

4 Schmierungszustände in der Dichtzone von RWDR

Wie aus den Betrachtungen aus dem letzten Kapitel hervorgeht, basieren die am meisten verbreiteten Erklärungsmodelle für die Funktionsbeschreibung von RWDR auf der reinen Hydrodynamik. Es muss allerdings bei diesen extremen Bedingungen in der Dichtzone (Bild 5) die Frage gestellt werden, ob sich wirklich ein hydrodynamischer Fluidfilm aufgrund existierender Mikro- und/oder Makroabweichungen vom parallelen Zustand der Oberflächen aufbaut, und ob dieser Fluidfilm eine ausreichende Tragfähigkeit besitzt, die Wellenoberfläche von der Elastomeroberfläche zu trennen.

In diesem Kapitel wird diese allgemein getätigte Annahme einer genaueren Betrachtung unterzogen. Es werden Versuche vorgestellt und deren Ergebnisse diskutiert, die Aussagen über die Reibungszustände in der Dichtzone von RWDR geben.

4.1 Betriebsparameter der RWDR-Dichtzone

Die in Bild 5 angegebenen Bedingungen in der Dichtzone von RWDR stellen erste Anhaltswerte dar, um hervorzuheben, dass die Belastungen von Reibpartner und Fluid sehr hoch sind. Eine Übersicht der Parameter, welche die Vorgänge in der Dichtzone beeinflussen, ist in Tabelle 1 gegeben.

Die Materialzusammensetzung und -Eigenschaften der drei Reibpartner sind komplex. Der RWDR besteht aus einem gefüllten Elastomer, welches ein ausgeprägtes Relaxationsverhalten und eine Elastizität aufweist, die von der Dynamik der Belastung abhängt. Hinzu kommt eine Querschnittsgeometrie, die sich bei der Montage durch die Aufweitung auf einen größeren Durchmesser verändert und eine radiale Pressung auf die Wellenoberfläche verursacht. Die eingesetzten Wellen sollen eine drallfreie Rauheitsstruktur besitzen, wenn eine drehrichtungsunabhängige Dichtfähigkeit gefordert ist. Die Oberfläche ist speziell für höhere Umfangsgeschwindigkeiten gehärtet ausgeführt, um den Verschleiß der Welle gering zu halten. Auftretender Verschleiß an Welle und Elastomer verändert die geometrischen Bedingungen in der Dichtzone, welches einen Einfluss auf die Pressungs- und Fluidfilmdickenverteilung hat. Handelsübliche Schmierfluide enthalten eine Vielzahl von

Additiven, welche Fließeigenschaften und Wechselwirkungen mit den Reibpartnern beeinflussen.

Die Anordnung von RWDR zu Welle (Koaxialität und Schiefstellung) besitzen einen direkten Einfluss auf die Dichtzonenparameter. Eine statische Exzentrizität und eine Schiefstellung verursachen eine zusätzliche statische Be- und Entlastung in Abhängigkeit der Lage der Dichtlippe zur Welle. Wohingegen eine dynamische Exzentrizität eine umlaufende zusätzliche dynamische Belastung für den RWDR darstellt.

Die Wechselwirkungen der Reibpartner untereinander und mit der Umwelt (z. B. Luft) rufen eine kontinuierliche Veränderung der Vorgänge in der Dichtzone hervor. Die Intensität der Wechselwirkungen wird durch die aktuellen Betriebsbedingungen und die Betriebsphasen bestimmt.

Tabelle 1: RWDR/Welle/Fluid-Parameter

Parameter	RWDR	Welle	Fluid
Materialart und -Eigenschaften	Elastomercompound Elastizität (statisch, dynamisch), Wärmeausdehnungskoeffizient, Relaxationsverhalten, Kriechen	Metall, Festigkeit, Beschichtung	additiviertes Schmierfluid, Viskosität, Normalspannungsdifferenzen
Oberflächeneigenschaften	Härte, Rauheit, Oberflächenstruktur (z. B. Welle: Drall), Verschleißverhalten (z. B. Werkstoffermüdung)		-
Geometrie	komplexe Querschnittsgeometrie	zylindrisch	-
Anordnung	Relativgeschwindigkeit (Umfangsrichtung und axial), statische/dynamische Exzentrizität, Schiefstellung		
Wechselwirkungen	<i>Fluid-Festkörper:</i> Benetzung, chemische Stabilität (Volumen- und Härteänderung), Reibung (Grenzschubspannung), Verschleiß <i>Festkörper-Festkörper:</i> Kontakt, Reibung, Verschleiß <i>Fluid-Umgebung:</i> verdampfen, oxidieren, Medien lösen ineinander <i>Festkörper-Umgebung:</i> oxidieren		
Dichtzonenparameter	radiale Pressung, Scherung/Schubbelastung, Fluidfilmdicke, Dichtzonen-temperatur, Schmierstoffangebot, Verschleiß		
Betriebsparameter	Wellendrehzahl, Druck und Temperatur innerhalb des Gehäuses bzw. des zugeführten Schmierfluids, Umgebung (Medium, Temperatur, Druck, Schmutz), Art des Betriebs (Anschaltdauer, Starts/Stops, Drehzahl-durchläufe, Stillstandszeiten, z. B. stationärer ggü. mobilem Betrieb)		
Betriebsphasen	Einlauf, normale Betriebsphase, Leckage/Ausfall		

4.2 Abschätzung der Fluidfilmdicke im Normalbetrieb

Für die Abschätzung der Fluidfilmdicke werden Reibmoment und Dichtzontemperatur für unterschiedliche Betriebsbedingungen gemessen. Diese Versuche können am Horizontal-Prüfstand des Arbeitsbereiches Konstruktionstechnik II der TUHH (Bild 13) durchgeführt werden.

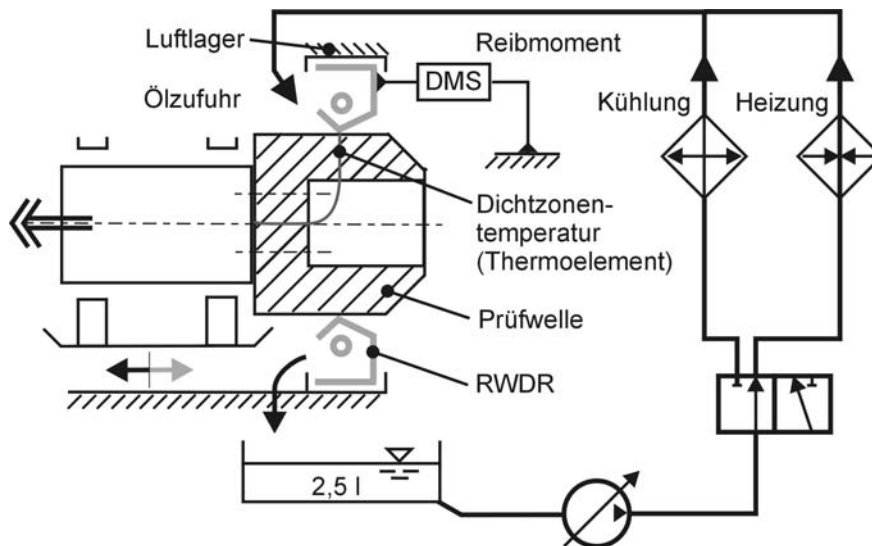


Bild 13: Horizontal-Prüfstand

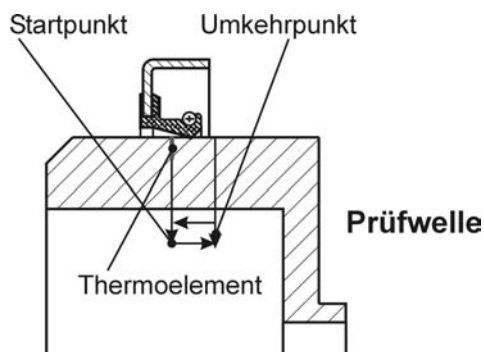


Bild 14: Temperaturmessvorgang

Der Prüfstand ermöglicht die gleichzeitige Messung des Reibmomentes und der Dichtzontemperatur. Das Reibmoment, welches von der Welle und dem Fluid auf den RWDR übertragen wird, kann über den aerostatisch gelagerten RWDR an einem Widerlager der RWDR-Aufnahme abgenommen werden. Die Messung erfolgt nach dem Biegebalken-Prinzip mit temperaturkompensierten Dehnungsmessstreifen (DMS). Die Dichtzonen-

temperatur wird mit einem in die Welle eingebrachten Thermoelement erfasst, welches gegenüber der Welle thermisch isoliert ist. Die Abmaße des Thermoelementes betragen ca. 60 μm in axialer Richtung und 200 μm in Umfangsrichtung. Durch die geringe Abmessung in axialer Richtung wird sichergestellt, dass sich das gesamte Thermoelement während der Messung innerhalb des Dichtzonenbereiches des RWDRs befindet und die Temperatur des Fluidfilmes erfasst, was durch thermische Isolierung des Thermoelementes zur Welle erreicht wird. Ein Temperaturmessvorgang erfolgt durch axiales Verfahren der Welle,

wobei das Thermoelement mit einer geringen Axialgeschwindigkeit von max. 10 $\mu\text{m/s}$ durch die Dichtzone bewegt wird (Bild 14).

Die Schmierung der Dichtstelle wird durch eine Fluidzuführung oberhalb der Dichtstelle realisiert, so dass ein konstanter temperierter Fluidstrom die Stirnseite des RWDR benetzt. Um die Reibmomentmessung nicht zu beeinflussen, liegt die Oberfläche des Ölsumpfes unter der Wellenunterkante. Eine genauere Beschreibung des Horizontal-Prüfstandes kann der Dissertation von *Wollesen* [WON93] entnommen werden.

