

2 Stand der Technik bei RWDR/Welle/Fluid-Systemen

RWDR, ähnlich der heutigen Form, existieren seit über 100 Jahren, ihr Einsatz als radiale Abdichtung von Wellen an Gehäusedurchtritten bekommt mit dem Einsatz von niederviskosen Schmiermedien für schnelllaufende Maschinen eine zunehmende Bedeutung. Frühe RWDR (Ende 19. Jahrhundert bis in die Dreißiger Jahre) bestehen aus einem Metallgehäuse und enthalten eine eingepresste Lederdichtlippe (Bild 2 a+b), deren Anpressung mit einer umlaufenden Zugfeder erhöht werden kann (Bild 2 c).

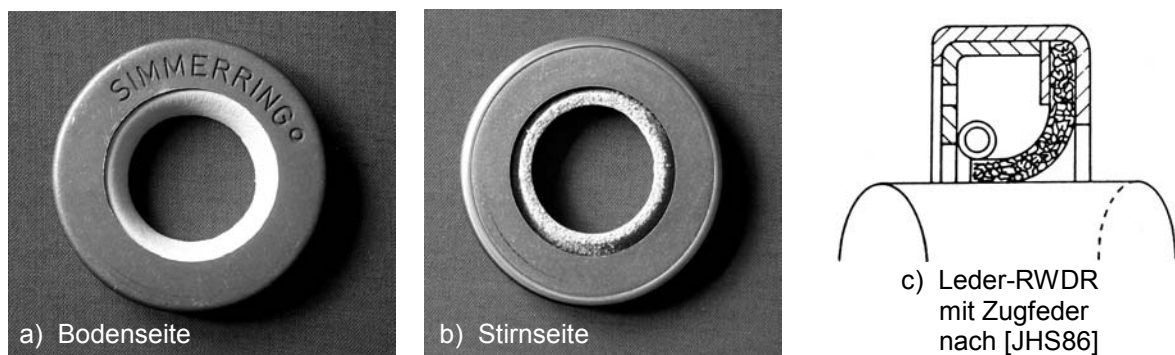


Bild 2: Ursprünglicher Radialwellendichtring mit Lederdichtlippe zu Beginn des 20. Jahrhunderts

Mitte der Dreißiger Jahre wird der erste RWDR aus Elastomer von *Dr. Simmer* vorgestellt, dessen Geometrie mit den heutigen Ausführungen schon vergleichbar ist. Wie sich die Entwicklung von RWDR in den letzten Dekaden vollzogen hat, kann Bild 3 entnommen werden. Durch kontinuierliche Querschnittsverringering und Rücknahme der Dichtlippen-
dehnung ergeben sich kleinere Radialkräfte sprich radiale Pressung auf die Wellenoberfläche und folglich ebenso geringere Verlustleistungen.

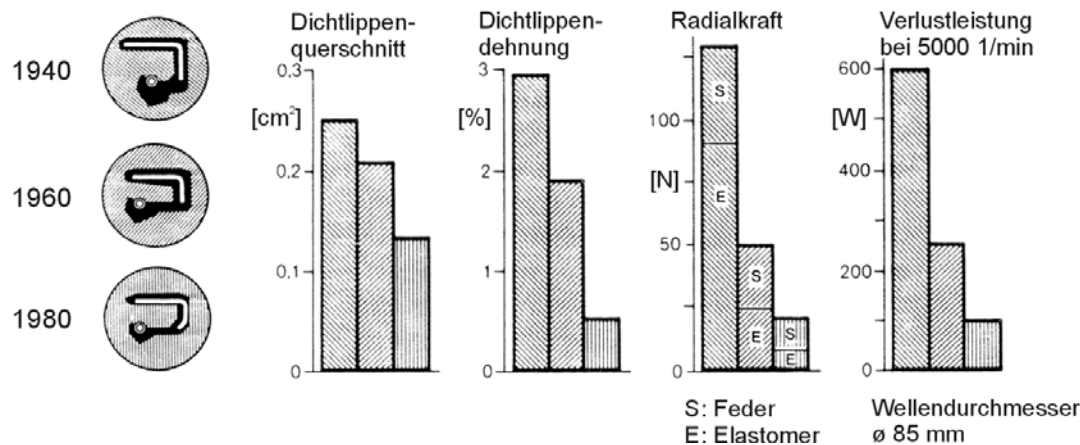


Bild 3: Entwicklung der RWDR nach [OTO81]

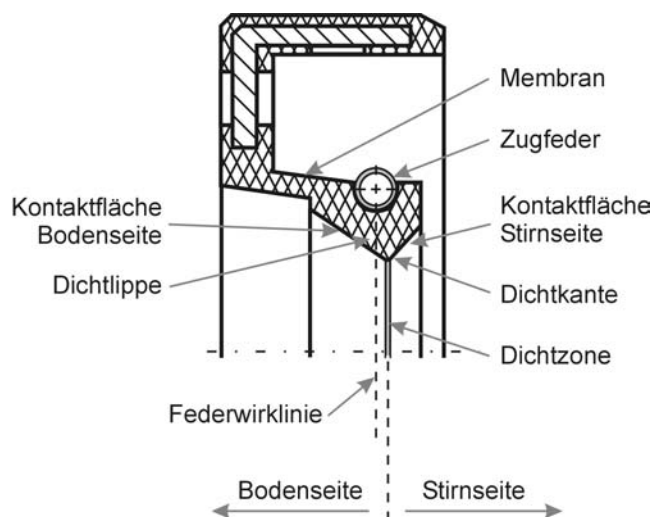


Bild 4: RWDR-Bezeichnungen

Wesentlich für die Weiterentwicklung von technischen Elementen ist das Verständnis der Funktionsweise. Die Funktion *Dichten* eines RWDR erfolgt in der sogenannten Dichtzone (Bild 4 mit weiteren RWDR-typischen Bezeichnungen) und an seinem äußeren Umfang gegenüber dem Gehäuse. Die rein statische Abdichtung zum Gehäuse wird im Folgenden nicht betrachtet, sondern das Augenmerk gilt der statischen (Stillstand) und

