

## 6 Radiale Pressung des RWDR

Dieses Kapitel setzt sich mit der radialen Pressung, die der RWDR auf das Fluid und die Wellenoberfläche ausübt, auseinander. Es wird nach einer Abschätzung der Gesamtpressung für den Betriebszustand, die axiale Pressungsverteilung mit deren Verschleißverhalten und die Verzerrung der Elastomeroberfläche in Umfangsrichtung betrachtet.

Die radiale Pressung des RWDR resultiert aus der Durchmesserüberdeckung, die sich aus der Differenz des Innendurchmessers eines ausgebauten RWDRs und dem Wellendurchmesser ergibt. Für einen Nenndurchmesser von 80 mm ergeben sich Überdeckungswerte im Bereich von 1,5-2 mm. Die durch die Aufweitung resultierende radiale Pressung setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

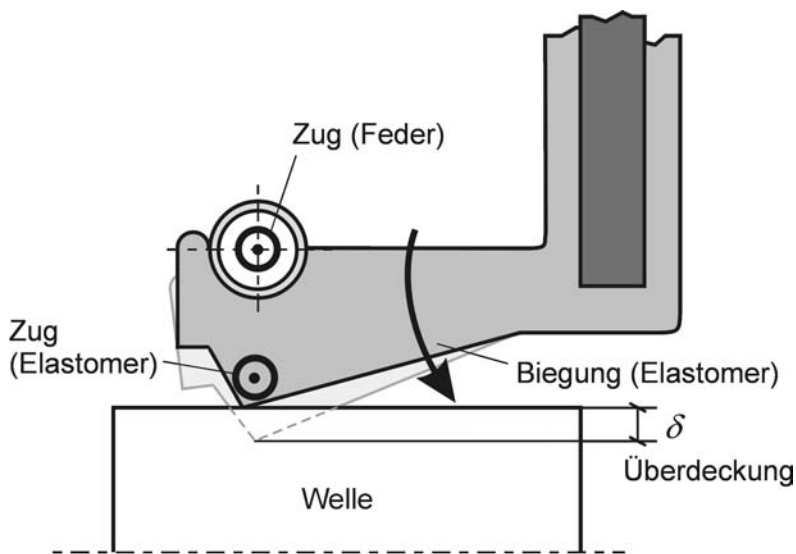


Bild 58: Aus der Überdeckung resultierende Radialkraftkomponenten

1. Zugfederanteil (ca. 50% der Gesamtradialkraft bei Raumtemperatur [CFW96]):  
Es werden vorgespannte Schraubenfedern mit geringer Federsteifigkeit eingesetzt. Für eine gestreckte Feder (RWDR-Nenndurchmesser 80 mm) ergeben sich typische Federkonstanten im Bereich von  $e_F \approx 0,1 \text{ N/mm}$ , wobei die Vorspannung bei ca. 2,5 N liegt.
2. Elastomer-Zuganteil (ca. 40% der Gesamtradialkraft bei Raumtemperatur):  
Die Überdeckung führt zu einer Umfangsvergrößerung der Dichtlippe. Diese ergibt

sich bei 2 mm Überdeckung und einem Nenndurchmesser von 80 mm zu  $2\pi = 6,28$  mm, was einer Dehnung von 2,5% entspricht.

3. Elastomer-Biegeanteil (ca. 10% der Gesamtradialkraft bei Raumtemperatur):  
Der Biegeanteil resultiert aus der Biegung der Membranfläche (Biegewinkel der Membran im Bereich von  $7,5^\circ$ - $12^\circ$  beim Aufschieben auf die Welle).

Die Messung der radialen Pressung wird nach DIN3761 T9 mit einem Radialkraftmessgerät durchgeführt. Das Gerät besteht aus einer geteilten Welle, dessen eine Wellenhälfte starr und die andere federbelastet gelagert ist. Über einen Wegaufnehmer wird die Kraft ermittelt, mit der die halbierten Wellenstümpfe zusammengedrückt werden. Nach DIN3761 T9 wird die gemessene Kraft mit dem Faktor  $\pi$  multipliziert, um dem Messprinzip Rechnung zu tragen, da nur die Kräfte in der Messrichtung erfasst werden. Dies sind die tangential in Umfangsrichtung wirkenden Kräfte in der gedehnten elastomeren Dichtlippe, der Zugfeder und des geringeren Anteils aus der Biegung der Membran (siehe Anhang Bild A 5 und Bild A 6).

Um eine bessere Aussage über die wirkende Radialkraft im Betrieb machen zu können, ist eine Messung im Bereich typischer Betriebstemperaturen aussagekräftiger als bei Raumtemperatur.

## 6.1 Temperierte Radialkraftmessung

Um Radialkraftmessungen bei erhöhten Temperaturen durchzuführen, wird das Radialkraftmessgerät nach DIN3761 T9 modifiziert (Bild 59). Der RWDR ist in eine Aufnahme (2) eingepresst, die einen isolierten Aufsatz (4) besitzt, der an seinem äußeren Umfang eine Heizmanschette trägt. Die Temperatur kann stufenlos zwischen Raumtemperatur ( $20^\circ\text{C}$ ) und  $100^\circ\text{C}$  geregelt werden. Vorversuche ergeben eine Abhängigkeit des Messergebnisses von der Temperatur. Dies ist auf die thermische Empfindlichkeit der Messapparatur zurückzuführen. Um diese Temperatureinflüsse zu eliminieren, werden Kalibrierungskurven in verschiedenen Belastungszuständen aufgenommen (Anhang, Bild A 7), mit denen die Messwerte korrigiert werden.