Die Fluidfilmdicke soll zunächst für den Normalbetrieb abgeschätzt werden. Normalbetrieb bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der RWDR seine Dichtfunktion erfüllt und auf seiner Bodenseite keine Fluidoberfläche sichtbar ist.

4.2.1 Versuchsdurchführung

Tabelle 2: Versuchsparmeter der Reibmoment und Dichtzonentemperaturmessungen

Wellendurchmesser	80 mm
Wellenwerkstoff	oberflächengehärteter Vergütungsstahl C45, 60-64 HRC
RWDR-Werkstoff	Fluorelastomer
Schmierfluid	mineralölbasiertes Hydrauliköl HLP 68
Mischöltemperatur	70°C
Umfangsgeschwindigkeit	4-12 m/s

Der Beginn der Versuchsdurchläufe (Versuchsparmeter in Tabelle 2) erfolgt nach einer achtstündigen Einlaufphase. Die in Bild 15 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen die gemessenen Reibmomente während des Normalbetriebes ohne Druckbeaufschlagung und bei einer Mischöltemperatur von 70°C. Alle gemessenen Reibmomente im untersuchten Geschwindigkeitsintervall liegen nah beieinander in einem Bereich von 0,51-0,56 Nm. Ein wesentlicher Grund für diese ähnlichen Ergebnisse sind die identischen Umgebungsbedingungen bei allen Geschwindigkeiten, woraus folgt, dass die Dichtzonentemperatur mit der Umfangsgeschwindigkeit steigt und ein heißer laufender RWDR bei höherer Geschwindigkeit auf vergleichbarem Reibmomentniveau laufen kann.

Die zugehörigen Dichtzonentemperaturen sind ebenfalls in Bild 15 an der Sekundärachse aufgetragen. Bei ähnlichen Reibmomenten und konstanten Betriebsbedingungen entscheidet allein die Drehzahl über die eingebrachte Leistung in die Dichtzone und es ergibt sich ein fast linear steigender Dichtzonentemperaturverlauf über der Umfangsgeschwindigkeit.

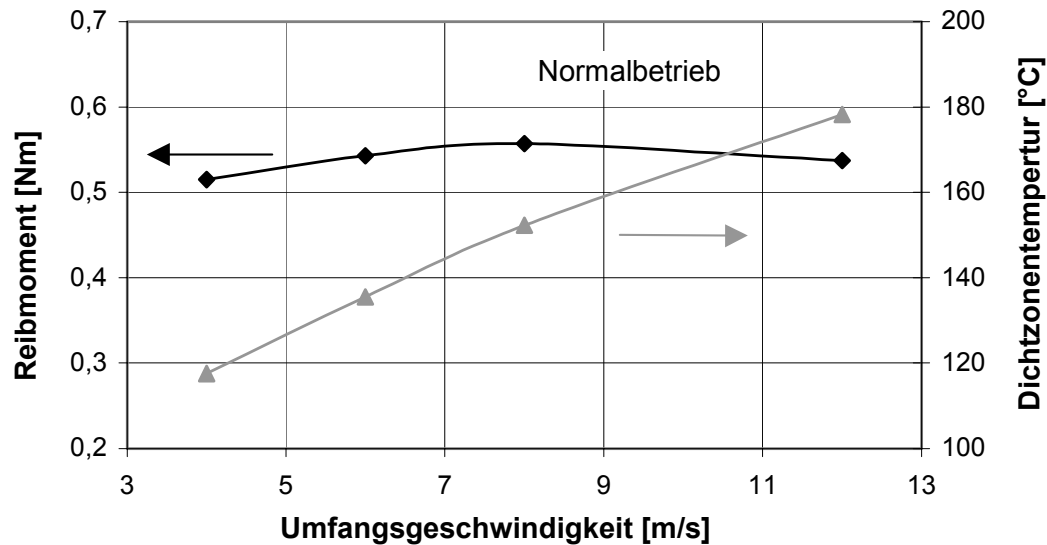


Bild 15: Gemessene Reibmoment- und Dichtzonentemperaturwerte

4.2.2 Fluidfilmdicke im Normalbetrieb

Die Fluidfilmdicke wird definiert als der Abstand zwischen den plateauartigen Strukturen auf der Elastomeroberfläche bis zu der mittleren Rauheitslinie der Welle (Bezugslinie des Mittenrauheitswertes R_a). Um die Fluidfilmdicke bei reiner hydrodynamischer Reibung abzuschätzen, wird der Newtonsche Ansatz für die einfache Scherströmung angewendet. Es gilt die Proportionalität zwischen der Scherrate u/h und der Schubspannung τ .

$$\tau = \eta \frac{u}{h} \quad F\ 4$$

Zur Abschätzung der Fluidfilmdicke wird F 4 umformuliert und τ durch den Quotienten der in der Scherebene wirkenden Reibkraft und gescherten Fläche ersetzt. Um den Reibmomentmesswert M direkt einzubringen, wird die Formel mit dem Wellenradius r erweitert.

$$h = \frac{\eta u r A}{M} \quad F\ 5$$

Die dynamische Viskosität η kann aus der gemessenen Viskosität/Temperatur-Kurve für das verwendete Schmierfluid HLP 68 ermittelt werden (Bild 16). Die gescherte Fläche A ergibt sich aus der Dichtzonenbreite b (0,15 mm) und dem Wellenumfang $r\pi$ (250 mm). Vernachlässigte man die Oberflächenrauheit beider Reibpartner, so müsste die gesamte

Dichtzonenfläche $A = br\pi$ als gleichmäßig gescherte Fläche berücksichtigt werden. Eine Abschätzung dieser Art führt jedoch zu einer Überschätzung der Fluidfilmdicke.

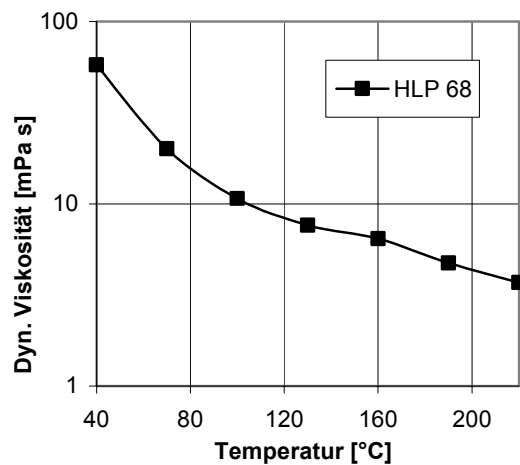


Bild 16: Viskosität/Temperatur-Kurve für HLP 68

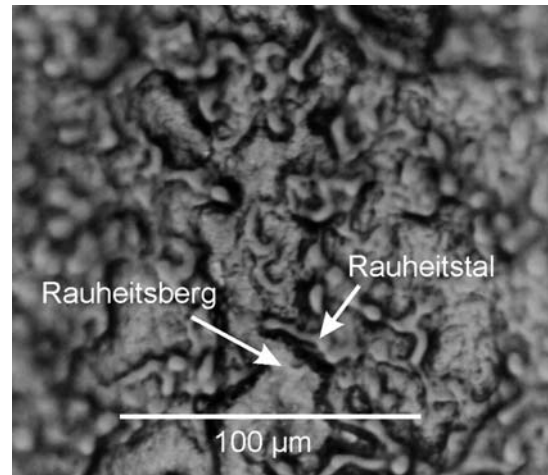


Bild 17: Vergrößerte Darstellung einer verschlissenen RWDR-Dichtzone (4.000 km) [WIE00a]

Beobachtungen zeigen, dass die wirkliche „Berührfläche“ von RWDR und Welle im Stillstand erheblich kleiner ist, als die gesamte Dichtzonenfläche. Nakamura [NKM87] beobachtet die Dichtzone durch eine hohle Glaswelle mit einer Vergrößerungsoptik. Dichtende RWDR besitzen stets eine reale Kontaktfläche von kleiner als 5% der gesamten Dichtzonenfläche. Gabelli und Poll [GBL92] untersuchen ebenfalls die Oberfläche von RWDR und stellen die Oberflächenstruktur in dreidimensionaler Form dar, auch diese Autoren fanden eine wahre Kontaktfläche, die deutlich kleiner als 50% der Dichtzonenfläche ist. In Bild 17 ist die Oberfläche eines in diesem Versuch getesteten RWDR dargestellt. Es ist eine grobe Rauheitsstruktur zu erkennen, die sich aus plateauartigen Erhebungen (Rauheitsberge) mit durchzogenen Kanälen (Rauheitstäler) zusammensetzt.

Bei der Abschätzung der Fluidfilmdicke ist davon auszugehen, dass die Bereiche der Rauheitserhebungen den wesentlichen Anteil an der Reibung verursachen, da die erzeugten Scherspannungen im Fluid proportional mit der Zunahme der Fluidfilmdicke abnehmen und die Rauheit der Elastomeroberfläche groß ist im Verhältnis zur Fluidfilmdicke. Die Fluidfilmdicken werden für diesen Versuch beispielhaft mit einer aktiv gescherten Fläche von 10% und 50% bestimmt (Bild 18).