hauptsächlich der dynamischen Abdichtung zur Wellenoberfläche in der Dichtzone. Um die Dichtfunktion zu analysieren und zu beschreiben, ist die Erfassung von vorherrschenden physikalischen Größen in der Dichtzone hilfreich. Wie in der Einleitung erwähnt, ist der Zugang zu den Messgrößen in der Dichtzone, durch deren Abmessungen (Dichtzonenbreite 0,2-0,3 mm), Lage und den vorherrschenden Bedingungen erschwert. Einen schematischen Überblick der Situation gibt Bild 5. Die Relativgeschwindigkeiten zwischen den Oberflächen sind hoch (0 bis > 30 m/s), der Abstand der Oberflächen liegt im Sub- μ m-Bereich, woraus hohe Scherraten (Quotient aus Relativgeschwindigkeit und Fluidfilmdicke) für das Fluid in der Dichtzone resultieren. Durch die Aufweitung des RWDR beim Aufschieben auf die Welle wird eine radiale Anpressung erzielt, die geometriebedingt eine axiale Verteilung besitzt. Um das Zusammenwirken von RWDR, Welle und Fluid bzw. die Vorgänge in der Dichtzone zu beschreiben, die für die Dichtfunktion sorgen, werden die

relevanten physikalischen Größen mit einer Bewertung ihrer Erfassbarkeit zusammengestellt.

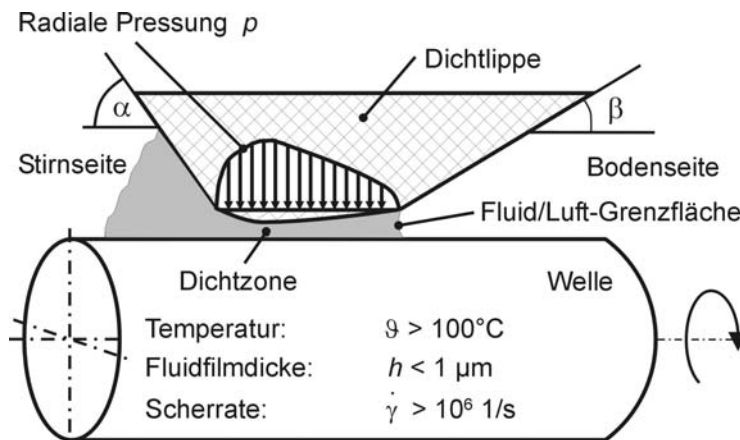


Bild 5: RWDR-Dichtzone

2.1 Messbarkeit von physikalischen Größen in der Dichtzone

Radiale Anpressung

Die radiale Anpressung des RWDR auf die Wellenoberfläche wird nach DIN 3761 T9 gemessen (Kap. 6, S. 87 und Anhang Bild A 5), dabei wird im statischen Zustand die Linienkraft bestimmt, welche die RWDR-Dichtlippe auf den Umfang der Welle ausübt. Um den qualitativen Verlauf der Pressungsverteilung im statischen Zustand zu bestimmen, stellen *Hermann* und *Seffler* [HRM85] eine Methode vor, bei der ein dünner Draht axial zwischen Dichtlippe und Wellenoberfläche eingeführt wird. Der kontaktfreie Abstand von Drahtmitte bis zu dem Punkt, wo sich Elastomer und Wellenoberfläche berühren, ist ein Maß für die Höhe der Pressung. Um den Einfluss der RWDR-Geometrie auf die Spannungsverteilung im Querschnitt und auf die radiale Pressung in der Dichtzone zu untersuchen, haben *Hirano et al.* spannungsoptische Versuche an unterschiedlichen RWDR-Geometrien aus Plexiglas durchgeführt [HRO61].

Kommentar:

Eine quantitative Messung der axialen Pressungsverteilung im statischen wie auch im dynamischen Zustand ist nach aktuellem Kenntnisstand für unmodifizierte RWDR bisher nicht erfolgt. Gerade eine Messung der Verteilung im dynamischen Zustand wäre auf-

schlussreich, da sie über Veränderungen der Pressung in verschiedenen Betriebssituationen in Abhängigkeit der Gesamtleistung aussagt.

Spannungen im Fluid

Die auftretenden Spannungen im Fluid, welches sich in der Dichtzone befindet, müssen mindestens so groß wie die lokal wirkende Anpressung der RWDR-Dichtlippe sein, da sonst das Fluid zu Boden- und Stirnseite herausgedrängt würde. *Shimotsuma* und *Iwasaki* [SMA76] und ebenso *Oliveira* [OLA95] haben Versuche durchgeführt, um die wirkenden Druckspannungen auf die Wellenoberfläche zu messen. Die Vorgehensweise der Autoren ist dabei identisch, sie bringen eine kleine Bohrung in die Wellenoberfläche ein. Der Bohrungsdurchmesser ist dabei kleiner als die Breite der RWDR-Dichtzone, so dass durch axiales Verfahren der Welle eine Druckverteilung über die Dichtzonenbreite aufgenommen werden kann. Ein in der Welle platzierter Druckaufnehmer misst den Druck, der in der Flüssigkeitssäule der Bohrung vorherrscht.

Die Ergebnisse der Autoren sind ähnlich. In beiden Quellen sind die Drücke in der Dichtzone niedriger, als die von außen wirkenden Drücke auf Boden- und Stirnseite. Wobei *Shimotsuma* und *Iwasaki* negative Drücke bis zu -10.800 Pa messen und die Messungen von *Oliveira* lediglich eine Verringerung ergeben, aber nicht bis in den negativen Bereich vordringen.

Kommentar:

Die Ähnlichkeit der Messergebnisse in beiden Veröffentlichungen mag die Messung des Drucks in der Bohrung der Welle bestätigen. Allerdings erhebt sich die Frage, ob dieser Druck wirklich einem Fluiddruck entspricht, der im Fluidfilm vorherrscht. Das Fluid in der Dichtzone fließt mit hoher Geschwindigkeit über die Öffnung der Bohrung. Dieses Messprinzip wird in der Hochgeschwindigkeitsrheometrie (Schlitzrheometer) eingesetzt, um das elastische Verhalten von Fluiden zu bestimmen. Die simultane Messung mit Druckaufnehmern, deren Membran bündig mit der Oberfläche montiert ist, und Druckaufnehmern in einer Bohrung bzw. Schlitz lassen Rückschlüsse auf das elastische Verhalten von Fluiden zu, wobei die Messung des Drucks in der Bohrung kleinere Werte ergibt als auf der Oberfläche [TNR69].

