächenprobe umzulagern, mit einer Glasscheibe verschlossen. Der Innenraum des Behälters wird anschließend bis auf einen Unterdruck von 0,6 bar gegenüber der Atmosphäre evakuiert. Der sich dadurch ergebende Absolutdruck verbleibt deutlich über dem Dampfdruck der verwendeten Fluide. Dadurch das Evakuieren ist weniger Luft und somit weniger Feuchtigkeit im Innenraum des Behälters. Damit kann sich weniger Feuchtigkeit auf den Oberflächenproben niederschlagen und die Messung beeinflussen. Die Feuchtigkeit der restlichen im Innenraum des Behälters verbleibenden Luft, wird durch das im Behälter eingelagerte Silika-Granulat gebunden.

Jeder angegebene Wert eines Benetzungsfaktors beruht auf der Vermessung von vier unabhängig voneinander, auf einer Oberflächenprobe abgesetzten Fluidtropfen beziehungsweise deren Benetzungsflächen. Angegeben ist immer der Mittelwert der einzelnen Benetzungsfaktoren. Diese Vorgehensweise wurde jeweils für die unterschiedlichen Verweildauern und Einlagerungstemperaturen durchgeführt.

### **Tropfenvolumen**

Die Fluidtropfen werden mit einer Pipette bemessen und abgesetzt, siehe Abbildung 4.22. Nach eingehenden Voruntersuchungen wurde das Tropfenvolumen auf 5 µl festgelegt. In-

nerhalb der Grenzen sinnvoll möglicher Volumina hat das Tropfenvolumen einen untergeordneten Einfluss auf den Benetzungsfaktor. Dies wurde in ähnlichen Untersuchungen, in welchen die temperaturbedingte laterale Migration betrachtet wird, ebenfalls bestätigt /75/.

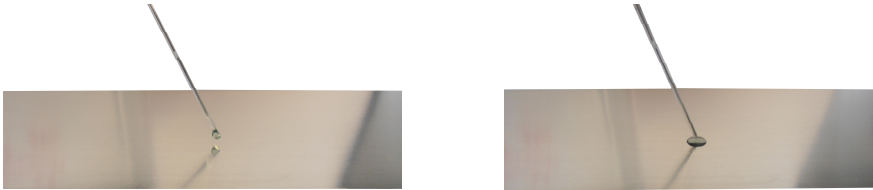


Abbildung 4.22: Vorgang des absetzens eines Fluidtropfens, links Fluidtropfen an der Spitze der Pipetten, rechts abgesetzter Fluidtropfen

Ein Fluidtropfen bildet nach zehn Sekunden eine Benetzungsfläche von rund  $20 \text{ mm}^2$ . Sämtliche im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Fluide liegen in etwa bei diesem Wert. Bezogen auf das abgesetzte Tropfenvolumen ist nach den zehn Sekunden die mittlere Fluidfilmhöhe  $250 \mu\text{m}$ . In den Voruntersuchungen wurden Benetzungsfaktoren mit einem Wert von über 20 erreicht. Ein mittlerer Benetzungsfaktor von zehn führt zu einer Benetzungsfläche von  $200 \text{ mm}^2$  und damit zu einer mittleren Fluidfilmhöhe von  $25 \mu\text{m}$ . Ein ausgewiesener hoher Benetzungsfaktor von 20 ergibt eine Benetzungsfläche von  $400 \text{ mm}^2$  und eine mittlere Fluidfilmhöhe von  $12,5 \mu\text{m}$ . Diese gegebenenfalls erreichten Fluidfilmhöhen nähern sich dem Bereich der im Dichtkontakt der beschriebenen Dichtsysteme vorherrschenden Fluidfilmhöhen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei genannten Fluidfilmhöhen die makroskopischen Benetzungseigenschaften die mikroskopischen übertreffen, siehe Kapitel 2.4.

### **Verweildauer**

Die Verweildauer hat einen Einfluss auf den Benetzungsfaktor. Selbstständig benetzende Fluide vergrößern mit fortschreitender Verweildauer kontinuierlich ihre Benetzungsfläche. Die erreichbare Fluidfilmhöhe ist damit, abgesehen von dem Tropfenvolumen, auch von der Verweildauer abhängig. In den genannten Voruntersuchungen wurde die Verweildauer in Zusammenhang mit dem Tropfenvolumen betrachtet. Eine maximale Verweildauer von 20 Stunden erwies sich dabei als sinnvoll, um noch vermessbare Benetzungsflächen zu erhalten. Bei einer zu geringen Fluidfilmhöhe ist die Abgrenzung der Benetzungsfläche mit dem verwendeten Digitalkamerasystem nur noch schwer zu erkennen. Auch sind der darstellbare Bildausschnitt und die geometrischen Abmessungen einer Oberflächenprobe begrenzt. Um den gravitationsbedingten Einfluss auf die Fluidtropfen im Vergleich zu den Kontaktwinkelmessungen zu reduzieren, wurde eine minimale Verweildauer von zwei Stunden festgelegt. Nach einer minimalen Verweildauer von zwei Stunden sind die

Änderungen der Benetzungsfläche, die sich im Zeitraum von einigen Sekunden ergeben, vernachlässigbar gering. Unter Berücksichtigung der gesamten Verweildauer kann ein quasistationärer Zustand während des Vorgangs der optischen Vermessung der Benetzungsfläche angenommen werden. In den Abbildungen 4.24 bis 4.27 ist der Einfluss der Verweildauer ersichtlich. Die Abbildungen zeigen jeweils von oben nach unten die Ergebnisse nach einer Verweildauer von zwei, fünf und 20 Stunden. Die Tendenz zu steigenden Benetzungsfaktoren mit fortschreitender Verweildauer wird aufgezeigt. Jede Messung wurde eigenständig durchgeführt. Es wurde nicht die Benetzungsfläche nach zwei Stunden vermessen, weitere drei Stunden abgewartet und dann die Benetzungsfläche nach fünf Stunden vermessen. Jede einzelne Angabe eines Benetzungsfaktors für eine gegebene Verweildauer und Einlagerungstemperatur beruht auf eigenständigen Absetzungen von Fluidtropfen und deren Vermessungen.

### ***Einlagerungstemperatur***

Die Einlagerungstemperatur beeinflusst maßgeblich die Viskosität des abgesetzten Fluids und damit deren Benetzungseigenschaften. In den vorangegangenen dynamischen Untersuchungen lag die Ölsumpftemperatur maximal bei 100°C. Es wurden Voruntersuchungen angestellt, um den Einfluss der Einlagerungstemperatur und eine sinnvolle obere Grenze dieser zu erfassen. Der Einfluss der Einlagerungstemperatur auf den Benetzungsfaktor ist exemplarisch in Abbildung 4.23 ersichtlich. Die Untersuchungen wurden jeweils mit den Grundölen PG und PAO durchgeführt. Jeder einzelne dargestellte Wert entstammt einer eigenständigen Messung. Es ist die Tendenz erkennbar, dass mit höheren Einlagerungstemperaturen höhere Benetzungsfaktoren erreicht werden.

In Untersuchungen mit Einlagerungstemperaturen von 90 und 110°C haben sich nicht hinnehmbare Abweichungen ergeben. Auf den Oberflächenproben waren nach den Untersuchungen deutliche Einbrandspuren der Fluide vorhanden. Eine ungehinderte Benetzung der Oberfläche muss in Frage gestellt werden. Weiterhin hat sich an der Glasscheibe des Behälters ein Ölnebel niedergeschlagen. Dieser reduziert das Tropfenvolumen und verfälscht damit das Messergebnis. Auch ist dadurch eine zuverlässige optische Vermessung der Benetzungsfläche nicht mehr möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die maximale Einlagerungstemperatur deshalb auf 70°C festgelegt. Die minimale Einlagerungstemperatur lag bei Raumtemperatur.

Die Einlagerungstemperatur wurde dadurch erreicht, dass die Behälter mit den eingelagerten Oberflächenproben, auf welchen sich die Fluide bereits befanden, in einem Wärmeofen eingelagert wurden. Zum Zeitpunkt der Absetzung der Fluidtropfen waren der Behälter und die Oberflächenproben immer auf Raumtemperatur temperiert. Die Behälter wurden nach der Absetzung der Fluidtropfen in den bereits auf die Einlagerungstemperatur temperierten Wärmeofen gegeben. Die Oberflächenproben waren zum Zeitpunkt der Messung der Benetzungsflächen noch annähernd auf der Einlagerungstemperatur. Die kurzzeitige Ab-

kühlung an der Umgebungsluft kann vernachlässigt werden, da die Oberflächenproben in den verschlossenen, massiven Behältern verblieben sind.

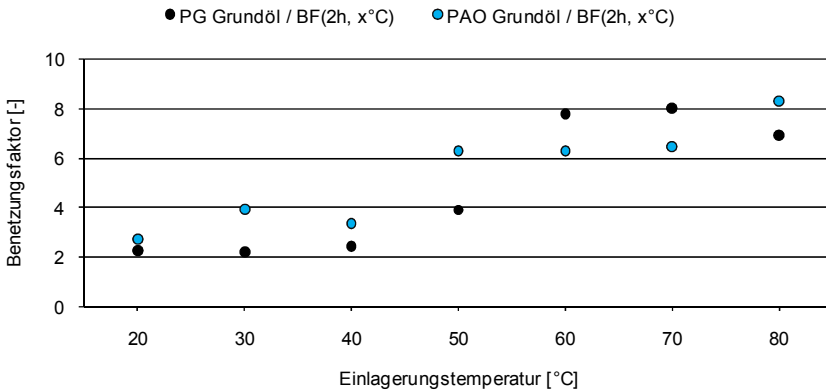


Abbildung 4.23: Einfluss der Einlagerungstemperatur auf den Benetzungsfaktor

### **Oberflächenproben**

Die Bestimmung des Benetzungsfaktors muss auf einer ebenen, horizontal gelagerten Festkörperoberfläche stattfinden. Der Einfluss einer Krümmung oder Schiefstellung der Oberfläche auf die Ausbreitung eines Fluids soll ausgeschlossen werden. Die in den dynamischen Untersuchungen verwendeten Wellenhülsen, können nicht als Oberflächenproben verwendet werden. Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Benetzungsverhalten wurde in Kapitel 2.4 dargelegt. Dementsprechend ergeben sich die Anforderungen an die Oberflächenproben. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten soll deren Oberflächenbeschaffenheit der einer Wellenhülse möglichst ähnlich sein. Im Verlauf der Bestimmung des Benetzungsfaktors werden mehrere artgleiche Oberflächenproben verwendet. Diese sollen untereinander eine sehr ähnliche Oberflächenbeschaffenheit aufweisen. Dadurch sollen unterschiedliche Messergebnisse, aufgrund von unterschiedlich beschaffenen Oberflächen, ausgeschlossen werden. Diese Anforderungen, gepaart mit Anforderung nach einer ebenen, möglichst sinnvoll zu handhabenden Geometrie, führte zu der Entscheidung ein Präzisions-Lehrenband zu verwenden. Dieses steht in der Dimension 300 x 50 x 1 mm (L x B x T) zur Verfügung.

Die Oberfläche der Oberflächenproben wird durch einen Walzprozess hergestellt. Demzufolge ist je Oberflächenprobe und vergleichend zwischen diesen eine relativ homogene Oberflächenbeschaffenheit zu erwarten. Die Oberfläche weist eine eindeutige, durch die

Fertigung gegebene Strukturrichtung auf. Diese Eigenschaft findet sich auch bei den Wellenhülsen.

Der Werkstoff des Präzisions-Lehrenbandes ist der Stahlwerkstoff C100S mit der Werkstoffnummer 1.1274. Die in den dynamischen Untersuchungen verwendeten Wellenhülsen bestehen aus dem Stahlwerkstoff 100Cr6 mit der Werkstoffnummer 1.3505. Die Werkstoffzusammensetzungen sind in Tabelle 4.10 ersichtlich /76/. Der einzige nennenswerte Unterschied zwischen den Werkstoffen ist, dass in dem 100Cr6 mehr Chrom als Legierungselement vorhanden ist. Dieser geringen Abweichung der Werkstoffzusammensetzung wird im Hinblick auf die vorgesehenen Benetzungsmessungen kein großer Einfluss beige-messen /52/.

Tabelle 4.10: Werkstoffzusammensetzung von 100Cr6 und C100S /76/

| Bezeichnung                     |             |    | 100Cr6      | C100S       |
|---------------------------------|-------------|----|-------------|-------------|
| Werkstoffnummer                 |             |    | 1.3505      | 1.1274      |
| Legierungselement (Angabe in %) | Kohlenstoff | C  | 0,93...1,05 | 0,95...1,05 |
|                                 | Silizium    | Si | 0,15...0,35 | 0,15...0,35 |
|                                 | Mangan      | Mn | 0,25...0,45 | 0,30...0,60 |
|                                 | Phosphor    | P  | ≤0,025      | ≤0,025      |
|                                 | Schwefel    | S  | ≤0,015      | ≤0,025      |
|                                 | Aluminium   | Al | ≤0,050      | -           |
|                                 | Chrom       | Cr | 1,35...1,60 | ≤0,40       |
|                                 | Kupfer      | Cu | ≤0,30       | -           |
|                                 | Molybdän    | Mo | ≤0,10       | ≤0,10       |
|                                 | Nickel      | Ni | -           | ≤0,40       |

Insgesamt wurden 14 Oberflächenproben in Form des genannten Präzisions-Lehrenbands verwendet. Die Oberflächenbeschaffenheit dieser wurde jeweils an vier unabhängigen Messstellen 3-dimensional erfasst. Diese Messstellen sind die Positionen, an welchen später die Fluidtropfen abgesetzt werden. Der Vergleich der Oberflächenkennwerte der vier Messstellen je Oberflächenprobe erlaubt es, zu beurteilen, wie homogen die Oberfläche einer Oberflächenprobe ist. Um die Oberflächenbeschaffenheit der Oberflächenproben mit denen der Wellenhülsen vergleichen zu können, wurden zwölf Wellenhülsen ebenfalls 3-dimensional vermessen. Die Vermessung erfolgte jeweils mit einem optischen Oberflächenmessgerät, siehe Kapitel 3.2.4. Vermessen wurde jeweils ein Bereich von 1 x 1 mm. Als aussagekräftige 3-dimensionale Oberflächenkennwerte werden im Folgenden die ma-

ximale Höhe der Oberfläche  $S_z$ , die Spitzendichte der Oberfläche  $S_{pd}$  und der Materialanteil  $S_{mr}(c)$  bewertet, siehe Kapitel 2.5.

In Tabelle 4.11 sind die genannten Oberflächenkennwerte der Oberflächenproben aufgeführt. Es ist zu beachten, dass je Oberflächenprobe für jeden Oberflächenkennwert der Mittelwert der vier Messungen angegeben ist, siehe „Ø aus 4“. Zur Bewertung der Homogenität der Oberflächenbeschaffenheit einer Oberflächenprobe ist die dazugehörige Standardabweichung angegeben. Der Mittelwert und die dazugehörige Standardabweichung eines Oberflächenkennwerts für alle Oberflächenproben sind in den letzten beiden Zeilen angegeben. Datenbasis hierfür waren dementsprechend die den Oberflächenproben zugeordneten Mittelwerte aus den vier Messungen (grau hinterlegt).

Tabelle 4.11: 3-dimensionale Oberflächenkennwerte der Oberflächenproben

|                      |    | $S_z$ [ $\mu\text{m}$ ] |          | $S_{pd}$ [ $1/\text{mm}^2$ ] |          | $S_{mr}(50\%)$ [%] |          |
|----------------------|----|-------------------------|----------|------------------------------|----------|--------------------|----------|
|                      |    | Ø aus 4                 | Std.abw. | Ø aus 4                      | Std.abw. | Ø aus 4            | Std.abw. |
| Oberflächenprobe Nr. | 1  | 4,30                    | 0,87     | 3384                         | 1074     | 51,3               | 0,4      |
|                      | 2  | 4,07                    | 0,32     | 3417                         | 451      | 50,7               | 0,9      |
|                      | 3  | 3,87                    | 0,85     | 4212                         | 1251     | 51,2               | 0,3      |
|                      | 4  | 4,25                    | 0,67     | 3342                         | 911      | 51,2               | 1,1      |
|                      | 5  | 4,18                    | 0,17     | 4151                         | 589      | 50,5               | 1,2      |
|                      | 6  | 4,48                    | 0,31     | 3960                         | 697      | 52,0               | 0,4      |
|                      | 7  | 4,79                    | 0,74     | 3958                         | 1084     | 51,3               | 0,8      |
|                      | 8  | 4,72                    | 0,33     | 3781                         | 360      | 52,3               | 0,4      |
|                      | 9  | 4,20                    | 0,27     | 4289                         | 367      | 51,3               | 1,1      |
|                      | 10 | 4,53                    | 0,34     | 4069                         | 267      | 51,2               | 0,6      |
|                      | 11 | 4,64                    | 0,69     | 3544                         | 1269     | 52,3               | 1,3      |
|                      | 12 | 4,56                    | 0,40     | 3835                         | 714      | 52,0               | 1,3      |
|                      | 13 | 4,54                    | 0,76     | 4233                         | 1270     | 51,5               | 0,6      |
|                      | 14 | 4,36                    | 0,49     | 5172                         | 810      | 51,9               | 1,1      |
|                      |    | $S_z$ [ $\mu\text{m}$ ] |          | $S_{pd}$ [ $1/\text{mm}^2$ ] |          | $S_{mr}(50\%)$ [%] |          |
| Gesamt Ø             |    | 4,39                    |          | 3953                         |          | 51,5               |          |
| Gesamt Std.abw.      |    | 0,26                    |          | 480                          |          | 0,6                |          |



In Tabelle 4.12 sind die genannten Oberflächenkennwerte der Wellenhülsen aufgeführt. Es wurde eine Messung je Wellenhülse durchgeführt, weshalb hier kein Mittelwert gebildet wird. Der Mittelwert und die dazugehörige Standardabweichung eines Oberflächenkennwerts für alle Wellenhülsen sind wiederum in den letzten beiden Zeilen angegeben

Tabelle 4.12: 3-dimensionale Oberflächenkennwerte der Wellenhülsen

|                    |    | $S_z$ [ $\mu\text{m}$ ] | $S_{pd}$ [ $1/\text{mm}^2$ ] | $S_{mr(50\%)}$ [%] |
|--------------------|----|-------------------------|------------------------------|--------------------|
| Wellenhülse Nr.    | 1  | 7,45                    | 4775                         | 52,0               |
|                    | 2  | 5,29                    | 3443                         | 51,4               |
|                    | 3  | 4,72                    | 2410                         | 53,6               |
|                    | 4  | 5,62                    | 3956                         | 48,7               |
|                    | 5  | 5,17                    | 4026                         | 47,9               |
|                    | 6  | 6,12                    | 2235                         | 49,1               |
|                    | 7  | 5,99                    | 2881                         | 47,1               |
|                    | 8  | 4,79                    | 3118                         | 50,8               |
|                    | 9  | 5,45                    | 2755                         | 53,0               |
|                    | 10 | 5,33                    | 4210                         | 53,1               |
|                    | 11 | 5,35                    | 4521                         | 48,3               |
|                    | 12 | 5,19                    | 5018                         | 47,8               |
|                    |    | $S_z$ [ $\mu\text{m}$ ] | $S_{pd}$ [ $1/\text{mm}^2$ ] | $S_{mr(50\%)}$ [%] |
| Gesamt $\emptyset$ |    | 5,54                    | 3612                         | 50,2               |
| Gesamt Std.abw.    |    | 0,73                    | 938                          | 2,3                |

Die Oberflächenbeschaffenheit einer zusammenhängenden Oberfläche ist, selbst wenn diese in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess hergestellt wurde, nicht an jeder Stelle der Oberfläche identisch. Aus diesem fertigungsbedingten Zusammenhang resultiert eine Streuung der Oberflächenkennwerte. Diese Streuung ist bei den Oberflächenproben und bei den Wellenhülsen, dokumentiert durch die Standardabweichungen, festzustellen. Auch auf einzelnen Oberflächenproben ist eine Streuung zwischen den Oberflächenkennwerten der vier Messstellen gegeben. Insgesamt ist diese aber nicht größer als zwischen den Wellenhülsen. Da auf jeder Oberflächenprobe vier Fluidtropfen abgesetzt werden und daraus der Mittelwert gebildet wird, kann diese Streuung akzeptiert werden.