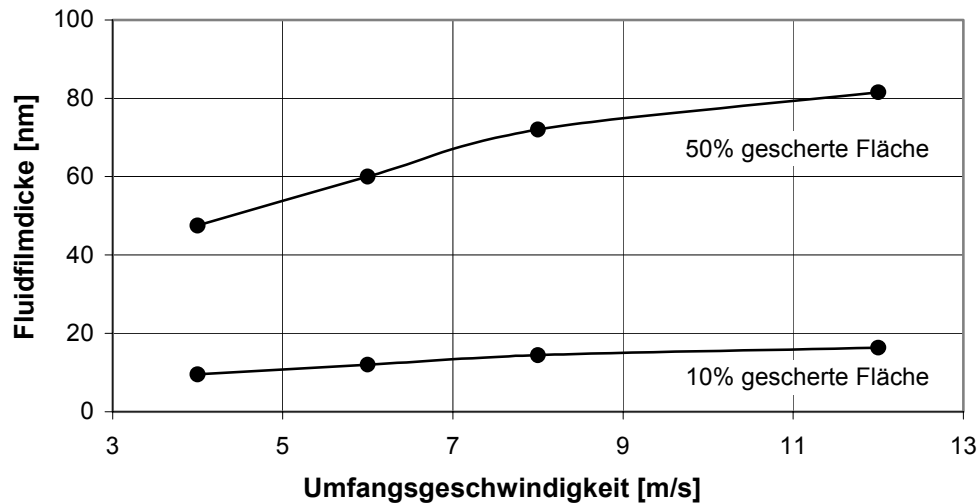


Bild 18: Abgeschätzte Fluidfilmdicken

Es ergibt sich für beide Oberflächen im betrachteten Geschwindigkeitsbereich von 4-12 m/s eine Fluidfilmdicke kleiner als 100 nm. Wird eine aktive gescherte Fläche von 10% angenommen, ergeben sich sogar Werte kleiner als 20 nm. Diese abgeschätzten Werte sind sehr gering. Allerdings basieren diese Werte auf einer einfachen aber legitimen Abschätzung der Scherung des Fluids. Auch in der Literatur lassen sich Hinweise auf die Problematik der Bestimmung von Reibungswerten mit der rein hydrodynamischen Betrachtung der RWDR-Schmierung finden. *Bavel et al.* [BVL96] haben eine mikrohydrodynamische Berechnung von Größen der RWDR-Dichtzone durchgeführt. Die Autoren haben Fluidfilmdicken im Bereich von μm -Bereich bestimmt, aber dabei nur sehr geringe Reibmomentwerte erhalten (z. B. 0,053 Nm bei 4 m/s). Dies erscheint verständlich, wenn beachtet wird, dass der Zusammenhang zwischen Fluidfilmdicke und Scherung aus F 4 stets gilt, wenn von einem Newtonschen Verhalten des Fluids ausgegangen wird und die Drücke gering sind.

Die Besonderheit der sehr hohen Scherraten und geringen Abmessungen der RWDR-Dichtzone soll an einem Größenordnungsvergleich beispielhaft gezeigt werden. Ausgehend von einer Scherrate 10^8 1/s , die bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 10 m/s einer Fluidfilmdicke von 100 nm entspricht, ergäbe sich für einen makroskopischen Spalt von 1 cm unter Beibehaltung der Scherrate eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Oberflächen von 10^6 m/s bzw. 3,6 Millionen km/h. Dieser Vergleich gibt ein Gefühl für die extremen Belastungen in der Dichtzone.

4.3 Abschätzung der Fluidfilmdicke im Förderbetrieb

Der Förderbetrieb von RWDR ist kein natürlicher Betriebszustand. Es ist vielmehr eine Möglichkeit ohne eine Beeinflussung von Betriebsparametern die Reibungssituation einer RWDR/Welle-Paarung zu ändern und gleichzeitig Informationen über die Förderfähigkeit der Paarung zu erhalten. Mit dem Begriff Förderfähigkeit ist der Fluidtransport von der Bodenseite zur Stirnseite benannt.

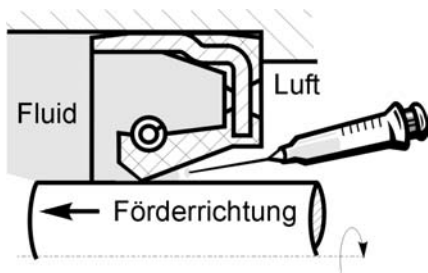


Bild 19: Fluidzugabe

4.3.1 RWDR-Förderbetrieb

Ein RWDR mit guter Dichtfunktion, d. h. es ist im Betrieb keine Fluidoberfläche auf der Bodenseite sichtbar, besitzt die Fähigkeit, Fluid von der Bodenseite auf die Stirnseite zu fördern. Dieses Phänomen wurde von Arai [ARA76] beobachtet. Um einen RWDR in den Förderzustand zu versetzen, kann eine kleine Menge Fluid auf der

Bodenseite direkt in die unmittelbare Nähe der Dichtzone zugegeben werden (Bild 19). In Bild 20 ist dargestellt, wie sich Reibmoment und Dichtzonen-temperatur während eines Fördervorganges verhalten. Durch die verbesserten Schmierungsbedingungen in der Dichtzone sinkt das Reibmoment.

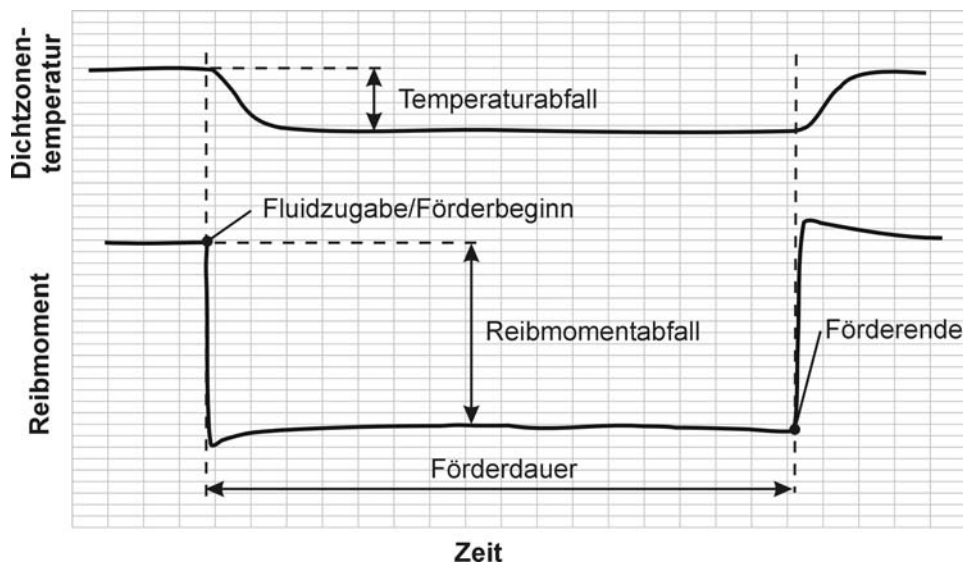


Bild 20: Reibmoment- und Dichtzonen-temperaturverlauf während eines Fördervorganges [WIE98b]

Dies geschieht schlagartig in dem Augenblick, in welchem das Fluid zugegeben wird. Es wird dabei vorausgesetzt, dass das Fluid benetzend auf die RWDR- und Wellenoberfläche wirkt. Die Reaktion der Temperatur in der Dichtzone ist deutlich träger als die des Reibmomentes aufgrund der gespeicherten Wärme im Wellenmaterial. Die langsamere Anpassung der Temperatur verursacht nach dem Förderbeginn ein vorübergehendes Absacken des Reibmomentes und nach dem Förderende eine Reibmomentüberhöhung, wie aus dem Messwertschrieb ersichtlich ist (Bild 20). Während der Förderung verhält sich das Reibmoment sehr stabil.

Wie schlagartig das Reibmoment bei einer bodenseitigen Fluidzugabe absinkt, kann durch eine zeitlich hochaufgelöste Betrachtung des Reibmomentsignals beobachtet werden. Es wird deutlich, dass das Reibmoment bei der Zugabe während *einer* Umdrehung auf den Förderwert sinkt (Bild 21). Dies bedeutet, dass der günstigere Schmierzustand der Förderung in sehr kurzer Zeit erreicht wird. Die periodischen Schwankungen des Reibmomentes sind auf Rundlaufungenauigkeiten der Welle in Kombination mit einer möglichen geringen Schiefstellung des RWDR zurückzuführen. Die Betriebsdrehzahl von 478 1/min ist im Normalbetrieb an der Periodizität des Signals wieder zu erkennen. Direkt nach Zugabe von Fluid befindet sich das Signal in einem etwas höherfrequenten Einschwingvorgang, da durch die abrupte Reibmomentänderung Störungen eingebracht werden.

Reibmomentabsenkungen von bis zu 40%, wie in Bild 21 dargestellt, sind dabei für gut fördernde RWDR durchaus erreichbar. Die Verringerung des Reibmomentes erfolgt durch eine bessere Schmierungssituation in der Dichtzone und diese kann durch eine vergrößerte Fluidfilmdicke und/oder bessere Schmierung der bodenseitigen Bereiche der Dichtzone erreicht werden.