Fluidfilmdicke

Poll und *Gabelli* [POL92], sowie *van Leeuwen* und *Wolfert* [LEN97] messen direkt die Fluidfilmdickenverteilung in axialer Richtung. *Poll* und *Gabelli* setzen ein magnetisches Fluid ein und messen die Fluidfilmdicke über die Ermittlung der Impedanzänderungen im Fluid, welches vom magnetischen Feld durchflossen wird. Um mit dieser Methode eine

Verteilung zu messen, werden RWDR mit sehr geringer radialer Anpressung aufgrund geringster Überdeckung¹ (80 μm , 1,5-2 mm normal) und verbreiteter Dichtzone (1 mm, 0,2-0,3 mm normal) eingesetzt. Die Messungen ergeben minimale Fluidfilmdicken von 0-10 μm bei einem Drehzahldurchlauf von 0-250 1/min (110 mm Wellendurchmesser).

Van Leeuwen und *Wolfert* setzen für ihre Messungen eine Bildverarbeitungstechnik² ein, die mit Hilfe einer Optik durch eine hohle Glaswelle die Fluidfilmdicke misst. Aus diesen Versuchen resultieren Fluidfilmdicken um 1 μm , allerdings bemerken die Autoren, dass die gemessenen Werte, die reale Fluidfilmdicke deutlich überschätzen, da hohe Temperaturen der Glaswelle einen Einfluss auf die Messung besitzen. Darüber hinaus sind die Werte von einem starken Rauschen überlagert, so dass keine Fluidfilmdickenverteilung in axialer Richtung erkennbar ist.

Kommentar:

Die vorgestellten Methoden zeigen, dass die Messung einer Fluidfilmdickenverteilung im Betrieb bisher nicht ohne wesentliche Modifikationen der Reibpartner (Welle, RWDR, Fluid) möglich ist. Daher ist die Interpretation der Ergebnisse in bezug auf eine reale Fluidfilmdickenverteilung einer nicht modifizierten RWDR/Welle-Paarung nicht überzeugend.

Reibmoment

Das Reibmoment, das im Betrieb von der Welle auf den RWDR übertragen wird, ist eine Betriebsgröße, die messtechnisch gut erfasst werden kann. Bei bekannter radialer Anpressung des RWDR auf die Welle kann aus ihr ein mittlerer Gleitreibungskoeffizient für die Dichtzone bestimmt werden. Eine fast reibungsfreie Lagerung der RWDR-Aufnahme in einer Laborausführung ermöglicht die exakte Bestimmung eines wirkenden mittleren Reibmoments. Die relativ einfache Lagerung mit Rillenkugellagern in den Sechziger Jahren [HRO61] wird später durch quasi reibungsfreie aerostatische Lagerungen abgelöst [JHS78, SCK81, OTT83, WON93].

Kommentar:

Die Messung des RWDR-Reibmoments stellt heutzutage keine hohen Anforderungen dar, allerdings ist die Bewertung der erzielten Messwerte nicht einfach, da über die Schmierungsbedingungen in der Dichtzone keine genauen Angaben vorliegen. Allgemein wird

¹ Durchmesserdifférenz von RWDR (ausgebaut) und Welle, siehe Kap. 6, S. 87

² Open Loop Focus Error Signal Detection

häufig als Vereinfachung angenommen, dass das Reibmoment aus reiner Fluidreibung herrührt, dieser Aspekt wird ausführlich in Kap. 5 diskutiert. Im Gegensatz zur globalen Messgröße Reibmoment steht die Erfassung der Schubspannungsverteilung in der Dichtzone während des Betriebs, die in axialer Richtung und Umfangsrichtung variieren kann. Bisher ist auch eine qualitative Messung dieser Verteilung nicht bekannt.

Verzerrung der Elastomeroberfläche

Die Schubspannungsverteilung in der Dichtzone ruft auf der Elastomeroberfläche eine Verzerrung hervor. *Kammüller* hat die Verzerrung durch eine hohle Plexiglaswelle bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 0,083 m/s mit einer Optik festgehalten [KMM86]. Einen weiteren Versuch der Verzerrungsmessung unternehmen *van Leeuwen* und *Wolfert* [LEN97] ebenfalls mit einer hohlen Glaswelle und einer Bildverarbeitung. Es werden Verzerrungsverteilungen bei Geschwindigkeiten bis zu 2,2 m/s aufgenommen. Die dynamischen Messungen zeigen auf, dass die Verzerrungsverteilungen von der Umfangsposition abhängig sind. *Nakamura* hat nicht die Verzerrungsverteilung über die Dichtzonenbreite untersucht, sondern die Verzerrung der Kontaktpunkte zwischen Welle und Elastomer, um zu untersuchen, ob eine Vorzugsrichtung der verzerrten Strukturen vorliegt, die der Autor aber nicht findet [NKM87].

Kommentar:

Die Messung der Verzerrungsverteilung einer unmodifizierten RWDR/Welle-Paarung ist bisher nicht gelungen. Dies liegt hauptsächlich daran, dass eine Messung der verzerrten Strukturen auf der Elastomeroberfläche durch das in der Dichtzone befindliche Fluid nicht möglich ist und eine optische Erkennung aufgrund von Reflexionen an den Grenzübergängen von Welle zu Fluid und Fluid zu Elastomer die Messungen erschwert. *Van Leeuwen* und *Wolfert* führen ihre Messungen im ungeschmierten Zustand durch und vermuten, dass die Verzerrung im geschmierten Zustand vergleichbar ist. Dies ist allerdings eine Annahme, die nur gilt, wenn in der gesamten Dichtzone identische Schmierungsbedingungen herrschen, was angezweifelt werden muss.

Temperatur in der Dichtzone

Die Messung der Temperatur in der Dichtzone ist für die Bestimmung der Volumenviskosität des Schmierfluids und thermischen Belastung der Reibpartner von großer Wichtigkeit. *Lines et al.* [LNS67, LNS71], *Jagger et al.* [JGG73], *Schnürle* [SÜE75] und *Wollesen* [WON93] führen Temperaturmessungen mit Thermoelementen durch, die an der Wellenoberfläche eingebracht sind. Allerdings sind nur die Versuchsanordnung von *Lines* und *O'Donoghue* [LNS71] und *Wollesen* in der Lage, die Übertemperaturen im Fluidfilm zu bestimmen, da hier ein zum Wellenmaterial hin isoliertes Thermoelement zum Einsatz

kommt und welches eine Messperle besitzt, die in der Größenordnung der Dichtzonenbreite (*Lines*) oder sogar kleiner ist (*Wollesen*).