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Mittelwert der maximale Höhe der Oberfläche  $S_z$  der Oberflächenproben etwas geringer ist als der der Wellenhülsen ( $\emptyset$  Oberflächen-

proben 4,39  $\mu\text{m}$ ,  $\emptyset$  Wellenhülsen 5,54  $\mu\text{m}$ ). Die Spitzendichte der Oberfläche  $S_{pd}$  der Oberflächenproben und der Wellenhülsen liegen durchschnittlich auf einem sehr ähnlichen Niveau ( $\emptyset$  Oberflächenproben 3953 1/ $\text{mm}^2$ ,  $\emptyset$  Wellenhülsen 3612 1/ $\text{mm}^2$ ). Der flächenhafte Materialanteil  $S_{mr}(c)$  der Oberflächenproben liegt durchschnittlich etwas über dem der Wellenhülsen ( $\emptyset$  Oberflächenproben 51,5 %,  $\emptyset$  Wellenhülsen 50,2 %). Sowohl die Oberflächenproben als auch die Wellenhülsen weisen fertigungsbedingt eine eindeutige Strukturrichtung auf. Deren Orientierung auf den Bauteilen ist unerheblich. Entscheidend ist, dass beide Oberflächen geradlinig ausgeprägte Strukturen aufweisen.

Die genannten Oberflächenkennwerte spiegeln das Bild wieder, dass die Oberflächenproben, verglichen mit den Wellenhülsen, durch den Walzprozess weniger hohe Spitzen aufweisen. Die Anzahl der Spitzen und die Verteilung zwischen Spitzen und Riefen, quantifiziert durch den flächenhaften Materialanteil  $S_{mr}(c)$ , sind indes annähernd gleich. Die Strukturrichtung ist weiterhin ein Merkmal das bei beiden ausgeprägt ist. Insgesamt werden die Oberflächenproben als sehr gut geeignet für die Bestimmung des Benetzungsfaktors bewertet.

### **Reinigung der Oberflächenproben**

Das Benetzungsverhalten eines Fluids auf einer Festkörperoberfläche ist auch abhängig von dem Reinigungszustand der Festkörperoberfläche, siehe Kapitel 2.4. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die in vorhergehenden Benetzungsversuchen aufgebrauchten Fluide (Öle) entfernt werden. Gleichzeitig dürfen keine Rückstände des Reinigungsmediums auf der Oberflächenprobe verbleiben. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, müssen die Oberflächen vor den Benetzungsmessungen jeweils in einem vergleichbar gereinigten Zustand sein.

In der Literatur werden im Zusammenhang mit der Ermittlung der unterschiedlichen Benetzungseigenschaften diverse Reinigungsmöglichkeiten genannt /52/. Im Rahmen dieser Arbeit wurden wässrige Lösungen mit tensidhaltigen Reinigungsmitteln, teilweise in Kombination mit einem Ultraschallbad, und diverse flüssige Reinigungsmedien, bis hin zu Chloroform, in Betracht gezogen. In Voruntersuchungen wurde die Wirkung von unterschiedlichen Reinigungsmedien untersucht. Im Einzelnen waren dies Aceton, Isopropanol und Reinigungsbenzin. Auf den mit Aceton gereinigten Oberflächenproben waren keine reproduzierbaren Ergebnisse der Benetzungsmessungen möglich. Optisch waren nach der Reinigung, speziell bei Fluiden auf Basis von PG, Rückstände zu erkennen. Das Aceton ist zur Reinigung mit einem Wasseranteil versetzt. Fluide auf Basis von PG können zumindest bedingt Wasser lösen. Es ist nicht auszuschließen, dass die Rückstände Öl-Wasser Emulsionen sind und deshalb mit Aceton nicht abgereinigt werden können.

Mit dem Reinigungsbenzin wurden sehr gut reproduzierbare Ergebnisse der Benetzungsmessungen erreicht. Das Reinigungsbenzin besteht aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen. Es ist anzunehmen, dass auch dadurch das gute Reinigungser-

gebnis bei den, in ihrer Zusammensetzung unterschiedlichen Fluiden, erzielt werden konnte.

Als eine erweiterte Reinigungsmöglichkeit wurde ein Oberflächenreinigungsgerät eingesetzt, welches mit Plasmatechnik arbeitet, siehe Kapitel 3.3. Die Reinigung mit diesem Gerät erfolgte ausschließlich nach einer vorhergehenden Reinigung der Oberfläche mit Reinigungsbenzin. Durch den Einsatz des Oberflächenreinigungsgeräts wird ein, gegenüber der Reinigung mit Reinigungsbenzin, verbesserter Reinigungszustand erreicht. Ziel ist die weitere Reduzierung äußerlich bedingter Einflüsse auf das Benetzungsverhalten.

### **Ergebnisse**

Abbildung 4.24 bis Abbildung 4.27 zeigen die Ergebnisse der Bestimmung des Benetzungsfaktors. Innerhalb einer Abbildung sind die Ergebnisse für eine gleichbleibende Einlagerungstemperatur und einen Reinigungszustand dargestellt. Die dreigliedrige Aufteilung je Abbildung resultiert aus den dort dargestellten drei unterschiedlichen Verweildauern. Von oben nach unten finden sich dort die Ergebnisse für eine Verweildauer von zwei, fünf und 20 Stunden. Die Benennung des jeweiligen Fluids ist innerhalb einer Abbildung jeweils bei den Ergebnissen nach einer Verweildauer von 20 Stunden angegeben. Die zu den Fluiden gehörenden Ergebnisse sind immer in der gleichen Reihenfolge angeordnet, sodass die unten stehende Benennung auf die oberen beiden Darstellungen übertragen werden kann.

Die Abbildungen sind aufgeteilt nach den unterschiedlichen Reinigungsverfahren der Oberflächenproben. In der Abbildung 4.24 und der Abbildung 4.25 sind die Ergebnisse, welche auf mit Reinigungsbenzin gereinigten Oberflächenproben erzielt wurden, dargestellt. In der Abbildung 4.26 und der Abbildung 4.27 sind die Ergebnisse, welche auf mit dem Oberflächenreinigungsgerät gereinigten Oberflächenproben erzielt wurden, dargestellt.

Der Benetzungsfaktor nimmt unabhängig vom Reinigungszustand und von der Einlagerungstemperatur mit zunehmender Verweildauer zu. Diese Zunahme fällt bei der Einlagerungstemperatur von 70°C deutlicher aus als bei 20°C. Der Benetzungsfaktor ist, unabhängig vom Reinigungszustand, bei der höheren Einlagerungstemperatur größer. In den Voruntersuchungen wurden diese Zusammenhänge für einzelne Fluide erkannt. In diesen Untersuchungen haben sich selbige bestätigt, siehe Abbildung 4.24 bis Abbildung 4.27.

Bei der gleichen Einlagerungstemperatur und Verweildauer ist der Benetzungsfaktor auf den, mit dem Oberflächenreinigungsgerät gereinigten Oberflächen tendenziell größer. Dieser Zusammenhang ist dadurch erklärbar, dass durch die bessere Reinigung die Oberflächenenergie dieser Oberfläche zunimmt. Je höher die Oberflächenenergie einer Oberfläche, desto besser wird diese benetzt, siehe Kapitel 2.4.

Betrachtet man die ermittelten Benetzungsfaktoren im Hinblick auf die Wirkung der Additive, so wird ersichtlich, dass diese einen nennenswerten Einfluss auf diesen haben. Es treten, ausgehend von dem Referenzwert, der mit dem jeweiligen Grundöl erreicht wird,

Steigerungen aber auch Verringerungen ein. Das Gesamtbild erscheint zunächst etwas regellos. Einzelne Additive heben sich hervor. Beispielsweise sind die Werte des Benetzungsfaktors für Fluide mit dem Additiv Aminphosphat immer die geringsten. Dies trifft unabhängig davon zu in welchem Grundöl das Additiv gelöst ist und hat Gültigkeit, unabhängig von dem Reinigungszustand, der Verweildauer und der Einlagerungstemperatur. Ist dieses Additiv gelöst in dem Grundöl PAO, treten sogar Benetzungsfaktoren kleiner ein auf. Die Migrationswilligkeit der Fluide mit dem Additiv Aminphosphat ist fast nicht vorhanden. Die Fluide haben kein Bestreben die Oberfläche zu benetzen.

Das Additiv Ca-Sulfonat ist nur gelöst in dem Grundöl PAO als Fluid vorhanden. Der Benetzungsfaktor dieses Fluids ist immer der höchste oder im obersten Bereich einer jeden Messreihe. Dies gilt entsprechend nur für die Fluide auf Basis von PAO. Dies tritt unabhängig von dem Reinigungszustand, der Verweildauer und der Einlagerungstemperatur auf. Das Fluid mit dem Additiv Ca-Sulfonat hat eine vergleichsweise stark ausgeprägte Migrationswilligkeit.

Auch für andere Additive ist erkennbar, dass diese unabhängig von dem Reinigungszustand, der Verweildauer und der Einlagerungstemperatur einen immer gleichen Einfluss auf den Benetzungsfaktor haben. So wirkt Triarylphosphat tendenziell erhöhend, während das Additiv Mo-Dialkyldithiophosphat tendenziell eine verringernde Wirkung auf den Benetzungsfaktor hat. Allerdings ist bei diesen Additiven, dieses Verhalten nicht so signifikant wie bei den zuvor genannten.

Die Werte des Benetzungsfaktors der Grundöle ohne Additivierung liegen tendenziell im oberen Bereich der jeweiligen Messreihe. Diese Tendenz ist unabhängig von dem Reinigungszustand, der Verweildauer und der Einlagerungstemperatur zu beobachten. Es zeigt sich, dass Fluide, in welchen ein Additiv gelöst ist, nur selten besser benetzen als das reine Grundöl.

### **Fazit**

Eine Steigerung der Verweildauer oder der Einlagerungstemperatur bewirkt tendenziell eine Erhöhung des Benetzungsfaktors. Der Reinigungszustand vor der Bestimmung des Benetzungsfaktors beeinflusst diesen. Oberflächen welche zusätzlich mit dem Oberflächenreinigungsgesetz (Plasmatechnik) gereinigt wurden, werden besser benetzt. Die relativen Unterschiede des Benetzungsverhaltens der einzelnen Fluide untereinander wird durch den Reinigungszustand nicht verändert.

Die einzelnen in den Grundölen gelösten Additive haben einen Einfluss auf den Benetzungsfaktor. Dieser Einfluss ist für einzelne Additive signifikant. Das Additiv Aminphosphat verringert den Benetzungsfaktor, das Additiv Ca-Sulfonat erhöht ihn hingegen.

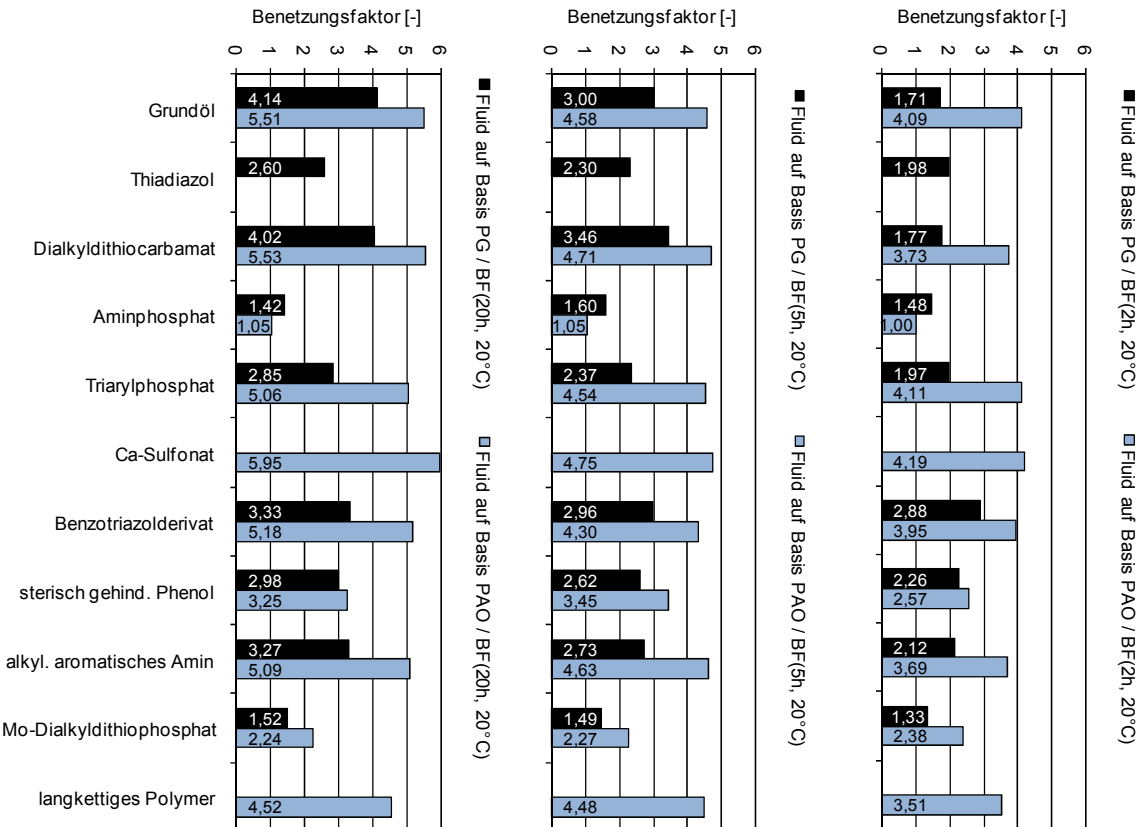
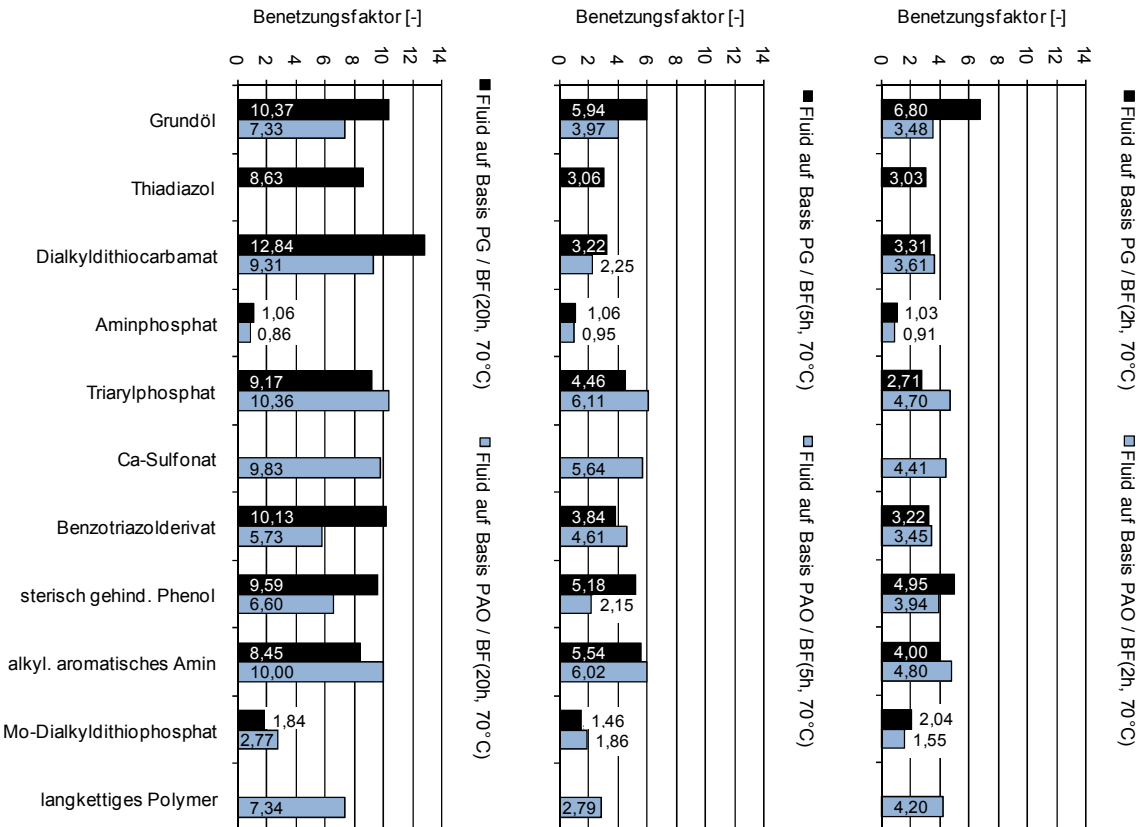
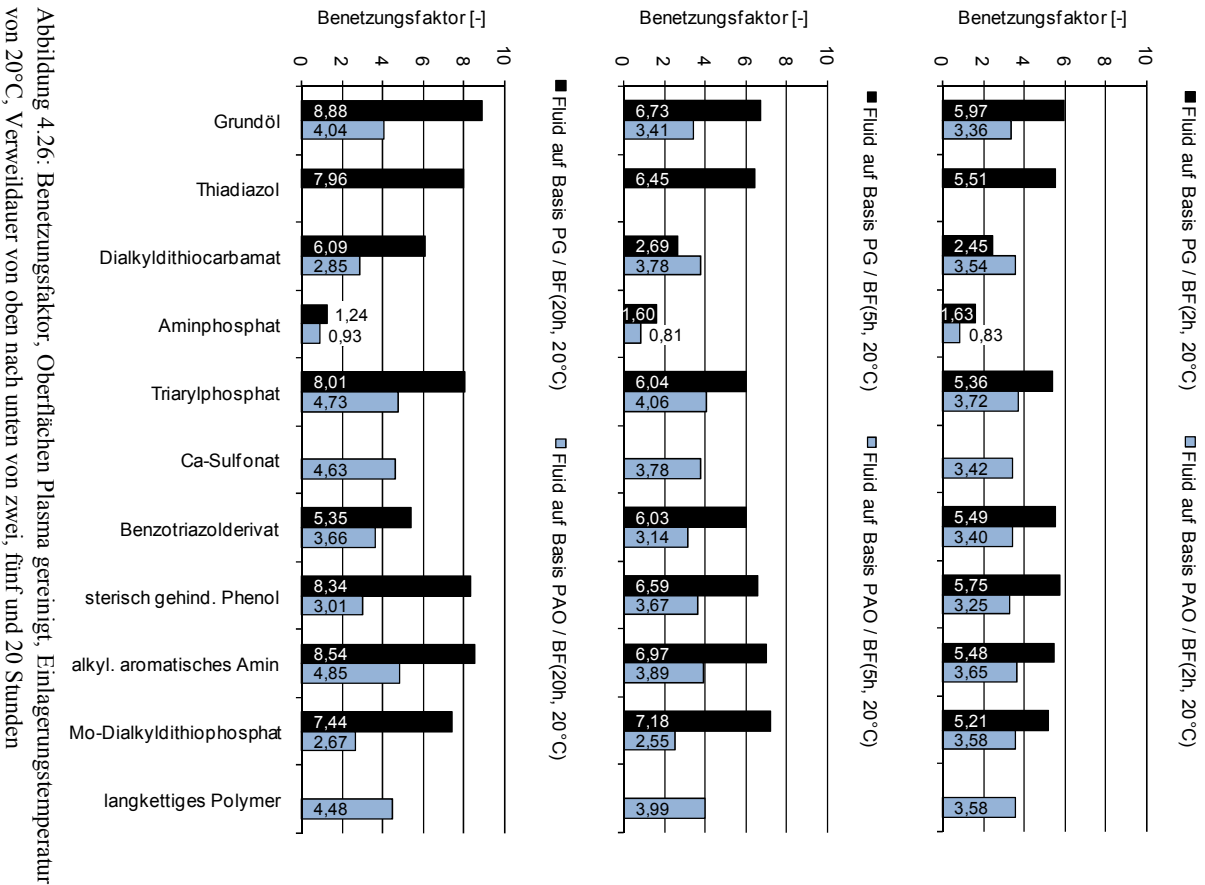
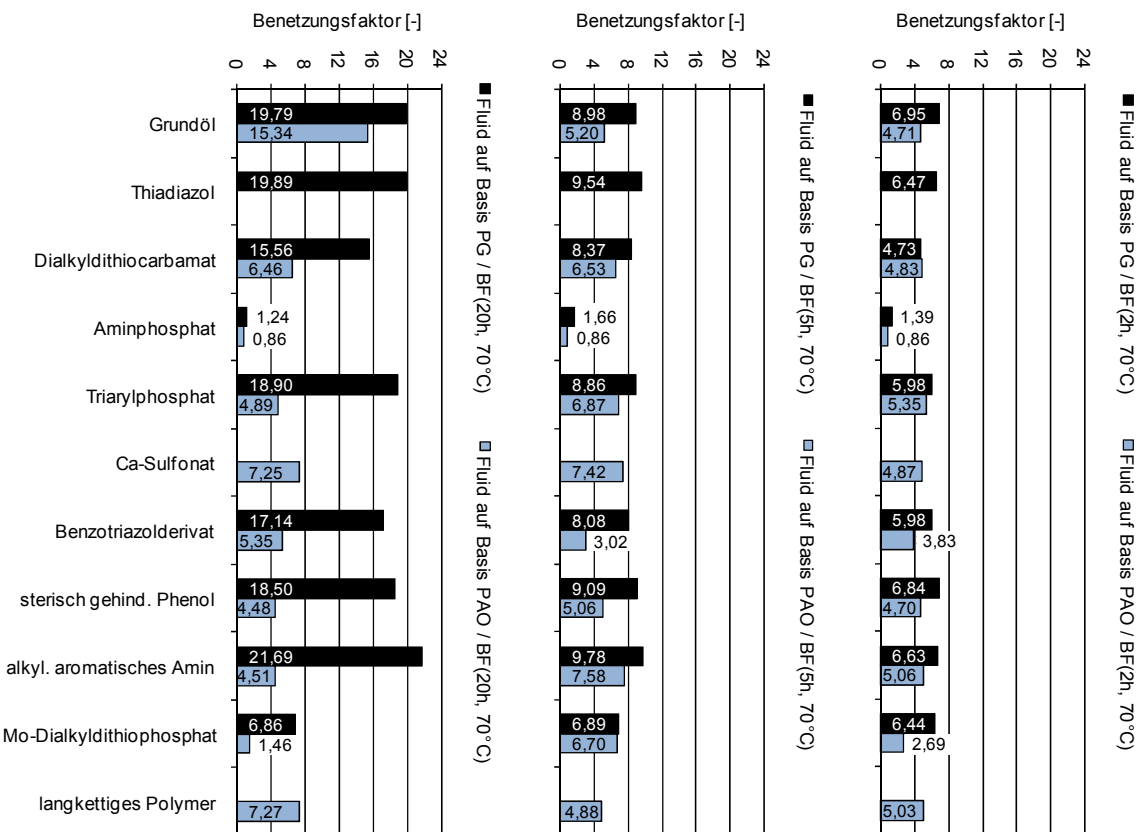


