

DICHTHEIT VON RADIAL-WELLENDICHTRINGEN AUF
GEGENLAUFFLÄCHEN MIT MESOSKOPISCHEN STRUKTUREN

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. MARK PHILIPP MATUS

2023

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres
Tag der Promotion: 07.10.2022

Mark Philipp Matus:

Dichtheit von Radial-Wellendichtringen auf Gegenlaufflächen mit mesoskopischen Strukturen, Dissertation © 2023

KURZFASSUNG

DICHTHEIT VON RADIAL-WELLENDICHTRINGEN AUF GEGENLAUFLÄCHEN MIT MESOSKOPISCHEN STRUKTUREN

Stichworte: RWDR, Leckage, Mikrostrukturen, Mesostrukturen, Kratzer, Dellen, Förderwirkung, Förderwert

In den für den Einsatz von Radial-Wellendichtringen (RWDR) aus Elastomer maßgeblichen Normen sind Strukturen auf der Gegenlauffläche, die eine Fluidförderung bewirken können, zu verhindern. In der industriellen Fertigung ist damit zu rechnen, dass die verwendeten Wellenoberflächen nicht immer der in den Normen geforderten Fehlerfreiheit entsprechen. In dieser Arbeit wurde der Einfluss von mesoskopischen Strukturen auf Gegenlaufflächen von RWDR im Hinblick auf deren Abdichtbarkeit untersucht. Die Strukturen wurden in die Dichtungsgegenlaufflächen eingebracht und repräsentieren Fehlstellen, wie sie zum Beispiel in Form von Dellen oder Kratzern auftreten können. Der Fokus lag auf Kratzern unterschiedlicher Tiefe, Orientierung, Anzahl und Anordnung. Als Dichtungsbauformen wurden Standard-RWDR ohne Rückförderhilfen sowie Einfachdrall-RWDR auf ihr Schadenskompensationsvermögen untersucht. In Leckageversuchen wurden kritische Fehlstellen identifiziert. Die Ergebnisse bestätigen, dass sowohl die Tiefe, die Orientierung und die Anzahl von Kratzern innerhalb des Dichtkontakts einen erheblichen Einfluss auf die Dichtigkeit des Dichtsystems haben können. Darüber hinaus zeigten sich bei Mehrfachkratzern Einflüsse des Kratzerabstands sowie deren gegenseitige Ausrichtung auf die Abdichtbarkeit. Bereits eine geringe Anzahl an Kratzern mit Tiefen im Bereich der tolerierbaren Oberflächenrauheit konnte in Kombination mit einem Standard-RWDR zu einer beachtlichen Leckage und damit zum Ausfall des Dichtsystems führen. Die Leckageversuche mit Einfachdrall-RWDR zeigten, dass die auftretende Leckagemenge im Vergleich zum Standard-RWDR deutlich geringer ausfällt. Die Förderwirkung der RWDR und Kratzerstrukturen wurden quantifiziert und mit den Ergebnissen der Leckageversuche korreliert. Basierend auf den experimentellen Ergebnissen wurde ein empirisches Gesamt-Modell aufgestellt, mit dessen Hilfe Strukturförderwerte abgeschätzt werden können. Zur theoretischen Abschätzung der kratzerbedingten Leckage wurden Strömungssimulationen mit dem Open Source Programm *ELMER* ausgeführt. Berechnungen mit dem in *ELMER* implementierten Navier-Stokes- und Reynolds-Solver wurden ausgeführt und die Ergebnisse der Strukturförderwerte mit einander verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung des Reynolds-Solvers insbesondere für geringe Strukturturen bis ca. 3 μm zielführend ist. Für tiefere Strukturen hat sich die Berechnung

mittels Navier-Stokes-Solver als vorteilhaft herausgestellt. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die korrekte Abbildung des Dichtkontakts, insbesondere bei Strukturturen im Bereich der Oberflächenrauheit, weitere Herausforderungen darstellt.

ABSTRACT

PERFORMANCE OF RADIAL SHAFT SEALS ON COUNTERFACES WITH MESOSCOPIC STRUCTURES

Keywords: elastomeric radial lip seal, radial shaft seals, leakage, scratches, micro-structures, meso-structures pumprate

In other projects the reasons for occurring leakage were investigated. However there is no satisfying method to identify critical surface structures such as lead on shafts on the market yet. Furthermore reliable limits are not known. Also in a properly executed grinding process or in the further handling process, scratches on the micro or meso scale can occur on shaft surfaces. In practice it can happen that surfaces, even those identified as good or lead-free, can be a cause of leakage. To promote the current state of research, in this thesis the investigations were carried out in reverse. Good seal counterfaces, which otherwise could be sealed properly, were micro-structured in order to investigate their effect on the performance of radial shaft seals. The focus was on investigating critical scratch failures. For this purpose laser scratches with a variation in depth, orientation, and number were created on the seal counterfaces, and leakage tests were carried out. Test results carried out with mechanically scratches support the comparability with laser-scratches. Different radial shaft seal types, such as plain lip seals or seals with unidirectional sealing aids were tested on the scratches with regard to their capability to compensate failures and to prevent leakage. The micro structures were precisely measured with a 3D-laserscanning microscope. The test results show that depth, orientation, and number of the scratches can have a massive impact on the seal performance. Also the distance and orientation between the structures can affect the leakage-free operation of the sealing system. One important result can be pointed out, namely that a small number of scratches with depths in the order of magnitude of the tolerable surface roughness can lead to a significant amount of leakage and consequently the loss of the sealing system function. By superimposing the reverse pumping rate measured on failure-free counterfaces and the pump rate influenced by the scratches, the net pump rate of the scratches was estimated. An empirical model to estimate the net pump rate of scratches was introduced. Beside the experimental investigations theoretical investigations using computational fluid dynamics were carried out with the open source multiphysics software *ELMER*. Thus the fluid flow through the scratches was estimated and compared with the experimental results. The results obtained with different solvers (Reynolds vs. Navier-Stokes) were compared and the

application limits regarding the calculation of the considered structure parameter combinations could be identified.

PUBLIKATIONEN

Grundlage dieser Dissertation sind die Arbeiten an den FVA-Forschungsvorhaben *Stochastische Strukturen*. Teile der Arbeit wurden bereits in den folgenden Publikationen verwendet:

- [Mat+18] Mark Matus, Veith Pelzer, Bengt Wennehorst und Gerhard Poll. „Kontinuierliche Messung des Rückförderverhaltens von Radialwellendichtungen“. In: 20th ISC International Sealing Conference, 10.-11.10.2018. 2018.
- [MP17a] Mark Matus und Gerhard Poll. „Auswirkung stochastischer Strukturen in Gegenaufläichen auf die Dichtfunktion von Radialwellendichtringen“. In: *Tagungsband Reibung, Schmierung und Verschleiß*. Bd. 1. 58. Tribologie-Fachtagung 2017, 25-27-09-2017. 2017, S. 20/1–20/4. ISBN: 978-3-9817451-2-2.
- [MP17b] Mark Matus und Gerhard Poll. *Auswirkung stochastischer Strukturen von Gegenaufläichen auf die Funktion von Radialwellendichtringen*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 706 I, FVA-Heft 1211, 2017.
- [MP21] Mark Matus und Gerhard Poll. *Auswirkung stochastischer Strukturen in Gegenaufläichen auf die Funktion von Radialwellendichtringen*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 706 II, FVA-Heft 1463, 2021.
- [MvP14] Mark Matus, Jan von Hollen und Gerhard Poll. „Reibungsverluste im Kurbeltrieb von Verbrennungsmotoren - ein Vergleich von Gleit- und Wälzlagern“. In: *Tagungsband Reibung, Schmierung und Verschleiß*. Bd. 1. 2014, S. 73/1–73/15. ISBN: 978-3-00-046545-1.
- [MvP15] Mark Matus, Jan von Hollen und Gerhard Poll. „Reibungsverluste durch die Pleuellagerung von Verbrennungsmotoren – ein Vergleich von Gleit- und Wälzlagern“. In: *Reibungsminimierung im Antriebsstrang: Effiziente Wege finden*, ATZ-Fachtagung, 1.-2.12.2015. Dez. 2015.
- [Ott+15] Kathrin Ottink, Mark Matus, Veith Pelzer und Gerhard Poll. „Investigations into the Friction Loss and the Thermal Impact of Protective Seals for Rolling Element Bearings under Harsh Conditions“. In: *International Tribology Conference 2015, ITC2015*, 16.-20.09.2015. Sep. 2015.

[Sch+20] Felix Schiefer, Mark Matus, Frank Bauer und Gerhard Poll.
*Schädliche Strukturen (Drall): Erkennen und bewerten von
schädlichen Strukturen auf RWDR-Gegenläufflächen.* Frank-
furt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungs-
vorhaben Nr. 805 I, FVA-Heft 1386, 2020.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll gilt mein besonderer Dank für die mir eingeräumten wissenschaftlichen Freiheiten, die fachliche Unterstützung und dem stets vertrauensvollen Umgang.

Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates. Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Kollegen am Institut sowie bei meinen studentischen Hilfskräften für die fachliche und tatkräftige Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit bedanken.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen der Projektreihe *Stochastische Strukturen* vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) finanziell unterstützt. Für die fachliche Unterstützung im Rahmen der Forschungsprojekte danke ich der *Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.* (FVA). Den Mitgliedern der FVA-Arbeitsgruppe *Stochastische Strukturen* unter der Leitung von Herrn Arnold Strauss möchte ich für die konstruktiven und zielführenden Diskussionen danken. Herrn Arnold Strauss danke ich persönlich für die stets sehr gute Zusammenarbeit.

Herzlichst bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen aus der Dichtungsgruppe Bengt Wennehorst, Marius Schüller, Veith Pelzer, Marc Mohaupt und Dilek Bulut für die tolle und freundschaftliche Zusammenarbeit. Norbert Bader danke ich für den stetigen Support in allen technischen und \TeX -nischen Belangen. Tom Wittek und Johannes Marx gehört mein persönlicher Dank für die tatkräftige Unterstützung während und außerhalb der Arbeitszeit.

Für die Unterstützung bei den unzähligen experimentellen Untersuchungen danke ich insbesondere Eike Klus und Filippo Manino als studentische Hilfskräfte.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Carolin und meinen Kindern, die mir während der Promotionszeit eine große Stütze waren und mich durch alle Höhen und Tiefen dieser Zeit begleitet haben. Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung meiner Ausbildung, die ständige Hilfsbereitschaft und Förderung.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2.1	Zielsetzung	3
2.2	Vorgehensweise	4
3	Stand der Forschung	5
3.1	Dichtungen – Grundlagen	5
3.2	Radial-Wellendichtringe – Grundlagen	8
3.3	Dichtfunktion von RWDR	11
3.3.1	Schmierfilmaufbau	12
3.3.2	RWDR-Förderwirkung	17
3.3.3	RWDR-Sonderbauformen	22
3.4	Anforderungen an RWDR-Gegenauflflächen	25
3.5	Einfluss von Strukturen in RWDR-Gegenauflflächen	27
3.6	Recherche zur Geometrie relevanter Schleiffehler	32
4	Experimentelle Ausstattung und Untersuchungsmethoden	35
4.1	Gegenauflflächen	35
4.2	Herstellung von Strukturen	35
4.2.1	Dellenschäden	35
4.2.2	Kratzerschäden	37
4.3	Begleitende Untersuchungen	38
4.3.1	Radial-Kraftmessung von RWDR	38
4.3.2	Technische Ausstattung zur optischen Messung	40
4.3.3	Geometrische Analyse der Strukturen	41
4.3.4	Messung der RWDR-Dichtkantenbreite und -position	41
4.4	Untersuchte Dichtungsbauformen	43
4.4.1	Standard-RWDR	43
4.4.2	Einfachdrall-RWDR	43
4.5	Versuchsöl	44
4.6	Prüfstandstechnik	45
4.6.1	Funktionsprüfstand zur Untersuchung von Dichtsystem- Leckage	45
4.6.2	Horizontal-Förderprüfstand zur Förderwert-Messung	46
4.7	Definitionen zur Drehrichtung	47
4.8	Förderwert-Bestimmung	48
4.8.1	Methode 1: Messung der Leckagerate	48
4.8.2	Methode 2: Messung des kombinierten Förder- werts	50
4.9	Ablauf von Leckageversuchen	55
5	Experimentelle Ergebnisse	57
5.1	Vergleich von Kratzerkonturen	57
5.2	Leckageversuche	58
5.2.1	Versuche mit Standard-RWDR	58

5.2.2	Versuche mit Einfachdrall-RWDR	72
5.3	Förderwertuntersuchungen	74
5.3.1	Förderwertmessung ohne Struktureinfluss	74
5.3.2	Einfluss der Querschnittsfläche	76
5.3.3	Einfluss des Winkels	82
5.3.4	Einfluss von Kratzeranzahl und -abstand	86
5.3.5	Empirisches Gesamt-Modell	88
5.3.6	Einfluss bei Wechselwinkeln	91
6	Strömungssimulation	95
6.1	Grundlagen	95
6.1.1	Newtonsches Fluid	95
6.1.2	Navier-Stokes-Gleichung	97
6.1.3	Reynolds-Gleichung	98
6.2	Vorgehensweise und Randbedingungen	105
6.3	Simulationsergebnisse	107
6.3.1	Einzelkratzer	107
6.3.2	Einfluss des Struktur-Aspektverhältnisses	110
6.3.3	Mehrfachkratzer	112
6.3.4	Diskussion: Simulation vs. Messung	116
7	Zusammenfassung und Ausblick	117
	Literatur	121
A	Anhang	131
A.1	Leckageversuche mit Standard-RWDR	131
A.1.1	Referenzversuche ohne Schaden	131
A.1.2	Leckageversuche - Dellenschäden	133
A.1.3	Leckageversuche - Mechanisch eingebrachte Einzelkratzer	135
A.1.4	Leckageversuche - Laser-Einzelkratzer	136
A.1.5	Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; 0,1 mm Kratzer-Abstand	144
A.1.6	Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; 1 mm Kratzer-Abstand	152
A.1.7	Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; gleichmäßig auf Umfang verteilte Kratzer	154
A.1.8	Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; Wechselwinkel	158
A.2	Leckageversuche mit Einfachdrall-RWDR	166
A.2.1	Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; 0,1 mm Kratzer-Abstand	166
A.3	Simulation	175
A.3.1	Randbedingungen für Reynolds-Solver und Navier-Stokes-Solver	175
A.3.2	Geometrien der untersuchten Einzelkratzer	176

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1	Vorgehensweise zum Erreichen des Forschungsziels	4
Abbildung 3.1	Schema Abdichtung	5
Abbildung 3.2	Gliederung von Dichtungen	6
Abbildung 3.3	Spalt- und Labyrinthdichtung	7
Abbildung 3.4	Aktive Dichtwirkung durch Fördergewinde	8
Abbildung 3.5	Wirkprinzipien von Dichtungen	9
Abbildung 3.6	RWDR-Hauptfunktionen	10
Abbildung 3.7	Aufbau eines RWDR	11
Abbildung 3.8	Schematische Darstellung eines Radial-Gleitlagers mit Druckverteilung	12
Abbildung 3.9	Reibungszustand eines hydrodynamischen Gleitlagers anhand einer Stribeck-Kurve	15
Abbildung 3.10	Schmierungszustand dynamischer Berührungsdichtungen	16
Abbildung 3.11	Vergleich Dichtkanteneinlauf	16
Abbildung 3.12	Verzerrungshypothese	18
Abbildung 3.13	Seitenstromhypothese	19
Abbildung 3.14	Wischkantenhypothese	20
Abbildung 3.15	Oil-Drop-Test	21
Abbildung 3.16	Funktion-Einfachdrall-RWDR	23
Abbildung 3.17	Einfachdrall-RWDR	23
Abbildung 3.18	Wechseldrall-RWDR	24
Abbildung 3.19	Wave-Seal-RWDR	24
Abbildung 3.20	PTFE-Manschette	25
Abbildung 3.21	Gegenüberstellung unterschiedlicher Schleifkommata; nach [TB17]	33
Abbildung 3.22	Topografie einer Schleifriefe; nach [Koe72]	34
Abbildung 4.1	Maße der verwendeten Gegenlaufflächen	35
Abbildung 4.2	Herstellung von Dellenschäden	36
Abbildung 4.3	Vorrichtung zur Erzeugung mechanischer Kratzerschäden	37
Abbildung 4.4	Beispielhafte Anordnung der Laserkratzer auf den Gegenlaufflächen	38
Abbildung 4.5	Radialkraftmessgerät	39
Abbildung 4.6	Beispiel einer Radialkraftmessung an einem Standard-RWDR	39
Abbildung 4.7	Relative Abweichung der Radialkraft für Standard-RWDR in Abhängigkeit der Messdauer bezogen auf den Radialkraftwert nach einer Stunde Messdauer	40