Kommentar:

Durch die Dichtzonentemperaturmessungen werden die vermuteten hohen Übertemperaturen in der Dichtzone von RWDR bestätigt und es kann mit den zugehörigen Viskositätswerten gearbeitet werden, die bei gleichzeitiger Messung des Reibmomentes [WON93] Rückschlüsse auf den Schmierungszustand in der Dichtzone ermöglichen.

Die obigen Betrachtungen zur Messung von physikalischen Größen in der Dichtzone zeigen die Problematik von Messungen auf, welche durch Lage, Größe und Umgebungsbedingungen der Dichtzone gegeben sind. Diese messtechnische Unzugänglichkeit der Dichtzone führt zu einer Mehrzahl von Funktionshypothesen, die nebeneinander existieren und deren Berechtigung nicht durch Messungen widerlegt werden kann.

2.2 RWDR-Funktionshypothesen

Die Arbeit von *Jagger* kann als ursprüngliches wissenschaftliches Grundgerüst angesehen werden [JGG57a, JGG57b], welches mit dem Nachweis der Existenz von Fluid in der Dichtzone von RWDR eine Basis für darauf folgende RWDR-Funktionshypothesen darstellt. *Jagger* verwendet für die tribologischen Untersuchungen modifizierte RWDR mit einer axial ausgerichteten Dichtlippe, um die wirkende Anpresskraft in der Dichtzone zu variieren. Aus den versuchstechnisch ermittelten Reibdaten für die trockene und geschmierte Dichtzone bei unterschiedlichen Belastungen resultiert die Existenz von Fluid in der durch Pressung belasteten Dichtzone.

Aus dieser Erkenntnis heraus entwickelt *Jagger* eine Theorie, welche den Verbleib von Fluid zwischen den belasteten Flächen begründet, die sogenannte *Meniskustheorie* (Bild 6). Dieser Ansatz, welcher die Grenzflächenspannungen auf der Bodenseite nutzt, um den Verbleib von Fluid in der Dichtzone zu erklären, wird revidiert, denn im Gegensatz zur Annahme eines konvexen Meniskus bildet sich ein konkaver aus, da eingesetzte Schmierfluide benetzend auf die Elastomeroberfläche wirken. Dieses Verhalten an der Grenzfläche Fluid/Luft wird von *Stakenborg* [SBG88] klar formuliert. *Stakenborg* bestimmt eine Druckdifferenz über die Grenzfläche, die in Richtung Bodenseite wirkt.

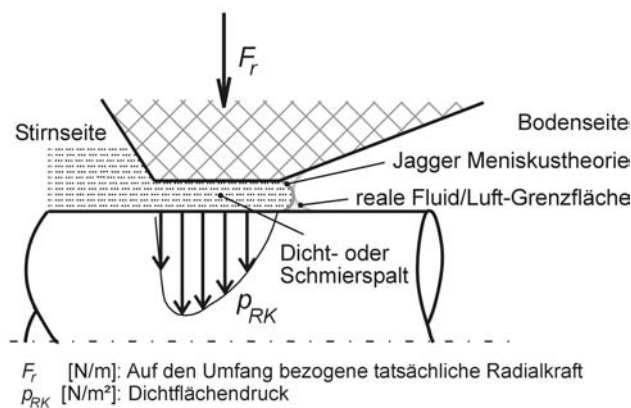


Bild 6: Meniskustheorie von Jagger nach [WON93]

Ausgehend von Jagers Arbeit entsteht die Frage, wie das in der Dichtzone befindliche Fluid einen tragenden Film aufbaut. Hirano *et al.* entwerfen hierzu ein empirisches Modell, welches den hydrodynamischen Druckaufbau an einzelnen Rauheiten auf den Reiboberflächen berücksichtigt, der insgesamt einen tragfähigen Fluidfilm bildet [HRO61, HRO66]. Diese Arbeiten mögen den Aufbau eines Fluidfilmes erklären, allerdings gelingt es den Autoren nicht, den Verbleib des

Fluids in der Dichtzone zu begründen. Es wäre zu erwarten, dass die radiale Anpressung der Dichtlippe das Fluid aus der Dichtzone seitlich herausdrückt.

Brink [BRK73], Shimotsuma [SMA76], Arai [ARA76] und Kawahara *et al.* [KWH77, KWH78, KWH80] gehen in ihren Veröffentlichungen unter anderem einer weiteren Eigenschaft von RWDR nach: dem Förderphänomen. Wenn ein RWDR verkehrt herum montiert wird, d. h. mit seiner Bodenseite zum Fluid hin montiert, tritt im Betrieb Leakage auf. Diese Leakage in Richtung Stirnseite wird als Förderung interpretiert, da sie auch im beiderseitig gefluteten Zustand zu beobachten ist bzw. wird von verschiedenen Autoren im korrekt eingebauten Zustand als ein Maß für die Dichtfähigkeit gesehen (siehe Abschnitt 4.3.1).

Die bestehenden Funktionshypothesen von RWDR werden nachfolgend nach Wirkprinzipen in Unterabschnitte eingeteilt, um dann jeweils den Fluidfilmaufbau und die Dicht-/Förderfähigkeit zu diskutieren.

2.2.1 Makroskopische Abweichung vom parallelen Zustand³

Lebeck [LBK87a, LBK87b] untersucht intensiv das Phänomen der Tragfähigkeit von Fluidfilmen und kommt zu dem Ergebnis, dass ein tragfähiger Film aufgebaut werden kann, wenn makroskopische Abweichungen vom parallelen Zustand in geschmierten und relativ zueinander bewegten Maschinenteilen vorliegen. Befindet sich ein Fluid in einem konvergierenden Spalt und bewegen sich die begrenzenden Oberflächen relativ zueinander,

³ Die relativ zueinander bewegten Gleitebenen besitzen in Bewegungsrichtung einen gleichförmigen Spalt.

so baut sich im verengenden Spalt ein Druck auf und der Fluidfilm besitzt eine Tragfähigkeit. Diese Art des hydrodynamischen Fluidfilmaufbaus ist Grundlage für die Auslegung von Gleitlagerungen. Aufgrund toleranzbehafteter Fertigung von RWDR und Montageungenauigkeiten findet der Fluidfilmaufbau durch makroskopische Abweichungen vom parallelen Zustand Anwendung in der Bildung von RWDR-Funktionshypothesen. Abweichungen vom parallelen Zustand können auf mehrere Arten bei einer RWDR/Welle-Paarung auftreten, wie in den folgenden Funktionshypothesen aufgezeigt wird.