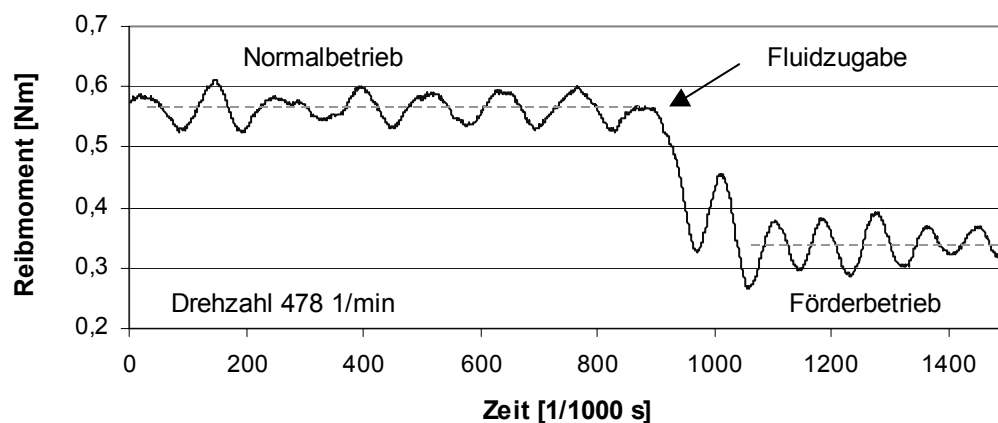


Bild 21: Zeitlich hochaufgelöstes Reibmomentsignal im Moment der Fluidzugabe

4.3.2 Fluidfilmdicke im Förderbetrieb

Die Abschätzung der Fluidfilmdicke für den Förderbetrieb wird in der gleichen Weise durchgeführt wie für den Normalbetrieb (Abschnitt 4.2). In Bild 22 sind die gemessenen Reibmoment- und Dichtzonentemperaturwerte dargestellt. Die Betriebsbedingungen für den Normal- und Förderbetrieb sind absolut identisch bis auf die Zugabe von Fluid auf der RWDR-Bodenseite.

Wie erwartet liegen die Reibmomentwerte während der Förderung deutlich unter den Werten des Normalbetriebs. In dem untersuchten Geschwindigkeitsbereich von 4-12 m/s ergeben sich Reibmomentabsenkungen in einem Bereich von 27% (6 m/s) bis 19% (12 m/s). Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die Differenz von Normalmoment zu Fördermoment mit steigender Umfangsgeschwindigkeit kleiner wird. Da eine Geschwindigkeitserhöhung einen unterschiedlichen Effekt auf den Reibmomentverlauf besitzt, lässt dies den Schluss zu, dass verschiedene Reibungsanteile im Förder- bzw. Normalbetrieb wirken. Angenommen, dass durch die Zugabe von Fluid die Fluidfilmdicke zunimmt, so vermindert sich das Reibmoment (wie gemessen), die eingebrachte Verlustleistung nimmt ab und somit die Temperatur in der Dichtzone, was zu einer Erhöhung der Viskosität führt. Dies ergibt dann einen kleinen Anstieg des Reibmomentes wie der in Bild 20 beschriebene Kurvenverlauf.

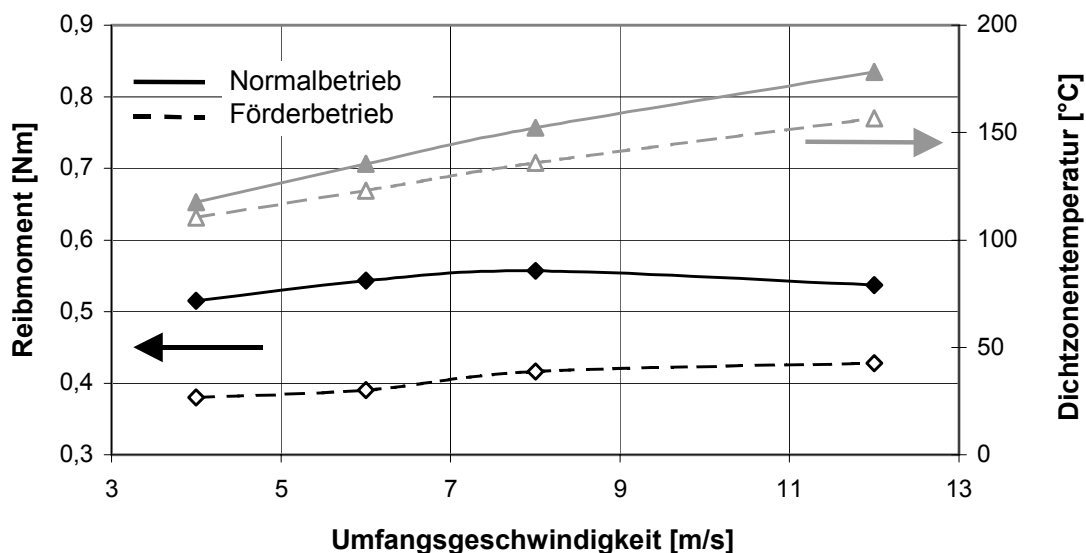


Bild 22: Reibmoment- und Dichtzonentemperaturverlauf für Normal- und Förderbetrieb

Die quasi lineare Abhängigkeit der Dichtzontemperatur von der Verlustleistung ist an der zunehmenden Absenkung der Dichtzontemperatur mit steigender Umfangsgeschwindigkeit zu erkennen (Anhang Bild A 1 u. Bild A 2).

Die Fluidfilmdicken während der Förderung sind in Bild 23 dargestellt. Während des Förderbetriebs ergibt die Abschätzung aufgrund des abgesenkten Reibmomentniveaus und der vergrößerten Viskosität deutlich größere Fluidfilmdicken als im Normalbetrieb (Steigerungen von 46%-67%). Daraus ergibt sich die folgende Frage: Kann unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse während der Förderung von einer reinen hydrodynamischen Reibung ausgegangen werden oder besitzen auch unter diesen verbesserten Schmierbedingungen weitere Reibungskomponenten einen Einfluss? Die Größenordnungen der errechneten Werte für die Fluidfilmdicken liegen allesamt unter 140 nm. Dieser Wert befindet sich mindestens eine Größenordnung unter der Rauheit von Wellen- und Elastomeroberfläche, wobei letztere noch deutlich rauer sein kann als die Welle (Bild 17). Bei derart geringen Fluidfilmdicken erhebt sich die Frage, ob wirklich die reine Scherung des Fluids als alleiniger Reibungsanteil wirkt, oder ob weitere Reibungsmodi in der Dichtzone existieren? Dieser Frage wird im Folgenden nachgegangen.

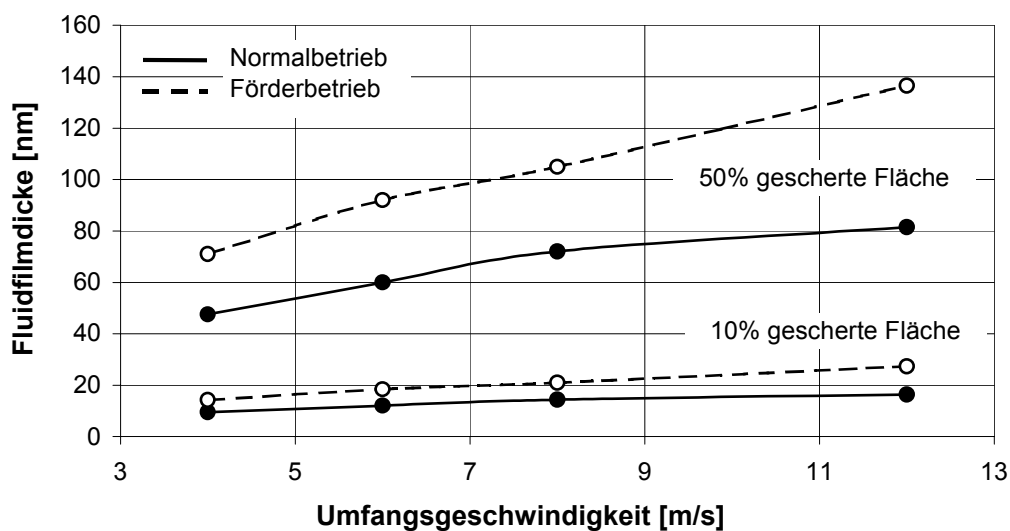


Bild 23: Fluidfilmdicke im Förder- und Normalbetrieb

4.4 Einfluss der Viskosität auf das Reibmoment

Um eine Antwort auf die Zusammensetzung der Reibung zu erhalten, wird versucht die Größenordnung der einzelnen Reibungsanteile zu bestimmen. Dazu wird zusätzlich zum Wechsel zwischen Förder- und Normalbetrieb der Einfluss von Viskositätsänderungen auf das Reibmoment betrachtet. Der nächste Versuch untersucht den Viskositätseinfluss des Fluids auf das Reibmomentniveau im Normal- und Förderbetrieb.

4.4.1 Zusammensetzung der Versuchsfluide

Um fluidspezifische Einflüsse möglichst gering zu halten, werden Testfluide ausgewählt, die aus identischen Komponenten bestehen. Sie unterscheiden sich nur in den Konzentrationen der Anteile. Es werden keine handelsüblichen, komplett additivierten Komponenten eingesetzt, sondern um die Anzahl der Komponenten zu reduzieren, werden nur zwei Grundkomponenten miteinander vermischt: ein unadditiviertes Basisöl (Telura 323, Esso) und ein Viskositätsindex-Verbesserer (VI-Verbesserer Viscoplex 12-410, Rohmax) in zwei Konzentrationen (5 und 10 Gew.-%). Der VI-Verbesserer besteht aus dem Polymer Polyalkylmethacrylate (PAMA) mit einem Molekulargewicht $M_W = 140.000$ g/mol (molekularer Aufbau von PAMA in Bild 33). In Bild 24 sind die Viskosität/Temperatur-Abhängigkeiten der Testfluide zusammengestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie der höhere Polymeranteil die Viskosität der Testfluide steigert. Zum Vergleich sind ebenfalls die Viskositätswerte des schon vorgestellten HLP 68 gezeigt, um zu demonstrieren, dass die Testfluide in einem für RWDR typischen Viskositätsbereich liegen.