Abbildung 4.8	Messung von Mikrostrukturen und Dichtkantenbreiten	41	
Abbildung 4.9	Vorgehensweise zur Auswertung von Verschleiß und Kratzergeometrie am Beispiel eines Einzelkratzers	42	
Abbildung 4.10	Messung der RWDR-Dichtkantenbreite und -position	42	
Abbildung 4.11	Standard-RWDR	43	
Abbildung 4.12	Einfachdrall-RWDR	43	
Abbildung 4.13	Berechnete dynamische Viskosität des Versuchssöls		44
Abbildung 4.14	Prüfkammer des Funktionsprüfstands	45	
Abbildung 4.15	Horizontal-Förderprüfstand	47	
Abbildung 4.16	Definitionen zur Drehrichtung	48	
Abbildung 4.17	Prinzip der Leckageratenmessung	50	
Abbildung 4.18	Prinzip zur Messung des kombinierten Förderwerts	51	
Abbildung 4.19	Beispiel einer Förderwertberechnung	53	
Abbildung 4.20	Beispiel einer nicht zielführenden Förderwertberechnung	55	
Abbildung 5.1	Vergleich von Kratzerkonturen	57	
Abbildung 5.2	Abtrag der Randaufwürfe in Laufspur	62	
Abbildung 5.3	Standard-RWDR-Förderwerte auf ungeschädigten Gegenauflähen	75	
Abbildung 5.4	Einfachdrall-RWDR-Förderwerte auf ungeschädigten Gegenauflähen	76	
Abbildung 5.5	Gegenüberstellung der Förderwerte unterschiedlicher Einzel-Strukturen	77	
Abbildung 5.6	Vergleich der Querschnittsflächen und der bezogenen Förderwerte	78	
Abbildung 5.7	Vergleich der effektiven Tiefe und der bezogenen Förderwerte	80	
Abbildung 5.8	Definition der Messrichtung für Kratzerquerschnitt und -Breite	81	
Abbildung 5.9	Vergleich der effektiven Tiefe mit der gemessenen Kratzertiefe	81	
Abbildung 5.10	Einfluss von Kratzertiefe und -winkel auf den Förderwert von Einzelkratzern	82	
Abbildung 5.11	Vergleich zwischen modellbasierten und gemessenen Einzel-Kratzerförderwerten	84	
Abbildung 5.12	Ableitung einer Dichtheitsgrenze für Einzel-Kratzer	85	
Abbildung 5.13	Ableitung einer noch zulässigen Grenztiefe für Einzelkratzer	85	
Abbildung 5.14	Einfluss der Kratzeranzahl und des -abstands; bis Anzahl: 200	86	

Abbildung 5.15	Einfluss der Kratzeranzahl und des -abstands; bis Anzahl: 20	88
Abbildung 5.16	Vergleich zwischen empirischem Gesamt-Modell und gemessenen Einzel-Kratzerförderwerten	89
Abbildung 5.17	Vergleich zwischen empirischem Gesamt-Modell und gemessenen Mehrfach-Kratzerförderwerten, bis Kratzeranzahl: 200	90
Abbildung 5.18	Vergleich zwischen empirischem Gesamt-Modell und gemessenen Mehrfach-Kratzerförderwerten; bis Kratzeranzahl: 20	91
Abbildung 5.19	Förderwertuntersuchungen von Strukturen mit 30°-Wechselwinkeln	92
Abbildung 5.20	Förderwertuntersuchungen von Strukturen mit 70°-Wechselwinkeln	93
Abbildung 6.1	Typische Fließkurven unterschiedlicher Schmier- stoffe	96
Abbildung 6.2	Geschwindigkeitsgefälle einer <i>Newtonschen Flüssigkeit</i>	96
Abbildung 6.3	Spannungen und Massenströme am Volumen- element	97
Abbildung 6.4	Massenströme durch rechteckiges Volumenele- ment	100
Abbildung 6.5	Druckverlauf eines Gleitlagers mit unterschied- lichen Kavitations-Modellen	102
Abbildung 6.6	Kaviataionsblasen nach der JFO-Theorie	102
Abbildung 6.7	Vorgehensweise bei der Strömungs-Simulation	106
Abbildung 6.8	Größen und Randbedingungen am Beispiel ei- nes synthetisch generierten Einzelkratzers	107
Abbildung 6.9	Eindringen der Dichtkante in Kratzer	107
Abbildung 6.10	Simulationsergebnisse 50°-Einzelkratzer	108
Abbildung 6.11	Relative Abweichung der Simulationsergebnis- se zwischen RS, NSS und Messergebnissen bei 50°-Einzelkratzern	109
Abbildung 6.12	Reynolds-Zahl Re_x von Einzel-Kratzern	111
Abbildung 6.13	<i>Modifizierte Reynolds-Zahl</i> Re_x und Aspektver- hältnis t/b von Einzelkratzern	112
Abbildung 6.14	Geometrie eines Kratzers innerhalb der Lauf- spur (tangential)	113
Abbildung 6.15	Nachstellung der Eindrückung einer Dichtung in einen Kratzer	113
Abbildung 6.16	Simulationsergebnisse von Mehrfachkratzern	114
Abbildung 6.17	Druck- und Kavitationsbereiche an Einzelkrat- zern unterschiedlicher Tiefe	115
Abbildung 6.18	Simulationsergebnisse von Mehrfachkratzern	115
Abbildung A.1	Übersicht der Randbedingungen von Navier- Stokes-Solver und Reynolds-Solver	175

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1	Übersicht von Oberflächen-Rauheitskenngrößen und -härte verschiedener Normen und Hersteller	26
Tabelle 4.1	Parameter zur Dellenerzeugung	36
Tabelle 4.2	Physikalische Eigenschaften des Versuchsöls	44
Tabelle 4.3	Versuchsbedingungen bei Leckageversuchen	56
Tabelle 5.1	Referenz-Leckageversuche auf ungeschädigten Gegenauflflächen, mit Standard-RWDR, je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s 24 h bei 15 m/s	59
Tabelle 5.2	Leckageversuche auf Dellenschäden	60
Tabelle 5.3	Versuchsergebnisse zum Einlaufverschleiß: nach 1 und 6 Stunden Laufzeit (oben) nach 5 und 15 Minuten Laufzeit (unten) Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Drehrichtung: leckagefördernd	61
Tabelle 5.4	Leckageversuch mit mechanisch eingebrachten Kratzerschäden; Kratzerwinkel: 30°, Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Drehrichtung: leckagefördernd	63
Tabelle 5.5	Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Einzelkratzern; Variation: Kratzerwinkel und -tiefe; Standard-RWDR; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Drehrichtung: leckagefördernd	64
Tabelle 5.6	Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Mehrfachkratzern; Variation: Kratzeranzahl und -tiefe; Standard-RWDR; Kratzerwinkel: 30°; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s; Drehrichtung: leckagefördernd	66
Tabelle 5.7	Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Mehrfachkratzern; Variation: Kratzerabstand und -tiefe; Standard-RWDR; Kratzerwinkel: 30°; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s; Drehrichtung: leckagefördernd	68
Tabelle 5.8	Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Mehrfachkratzern mit Wechselwinkeln; Variation: Kratzeranzahl und -tiefe; Wechselwinkel: +30°/-30°, +70°/-70°; Kratzerabstand: auf Umfang verteilt; Standard-RWDR; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s	71

Tabelle 5.9	Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Mehrfachkratzern; Variation: Kratzeranzahl und -tiefe; Einfachdrall-RWDR; Kratzerwinkel: 30°; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s; Drehrichtung: leckagefördernd 73
Tabelle A.1	Referenzversuche ohne Schaden, Standard-RWDR, Gesamtdauer 192 Stunden Drehrichtungswechsel nach jeweils 48 Stunden: 24 Stunden bei 5 m/s + 24 Stunden bei 15 m/s, Start: CW 131
Tabelle A.2	Referenzversuche ohne Schaden, Standard-RWDR, Gesamtdauer 192 Stunden Drehrichtungswechsel nach jeweils 48 Stunden: 24 Stunden bei 5 m/s + 24 Stunden bei 15 m/s, Start: CCW 132
Tabelle A.3	Erweiterte Ergebnisse - Leckageversuche auf Dellenschäden mit 10 µm Tiefe 133
Tabelle A.4	Erweiterte Ergebnisse - Leckageversuche auf Dellenschäden mit 15 µm Tiefe 134
Tabelle A.5	Leckageversuch mit mechanisch eingebrachten Kratzerschäden; Kratzerwinkel: 30°, Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Drehrichtung: leckagefördernd 135
Tabelle A.6	Solver-Randbedingungen 175
Tabelle A.7	Geometrie synthetischer Einzelkratzer; 50 µm Breite 176
Tabelle A.8	Geometrie synthetischer Einzelkratzer; 100 µm Breite 176
Tabelle A.9	Parameter zur Berechnung der <i>modifizierten Reynolds-Zahl</i> Re_x unterschiedlicher Einzelkratzer 177

FORMEL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

FORMELZEICHEN RÖMISCH

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A_{Struk}	μm^2	Querschnitt eines Einzelkratzers
a_{Struk}	mm	tangentialer Abstand von Mehrfachkratzern
b_{Struk}	μm	Breite eines Einzelkratzers
d_{Welle}	mm	Durchmesser der Gegenauflfläche
f	–	Reibwert
F_{rad}	N	Radialkraft
FW_{Struk}	mg/m	Strukturförderwert
$FW_{\text{Struk,grenz}}$	mg/m	Strukturförderwert; Dichtheitsgrenze
$FW_{\text{Struk,wicht}}$	mg	gewichteter Strukturförderwert
h_0	μm	zentrale Schmierfilmhöhe ohne Struktur
h_{F}	m	Federwirkabstand
n_{Struk}	–	Anzahl von Mehrfachkratzern in Laufspur
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
R_{max}	μm	Maximale Rautiefe
R_p	μm	Mittlere Glättungstiefe
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
t_{eff}	μm	effektive Tiefe eines Einzelkratzers
t_{mess}	μm	gemessene Kratzertiefe
$T_{\text{über}}$	$^{\circ}\text{C}$	Übertemperatur im Dichtkontakt
T_{gleit}	$^{\circ}\text{C}$	effektive Temperatur im Dichtkontakt

FORMELZEICHEN GRIECHISCH

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
α	°	RWDR-Kontaktflächenwinkel auf Stirnseite
β	°	RWDR-Kontaktflächenwinkel auf Bodenseite
φ_{Struk}	°	Kratzerwinkel; gegenüber Wellenachse

INDIZES

eff	effektiv; bei Tiefe: aus Querschnitt und Breite berechnet
grenz	Grenze abdichtbarer Strukturen
Struk	Struktur
wicht	mit effektiver Tiefe gewichtet

ABKÜRZUNGEN

ACM	Polyacrylat-Kautschuk
BK	Brinellkugel
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CCW	gegen Uhrzeigersinn, engl.: <u>counter</u> <u>clock</u> <u>wise</u>
CW	im Uhrzeigersinn, engl.: <u>clock</u> <u>wise</u>
EHL	engl.: <u>E</u> lasto <u>h</u> ydrodynamic <u>L</u> ubrication
FKM	Fluorkautschuk
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
FW	Förderwert
HNBR	Hydrierter Nitrilkautschuk
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk, engl.: <u>N</u> itrile <u>B</u> utadiene <u>R</u> ubber
NSS	Navier-Stokes-Solver
PTFE	Polytetrafluorethylen
RMA	Rubber Manufacturers Association

RS	Reynolds-Solver
RWDR	Radial-Wellendichtring

EINLEITUNG

In vielen Anwendungen werden Radial-Wellendichtringe (RWDR) zur Abdichtung gefluteter oder bespritzter Wellendurchtrittsstellen eingesetzt. Typische Beispiele stellen die Getriebeabdichtung oder die Kurbelwellenabdichtung von Verbrennungsmotoren dar.

RWDR sind in der Lage geringe Mengen Schmierstoff aktiv in den abzudichtenden Raum zurück zu fördern und hierdurch auch bei dynamischen Dichtspalten von wenigen Mikrometern Höhe leakagefrei abzudichten. Voraussetzung dafür ist ein funktionsfähiges Dichtsystem, bestehend aus Dichtring, abzudichtendem Medium und Gegenlauffläche.

In den für den Einsatz von RWDR maßgeblichen Normen sind Strukturen auf der Gegenlauffläche, die eine Fluidförderung bewirken können, zu verhindern. Es wird eine drallfreie Oberfläche gefordert, die frei von jeglichen Fehlstellen wie Dellen, Kratzern, Rissen, Rost und Ausbrüchen ist.

In der Praxis besteht der Wunsch, wirtschaftlichere Fertigungsverfahren, alternative Werkstoffe oder reibungs- und verschleißmindernde Beschichtungen zu nutzen. Ferner ist in der industriellen Fertigung damit zu rechnen, dass die verwendeten Wellenoberflächen nicht immer der in den Normen geforderten Fehlerfreiheit entsprechen und oftmals Erfahrungen über tolerierbare Grenzwerte fehlen. Diese Wellen werden somit zum Ausschuss.

Außerdem sind Grenzwerte zur Erkennung und Auswertung leakagekritischer Strukturen notwendig, um zum Beispiel Messverfahren zuverlässig auslegen zu können. Aufgrund unzuverlässiger Systeme zur Erkennung und Auswertung der stets geforderte Drallfreiheit bzw. kritischer Strukturen kann es in der Praxis trotz erfolgreicher Abnahme von Gegenlaufflächen zu Leakage kommen. Um zukünftig Durchtrittsstellen von rotierenden Wellen bei steigenden Anforderungen wirtschaftlich herstellen und bewerten zu können, ist es notwendig, Herstellern und Anwendern erweiterte Informationen über Grenzwerte zulässiger Fehlstellen bereitzustellen.

Diese Arbeit soll dazu beitragen, die Auswirkungen von Oberflächenstrukturen hinsichtlich ihrer Abdichtbarkeit sowie Förderwirkung einordnen zu können.

ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

2.1 ZIELSETZUNG

Anders als in anderen Arbeiten, in denen die Abdichtbarkeit gegebener schadhafter, zum Beispiel Drall behafteter Wellen untersucht wurde, soll in dieser Arbeit der Einfluss von gezielt eingebrachten Oberflächenstrukturen in ursprünglich förderneutrale Oberflächen herausgearbeitet werden. Ziel ist es, Grenzbereiche der Abdichtbarkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter aufzuzeigen.

Besonderer Fokus soll auf Kratzerschäden mit Tiefen bis in den Bereich der üblichen geforderten Wellenoberflächenrauheit gelegt werden. Neben der Tiefe, Anzahl und Orientierung sollen zusätzlich auch der Einfluss des Abstands sowie der Winkel zwischen den Kratzern untersucht werden.

Neben den experimentellen Untersuchungen soll die kratzerbedingte Förderwirkung mittels Strömungssimulation theoretisch untersucht werden. Durch die Berechnung der fehlstelleninduzierten Fluidförderung und den Abgleich mit Messwerten zum Fördervermögen der Strukturen und dem Rückfördervermögen der Dichtungen soll eine Vorhersage einer möglichen Leckage im Vorfeld ermöglicht werden.

2.2 VORGEHENSWEISE

Der Lösungsweg zum Erreichen des Forschungsziels ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Zunächst werden Strukturen unterschiedlicher Geometrie in förderneutrale Gegenläufigen eingebracht. Diese Strukturen werden insbesondere nach Durchführung der experimentellen Versuche geometrisch analysiert, um die im Dichtkontakt vorherrschende Geometrie sowie einen möglichen Verschleiß zu identifizieren.

Der experimentelle Teil dieser Arbeit lässt sich in drei Abschnitte unterteilen. Zunächst werden mit Hilfe von Leckageversuchen die eingebrachten Strukturen hinsichtlich ihrer Abdichtbarkeit untersucht. Im Anschluss wird der Förderwert der Kratzerstrukturen quantifiziert. Parallel dazu wird der RWDR-Rückförderwert der zu untersuchenden Dichtungsbauforn untersucht. Der theoretische Teil umfasst die Strömungssimulation der kratzerbedingten Förderwirkung und den Abgleich mit den experimentellen Ergebnissen.

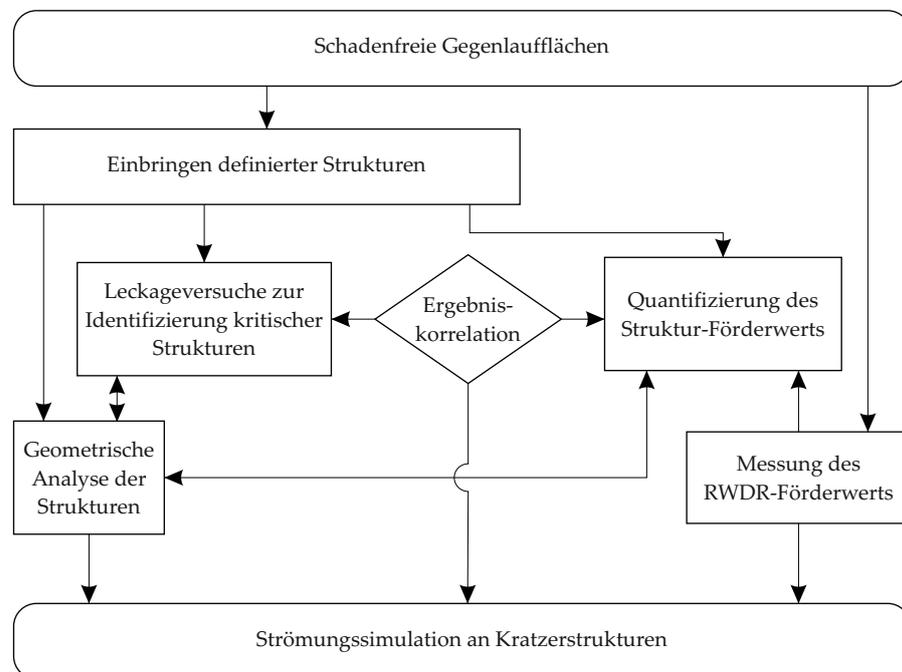


Abbildung 2.1: Vorgehensweise zum Erreichen des Forschungsziels

STAND DER FORSCHUNG

Nach einer Einführung in die Thematik der Dichtungen werden in diesem Kapitel die Grundlagen zur Funktion und dem Einsatz von Radial-Wellendichtringen (RWDR) erörtert. Darauf aufbauend werden die Anforderungen an RWDR-Gegenauflähen dargestellt und der Einfluss von Mikrostrukturen in RWDR-Gegenauflähen auf die RWDR-Funktion hervorgehoben.