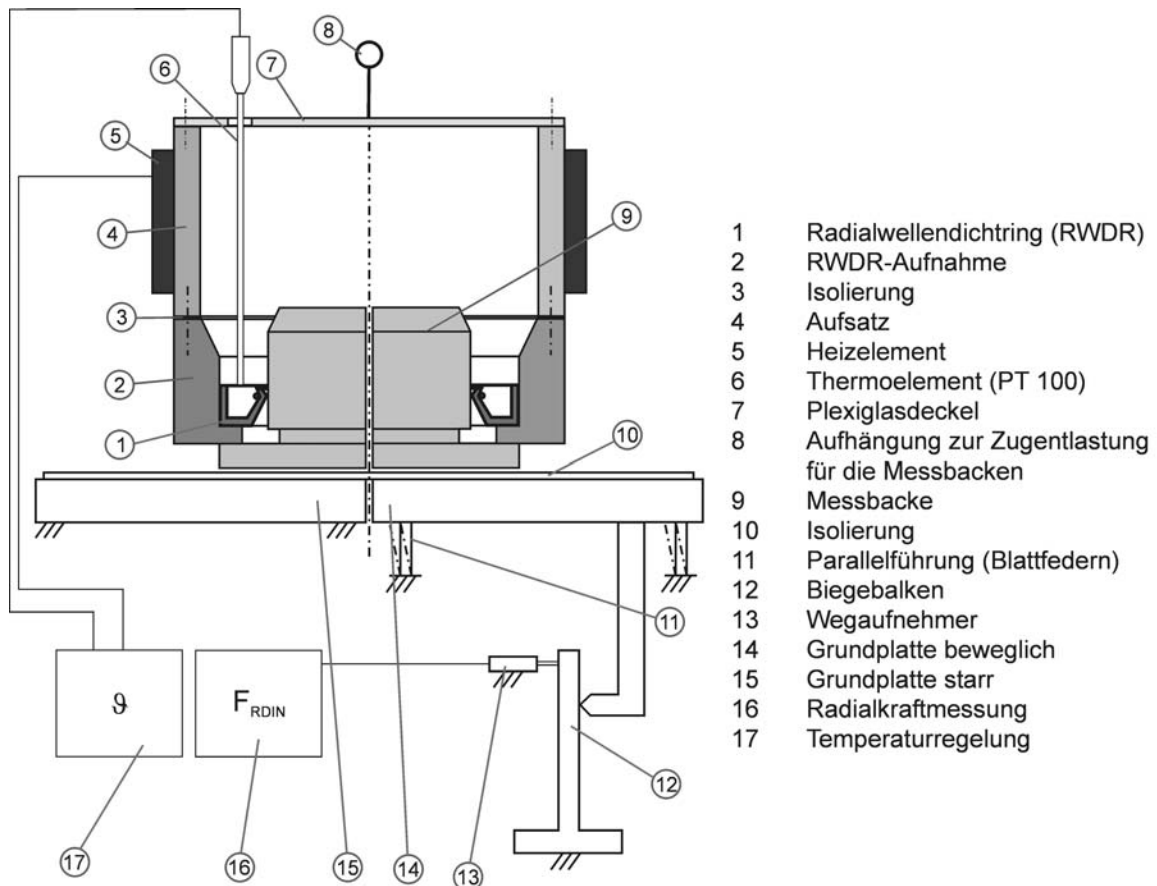


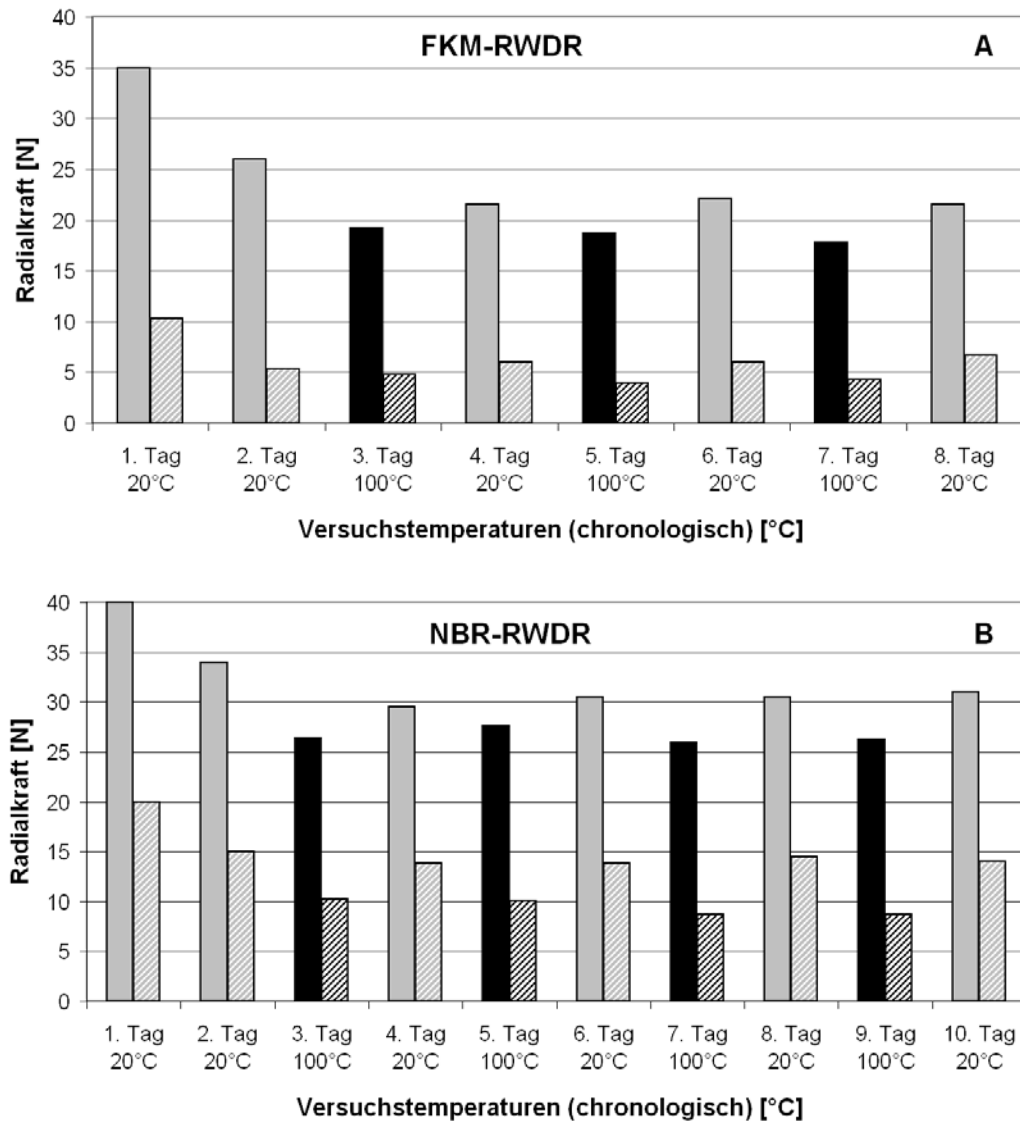
Bild 59: Modifiziertes Radialkraftmessgerät nach DIN3761 T9 zur Messung in einem Temperaturbereich von 20-100°C

Die Diagramme **A** und **B** in Bild 60 stellen die Versuchsergebnisse der FKM- und NBR-RWDR dar. Tagesweise wechselt die Temperatur zwischen 20 und 100°C und es sind jeweils die quasi-stationären Messwerte nach 24h aufgeführt. Die Charakteristik beider Messkurven ist identisch: ein deutlicher Abfall nach der Montage und die Verringerung der Radialkraft durch die Temperaturerhöhung mit einem anschließenden Anstieg bei Abkühlung, wobei sich reproduzierbare Werte für beide Werkstoffe ergeben.