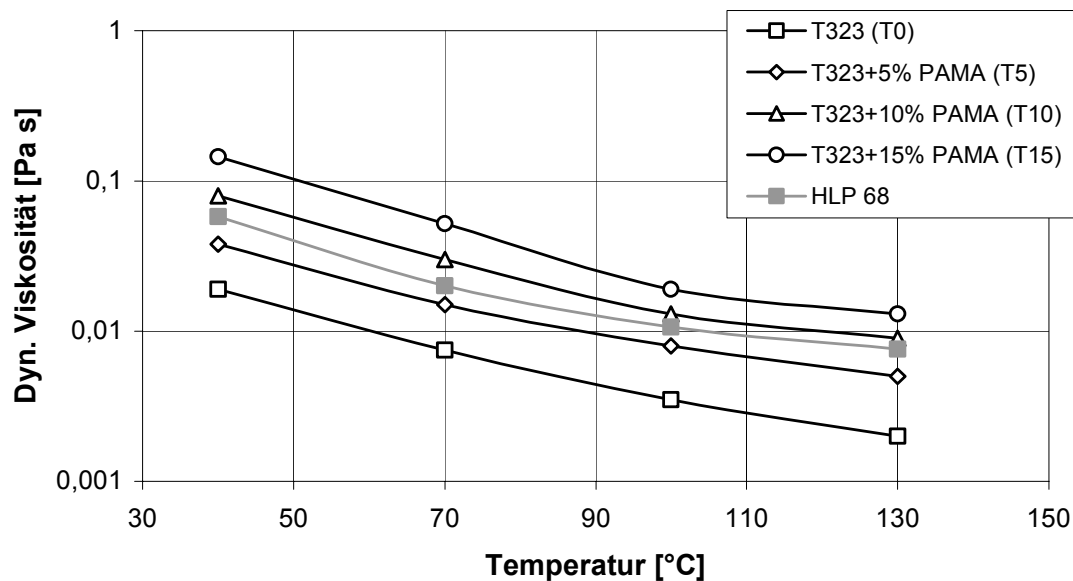


Bild 24: Viskosität/Temperatur-Abhängigkeit der Testfluide

An den übereinander liegenden Kurven ist die Konzentrationserhöhung der Polymeranteile ersichtlich. In diesem Fall geht die Viskositätserhöhung logarithmisch gleichmäßig mit den 5%igen Konzentrationserhöhungen einher, was nicht zwingend erforderlich ist bei makromolekularen Lösungen [PAH95]. Der Einfluss des VI-Verbesserers ist gut bei 130°C erkennbar, da hier die Kurven des reinen Basisöls ohne Polymerzusatz (T323, ungefüllte Quadrate) zu den übrigen Kurven deutlich auseinanderliegen.

4.4.2 Versuchsdurchführung und -Ergebnisse

Tabelle 3: Versuchsp Parameter für die Messung des Viskositätseinflusses

Wellendurchmesser	80 mm
Wellenwerkstoff	oberflächengehärteter Vergütungsstahl C45, 60-64 HRC
RWDR-Werkstoff	Fluorelastomer
Schmierfluid	Basisöl T323 mit 0%, 5%, 10% PAMA-Anteil
Umfangsgeschwindigkeit	4 m/s

Um den Viskositätseinfluss möglichst isoliert zu betrachten, werden Mischfördiversuche durchgeführt (Versuchsp Parameter in Tabelle 3). Es erfolgt die Montage eines bereits eingelaufenen RWDR, dem bei dieser Art von Versuchen nacheinander mehrere Fluide von der Bodenseite zugeführt werden, um Reibmoment- und Dichtzonen temperaturwerte während des Förder- und Normalbetriebs zu beobachten. Vorversuche mit unterschiedlichen RWDR für die einzelnen Testfluide ergeben eine große Streuung der Messwerte, daher werden in dieser Versuchsreihe *einem* RWDR mehrere Fluide zugeführt. Ursachen für die Streuung der Ergebnisse sind toleranzbehaftete RWDR und Wiederholgenauigkeit der Montage. Die Differenzen sind so groß, dass Unterschiede zwischen den Fluiden nicht klar herausgearbeitet werden können.

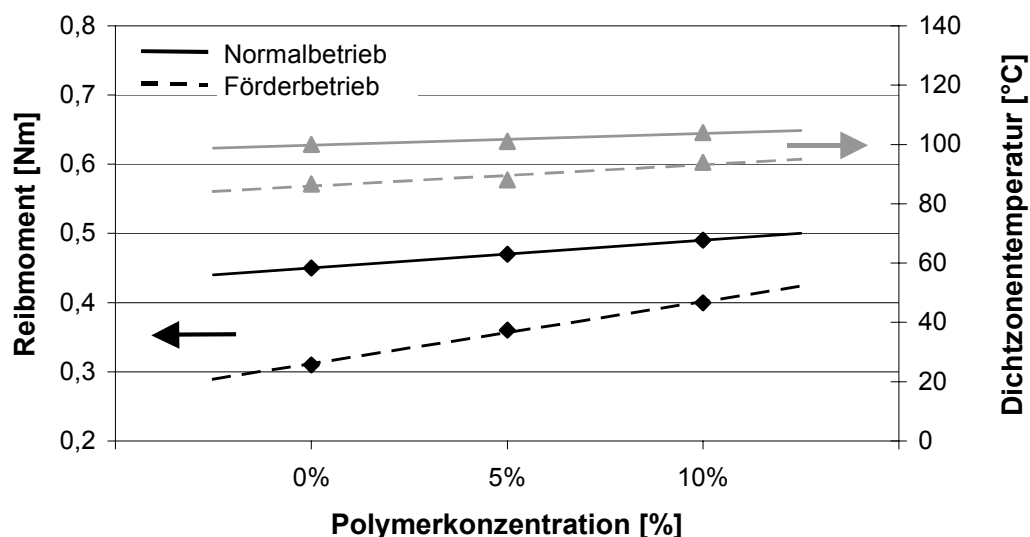


Bild 25: Reibmomentverhalten in Abhängigkeit der Polymerkonzentration

Um Aussagen einem bestimmten Fluid zuzuordnen, wenn ein RWDR für mehrere Fluide eingesetzt wird, ist es bei diesen Versuchen wichtig, dass sich nur ein Fluid zur Zeit in der Dichtzone befindet. Zum „Spülen“ der Dichtzone werden deshalb nach einem Fluidwech-

sel mehrere Fördervorgänge mit dem neuen Fluid durchgeführt, bevor die eigentlichen Messwerte aufgenommen werden.

Weiterhin erfolgt keine Mischölschmierung der RWDR auf der Stirnseite. Die Schmierung wird allein durch das auf der Bodenseite zugegebene Fluid übernommen. Diese besondere Art der Versuchsdurchführung wird gewählt, damit keine Beeinflussung des Reibmomentes und der Dichtzonentemperatur durch eine Mischölszuführung verursacht werden kann.

Eine Erhöhung der Viskosität durch Steigerung der Polymer-Konzentration (Bild 24) verursacht eine Steigerung des Reibmomentes im Normal- und im Förderbetrieb, wobei sich die Viskositätserhöhung im Förderbetrieb stärker auf das Reibmoment auswirkt als im Normalbetrieb. Die Ergebnisse sind in Bild 25 dargestellt und es ist deutlich, die größere Steigung der Trendlinie für die Reibmomentwerte der Förderung (gestrichelte schwarze Linie) im Vergleich zu den Reibmomenten bei Normalbetrieb (durchgezogene schwarze Linie) zu erkennen. Die Messungen der Dichtzonentemperaturen (graue Linien) bestätigen die Reibmomentmessungen. Bezogen auf das Normalmoment ohne Polymerzusatz stellen sich die Ergebnisse folgendermaßen dar:

4.4.3 Diskussion der Ergebnisse

Der Fluidwechsel von $T0$ zu $T5$ erzeugt im Normalbetrieb eine Reibmomentsteigerung von 4,4%, wohingegen im Förderbetrieb die Steigerung mit 12,9% dreimal so groß ausfällt (Tabelle 4). Analoges Verhalten ist beim Wechsel von $T0$ auf $T10$ zu beobachten, das Fördermoment steigt um 29% und das Reibmoment im Normalbetrieb nur um 12,9%. So betrachtet, wirkt sich die Viskositätsänderung um ein Mehrfaches stärker im Förderbetrieb als im Normalbetrieb aus. Diese Beobachtungen lassen ebenfalls den Schluss zu, dass nicht die Viskosität allein die Vorgänge in der Dichtzone bestimmt, sondern dass es mindestens einen weiteren Reibungsanteil außer der hydrodynamischen Reibung wenigstens im Normalbetrieb von RWDR gibt.

Tabelle 4: Reibmomentänderung durch Variation der Viskositäten

Fluidwechsel	ΔM_{NB}		ΔM_{FB}		$\Delta \eta_{NB}$		$\Delta \eta_{FB}$	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Pa s]	[%]	[Pa s]	[%]
$T0 \rightarrow T5$	0,02	4,4	0,04	12,9	0,0041	117	0,0054	117
$T0 \rightarrow T10$	0,04	12,9	0,09	29,0	0,0083	220	0,0101	237

ΔM_{NB} Reibmomentänderung im Normalbetrieb [Nm], $\Delta \eta_{NB}$ Viskositätsänderung im Normalbetrieb [Pa s]
 ΔM_{FB} Reibmomentänderung im Förderbetrieb [Nm], $\Delta \eta_{FB}$ Viskositätsänderung im Förderbetrieb [Pa s]

Der Fluidwechsel von $T0$ zu $T5$ ergibt eine Viskositätserhöhung von 117% in der RWDR-Dichtzone, wobei das Reibmoment sich nur um 4,4% erhöht. Um dieses Ergebnis zu bewerten, kann die Arbeit von *Hirano et al.* [HRO61] herangezogen werden. Die Autoren haben unter Anwendung der Gleitlagertheorie eine Beziehung zwischen der dynamischen Viskosität η und der Reibungszahl μ für RWDR hergestellt:

$$\mu = \Phi \left(\frac{\eta u}{w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad F 6$$

Φ ist ein Faktor, der die RWDR Dichtfähigkeit in Abhängigkeit von Rauheitsstruktur und Elastomereigenschaften beurteilt, w ist die durchschnittliche Flächenbelastung und u die Relativgeschwindigkeit zwischen den Gleitflächen.