3.1 DICHTUNGEN – GRUNDLAGEN

Dichtungen dienen im Allgemeinen dazu, den Stoffaustausch verschiedener Medien zwischen zwei benachbarten Arbeitsräumen zu verhindern oder zu begrenzen. Die Arbeitsräume besitzen eine gemeinsame Grenzfläche, welche gegenüber der Dichtung eine Relativbewegung erfahren kann (Abbildung 3.1). Da eine vollständige Sperrung des Stoffaustausches meist nicht realisiert werden kann oder auch nicht erforderlich ist, wird die auftretende Leckage meist auf ein tolerierbares Maß begrenzt. Eine Leckage kann zum Beispiel aufgrund von Diffusionsvorgängen durch die Dichtung oder durch einen Strömungsanteil über die Grenzfläche zwischen Dichtung und Gegenfläche hervorgerufen werden.

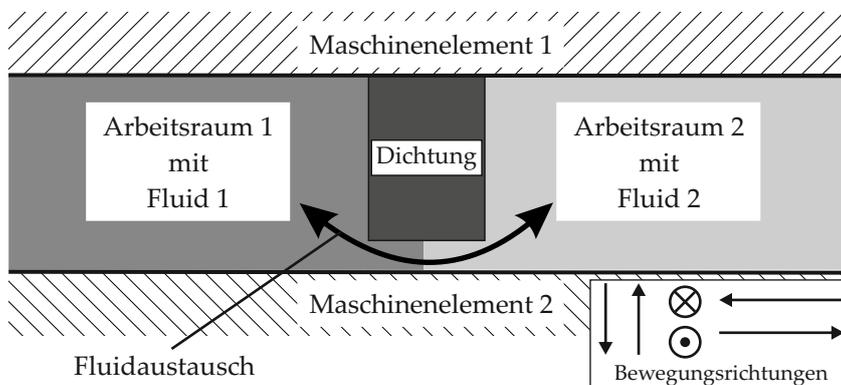


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung einer Abdichtung

Abhängig davon ob eine Relativbewegung vorliegt, wird zwischen einer statischen und einer dynamischen Abdichtung unterschieden. Bei dynamischen Dichtungen kann die Bewegung translatorisch oder rotatorisch sein, wodurch verschiedene Dichtungen erforderlich werden. Überordnend werden Dichtungen in berührende und berührungsfreie Dichtungen unterteilt. Eine Übersicht über die verschiedenen Bauformen von Dichtungen liefert Abbildung 3.2.

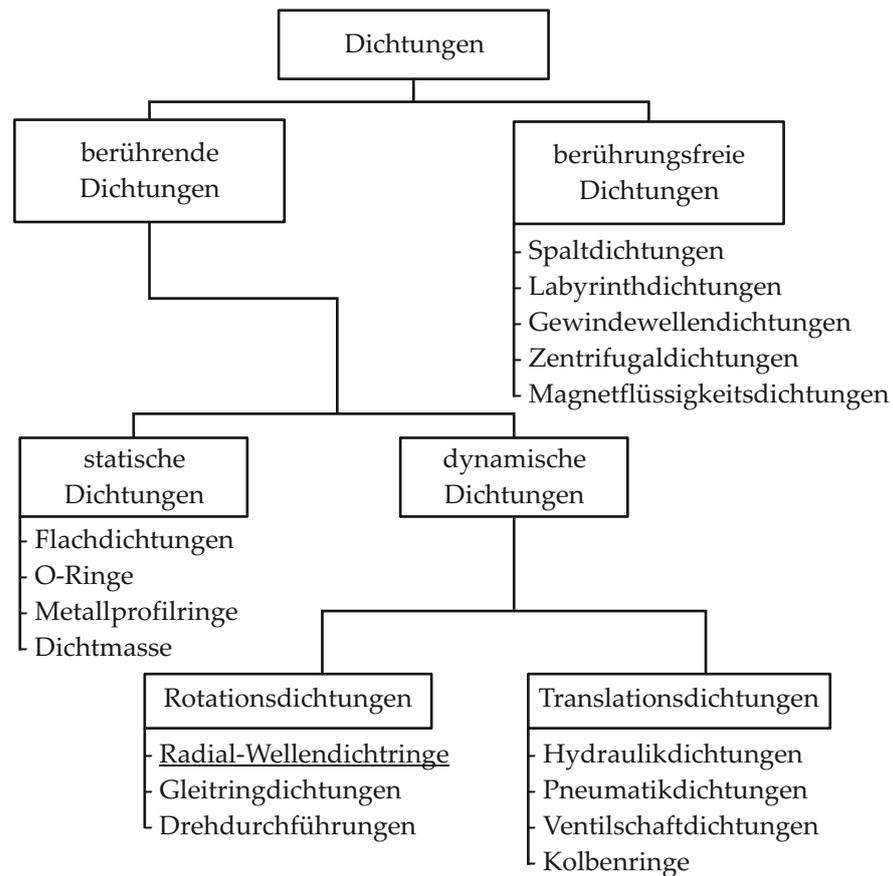


Abbildung 3.2: Gliederung von Dichtungen; nach [Pol12]

Beruehrungsfreie Dichtungen besitzen meist einen konstruktiv fest vorgegebenen Abstand ihrer Funktionsflächen. Hierbei handelt es sich zumeist um Spalt- oder Labyrinthdichtungen (Abbildung 3.3). Der Dichtspalt ist im Vergleich zu den berührenden Dichtungen wesentlich größer, weshalb diese Dichtungen vergleichsweise geringe Reibung erzeugen. Aus diesem Grund werden beruehrungsfreie Dichtungen häufig bei schnell laufenden Wellen, wie z.B. bei Werkzeugmaschinen-spindeln oder Turbomaschinen, eingesetzt. Häufig werden beruehrungsfreie Spaltdichtungen zum Abdichten fettgeschmierter Wälzlager eingesetzt. Je nach Anwendung kann dabei eine einfache Ausführung als Stauscheibe genügen, um das Fett im Lager zu halten (vgl. Abbildung 3.3, rechts). Eine Erhöhung der passiven Dichtwirkung kann mit Hilfe von in Reihe angeordneter Spalte und im Verbund eingesetzter Fangvorrichtungen sowie Ablaufkanäle realisiert werden. Diese Vorrichtungen funktionieren allerdings nur bei ausreichend niedrigem Fluidstand, welcher unterhalb der Welle liegen muss. Fluidnebel kann dadurch alleine nicht zurückgehalten werden. Aktiv kann zum Beispiel durch Ausnutzung der Fliehkraft und anderer fluiddynamischer Effekte einer Druckdifferenz entgegengewirkt werden. Des Weiteren kann mit Hilfe von Wirbelbildung im Fluid in begrenzten Drehzahlbe-

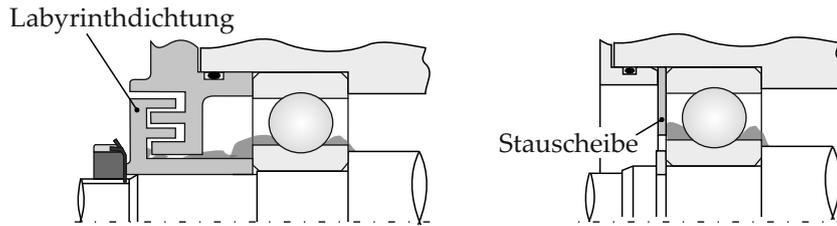


Abbildung 3.3: Beispiel für eine Labyrinthdichtung (links) und eine Spaltdichtung mittels Stauscheibe (rechts)

reichen, auch bei einem relativ großem Spalt, eine Dichtheit ermöglicht werden.

Durch die zunehmende Elektrifizierung des KFZ-Antriebsstrangs und die damit einhergehenden höheren Drehzahlen besteht der Bedarf nach immer leistungsfähigeren Dichtungskonzepten. Auch hierbei können berührungsfreie Dichtungen im dynamischen Betrieb ihre Vorteile ausspielen. Zur statischen Abdichtung bei Stillstand wäre eine Kombination von berührungsfreien Spaltdichtungen und berührenden Dichtungen, die z.B. fliehkraftbedingt abheben, denkbar.

Bei *berührenden statischen Dichtungen* wird eine Sperrwirkung vorwiegend durch Festkörperkontakt zwischen Dichtung und Grenzfläche realisiert. Um Leckkapillare im Kontakt zwischen Dichtung und abzudichtender Fläche zu verschließen, ist ein Kontaktflächenanteil von über 50 % nötig [Pol12]. Formabweichungen und stochastische Fehlstellen können jedoch auch bei nominell ausreichendem Kontaktflächenanteil zu Leckage führen. Kapillarkräfte im Fluid können die Dichtwirkung positiv unterstützen. Klassische statische Dichtungen sind zum Beispiel O-Ringe oder Flachdichtungen.

Die Kontaktverhältnisse statischer Dichtungen können bei *berührenden dynamischen Dichtungen* nicht realisiert werden, da die vergleichsweise großen Kontaktflächen bzw. Kontaktpressungen zu einer zu hohen Reibung führen würden. Infolge dessen käme es zu einer starken thermischen Beanspruchung des Dichtsystems, sodass u.a. hoher Verschleiß die Folge wäre. Dynamische Dichtungen weisen im Betrieb meist einen sich selbsttätig einstellenden, hydrodynamischen Dichtspalt¹ auf, welcher von der Größenordnung der Rauheit ist.

Zusätzlich können Dichtungen nach ihren Wirkprinzipien unterteilt werden. Hierbei wird zwischen einer *aktiven* sowie einer *passiven Dichtwirkung* unterschieden (Abbildung 3.5). Innerhalb eines Dichtspalts herrscht stets eine Strömung in Richtung eines Druckgefälles. Bei Dichtungen mit *passivem Wirkmechanismus* wirkt dem Druckgefälle die Drosselwirkung entgegen. Beim Einsatz von Dichtungen mit *aktivem Wirkmechanismus* überlagert sich dem Druckgefälle eine entgegen gerichtete Förderwirkung. Diese kann bei ausreichender Größe sogar eine umgekehrte Strömung bewirken. Die aktive Förderwirkung kann

¹ Siehe auch Abschnitt 3.3.

auf unterschiedliche Weise hervorgerufen werden. Schleuderscheiben nutzen die Fliehkraftwirkung, um Flüssigkeiten und Partikel vom Dichtspalt fernzuhalten. Mit Hilfe von Gewinden oder Drallstegen ist es auch möglich, die bei Wellenrotation auftretenden Schlepplösungen im Fluid umzulenken und so eine gewünschte Förderwirkung zu erzielen. Die Drallstege oder Gewinde können abhängig von der Dichtung zum Beispiel entweder in der Gegenlauffläche oder direkt in der Dichtlippe eingebracht sein. Dieser Effekt findet beispielsweise bei PTFE-Manschettendichtungen oder bei Gewinde-Wellendichtungen Anwendung (vgl. Abbildung 3.4).

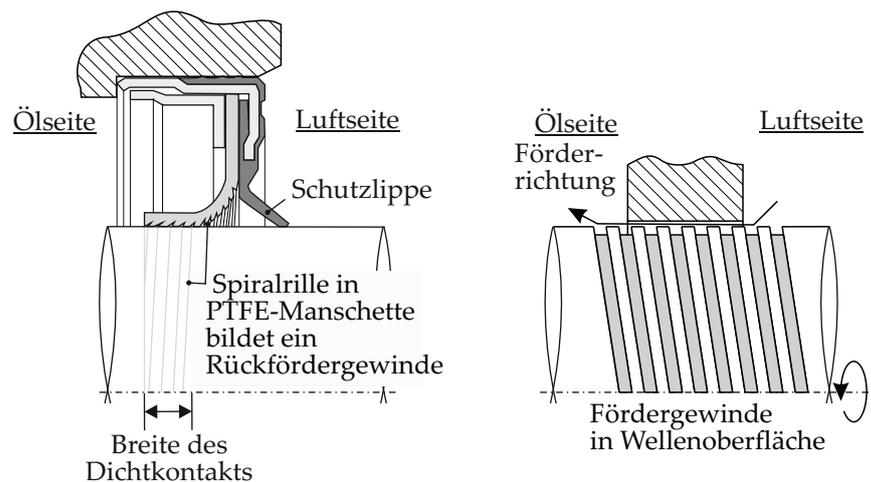


Abbildung 3.4: Aktive Dichtwirkung durch Fördergewinde, links: PTFE-Manschettendichtung, rechts: Gewinwellendichtung

Häufig werden *passiv* und *aktiv* wirkende Dichtungen kombiniert, um die Dichtwirkung für den jeweiligen Anwendungsfall optimal zu gestalten.

3.2 RADIAL-WELLENDICHTRINGE – GRUNDLAGEN

RWDR sind häufig eingesetzte Maschinenelemente und werden zur Abdichtung gefluteter oder bespritzter Wellendurchtrittsstellen in zahlreichen Anwendungen eingesetzt. Typische Beispiele sind die Kurbelwellenabdichtung von Verbrennungsmotoren oder die Getriebeabdichtung. Elastomer-RWDR sind in erster Linie durch die DIN 3760 [DIN96] und ergänzend durch die DIN 3761 [DIN84c] sowie ISO 6194 [ISO07] genormt.

Sie lassen sich den berührenden, dynamischen Rotationsdichtungen zuordnen. Aufgrund ihres Wirkprinzips können diese zusätzlich den aktiven Dichtungen zugeordnet werden (vgl. Abbildung 3.2 und Abbildung 3.5). Die Hauptabdichtung besteht im Kontakt zwischen Dichtkante und Gegenlauffläche. Die statische Abdichtung zwischen RWDR-Außenfläche und Gehäuse stellt die Nebenabdichtung dar.

Im Betrieb stellt sich aufgrund der mikroelastohydrodynamischen Vorgänge im Dichtkontakt ein Dichtspalt zwischen Dichtkante und Gegenlauffläche ein (siehe Abschnitt 3.3).

Im Gegensatz zu passiven Dichtungen, bei denen die Dichtwirkung allein durch Drosselwirkung erzielt wird, sind RWDR in der Lage, aktiv Fluid zu fördern und einem Druckgefälle entgegen zu wirken. Die Hauptfunktion von RWDR besteht zumeist im Rückhalt des Schmierstoffs in den abzudichtenden Raum. Je nach Ausführung und Einbaurichtung kann bei der Verwendung von RWDR, zum Bei-

Wirkprinzipien von Dichtungen

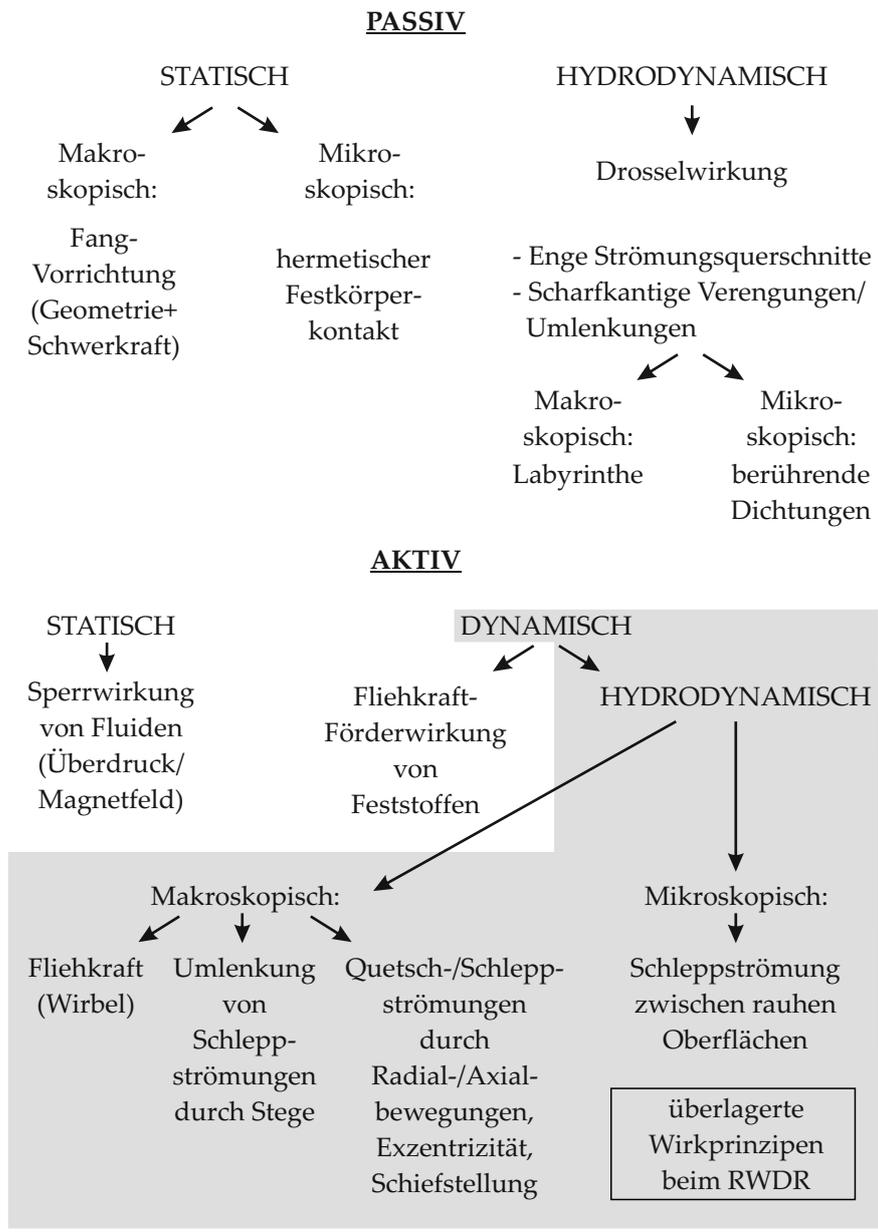


Abbildung 3.5: Wirkprinzipien von Dichtungen; nach [Pol12]

spiel als Wälzlager-Schutzdichtung², die Hauptfunktion im Fernhalten bzw. Abdichten gegen Verunreinigungen bestehen. Der Rückhalt des Schmierstoffs stellt dann lediglich die Nebenfunktion dar (vgl. Abbildung 3.6).