Abweichungen in Umfangsrichtung – Aufbau eines tragenden Fluidfilms:

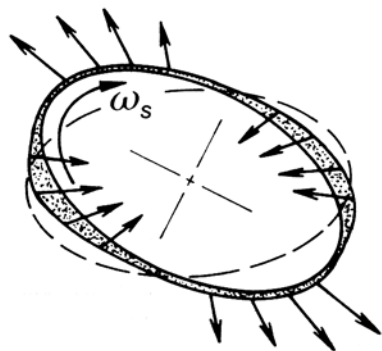


Bild 7: Fluidfilmaufbau
[SBG90]

In dem von *Stakenborg* und *van Leeuwen* vorgestellten *Visko-Elastohydrodynamischen Modell* (VEHD) wird der Aufbau eines Fluidfilmes in der RWDR-Dichtzone durch Abweichung vom parallelen Zustand in Umfangsrichtung betrachtet [LEN90, SBG90]. Grundvoraussetzung für die Funktion dieses Modells ist die Existenz einer dynamischen Exzentrizität und ebenso die Existenz von Retardation der elastomeren Dichtlippe zur Wellenoberfläche, welche einen konvergierenden und divergierenden Spalt erzeugt, der einen Fluidfilmaufbau erst

ermöglicht. In Bild 7 ist die Funktion dieses Modells am Beispiel einer elliptischen Welle (Drehgeschwindigkeit ω_s) dargestellt. Der Druckverlauf ist über den Umfang aufgetragen (Pfeile) und zusätzlich der konvergierende und divergierende Spalt zwischen Welle und Dichtlippe eingezeichnet (schattierter Bereich).

Kommentar:

Die Autoren errechnen eine Abhebfrequenz der Dichtlippe von der Wellenoberfläche von 1,8 Hz bei einer dynamischen Exzentrizität von 10 μm . Diese Frequenz entspricht einer Wellendrehzahl von nur 110 1/min, was für RWDR-Anwendungen mit einem Wellendurchmesser von 70 mm (Autorenangabe) als gering anzusehen ist. Diese sehr niedrige Abhebfrequenz wird von anderen Untersuchungen nicht bestätigt [HBR96], welche die erste Eigenfrequenz eines RWDR bei 340 Hz bestimmen, was auf eine erheblich höhere Drehzahl hindeutet, über der eine Retardation der Dichtlippe eintritt.

Über einen vorhandenen Dichtmechanismus machen die Autoren keine Angaben. Leckage wird in allen Betriebsbedingungen angenommen. Sie beträgt zwischen 0,6 und 21,6 ml/h, was als deutliche Leckage zu bezeichnen ist.

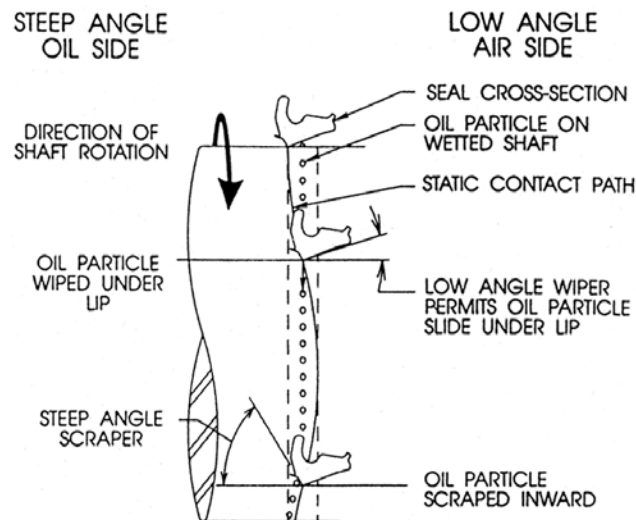
Abweichungen in axialer Richtung – Fluidförderung:

Bild 8: Fluidförderung beim 'Wave Seal'
[HRV96]

Neben der Abweichung vom parallelen Zustand in Umfangsrichtung ergibt sich aufgrund der RWDR-Kontaktwinkel ebenso eine Abweichung vom parallelen Zustand in axialer Richtung. Wird zu dieser geometrischen Bedingung noch eine dynamische, statische Exzentrizität bzw. Schiefstellung des RWDR betrachtet, resultiert eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Oberflächen in axialer Richtung. Somit sind die Voraussetzungen für den Aufbau eines hydrodynamischen Fluidfilmes erfüllt.

1973 berichten *Brink* und *Horve* [BRK73] über ein sogenanntes *Wave Seal*, dessen Dichtlippe in Umfangsrichtung leicht gewellt ist und daher einen größeren axialen Bereich der Wellenoberfläche überstreicht. Die Autoren untersuchen ebenfalls das Förderverhalten dieser Dichtungsgeometrie und entwickeln daraus den *Wave Seal Mechanism* (Bild 8). Dieser Fördermechanismus beruht auf der axialen Relativbewegung von Dichtlippe und Wellenoberfläche zueinander unter Berücksichtigung der Spaltöffnungswinkel auf Boden- und Stirnseite. Die Funktion des steileren Kontaktwinkels auf der Stirnseite kann als *Abstreifer* beschrieben werden, wohingegen auf der Bodenseite durch den kleineren Winkel ein *Gleiter* vorliegt. Mit dieser Abstreiferwirkung kann Fluid von der Bodenseite auf die Stirnseite des RWDR gefördert werden. *Arai* [ARA76] verwendet den gleichen Ansatz, um den *Saugeffekt* zu beschreiben, welchen der Autor in Versuchen mit variabler dynamischer Exzentrizität bestimmt.