Abbildung 4.24: Benetzungsfaktor, Oberflächen mit Benzin gereinigt, Einlagerungstemperatur von 20°C, Verweildauer von oben nach unten von zwei, fünf und 20 Stunden









## 5 Diskussion der Ergebnisse

In Kapitel 4 wurden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen dargestellt. Das übergeordnete Ziel, die Ergebnisse übergreifend zu bewerten, ist Inhalt dieses Kapitels. Ausgehend von einer Betrachtung der Einflussfaktoren der einzelnen Untersuchungen werden abschnittsweise jeweils zwei Betriebseigenschaften des Dichtsystems miteinander verglichen. Abschließend wird die Korrelation zwischen den Betriebs- und den Benetzungseigenschaften des Dichtsystems thematisiert.

### 5.1 Betrachtung der Einflussfaktoren der Untersuchungen

Die Reibmomentmessungen, die Förderwertmessungen und die Verschleißuntersuchungen wurden an realen Dichtsystemen durchgeführt. Durch die 19 Fluide und die zwei RWDR Werkstoffe sind es insgesamt 38 Dichtsysteme, bestehend aus unterschiedlichen Komponenten. Um die Ergebnisse untereinander vergleichen zu können, wurde jedes dieser Dichtsysteme in den einzelnen Untersuchungen betrachtet.

Die RWDR aus NBR haben, durch den Hersteller vorgegeben, im Neuzustand eine etwas höhere durchschnittlich Radialkraft, als die aus FPM, siehe Tabelle 4.3. Dieser Umstand beeinflusst sämtliche Betriebseigenschaften. Auch ist davon auszugehen, dass die unterschiedlichen Elastomere unterschiedliche tribologische Eigenschaften im Reibkontakt aufweisen. Sowohl der Verschleiß, als auch die gemessenen Förder- und Reibmomentwerte sind damit nicht vorbehaltlos vergleichbar. Die Betriebsbedingungen in den unterschiedlichen Untersuchungen liegen nahe an der Einsatzgrenze der RWDR aus NBR. Die Einsatzgrenze der RWDR aus FPM wird deutlich unterschritten. Wie bereits erörtert, kann dieser Umstand die Ausfälle der RWDR aus NBR mit beeinflusst haben, siehe Kapitel 4.5. Aus genannten Gründen werden im Folgenden die Ergebnisse getrennt für die beiden RWDR Werkstoffe diskutiert.

Wenn die Dichtsysteme getrennt nach den RWDR Werkstoffen bewertet werden, unterscheiden sich diese nur durch das abdichtende Fluid. Dies entspricht dem angestrebten Ziel alleine den Einfluss des Fluids zu bestimmen. Tatsächlich ist es technisch aber nicht möglich bis auf die variierte Komponente exakt gleiche Dichtsysteme zu untersuchen. Auch wenn es das Ziel ist, die Abweichungen untereinander zu minimieren, so sind die

Komponenten herstellungsbedingt nicht gleich. Diese Tatsache wirkt sich mehr oder weniger auf sämtliche Untersuchungen aus.

### ***Streuung der Oberflächenbeschaffenheit der Gegenlaufflächen***

Die gemittelte Rautiefe  $R_z$  aller, im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Wellenhülsen, liegt durchschnittlich bei  $2,39 \mu\text{m}$ . Die Standardabweichung, zugehörig zu diesem Mittelwert, liegt bei  $0,36 \mu\text{m}$ , siehe Tabelle 4.4. Zwischen dem geringsten und dem höchsten gemessenen Wert der gemittelten Rautiefe liegen rund  $1,4 \mu\text{m}$ . Die Werte streuen nicht sehr stark und liegen im mittleren Bereich der für Dichtsysteme Radial-Wellendichtung geforderten Rauheit.

Es wurden die 3-dimensionalen Oberflächenkennwerte von Wellenhülsen mit denen, die für die Bestimmung des Benetzungsfaktors verwendeten Oberflächenproben, vergleichend bewertet, siehe Tabelle 4.11 und Tabelle 4.12. Die herstellungsbedingt immer vorhandene Streuung der Oberflächenbeschaffenheit wird durch die 3-dimensionalen Oberflächenkennwerte dokumentiert. Insgesamt sind die Voraussetzungen gut, um vergleichende Untersuchungen durchzuführen.

Sämtliche, in den dynamischen Untersuchungen gemessenen Werte, werden von der Oberflächenbeschaffenheit der Gegenlauffläche beeinflusst. Mit mineralischen Referenzölen wurde nachgewiesen, dass bei einem bestimmten Wert von  $R_z$  ein maximaler Förderwert erreicht wird /41/. In anderen Untersuchungen wurde, ebenfalls im Hinblick auf den Förderwert, unter vergleichbaren Betriebsbedingungen die Rauheit der Oberfläche als die dominante Einflussgröße bewertet /37/. Dass auch geringe Abweichungen von  $R_z$ , auf im Einstich geschliffenen Wellenhülsen, den Förderwert und das Reibmoment beeinflussen, wurde auch in /38/ bestätigt. Alle diese genannten Untersuchungen sind im repräsentativen Bereich der gemittelten Rautiefe  $R_z$  von  $1 \dots 5 \mu\text{m}$  durchgeführt worden.

Der Verschleiß ist ebenfalls von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Einerseits wird durch eine zu geringe Rauheit die Zufuhr des abzudichtenden Fluids beeinträchtigt, was zu gesteigerten Temperaturüberhöhungen führen kann. Andererseits führt eine größere Rauheit zu einer Zunahme des abrasiven Verschleißes /41/, /77/.

Die Streuung der Oberflächenbeschaffenheit, aufgezeigt am Beispiel der gemittelten Rautiefe  $R_z$ , ist herstellungsbedingt unvermeidbar. Selbst auf einer Wellenhülse ist die Oberflächenbeschaffenheit nicht zwangsläufig an jeder beliebigen Position exakt gleich. Insgesamt liegt die Rauheit der Wellenhülsen im mittleren Bereich der für Dichtsysteme Radial-Wellendichtung gestellten Anforderungen. Die vorliegende Streuung verfälscht die Ergebnisse nicht maßgeblich. Dass die Streuung der Oberflächenbeschaffenheit der Gegenlaufflächen einen Einfluss auf die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen hat, ist jedoch nicht von der Hand zu weisen und muss in allen folgenden Bewertungen berücksichtigt werden.

### ***Streuung der Radialkraft der RWDR***

Die Radialkraft aller, im Rahmen dieser Arbeit verwendeten RWDR aus NBR liegt vor den Untersuchungen durchschnittlich bei 36,2 N. Die Standardabweichung, zugehörig zu diesem Mittelwert liegt bei 2,4 N. Die dementsprechenden Werte für RWDR aus FPM liegen bei 32,3 N beziehungsweise bei 1,0 N, siehe Tabelle 4.3. Bei RWDR aus NBR liegen zwischen dem kleinsten und dem größten gemessenen Wert der Radialkraft rund 6 N. In zwei um 90° versetzten Messungen an einem RWDR können Unterschiede von bis zu 3 N vorkommen. Insgesamt sind dies gute Voraussetzungen um vergleichbare Untersuchungen durchzuführen.

Welchen Einfluss die Radialkraft auf das Reibmoment hat, wurde in Abbildung 4.2 gezeigt. Eine Steigerung der Radialkraft um 5 N ergab eine Steigerung des Reibmoments um rund 0,1 Nm. Dieses empirisch für die vorliegenden Dichtsysteme ermittelte Ergebnis ist in Gl. (2-5) nachvollziehbar und wurde in ähnlichen Versuchen quantitativ bestätigt [38]. Die, mit einer höheren Radialkraft einhergehende, höhere mittlere Flächenpressung in der Berührfläche macht es nachvollziehbar, dass dadurch höherer Verschleiß am RWDR zu erwarten ist.

Der Förderwert eines Dichtsystems ist ebenfalls von der Radialkraft abhängig, siehe Abbildung 4.6. Eine Steigerung der Radialkraft um 5 N ergibt eine Verringerung des Förderwerts um rund 1,25 g/10 h.

In Abbildung 5.1 ist der Einfluss der Radialkraft auf den Förderwert und das Reibmoment eines Dichtsystems dargestellt. Exemplarisch dargestellt ist ein beliebiger Datenpunkt. Dieser Datenpunkt soll das Ergebnis aus einer Förderwert- und einer Reibmomentmessung sein. Um sich die Abweichungen zu verdeutlichen wird angenommen, dass diese Ergebnisse mit einem speziellen RWDR mit folgenden Eigenschaften erzielt wurden. Die Radialkraft dieses RWDR soll so hoch sein wie der Mittelwert aller verwendeten RWDR (NBR: 36,2 N; FPM: 32,3 N). Weicht die Radialkraft des RWDR vom Mittelwert ab, so ergibt sich ein anderes Ergebnis als das dargestellte. Der Datenpunkt verschiebt sich. Grundlage für die aufgezeigten Verschiebungen sind die Ergebnisse der bereits genannten Untersuchungen, siehe Abbildung 4.2 und Abbildung 4.6. Die horizontale Verschiebung ist die Änderung des Reibmoments, welche durch eine um 2,5 N größere oder kleinere Radialkraft des RWDR eintreten würde. Die vertikale Verschiebung entspricht der Änderung des Förderwerts bei einer um 2,5 N größeren oder kleineren Radialkraft. Wenn die Radialkraft der RWDR um nicht mehr als 2,5 N von dem Mittelwert abweicht, dann liegt der Datenpunkt innerhalb des grau dargestellten Rechtecks.

Die Streuung der Radialkraft der RWDR ist herstellungsbedingt praktisch nicht zu vermeiden. Das Elastomer eines RWDR setzt sich aus mehreren Bestandteilen zusammen. Es ist immer ein inhomogenes Material. Auch alterungsbedingte Veränderungen sind nicht auszuschließen. Die vorliegende Streuung verfälscht die Ergebnisse nicht maßgeblich. Der

Einfluss dieser Streuung ist aber zumindest in geringem Maße gegeben und muss in allen folgenden Bewertungen berücksichtigt werden.

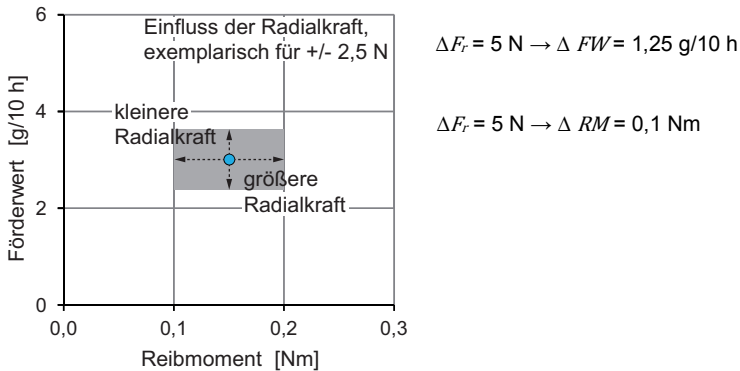


Abbildung 5.1: Darstellung des Einflusses der Radialkraft, exemplarisch für einen beliebigen Datenpunkt

Der Mittelwert des Reibmoments aller untersuchten Dichtsysteme liegt bei rund 0,68 Nm. Eine Änderung der Radialkraft von  $\Delta F_r = 5 \text{ N}$  hat eine Änderung des Reibmoments von  $\Delta RM = 0,1 \text{ Nm}$  zur Folge. Bezogen auf den genannten Mittelwert ist dies eine Änderung von rund 14 %. Der Mittelwert des Förderwerts aller untersuchten Dichtsysteme liegt bei rund 32 g/10 h. Eine Änderung der Radialkraft von  $\Delta F_r = 5 \text{ N}$  hat eine Änderung des Förderwerts von  $\Delta FW = 1,25 \text{ g/10 h}$  zur Folge. Bezogen auf den genannten Mittelwert ist dies eine Änderung von rund 4 %. Verglichen mit dem Reibmoment ist der Förderwert weniger abhängig von der Radialkraft.

### **Ergebnisse aus zwei unabhängigen Untersuchungen**

Bei allen folgenden Bewertungen ist zu berücksichtigen, dass die aufgetragenen Ergebnisse immer aus zwei unabhängig voneinander durchgeführten Untersuchungen stammen. Die Rahmenbedingungen wurden identisch gewählt und die Dichtsysteme waren artgleich, aber es war nicht ein und dasselbe Dichtsystem das untersucht wurde.

In Abbildung 5.1 wird beispielsweise der Förderwert und das Reibmoment betrachtet. Grundlage ist ein artgleiches Dichtsystem (gleicher RWDR Werkstoff, gleiches Fluid). Für diesen einen Datenpunkt müssten aber wenigstens zwei RWDR, auf zwei unterschiedlichen Laufspuren untersucht werden. Die benannten Einflussfaktoren Oberflächenbeschaffenheit und Radialkraft wirken sich jeweils auf beide Untersuchungen aus.

## **Fazit**

Die Oberflächenbeschaffenheit der Gegenauflflächen und die Radialkraft der RWDR können herstellungsbedingt nicht bei allen Untersuchungen identisch sein. Sämtliche Ergebnisse von dynamischen Untersuchungen werden von den genannten Größen beeinflusst.

Die Tatsache, dass die Ergebnisse jeweils aus unabhängigen Untersuchungen stammen, birgt mehrfach die Möglichkeit einer Beeinflussung.

Die Funktionsweise von Dichtsystemen wird von einer Vielzahl an Einflussfaktoren bestimmt. Einige haben gegebenenfalls nur minimale Auswirkungen und sind untergeordnet, aber dennoch vorhanden. Es gibt Anforderungen, zum Teil auch in Form von Grenzwerten, die zwar von allen Dichtsystemen erfüllt wurden, aber sicherlich nicht in gleichem Maße. Beispielsweise sind zu nennen:

- Schiefstellung der Dichtkante (herstellungs- oder einbaubedingt)
- Exzentrizität (statisch oder dynamisch)
- Inhomogenität im Elastomer oder dessen Alterung.

Diese Einflüsse wurden minimiert oder nach bestem technischen Möglichkeiten ausgeschlossen. Dennoch ist in Anbetracht sämtlicher Einflussfaktoren, die auf ein Dichtsystem wirken nicht zu erwarten, dass dessen Betriebseigenschaften exakt reproduzierbar sind. Dementsprechend können Korrelationen zwischen oder mit Betriebseigenschaften keinem exakten mathematischen Zusammenhang folgen.

## **5.2 Grundlage der Korrelationen**

Die Korrelationen der Betriebs- und Benetzungseigenschaften werden in den folgenden Unterkapiteln in einzelnen Abbildungen dargestellt, Abbildung 5.2 bis 5.11. Entsprechend der Definition einer Korrelation, wird keine Aussage zur Kausalität der Eigenschaften zueinander getroffen. Demzufolge ist es unerheblich, welche Eigenschaft auf der Abszisse oder der Ordinate angeordnet ist.

In den Abbildungen sind, zugehörig zu den Datenpunkten, Geraden eingetragen. Diese Geraden beruhen auf einer einfachen linearen Regression, unter der Vorgabe der Minimierung der Summe der Fehlerquadrate. Wenn die Werte beider Eigenschaften gleichsam steigend sind, liegt eine gleichläufige Korrelation vor. Dargestellt wird dies durch eine Gerade mit einer positiven Steigung. Liegt der gegensätzliche Fall vor, also wenn die Werte einer Eigenschaft steigend sind, während die der anderen fallen, dann liegt eine gegenläufige Korrelation vor. Dargestellt wird dies durch eine Gerade mit negativer Steigung /78/.

Die folgenden Betrachtungen legen den Fokus auf die Orientierung der Korrelationen (gleich- oder gegenläufig). Um diese zu veranschaulichen, wurden die Achsenabschnitte

und die Skalierungen in den Abbildungen 5.2 bis 5.11 angepasst. Die absoluten Zahlenwerte der Datenpunkte sind in Kapitel 4 erörtert.

## **5.3 Korrelationen zwischen den Betriebseigenschaften**

Die Betriebseigenschaften eines Dichtsystems sind das Reibmoment, der Förderwert und der Verschleiß. Die Korrelationen zwischen diesen werden im Folgenden erörtert. Als Ausgangsdaten dienen hierzu die in den Kapiteln 4.3, 4.4 und 4.5 beschriebenen Ergebnisse. Ein angegebener Wert eines Reibmoments entspricht je Dichtsystem letztlich dem Mittelwert aus einer 3-stündigen Messung. Der Wert des Förderwerts basiert auf der Mittelung von zwei 10-stündigen Messungen mit unterschiedlicher Drehrichtung. Der Verschleiß wird durch den Mittelwert der Verschleißbreite von vier über 96 Stunden untersuchten RWDR repräsentiert. Einzelne Werte von Dichtsystemen mit RWDR aus NBR basieren auf drei oder zwei Messungen, siehe Kapitel 4.5.

### **5.3.1 Korrelation zwischen Reibmoment und Förderwert**

In Abbildung 5.2 sind die Ergebnisse der Förderwertmessungen über denen der Reibmomentmessungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Es ist jeweils eine gleichläufige Korrelation zwischen dem Förderwert und dem Reibmoment gegeben. Für mineralische Schmieröle ist unter Variation der Relativgeschwindigkeit ein ähnliches Verhalten bekannt /33/. Das hier aufgezeigte Ergebnis beruht hingegen auf gleichen Betriebsbedingungen und resultiert aus dem Einfluss des abzudichtenden Fluids. Abhängig von der Zusammensetzung eines Fluids ist gleichsam eine Zunahme oder Abnahme von Förderwert und Reibmoment zu beobachten.