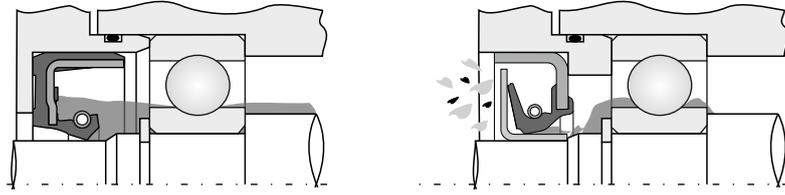


Abbildung 3.6: Beispiel unterschiedlicher Hauptfunktionen von RWDR;
links: Abdichtung gegen Ölaustritt (Beispiel: Getriebeabdichtung); rechts: Fernhalten von Verschmutzungen (Beispiel: Radlager)

In Abhängigkeit des abzudichtenden Mediums, der Gleitgeschwindigkeit, der Dauertemperatur, des Betriebsdruckes sowie des Preises wird der passende Dichtungswerkstoff ausgewählt. Gängige Elastomertypen³ sind zum Beispiel Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR), Polyacrylat-Kautschuk (ACM), hydrierter Nitrilkautschuk (HNBR), Fluorkautschuk (FKM) oder Polytetrafluorethylen (PTFE). Je nach Anforderung gibt es unterschiedliche RWDR-Bauformen, sodass Ausführungen mit oder ohne Schutzlippe oder mit unterschiedlichen Außenflächen verfügbar sind. Der schematische Aufbau eines RWDR der Form AS nach DIN3761-1 ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

Für eine funktionsgerechte Anwendung wird vorausgesetzt, dass der Durchmesser der Dichtlippe etwas kleiner ist als der Wellendurchmesser. Durch diese Überdeckung⁴ ergibt sich eine elastische Aufweitung der Dichtung, welche eine radiale Linienpressung bewirkt. Die Summe aller auf die Wellenoberfläche wirkenden Kraftkomponenten der Dichtlippe wird als Radialkraft bezeichnet⁵ [DIN84a]. Die Radialkraft stellt den Kontakt der Dichtlippe auf der Welle sicher und verhindert somit ein Abheben bei hohen Drehzahlen aufgrund von dynamischen Rundlaufabweichungen der Welle. Zur Unterstützung der Radialkraft besitzt der RWDR eine Spiralzugfeder. Die radiale Anpres-

² Bei Wälzlager-Schutzdichtungen, wie zum Beispiel bei Radlagereinheiten, erfolgt die RWDR-Schmierung zumeist durch die Grundölabgabe des Lagerfettes. Die Lager besitzen oft eine Lebensdauerfettenschmierung. Ein Fluidaustausch mit der Umgebung ist nicht erwünscht. Ausnahmen bilden zum Beispiel *Clean-Bearings* in Getriebeanwendungen. Hierbei ist ein Fluidaustausch zwischen Getriebeöl und Lagerfettgrundöl gewünscht. Weitere Informationen zum Thema Wälzlager-Schutzdichtungen können z.B. [WPo8; OP13; Ott14] entnommen werden.

³ Informationen zu den Elastomer-Einsatzgrenzen können zum Beispiel DIN3760 [DIN96] oder den Produktinformationen von Dichtringherstellern entnommen werden [FST15; SKF13; Tre20].

⁴ Die Überdeckung stellt das Übermaß der Gegenauflfläche gegenüber der Dichtkante im freien, nicht montierten Zustand dar.

⁵ Informationen zur Messung der Radialkraft können Abschnitt 4.3.1 entnommen werden.

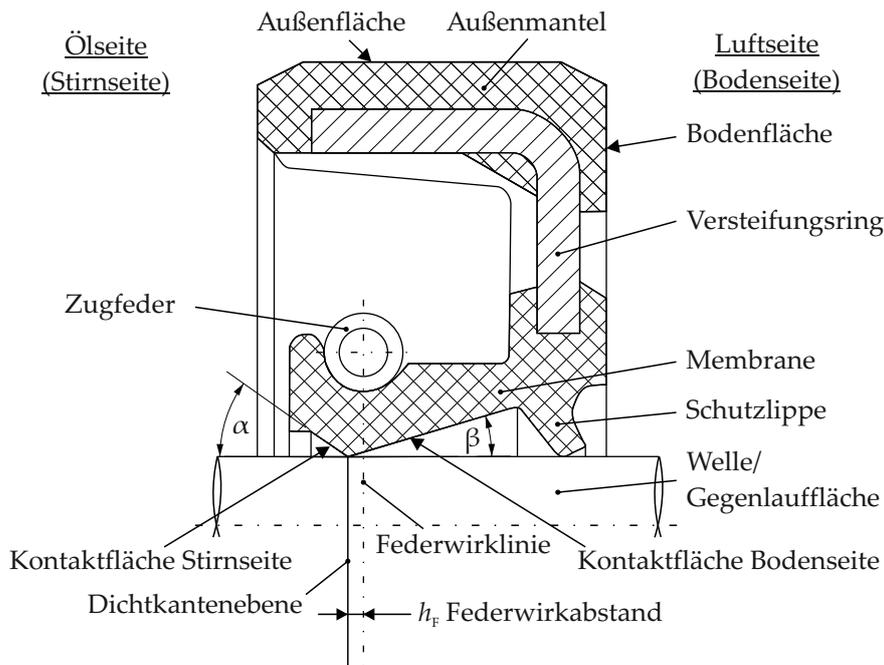


Abbildung 3.7: Aufbau eines RWDR am Beispiel der Form AS; nach DIN3761-1

sung setzt sich folglich aus einem Anteil der Spiralzugfeder und einem Anteil des Elastomerwerkstoffes zusammen. Durch Wärmedehnung und Relaxation des Elastomers nimmt die Anpressung mit der Zeit ab. Ziel ist es, diese Abnahme mit Hilfe der Feder zu kompensieren, aber gleichzeitig die Radialkraft auf ein nötiges Minimum zu reduzieren. Eine zu große Radialkraft kann bei hohen Drehzahlen zu einer thermischen Überbeanspruchung infolge zu hoher Reibungswärme führen, wodurch die Dichtung dauerhaft geschädigt werden kann. Der Radialkraftanteil der Zugfeder moderner RWDR beträgt $\geq 50\%$ der gesamten Radialkraft [BL17]. Die Wirkebene der Feder ist etwas von der Dichtkantenebene hin zur Bodenseite versetzt, wodurch sich der Federwirkabstand h_F ergibt. Dieser dient zur Stabilisierung der Dichtlippenlage und erzeugt im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Kontaktflächenwinkeln einen asymmetrischen Pressungsverlauf im Dichtspalt, welcher für die korrekte Funktion ausschlaggebend ist (vgl. Abbildung 3.12). Ist h_F im Einbauzustand zu klein oder negativ, kann es zur Leckage des Dichtsystems kommen [Bri93].

3.3 DICHTFUNKTION VON RWDR

Eine gute Funktion von RWDR zeichnet sich durch eine geringe Reibung, geringen Verschleiß und Leckagefreiheit aus. Zwischen der Dichtkante und der Welle bildet sich idealerweise ein dünner Schmierfilm aus, der auf der einen Seite groß genug ist, um den Verschleiß gering zu halten, und auf der anderen Seite klein genug ist, um eine

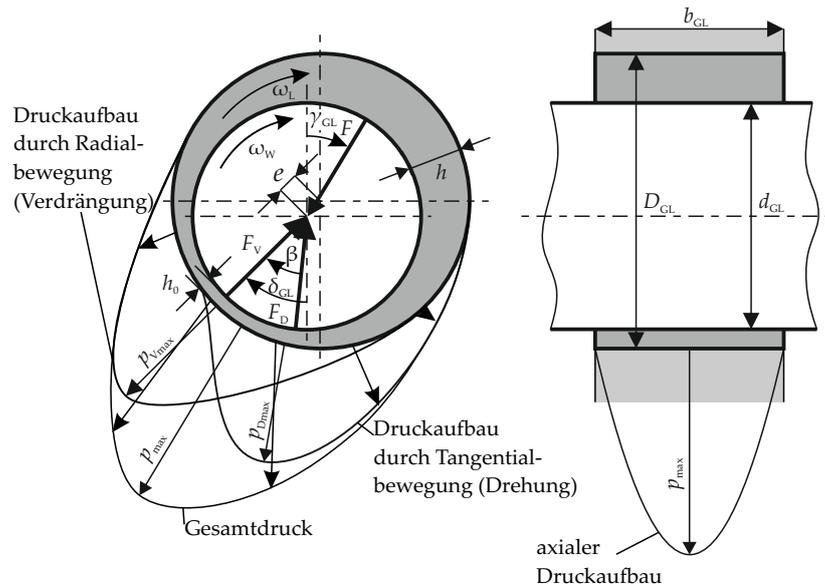


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung eines Radial-Gleitlagers mit Druckverteilung; nach [AG96]

Kontamination durch äußere Verschmutzungen zu unterbinden. Zusätzlich sind RWDR trotz sich dynamisch aufbauenden Schmierspalts in der Lage, Schmierstoff aktiv zu fördern. In diesem Abschnitt werden einerseits der Schmierfilmaufbau im Dichtkontakt und andererseits die aktive RWDR-Förderwirkung beschrieben.

3.3.1 Schmierfilmaufbau

Wie aus der hydrodynamischen Schmiertheorie von Gleitlagern bekannt, sind für die Ausbildung eines tragenden Schmierfilms ein konvergierender Schmierpalt, ein viskoser, an den Gleitoberflächen haftender Schmierstoff sowie eine Schmierstoffförderung in Richtung des sich verengenden Spalts notwendig. Durch die Exzentrizität der Welle im Lager bildet sich ein Schmierkeil, der die vollständige Trennung der Oberflächen realisieren kann. Abhängig von den Betriebsbedingungen stellt sich eine Exzentrizität zwischen Welle und Lagerschale ein, bei der das Integral der Druckverteilung über der Lagerfläche mit der äußeren Lagerkraft im Gleichgewicht steht [Det12a].

Der Druckaufbau in einem hydrodynamischen Gleitlager resultiert aus einer Überlagerung von Tangential- und Radialbewegung, sodass zwischen

- Druckaufbau durch Tangentialbewegung (Keildruck) und
- Druckaufbau durch Radialbewegung (Verdrängungsdruck)

differenziert werden kann. Die Überlagerung der beiden Druckkomponenten erzeugt den resultierenden Gesamtdruck (Abbildung 3.8).

Aufgrund der geometrischen Bedingungen zwischen RWDR-Dichtkante und Welle ist unter normalen Bedingungen makroskopisch von einem parallelen Spalt auszugehen, sodass kein Schmierkeil vorhanden ist, der einen hydrodynamischen, trennenden Schmierfilmaufbau erklären kann. Die ursprüngliche Vorstellung der Dichtfunktion von RWDR bestand darin, dass der Dichtring den auf der Welle befindlichen Ölfilm abschneidet. Dieses Verhalten sollte besonders gut mit steigender Radialkraft funktionieren. Bereits in frühen Untersuchungen konnte von *Lein* gezeigt werden, dass dies bei RWDR nicht der Fall ist. *Lein* beobachtete ein hohes Reibmoment welches durch eine zu große Radialkraft erzeugt wird. Dieses führt zu einem erhöhten Wellenverschleiß und steigenden Temperaturen, sodass die Dichtungen vorzeitig zerstört und undicht werden. Aus Reibungsuntersuchungen schließt er darauf, dass sich die Reibung im Dichtkontakt auf einen geschwindigkeitsunabhängigen Grenzreibungsanteil und einen geschwindigkeitsabhängigen Flüssigkeitsreibungsanteil zusammensetzt und, dass sich im Betrieb ein tragender Ölfilm ausbildet. Der zur Aufnahme der äußeren RWDR-Radialkraft nötige Druckaufbau wird hierbei an den Rauheitsspitzen der Kontaktpartner erzeugt, wobei *Lein* zusätzlich von einem gleichzeitigen Auftreten von Grenz- und Trockenreibung ausgeht [Lei54]. Erste Untersuchungen zur Bestimmung der Schmierfilmdicke gehen zurück auf *Jagger*, welcher die Schmierfilmhöhe zum einen rechnerisch abschätzt und zum anderen messtechnisch erfasst. Hierzu wurde eine axial wirkende Dichtung, mit der gleichen Kontakt-Geometrie wie eine radial wirkende Dichtung untersucht. *Jagger* geht von einer Schmierfilmdicke in der Größenordnung von 1 μm aus.

Im weiteren Verlauf der folgenden Jahrzehnte war die Messung der Schmierfilmhöhe und die Bestimmung der damit verbundenen Reibungszustände Gegenstand vieler Untersuchungen⁶, sodass es in der Literatur unterschiedliche Angaben⁷ zu der im Dichtkontakt vorliegenden Schmierfilmhöhe gibt. Laut *Müller* weist der hydrodynamische Schmierfilm moderner RWDR Höhen in der Größenordnung einiger zehntel Mikrometer auf [Mü90]. *Bock* und *Leichner* geben für die Schmierfilmhöhe ölgeschmierter RWDR ebenfalls Größen von 0,1 bis 1 μm an [BL17].

Die Reibungszustände von RWDR werden häufig in Analogie zu hydrodynamischen Gleitlagern anhand einer Stribeck-Kurve beschrieben. Im Zusammenhang mit RWDR wird oftmals das gleichwertige *Gümbel-Diagramm* sowie die *Gümbelzahl* zur Beschreibung der Reibungszustän-

⁶ Aufgrund der Vielzahl an Untersuchungen kann an dieser Stelle nur auf einige wichtige Quellen verwiesen werden. Ausführliche Zusammenfassungen der Untersuchungen zur Messung der Schmierfilmhöhe an RWDR der letzten Jahrzehnte können u.a. [Wen16; Sal99; BLP09] entnommen werden. Zusätzliche Informationen zur EHL-Modellierung im Dichtkontakt können u.a. [Wen16; Sal10; Thi19] entnommen werden.

⁷ Zu beachten sind hierbei auch die unterschiedlichen Betriebsbedingungen, wie z.B. Gleitgeschwindigkeit, Schmierstoff-Viskosität und -Temperatur sowie die unterschiedlichen verwendeten Messverfahren.

de herangezogen, wobei der Reibwert f über einer hydrodynamischen Kennzahl G aufgetragen wird (vgl. Abbildung 3.9).

$$G = \frac{\eta \cdot \omega}{\bar{p}} \quad (3.1)$$

Die Kennzahl G^8 beschreibt den Betriebspunkt in Abhängigkeit von der dynamischen Viskosität η der Winkelgeschwindigkeit ω und der mittleren Pressung \bar{p} im Dichtkontakt. *Jung* schlägt ein erweitertes *Gümbel-Diagramm* vor, bei dem zusätzlich der Traganteil der Gegenlauf­fläche berücksichtigt wird [Jun12]. Der Schmierfilmaufbau im Dicht­kontakt kann dadurch erklärt werden, dass der Schmierstoff durch die Adhäsion an der Welle mitgeschleppt wird und somit, unterstützt durch Kapillarkräfte, in den Dichtkontakt gelangt. Bei sehr geringen Relativgeschwindigkeiten oder mangelndem Schmierstoffangebot findet keine ausreichende Trennung von Dichtkante und Gegenlauf­fläche statt, sodass von *Festkörper-* oder *Grenzreibung* auszugehen ist (① in Abbildung 3.9). Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit bilden sich lokal an den Rauheitsspitzen hydrodynamisch wirksame Schmierkeile aus, die zur Entlastung und teilweisen Trennung der Rauheitskontakte führt. Besteht weiterhin ein signifikanter Anteil von Festkörperkontakten, wird die Reibung als *Mischreibung* bezeichnet (② in Abbildung 3.9). Übersteigt die durchschnittliche Schmierfilmhöhe die Summe der Oberflächenrauheiten von Dichtkante und Gegenlauf­fläche, liegt *Flüssigkeitsreibung* vor (③ in Abbildung 3.9).