Bei der Durchführung der vorgestellten Versuche wurde außer der Zuführung eines anderen Fluids auf der Bodenseite vom RWDR nichts geändert. Daraus folgt für die Gleichung F 6, dass u , w und Φ als konstant angesehen werden können. Und es ergibt sich Gleichung F 7, die für eine Viskositätsänderung die entsprechende Reibkoeffizientenänderung (μ_N , μ_F) bestimmt:

$$\mu \sim \eta^{\frac{1}{3}} \quad \longrightarrow \quad \frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} = \left(\frac{\eta_i}{\eta_{i+1}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad F 7$$

In Tabelle 5 sind die Messungen den errechneten Ergebnissen gegenübergestellt:

Tabelle 5: Ergebnis der Viskositätsvariation, Messung – Berechnung nach [HRO61]

Fluid- wechsel	Messwerte				Hirano	
	ΔM_{NB} [%]	ΔM_{FB} [%]	$\Delta \eta_{NB}$ [%]	$\Delta \eta_{FB}$ [%]	$\Delta \mu_{NB}$ [%]	$\Delta \mu_{FB}$ [%]
$T0 \rightarrow T5$	4,4	12,9	117	117	29,5	29,5
$T0 \rightarrow T10$	12,9	29,0	220	237	47,3	50,0

Wird die Beziehung von *Hirano et al.* auf die Messwerte angewandt, wird deutlich, dass die erwartete Reibmomentänderung (proportional zum Reibkoeffizienten, da die Presungsverteilung sich nicht verändert) erheblich größer ist, als die eingetretene. Nach *Hirano* müsste sich das Reibmoment beim Wechsel von $T0$ auf $T5$ um bis zu 30% erhöhen, wohingegen die Messwerte nur eine Erhöhung von 4,4% für den Normalbetrieb und 12,9%

für den Förderbetrieb aufweisen. Hieraus kann abgelesen werden, dass selbst im Förderbetrieb nicht von einer reinen hydrodynamischen Schmierung ausgegangen werden kann. Diese Schlussfolgerung wird durch die abgeschätzten Fluidfilmdicken gestützt, die selbst im Förderbetrieb nur in Größenordnungen von 45-140 nm (Bild 23) liegen.

Der gemessene Viskositätseinfluss auf das Reibmoment kann mit der Gleichung F 7 abgeschätzt werden: Er beträgt im **Normalbetrieb 15% und im Förderbetrieb 44%**. Wenn diese Zahlenwerte Gültigkeit besäßen, bedeutete dies, dass im Normalbetrieb andere Ansätze als die reine Fluidreibung zur Beschreibung der Vorgänge in der Dichtzone herangezogen werden sollten. Selbst bei Förderung, einer beiderseitig mit Fluid beaufschlagten RWDR-Dichtzone, liegt der Viskositätseinfluss auf die Reibung unter 50% und dies stellt den bestmöglichen Schmierzustand für einen RWDR dar.

4.5 Axialverschiebung der Welle

4.5.1 Wegabhängigkeit des Reibmomentsignals

In diesem Abschnitt werden Versuchsergebnisse vorgestellt, bei der die Abhängigkeit des Reibmomentsignals von der axialen Wellenposition untersucht wird. Wird die Welle während des normalen Betriebs in axialer Richtung verfahren, so sind Reibmomentschwankungen zu beobachten. Diese Schwankungen sind reproduzierbar, wie mit einem axialen Verfahren der Welle (Bild 14) in beide Richtungen in Bild 26 gezeigt ist. In der oberen Kurve ist der Fahrweg aufgenommen und die untere Kurve stellt das Reibmomentsignal dar. Jede Wellenposition besitzt einen zugehörigen Reibmomentwert, der stets wieder angefahren werden kann. Die Schwankungsbreite der Reibmomentwerte beträgt in diesem Versuch 19,4%. Während des Versuchs wird außer der Wellenposition nichts verändert, daher muss davon ausgegangen werden, dass die Reibmomentfluktuationen von der Welle hervorgerufen werden.

Das Reibmoment entsteht in der Dichtzone und die Gesamtheit von Welle/RWDR, deren Makro- und Mikro-Geometrie, das Fluid und die aktuellen Betriebsbedingungen (Temperatur, Druck, Geschwindigkeit) bestimmen die Reibungsbedingungen, welche durch eine axiale Wellenverschiebung verändert werden können. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erstreckt sich nicht auf einen bestimmten Versuch, sondern diese Form des Reibmomentsignals ist charakteristisch für die getestete Welle/RWDR-Paarung.

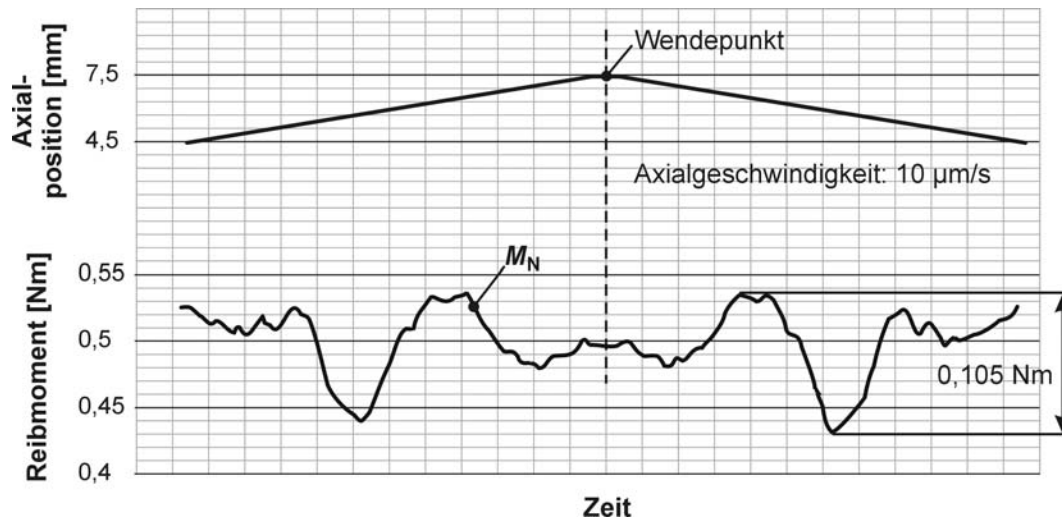


Bild 26: Reibmomentsignal bei Axialverschiebung der Welle [WIE98b]

4.5.2 Drehzahleinfluss

Wenn sich bei Axialverschiebungen ein bestimmtes Reibmomentprofil einstellt, müsste dies auch für verschiedene Geschwindigkeiten gelten. Die Frage ist, wie sich das Reibmomentprofil dabei verändert. In Bild 27 sind drei Reibmomentprofile für 300, 600 und 1200 1/min dargestellt. Die durchschnittliche Steigerung des Reibmomentes mit der Drehzahl ist klar zu erkennen und alle drei Profile besitzen große Ähnlichkeit. Darüber hinaus zeigt das Profil bei 1200 1/min eine feinere Struktur der Schwankungen als bei niedrigeren Geschwindigkeiten.

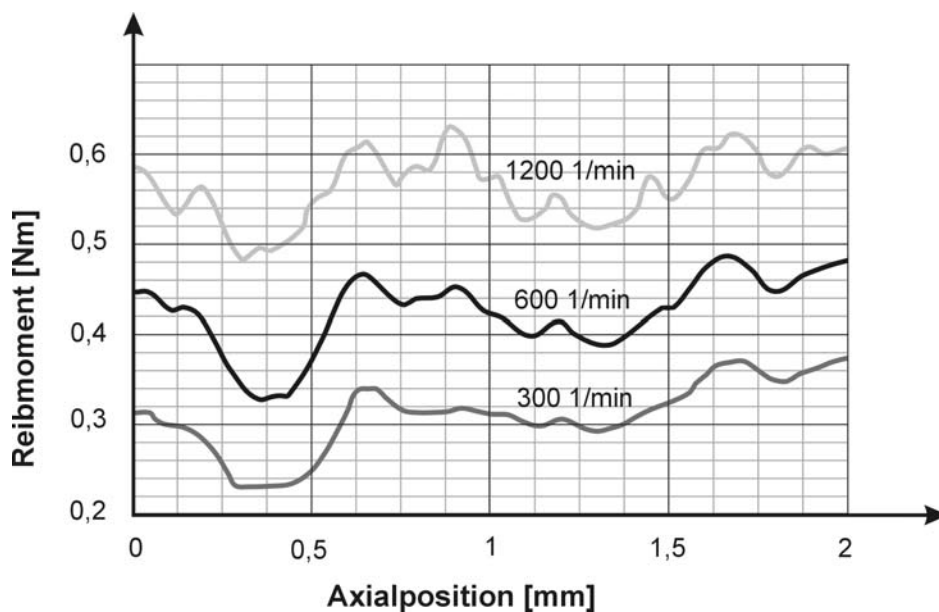


Bild 27: Reibmomentprofile bei verschiedenen Drehzahlen

4.5.3 Fluideinfluss

Um den Einfluss eines Fluidwechsels zu demonstrieren, sind in Bild 28 Reibmomentprofile von zwei verschiedenen Fluiden aufgeführt. Die getesteten Fluide weisen ähnliche Viskositäten auf (Bild A 3), sind aber unterschiedlich additiviert. Für beide Fluide wird bei allen Geschwindigkeiten ein ähnliches Reibmomentprofil gemessen.