Der genannte Zusammenhang ist durch eine Annahme hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt nachvollziehbar. Der axialen Ausbreitung des Fluids von der Öl- zur Luftseite wirkt im dynamischen Betrieb der Förderwert entgegen. Je kleiner der Förderwert ist, desto weiter schreitet die axiale Ausbreitung des Fluids voran und desto mehr Fluidmenge ist damit im Dichtspalt vorhanden. Umso mehr Fluidmenge im Dichtspalt vorhanden ist, umso größer ist die Fluidfilmhöhe und umso größer ist der Anteil der hydrodynamischen Flüssigkeitsreibung. Je größer der Bereich der Flüssigkeitsreibung im Dichtspalt beziehungsweise je größer die Fluidfilmhöhe ist, umso kleiner ist das zu messende Reibmoment, siehe Kapitel 2.3. Nachvollziehbar wird das genannte Verhalten auch unter der Annahme, dass der Förderwert auf einen Wert absinkt, bei welchem das Fluid nicht mehr ausreichend zur Ölseite zurückgefördert wird. Leckage ist die Folge. In diesen Betrachtungen wurde keine Leckage erfasst. Bei den durchgeführten Förderwertmessungen, mit genannter Vorgehens-

weise, ist dies aufgrund der veränderten Einbausituation nicht möglich. Bei den Reibmomentmessungen ist keine Leckage aufgetreten.

Analog dazu ist die genannte Annahme, hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt für einen großen Förderwert stimmig. Ein großer Förderwert kann dazu führen, dass so viel Fluid zurückgefördert wird, dass im Extremfall ölseitig nur noch wenig weiter als bis an das radiale Pressungsmaximum ein tragfähiger Schmierfilm ausgebildet ist, siehe Kapitel 2.2. Dadurch resultieren ein größerer Bereich in dem Mischreibung herrscht und damit ein größeres Reibmoment.

Die untersuchten Dichtsysteme sind, mit Ausnahme der unterschiedlichen Fluide, im Rahmen der genannten Möglichkeiten identisch, siehe Kapitel 5.1. Es wurde eine Annahme aufgezeigt, wie die Fluidmenge im Dichtspalt, den Förderwert und das Reibmoment gleichsam beeinflussen kann. Die Fluidmenge im Dichtspalt wird in diesen Untersuchungen maßgeblich durch das abdichtende Fluid beziehungsweise dessen Eigenschaften bestimmt. Es kann angenommen werden, dass die Benetzungseigenschaften der Fluide hierbei nicht unerheblich zum Tragen kommen. Eine weiterführende Diskussion der Annahme hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt findet sich in Kapitel 5.5.

Die Steigung der in Abbildung 5.2 eingetragenen Gerade beträgt bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR rund  $36 \text{ g}/10 \text{ h} \cdot \text{Nm}$ . Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung rund  $58 \text{ g}/10 \text{ h} \cdot \text{Nm}$ .

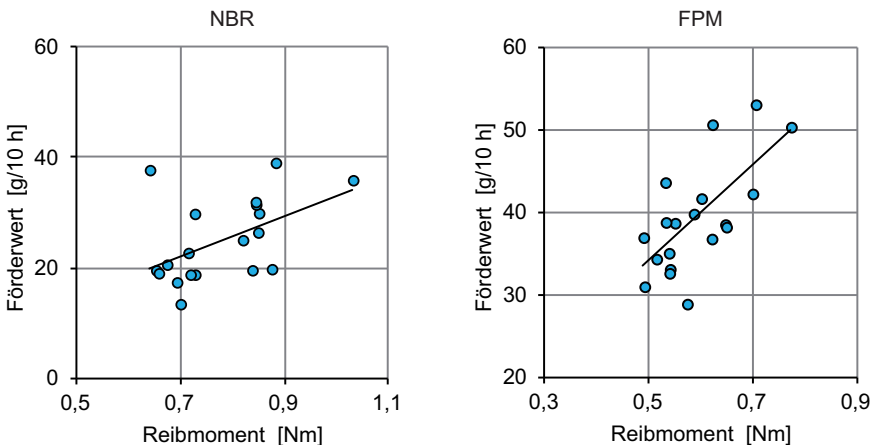


Abbildung 5.2: Darstellung der Korrelation zwischen Reibmoment und Förderwert, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

### 5.3.2 Korrelation zwischen Förderwert und Verschleiß

In Abbildung 5.3 sind die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen über denen der Förderwertmessungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Es ist jeweils eine gleichläufige Korrelation zwischen dem Verschleiß und dem Förderwert gegeben. Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM ist die Abweichung der Datenpunkte von der Gerade größer als bei jenen mit RWDR aus NBR. Der in Kapitel 4.5 dargestellte, deutlich unterschiedliche Verschleiß der einzelnen RWDR aus FPM, ist hierfür der Grund.

Die im vorangegangenen Unterkapitel 5.3.1 genannte Annahme, hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt, kann auch hier bestätigt werden. Je höher der Förderwert, desto geringer ist die Fluidmenge im Dichtspalt und desto größer ist gegebenenfalls der Bereich der Mischreibung im Dichtspalt. Daraus folgt, dass ein größerer Verschleiß auftritt.

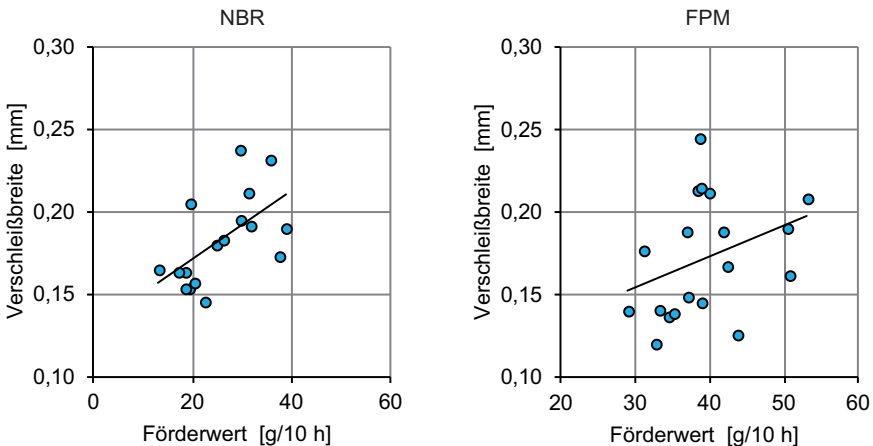


Abbildung 5.3: Darstellung der Korrelation zwischen Förderwert und Verschleißbreite, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

Die Steigung der eingetragenen Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR beträgt rund  $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot 10 \text{ h/g}$ . Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung rund  $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot 10 \text{ h/g}$ . Die Abweichungen der Datenpunkte der Messungen mit RWDR aus FPM könnte die Aussagekraft der aufgezeigten Gerade in Frage stellen. Die Tatsache, dass deren Steigung sehr ähnlich ist wie die der RWDR aus NBR, unterstreicht deren Aussagekraft jedoch. Der Verschleiß der RWDR aus NBR und aus FPM ist ähnlich, siehe Kapitel 4.5.



### 5.3.3 Korrelation zwischen Reibmoment und Verschleiß

In Abbildung 5.4 sind die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen über denen der Reibmomentmessungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Es ist jeweils eine gleichläufige Korrelation zwischen dem Verschleiß und dem Reibmoment gegeben.

Das Reibmoment und der Verschleiß werden jeweils maßgeblich von der Radialkraft beeinflusst, siehe Gl. (2-5) beziehungsweise Kapitel 5.1. Dass diese Größen an einem Dichtsystem voneinander abhängen können, ist nachvollziehbar. Die dargestellten Ergebnisse beruhen auf unterschiedliche Untersuchungen an mehreren Dichtsystemen. Selbst wenn das ermittelte Reibmoment aufgrund einer leicht höheren Radialkraft des RWDR zu begründen wäre, so ist zu beachten, dass die Verschleißuntersuchungen mit anderen RWDR durchgeführt wurden. Es ist auszuschließen, dass die Ergebnisse alleine durch die Streuung der Radialkraft der RWDR im Neuzustand zustande gekommen sind. Sowohl ein erhöhter Wert des Reibmoments als auch der Verschleißbreite ist nur durch einen, von den anderen Dichtsystemen abweichenden Schmierungszustand zu begründen. Es ist anzunehmen, dass die Eigenschaften der Fluide, die Fluidmenge im Dichtspalt, und damit die aufgezeigten Ergebnisse beeinflusst.

Das Ergebnis ist bei Betrachtung eines einzelnen Dichtsystems physikalisch nachvollziehbar. Ein höheres gemessenes Reibmoment bedeutet eine höhere zu ertragende Reibleistung für das Dichtsystem beziehungsweise besonders für den RWDR. Diese höhere Reibleistung steht im Zusammenhang mit einem höheren Verschleiß des RWDR.

Die Steigung der eingetragenen Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR beträgt rund 0,18 mm/Nm. Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung rund 0,25 mm/Nm. Beide Geraden verlaufen, ihrer Geradengleichung zufolge, annähernd durch den Nullpunkt. Diese Tatsache ist physikalisch nachvollziehbar. Insbesondere weil beide Geraden näherungsweise durch den Nullpunkt verlaufen, ist davon auszugehen, dass bei gleichem gemessenem Reibmoment ein RWDR aus FPM mehr verschleißt als ein RWDR aus NBR. Demzufolge kann auch angenommen werden, dass bei gleicher Radialkraft ein RWDR aus FPM mehr verschleißt als ein RWDR aus NBR.

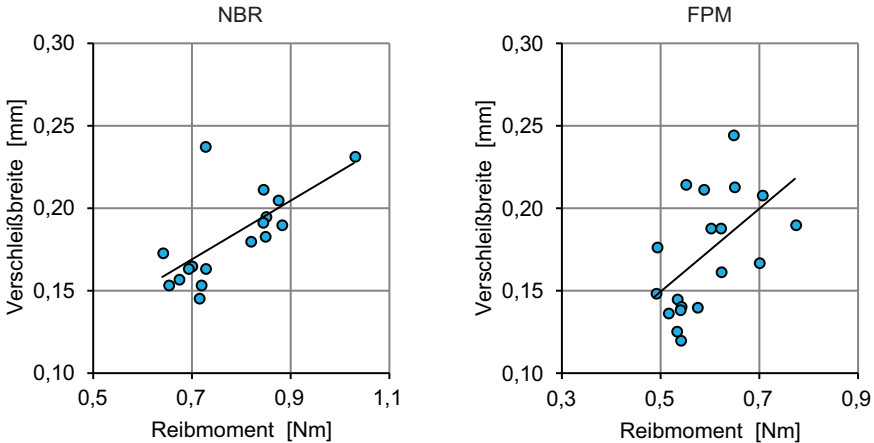


Abbildung 5.4: Darstellung der Korrelation zwischen Reibmoment und Verschleißbreite, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

## 5.4 Korrelationen zwischen den Betriebs- und den Benetzungseigenschaften

Die Betriebseigenschaften eines Dichtsystems sind das Reibmoment, der Förderwert und der Verschleiß. Die Benetzungseigenschaften werden im Rahmen dieser Arbeit durch den Benetzungsfaktor und den Kontaktwinkel angegeben. Die Korrelationen zwischen den Betriebseigenschaften wurden in Kapitel 5.3 erörtert. Im Folgenden werden die Korrelationen zwischen den Betriebs- und den Benetzungseigenschaften erörtert. Abschließend folgt eine vergleichende Betrachtung der genannten Benetzungseigenschaften untereinander. Als Datenbasis dienen hierzu die in den Kapiteln 4.3 bis 4.6 beschriebenen Ergebnisse.

Ein angegebener Wert eines Reibmoments entspricht je Dichtsystem letztlich dem Mittelwert aus einer 3-stündigen Messung. Der Wert des Förderwerts basiert auf der Mittelung von zwei 10-stündigen Messungen mit unterschiedlicher Drehrichtung. Das Verschleißverhalten wird durch den Mittelwert der Verschleißbreite von vier über 96 Stunden untersuchten RWDR repräsentiert. Einzelne Werte von Dichtsystemen mit RWDR aus NBR basieren auf drei oder zwei Messungen, siehe Kapitel 4.5.

Ein angegebener Wert eines Kontaktwinkels entspricht dem Mittelwert aus 30 mehrfach beidseitig vermessenen Fluidtropfen, siehe Kapitel 4.6.1. Die Werte des Benetzungsfaktors

sind die nach einer Verweildauer von zwei Stunden bei einer Einlagerungstemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  ( $BF_{(2h, 20^{\circ}\text{C})}$ ) ermittelten. Es handelt sich um die Ergebnisse der Messungen auf Oberflächenproben, welche nicht zusätzlich mit dem Oberflächenreinigungsgerät gereinigt wurden, siehe Kapitel 3.3. Ein angegebener Wert eines Benetzungsfaktors ist der Mittelwert aus vier Messungen mit dem gleichen Fluid, durchgeführt auf derselben Oberflächenprobe, siehe Kapitel 4.6.2.

#### 5.4.1 Korrelation zwischen Reibmoment und Benetzungsfaktor

In Abbildung 5.5 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Benetzungsfaktors über denen der Reibmomentmessungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Die Werte des Benetzungsfaktors entsprechen dem  $BF_{(2h, 20^{\circ}\text{C})}$ . Diese sind auf den metallischen Oberflächenproben ermittelt worden. Die in den beiden Diagrammen (NBR und FPM) aufgetragenen Werte des Benetzungsfaktors sind dieselben.

Die Korrelation zwischen dem Reibmoment und dem Benetzungsfaktor ist jeweils gegenläufig. Je größer der Benetzungsfaktor ist, desto kleiner ist das Reibmoment. Es wird qualitativ der Zusammenhang aufgezeigt, dass ein Fluid welches auf der Oberflächenprobe besser benetzt, also eine größere Migrationswilligkeit aufweist, im Dichtsystem ein kleineres Reibmoment hervorruft. Auch hier zeigt sich eine Analogie zu der in Kapitel 5.3.1 formulierten Annahme hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt. Ein Fluid, welches besser benetzt kann der Grund für eine größere Fluidmenge im Dichtspalt und damit für ein kleineres Reibmoment sein.

Die Steigung der eingetragenen Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR beträgt rund  $-7,8$   $1/\text{Nm}$ . Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung rund  $-9,9$   $1/\text{Nm}$ . Wenn angenommen wird, dass das Reibmoment von dem Benetzungsfaktor der Fluide beeinflusst wird, dann ist festzuhalten, dass dies bei RWDR aus NBR in stärkerem Maße geschieht, als bei RWDR aus FPM. Quantifizierbar ist dies anhand der geringeren Steigungen der Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR. Insgesamt sind die Steigungen der Geraden ähnlich. Es ist deshalb naheliegend von einem annähernd gleichen Zusammenhang zwischen der Migrationswilligkeit des Fluids und dem Reibmoment bei RWDR aus NBR und FPM auszugehen.

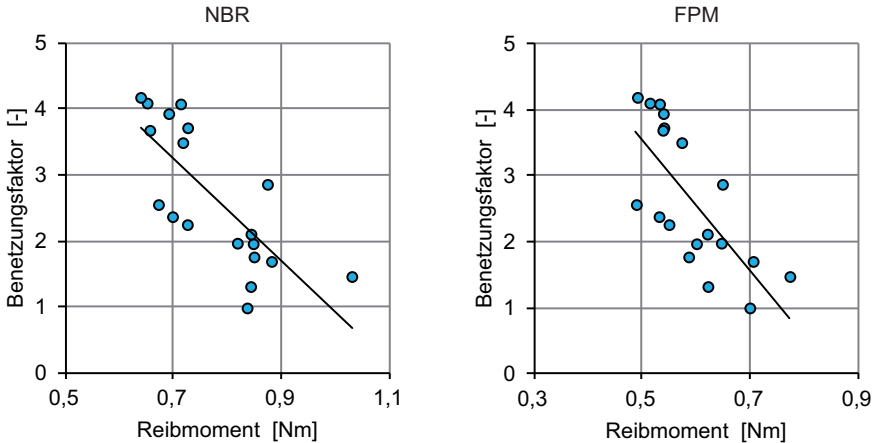


Abbildung 5.5: Darstellung der Korrelation zwischen Reibmoment und Benetzungsfaktor, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

### 5.4.2 Korrelation zwischen Förderwert und Benetzungsfaktor

In Abbildung 5.6 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Benetzungsfaktors über denen der Förderwertmessungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Die Werte des Benetzungsfaktors entsprechen dem  $BF_{(2h, 20^\circ C)}$ . Diese sind auf den metallischen Oberflächenproben ermittelt worden. Die in den beiden Diagrammen (NBR und FPM) aufgetragenen Werte des Benetzungsfaktors sind dieselben.

Der Förderwert, der Dichtsysteme mit RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM, und der Benetzungsfaktor, zeigen jeweils eine gegenläufige Korrelation zueinander. Ein größerer Benetzungsfaktor tritt mit einem kleineren Förderwert auf. Die negative Steigungen der Geraden zeigen qualitativ ein klares Bild. Ein Fluid, das eine größere Migrationswilligkeit hat, also eine Oberflächenprobe besser benetzt, steht in Verbindung mit einem kleineren Förderwert des Dichtsystems. Die Annahme hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt zeigt sich auch hier als stimmig. Eine größere Fluidmenge im Dichtspalt kann durch ein Fluid, welches besser benetzt, also einen größeren Benetzungsfaktor hat, verursacht werden. Wenn die Migrationswilligkeit eines Fluids für eine größere Fluidmenge im Dichtspalt verantwortlich ist, dann ergibt sich folgerichtig, dass diese dem Förderwert entgegenwirkt.

Die Steigung der eingetragenen Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR beträgt rund  $-0,05 \text{ } 10 \text{ h/g}$ . Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung

rund  $-0,12$   $10$   $h/g$ . Es ist ersichtlich, dass die Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR durch zwei Datenpunkte stark beeinflusst wird. Es handelt sich um die Datenpunkte  $FW=37,5$   $g/10$   $h$ ,  $BF=4,19$  und  $FW=19,3$   $g/10$   $h$ ,  $BF=1,0$ . Ohne diese Datenpunkte würde die Gerade eine deutlich größere Steigung aufweisen, nämlich rund  $-0,10$   $10$   $h/g$ , und damit ähnlich wie die der RWDR aus FPM verlaufen. Eine derartige Abweichung der Gerade ist verfahrensbedingt bei einer einfachen linearen Regression nicht auszuschließen. Einzelne Datenpunkte haben durch einen größeren Abstand zu der Geraden eine erhebliche Hebelwirkung auf diese. Es wurde davon abgesehen einzelne Datenpunkte von der Bewertung auszuschließen. In den einzelnen Untersuchungen wurden die Ergebnisse bereits auf Plausibilität hin überprüft und gegebenenfalls durch Wiederholversuche abgesichert, siehe Kapitel 4.3 bis 4.6. An dieser Stelle werden sämtliche Ergebnisse aufgezeigt.

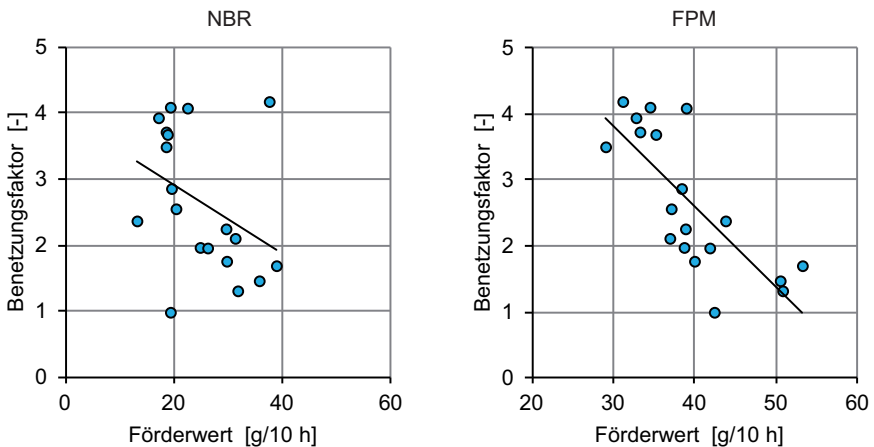


Abbildung 5.6: Darstellung der Korrelation zwischen Förderwert und Benetzungsfaktor, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

### 5.4.3 Korrelation zwischen Verschleiß und Benetzungsfaktor

In Abbildung 5.7 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Benetzungsfaktors über denen der Verschleißuntersuchungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Die Werte des Benetzungsfaktors entsprechen dem  $BF'_{(2h, 20^\circ C)}$ . Diese sind auf den metallischen Oberflächenproben ermittelt worden. Die in den beiden Diagrammen (NBR und FPM) aufgetragenen Werte des Benetzungsfaktors sind dieselben.