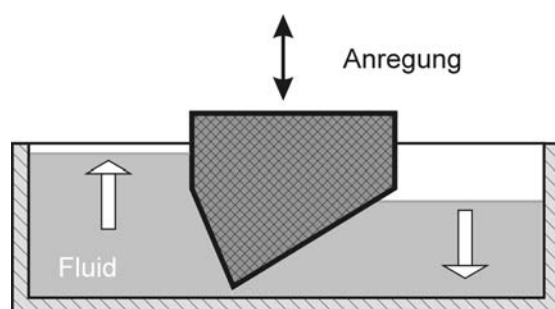


Bild 9: Schwingförder-Prinzip

Umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss von statischer, dynamischer Exzentrizität und Schiefstellung werden von *Hermann* und *Seffler* [HRM85] durchgeführt. Sie prägen den Begriff *Schwingförderer*, welcher symbolisiert, dass aufgrund periodischer Abstandsänderungen einer Kantengeometrie zu einer ebenen Fläche, wie in Bild 9 dargestellt,

eine Fluidförderung zur Seite mit dem steileren Geometriewinkel stattfindet. In der RWDR-Anwendung wird diese Abstandsänderung durch Rundlaufabweichung bzw. Schiefstellung verursacht, welche die radiale Anpressung verändern, daher einen Einfluss auf die Fluidfilmdicke besitzen und somit zu einer Fluidbewegung in Richtung Stirnseite führen können.

Kommentar:

Der von *Brink* und *Horve* vorgestellte *Wave Seal Mechanism* und gleichfalls der *Schwingförderer* von *Hermann* und *Seffler* bieten nur eine Erklärung für die Förderung von Fluid auf die RWDR-Stirnseite, wenn eine Exzentrizität bzw. Schiefstellung des RWDR vorliegt. Dass diese Mechanismen beim RWDR bei Abweichungen vom parallelen Zustand die Förderung unterstützen können, ist nachvollziehbar, dass allerdings diese Mechanismen allein wirksam sind, muss bezweifelt werden, denn dann besäßen sehr genau positionierte RWDR/Wellen-Paarungen eine schlechtere Dichtfähigkeit als Paarungen mit größeren Abweichungen im Rundlauf und Schiefstellung, was nicht plausibel ist.

2.2.2 Mikroskopische Abweichung vom parallelen Zustand

Die Oberflächenrauheiten der Reibpartner erzeugen mikroskopische Abweichungen vom parallelen Zustand. Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, haben *Hirano et al.* ein empirisches Modell entworfen, welches den Aufbau eines Fluidfilmes in der Dichtzone von RWDR unter Berücksichtigung des hydrodynamischen Druckaufbaus an den Rauheiten beschreibt. Die wesentliche Weiterentwicklung dieses Modells geschieht durch die Berücksichtigung der verzerrten Elastomeroberfläche.

Dass Verzerrungen einer schubbelasteten Elastomeroberfläche in Zusammenhang mit der Dichtfunktion stehen, hat *Kuzma* schon 1969 für Gleitringdichtungen formuliert [KUZ69]. *Shimotsuma* [SMA76], *Arai* [ARA76] und *Kawahara* [KWH80] sagen aus, dass eine Verzerrung ebenfalls in der Dichtzone von RWDR auftritt und die verzerrte Oberfläche mit der Dichtfähigkeit zusammenhängt. 1984 und 1986 formulieren *Qian* [QIA84] und *Kammüller* [KMM86] die *Verzerrungshypothese* (Bild 10), welche durch Kanalisierung des Fluids den Aufbau eines Fluidfilmes und die Förderung von Fluid zur Stirnseite bei bodenseitigem Fluidangebot erklären sollte. Durch eine asymmetrische radiale Pressungsverteilung resultiert ebenso eine asymmetrische Schubbelastung der Elastomeroberfläche. Befinden sich in der Dichtzone axiale Rauheitsstrukturen, welche durch die wirkenden Schubbelastungen verzerrt werden, so ergeben sich auf der Bodenseite längere kanalartige Strukturen als auf der Stirnseite. Durch die Relativbewegung wird Fluid aus den Seitenbereichen in den Tälern dieser Strukturen in Richtung des Pressungsmaximums geleitet, so kann sich ein hydrodynamischer Fluidfilm aufbauen und gleichzeitig tritt bei einem

Überangebot von Fluid auf der Bodenseite eine Förderung in Richtung Stirnseite ein. Diese *Verzerrungshypothese* mit axialer Rauheitsstruktur wird von *Hermann* und *Seffler* [HRM85] und später von *Müller* [MLL88] zum *Seitenströmungsmodell* entwickelt, welches eine beliebige Struktur aufweist.

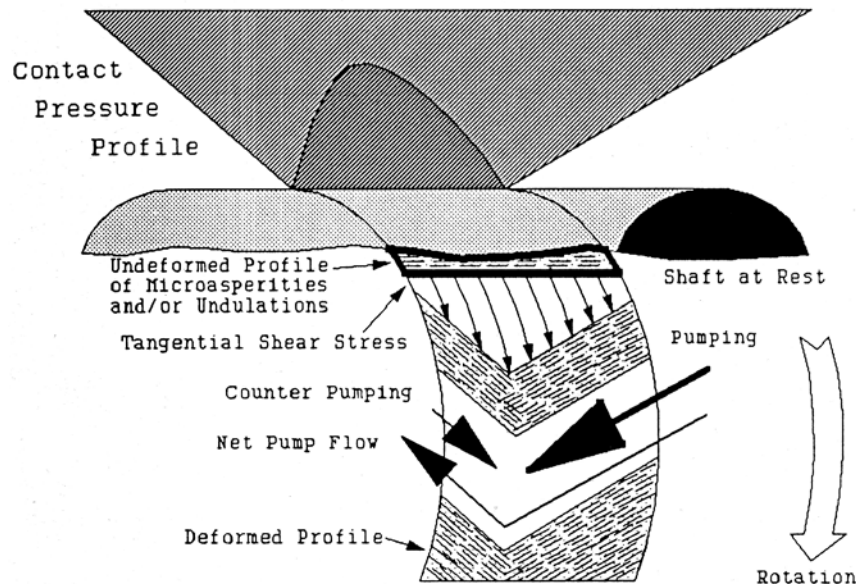


Bild 10: *Verzerrungshypothese* [HRV96]