Reproduzierbarkeit und Ähnlichkeit der Reibmomentprofile bei Drehzahl- und Fluidvariation zeigen, wie stabil der Einfluss der Wellenoberfläche, trotz geänderter Betriebsparameter, auf die Reibungsbedingungen in der Dichtzone von RWDR ist.

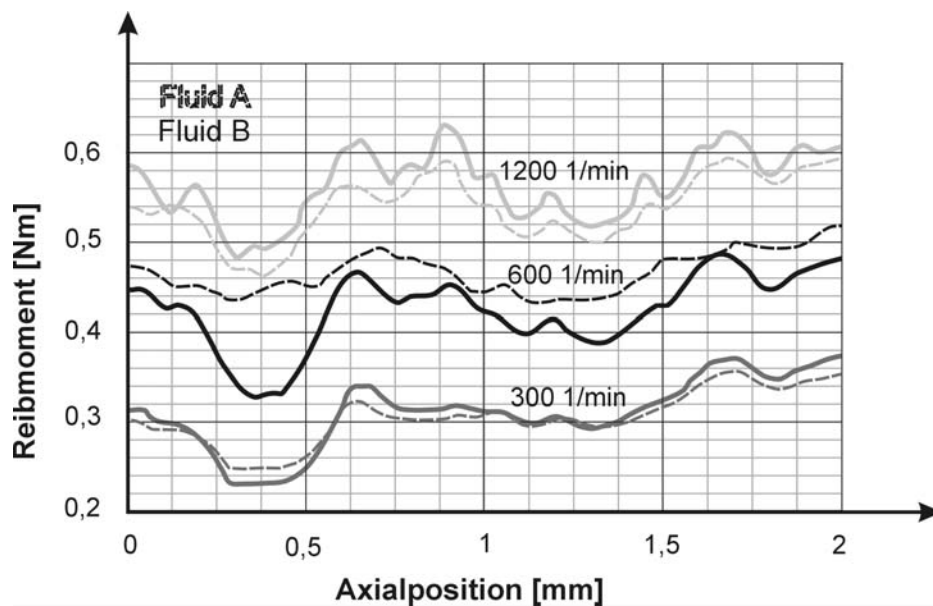


Bild 28: Reibmomentprofil bei unterschiedlichen Fluiden

4.5.4 Rauheitseinfluss

Es liegt die Vermutung nahe, dass die Oberflächenqualität der Welle dieses Ergebnis hervorruft. Die Oberflächengüte der Prüfwellen beträgt $R_{max} = 1,11\text{--}1,37\text{ }\mu\text{m}$ und $R_a = 0,2\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m}$, damit werden die maximal zulässigen Werte von $R_{max} = 6,3\text{ }\mu\text{m}$ und einem $R_a = 0,2\text{--}0,8\text{ }\mu\text{m}$ nach DIN 3760 deutlich unterschritten.

Die Welle ist drallfrei im Einstechverfahren geschliffen. Bei dieser Art der Bearbeitung entsteht eine Oberflächenstruktur, die in Umfangsrichtung homogener ist als in axialer Richtung. Geringste Abweichungen beim Abrichten der Schleifscheibe und hervorstehende Schleifkornspitzen erzeugen beim Schleifvorgang ohne seitlichen Vorschub Riefen in der Wellenoberfläche, die aufgrund des langsam drehenden Werkstücks und der schnell drehenden Schleifscheibe während des Bearbeitungsvorgangs am gesamten Umfang

eingearbeitet werden. Diese Aussage wird durch Messungen bestätigt (s. Bild 29). Die drei um 120° am Umfang versetzten axialen Rauheitsschriebe, weisen große Ähnlichkeiten auf. Die Messstrecke beträgt 1,7 mm.

In Bild 30 ist die Rauheitsstruktur der Prüfwelle (gemittelte Rauheit aus Bild 29) mit dem zugehörigen Reibmomentprofil dargestellt. Im oberen Teil des Bildes ist der Verlauf des Reibmomentes dem Rauheitsprofil hinterlegt. Es fällt auf, dass Rauheitserhebungen mit hohen Reibmomentwerten zusammenfallen. Dieses Resultat ist verständlich, da die Rauheitsstruktur über den Umfang nur geringfügig variiert und daher eine Rauheitsspitze im axialen Rauheitsschrieb wie eine um den gesamten Umfang laufende Erhebung gesehen werden kann. Die gemessenen Rauheiten ragen bis zu $0,8\text{ }\mu\text{m}$ über die Bezugslinie des Rauheitsprofils heraus. Wobei die Rillen in axialer Richtung eine Periodizität im Bereich von $0,3\text{--}0,5\text{ mm}$ besitzen (Bild 30 oben), die aus dem Schleifvorgang herrührt. Darüber liegt eine feinere Rauheitsstruktur mit einer kleineren Wellenlänge im μm -Bereich.

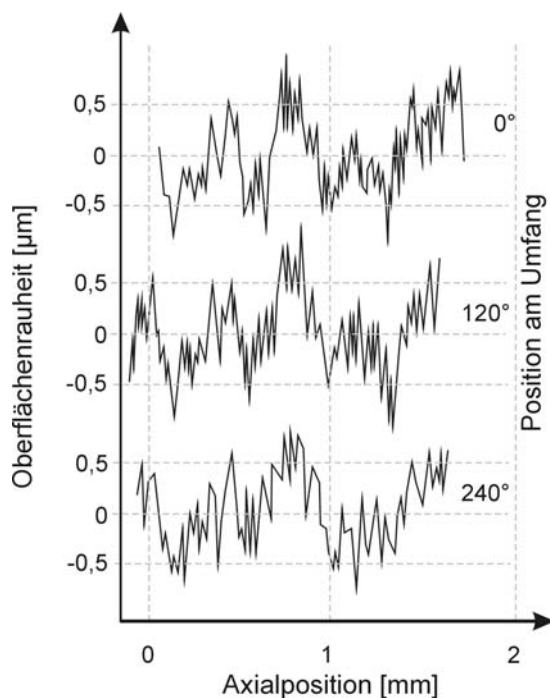


Bild 29: Oberflächenrauheit der Welle

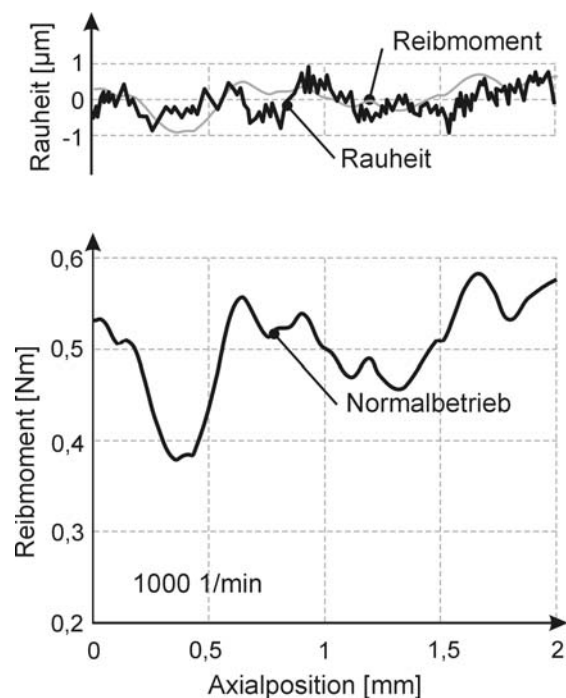


Bild 30: Reibmoment vs. Oberflächenrauheit nach [SCH98]

Wie in Bild 30 ebenfalls zu erkennen ist, sind die Übergänge zwischen den Rillen nicht gleichmäßig und wenn von abgeschätzten Fluidfilmdicken im Bereich von $< 200\text{ nm}$ ausgegangen wird (Abschnitt 4.2), lässt sich daraus schließen, dass die Größe des Reibmomentes signifikant beeinflusst wird. So erklärt sich die Min/Max-Kontur des Reibmomentprofils, die dem Verlauf der Oberflächenrauheit ähnelt.

4.5.5 Förderbetrieb

Bisher wurden die Auswirkungen einer Axialverschiebung im Normalbetrieb beobachtet. Nun wird die Welle bei beidseitig benetzter Dichtzone (Förderbetrieb) axial verfahren. In Bild 31 ist ein typisches Reibmomentsignal für den Förderbetrieb dargestellt. Eine Axialverschiebung verursacht in einem Bereich, wo bei Normalbetrieb deutliche Reibmomentschwankungen auftreten (Kurve **B**), keine messbaren Fluktuationen (Kurve **C**). Da die Versuchsparameter zwischen Förder- und Normalbetrieb nicht modifiziert werden, außer durch eine Fluidzugabe auf der Bodenseite, kann aus den Beobachtungen für die Welle/RWDR-Paarung geschlossen werden, dass Oberflächenrauheiten bzw. Oberflächenstrukturen der Welle im Normalbetrieb einen Einfluss auf das Reibmoment haben, was im Förderbetrieb nicht der Fall ist. Für die getestete RWDR/Welle-Paarung bedeutet dies, dass im Förderbetrieb trotz der messbaren Unterschiede der Oberflächenrauheiten, die in der Dichtzone erzeugte gesamte Reibung bei einer Axialverschiebung in der Dichtzone konstant bleibt. Im Förderbetrieb wird trotz geringer Fluidfilmdicken (< 200 nm, Abschnitt 4.3.2) der Rauheitseinfluss nicht abgebildet, was auf die exzellente Schmierungssituation zurückzuführen ist.