Zwischen der Verschleißbreite der RWDR, aus NBR beziehungsweise aus FPM, und dem Benetzungsfaktor, liegt jeweils eine gegenläufige Korrelation vor. Kleinere Verschleißbreiten wurden in Zusammenhang mit einem größeren Benetzungsfaktor festgestellt. Der größere Benetzungsfaktor steht für eine größere Migrationswilligkeit eines Fluids. Im Rahmen dieser Untersuchung zeigte sich letztlich, dass je migrationswilliger das Fluid ist, desto kleiner ist der gemessene Verschleiß an einem RWDR, wenn er mit diesem Fluid betrieben wurde. In Kapitel 5.3.1 wurde die Annahme formuliert, dass ein Fluid mit einer größeren Migrationswilligkeit in Zusammenhang steht mit einer größeren Fluidmenge im Dichtspalt. Bezogen auf das hier thematisierte Verschleißverhalten bestätigt sich das. Eine größere Fluidmenge im Dichtspalt steht in Verbindung mit geringerem Verschleiß.

Die Steigung der eingetragenen Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR beträgt rund  $-24,5$  1/mm. Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung rund  $-16,2$  1/mm. Die Datenpunkte in dem Diagramm mit den RWDR aus FPM liegen etwas weiter auseinander als die bei den RWDR aus NBR. Die genannte Steigung der Gerade ist somit mit einem Unsicherheitsfaktor behaftet. Die grundsätzliche Orientierung der Gerade ist hingegen unstrittig.

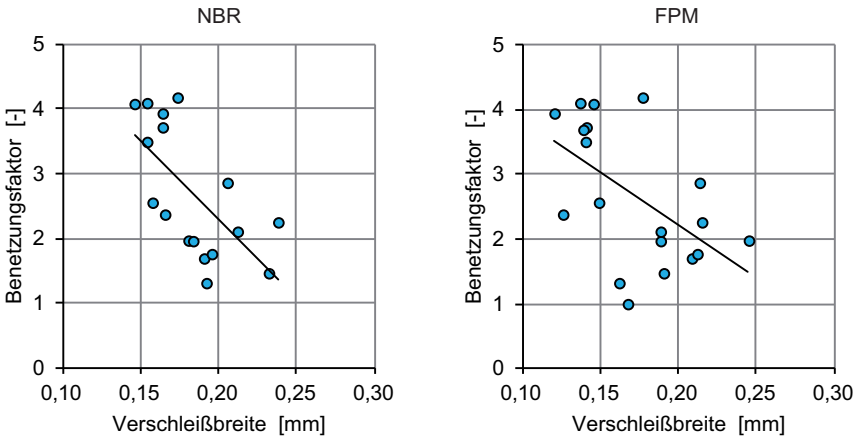


Abbildung 5.7: Darstellung der Korrelation zwischen Verschleißbreite und Benetzungsfaktor, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

#### 5.4.4 Korrelation zwischen Reibmoment und Kontaktwinkel

In Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Kontaktwinkels über denen der Reibmomentmessungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Die Werte der Kontaktwinkel sind entsprechend auf RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM ermittelt worden.

Es ist jeweils eine gleichläufige Korrelation zwischen dem Reibmoment, der Dichtsysteme mit RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM, und der Kontaktwinkel zu erkennen. Ein größerer Kontaktwinkel geht einher mit einem größeren Reibmoment. Ein größerer Kontaktwinkel bedeutet, dass das Fluid die Oberfläche des Elastomers weniger benetzt, also eine kleinere Migrationswilligkeit hat. Es wird qualitativ der Zusammenhang aufgezeigt das ein Fluid welches auf dem RWDR besser benetzt, also eine größere Migrationswilligkeit aufweist, im Dichtsystem ein kleineres Reibmoment hervorruft. Die in Kapitel 5.3.1 formulierten Annahme hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt findet Bestätigung. Ein Fluid, welches den RWDR besser benetzt, kann der Grund für eine größere Fluidmenge im Dichtspalt und damit für ein kleineres Reibmoment sein.

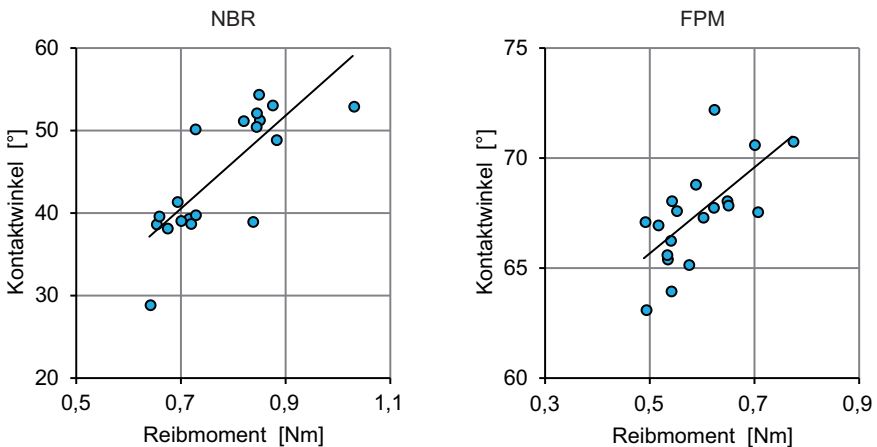


Abbildung 5.8: Darstellung der Korrelation zwischen Reibmoment und Kontaktwinkel, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

Die Steigung der eingetragenen Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR beträgt rund  $56 \text{ }^\circ/\text{Nm}$ . Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung rund  $20 \text{ }^\circ/\text{Nm}$ . Anhand der Steigungen kann formuliert werden, dass das Reibmoment bei RWDR aus FPM stärker von dem Kontaktwinkel des Fluids abhängt. Die Werte der Kon-

taktwinkel auf dem RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM liegen auf unterschiedlichen Niveaus. Die gemessenen Reibmomente für RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM liegen ebenfalls auf unterschiedlichen Niveaus. Entscheidend ist aber, dass die Orientierung der Geraden jeweils identisch ist.

#### **5.4.5 Korrelation zwischen Förderwert und Kontaktwinkel**

In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Kontaktwinkels über denen der Förderwertmessungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Die Werte der Kontaktwinkel sind entsprechend auf RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM ermittelt worden.

Der Förderwert und der Kontaktwinkel sind durch eine gleichläufige Korrelation verbunden. Im Rahmen dieser Untersuchungen geht ein Ansteigen der einen Eigenschaft immer einher mit dem Ansteigen der anderen. Ein kleinerer Kontaktwinkel steht für eine bessere Benetzung der Oberfläche des Elastomers und damit für eine größere Migrationswilligkeit des Fluids. Die Korrelation zeigt, dass eine größere Migrationswilligkeit zusammen mit einem kleineren Förderwert auftritt. Es erscheint schlüssig, dass eine größere Migrationswilligkeit eines Fluids ursächlich für eine größere Fluidmenge im Dichtspalt ist. Eine größere Fluidmenge im Dichtspalt steht in Zusammenhang mit einem kleineren Förderwert, weil der Förderwert die quantifizierbare Größe der hydrodynamischen Rückförderung ist, siehe Kapitel 2.2. Hierin bestätigt sich die in Kapitel 5.3.1 formulierte Annahme hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt.

Die Steigung der eingetragenen Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR beträgt rund  $0,35 \cdot 10 \text{ h/g}$ . Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung rund  $0,23 \cdot 10 \text{ h/g}$ . Die Werte der Kontaktwinkel auf den RWDR aus NBR liegen auf einem niedrigeren Niveau, als die auf RWDR aus FPM. Auch die Förderwerte der RWDR aus NBR liegen auf einem niedrigeren Niveau, als die von RWDR aus FPM. Für den Gesamtzusammenhang wichtig ist, dass die Steigungen der Geraden jeweils gleich, in diesem Fall positiv, sind. Weiterhin sind die Steigungen betragsmäßig relativ ähnlich.



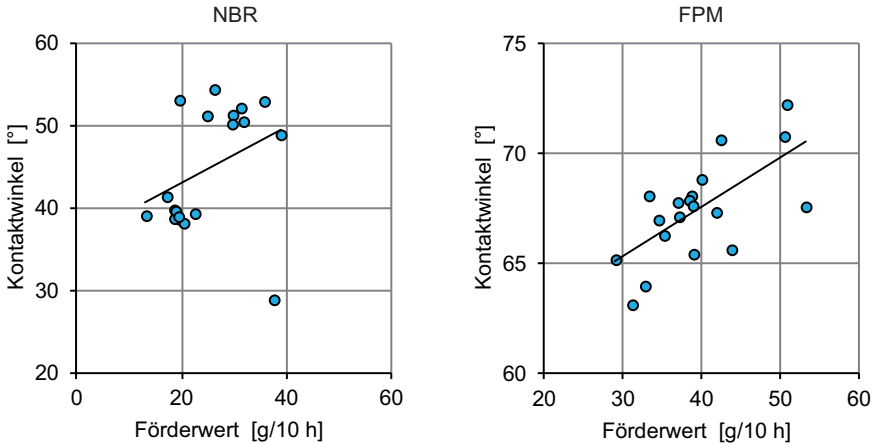


Abbildung 5.9: Darstellung der Korrelation zwischen Förderwert und Kontaktwinkel, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

#### 5.4.6 Korrelation zwischen Verschleiß und Kontaktwinkel

In Abbildung 5.10 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Kontaktwinkels über denen der Verschleißuntersuchungen, für Dichtsysteme mit RWDR aus NBR (links) und aus FPM (rechts), aufgetragen. Die Werte der Kontaktwinkel sind entsprechend auf RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM ermittelt worden.

Die Verschleißbreite und der Kontaktwinkel, jeweils hinsichtlich RWDR aus NBR und aus FPM, sind miteinander durch eine gleichläufige Korrelation verbunden. Für die durchgeführten Untersuchungen gilt, je größer der Kontaktwinkel ist, desto größer ist die Verschleißbreite. Ein kleinerer Kontaktwinkel wird an einem Fluid erfasst, welches die Oberfläche des Elastomers besser benetzt, also eine größere Migrationswilligkeit aufweist. Diese steht in Verbindung mit einer kleineren zu messenden Verschleißbreite. Auch hier zeigt sich eine Analogie zu der in Kapitel 5.3.1 formulierten Annahme hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt. Ein Fluid, welches besser benetzt, kann der Grund für eine größere Fluidmenge im Dichtspalt und damit für einen geringeren Verschleiß sein.

Die Steigung der eingetragenen Gerade bei den Dichtsystemen mit RWDR aus NBR beträgt rund 200 °/mm. Bei den Dichtsystemen mit RWDR aus FPM beträgt die Steigung rund 23 °/mm. Die Steigungen der beiden Geraden sind sehr unterschiedlich. Die Steigung

der Gerade, zugehörig zu den RWDR aus NBR, ist annähernd um den Faktor neun größer. Die grundsätzlich gleiche Orientierung der Gerade ist hingegen unstrittig.

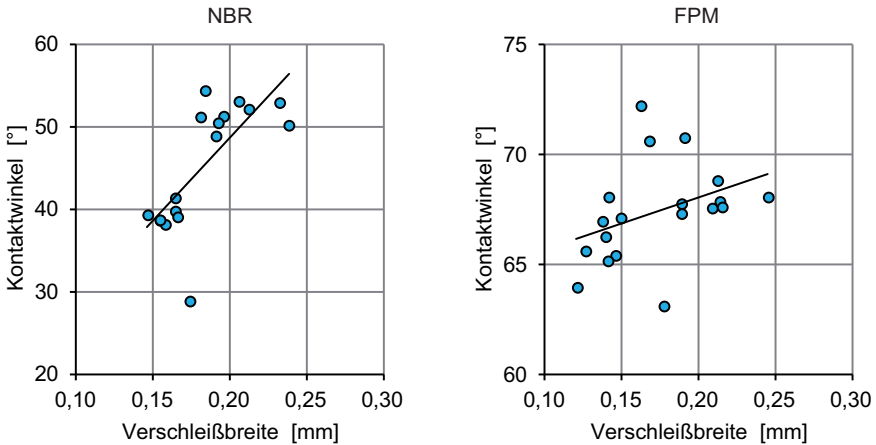


Abbildung 5.10: Darstellung der Korrelation zwischen Verschleißverhalten und Kontaktwinkel, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

### 5.4.7 Korrelation zwischen Benetzungsfaktor und Kontaktwinkel

In Abbildung 5.11 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Kontaktwinkels über denen der Bestimmung des Benetzungsfaktors aufgetragen. Die Werte der Kontaktwinkel wurden auf RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM ermittelt und repräsentieren die Migrationswilligkeit eines Fluids auf einem Elastomer. Die Werte des Benetzungsfaktors entsprechen dem  $BF_{(2h, 20^\circ C)}$ . Diese wurden auf den metallischen Oberflächenproben ermittelt und repräsentieren die Migrationswilligkeit eines Fluids auf der Gegenauflfläche.

Die Korrelation zwischen dem Benetzungsfaktor und den Kontaktwinkeln, ermittelt auf den RWDR aus NBR beziehungsweise aus FPM, ist gegenläufig. Je größer der Benetzungsfaktor ist, desto größer ist die Migrationswilligkeit eines Fluids auf der metallischen Oberflächenprobe. Je kleiner der Kontaktwinkel ist, desto größer ist die Migrationswilligkeit eines Fluids auf der Oberfläche des RWDR. Es wird qualitativ der Zusammenhang aufgezeigt, dass unterschiedliche Fluide auf charakteristisch unterschiedlichen Oberflächen eine ähnliche Migrationswilligkeit zeigen. Dieser Sachverhalt zeigt sich bei Paarungen aus

metallischer Oberflächenprobe und RWDR aus NBR, als auch bei Paarungen aus metallischer Oberflächenprobe und RWDR aus FPM.

Die Steigungen der Geraden sind gleich orientiert. Diese beträgt bei der Korrelation hinsichtlich NBR rund  $-4,5\text{ }^\circ/1$ . Bei der Korrelation hinsichtlich FPM beträgt die Steigung rund  $-1,7\text{ }^\circ/1$ .

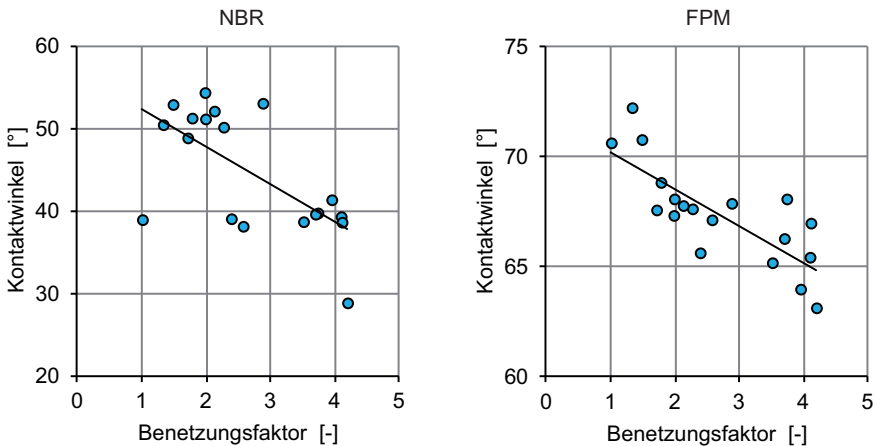


Abbildung 5.11: Darstellung der Korrelation zwischen Benetzungsfaktor und Kontaktwinkel, aufgeteilt nach den Werkstoffen der RWDR (links NBR, rechts FPM)

## 5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationen

Im Folgenden werden die Korrelationen zwischen einzelnen Eigenschaften, ein Gesamtzusammenhang zwischen den Eigenschaften und letztlich eine Annahme zur Erklärung des Gesamtzusammenhangs erörtert. Abschließend werden der Gültigkeitsbereich der Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten betrachtet.

### ***Korrelationen zwischen einzelnen Eigenschaften***

In den vorangegangenen Unterkapiteln wurden die Korrelationen zwischen einzelnen Eigenschaften aufgezeigt. Die Bewertung und Abbildung erfolgte jeweils getrennt für die unterschiedlichen Elastomere NBR und FPM. Die Ausprägung jeder Korrelation wurde in den Abbildungen für die beiden Elastomere durch jeweils eine Gerade aufgezeigt. Die Steigung

der Gerade ist positiv, wenn die Korrelation der Eigenschaften gleichläufig ist. Ist die Korrelation der Eigenschaften gegenläufig, so ist die Steigung der Gerade entsprechend negativ. Die Orientierung (positiv oder negativ) der Steigungen der Geraden zwischen zwei Eigenschaften, sind für die beiden Elastomere jeweils gleich. Dies gilt für sämtliche hier aufgezeigten Korrelationen. Die Korrelationen von zwei beliebigen Eigenschaften verhalten sich also immer bei beiden Elastomeren entweder gleich- oder gegenläufig zueinander.

Trotz gleicher Orientierung der Geraden ist die Größe der Steigung für die Elastomere teilweise deutlich verschieden. Dies ist maßgeblich dadurch begründet, dass die Ergebnisse, speziell für die Kontaktwinkelmessung, für die beiden Elastomere, einen unterschiedlich großen Wertebereich aufweisen. Die gemessenen Kontaktwinkel der Fluide auf den RWDR aus NBR liegen zwischen rund  $29^\circ$  und  $55^\circ$ . Damit ergibt sich ein Wertebereich von  $26^\circ$ . Die entsprechenden Werte liegen bei RWDR aus FPM zwischen rund  $63^\circ$  und  $72^\circ$ . Dies entspricht einem vergleichsweise kleinen Wertebereich von nur  $9^\circ$ . Die Kontaktwinkel der Fluide auf den RWDR aus NBR fallen deutlich breiter gefächert aus als die auf RWDR aus FPM.

Der Wertebereich der Ergebnisse der Betriebseigenschaften (Reibmoment, Förderwert, Verschleiß) ist für die beiden Elastomere jeweils ähnlich. Bei einer Korrelation des Kontaktwinkels mit einer Betriebseigenschaft ergeben sich zwangsläufig für die beiden Elastomere deutlich unterschiedliche Steigungen der Geraden. Die Korrelationen der Eigenschaften zeigen letztlich das gleiche Ergebnis. Deren Ausprägung, in Form der Steigung der Geraden, wird aber stark davon beeinflusst, wie breit gefächert beispielsweise die Kontaktwinkel auf den beiden Elastomeren ausfallen.

### ***Gesamtzusammenhang zwischen den Eigenschaften***

Es wurde erörtert, dass sich jeweils zwei beliebige Eigenschaften immer mit beiden Elastomeren entweder gleich oder gegensätzlich zueinander verhalten. Es ist zielführend, wenn im Folgenden die Korrelationen losgelöst von den unterschiedlichen Elastomeren allgemein betrachtet werden.

Es wurden sämtliche Zusammenhänge zwischen den insgesamt fünf Betriebs- und Benetzungseigenschaften untersucht, siehe Abbildung 5.12. Es müssen jeweils drei Eigenschaften abhängig voneinander sein. Bei Kenntnis von zwei Korrelationen zwischen drei Eigenschaften ergibt sich eine Zwangsbedingung für die dritte Korrelation. Wenn sich beispielsweise sowohl das Reibmoment und der Verschleiß als auch das Reibmoment und der Förderwert gleich zueinander verhalten (positive Steigung der Gerade), dann müssen sich auch der Verschleiß und der Förderwert gleich zueinander verhalten. Eine gegensätzliche Korrelation (negative Steigung der Gerade) zwischen dem Verschleiß und dem Förderwert würde hierbei einen Widerspruch aufwerfen und die Aussage der Ergebnisse aushebeln.

Die Zusammenhänge von sämtlichen aufgezeigten Korrelationen ergeben ein durchgängig schlüssiges Bild. Auch weil die Ergebnisse in einzelnen Untersuchungen ermittelt und bewertet wurden, ist dies ein Beleg für die Korrektheit der Korrelationen. Insgesamt ergeben sich zwei Gruppen. Die Eigenschaften Reibmoment, Förderwert, Verschleiß und Kontaktwinkel verhalten sich in jeglicher Korrelation zueinander gleichläufig (positive Steigung der Gerade). Diesen gegenüber steht der Benetzungsfaktor. Dieser verhält sich in jeglicher Korrelation zu einer der vier genannten Eigenschaften gegenläufig (negative Steigung der Gerade).