Tabelle 12: Temperatureinfluss auf die Radialkraft

	$F_{RDIN}$ NBR			$F_{RDIN}$ FKM		
	mit Feder	ohne Feder	$\Delta F_{RDIN}$ (Feder)	mit Feder	ohne Feder	$\Delta F_{RDIN}$ (Feder)
<b>20°C</b>	30,4 N	14 N	-46%	21,4 N	6 N	-28%
<b>100°C</b>	26,6 N	9,5 N	-35,7%	19 N	4,3 N	-22,6%
$\Delta F_{RDIN} (\vartheta)$	-12,5%	-32,1%		-11,2%	-28,3%	

Die Abnahme der Radialkraft ist für beide untersuchten Werkstoffe mit 11,2% für FKM und 12,5% für NBR als gering anzusehen (Tabelle 12). In der Literatur werden teilweise deutlich stärkere Temperaturabhängigkeiten angegeben: von 40% [OTO73] bis zu über 50% [SÜE75] Radialkraftverlust von Raumtemperatur auf 100°C. Die Unterschiede in den Angaben können auf veränderte Materialzusammensetzungen und zeitlich anders gestaltete Versuchsabläufe zurückzuführen sein.



*Bild 60: Radialkraftmessungen von RWDR aus FKM (Diagramm A), NBR (Diagramm B) bei 20°C (grau) und 100°C (schwarz), mit Zugfeder (Vollfarbe) und ohne Zugfeder (Schraffur)*

Um den Einfluss der Temperaturerhöhung direkt auf den Elastomerwerkstoff zu erfassen, werden die gleichen Versuche ohne Zugfeder durchgeführt. Im Durchschnitt ergeben sich für den Temperatureinfluss auf das Elastomer vergrößerte Abnahmen von 28,3% bei FKM und 32,1% bei NBR. Der Radialkraftanteil der Elastomerkomponenten ist kleiner als der Zugfederanteil. Dies gilt insbesondere für den FKM-Werkstoff der nur 28% (20°C) bzw.

22,6% (100°C) zur Gesamtradialkraft beiträgt. Beim NBR liegt der Anteil etwas höher 46% (20°C) und 35,7% (100°C), was daher auch zu der leicht größeren Abnahme der Radialkraft bei 100°C führt.

Die ermittelten Werte werden genutzt, um die wirkende axiale Pressung unter Betriebsbedingungen abzuschätzen.

## 6.2 Axiale Pressungsverteilung

Bisher ist es nicht gelungen die dynamische axiale Pressungsverteilung von RWDR im Betrieb zu messen. Die schlechte Zugänglichkeit der Messstelle mit einer geringen Dichtzonenbreite im Bereich von 0,1-0,3 mm und den hohen Scherraten in der Dichtzone bei geringsten Fluidfilmdicken erschweren die Messung. Ausgehend von der Dichtlippengeometrie im nicht montierten Zustand, ist eine grobe Abschätzung des Pressungsverlaufs möglich.

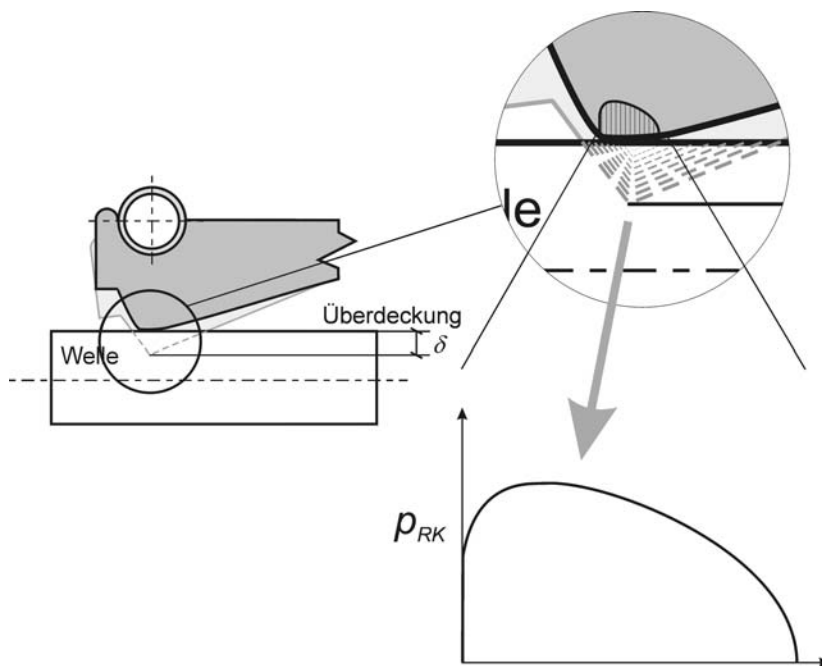


Bild 61: Abplattung der Dichtkante nach Montage und Ableitung der Pressungsverteilung aus der Elastomerdeformation

Wird ein neuer RWDR mit einem fertigungsbedingtem Dichtkantenradius von ca. 40  $\mu\text{m}$  auf eine Welle montiert, so stellt sich eine Dichtzonenbreite bzw. Kontaktbreite ein, deren Größe von Überdeckung und Dichtkantengeometrie abhängt. Untersuchungen an RWDR von verschiedenen Herstellern ergeben Verkippungen der Dichtkanten zwischen 7,5-12°.

Der Verlauf der axialen Pressungsverteilung besitzt ein stirnseitiges Maximum, da in diesem Bereich die stärkste Deformation des Elastomers vorliegt (Bild 61). In Richtung der Randzonen nimmt die Pressung kontinuierlich ab, wobei der Pressungsabfall auf der Stirnseite aufgrund des steileren Kontaktwinkels stärker ausfällt. Diese Verteilung wird auch durch photoelastische Aufnahmen von *Hirano et al.* [HRO61] und qualitative Messungen von *Hermann und Seffler* [HRM85] bestätigt.

Die obige Ableitung der Pressungsverteilung gilt nur für einen neuen RWDR im statischen Zustand. In Realität werden auftretender Verschleiß und mögliche Abweichungen vom Rundlauf eine Veränderung der dargestellten idealisierten Pressungsverteilung hervorrufen.