Aufgrund der im Vergleich zur Gegenlauf­fläche sehr viel geringeren Steifigkeit des Elastomerwerkstoffes⁹ werden die Rauheitsspitzen durch den lokalen hydrodynamischen Druck abgeplattet und durch die Schubspannungen tangential verformt, sodass lokal eine mikroelastohydrodynamische Schmierung¹⁰ unterschiedlicher Größenordnungen entsteht (vgl. Abbildung 3.10). Die hydrodynamische Reibung lässt sich somit durch einen Anteil μ -EHL 1. Ordnung und einen Anteil μ -EHL 2. Ordnung beschreiben. *Wennhorst* konnte zeigen, dass insbesondere die μ -EHL-Reibung 2. Ordnung schon bei sehr geringen Gleitgeschwindigkeiten¹¹ wirksam ist und die Reibung erheblich reduzieren kann [Wen16]. Zusätzlich tragen die sehr dünnen Schmierfilme der μ -EHL-Reibung 2. Ordnung aufgrund der geringen Schmierfilmhöhen und der damit verbundenen hohen Schergefälle zu einem erheblichen Anteil viskoser Reibung bei.

Die klassische Form der Stribeck-Kurve mit einem steilen Abfall der Reibung im Mischreibungsgebiet, gefolgt von einem Anstieg im Bereich der Flüssigkeitsreibung, ist für die Anwendung bei RWDR,

⁸ Im angelsächsischen Raum auch *Hersey-Zahl* genannt.

⁹ Zum Vergleich $E_{\text{Stahl,unlegiert}} = 210 \text{ GPa}$, $E_{\text{Elastomer}} \approx 0,0045 \text{ GPa}$; aus experimenteller Materialkalibrierung für Neo-Hooke-Material-Modell [Wen16].

¹⁰ In diesem Fall auch als *weiche* μ -EHL bezeichnet.

¹¹ Laut der klassischen Vorstellung anhand der Stribeck-Kurve tief in der Mischreibung.

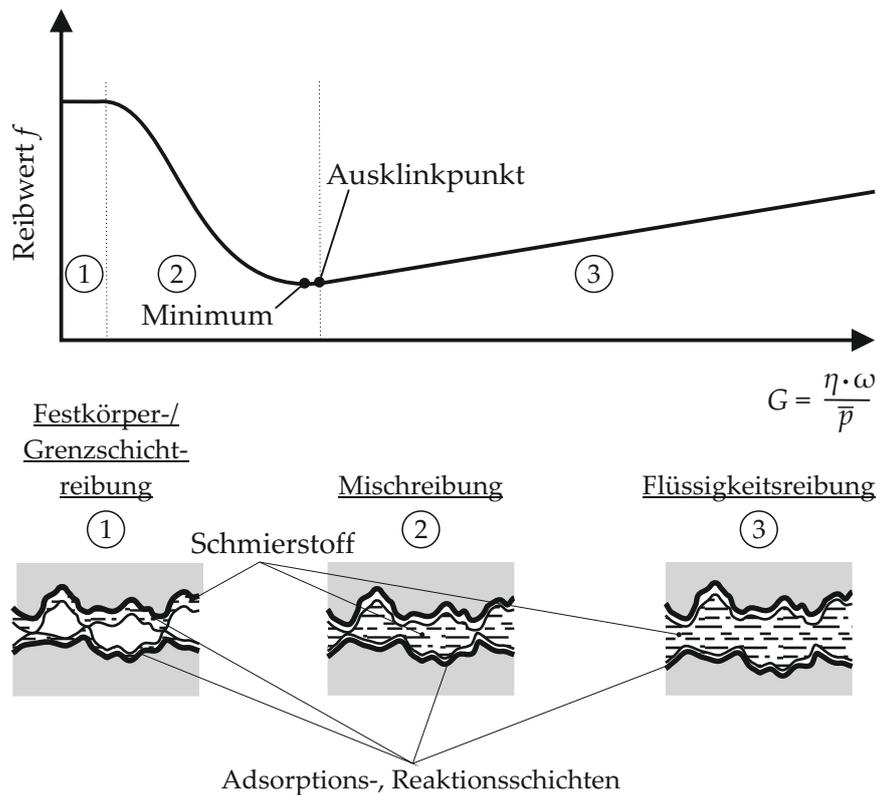


Abbildung 3.9: Reibungszustand eines hydrodynamischen Gleitlagers anhand einer Stribeck-Kurve

insbesondere bei sehr geringen Gleitgeschwindigkeiten, nicht immer zutreffend. *Wennerhorst* konnte zeigen, dass die Reibung bereits bei kleinsten von Null ausgehenden Gleitgeschwindigkeiten elasto-hydrodynamischer Natur ist und mit steigender Gleitgeschwindigkeit weiter ansteigt [WP09]¹².

Zum Aufbau eines tragenden Schmierfilms ist somit die Anwesenheit ausreichender Mikro-Rauheiten auf der Dichtkante von entscheidender Bedeutung. Diese Mikro-Rauheiten bilden sich durch den Einlauf-Verschleiß während der ersten Wellen-Umdrehungen aus. Untersuchungen haben gezeigt, dass Dichtungen mit einer geringen Ausprägung entsprechender Dichtkanten-Rauheit keinen effektiven Rückfördermechanismus ausbilden und zur Leckage tendieren [Hor96]. Die korrekte Ausbildung ausreichend großer Rauheiten auf der Dichtkante hängt stark von der Elastomer-Mischung¹³ der Dichtung sowie der Oberflächenrauheit der Gegenauflfläche ab. Hierbei muss die Wellenoberfläche rau genug und das Elastomer zusätzlich in der Lage sein, kleine Teile aus der Elastomer-Oberfläche herauszulösen, um

¹² Ähnliche Erscheinungen wurden auch von *Lein, Johnston* und *Johnston und Vogt* beobachtet [Lei54; Joh86; JV95].

¹³ Auch als Compound bezeichnet.

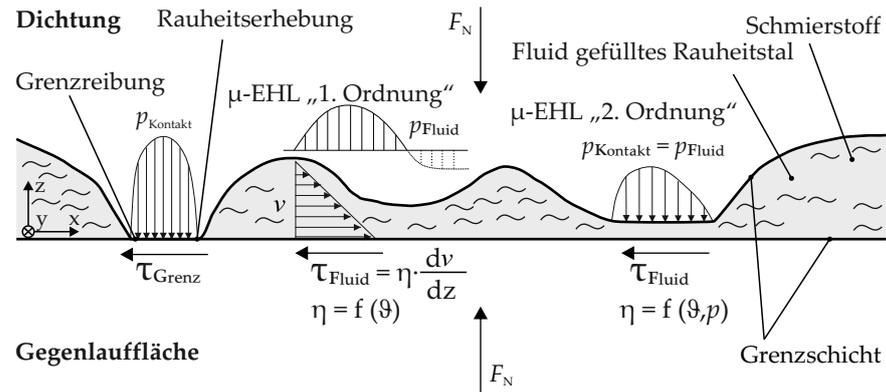


Abbildung 3.10: Schmierungszone dynamischer Berührungsdichtungen; nach [Poloo]

kontinuierlich¹⁴ eine Oberfläche mit ausreichend großen Mikrorauheiten zu generieren. Eine zu glatte Elastomeroberfläche kann keine ausreichende Kühlung durch den Schmierstofftransport innerhalb des Dichtkontakts sicherstellen, sodass es zu lokaler thermischer Überbeanspruchung und zum frühzeitigen Ausfall der Dichtungen kommen kann. Ist die Welle jedoch zu rau, findet keine ausreichende Trennung der Oberflächen von Dichtkante und Gegenläufige statt und ein erhöhter Dichtkantenverschleiß ist die Folge.

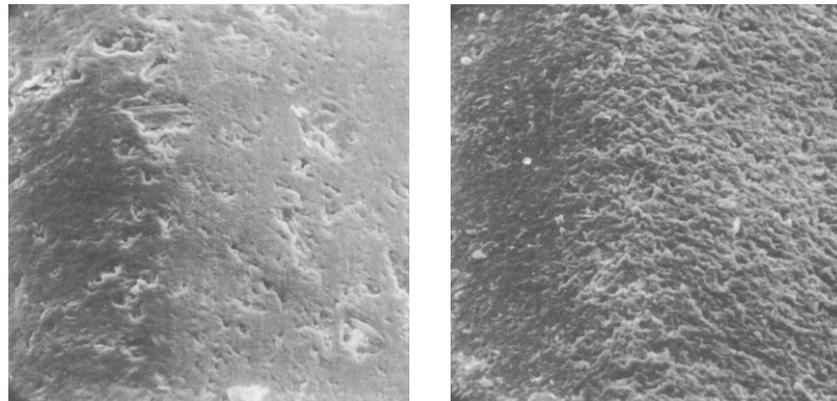


Abbildung 3.11: Vergleich des Dichtkanten einlaufs von zwei unterschiedlichen NBR-Formulierungen; links: glatte Dichtkantenoberfläche, mit wenig Mikrorauheiten nach Einlauf; rechts: raue Dichtkantenoberfläche, mit ausreichend Mikrorauheiten nach Einlauf; nach [Hor96]

¹⁴ Untersuchungen haben gezeigt, dass bei ungünstiger Elastomer-Formulierung, auch nach einem manuellen initialen Aufrauen der Elastomer-Oberfläche, ein erneutes ungünstiges Einglätten der Elastomeroberfläche stattfinden kann [Hor96].

3.3.2 RWDR-Förderwirkung

Die aktive Förderwirkung wird durch den RWDR-Aufbau und insbesondere durch die Geometrie der Dichtkante erreicht. Im Laufe der empirischen Optimierung von RWDR stellte sich heraus, dass die Größe der Kontaktflächenwinkel die dynamische Dichtwirkung erheblich beeinflusst. RWDR besitzen zwei unterschiedliche Kontaktflächenwinkel der Dichtkante gegenüber der Welle. Der Winkel α der Stirnseite¹⁵ ist wesentlich größer als der Winkel β der Bodenseite¹⁶ (vgl. Abbildung 3.7 und 3.12).

Die Fluidförderung ist stets vom kleinen zum großen Kontaktwinkel gerichtet und unabhängig von der Drehrichtung der Welle. Die Förderwirkung wird durch unterschiedliche Hypothesen beschrieben, die auf der hydrodynamischen Fluidförderung zwischen Dichtkante und Gegenoberfläche beruhen. Als wichtigste Hypothesen können derzeit die

- *Verzerrungshypothese*
- *Seitenstromhypothese*
- *Wischkantenhypothese*

angesehen werden.

Die wohl am häufigste verbreitete Hypothese ist die *Verzerrungshypothese* (vgl. Abbildung 3.12) welche auf der, erstmals von Kuzma theoretisch beschriebenen, tangentialen Verzerrung der Elastomerrauheiten im Dichtkontakt, beruht [Kuz69]. Qian [Qia84] und Kammüller [Kam86] nehmen diese Verzerrung unter Berücksichtigung einer asymmetrischen Pressungsverteilung auf, um die Dichtwirkung von RWDR zu erklären. Kammüller nennt zwei Voraussetzungen für die Funktion der Verzerrungshypothese:

1. Eine asymmetrische Pressungsverteilung im Dichtkontakt durch unterschiedliche Kontaktflächenwinkel.
2. Eine verschleißbedingte Welligkeitsstruktur¹⁷ auf der Dichtkantenoberfläche senkrecht zur Bewegungsrichtung.

Aufgrund der asymmetrischen Pressungsverteilung im Dichtspalt werden die Mikrostrukturen im Pressungsmaximum mehr abgeplattet als am Rand der Berührungsfläche. Bei Rotation der Welle bewirkt die Scherspannung im Fluid eine Reibkraft und daraus resultierend eine tangentialer Verzerrung der Mikrostrukturen auf der Dichtkante. Die maximale Verzerrung tritt folglich im Bereich der größten Flächenpressung auf. Durch die Verzerrung der ursprünglich axialen

¹⁵ Der stirnseitige Kontaktflächenwinkel α weist in der Regel Größen zwischen $\alpha = 40$ bis 60° [Mü90] bzw. $\alpha = 40$ bis 70° [Bri93] auf.

¹⁶ Der bodenseitige Kontaktflächenwinkel β weist in der Regel Größen zwischen $\beta = 20$ bis 35° [Mü90; Bri93] auf.

¹⁷ Auch als *Schallamach-Wellen* bezeichnet.

Kanäle erstehen schräge Kanäle die eine fischgrätähnliche Form aufweisen. *Kammüller* verweist auf die Analogie zu einem *Fischgrätlager* und dessen Möglichkeit, hydrodynamisch Fluid zu fördern. Das im Dichtkontakt mitgeschleppte Öl wird an den schrägen Flanken der Kanäle abgelenkt, sodass sich gegenläufige *Mikropumpen* ausbilden. Auf diese Weise wird Öl von beiden Seiten zum Pressungsmaximum gefördert. Aufgrund der Asymmetrie sind die bodenseitigen Mikropumpen länger, woraus eine Förderwirkung in Richtung der Stirnseite resultiert. Bei Inbetriebnahme eines regulär¹⁸ montierten RWDR wird zunächst Öl von der Stirnseite zum Bereich der höchsten Pressung durch den Dichtspalt hindurch gefördert. Danach setzt die entgegengesetzte Förderwirkung ein und erzeugt einen Gegenstrom. Die dynamische Dichtwirkung ist erreicht, sobald beide Förderwirkungen im Gleichgewicht stehen. Wird der RWDR invers¹⁹ montiert, dominiert der Förderstrom der längeren bodenseitigen Kanäle und das Öl wird zur Lufseite gefördert. Die Verzerrung der Rauheiten im Dichtkontakt wurde anhand optischer Untersuchungen von *Kammüller* validiert. Später haben u.a. *Van Leeuwen* und *Wolfert* sowie *Ottink* diese Hypothese aufgegriffen und die asymmetrische Verzerrung ebenfalls durch optische Untersuchungen bestätigt [VLW97; Ott14].

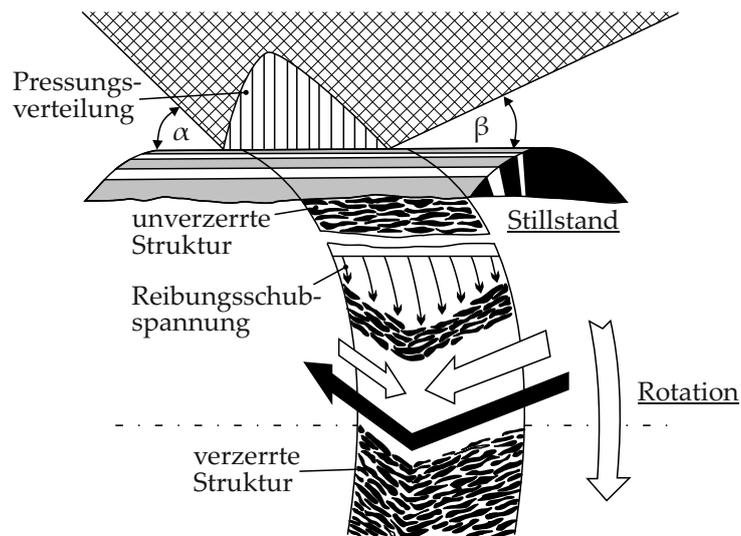


Abbildung 3.12: Verzerrungshypothese; nach [Kam86]

Eine weitere Hypothese ist die *Seitenstromhypothese*. Anders als bei der *Verzerrungshypothese* wird hierbei von irregulär verteilten Rauheitserhebungen im dynamischen Dichtspalt ausgegangen, welche die Förderwirkung herbeiführen. Die Rauheitserhebungen werden auf der Wellenoberfläche abgeplattet. Die größte Verformung findet im Bereich des Pressungsmaximums statt (Abbildung 3.13). Aufgrund der unterschiedlichen Kontaktflächenwinkel nimmt die Größe der Verfor-

¹⁸ Stirnseite in Richtung Öl.