Diese phänomenologisch formulierte *Verzerrungshypothese* und *Seitenströmungsmodell* wird von *Salant et al.* [SLT94, SLT95, SLT96, SLT97, SLT98, SLT99, SHI00] und *Bavel et al.* [BVL96] numerisch formuliert und speziell von *Salant et al.* variationsreich weiter entwickelt. In der aktuellsten vorliegenden Veröffentlichung von *Shi* und *Salant* [SHI00] wird neben der Verzerrung der Elastomeroberfläche ein *Surface Tilt Mechanism* vorgestellt. Für die Betrachtung dieses Effekts bleibt eine Verzerrung der Elastomeroberfläche unberücksichtigt. Unter gefluteten Bedingungen (Fluid auf Stirn- und Bodenseite vorhanden) errechnen die Autoren eine Fluidfilmdickenverteilung, welche auf der Bodenseite eine kleinere Fluidfilmdicke besitzt als auf der Stirnseite. Bei Berücksichtigung von Kavitation resultiert aus der numerischen Betrachtung von *Shi* und *Salant* ein Druckgradient von Boden- in Richtung Stirnseite, der zur Förderung von Fluid führt.

Kommentar:

Die weiterentwickelte *Verzerrungshypothese* genießt als RWDR-Funktionsmodell eine große Akzeptanz in der Fachwelt, trotzdem sollen an dieser Stelle einige kritische Aspekte herausgearbeitet und diskutiert werden. Ausgehend von einer axialen Verschleißstruktur der verschlissenen Dichtlippenoberfläche, welche einen starken kanalisierenden Effekt auf vorüberströmendes Fluid ausübt und die unter realen Bedingungen kaum beobachtet werden kann, wird versucht, dass Modell an eine zufällig verteilte Rauheitsstruktur

anzupassen. Es erhebt sich die Frage, ob die Verzerrung einer beliebigen Rauheitsverteilung die Fluidförderung in jedem Falle vergrößert oder ob die Lage einzelner Rauheiten einen Einfluss besitzt (kanalisierende Wirkung in Reihe liegender Rauheiten). Unter der Annahme, dass jede beliebige Rauheitsverteilung eine Förderung hervorruft, muss die Umströmung einer einzelnen deformierten Rauheit zu einem Nettoförderstrom in Richtung des Pressungsmaximums führen, der größer für eine deformierte Rauheit als für eine undeformierte ist. Dies wiederum wäre die numerische Beschreibung des *Seitenströmungsmodells* von Müller. Eine detailliertere Darstellung der numerischen Ergebnisse wäre hilfreich.

Durch eine Verkipfung der Dichtlippenoberfläche (*Surface Tilt Mechanism*), welche eine abnehmende Fluidfilmdicke auf der Bodenseite zur Folge hat, steigt die Belastung in den bodenseitigen Bereichen, was zu einer stärkeren Verzerrung in diesen Bereichen führt. Eine stärkere bodenseitige Verzerrung ergibt nach der beschriebenen *Verzerrungshypothese* eine Fluidförderung in Richtung Bodenseite. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Berücksichtigung von unterschiedlichen Schmierungsbedingungen in der Dichtzone, wie sie im Normal- (Stirnseite mit Fluid versorgt) und Förderbetrieb (Boden- und Stirnseite mit Fluid versorgt) vorliegen. Im Normalbetrieb ohne bodenseitige Fluidversorgung wird sich eine geringere Fluidfilmdicke auf der Bodenseite einstellen, welche die Verzerrung in diesem Bereich ebenfalls verstärkt und zu einer Fluidströmung in Richtung Bodenseite führte. Hieraus folgt, dass die beiden Mechanismen, *Verzerrungshypothese* und *Surface Tilt Mechanism*, in entgegengesetzte Richtungen wirken können.

2.2.3 Normalspannungsdifferenzen im Fluid

Ausgehend von Wollesens Untersuchungen, in denen er Reibmoment und Dichtzonentemperatur gleichzeitig misst und ein rein hydrodynamisches Verhalten des Schmierfluids in der Dichtzone anzweifelt [WON93], entwickelt Oliveira eine RWDR-Funktionshypothese [OLA95], die auf dem nicht Newtonschen Verhalten von Schmierfluiden basiert. In Analogie zum Verhalten von gescherten Polymerlösungen und -schmelzen, die schon bei geringer Scherung Fließanomalien ausbilden, welche auf die Wirkung von Normalspannungsdifferenzen zurückgeführt werden können, wendet Oliveira diese Theorie der nicht Newtonschen Flüssigkeiten auf niedermolekulare Schmierfluide an, die einer sehr hohen Scherrate unterworfen sind.

In [OLA95] werden Formulierungen für den Normal- und Förderbetrieb entworfen. Im Normalbetrieb gilt ein Gleichgewicht zwischen der radialen Pressung des RWDR auf die Wellenoberfläche und einer gleichgerichteten Fluidspannung, welche durch die große Scherung des Fluids entsteht (Bild 11, Grafik Mitte). Oliveira kann aufgrund dieser Annahme eine einfache Beziehung für die Fluidfilmdicke im Normalbetrieb entwickeln:

$$h(z) = \left(\frac{\nu_2(z)}{p_{RK}(z)} \right)^{1/2} u \quad F 1$$

| | | | | | |
|-----|------------------------|--------|----------|-------------------------------|----------------------|
| h | Fluidfilmdicke | [m], | ν_2 | 2. Normalspannungskoeffizient | [Pa s ²] |
| u | Umfangsgeschwindigkeit | [m/s], | p_{RK} | Pressungsverteilung | [Pa] |

Der Normalspannungskoeffizient ν ist ein Maß für die Größe von Normalspannungsdifferenzen im Fluid in Abhängigkeit von der Scherung, die sich aus der Fluidfilmdicke und der Umfangsgeschwindigkeit ergibt.