### 6.3 Auswirkung des Verschleißes auf die axiale Pressungsverteilung

Um das Maß der Auswirkungen von normalem Verschleißverhalten auf die Gesamtradialkraft abzuschätzen, wird folgende Überlegung durchgeführt. Unter der Annahme, dass sich die Verschleißbreite der RWDR-Dichtkante von 0,1 mm auf 0,3 mm vergrößert, resultiert eine Durchmesseränderung von 0,12 mm (Kontaktwinkel im montierten Zustand: Stirnseite 50°, Bodenseite 22°). Der Verschleiß der Dichtkante wirkt sich unterschiedlich auf die Radialkraftanteile von Elastomer und Feder aus. Dies wird in Bild 62 verdeutlicht, wo die spezifische Anpressung in Abhängigkeit der Überdeckung aufgeführt ist. Ein linearer Verlauf des Radialkraftanteils im oberen Bereich der Kurve ergibt sich erst bei ausreichend großer Überdeckung. Die Kurve für den Federanteil weist keinen abrupten Übergang beim Überschreiten der Federvorspannung auf. Dies ist auf Reibvorgänge in der Federnut von der gespannten Zugfeder mit dem Elastomer zurückzuführen. Aufgrund der vorgespannten Feder tritt nur eine sehr geringe Absenkung des Federanteils durch den Dichtkantenverschleiß ein. Dieser kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$\Delta F_{RDIN\ Feder} = 2\pi \Delta F_{Feder} = 2\pi e_F \Delta l \quad \text{mit} \quad \Delta l = \pi \Delta d$$

Mit  $\Delta d = 0,12\text{ mm}$  (s.o.) und einer üblichen Federkonstanten von  $e_F = 0,1\text{ N/mm}$  ergibt sich eine Radialkraftverringerung von nur 0,24 N. Dies entspricht einer Veränderung von ca. 1%.

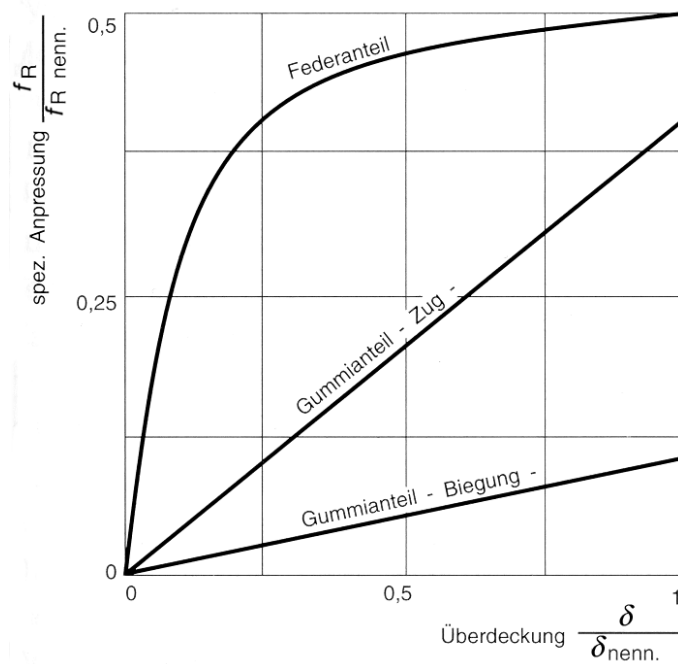


Bild 62: Variation der Radialkraftanteile mit dem Maß der Überdeckung [CFW96]

Für die Elastomeranteile wird von einer linearen Abnahme bei Rückgang der Überdeckung ausgegangen (Bild 62). Mit einer ursprünglichen Überdeckung von 2 mm wird durch eine Durchmesserergrößerung von  $\Delta d = 0,12$  mm eine Verringerung der Radialkraft aus dem Elastomer von ca. 6% verursacht. Der Anteil des Elastomers an der Gesamtradialkraft liegt zwischen 22,6 und 46% (Tabelle 12), woraus eine Abnahme von 1,4-2,8% resultiert.

Werden Elastomer- und Federanteil addiert, ergibt sich bei einer Dichtzonenverbreiterung von 0,1 auf 0,3 mm eine Radialkraftabnahme von 2,4-3,8%. Diese Veränderung ist so gering, dass für die Betrachtung der Pressungsverteilung von einer konstanten Gesamtpressung ausgegangen wird.

Für die Abschätzung der wahren Pressung in der Dichtzone werden die Radialkraftmesswerte aus Tabelle 12 verwendet, und für die Gesamtpressung wird  $F_{RDIN} = 22,6$  N gewählt (Mittelwert der Messungen bei 100°C). Diese Radialkraft entspricht bei einem Wellendurchmesser von 80 mm einer Linienlast von 0,28 N/mm. Die aus dieser Linienlast resultierenden Pressungen sind in Tabelle 13 exemplarisch für zwei Dichtzonenbreiten mit Berücksichtigung der wahren Kontaktfläche aufgeführt. Außerdem sind zwei Arten von Pressungsverteilungen berücksichtigt, eine sehr gleichmäßige Verteilung und eine maximumbetonte, um den Bereich der Pressungsmaxima aufzuzeigen (Pressungsverteilungen im Anhang Bild A 8, Bild A 9). Bei einer schmalen Dichtzone von 100  $\mu$ m ergäben sich Pressungswerte von bis zu 15 MPa, wenn von einer maximumbetonten Verteilung und einer Kontaktfläche von nur 10% ausgegangen wird. Dies ist ein hoher Pressungswert für

eine Elastomerfläche und verursachte starke Deformationen, so dass die wahre Kontaktfläche größer als 10% ausfiel.

*Tabelle 13: Maximale Pressungswerte in Abhängigkeit der wahren Kontaktfläche und Art der Pressungsverteilung*

	Pressung bei gleichmäßiger Pressungsverteilung			Höchste Pressung bei maximumbetonter Pressungsverteilung		
	$p_{RKmax}$ [10 <sup>6</sup> Pa]			$p_{RKmax}$ [10 <sup>6</sup> Pa]		
Kontaktfläche	100%	50%	10%	100%	50%	10%
100 µm	0,95	1,9	9,5	1,5	3	15
300 µm	0,3	0,6	3	0,4	0,8	4

Als anschauliches Beispiel kann hierzu die Shore-Härte-Messung herangezogen werden. Bei einem Elastomer mit einer Shore A Härte von 70 wirkt während der Eindringung des stumpfen Messkegels in die Probe eine mittlere Pressung von ca. 12 MPa. Der Kegelsumpf hat einen Durchmesser von 0,79 mm und dringt 0,75 mm in das Elastomer ein. Einen weiteren Hinweis auf die Vergrößerung der wahren Kontaktfläche bei hohen Pressungswerten liefern Versuchsergebnisse von [UEZ84]. Untersuchungen von Nitril/Butadien-Elastomer auf einer Glasfläche ergeben eine maximal erreichbare wahre Kontaktfläche von ca. 70% bei einer Pressung > 6 MPa. Dieses Resultat berücksichtigend, werden die 10%-Kontaktflächenwerte aus Tabelle 13 für die 100 µm Dichtzonenbreite gestrichen, da für die hohen Pressungswerte, die angegebene wahre Kontaktfläche zu klein ist. Je nach Breite der Dichtzone und wahrer Kontaktfläche ergeben sich maximale Pressungswerte zwischen 0,6-4 MPa in der RWDR-Dichtzone.