¹⁹ Bodenseite in Richtung Öl.

mungen zu den Seiten hin in einem unterschiedlichen Maße ab. Durch die Wellenrotation wird Fluid tangential unter den Rauheitserhebungen hindurchgeschleppt, wodurch sehr enge elasto-hydrodynamische Spalte ausgebildet werden. Die Pressung einer ideal glatten Dichtkante wird in Abbildung 3.13 als *globaler Pressungsverlauf* dargestellt. Das mitgeschleppte Fluid wird zum Teil seitlich an den Rauheitserhebungen abgedrängt, wodurch eine axiale Fluidströmung entsteht. Diese axiale Strömung findet sowohl auf der Stirn- als auch auf der Bodenseite statt und ist zum Teil so groß, dass sie den Bereich der maximalen Pressung überquert. Somit wird auch Fluid in Bereiche gefördert, in denen ein höheres globales Druckniveau herrscht [Mü87; Mü90]. Aufgrund des geringeren Kontaktwinkels auf der Bodenseite stehen mehr Rauheitserhebungen im Kontakt mit der Wellenoberfläche als auf der Stirnseite. Dies hat zur Folge, dass eine größere axiale Fluidförderung in Richtung der Stirnseite als zur Bodenseite stattfindet. Ein Gleichgewicht stellt sich ein, sobald an der Bodenseite kein weiteres Fluid mehr zur Verfügung steht.

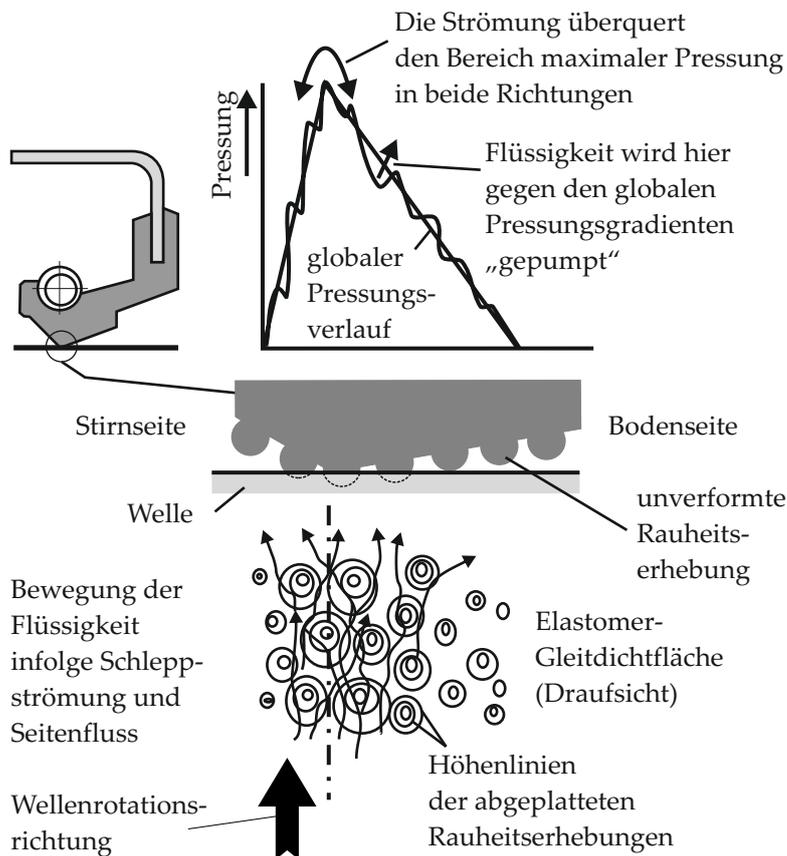


Abbildung 3.13: Seitenstromhypothese; nach [Mü90]

Neben den mikrogeometrischen Effekten der Verzerrungshypothese beruht die *Wischkantenhypothese* auf der makroskopischen Pumpwirkung durch Schiefstellung oder Welligkeit der Dichtlippe (Abbildung

3.14). Sitzt ein RWDR schief in der Aufnahme oder kommt es zu fertigungstechnischen Abweichungen, kann dies zu einer Schiefstellung der Dichtlippe gegenüber der Welle führen. Eine Schräglage der Laufspur kann auch durch eine Abweichung der Koaxialität zwischen Dichtung und Welle entstehen. Die Folge sind kurzhubige Schwingungen der Dichtkante auf der Welle. Aufgrund der aus den unterschiedlichen Kontaktflächenwinkeln resultierenden asymmetrischen Pressung und der axialen Bewegung der Dichtkante wird mehr Fluid vom kleinen zum großen Kontaktflächenwinkel gefördert als umgekehrt²⁰[Mü90; Jen91]. Eine spezielle RWDR-Sonderbauform, bei der eine axiale Relativbewegung durch absichtliche Ondulierung der Dichtkante in tangentialer Richtung herbeigeführt wird, ist der *Wave-Seal-RWDR* (Abbildung 3.19) dessen Funktionsprinzip in [Hor96] detailliert beschrieben wird.

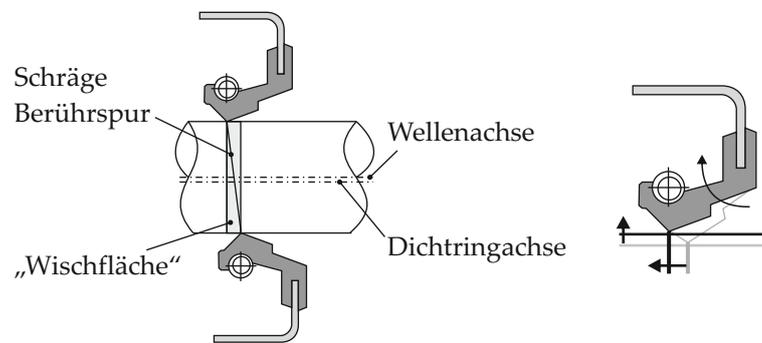


Abbildung 3.14: Wischkantenhypothese; nach [Mü90]

Weitere Ansätze und Erklärungsversuche zur Beschreibung der Förderwirkung von RWDR sind u.a. in [Ott83] und [Oli95] zu finden.

3.3.2.1 Messung der RWDR-Förderwirkung

Mit Hilfe der quantitativen Bestimmung der RWDR-Förderwirkung ist es möglich, die Dichtheitsreserve von Dichtungen zu bestimmen [HS85]. Dadurch lassen sich Dichtungen untereinander und bauformübergreifend vergleichen.

Zur Messung der Förderwirkung von RWDR haben sich in der Vergangenheit unterschiedliche Methoden etabliert. Hervorzuheben sind hier die Methoden *Backward Test* und *Oil Drop Test* [Hor96].

Beim *Oil Drop Test* erfolgt die Messung der RWDR-Förderwirkung in regulärer abdichtender Einbausituation, mit Öl auf der Stirnseite anstehend. Hierbei wird der Dichtung eine geringe Menge Öl zum Beispiel mit einer μL -Spritze auf der Luftseite zugeführt. Gemäß seiner Förderwirkung fördert der RWDR dann das außen angebotene Öl von der Bodenseite zur Stirnseite. Durch Messung der Förderdauer und der Kenntnis der zugeführten Ölmenge kann der Förderwert der

²⁰ Analog zum Funktionsprinzip von Hydraulik-Stangendichtungen.

Dichtung bestimmt werden. *Hermann und Seffler* beschreiben dieses Verfahren und kombinieren es mit der Erfassung des Reibmoments [HS85]. Durch äußere Zugabe von Schmierstoff ändert sich der Schmierungszustand im Dichtkontakt, wodurch das Reibmoment bei einem dichten bzw. *gesunden* Dichtsystem während der Förderdauer abfällt. Nach Abschluss der Förderung stellt sich das ursprüngliche Reibungsniveau wieder ein (vgl. Abbildung 3.15). Die Autoren zeigen auf, dass bei einem *anfalligen* RWDR das Reibmoment nicht abfällt und dass bei Dichtungen die Leckage aufweisen, generell ein geringeres Reibmoment messbar ist, da sich bereits mehr Schmierstoff im Dichtkontakt befindet. Durch Auswertung der Zeitdauer der Reibmomentänderung und der aufgetragenen Ölmenge kann der Förderwert berechnet werden. *Horve* empfiehlt eine Anordnung mit horizontal stehendem Dichtring und vertikaler Welle. Dadurch lässt sich eine gleichmäßige Verteilung des außen aufgetragenen Schmierstoffs einfacher sicherstellen [Hor96].

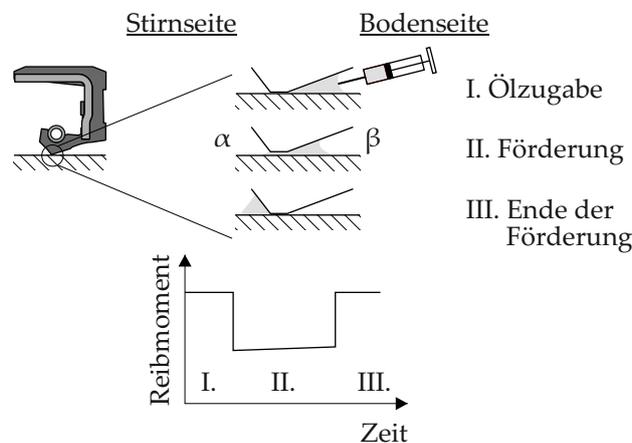


Abbildung 3.15: Oil-Drop-Test; nach [Mü90]

Beim *Backward Test* wird die Dichtung *invers* montiert. Öl wird dabei der Bodenseite angeboten, sodass der Dichtring stetig Öl von der Boden- zur Stirnseite fördert. Um den Einfluss der Dichtkanten-Oberflächenrauheiten auf die Dichtfunktion von Dichtungen ohne zusätzliche Förderhilfen zu untersuchen, nutzten *Kawahara et al.* einen Prüfaufbau, bei dem der *Backward Test* umgesetzt wurde. Die Autoren nutzten diese Methode um die RWDR-Förderwirkung zu quantifizieren und mit den untersuchten Dichtringoberflächen zu korrelieren [KAH78; KH79; KAH80]. Dieses Verfahren wird u.a. bereits von *Symons* im Zusammenhang mit der Evaluierung der Wirkung von RWDR mit Förderhilfen erwähnt [Sym73].

Mit dieser Methode können Dichtsysteme quantifiziert und hinsichtlich ihrer Förderwirkung verglichen werden. Zu beachten ist, dass dem Dichtring beim inversen Einbau mehr Schmierstoff angeboten wird als beim regulären, abdichtenden Einbau. Der Schmierungszustand ist somit nicht direkt übertragbar.

Hermann und Seffler greifen diese Methode ebenfalls kurz auf und verweisen auf einen durch den inversen Einbau geänderten Schmierzustand und auf einen damit einhergehenden geänderten Dichtkanteneinlauf, wodurch die Förderwirkung sich vom regulären Einbauzustand unterscheiden kann [HS85].

Die Methode des inversen Einbaus wurde in unterschiedlichen Variationen genutzt um die Förderwirkung von RWDR und Wellenoberflächen zu bestimmen.

Raab nutzte das Verfahren mit wechselnder Drehrichtung um den Einfluss der Wellenauflfläche auf das Dichtverhalten von RWDR zu untersuchen [Raa98]. Durch die wechselnde Drehrichtung kann sowohl der RWDR- als auch der Wellen-Förderwert bestimmt werden. Diese Methode setzt voraus, dass der RWDR-Förderwert größer ist als der Förderwert der Gegenauflfläche. Bei stark ausgeprägten Wellenstrukturen kann der Wellen-Förderwert größer sein, als der RWDR-Förderwert, sodass diese Methode nicht vollständig angewendet werden kann²¹.

Für diesen Fall erweiterte *Buhl* diese Methode und verwendete zusätzlich eine polierte Welle. Diese soll aufgrund ihrer geringen Oberflächenrauheit förderneutral sein. Die Messung des RWDR-Förderwerts erfolgt nach Einlauf und Messung auf der strukturierten Welle separat. Durch die Differenz der beiden Messungen wird der Wellen-Förderwert bestimmt [Buho6].

3.3.3 RWDR-Sonderbauformen

Zur Kompensation von Leckage können RWDR mit zusätzlichen hydrodynamischen Förderhilfen ergänzt werden. Diese können aus erhabenen Strukturen auf der bodenseitigen Kontaktfläche oder aus einer modifizierten Dichtkante bestehen. Die Förderhilfen können zum Beispiel als Einfachdrall oder Wechseldrall ausgeführt werden. Genormt sind Einfach- und Wechseldrall nach DIN 3761-1 [DIN84a].

3.3.3.1 Einfachdrall-RWDR

Einfachdrall-RWDR besitzen auf der luftseitigen Kontaktfläche längliche und schräg angeordnete Drallstege. Diese Drallstege erstrecken sich im uneingebauten Zustand nicht ganz bis zur Dichtkante. Im eingebauten Zustand wird der innere Teil der Drallstege zusammen mit der Dichtkante abgeplattet, sodass ihre Abdruckflächen auf der Wellenoberfläche zusammenfließen (Abbildung 3.16).

Tritt Schmierstoff durch den Dichtkontakt auf die Bodenseite, wird dieser in die keilförmig verengenden Räume zwischen Dichtkante und Drallsteg geschleppt. Durch den dadurch entstehenden hydro-

²¹ Diese Methode wurde ebenfalls in dieser Arbeit angewandt. Weitere Informationen sind in Abschnitt 4.8 aufgeführt.

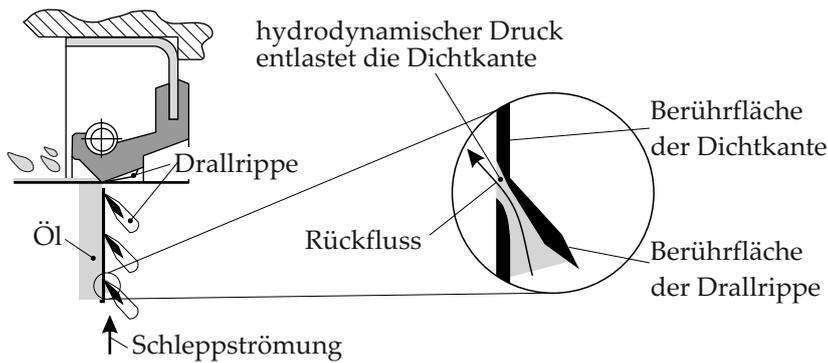


Abbildung 3.16: Funktionsprinzip eines Einfachdrall-RWDR; nach [Mü90]

dynamischen Staudruck wird die Dichtkante örtlich entlastet und Schmierstoff in Richtung Stirnseite gefördert. Bei der Ausführung der Einfachdrall-RWDR ist auf eine Drehrichtungsabhängigkeit zu achten (vgl. Abbildung 3.17). Laut Müller kann die Dichtwirkung bei Einfachdrall-RWDR um den Faktor 100 größer sein als bei einem Standard-RWDR ohne Dichthilfe [Mü90].

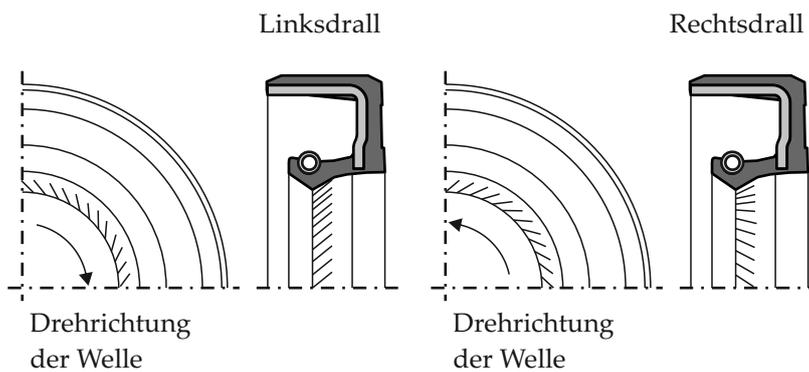


Abbildung 3.17: Einfachdrall-RWDR; nach [Pol12]

3.3.3.2 Wechseldrall-RWDR

Dichtringe mit *Wechseldrall* oder *Doppeldrall* können im Gegensatz zum Einfachdrall-RWDR in beide Drehrichtungen betrieben werden. Das Prinzip der Förderwirkung basiert auf dem gleichen Effekt wie beim Einfachdrall-RWDR. Bei dieser Bauform existieren Drallstege, die in beide Drehrichtungen verengende Keile auf der Bodenseite der Dichtkante ausbilden. Diese Drallstege können unterschiedliche Formen aufweisen (vgl. Abbildung 3.18). Laut Müller kann ein ungünstig gestalteter Wechseldrall-RWDR jedoch auch eine Leckage begünstigen. Hierbei kann der Schmierstoff soweit von der Dichtkante zur Bodenseite verdrängt werden, dass dieser nicht mehr von den rückfördernden Drallstegen erfasst wird. Ferner können weit in die Bodenseite ragende Drallstege, welche von der Dichtkante wegführen,

schädliche Luftströmungen erzeugen, die den Schmierstoff von der Dichtkante wegblasen [Mü90].