In Abbildung 5.13 ist die Korrelation zwischen den fünf Betriebs- und Benetzungseigenschaften aufgezeigt. Das Reibmoment, der Förderwert, der Verschleiß und der Kontaktwinkel verhalten sich immer gleichläufig zueinander. Die Zunahme einer Eigenschaft tritt gleichzeitig mit der Zunahme der anderen Eigenschaften auf. Diese Eigenschaften sind demzufolge auf einer Achse in dem Diagramm aufgetragen. Der Benetzungsfaktor verhält sich bezüglich der vier genannten Eigenschaften jeweils gegenläufig und wird auf der anderen Achse aufgetragen. Die dicke Linie zeigt qualitativ den Gesamtzusammenhang der im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigten Eigenschaften. Die Korrelationen der einzelnen Eigenschaften folgen nicht exakt dieser Gerade. Der Gesamtzusammenhang erschließt sich dennoch folgerichtig. Die Zunahme des Benetzungsfaktors geht einher mit einem Rückgang des Reibmoments, des Förderwerts, des Verschleiß und des Kontaktwinkels.

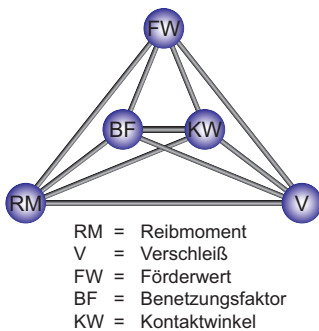


Abbildung 5.12: Zusammenhänge zwischen Betriebs- und Benetzungseigenschaften

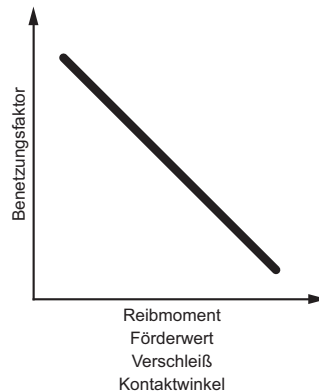


Abbildung 5.13: Korrelation der Betriebs- und Benetzungseigenschaften

### ***Annahme zur Erklärung des Gesamtzusammenhangs***

In den vorangegangenen Unterkapiteln wurde, im Zusammenhang mit den Korrelationen zwischen jeweils zwei Eigenschaften, eine Annahme hinsichtlich der Fluidmenge im Dichtspalt formuliert. Die Fluidmenge im Dichtspalt könnte sowohl eine Erklärung für die Korrelationen zwischen den Betriebseigenschaften, als auch zwischen diesen und den Benetzungseigenschaften liefern.

### ***Fluidfilmhöhe im Dichtsystem***

Die Fluidmenge im Dichtspalt geht einher mit der Fluidfilmhöhe zwischen Gegenauflfläche und Berührfläche des RWDR. Die Fluidfilmhöhe ist in axialer Richtung nicht konstant. Die durch den RWDR aufgebrachte, asymmetrisch verteilte, radiale Pressung beeinflusst die lokale Fluidfilmhöhe. Das luftseitige Ende des Fluidfilms bei Mangelschmierung ausgenommen, liegt die minimale Fluidfilmhöhe an der Stelle der maximalen radialen Pressung des RWDR /41/, /46/. Diese exakte axiale Ausbildung des Fluidfilms ist für die folgenden Betrachtungen nicht relevant. Grundsätzlich weisen alle RWDR die asymmetrisch verteilte radiale Pressung auf. Demzufolge bildet sich bei allen Dichtsystemen dieser charakteristisch verteilte Fluidfilm aus. Für die weitere Betrachtung ist es zielführend, die mittlere Fluidfilmhöhe  $h$ , nachfolgend nur als Fluidfilmhöhe bezeichnet, als bewertbare Größe heranzuziehen.

Der sich hydrodynamisch ausbildende Fluidfilm beziehungsweise die mittlere Fluidfilmhöhe werden durch die Betriebsbedingungen des Dichtsystems beeinflusst. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Gegenauflfläche und Berührfläche des RWDR und die Temperatur, und damit die Viskosität des Fluids, sind maßgebliche Einflussfaktoren Gl. (2-6), /1/, /41/. Im Rahmen dieser Arbeit wurden innerhalb jeder einzelnen Untersuchung mit unterschiedlicher Zielsetzung, die Betriebsbedingungen gleich gewählt. Unterschiedliche Fluidfilmhöhen können demzufolge auf die Eigenschaften der unterschiedlichen Fluide zurückgeführt werden. Deren Benetzungseigenschaften wurden durch den Kontaktwinkel und den Benetzungsfaktor erfasst.

Die Messung der Fluidfilmhöhe im dynamischen Betrieb ist nur unter erheblichen Einschränkungen möglich und die Ergebnisse sind entsprechend unsicher. Die Ergebnisse sind für einzelne Fallbetrachtungen zielführend. Eine allgemein gültige Aussage darf in Frage gestellt werden, siehe Kapitel 2.3. Auf Grundlage dieser Messungen und auch davon unabhängig wurden weiterführende Betrachtungen angestellt. Der Zusammenhang zwischen dem Reibmoment und der mittleren Fluidfilmhöhe wurde erörtert. Trotz teilweise im Detail unterschiedlicher Modelvorstellungen (Newtonsche Fluidreibung /41/ beziehungsweise Dünnschichtreibung /42/) wird jeweils auf den gleichen Zusammenhang geschlossen. Im Bereich der anwendungsrelevanten Fluidfilmhöhe geht eine Zunahme dieser einher mit einem Rückgang des Reibmoments.

### *Fluidfilmhöhe und Förderwert*

Der axialen Ausbreitung des Fluids von der Öl- zur Luftseite wirkt im dynamischen Betrieb der Förderwert entgegen. Je geringer der Förderwert ist, desto mehr Fluid gelangt in den Dichtspalt. Der Extremfall ist ein Förderwert der so gering ist, dass Fluid austritt. Die Analogie zwischen der Menge an Fluid im Dichtspalt und der Fluidfilmhöhe wurde bereits aufgegriffen. Daraus folgt, dass je größer der Förderwert ist, desto kleiner ist die Fluidfilmhöhe.

Einzelne Untersuchungen bringen einen großen Förderwert in Verbindung mit einer großen Fluidfilmhöhe /41/. Hierbei wird aber der Förder- und nicht der Abdichtbetrieb betrachtet. Dabei liegt das Fluidniveau auf der Luftseite des RWDR an. Fluid welches ständig nachfließen kann wird aktiv durch den Dichtspalt gefördert. Im regulären Abdichtbetrieb ist dies nicht der Fall. Es gibt kein nachfließendes Fluid. Es herrscht ein Gleichgewichtszustand zwischen der Rückförderung und dem Bestreben des Fluids, luftseitig den Dichtspalt zu verlassen.

### *Fluidfilmhöhe und Verschleiß*

Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Verschleiß an einem RWDR und der Fluidfilmhöhe. Wenn der Fluidfilm unter der Dichtkante unzureichend ausgebildet ist, dann liegt Mischreibung vor. Es kommt zum Kontakt zwischen den Rauheitserhebungen der Gegenauflfläche und der Berührfläche des RWDR. Abrasiver Verschleiß ist die Folge. Wenn der Fluidfilm vollständig ausgebildet ist, kommen die Rauheitserhebungen der Gegenauflfläche und die Berührfläche des RWDR idealerweise nicht oder zumindest kaum in Kontakt. Es liegt Flüssigkeitsreibung vor und es gibt keinen abrasiven Verschleiß /1/. Dies ist die Grundlage dafür, dass mit zunehmender Fluidfilmhöhe weniger Verschleiß auftritt.

### *Migrationswilligkeit beschrieben durch Kontaktwinkel und Benetzungsfaktor*

Der Kontaktwinkel und der Benetzungsfaktor sind die in dieser Arbeit untersuchten Benetzungseigenschaften. Beide beschreiben die Migrationswilligkeit eines Fluids auf einer Festkörperoberfläche. Der Kontaktwinkel wurde mit sämtlichen Fluiden auf der Oberfläche der RWDR aus NBR und aus FPM bestimmt. Daraus wird die Migrationswilligkeit der Fluide auf den Elastomeren beschrieben. Der Benetzungsfaktor wurde mit sämtlichen Fluiden auf metallischen Oberflächenproben bestimmt. Dadurch wird die Migrationswilligkeit der Fluide auf der Gegenauflfläche abgeleitet. Für die Betrachtung des Benetzungsverhaltens zwischen jeweils zwei der drei Komponenten des Dichtsystems Radialwellendichtung ist damit eine Eigenschaft benannt. Das Benetzungsverhalten zwischen dem abzudichtenden Fluid und dem RWDR wird durch den Kontaktwinkel beschrieben. Das Benetzungsverhalten zwischen dem abzudichtenden Fluid und der Gegenauflfläche wird durch den Benetzungsfaktor beschrieben.

Die Migrationswilligkeit der Fluide ist auf den drei unterschiedlichen Werkstoffen ähnlich. Die Bewertung erfolgt jeweils vergleichend zwischen den untersuchten Fluiden. Ein Fluid, welches eine große Migrationswilligkeit auf dem RWDR aus NBR zeigt, zeigt dieses Verhalten auch auf dem RWDR aus FPM und auf der metallischen Oberflächenprobe, siehe Abbildung 5.11.

### *Annahme zum Zusammenhang zwischen Migrationswilligkeit und Förderwert*

Es wurden sämtliche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Betriebseigenschaften und der Fluidfilmhöhe aufgezeigt. Je kleiner die Fluidfilmhöhe ist, desto größer sind das Reibmoment, der Förderwert im Förderbetrieb und der Verschleiß. Das Reibmoment und der Verschleiß werden durch die Fluidfilmhöhe bestimmt. Der Förderwert hingegen hat einen direkten Einfluss auf die Fluidfilmhöhe. Im dynamischen Betrieb wirkt der Förderwert dem Bestreben des Fluids entgegen, sich axial von der Öl- zur Luftseite auszudehnen. Es stellt sich die Frage, welche Eigenschaft das Bestreben des Fluids, sich axial auszudehnen, beschreibt. In dieses Gesamtbild fügt sich die Migrationswilligkeit des Fluids ein. An dieser Stelle wird auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen und der aufgezeigten weiterführenden Überlegungen die Annahme formuliert:

**Die Migrationswilligkeit des Fluids beschreibt das Bestreben nach der axialen Ausbreitung. Dies bedeutet, dass die Migrationswilligkeit sinnbildlich der Gegenspieler des Förderwerts ist.**

Durch konsequente Weiterüberlegung folgt, dass die Fluidfilmhöhe im Dichtspalt maßgeblich durch die Migrationswilligkeit des Fluids mitbestimmt wird. Die Fluidfilmhöhe wirkt sich, wie aufgezeigt, auf die Betriebsbedingungen aus. Das Reibmoment und der Verschleiß sind damit das Produkt aus dem Wechselspiel zwischen Benetzung (Migrationswilligkeit) und Rückförderung. Auf Grundlage dieser Annahme ist das Benetzungsverhalten des Fluids auf dem RWDR und der Gegenlauffläche, ein zentraler Einflussfaktor für die Funktion eines Dichtsystems. Grafisch dargestellt ist diese zentrale Annahme in Abbildung 5.14. Die, auf Untersuchungen gestützten Ergebnisse, werden hier durch die formulierte Annahme ergänzt.



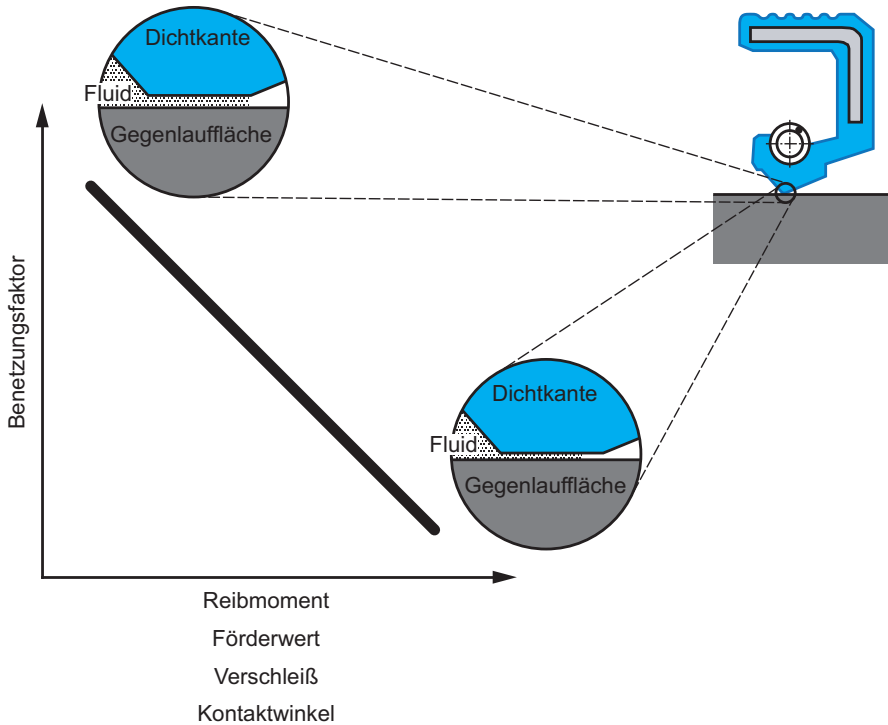


Abbildung 5.14: Korrelation der einzelnen Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Hinblick auf die Schmierfilmhöhe

### **Gültigkeitsbereich der Ergebnisse**

Bei sämtlichen aufgezeigten Ergebnissen, deren Korrelationen und der abschließenden Annahme ist zu beachten, auf welchen Untersuchungen diese beruhen. Es wurden jeweils Dichtsysteme mit einem Systemdurchmesser von 80 mm verwendet. Die RWDR waren aus NBR oder FPM und wurden von einem Hersteller bezogen. Die Oberflächenbeschaffenheit der Gegenlaufflächen war jeweils vergleichbar und alle Gegenlaufflächen wurden mit dem gleichen Fertigungsverfahren hergestellt. Die Fluide basieren auf den zwei synthetischen Grundölen PAO und PG. Im Vergleich zu gebrauchsfertigen Schmierölen ist der Anteil des Additivs gering. Die dynamischen Untersuchungen wurden hinsichtlich der Ölsumpftemperatur und der Relativgeschwindigkeit im Dichtspalt, bei einem Betriebspunkt durchgeführt. Die Ölsumpftemperatur und die Relativgeschwindigkeit haben einen Einfluss auf die Vis-

kosität des abzudichtenden Fluids und damit auf den Aufbau des Fluidfilms beziehungsweise die Fluidfilmhöhe unter der Dichtkante.

Die gleichbleibenden Versuchsbedingungen und die enge Auswahl der Komponenten des Dichtsystems wurden gezielt festgelegt, um aus den Untersuchungen vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Nur durch diesen abgesteckten Rahmen ist es möglich die Korrelationen der unterschiedlichen Eigenschaften sicher aufzuzeigen. Gleichzeitig ist dieser Rahmen der nachgewiesene Gültigkeitsbereich der aufgezeigten Ergebnisse.

Eine gewisse Sinnfälligkeit deutet darauf hin, dass die aufgezeigten Ergebnisse auch für andere Systemdurchmesser oder Betriebspunkte Gültigkeit haben. Ein expliziter Nachweis wurde aber nicht erbracht. Um den Gültigkeitsbereich zu erweitern müsste der Umfang der Untersuchungen um ein Vielfaches erweitert werden. Dies war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Auch eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf abweichende Komponenten des Dichtsystems wäre gegebenenfalls durch weiterführende Untersuchungen zu überprüfen. Bisher bleiben beispielsweise andersartig gefertigte Gegenauflflächen, Fluide die auf anderen Grundölen basieren oder RWDR welche aus anderen Elastomeren hergestellt sind, außen vor. Dies ist bei der Übertragbarkeit der aufgezeigten Ergebnisse über den Rahmen dieser Untersuchungen hinaus immer zwingend zu beachten.

### ***Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse***

Die aufgezeigten Zusammenhänge zwischen Betriebs- und Benetzungseigenschaften ermöglichen ein besseres Systemverständnis des Dichtsystems Radial-Wellendichtring. Ein besseres Systemverständnis hilft, Dichtsysteme zu optimieren oder Ausfälle gezielt zu analysieren und zukünftig zu vermeiden. Der Vorteil der Bestimmung der Benetzungseigenschaften liegt auch darin, dass hierzu im Vergleich zu der Bestimmung der Betriebseigenschaften im Regelfall ein viel geringerer Aufwand nötig ist. Kosten- und zeitaufwändige Prüfläufe zur Bestimmung der Betriebseigenschaften können durch verhältnismäßig schnelle Messungen der Benetzungseigenschaften ergänzt oder gar ganz ersetzt werden.

Wenn beispielsweise ein RWDR einen sehr hohen Verschleiß aufweist und dieser nicht durch die Laufzeit, die Beschaffenheit der Gegenauflfläche oder andere mögliche Fehlerquellen zu begründen ist, dann können die Benetzungseigenschaften Aufschluss über den im zurückliegenden Betrieb vorherrschenden Schmierzustand geben. Sollte das Fluid auf der Gegenauflfläche einen Benetzungsfaktor nahe eins aufweisen, so wäre naheliegend, dass sich nur eine ungenügender Schmierfilm im Betrieb ausgebildet hat. Dies wäre die Begründung für den hohen Verschleiß. Unabhängig von der Additivierung war dies bei den auf unterschiedlichen Grundölen basierenden Fluiden zu beobachten. Die RWDR, welche mit Fluiden basierend auf PG untersucht wurden, haben einen rund 34 % höheren durchschnittlichen Verschleiß als jene, welche mit Fluiden basierend auf PAO untersucht wurden (PG Ø 203 µm, PAO Ø 152 µm). Der Benetzungsfaktor der auf PG basierenden Fluide ist in diesem Fall dementsprechend durchschnittlich rund 42 % geringer (PG Ø 1,9,

---

PAO Ø 3,3). Diese Werte entsprechen dem in Kapitel 5.4 verwendeten Benetzungsfaktor  $BF_{(2h, 20^\circ C)}$ , ermittelt auf einer mit Benzin gereinigten metallischen Oberflächenprobe.

Bei der Schmierstoffauswahl für ein Produkt, beispielsweise ein Getriebe, ist es zielführend das Benetzungsverhalten der Schmierstoffe zu bestimmen. Ausgehend von einem nachweislich funktionierenden Dichtsystem, können die Benetzungseigenschaften der zur Auswahl stehenden Schmierstoffe, auf dem RWDR und der Gegenlauffläche, vergleichend untersucht werden. Diese vergleichende Bewertung der Benetzungseigenschaften ist nicht zwingend ein Ersatz für einen Prüflauf unter realen Bedingungen. Auf Grundlage der Benetzungseigenschaften kann aber zumindest eine Vorauswahl der Schmierstoffe und dann eine Priorisierung der Prüfläufe erfolgen. Möglicherweise kann aber auch ein Prüflauf mit einem Schmierstoff, aufgrund stark abweichender, ungünstiger Benetzungseigenschaften, eingespart werden.

Nicht nur die Auswahl der Schmierstoffe unterliegt der fortwährenden Optimierung der Hersteller. Auch die Gegenlauffläche soll oft gezielt verändert werden. Diese Bestrebungen sind oftmals von dem Wunsch nach der Reduktion der Fertigungskosten und/oder der Reibungsverluste getrieben. An dieser Stelle ist es nun möglich, die Eignung von Gegenlaufflächen auf Grundlage von vergleichenden Benetzungsmessungen zu bewerten. Der Benetzungsfaktor, welcher mit jeweils dem gleichen Fluid auf den unterschiedlichen Gegenlaufflächen bestimmt wird, ist hierfür aussagekräftig. Es ist beispielsweise davon auszugehen, dass mit einer Gegenlauffläche auf der mit dem Fluid ein vergleichsweise geringer Benetzungsfaktor erzielt wird, ein vergleichsweise hohes Reibmoment im Betrieb mit diesem Fluid zu erwarten ist. Dadurch sind vergleichende Bewertungen von Gegenlaufflächen auf einfache und schnelle Art und Weise möglich.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Dichtsystem Radialwellendichtung umfasst drei Komponenten: Gegenlauffläche, Radial-Wellendichtring und abdichtendes Fluid. Die Gegenlauffläche muss gewissen Vorgaben entsprechen, um für einen funktionssicheren Betrieb des Dichtsystems geeignet zu sein. Die Geometrie der Radial-Wellendichtringe hat sich seit Jahrzehnten nicht grundlegend geändert. Der Fortschritt vollzieht sich gegebenenfalls auf Seiten der Werkstoffentwicklung. Die Elastomere werden beispielsweise hinsichtlich ihrer chemischen und thermischen Beständigkeit leistungsfähiger. Auf dem Gebiet der Schmieröle, welche im Regelfall das abdichtende Fluid im Dichtsystem sind, ist in der jüngeren Vergangenheit die Entwicklung rasant /5/. Die Hauptaufgabe dieser Fluide ist es, eine ausreichende Schmierung von Metall-Metall-Reibpaarungen, wie beispielsweise in Wälzlagern oder in Verzahnungsstufen zu gewährleisten. Die Leistungsfähigkeit der Fluide wird durch den Einsatz von synthetischen Grundölen und gezielt durch die Zugabe von speziellen Additiven gesteigert /6/, /7/. Wie diese neuartigen Fluide die Funktionalität der Dichtsysteme beeinflussen ist bisher unklar.