Vorausgesetzt, eine RWDR/Welle-Paarung besäße keine statische Exzentrizität und die Betriebsbedingungen über den Umfang wären vergleichbar, kann angenommen werden, dass die Verschleißbedingungen in Umfangsrichtung ähnlich sind. In axialer Richtung hängt der Verschleiß in der Dichtzone von einem Belastungskollektiv ab, welches sich aus lokalen und globalen Belastungsparametern zusammensetzt. Die lokalen Parameter variieren mit der axialen Position in der Dichtzone, wohingegen die globalen Parameter für die gesamte Dichtzone konstant anzusehen sind.

### lokale Belastungsparameter

#### - Radiale Pressung:

Die axiale Pressungsverteilung, wie sie in Bild 61 skizziert ist, mit einem ausgeprägten stirnseitigen Maximum, führt zu einer hohen lokalen Beanspruchung beider Reibpart-

ner. Dies wird durch Versuche bestätigt. Der höchste Verschleiß in der Dichtzone tritt in dem Bereich der größten Pressung auf. Dies ist an der Dichtkante und gleichermaßen auf der Wellenoberfläche zu erkennen (Bild 63). Am besten lässt sich dieses Verschleißverhalten unter stationären Betriebsbedingungen beobachten, wenn selbst minimale axiale Relativbewegungen zwischen Welle und RWDR ausgeschlossen werden können (z. B. Vermeidung von Längenänderungen durch Wärmeausdehnungen). In diesem Fall ist die Rillengeometrie des Wellenverschleißes entsprechend einer Kombination aus Dichtlippengeometrie und Pressungsverteilung geformt.

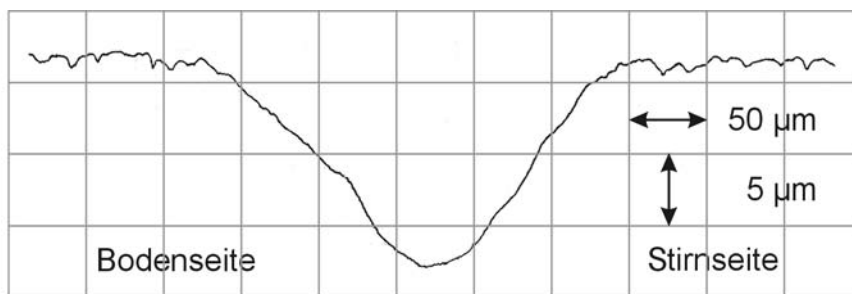


Bild 63: Wellenverschleiß ( $14\text{ }\mu\text{m}$ ) nach 15.000 km Laufleistung

- Schmierungszustand/Fluidangebot:

Der starke Einfluss des Schmierungszustandes kann beispielhaft besonders gut bei RWDR mit zu hoher Förderwirkung beobachtet werden. Diese RWDR neigen zu frühzeitigem Ausfall, da sie auf der Bodenseite starkem Verschleiß ausgesetzt sind (Bild 64), der nachhaltig die Dichtfunktion beeinflusst und im weiteren Betrieb Leckage verursacht.

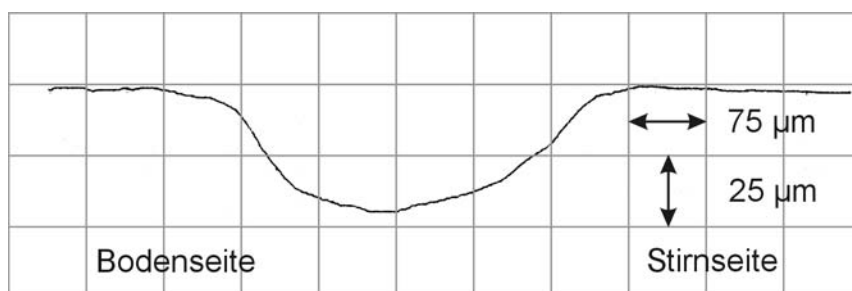


Bild 64: Wellenverschleiß ( $40\text{ }\mu\text{m}$ ) nach 40.000 km Laufleistung

- Reibungsbedingungen/Schubbelastung:

Aus der radialen Pressung und dem Schmierungszustand ergeben sich die lokalen Reibungsbedingungen. Hohe Reibung und somit Schub belasten die Werkstoffe und verursachen erhöhten Verschleiß.

**Belastungsparameter der gesamten Dichtzone****- Temperatur:**

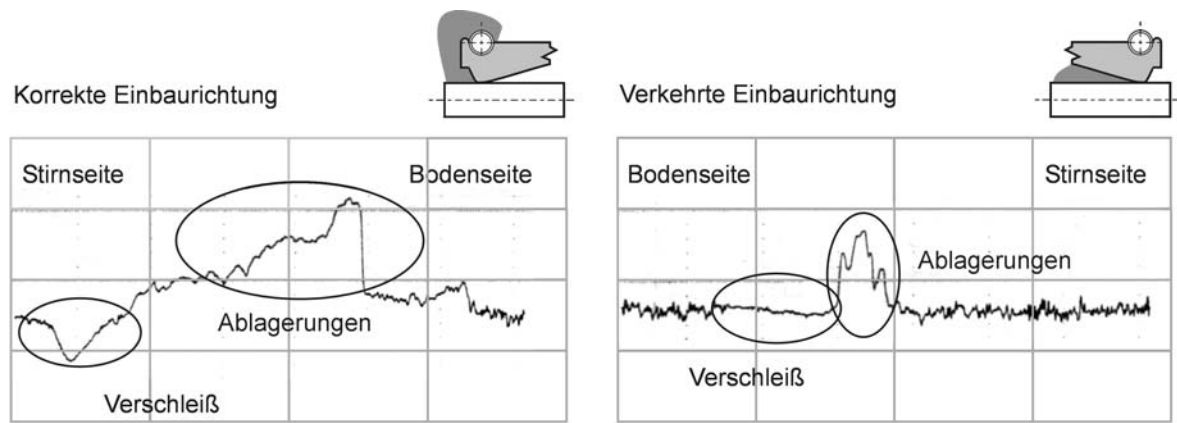
Die Temperatur in der Dichtzone ist von der eingebrachten Reibleistung und den Wärmeableitbedingungen abhängig. Hierzu zählt maßgeblich die Wärmeableitung über die metallische Welle. Die Wärmeableitung durch das Elastomer kann aufgrund der ca. 500fach geringeren Wärmeleitfähigkeit vernachlässigt werden (Wärmeleitzahl  $\lambda_{Fe} = 81 \text{ W/(m K)}$ ,  $\lambda_{Gummi} = 0,17 \text{ W/(m K)}$  [GCK81]). Die kleine axiale Abmessung der Dichtstelle und die gute Leitfähigkeit des Metalls mit geringem Temperaturgradienten lassen die Annahme zu, dass in der Dichtzone eine einheitliche Temperatur vorherrscht. Die thermisch-chemische Belastung der Werkstoffe durch die Übertemperatur in der Dichtzone kann anschaulich mit der Reaktionsgeschwindigkeit/Temperatur-Beziehung von *van't Hoff* ausgedrückt werden. Wenn eine Temperaturerhöhung um 10°C eine Verzwei- bis Verdreifachung der Reaktionsgeschwindigkeit zur Folge hat [RMP95], dann ergibt sich für die Dichtzone bei einer Übertemperatur von 50°C gegenüber dem übrigen Schmierstoffkreislauf eine Reaktionsgeschwindigkeitserhöhung von 32 (Verdopplung bei 10°C) bis 243 (Verdreifachung bei 10°C). Diese Abschätzung zeigt deutlich die extreme Belastung des Fluids in der Dichtzone.