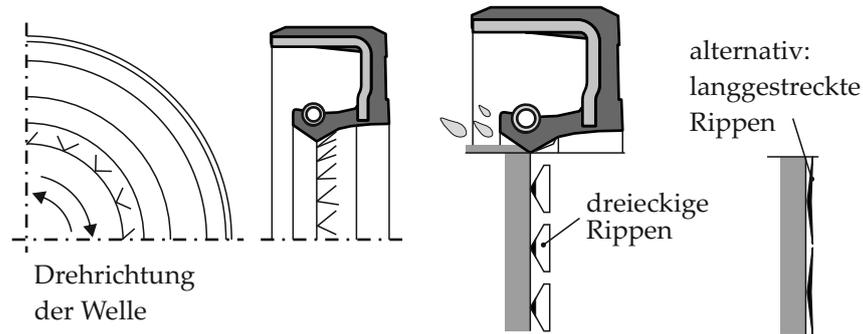


Abbildung 3.18: Wechsellagerung-RWDR; nach [Pol12] und [Mü90]

3.3.3.3 Wave-Seal-RWDR

Der *Wave-Seal-RWDR* besitzt eine sinusförmige Dichtkante. Diese weist Amplituden mehrerer Zehntelmillimeter auf [Mü90]. Bei dieser Art von Dichtung wird der in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Effekt der *Wischkantenhypothese* genutzt. Das ausgeprägte axiale Wischen der Dichtlippe kann drehrichtungsunabhängig zu einer größeren Förderwirkung gegenüber konventionellen RWDR führen. Durch den sinusförmigen Lauf auf der Welle wird der überstrichene Laufflächenbereich vergrößert und die spezifische Flächenpressung in der Dichtkontaktzone verringert. Dadurch wird eine Reibungsreduktion um bis zu 20 % und eine Temperaturabsenkung von bis zu 30 % im Vergleich zu herkömmlichen Dichtlippenbauformen erreicht [SKF13]. Das Funktionsprinzip wird in [Hor96] detailliert erläutert.

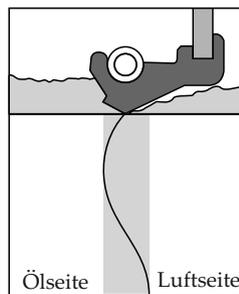


Abbildung 3.19: Wave-Seal-RWDR; nach [SKF13]

3.3.3.4 PTFE-Manschette mit Fördergewinde

Eine Alternative zum Elastomer-RWDR stellt die PTFE-Manschette mit Spiralnut dar. Hierbei werden vor allem die guten Gleiteigenschaften des Dichtungswerkstoffes PTFE genutzt, um die Reibung und thermische Belastung im Dichtkontakt zu reduzieren. Aufgrund der höheren

Wärmebeständigkeit verstärkter PTFE-Werkstoffe werden diese häufig bei schnelllaufenden, thermisch hochbelasteten Dichtstellen eingesetzt. Auch bei chemisch aggressiven Flüssigkeiten kommen diese Dichtungen zum Einsatz [Mü90]. Das Funktionsprinzip der Rückförderwirkung ähnelt dem einer Gewindewellendichtung, wobei der Schmierstoff durch die Schleppströmung in den Gewindegängen von der Bodenseite zur Ölseite gefördert wird. Aufgrund des eingebrachten Gewindes ist diese Dichtungsbauform drehrichtungsabhängig.

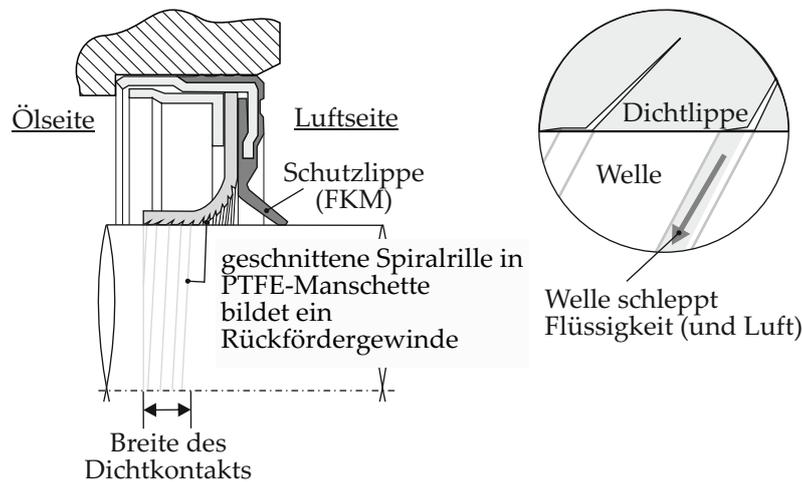


Abbildung 3.20: Beispiel einer PTFE-Manschettendichtung mit vorgeschalteter Schutzlippe; nach [Mü90]

3.4 ANFORDERUNGEN AN RWDR-GEGENLAUFLÄCHEN

Wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben hat die Oberfläche der Gegenlauf­fläche einen entscheidenden Einfluss auf den Einlaufverschleiß der Dichtkante und trägt somit erheblich zur ordnungsgemäßen Funktion der Dichtung bei. Durch zahlreiche Untersuchungen konnten Richtwerte für die Oberflächen zuverlässiger Gegenlauf­flächen ermittelt werden, welche in Richtlinien und Normen festgehalten worden sind. Hierzu sind die DIN 3760 [DIN96], DIN 3761 – 2 [DIN83], DIN ISO 6194 [ISO07] und die Richtlinien der Rubber Manufacturers Association (RMA) [RMA04] zu nennen. In der deutschen Norm DIN 3760 werden neben der Definition von RWDR-spezifischen Größen wie z.B. Formen, Materialien, Bezeichnungen sowie Betriebsgrenzen auch Angaben bzgl. einzuhaltender Grenzwerte für Gegenlauf­flächen definiert. Für den arithmetischen Mittenrauwert R_a werden Größen zwischen $R_a = 0,2$ bis $0,8 \mu\text{m}$, für die gemittelte Rautiefe R_z Werte zwischen $R_z = 1$ bis $5 \mu\text{m}$ und für die maximale Rautiefe ein Wert von $R_{\text{max}} = 6,3 \mu\text{m}$ vorgegeben. Eine Drallorientierung im Lauf­flächenbereich, die zur Leckage führen kann, wird verboten. Zusätzlich werden Werte für die Oberflächenhärte sowie Formtoleranzen eingegrenzt [DIN96]. Die Norm für *Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge*

DIN 3761 Teil 2 ergänzt einen Toleranzwert von h_{11} für den Laufflächenbereich und grenzt den Rauheitsbereich von R_z weiter ein, sodass $R_z = 1$ bis $4 \mu\text{m}$ toleriert wird. Ebenfalls wird eine Drallfreiheit gefordert und zudem die Angabe gemacht, dass Drallfreiheit durch das Schleifen im Einstichverfahren²² zu erzielen ist. Außerdem werden Verfahren zur Ermittlung von Drall²³ vorgeschlagen [DIN83]. Die internationale Norm ISO 6194 gibt abweichende Oberflächenkennwerte an. Demzufolge soll der R_a -Wert zwischen $R_a = 0,2$ und $0,5 \mu\text{m}$ und R_z zwischen $R_z = 1,2$ und $3 \mu\text{m}$ liegen. Ferner wird ergänzt, dass in Einzelfällen eine Absprache zwischen Zulieferer und Käufer erfolgen soll, da etwa eine geschliffene und polierte Oberfläche trotz Abweichung der Werte als RWDR-Gegenlauffläche geeignet sein kann. Die Laufflächen sollen laut dieser Norm *normalerweise* drallfrei sein [ISO07]. Die Richtlinien der RMA fordern einen arithmetischen Mittenrauwert von $R_a = 0,2$ bis $0,43 \mu\text{m}$ sowie eine gemittelte Rauhtiefe von $R_z = 1,65$ bis $2,9 \mu\text{m}$. Die mittlere Glättungstiefe wird auf $R_p = 0,5$ bis $1,25 \mu\text{m}$ begrenzt. Ferner ist ein Drallwinkel kleiner $\pm 0,05^\circ$ zugelassen [RMA04]. Zudem geben RWDR-Hersteller eigene Anforderungen an Wellenoberflächen an, welche den technischen Dokumentationen und Handbüchern entnommen werden können. Neben den geforderten Rauheiten werden zum Beispiel Anforderungen wie die maximale Porengröße oder Sonderwerte für bestimmte Materialien angegeben. Eine vergleichende Aufstellung ist in Tabelle 3.1 zu finden.

	R_a in μm	R_z in μm	R_{max} in μm	R_p in μm	Härte in HRC
DIN 3760	0,2 - 0,8	1 - 5	6,3	-	> 45 - 55
DIN 3761	0,2 - 0,8	1 - 4	6,3	-	> 55
ISO 6194	0,2 - 0,5	1,2 - 3	-	-	> 30 - 45
RMA	0,2 - 0,43	1,65 - 2,9	-	0,5 - 1,25	-
Freudenberg	0,2 - 0,8 ²⁴	1 - 5 ²⁵	6,3	-	> 45 - 60
SKF ²⁶	0,2 - 0,43	1,65 - 2,9	-	0,5 - 1,25	> 30 - 45
Trelleborg	0,2 - 0,5	-	2	-	> 45 - 60

Tabelle 3.1: Übersicht von Oberflächen-Rauheitskenngrößen und -härte verschiedener Normen und Hersteller

Generell wird bei Unterschreiten des R_a - bzw. R_z -Bereichs vor Mangelschmierung gewarnt, wodurch es zu einer thermischen Über-

²² Es soll ein ganzzahliges Drehzahlverhältnis zwischen Schleifscheibe und Werkstück vermieden werden. Die Schleifscheibe sollte mit einer Profil-Abbrichtrolle ohne Seitenvorschub oder mit einem Vielkornabrichter mit kleinstmöglichem Seitenvorschub abgerichtet werden [DIN83].

²³ Zur Feststellung negativer Auswirkungen durch eine Drallorientierung sollen Versuchsläufe mit Drehrichtungswechsel durchgeführt werden [DIN83].

²⁴ Bei Druckbeaufschlagung $> 0,1 \text{ MPa}$: $R_a = 0,2 - 0,4 \mu\text{m}$.

²⁵ Bei Druckbeaufschlagung $> 0,1 \text{ MPa}$: $R_z = 1 - 3 \mu\text{m}$.

²⁶ Es sollen die Grenzwert der RMA OS-1-1 [RMA04] eingehalten werden.

beanspruchung kommen kann. Durch die resultierende Elastomerverhärtung kann frühzeitiger Ausfall die Folge sein. Das Überschreiten des Bereichs führt zu übermäßigem Verschleiß und beeinträchtigt ebenfalls die Lebensdauer negativ. Das Überschreiten von R_{\max} kann die Gefahr einer unmittelbaren Undichtheit bergen. Aus diesen Gründen soll die Gegenlauffläche frei von Beschädigungen wie zum Beispiel Kratzer, Dellen, Rost und Rissen sein [DIN83]. Die spezifizierten Rauheitsangaben basieren auf empirischen Werten und gelten für Wellenoberflächen, die bei genügend langen Ausfunkzeiten von etwa 30 Sekunden im Einstich geschliffen wurden. Entstehung von Drall soll dadurch verhindert werden. Wegen des daraus resultierenden hohen Aufwands wird die Fertigungszeit oft verkürzt oder alternative Fertigungsverfahren wie zum Beispiel das Hartdrehen, Glattwalzen oder Strahlen angewandt. Die für den Schleifprozess genormten Rauheitswerte lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf abweichende Fertigungsverfahren übertragen. Abweichende Fertigungsverfahren sind mit den Dichtringherstellern abzustimmen. In [FST15] sind u.a. Bearbeitungsrichtlinien und -parameter für geschliffene und hartgedrehte Oberflächen angegeben. Die Aussagekraft der geforderten Rauheitskenngrößen zur Beschreibung zuverlässiger Dichtungsflächen ist jedoch zu hinterfragen. Standardmäßig werden einzelne Profilschnitte auf der Oberfläche quer zur Bearbeitungsrichtung, bei Wellen folglich in axialer Richtung, aufgenommen. Aufgrund der Relativbewegung im Dichtspalt hält *Kunstfeld* etwa die Aufnahme in Umfangsrichtung für geeigneter [Kun05]. *Marquart et al.* beschrieben zum Beispiel in einem Artikel zur DIN EN ISO 25178 den begrenzten Informationsgehalt einzelner Rauheits-Profilschriebe und empfehlen die flächenhafte Erfassung und Auswertung von Rauheitskenngrößen [MSS09].

3.5 EINFLUSS VON STRUKTUREN IN RWDR-GEGENLAUFFLÄCHEN

Die Untersuchung des wellenoberflächeninduzierten Fluidstroms in Abhängigkeit unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften ist Gegenstand aktueller Forschung. Insbesondere zur Auswirkung von deterministischen Strukturen wie Mikro-, Makro-Drall sowie der Wellenoberflächenrauheit, welche zumeist durch spezifische Fertigungsverfahren bzw. Fertigungsparameter entstehen, gibt es zahlreiche Arbeiten.

Sowohl *Raab* als auch *Kunstfeld* untersuchten unterschiedliche Fertigungsverfahren und daraus resultierende Oberflächen hinsichtlich ihrer Eignung als RWDR-Gegenlauffläche. Zur Charakterisierung geeigneter Dichtungsgegenlaufflächen wurden Förderwertmessungen ausgeführt, mit denen der Förderwert der Wellenoberfläche beschrieben wird. *Raab* konnte trotz gegebener Drallstrukturen die Eignung unterschiedlich gefertigter Oberflächen als RWDR-Gegenlaufflächen nachweisen. Auch hartgedrehte Oberflächen konnten sich laut *Raab* zur

Abdichtung durch RWDR als geeignet erweisen [Raa98]. Der Schwerpunkt *Kunstfelds* Untersuchungen zu alternativen Fertigungsverfahren lag im Bereich der Drehverfahren. Die Auswirkung unterschiedlicher Fertigungsparameter auf die dichtungstechnische Eignung als Gegenlauffläche wurde untersucht. Dazu entwickelte er eine Vorgehensweise zur Beurteilung der Eignung von Wellenoberflächen als RWDR-Gegenlauffläche. Er beschreibt, dass sich sowohl hart- als auch wechlängsgedrehte Oberflächen als geeignet erweisen können. Auch ohne axialen Vorschub hartgedrehte Oberflächen eignen sich als Gegenlauffläche, wobei vergleichsweise geringere Förderwerte gemessen wurden. Oberflächen durch *Bandfinishen* oder *Kurzhubhonen* mit sehr feinen schräg zur Wellenachse verlaufenden Riefenstrukturen erweisen sich als äußerst förderintensiv und stellen somit keine Alternative dar. Ferner wird der Einfluss von Mikrostrukturen auf die Fördereigenschaften herausgestellt [Kun05].

Buhl untersuchte die Auswirkungen von Drall unterschiedlicher Ausprägung und Größenordnung sowie der Oberflächenrauheit. Hierzu brachte er gezielt Strukturen auf Versuchswellen auf. Mittels eines vorgestellten Modells können die Förderwirkungen entsprechend ihrer Ursachen kategorisiert und Abhängigkeiten von Oberflächenstrukturparametern berücksichtigt werden. Weiterhin führte er einen Kennwert zur Beschreibung der Förderaktivität von Wellenoberflächen ein. *Buhl* wies wie *Kunstfeld* auch die Förderwirkung kleinster gerichteter Strukturen nach [Buh06].

Baitinger veröffentlichte ein Simulationsmodell zur Generierung verschiedenartiger Oberflächenstrukturen und zur Berechnung ihres Einflusses auf den Wellenförderwert. Ferner wird ein Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse von Oberflächen vorgestellt. Auch in dieser Arbeit stand die Beurteilung von Drallstrukturen im Vordergrund [Bai11].

Baumann hat die Arbeiten von *Baitinger* weitergeführt und ein auf optischer Topographiemessung basierendes Drallmessverfahren vorgestellt. Zur Bewertung von Dichtungsgegenlaufflächen hat er Drall- und Oberflächenkenngrößen vorgestellt und diese mit Wellenförderwerten korreliert. Unterschiedliche Drallausprägungen, wie *Mikro-Drall* und *Marko-Drall*, werden differenziert betrachtet. Durch Bilanzierung von Wellen- und Dichtringförderwert wird ein empirisches Modell vorgestellt, mit dem eine Dichtsicherheit für die betrachteten Dichtsysteme abgeleitet werden kann [Bau17].

Jung vertiefte die Untersuchungen von *Buhl* u.a. mit gezielt laserstrukturierten Wellenoberflächen. Hierbei wurden Strukturen mit einer Anzahl von 1000 bis 4000, Struktur-Winkel von 10° bis 40° gegenüber der Dichtkante und Tiefen von 0,34 mm bis 1,7 mm untersucht. Zusätzlich wurden Gegenlaufflächen, welche mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren²⁷ hergestellt wurden, hinsichtlich ihrer Oberflä-

²⁷ Schleifen, Drehen, Rollieren/ Glattwalzen, Tiefziehen, Honen/ Superfinishen.

chenkennwerte, Förderwerte und ihres Reibverhaltens verglichen. Aus den Reibungsversuchen wurde ein *erweitertes Gümbel-Diagramm* abgeleitet, welches exemplarisch den Materialtraganteil der untersuchten Oberflächen mitberücksichtigt. Während Dauerlaufuntersuchungen an tiefgezogenen Gegenaufläichen konnte an zwei Proben Leakage ermittelt werden. Die Untersuchung der Gegenaufläichen mittels *Carmen-Methode* und *Faden-Methode* ergab eine scheinbare Drallfreiheit. Es konnten jedoch axiale Riefen gefunden werden, welche die Leakage erklären könnten [Jun12]. Neben den experimentelle Untersuchungen wird ein Simulationsmodell zur Förderwertberechnung der laserstrukturierten Gegenaufläichen vorgestellt. Das Simulationsmodell wird explizit nochmal in [Jia+11] beschrieben.