Abgeleitet von der beschriebenen Ausgangssituation ergab sich die Zielsetzung für die vorliegende Arbeit. In einem ersten Schritt wurde geklärt, wie sich synthetische, additivierete Fluide auf die Betriebs- und Benetzungseigenschaften des Dichtsystems Radial-Wellendichtung auswirken. Die Betriebseigenschaften sind hierbei das Reibmoment, der Förderwert und der Verschleiß. Die Benetzungseigenschaften wurden durch den Kontaktwinkel und den Benetzungsfaktor erfasst. Die Kontaktwinkel der Fluide wurden auf den Elastomeroberflächen der Radial-Wellendichtringe ermittelt. Der Benetzungsfaktor der Fluide wurde auf metallischen Oberflächenproben ermittelt. Durch diese zweigeteilte Vorgehensweise wurde die Migrationswilligkeit der Fluide auf den beiden, im Dichtsystem vorhandenen Werkstoffoberflächen bestimmt. Der zweite Schritt war die Klärung der Zusammenhänge zwischen den insgesamt fünf genannten Eigenschaften.

Es wurden acht Fluide auf Basis von Polyglycol und neun auf Basis von Polyalphaolefin eingesetzt. Untereinander unterscheiden sich die Fluide je Grundölart dadurch, dass diesen jeweils ein anderes einzelnes Additiv hinzugefügt ist. Weiterhin wurden in allen Untersuchungen die nicht additivierten Grundöle berücksichtigt. Insgesamt wurden 19 Fluide verwendet: 17 Grundöl-Einzeladditiv-Mischungen und zwei nicht additivierete Grundöle. Die Fluide für diese Untersuchungen wurden eigens hergestellt und entsprechen keiner anwendungsfertigen Formulierung. Alle Untersuchungen wurden mit Radial-Wellendichtringen

aus dem Standardlieferprogramm eines Herstellers durchgeführt. Als Gegenauflflächen wurden durchgängig im Einstich geschliffene Nadellagerinnenringe verwendet.

Die Ermittlung der Betriebs- und Benetzungseigenschaften ist in jeweils eigenständigen Untersuchungen durchgeführt worden. Der Benetzungsfaktor bezieht sich auf die Wechselwirkung zwischen dem Fluid und einer metallischen Oberfläche. Alle anderen Untersuchungen wurden getrennt voneinander mit Radial-Wellendichtringen aus NBR und aus FPM durchgeführt.

Der Benetzungsfaktor ist eine Eigenschaft, welche eingeführt wurde, um die Migrationswilligkeit eines Fluids auf einer metallischen Oberflächenprobe zu beschreiben. Es bietet sich der Vorteil, die Verweildauer des Fluids in der Größenordnung von mehreren Stunden zu wählen. Der gravitationsbedingte Einfluss auf die Ausbreitung eines Fluids wird dadurch deutlich reduziert und die fluidspezifischen Benetzungseigenschaften kommen besser zum Tragen. Die Einlagerungstemperatur kann ebenfalls variiert werden und es ist nicht notwendig die Messung auf der gekrümmten Oberfläche einer Gegenauflfläche durchzuführen. Der Benetzungsfaktor beschreibt somit die Veränderung der durch ein Fluid benetzten Fläche, nach einer definierten Verweildauer und Einlagerungstemperatur. Eine Steigerung der Verweildauer oder der Einlagerungstemperatur bewirkt tendenziell eine Erhöhung des Benetzungsfaktors. Der Reinigungszustand vor der Bestimmung des Benetzungsfaktors beeinflusst diesen. Oberflächen, welche zusätzlich mit einem Oberflächenreinigungsgerät (Plasmatechnik) gereinigt wurden, werden besser benetzt.

Ein Einfluss des Fluids ist in sämtlichen Untersuchungen festzustellen. Es wirkt sich die Art des Grundöls und das einzelne gelöste Additiv auf das Ergebnis aus. Dichtsysteme mit Fluiden auf Basis von Polyglycol zeigen tendenziell ein größeres Reibmoment, einen größeren Förderwert und einen größeren Verschleiß der Radial-Wellendichtringe. Fluide auf Basis von Polyglycol zeigen eine kleinere Migrationswilligkeit als jene auf Basis von Polyalphaolefin. Dies dokumentieren die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich des Benetzungsfaktors und des Kontaktwinkels. Lediglich auf den Radial-Wellendichtringen aus FPM ist diese Tendenz nicht ganz eindeutig nachvollziehbar.

Grundsätzlich wurde in den Untersuchungen festgestellt, dass die Ergebnisse mit Fluiden in welchen ein Additiv gelöst ist, sich von denen mit dem reinen Grundöl unterscheiden. Additive beeinflussen also das Funktionsverhalten des Dichtsystems. Weiterhin haben einzelne Additive einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Untersuchungen. Dieser zeigt sich unabhängig davon, in welchem Grundöl die Additive gelöst sind. Auch ist der Einfluss unabhängig davon, aus welchem Werkstoff die Radial-Wellendichtringe gefertigt sind. Das Additiv Aminphosphat führt stets zu den größten gemessenen Reibmomenten. Dieses Additiv zeigt unabhängig von der Verweildauer und der Einlagerungstemperatur auch immer den kleinsten Benetzungsfaktor. Hinsichtlich des Kontaktwinkels hebt sich das Additiv Ca-Sulfonat dadurch hervor, dass mit Fluiden, in welchen es gelöst ist immer die kleinsten Werte gemessen werden.

Die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen fallen für die Radial-Wellendichtringe aus den beiden Werkstoffen unterschiedlich aus. Maßgeblichen Anteil daran hat die anwendungsbedingt vorgegebene, unterschiedliche Radialkraft der Radial-Wellendichtringe aus NBR und aus FPM. Durch einzelne Untersuchungen mit einer veränderten Radialkraft der Radial-Wellendichtringe wird darauf geschlossen, dass die tribologischen Unterschiede der Elastomere untergeordnet sind. Unabhängig vom Fluid wurde festgestellt, dass die Radialkraft der Radial-Wellendichtringe aus NBR in den dynamischen Untersuchungen deutlich zunimmt, während sie bei jenen aus FPM leicht abnimmt.

Die Zusammenhänge zwischen den fünf genannten Betriebs- und Benetzungseigenschaften wurden jeweils getrennt für die beiden Werkstoffe der Radial-Wellendichtringe bewertet. Die Korrelation von jeweils zwei Eigenschaften wurde durch eine Gerade abgebildet. Verhalten sich die zwei Eigenschaften gegensätzlich zueinander, hat die Gerade eine negative Steigung. Dies ist beispielsweise der Fall, bei einer Zunahme des Reibmoments, welches mit einer Abnahme des Benetzungsfaktors in Verbindung steht. Verhalten sich die Eigenschaften gleich zueinander, hat die Gerade eine positive Steigung. Bei jeglichen Kombinationen von zwei Eigenschaften ist die Orientierung der Geraden für Ergebnisse mit Radial-Wellendichtringen aus NBR und aus FPM gleich. Die grundsätzlichen Zusammenhänge innerhalb eines Dichtsystems sind damit unabhängig vom Werkstoff des Radial-Wellendichtrings.

Unter Betrachtung von jeweils drei beliebigen Eigenschaften und durch Kenntnis von zwei Korrelationen zwischen diesen, ergibt sich eine Zwangsbedingung für die noch unbekannte dritte Korrelation. Durch diese Verknüpfungen sind die Eigenschaften nicht unabhängig voneinander. Alle aufgezeigten Korrelationen zwischen den Eigenschaften ergeben ein schlüssiges Gesamtbild, ohne jeden Widerspruch. Die Eigenschaften Reibmoment, Förderwert, Verschleiß und Kontaktwinkel verhalten sich alle gleich. Die Zunahme einer Eigenschaft geht einher mit der Zunahme der anderen. Jeweils gegensätzlich zu diesen vier Eigenschaften, verhält sich der Benetzungsfaktor. Damit verhält sich dessen Wert auch gegensätzlich zu dem des Kontaktwinkels. Diese Werte repräsentieren die Migrationswilligkeit eines Fluids auf einer metallischen Oberfläche beziehungsweise auf der Oberfläche aus Elastomer. Dass sich die Werte der Eigenschaften gegensätzlich verhalten, beschreibt ein gleiches Verhalten der Migrationswilligkeit der Fluide auf unterschiedlichen Oberflächen. Insgesamt wird eine Zunahme der Migrationswilligkeit eines Fluids in Verbindung gebracht, mit einer Abnahme des Reibmoments, des Förderwerts und des Verschleißes.

Auf Grundlage der Untersuchungen wird die Annahme formuliert, dass in diesen Untersuchungen die Migrationswilligkeit der Fluide einen maßgeblichen Einfluss auf die Fluidfilmhöhe im Dichtkontakt hat. Die Migrationswilligkeit eines Fluids beschreibt dessen Bestreben sich auszubreiten. Dies tritt im Dichtspalt in axialer Richtung von der Öl- zur Luftseite auf. Somit steht die Migrationswilligkeit im Wechselspiel mit dem Förderwert. Das Reibmoment und der Verschleiß werden durch die Fluidfilmhöhe bestimmt und sind

---

damit das Ergebnis aus genanntem Wechselspiel und ebenfalls von der Migrationswilligkeit des Fluids abhängig.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen ein schlüssiges Gesamtbild. Eine Erweiterung dessen auf andere Fluide wäre ein nächster Schritt. Fluide mit einer höheren Konzentration einzelner Additive könnten die Bandbreite der Ergebnisse weiter auffächern. Mineralische Fluide ohne Additive und anwendungsfertige Schmieröle könnten Bestandteil anschließender Untersuchungen sein. Insgesamt sollte das Ziel verfolgt werden auf Grundlage der Benetzungseigenschaften eines Fluids auf die Betriebseigenschaften des Dichtsystems zu schließen. Dabei sollte nicht nur der Schmierstoff selbst im Fokus stehen. Es ist auch denkbar die Eignung von andersartig gefertigten oder beschichteten Gegenaufläichen zu bewerten. Wenn beispielsweise der Benetzungsfaktor eines Fluids auf einer im Einstich geschliffenen Standardwelle bekannt ist, so könnte vergleichend dazu, der Benetzungsfaktor dieses Fluids auf der andersartigen Gegenaufläiche untersucht werden. Abstrahierte tribologische Betrachtungen könnten weiterhin zu einem Kenntnisgewinn, hinsichtlich einzelner Komponenten, führen.

## 7 Literaturverzeichnis

- /1/ **Müller, H. K.; Haas, W.:** *Dichtungstechnik*. Vorlesungsumdruck, 6. Auflage, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2009.
- /2/ **Alexander, H.:** *Innovatives Tirol: Techniker, Erfinder, Unternehmer*. Medien- & Verlagsbüro A. Kronic, Innsbruck, 2007.
- /3/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN 3760: Radial-Wellendichtringe*. Beuth Verlag, Berlin, September 1996.
- /4/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN 6503: Radialdichtringe für Wellen mit Gummi-Manschette*. Beuth Verlag, Berlin, Mai 1950.
- /5/ **Wallfarth, B.:** *Trends in Entwicklung und Verfügbarkeit von Grundölen für Schmierstoffe*. Tagungsmanuskript, Getlub - Tribologie- und Schmierstoffkongress, Würzburg, März 2012.
- /6/ **Reid-Peters, S.:** *Höhere Energieeffizienz durch Einsatz von synthetischen Grundölen*. Tagungsmanuskript, UNITI Mineralöltechnologie-Forum, Stuttgart, 20.+21. März 2012.
- /7/ **Maelger, H.; Pillard, D.; Jemi-Alade, A.; Iyer, R.; Culley, S.:** *Zukunftssichere Additive für Getriebe-Schmierstoffe*. Tagungsmanuskript, Getlub - Tribologie- und Schmierstoffkongress, Würzburg, März 2012.
- /8/ **Müller, H. K.; Nau, B. S.:** *Fluid Sealing Technology - Principles and Applications*. Verlag Marcel Dekker Inc., New York, 1998.
- /9/ **Rudnick, L. R.; Heinemann, H.; Speig, J. G.:** *Lubricant Additives, Second Edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2009.
- /10/ **Schulz, J.; Holweger, W.:** *Wechselwirkung von Additiven auf Metalloberflächen*. Expert Verlag, Renningen, 2010.
- /11/ **Kunstfeld, T.; Haas, W.:** *Dichtungsumfeld - Einfluss des bespritzungs- und luftseitigen Umfelds auf die Dichtwirkung von Radial-Wellendichtringen*. Abschlussbericht, Forschungskuratorium Maschinenbau e. V., Vorhaben Nr. 236, Heft Nr. 261, Frankfurt am Main, 2001.



- 
- /12/ **Freudenberg Simrit GmbH & Co. KG:** *Technisches Handbuch*. Weinheim, 2007.
- /13/ **Trelleborg Sealing Solutions Germany GmbH:** *Produktkatalog Rotationsdichtungen*. Stuttgart, Februar 2011.
- /14/ **Dichtomatik Vertriebsgesellschaft für Technische Dichtungen mbH:** *Produktkatalog Radial-Wellendichtungen*. Hamburg, 2012.
- /15/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN 3761 Teil 2: Radial-Wellendichringe für Kraftfahrzeuge; Anwendungshinweise*. Beuth Verlag, Berlin, November 1983.
- /16/ **Schmitt, W.:** *Kunststoffe und Elastomere in der Dichtungstechnik*. W. Kohlhammer Druckerei GmbH + Co., Stuttgart, 1987.
- /17/ **Baitinger, G.:** *Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenauflflächen*. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2011.
- /18/ **Kunstfeld, T.:** *Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen*. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2005.
- /19/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN 51517: Schmierstoffe - Schmieröle*. Beuth Verlag, Berlin, Juni 2009.
- /20/ **Mobil Schmierstoff GmbH:** *Mobil Industrie Report - Synthetische Schmierstoffe*. Hamburg, 1999.
- /21/ **Deutsche BP Aktiengesellschaft:** *Schmierstoffe*. Hamburg, März 2008.
- /22/ **Mang, T.; Dresel, W.:** *Lubricants and Lubrication*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2001.
- /23/ **Chevron Cooperation Inc.:** *Modern Base Oils & Blending for Optimal Performance*. LUBE - The European Lubricants Industry Magazine, Seite 20-25, Februar 2012.
- /24/ **Rehbein, W.:** *Basisflüssigkeiten für Schmierstoffe*. Firmenschrift: OEL-HELD GmbH, Stuttgart, 2012.
- /25/ **Bartz, W.:** *Einführung in die Tribologie und Schmierungstechnik*. Expert Verlag, Renningen, 2010.
- /26/ **Lok, B.:** *Impacts And Utilisation Of Modern Hydroprocessed Base Stocks*. Tagungsmanuskript, UNITI Mineralöltechnologie-Forum, Stuttgart, 20.+21. März 2012.

- /27/ **Schütz, W.:** *Mineralölalphabet kompakt*. Technischer Dienst UNITI, Hamburg, 2007.
- /28/ **Bartz, W.:** *Additive für Schmierstoffe*. Seminarunterlagen Technische Akademie Esslingen, Ostfildern-Nellingen, 2005.
- /29/ **Totten, G.:** *Fuels and Lubricants Handbook*. ASTM International, West Conshohocken, 2003.
- /30/ **Herrmann, W.; Seffler, H. W.:** *Neue Erkenntnis für den Abdichtmechanismus von Radialwellendichtringen*. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 87, Band 9, Seite 475-484, 1985.
- /31/ **Kawahara, Y.; Hirabayashi, H.:** *A Study of Sealing Phenomena on Oil Seals*. ASLE Transactions, Vol. 22-1, Seite 46-55, 1979.
- /32/ **Raab, H.; Haas, W.:** *Einfluss der Wellenlauffläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen*. Abschlussbericht, Forschungskuratorium Maschinenbau e. V., Vorhaben Nr. 211, Heft Nr. 239, Frankfurt am Main, 1998.
- /33/ **Kammüller, M.:** *Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen*. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1986.
- /34/ **Müller, H. K.:** *Concepts of Sealing Mechanism of Rubber Lip Type Rotary Shaft Seals*. Tagungsmanuskript, 11th International Conference on Fluid Sealing - BHRA, Paper K1, Seite 698-709, Bedford, 1987.
- /35/ **Brink, R. V.; Horve, L. A.:** *Wave Seals - A Solution to the Hydrodynamic Compromise*. ASLE Transactions, Vol. 29, Seite 265-270, 1973.
- /36/ **Schnürle, F.:** *Beitrag zur Beurteilung der Einflußgrößen auf Schmierungs Zustand und Betriebsverhalten, insbesondere Verschleiß und Lebensdauer, von Radial-Wellendichtringen*. Dissertation, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe, 1975.
- /37/ **Schmuker, S.; Haas, W.:** *Oberflächentopografie - Einfluss der Oberflächentopografie auf das Dichtsystem der Radialwellendichtung*. Abschlussbericht, Forschungskuratorium Maschinenbau e. V., Vorhaben Nr. 269, Heft Nr. 297, Frankfurt am Main, 2007.
- /38/ **Jung, S.:** *Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenlaufflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung*. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2012.
- /39/ **Roloff, H.; Matek, W.:** *Maschinenelemente*. 14. Auflage, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 2000.

- 
- /40/ **Horve, L.:** *A Macroscopic View of the Sealing Phenomenon for Radial Lip Oil Seals.* Tagungsmanuskript, 11th International Conference on Fluid Sealing - BHRA, Paper K2, Seite 710-731, Bedford, UK, 1987.
- /41/ **Buhl, S.:** *Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenlauffläche und Fluid.* Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2006.
- /42/ **Wiehler, K.:** *Tribologie und Fluidverhalten in der Dichtzone von Radialwellendichtringen unter Berücksichtigung makromolekularer Bestandteile der Schmierfluide.* Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2002.
- /43/ **Hirano, F.; Ishiwata, H.:** *The Lubricating Condition of a Lip Seal.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3B, Vol. 180, Paper 15, Seite 187-196, 1966.
- /44/ **Schuck, O.; Müller, H. K.:** *Rotary Shaft Seals at Large Dynamic Eccentricities.* Tagungsmanuskript, 9th Conference on Fluid Sealing - BHRA, Paper D1, Tagungsband Seite 103-109, Noordwijkerhout, Niederlande, 1981.
- /45/ **Ott, G. W.:** *Untersuchungen zum dynamischen Reib- und Leckageverhalten von Radialwellendichtringen.* Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1983.
- /46/ **Schouten, M. J. W.:** *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erweiterung der EHD-Theorie auf praxisnahe und instationäre Bedingungen.* Abschlussbericht, Forschungskuratorium Maschinenbau e. V., Heft Nr. 72, Frankfurt am Main, 1978.
- /47/ **Poll, G.; Gabelli, A.:** *Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part II - A New Measuring Principle for Lubricant Film Thickness.* Journal of Tribology, Vol. 114, Seite 290-296, 1992.
- /48/ **Leeuwen, H. J. v.; Wolfert, M.:** *The Sealing and Lubrication Principles of Plain Radial Lip Seals: An Experimental Study of Local Tangential Deformations and Film Thickness.* Elastohydrodynamics, Seite 1-14, 1996.
- /49/ **Bock, E.:** *Simmerringe im Einsatz.* Seminarunterlagen, Dichtungstechnik Seminar der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Seite 36-39, Stuttgart, 9. Februar 2012.
- /50/ **Piatti, L.; Küng, A.; Kaiser, A.:** *Die Benetzung von Oberflächen von Werkstoffen.* Werkstoffe und Korrosion, Vol. 10, Heft 4, Seite 239-243, April 1959.