**- Betriebsmodi:**

Lauf-, Standzeiten, Anzahl der Kaltstarts bzw. Anfahrvorgänge beeinflussen das Verschleißverhalten von RWDR/Welle-Paarungen.

**- Schmierungszustand/Fluidangebot:**

Dass der allgemeine Schmierungszustand bzw. das Fluidangebot einen entscheidenden Einfluss auf das Verschleißverhalten besitzen, wird durch einen Verschleißversuch demonstriert. Dazu werden korrekt montierte RWDR/Welle-Paarungen mit Paarungen verglichen, deren Bodenseite mit Fluid beaufschlagt ist. Unter ansonsten identischen Bedingungen werden die korrekt montierten Paarungen im Normalbetrieb und die anderen im ständigen Förder-/Leckagebetrieb betrieben. Verschleißresultate nach 1000 h Dauerversuch zeigen klare Unterschiede im Verschleißverhalten, was auf den allgemeinen Schmierungszustand der Dichtzone zurückzuführen ist. Beispielhaft sind in Bild 65 zwei typische Verschleißresultate dargestellt. Die linke korrekt montierte Paarung weist einen sichtbaren Verschleiß mit einer Rillentiefe von ca. 4,5 µm auf, wohingegen im rechten Messschrieb nur eine Glättung der Rauheitsspitzen zu erkennen ist. Im normal betriebenen Zustand ist das Gesamtvolumen der Ablagerungen größer, als im Förderbetrieb, da sie hier aufgrund eines kontinuierlichen Fluidstromes schlechter haften.



Raster vertikal 5  $\mu\text{m}$ , horizontal 500  $\mu\text{m}$

Bild 65: Wellenverschleiß in Abhängigkeit der Einbaurichtung

Die Betrachtung der Belastungsparameter für die Werkstoffe in der Dichtzone zeigt, dass der Verschleiß lokal unterschiedlich ist und von einem Belastungskollektiv bestimmt wird. Im Bereich des stirnseitigen starken Pressungsmaximums tritt der größte Verschleiß auf, dies kann durch Versuche demonstriert werden, wie in Bild 63 gezeigt. Es ergeben sich durch den Verschleiß von RWDR-Dichtkante und Wellenoberfläche neue komplexere geometrische Verhältnisse, die eine Veränderung der Pressungsverteilung hervorrufen.

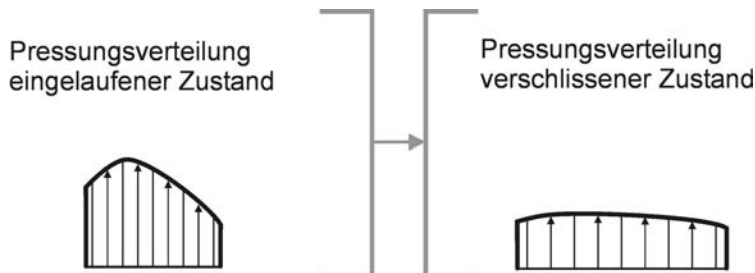
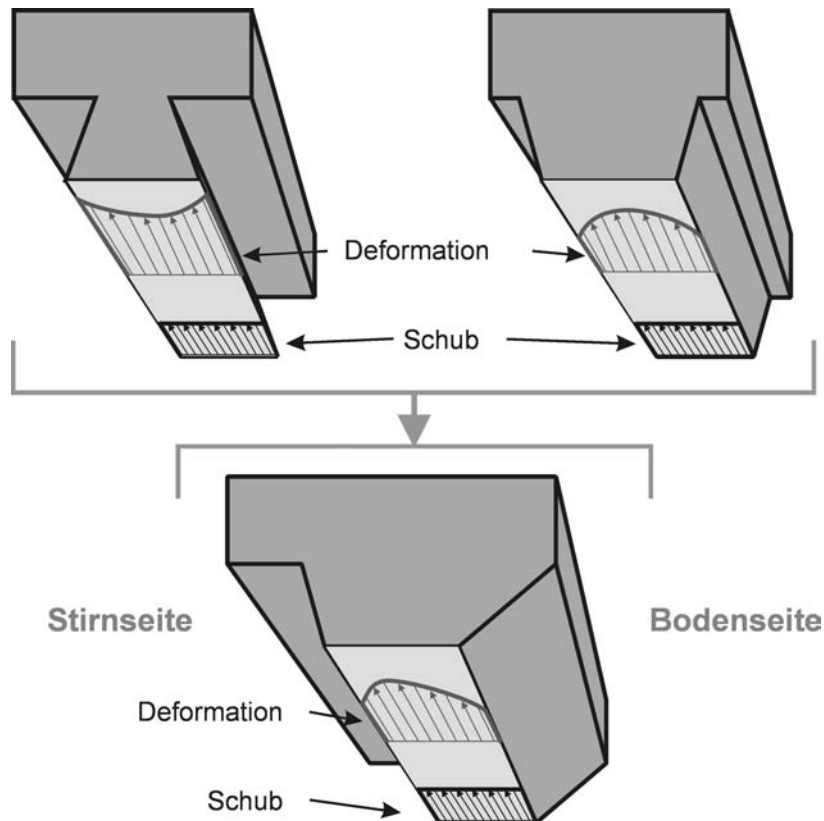


Bild 66: Veränderung der Pressungsverteilung durch Dichtkantenverschleiß

Wird davon ausgegangen, dass eine hohe lokale Belastung, entspricht z. B. einer hohen radialen Pressung, mit dem lokalen Verschleiß korreliert, resultiert anschaulich eine Abflachung der Pressungsverteilung mit zunehmender Laufzeit (Bild 66). Einen Aufbau von hohen Kantenpressungen, wie sie beispielsweise bei einem Linienkontakt eines zylindrischen Bolzens beobachtet werden, wird durch das verschleißverursachende Belastungskollektiv verhindert. Es kann allerdings verschleißbedingt zu einer axialen Verschiebung des Pressungsmaximums kommen, welche die Dichtfähigkeit des Systems beeinflusst.