$$\int_{z_1}^{z_3} \eta_z \frac{\nu}{h(z)} dz = u^2 \int_{z_2}^{z_3} \nu_2 \frac{dz}{h^2(z)} \quad , \text{ woraus folgt} \quad F 2$$

$$\dot{V} = 2 \pi r \frac{\rho \nu_2}{\eta_z} u^2 \phi \quad , \text{ mit} \quad \phi_{FFD} = \frac{\int_{z_2}^{z_3} \frac{dz}{h^2(z)}}{\int_{z_1}^{z_3} \frac{dz}{h^2(z)}} \quad F 3$$

| | | | | | |
|--------------|--------------------------|-----------------------|-----------|------------------------------------|---------------------|
| η_z | Viskosität in z-Richtung | [Pa s], | ν | Fluidgeschwindigkeit in z-Richtung | [m/s] |
| ρ | Dichte des Fluids | [kg/m ³], | r | Wellenradius | [m] |
| ϕ_{FFD} | Formfaktor | [-], | \dot{V} | Förderrate | [m ³ /s] |

Im Förderbetrieb entstehen im Fluid auf der Bodenseite zusätzliche Normalspannungen, die in z-Richtung wirken. Wird das Integral dieser Normalspannungen (rechte Seite F 2) gleich dem Widerstand gegen eine Fließbewegung in z-Richtung gesetzt (linke Seite F 2), so erhält *Oliveira* eine Beziehung für die Förderrate eines RWDR (F 3). In Bild 11 sind die zur Gleichung F 2 gehörigen Flächen schraffiert dargestellt. Die rechte Fläche A_{BoSe} entspricht dem Integral der Normalspannungen, die elastische Kräfte in Richtung Stirnseite auf den Fluidfilm ausüben. Wobei die Differenz von Pressung und Normalspannungsverlauf A_{N2_P} , den Widerstand der Fluidbewegung in Richtung Stirnseite darstellt (linke Seite der Gleichung). Bei Annahme, dass sich die Fluideigenschaften innerhalb der Dichtzone nicht ändern, ist die Förderrate nach *Oliveira* nur von einem Funktional abhängig, welches durch den Fluidfilmdickenverlauf in der Dichtzone gegeben ist.

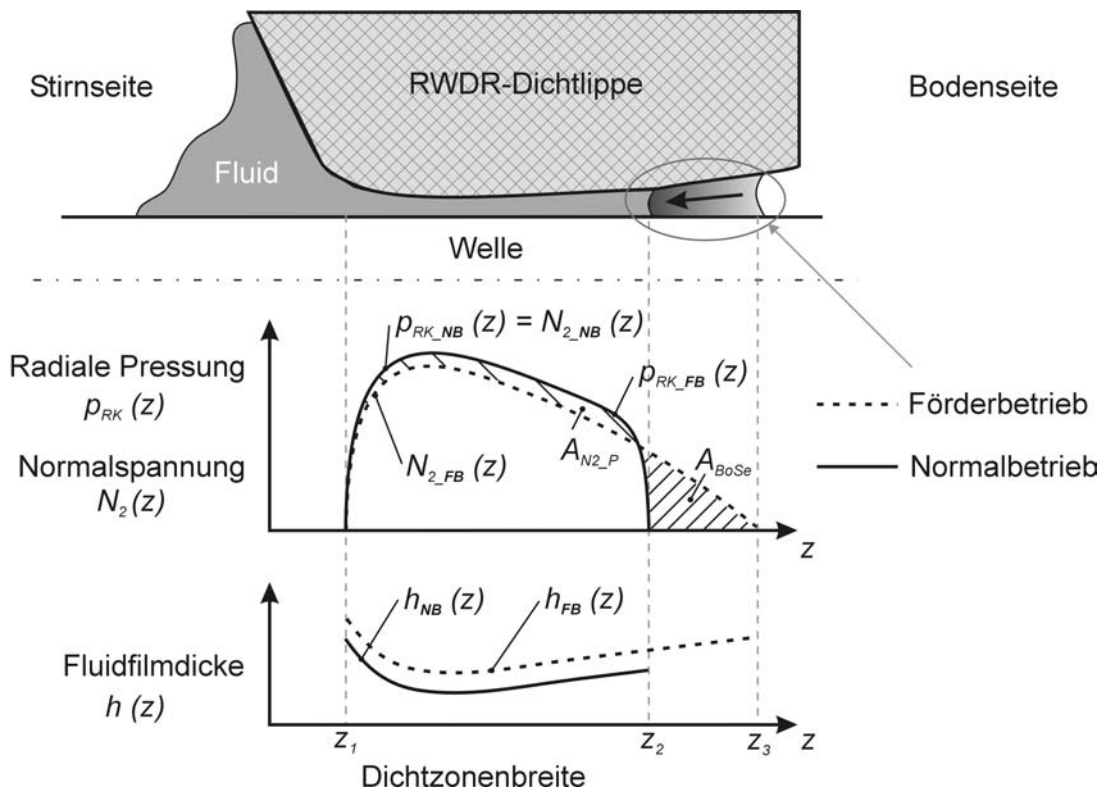


Bild 11: Normal- und Förderbetrieb nach Oliveiras Dicht- und Schmierungshypothese; Normalbetrieb (NB): Radiale Pressung gleich Normalspannung; Förderbetrieb (FB): Radiale Pressung ungleich Normalspannung und zusätzlicher Normalspannungen im Bereich z_2 bis z_3

Kommentar:

Die extremen Bedingungen in der Dichtzone von RWDR lassen eine rein Newtonsche Beschreibung des Fluidverhaltens für nicht geeignet erscheinen. Erstmals werden über die rein viskose Betrachtung hinausgehend auch elastische Eigenschaften des Fluids beachtet. Aufgrund der Annahme, dass die lokale Normalspannungsdifferenz im Normalbetrieb identisch mit der lokalen Pressungsverteilung ist, gelingt *Oliveira* eine einfache Formulierung des Fluidverhaltens in der RWDR-Dichtzone. Im Förderbetrieb ergibt die Annahme, dass auf der Bodenseite ein fluidgefüllter Bereich existiert, in dem Normalspannungsdifferenzen vorliegen, die nur in axialer Richtung wirken und eine Förderung des Fluids in Richtung Stirnseite hervorrufen, ebenso eine griffige Formulierung.

Eine versuchstechnische Verifizierung des Einflusses der Normalspannungen im Fluid auf Dicht- und Schmierungsfunktion von RWDR wäre erstrebenswert. Auch werden in der Arbeit von *Oliveira* die Oberflächen der Reibpartner nicht berücksichtigt und es erfolgt keine Beachtung der Fluid/Luft-Grenzfläche auf der Bodenseite.