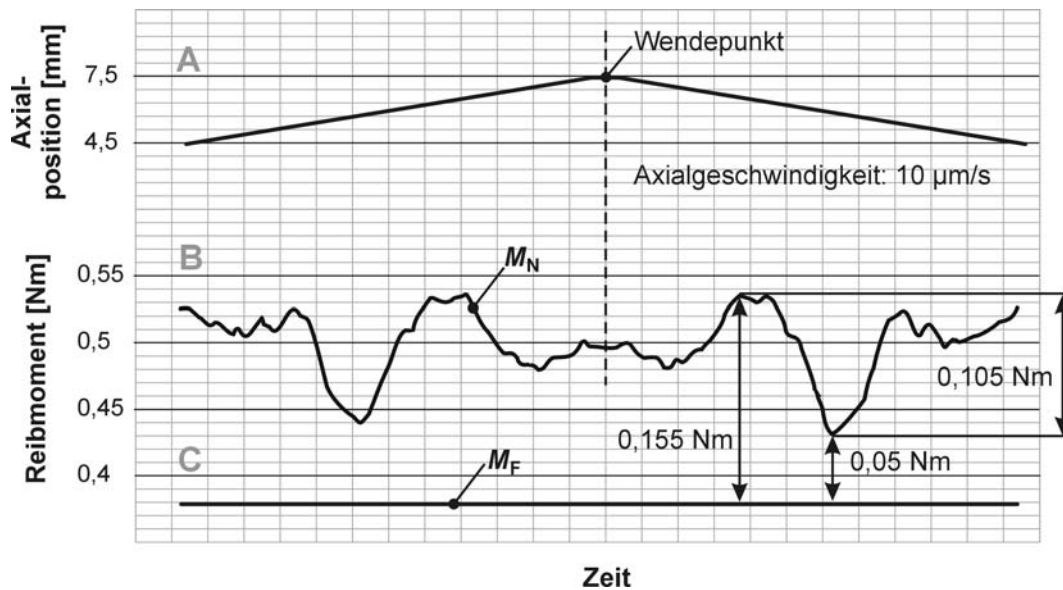


Bild 31: Reibmomentprofil bei Normal- und Förderbetrieb [WIE98b]

Aus diesen Beobachtungen lässt sich erkennen, dass unterschiedliche Reibmomentniveaus einer RWDR/Welle/Fluid-Kombination ein Maß für die Dichtfähigkeit dieser spezifischen Kombination darstellen. Beim axialen Verfahren im Normalbetrieb (ohne Fluidzugabe auf der Bodenseite) kann es geschehen, dass das Reibmoment auf Förderniveau absinkt. Exakt in dem Moment, wo dies geschieht, wird auf der Bodenseite eine Fluidoberfläche sichtbar. Wird die axiale Bewegung der Welle an dieser Position gestoppt und rotiert diese weiter, so kann beobachtet werden, dass mehr Fluid zur Bodenseite wandert und der RWDR die

Dichtfunktion verlieren kann und nach einiger Zeit Leakage zeigt. Das Fördermoment M_F ist gleich dem auftretenden Leakage-Reibmoment M_L . Um aus diesem indifferenten Zustand wieder in den Dichtzustand zu gelangen, kann eine beliebige Wellenposition angefahren werden, an der zuvor ein höheres Moment im Normalbetrieb vorherrschte. So wird das Fluid, welches sich auf der Bodenseite befindet durch die Dichtzone zur Stirnseite gefördert. Danach steigt das Reibmoment wieder auf das Niveau des Normalbetriebs an.

Die Differenz $\Delta M = M_N - M_F$ beschreibt die Dichtfähigkeit bzw. die Förderfähigkeit einer RWDR/Welle/Fluid-Kombination. Aus umfangreichen Versuchen zum Förderbetrieb hat sich für diese Versuche eine Grenze der Förderfähigkeit ergeben. Ist $\Delta M < 0,05-0,1 M_N$ so hat keine Förderung stattgefunden und es bleibt eine Fluidoberfläche auf der Bodenseite sichtbar. Jeder Dichtungstyp in Kombination mit Welle und Fluid müsste so eine Grenze der Förderfähigkeit besitzen.

Aus diesen Beobachtungen kann abgeleitet werden, dass das Reibmoment während des Förderns gleich dem Reibmoment bei Leakage ist ($M_F = M_L$). Dies zeigt, dass die Reibungsvorgänge in der Dichtzone in beiden Fällen identisch sind. Förderung und Leakage unterscheiden sich nur durch die Richtung, in der das Fluid sich bewegt.

4.6 Zusammenfassung Kapitel 4

Fluidfilmdicke im Normal- und Förderbetrieb:

Aus der gleichzeitigen Messung von Reibmoment und Dichtzonentemperatur werden die Fluidfilmdicken für den Normal- und Förderbetrieb abgeschätzt. Bei dieser Abschätzung wird von reiner Fluidreibung ausgegangen und eine effektiv gescherte Fläche von $\leq 50\%$ der gesamten Dichtzone angewandt. Für diese Parameter ergeben sich Fluidfilmdicken für beide Betriebszustände im Bereich von 10-140 nm, wobei die Fluidfilmdicken im Förderbetrieb fast doppelt so groß sind wie im Normalbetrieb (Bild 23).

Diese geringen Fluidfilmdicken lassen Fragen aufkommen: Wie verhält sich das Fluid unter diesen extremen Scherbedingungen und liegen die realen Fluidfilmdicken wirklich in diesem Bereich? Die Messergebnisse deuten auf weitere Reibungskomponenten hin, welche die für reine Fluidreibung hohen Werte erklären könnten. Die hohe Scherbelastung lässt auf ein Abweichen vom Newtonschen Fluidverhalten schließen.

Viskositätseinfluss:

Eine Veränderung der Fluidviskosität wirkt sich im Förderbetrieb stärker auf das Reibmoment aus als im Normalbetrieb. Dies deutet auf einen nicht von der Viskosität bestimmten Reibungsanteil hin, der stärker im Normalbetrieb als im Förderbetrieb ausgeprägt ist.

Wird bei hydrodynamischer Reibung die Viskosität des Fluids zwischen den Reibpartnern verändert, so kann nach [HRO61] mit der Proportionalität zwischen μ und $\eta^{1/3}$ der neue erwartete Reibungskoeffizient bestimmt werden. Auch hier zeigt sich, dass die gemessenen Auswirkungen der Viskosität deutlich kleiner sind, im Vergleich zu den Werten, die bei reiner Fluidreibung erwartet würden.

Axialverschiebung:

Das Reibmoment ist von der Oberflächenstruktur der Welle abhängig, dies wird durch Axialverschiebung der Prüfwellen während des Betriebs gezeigt. Die Abhängigkeit des Signals ist reproduzierbar und stellt ein Charakteristikum, der verwendeten Wellen/RWDR-Kombination dar. Drehzahlvariation und Fluidwechsel können das mittlere Reibmomentniveau verschieben und kleinere Abweichungen hervorrufen, allerdings bleibt das Reibmomentprofil sehr ähnlich.

Ein Dichtsystem lässt sich durch eine Axialverschiebung der Welle in unterschiedliche Reibungszustände versetzen, die sogar zur Leckage des Systems führen können, obwohl nach DIN 3760 zulässige drallfrei im Einstechverfahren geschliffene Wellen eingesetzt werden. Die Wellenoberflächen besitzen Mikrostrukturen, die die Reibungsbedingungen von RWDR so stark beeinflussen, dass diese Mikrostrukturen einen Einfluss auf die Dichtfähigkeit/Förderfähigkeit des Systems besitzen.

Im Gegensatz zum Normalbetrieb ergibt sich im Förderbetrieb keine Abhängigkeit des Reibmoments von der axialen Wellenposition, die Schmierung der gesamten Dichtzone ist im bestmöglichen Zustand, da auf beiden Seiten Schmierstoff vorhanden ist. Das Reibmoment im Förderbetrieb M_F ist gleich dem Leckagereibmoment M_L . Der alleinige wesentliche Unterschied dieser beiden Betriebssituationen besteht in der Richtung des Fluidtransports.

Alle vorgestellten Versuchsergebnisse zeigen auf, dass es mehr als nur eine hydrodynamische Schmierung mit viskoser Reibung in der Dichtzone von RWDR gibt. Durch gleichzeitige Messung des RWDR-Reibmoments mit der Dichtzonentemperatur kombiniert mit Normal- und Förderbetrieb können diese Ergebnisse beim Vergleich von sehr ähnlichen Fluiden, die sich nur in ihrer Viskosität unterscheiden, herausgearbeitet werden. Wenn weitere bedeutende Reibungsanteile in der Dichtzone von RWDR existierten, dann sollte ebenso der Aufbau eines tragenden Fluidfilms durch hydrodynamische Vorgänge ange-

zweifelt werden. Wie schon *Lebeck* formulierte, werde der Anteil der reinen Fluidreibung und die Tragfähigkeit eines Fluidfilmes durch Abweichung vom parallelen Zustand häufig überschätzt [LBK87b].