- /51/ **Jagger, E. T.; Wallace, D.:** *Further Experiments on the Sealing Mechanism of a synthetic Rubber Lip Type Seal operating on a rotating Shaft.* The Institution of Mechanical Engineers, Vol. 187, Paper 29, Seite 361-367, 1973.
- /52/ **Schuler, P.:** *Grundlagen der Benetzung metallischer Oberflächen im Hinblick auf die Gegebenheiten von Radial-Wellendichtungen.* Diplomarbeit, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2009.
- /53/ **Braun, R.; Robert, J.; Prem, E.:** *Interactions between gear oils and sealing materials.* Firmenschrift: Klüber Lubrication München KG, München, 2007.
- /54/ **Tietze, W.:** *Untersuchungen und Anwendung von Dichtelementen.* Vulkan-Verlag Essen, Essen, 2001.
- /55/ **Frohn, A.; Roth, N.:** *Dynamics of Droplets.* Springer Verlag, Berlin, 2000.
- /56/ **Hild, W.:** *Tribologische Untersuchungen an Mikrosystemen: Einfluss der Benetzbarkeit.* Dissertation, Institut für Physik, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /57/ **Butt, H.-J.; Graf, K.; Kappl, M.:** *Physics and Chemistry of Interfaces.* Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2006.
- /58/ **Harkins, W. D.:** *The Physical Chemistry of Surface Films.* Reinhold Publishing Corporation, New York, USA, 1954.
- /59/ **Fritz, G.:** *Kolloidchemie - Die Welt von Grenzflächen und Kolloidteilchen.* Vorlesungsumdruck, Version 18, Institut für Chemie, Karl-Franzens Universität Graz, 2006.
- /60/ **Wautelet, M.:** *Nanotechnologie, Übersetzt von Bernhard Hoppe.* Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2008.
- /61/ **Kersten, G.:** *Optische und antastende Prüfung der Gegenlauffläche von Radial-Wellendichtungen.* Dissertation, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Hannover, 1992.
- /62/ **Stadler, R.; Vogt, R.:** *Dichtungs- und Verschleißverhalten von Simmerringen unter besonderer Berücksichtigung der Wellenoberflächentopographie.* Tagungsmanuskript, GfT Tribologie-Fachtagung, Tagungsband Seite 70/1-13, Göttingen, 25.-27. September 2000.
- /63/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN 4760: Gestaltabweichungen - Begriffe Ordnungssystem.* Beuth Verlag, Berlin, Juni 1982.
- /64/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikationen - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen,*

- 
- Definition und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.* Beuth Verlag, Berlin, Juli 2010.
- /65/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN EN ISO 25178 Teil 2: Geometrische Produktspezifikation - Oberflächentextur: Fläche - Begriffe, Definitionen und Oberflächentexturparameter.* Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- /66/ **Marquart, M.; Sauer, B.; Seewig, J.:** *3D-Oberflächenanalyse einer RWDR-Lauffläche unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 25178.* Tagungsmanuskript, GfT Tribologie-Fachtagung, Tagungsband Seite 61/1-13, Göttingen, 21.-23. September 2009.
- /67/ **Jung, S.; Haas, W.:** *Treffsichere Bewertung: Einfluss der Gegenlauffläche auf Dichtgüte und Reibung von Radial-Wellendichtungen.* KEM, Ausgabe 5/2011, Seite 20-21, 2011.
- /68/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN 3761 Teil 9: Radial-Wellendichrings für Kraftfahrzeuge; Prüfung: Radialkraft-Meßgerät-Digital.* Beuth Verlag, Berlin, Januar 1984.
- /69/ **Fries Research & Technologie GmbH:** *Der Microprof® - Bedienungsanleitung.* Bergisch Gladbach, 2004.
- /70/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN EN ISO 3274: Geometrische Produktspezifikationen - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten.* Beuth Verlag, Berlin, April 1998.
- /71/ **Daimler AG:** *MBN 31007-7: Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächenbeschaffenheit: Mess- und Auswerteverfahren zur Bewertung von drallreduzierten dynamischen Dichtflächen.* Stuttgart, 2008.
- /72/ **Reinhausen Plasma GmbH:** *Produktinformationen Piezobrush PZ1.* Regensburg, März 2010.
- /73/ **Deutsches Institut für Normung e. V.:** *DIN 51502: Kurzbezeichnung der Schmierstoffe und Kennzeichnung der Schmierstoffbehälter, Schmiergeräte und Schmierstellen.* Beuth Verlag, Berlin, August 1990.
- /74/ **Kubasch, J.:** *Mündlicher Erfahrungsaustausch zu Fragestellungen der Benetzungsmessung und der Additivverträglichkeit allgemein.* Weinheim, 21. September 2011.
- /75/ **Klien, S.; Surberg, C. H.; Stehr, W.:** *Temperaturbedingte Schmierstoffmigration auf technischen Oberflächen.* Tagungsmanuskript, GfT Tribologie-Fachtagung, Tagungsband Seite 4/1-4/11, Göttingen, 21.-23. September 2009.

- /76/ **Wegst, C. A.:** *Stahlschlüssel*. 20. Ausgabe, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Marbach, 2004.
- /77/ **Prem, E.; Vogt, R.:** *Der Simmerring - Grundlagen zur Schadensprävention*. Firmenschrift: Freudenberg Simrit GmbH & Co. KG, Weinheim, 2007.
- /78/ **Weigand, C.:** *Statistik mit und ohne Zufall - Eine anwendungsorientierte Einführung*, 2. Auflage. Physica-Verlag, Berlin, 2009.

## 8 Anhang

Im Folgenden wird der Ablauf der Messungen der Benetzungsflächen zur Bestimmung des Benetzungsfaktors erörtert. Die erste Messung nach zehn Sekunden erfolgte getrennt von der Messung nach der angestrebten Verweildauer von zwei, fünf oder 20 Stunden. Das heißt, dass nicht die Benetzungsfläche desselben Fluidtropfens nach zehn Sekunden und später nach der angestrebten Verweildauer vermessen wurde. Es wurden zunächst die Benetzungsflächen nach zehn Sekunden für alle Fluide bestimmt. Im Anschluss daran wurden die Messungen der Benetzungsflächen nach der angestrebten Verweildauer im Bereich mehrerer Stunden durchgeführt.

Die Vermessung der Benetzungsfläche nach zehn Sekunden wurde pro Fluid an vier Fluidtropfen durchgeführt. Der Wert der Benetzungsfläche, welche einem Fluid zugeordnet wird, ist der Mittelwert aus diesen vier Messungen. Die Messungen erfolgten je Fluid auf einer Oberflächenprobe, welche im dafür vorgesehenen Behälter eingelegt war. Der Behälter wurde zu diesem Zweck bereits vorab so unter dem Digitalkamerasystem positioniert, so dass eine Vermessung der Benetzungsfläche direkt möglich war. Es wurde darauf geachtet, dass der Behälter waagrecht steht. Aufgrund der vergleichsweise sehr kurzen Verweildauer von zehn Sekunden, wurde der Behälter nach der Absetzung eines Fluidtropfens nicht verschlossen. Die exakte Bestimmung der zehn Sekunden zwischen dem absetzen des Fluidtropfens und der Bilderstellung zur Vermessung der Benetzungsfläche, wurde über das Digitalkamerasystem realisiert. Dort wurde eine Belichtungszeit von 0,5 Sekunden eingestellt. Ausgehend vom Zeitpunkt des Absetzens ist das 20. erstellte Bild jenes, welches zehn Sekunden nach dem absetzen entstanden und folglich zur Bewertung heranzuziehen ist.

Jede Messung für jede Verweildauer erfolgt separat. Demzufolge wird nach der Messung der Benetzungsfläche nach einer Verweildauer von zwei Stunden der Versuch abgeschlossen. Es erfolgt kein weiteres benetzen und erneutes Messen der Benetzungsfläche nach fünf oder 20 Stunden. Jeder ermittelte Benetzungsfaktor für jede Einlagerungstemperatur und jede Verweildauer beruht je Fluid auf vier Messungen der Benetzungsflächen von vier eigenständig abgesetzten Fluidtropfen.

Vor dem Absetzen eines Fluidtropfens auf einer Oberflächenprobe musste diese gereinigt werden. Für den Reinigungsprozess und die sich anschließenden einzelnen Schritte zur Messung der Benetzungsfläche, war penible Sauberkeit erforderlich. In Kapitel 4.6.2 wird erörtert, dass immer mit Benzin gereinigt wird und teilweise anschließend mit einem Ober-

flächenreinigungsgerät, siehe Kapitel 3.3. An Umgebungsluft können sich Feuchtigkeit oder Staubpartikel aus eben der Umgebungsluft an den Oberflächenproben anlagern. Deshalb wurde darauf geachtet, dass möglichst wenig Zeit zwischen dem reinigen und dem absetzen der Fluidtropfen verstreicht.

Die Reinigung mit Benzin erfolgte unter Zuhilfenahme von feinporigen Reinigungstüchern. Diese wurden mit Benzin gedrängt und zum Wischen der Oberflächenproben verwendet. Dieses Abwischen wurde jeweils mehrfach mit neuen Reinigungstüchern wiederholt. Auch kleinere Rückstände von Fluid aus einem vorhergehenden Benetzungsversuch, konnten relativ gut durch Schlieren oder leichte Verfärbungen auf der Oberflächenprobe erkannt werden. Diese Rückstände wurden vollständig entfernt.

Die Reinigung mit dem Oberflächenreinigungsgerät erfolgte immer im Anschluss an eine Reinigung mit Benzin. Die Oberflächenproben wurden vollflächig behandelt. Das Oberflächenreinigungsgerät wurde entsprechend dessen bestimmungsgemäßer Verwendung eingesetzt, siehe Abbildung 3.12 und /72/. Die Vorschubbewegung wurde in etwa so gewählt, dass eine Oberflächenprobe in rund vier Minuten vollflächig behandelt werden konnte. Die Vorschubbewegung erfolgte mäanderförmig, wobei die längere Strecke parallel zu der kurzen Kante der Oberflächenprobe orientiert war.

Im Folgenden wird die Handlungsabfolge zur Messung der Benetzungsflächen nach einer Verweildauer von zwei, fünf beziehungsweise 20 Stunden in Stichpunkten erörtert:

- Vorbereitungen durchführen und Oberflächenproben einlegen.
  - Behälter waagrecht positionieren.
  - Der Behälter hat unabhängig davon welche Einlagerungstemperatur für die Messung vorgesehen ist, eine Temperatur von rund 20°C (Raumtemperatur).
  - O-Ring-Schnur einlegen.
  - Silika-Granulat in die vorgesehenen Ausfräsungen einfüllen.
  - So viel Silika-Granulat einfüllen, dass der Grund der Ausfräsungen vollständig bedeckt ist.
  - Ab dem Einfüllen des Silika-Granulats ist ein kontinuierliches Arbeiten mit möglichst wenig Zeitverzug zielführend. Das Silika-Granulat bindet die Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft, wird dadurch gesättigt und verliert zunehmend die Fähigkeit weitere Luftfeuchtigkeit zu binden. Durch die gebundene Feuchtigkeit verfärbt sich das Granulat. Abhängig von der Anwendung muss dieses wieder thermisch regeneriert werden.
  - Oberflächenproben in die vorgesehenen Ausfräsungen einlegen.
  - Die zuvor gereinigten Oberflächenproben müssen eine Temperatur von rund 20°C (Raumtemperatur) aufweisen.



- 
- Absetzen der Fluidtropfen.
    - Die Fluidtropfen werden mit einer Pipette dosiert und auf den Oberflächenproben abgesetzt.
    - Pro Oberflächenprobe wurden vier Fluidtropfen des gleichen Fluids abgesetzt.
    - Die Fluidtropfen werden in Querrichtung mittig auf den Oberflächenproben abgesetzt. In Längsrichtung wird zum Rand der Oberflächenprobe beidseits ein Abstand von rund 37 mm und zwischen den Fluidtropfen von rund 75 mm eingehalten.
    - Die Verwendung von neuen Kanülen für die Pipette ist je Fluid erforderlich.
    - Ab jetzt beginnt der Zeitraum der Verweildauer.
  
  - Behälter verschließen.
    - Behälter mit der Glasscheibe verschließen.
    - Vakuumpumpe am Absperrhahn anschließen.
    - Absaugen der Restluft aus dem Behälter bis auf einen Absolutdruck von 0,6 bar.
    - Absperrhahn verschließen.
    - Vakuumpumpe wieder vom Absperrhahn trennen.
    - Die Glasscheibe durch die Halteleisten zusätzlich fixieren.
  
  - Einlagern des Behälters bei der vorgesehenen Einlagerungstemperatur.
    - Wenn die Einlagerungstemperatur 20°C beträgt verbleibt der Behälter im entsprechend temperierten Labor.
    - Wenn die Einlagerungstemperatur mehr als 20°C beträgt, dann wird der Behälter in einem Ofen eingelagert. Es ist sicherzustellen, dass der Ofen im Innenraum bereits die vorgesehene Einlagerungstemperatur hat.
  
  - Benetzungsflächen vermessen.
    - Wenige Minuten (ein bis zwei) vor Ende der angestrebten Verweildauer wird der verschlossene Behälter in waagrechter Position zum Digitalkamerasystem transportiert.
    - Sobald die angestrebte Verweildauer erreicht ist, wird die Benetzungsfläche der einzelnen Fluidtropfen vermessen.
    - Der Absperrhahn und der Behälter bleiben während der Messung verschlossen.
  
  - Rückbau.
    - Absperrhahn öffnen.
    - Halteleisten demontieren.
    - Glasscheibe abnehmen.
    - Oberflächenproben entnehmen.
    - Silika-Granulat in ein verschließbares Behältnis geben.
    - Oberflächenproben reinigen.



# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Mathias Klaiber  
Geburtsdatum/-ort: 14.10.1980 in Ichenhausen (Bayern)  
Familienstand: ledig  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## Ausbildung und beruflicher Werdegang

09/1987 – 08/1991 Grundschule, Bächingen a. d. Brenz  
09/1991 – 08/1992 Grund- und Teilhauptschule, Syrgenstein  
09/1992 – 08/1998 Realschule, Giengen a. d. Brenz, Abschluss: Mittlere Reife  
09/1998 – 06/2001 Hornung & Häussler GmbH & Co. KG, Sontheim a. d. Brenz  
Berufsausbildung zum Metallbauer - Konstruktionstechnik  
07/2001 – 08/2001 Hornung & Häussler GmbH & Co. KG, Sontheim a. d. Brenz  
Anstellung als Facharbeiter  
09/2001 – 08/2003 Technische Oberschule, Ulm  
10/2003 – 11/2008 Universität Stuttgart, Studium des Maschinenwesens  
Hauptfächer: Konstruktionstechnik und Landmaschinen  
03/2006 – 05/2008 Andreas Stihl GmbH, Waiblingen  
Werkstudent im Bereich Vorentwicklung, Verbrennungsmotor  
07/2008 – 11/2008 Voith AG, Heidenheim a. d. Brenz  
Diplomarbeit im Bereich Antriebstechnik, PKW-Antriebsstrang  
01/2009 – 05/20013 Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart  
Anstellung als Akademischer Mitarbeiter  
10/2009 – 09/2010 Fernuniversität Hagen, Fernstudienkurs „Gewerblicher Rechtsschutz“, Nebenberufliche Fortbildung zum Patentingenieur



Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

| Nr. | Verfasser          | Titel   |
|-----|--------------------|---|
| 1   | H.K. Müller        | Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen   |
| 2   | W. Passera         | Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich  |
| 3   | K. Karow           | Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich  |
| 3   | F.E. Breit         | Die Kreiszyinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite   |
|     | W. Sommer          | Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten  |
| 4   | K. Heitel          | Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich                       |
| 5   | K.-H. Hirschmann   | Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen   |
| 6   | H. Däuble          | Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck  |
| 7   | J. Rybak           | Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahn mittels Schneidräder |
| 8   | D. Franz           | Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte   |
| 9   | E. Lauster         | Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe   |
| 10  |                    | Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke  |
| 11  | G. Ott             | Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen   |
| 12  | E. Fuchs           | Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen   |
| 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 außenverzählter Geradstirnräder  |
| 16  | N. Messner         | Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen   |
| 17  | V. Schade          | Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder                                  |
| 18  | A. Gührer          | Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen   |
| 19  | R. Nill            | Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben  |
| 20  | M. Kammüller       | Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen   |
| 21  | H. Truong          | Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen  |
| 22  | H. Liu             | Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik   |
| 23  | W. Haas            | Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen  |
| 24  | M. Plank           | Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung   |
| 25  | A. Wolf            | Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen   |
| 26  | P. Waidner         | Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen   |
| 27  | Hirschmann u.a.    | Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke  |
| 28  | B. Bertsche        | Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten   |
| 29  | G. Lechner;        | Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau  |
|     | K.-H.Hirschmann;   |   |
|     | B. Bertsche        |   |
| 30  | H.-J. Prokop       | Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen   |
| 31  | K. Kleinbach       | Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf                           |
| 32  | E. Zürn            | Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasters   |
| 33  | F. Jauch           | Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation   |
| 34  | J. Grabscheid      | Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung  |
| 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 Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast            |
| 38  | E. Fritz           | Abdichtung von Maschinenspindeln  |
| 39  | E. Fritz; W. Haas; | Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog   |
|     | H.K. Müller        |   |

| Nr. | Verfasser      | Titel  |
|-----|----------------|--|
| 40  | B. Jenisch     | Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen   |
| 41  | G. Weidner     | Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben   |
| 42  | A. Herzog      | Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten                             |
| 43  | T. Roser       | Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben  |
| 44  | P. Wäschle     | Entlastete Wellendichtringe  |
| 45  | Z. Wu          | Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen  |
| 46  | W. Richter     | Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlageeinheiten für Festplattenlaufwerke  |
| 47  | R. Durst       | Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen                 |
| 48  | G.S. Müller    | Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid  |
| 49  | W.-E. Krieg    | Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben   |
| 50  | J. Grill       | Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen                                       |
| 51  | M. Jäckle      | Entlüftung von Getrieben   |
| 52  | M. Köchling    | Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform  |
| 53  | M. Hildebrandt | Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen   |
| 54  | H. Kaiser      | Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem                                 |
| 55  | N. Stanger     | Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum   |
| 56  | R. Lenk        | Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe   |
| 57  | H. Naunheimer  | Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation  |
| 58  | G. Neumann     | Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern  |
| 59  | G. Wüstenhagen | Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings   |
| 60  | P. Brodbeck    | Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur System-berechnung nach dem Booleschen Modell |
| 61  | Ch. Hoffmann   | Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen  |
| 62  | V. Hettich     | Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen                              |
| 63  | K. Riedl       | Pulsationsoptimierte Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren  |
| 64  | D. Schwuchow   | Sonderverzahnungen für Zahnpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation  |
| 65  | T. Spörl       | Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und An-wendung auf Hybridantriebe               |
| 66  | K. Zhao        | Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität   |
| 67  | K. Heusel      | Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage  |
| 68  | T. Wagner      | Entwicklung eines Qualitätssystem für die Konstruktion   |
| 69  | H. Zelßmann    | Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen  |
| 70  | E. Bock        | Schwimmende Wellendichtringe   |
| 71  | S. Ring        | Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens                                   |
| 72  | M. Klöpfer     | Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen  |
| 73  | C.-H. Lang     | Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben   |
| 74  | W. Haas        | Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth                                |
| 75  | P. Schiberna   | Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation  |
| 76  | W. Elser       | Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben  |
| 77  | P. Marx        | Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben                                    |
| 78  | J. Kopsch      | Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz   |
| 79  | J. Rach        | Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben  |
| 80  | U. Häussler    | Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräserherstellung 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 Getriebebelastkollektiven 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 Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung   |
| 88  | M. Lambert     | Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen  |
| 89  | R. Kubalczyk   | Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich  |

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

| Nr. | Verfasser     | Titel  |
|-----|---------------|--|
| 136 | J. Gäng       | Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen   |
| 137 | Ch. Maisch    | Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben                            |
| 138 | D. Kirschmann | Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung   |
| 139 | D. Weber      | Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen         |
| 140 | T. Leopold    | Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen  |
| 141 | St. Jung      | Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenlaufflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung |
| 142 | T. Prill      | Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung   |
| 143 | D. Hofmann    | Verknüpfungsmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme              |
| 144 | M. Wacker     | Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben                                      |
| 145 | B. Jakobi     | Dichtungsgeräusche am Beispiel von Pkw-Lenkungen - Analyse und Abhilfemaßnahmen  |
| 146 | S. Kiefer     | Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtungen                                    |
| 147 | P. Fietkau    | Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben   |
| 148 | B. Klein      | Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik                                       |