## 6.4 Verzerrung der Elastomeroberfläche

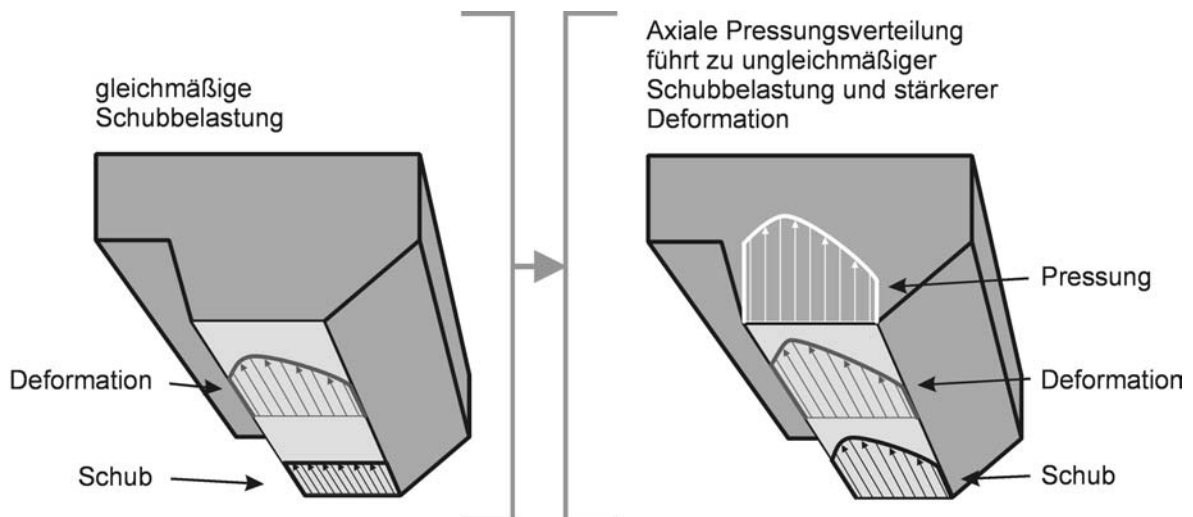
Die qualitative Verzerrung der Elastomeroberfläche ist von der Dichtkanten­geometrie und den wirkenden Schubspannungen auf der Elastomeroberfläche abhängig. Wie sich die Form der Dichtkante bei einer gleichmäßigen Schubbelastung auf die Verzerrung in Umfangsrichtung auswirkt ist in Bild 67 exemplarisch dargestellt.



*Bild 67: Verzerrungen der Elastomeroberfläche in Abhängigkeit der Geometrie des Querschnitts bei gleichmäßiger Schubbelastung an der Oberfläche*

Bei einem hinterschnittenen Profil (Bild 67 oben links) verursacht die Schubbelastung eine größere Deformation in den Randbereichen, da durch diese Querschnittsform der Widerstand gegen eine Deformation in den Randbereichen gering ist. Im Gegensatz dazu steht das Keilprofil aus Bild 67 oben rechts, bei dem das zusätzliche nicht belastete Material zu einer Versteifung führt und die Deformation in den Randbereichen geringer als in der Mitte der Oberfläche ausfällt. Wird dies Verhalten auf die schubbelastete RWDR-Dichtkante übertragen, so stellt sich aufgrund der unterschiedlichen Kontaktwinkel eine asymmetrische Deformation ein, wie sie in Bild 67 unten qualitativ dargestellt ist. Die Deformation auf der Stirnseite ist größer als auf der Bodenseite.

Für diese asymmetrische Deformation ist keine Pressungsverteilung mit einem Maximum auf der Stirnseite nötig; allein die Dichtkanten­geometrie ist hierfür ausreichend. Eine Pressungsverteilung verursacht unterschiedliche Belastungen in der Dichtzone, wie in Abschnitt 6.2 ausgeführt. Bei höherer lokaler Pressung ist von einer geringeren Fluidfilmdicke und höheren Schubbelastungen auszugehen. Hieraus folgt, dass eine Pressungsverteilung aus Bild 61 mit der daraus resultierenden Schubverteilung, die Deformation noch verstärkt (Bild 68).



*Bild 68: Einfluss der axialen Pressungsverteilung auf die Verzerrung der Elastomeroberfläche*

Ein weiterer Einfluss auf die Deformation der Elastomeroberfläche rührt aus den Schmierungsbedingungen, welche die Reibung in der Dichtzone beeinflussen. Herrscht ein reichliches Fluidangebot vor, so wird sich eine größere Fluidfilmdicke einstellen, als bei einem geringen Angebot. Beispielhaft kann dieser Einfluss auf das Deformationsverhalten an den beiden Betriebsmodi (Normalbetrieb und Förderbetrieb) gezeigt werden (Bild 69).

Wird im Förder- bzw. Leckagebetrieb von einem gleichmäßigen Fluidangebot in der gesamten Dichtzone ausgegangen, so sind für die Deformationsverteilung in der Elastomeroberfläche hauptsächlich die Dichtkanten­geometrie und die axiale Pressungsverteilung ausschlaggebend. Hingegen im Normalbetrieb ohne Fluidzugabe, sind die Schmierungsbedingungen auf der Bodenseite schlechter und es resultiert aufgrund einer geringeren Fluidfilmdicke eine höhere Schubbelastung, die eine ebenfalls größere Deformation hervorruft (Bild 69 rechts).

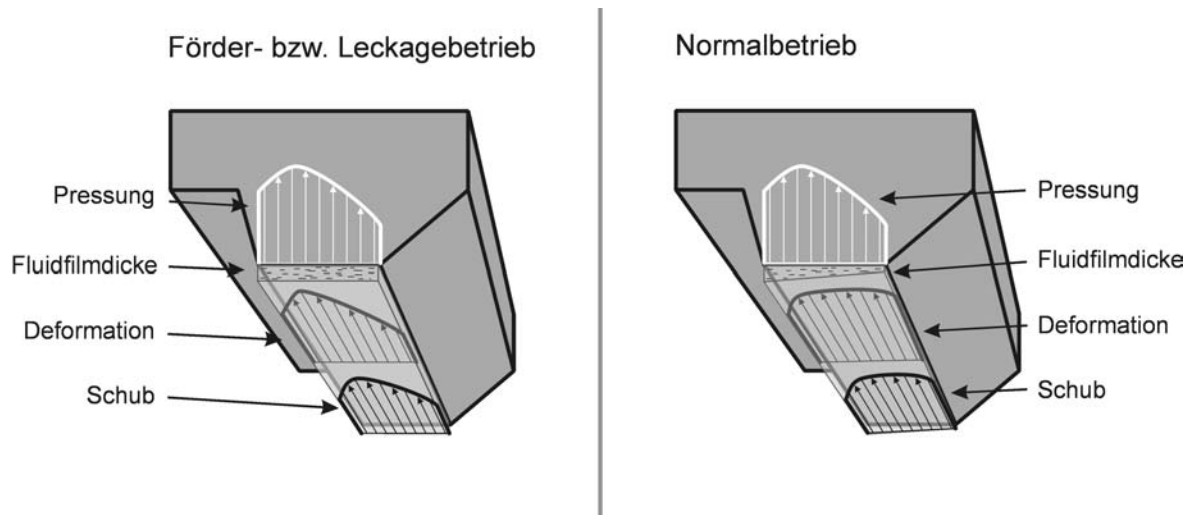


Bild 69: Einfluss des Schmierungszustandes / Fluidfilmdicke auf die Verzerrung der Elastomeroberfläche

Die verschleißbedingte Abnahme des Pressungsmaximums in eine flachere Verteilung mit vergleichbarer Gesamtpressung, führt zu einer Zunahme der Pressung in den anderen Bereichen. Das Abflachen der Pressungsverteilung verringert die Deformation im stirnseitigen Bereich und führt zu einer weiteren Verschiebung der Deformation zur Bodenseite (Bild 70).

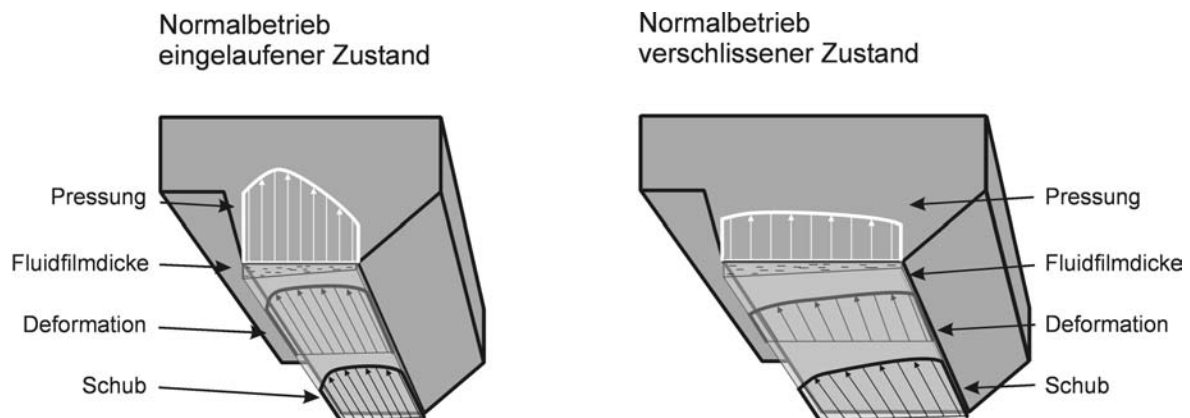


Bild 70: Wirkung des Verschleißes auf die Deformation der Elastomeroberfläche

## 6.5 Zusammenfassung Kapitel 6

Um die wirkende Pressung des RWDR bei Betriebstemperatur auf die Welle besser abzuschätzen, werden Versuchsergebnisse präsentiert, die eine durchschnittliche Absenkung der Radialkraft von 11-12,5% bei einer Temperaturerhöhung von 20 auf 100°C

aufweisen. Bei 100°C entspricht dies bei den untersuchten NBR- und FKM-RWDR einer durchschnittlichen Radialkraft von  $F_{RDIN} = 22,6$  N. Aus dieser Gesamtradialkraft wird eine maximale Pressung in der Dichtzone ermittelt, die von der Dichtzonenbreite, Gestalt der Pressungsverteilung und der wahren Kontaktfläche abhängt. Hier ergeben sich Pressungsmaxima zwischen 0,6-4 MPa. Diese Werte berücksichtigen keine dynamische Belastung des RWDR, welche im Betrieb durch Rundlaufabweichung und Lagerspiel eingebracht wird und zu einer Veränderung der Radialkraft führt.

Die Gestalt der Pressungsverteilung ist durch die Geometrie der RWDR-Dichtkante geprägt und weist bei den üblichen Kontaktwinkelverhältnissen ein stirnseitiges Maximum auf und fällt zu den Rändern hin ab. Die Auswirkung von moderatem Verschleiß (Dichtzonenverbreiterung von 0,1 auf 0,3 mm) auf die Gesamtradialkraft kann bei der Betrachtung der sich im Betrieb verändernden Pressungsverteilung vernachlässigt werden. Die Gesamtabsenkung, welche sich aus Feder- und Elastomeranteil zusammensetzt, summiert sich auf 2,4-3,8%.

Um den Verschleiß besser beschreiben zu können, werden lokale und die gesamte Dichtzone betreffende Belastungsparameter eingeführt, die den Verschleiß in der Dichtzone maßgeblich bestimmen. Mit zunehmender Laufleistung tritt eine Verbreiterung und Abflachung der anfänglich maximumbetonten Pressungsverteilung ein. Abschließend werden die Wirkung der Dichtkanten geometrie, Pressungsverteilung, Schmierungsbedingungen und Betriebsmodi auf die Verzerrung der Elastomeroberfläche in der Dichtzone diskutiert und qualitativ dargestellt. Die anfängliche Verzerrungsverteilung, welche der Pressungsverteilung ähnelt, verändert sich mit zunehmender Laufleistung zu einer Verteilung, die ebenso wie die Pressungsverteilung abflacht beziehungsweise sogar zu einer Verteilung führt, deren Maximum auf die Bodenseite der Dichtzone wandert (Bild 70).