Arnecke und Seewig haben ein Auswertungsverfahren für Mikrodrall, beispielsweise für Schleifrillen, entwickelt. Kern des Verfahrens sind zwei substituierbare Bewertungsalgorithmen. Außerdem wird die Möglichkeit der Aufschlüsselung der Oberflächentopographie hinsichtlich unterschiedlicher Skalen anhand sequentieller Filter und Rekonstruktionsalgorithmen präsentiert, wodurch Informationen über eine Drallorientierung auf der Oberfläche separiert von Fehlstellen für unterschiedliche Größenordnungen dargestellt werden können [Arn14]. Das Verfahren wird in [Arn17] weiter ausgeführt.

Thielen et. al untersuchten Gegenaufläichen die mittels eines speziellen Drehprozesses hergestellt wurden. Hierbei wurden die Oberflächen mehrfach in gegensätzliche Richtungen mittels eines Drehwerkzeugs überfahren, wobei unterschiedliche Fertigungsparameter, wie Kühlungsmethoden und Vorschubgeschwindigkeiten, variiert wurden. Ziel dieses Prozesses war die Herstellung förderneutraler Gegenaufläichen, bei der sich die durch den Drehprozess üblichen *Drallstrukturen* in ihrer Förderwirkung gegenseitig kompensieren. Die Oberflächenstrukturen, welche aus den unterschiedlichen Bearbeitungsparametern entstehen, wurden simuliert und mit den optischen Messergebnissen verglichen. Zusätzlich wurden Förder- und Leakageversuche durchgeführt und der Verschleiß an Dichtungen und Gegenaufläichen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass das Förderverhalten in Abhängigkeit der von der Dichtkante überstrichenen Strukturausrichtung, variiert. Ferner wurde dargestellt, dass mehrfach gegensätzlich überdrehte Oberflächen funktionierende RWDR-Gegenaufläichen darstellen können [Thi+18].

In [Sch+20] waren Dichtungsgegenaufläichen welche von der Industrie zur Verfügung gestellt wurden Gegenstand der Untersuchungen. Die Oberflächen der Gegenaufläichen wurden mit den aktuell gängigen Methoden messtechnisch untersucht. Dabei kamen taktile und optische Messmethoden, sowie die *Fadenmethode* zum Einsatz. Die Ergebnisse der Oberflächenanalyse wurden mit den Ergebnissen der tribologischen Untersuchungen korreliert. Die tribologischen Untersuchungen umfassten Leakage-, Förderwert- sowie Reibmoment-

messungen. Es konnten Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Untersuchung bzw. Erfassung schädlicher Strukturen abgeleitet werden. Weiterhin stellten insbesondere Gegenauflflächen mit Mikrodrall Auffälligkeiten durch erhöhte Wellenförderwerte bei den tribologischen Untersuchungen dar.

Bereits 1974 untersuchte *Otto* den Einfluss dreieckiger erhabener Strukturen, welche in die Oberflächen der Gegenauflfläche geätzt wurden. Gestützt durch Versuche konnte er zeigen, dass in Abhängigkeit der Geometrie und Anordnung die untersuchten Strukturen die Leckageneigung und den Dichtringverschleiß minimieren konnten [Ott74].

Warren und Stephens untersuchten experimentell den Einfluss dreieckiger Mikrostrukturen hinsichtlich ihrer Förderwirkung und den Einfluss auf das Reibmoment im RWDR-Dichtkontakt. Die Auswahl der Strukturen basiert auf numerischen Voruntersuchungen [SS04; HS07]. Die Strukturen wurden als Vertiefungen in eine mit Nickel beschichtete Stahloberfläche eingebracht, wobei ein UV-Fotolithografie-Verfahren genutzt wurde. Es wurden Fördervermögen, Temperatur, Reibmoment untersucht, wobei die untersuchten Strukturen einen positiven Effekt auf die Förderwirkung, die Temperatur und das Reibmoment haben können. Ein erhöhter Wellenverschleiß wurde beobachtet [WS09].

Li hat die Untersuchungen von *Warren und Stephens* weitergeführt, indem er ebenfalls Dreieckstrukturen untersucht hat. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen sowie Simulationen zur Förderwirkung ausgeführt. Die Strukturen wurden als Vertiefungen sowie als Erhebungen untersucht. Je nach Ausrichtung und Strukturtyp der Dreiecke wurde das Öl entweder zur Ölseite oder zur Luftseite gefördert. Dreieckige Vertiefungen, die in Richtung der Ölseite zeigen, führten zu Leckage, wohingegen zur Luftseite gerichtete Vertiefungen Öl von der Luftseite zurück zur Ölseite förderten. Erhabene Strukturen weisen genau gegensätzliche Ergebnisse auf. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass erhabene Strukturen einen sehr viel höheren Einfluss auf die Förderwirkung haben als Vertiefungen. Die Simulationsergebnisse wurden den Versuchsergebnissen gegenübergestellt. *Li* stellt heraus, dass die richtungsabhängige Förderwirkung der Strukturen mit dem Auftreten von Kavitation in Verbindung gebracht werden kann [Li12].

Der Einfluss von Texturen in RWDR-Gegenauflflächen auf die RWDR-Förderwirkung und das Reibmoment wurde von *Guo et. al* mittels EHL-Simulation untersucht. Insbesondere stand die axiale Positionierung der Dichtkante auf den Strukturen im Vordergrund. Hierzu wurden unterschiedliche Mikro-Geometrien wie Kreise, Quadrate und Dreiecke, welche als Vertiefungen in die Oberfläche eingebracht wurden, untersucht. [Guo+16]

Der Einfluss weichgeschliffener Gegenauflflächen auf das Dichtverhalten wurde von *Schuler* untersucht [SH13; SB13]. Hierbei wurden die Auswirkungen der im Zusammenhang mit dem Fertigungspro-

zess auftretenden Fehlstellen auf die Dichtfunktion untersucht. Es konnte ein starker Einfluss von korrosionsbedingten Fehlstellen aufgezeigt werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Fehlstellen *Schleifkommata* und *Kornbrüche* richtungsabhängig wirken und die Dichtfunktion beeinträchtigen können. In [TB17] wurden die Untersuchungen weitergeführt. Es zeigte sich, dass Fehlstellen bei weichgeschliffenen Dichtungsgegenläufigen im Vergleich zu gehärteten Gegenläufigen eine stärkere Ausprägung aufweisen und ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Fehlstellen sowie der Oberflächengüte mit den Fertigungsparametern besteht. Die untersuchten *singulären Fehlstellen*, wie zum Beispiel *Schleifkommata*, zeigten laut *Totz* einen eindeutigen Einfluss auf den Förderwert, wobei die *schwerwiegendste Fehlstelle* zu einer Änderung des Förderwerts von ca. 30 % führte. Ein Ausfall oder erhöhter Verschleiß der untersuchten Dichtsysteme konnte nicht ermittelt werden. Keines der untersuchten Dichtsysteme zeigte Leckage.

Die Auswirkungen stochastischer Strukturen wie zum Beispiel Kratzer oder Dellen wurden bisher nur in begrenztem Umfang untersucht. *Leis und von Hollen* untersuchten experimentell den Einfluss einzelner Schadenstypen auf die Dichtigkeit des Dichtsystems. Variiert wurden dabei die Tiefe und die Orientierung dieser Fehlstellen. Ferner wurden die Abhängigkeiten von einer Vielzahl von Geometrieparametern untersucht. Für den Schadenstyp *Delle* wurde eine starke Abhängigkeit von der Tiefe herausgearbeitet. Dellenschäden mit einer Tiefe größer 20 μm zeigten stets Leckage. Bei geringeren Tiefen konnte eine Dichtigkeit beobachtet werden. Für den Schadenstyp *Kratzer* wurde die Orientierung als ausschlaggebende Größe ermittelt. Kratzer mit einer Orientierung parallel zur Wellenachse waren stets dicht. Schräg gestellte Kratzer führten je nach Orientierung zu einem Fluidtransport in Richtung Ölseite oder Luftseite des RWDR. Diese Erkenntnis konnte durch optische Untersuchungen gestützt werden. Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen bestand in der Entwicklung eines praxisnahen Multisensorsystems zur optischen Erfassung stochastischer Defekte. Das Sensorsystem bestand aus einem Streulichtsensor zur qualitativen Erfassung und einem chromatischen Sensor zur quantitativen Erfassung der Fehlstellen. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Arbeiten wurde der Wellenförderwert bei den zentralen Messungen nicht isoliert betrachtet, sondern die Folge des Schadens im praxisnahen Dichtsystem beschrieben [Lei+10].

3.6 RECHERCHE ZUR GEOMETRIE RELEVANTER SCHLEIFFEHLER

Eine häufig Ursache für den Ausfall von Dichtsystemen ist das Auftreten von Strukturen in Gegenauflflächen, die eine aktive Förderwirkung aufweisen und je nach Drehrichtung zur Leckage führen oder Mangel-schmierung hervorrufen können. Diese Strukturen können zum einen durch einen unsachgemäßen Transport oder eine unsachgemäße Montage herbeigeführt werden, zum anderen können Oberflächenfehler auch aus einem nicht korrekten Fertigungsprozess entstehen. Da das Einstich-Schleifen das gängige Verfahren zur Herstellung von RWDR-Gegenauflflächen ist, wird in diesem Abschnitt ein kurzer Überblick über mögliche Schleiffehler gegeben.

Schleiffehler werden nach VDI 3393 als *Abweichungen des Arbeitsergebnisses vom vorgegebenen Sollbereich* definiert. Es kann zwischen *physikalischen und chemischen Schleiffehlern*, bei denen eine ungewünschte Änderung der Stoffeigenschaften an den Werkstückoberflächen und –randzonen auftritt, sowie geometrischen Schleiffehlern, bei denen nicht mehr tolerierbare Abweichungen beim Maß, der Lage, der Form oder der Oberflächenfeingestalt auftreten, unterschieden werden [VDI16].

Fehler in der Oberflächenfeingestalt können zum Beispiel sein:

- Rauheit zu groß oder zu klein
- Rattermarken, Facetten
- Vorschubspuren (Schraubenlinien), Drall, Schrägmuster
- Schleifkommata

Im Folgenden werden relevante Fehlerarten nach VDI 3393 zusammenfassend beschrieben [VDI16]:

Vorschubspuren (Schraubenlinien) sind schraubenförmige Spuren (Vorschubmarkierungen) auf der Werkstückoberfläche beim Rund-Längsschleifen. Die Steigung steht im direkten Verhältnis zum Tischvorschub.

Drall, Schrägmuster sind über den gesamten Umfang auftretende periodische Oberflächenausprägungen, wobei durchgängige oder unterbrochene Gänge möglich sind. Die Abrichtstrategie der Schleifscheibe hat einen großen Einfluss, da es bei ungünstigen Parametern zur Entstehung einer Abrichtwendel auf der Schleifscheibe kommen kann. Diese entsteht insbesondere durch eine Vorschubbewegung des Abrichtwerkzeugs gegenüber der Schleifscheibe. Ein ungünstiges Drehzahlverhältnis²⁸ (ganz- / halbzahlig) von Schleifscheibe und Werkstück kann den Übertrag der Abrichtkontur der Schleifscheibe auf die Werkstückoberfläche verursachen und somit eine Drallstruktur auf der Wellenoberfläche erzeugen.

²⁸ Hinweise in DIN 3761 – 2; in Abschnitt 3.4.

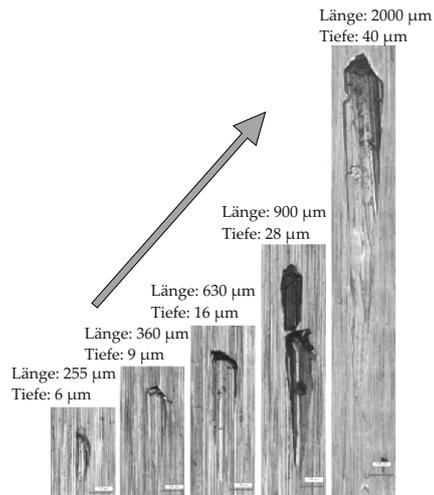


Abbildung 3.21: Gegenüberstellung unterschiedlicher Schleifkommata; nach [TB17]

Schleifkommata sind unregelmäßig verteilte, kurze, kommaförmige Kratzer auf der Wellenoberfläche. Diese können durch Ausbruch einzelner Schleifkörner während des Schleifens oder durch frei im Kühlschmierstoff schwebende Schleifkörner und Kornbruchteile in die Wellenoberfläche eingebracht werden. Die Dimension von Schleifkommata ist sehr unterschiedlich und über der Länge veränderlich. Maximale Breiten von ca. 50 µm bis 200 µm und maximale Tiefen von ca. 6 bis 40 µm wurden beobachtet [TB17]. Die Orientierung von Schleifkommata ist bedingt durch die Kinematik zwischen Schleifscheibe und Welle *in Umfangsrichtung* (vgl. Abbildung 3.21).

Die Werkstückoberfläche wird durch überlagerte *Schleifriefen* der Schleifkörner gebildet. Jedes Schleifkorn stellt dabei eine Einzelschneide dar. Der Literatur können unterschiedliche Angaben entnommen werden, welche jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung liegen:

- Riefenbreite: ca. 8 bis 10 µm bei Tiefe: 2 bis 3µm [Sch59]
- Riefenbreite: ca. 15 bis 25 µm bei Tiefe: 12µm [Kas69; Koe72]
- Riefenbreite: ca. 10 bis 20 µm [Ker92]
- Riefenbreite: 15 bis 20 µm [Bau17]

In Abbildung 3.22 ist exemplarisch eine Einzelriefe mit einer Breite von 50 µm bei einer Tiefe von 2 µm dargestellt. Anzumerken ist, dass durch vielfache Überlagerung einzelner Eingriffe auch wesentlich schmalere Riefen möglich sind [Ker92].

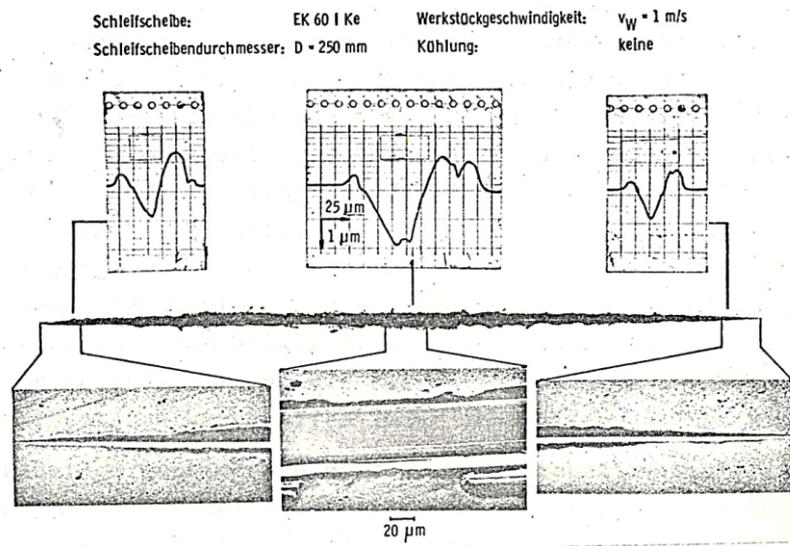


Abbildung 3.22: Topografie einer Schleifriefe; [Koe72]

EXPERIMENTELLE AUSSTATTUNG UND UNTERSUCHUNGSMETHODEN

4.1 GEGENLAUFFLÄCHEN

Bei den verwendeten Gegenlaufflächen handelt es sich um einsatzgehärtete und angelassene Wellenzapfen. Der Werkstoff ist 16MnCr5, die Lauffläche wurde im Einstich geschliffen. Die Grundmaße der verwendeten Wellenzapfen sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Der Nenndurchmesser der RWDR-Gegenlauffläche beträgt $\varnothing 60$ mm.

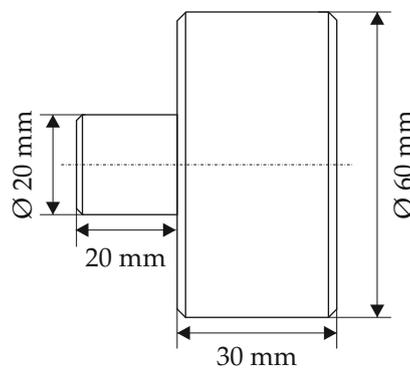


Abbildung 4.1: Maße der verwendeten Gegenlaufflächen

4.2 HERSTELLUNG VON STRUKTUREN

Die betrachteten Strukturen weisen unterschiedliche Geometrien auf. Es wurden Schäden in Form von *Dellen* sowie *kratzerähnliche* Strukturen nachgebildet. Die Dellenschäden wurden mechanisch eingedrückt. Bei den Kratzern kann zwischen mechanisch eingeritzten oder mittels Laser eingebrachten Kratzern unterschieden werden.

4.2.1 Dellenschäden

Die *Dellenschäden* werden mit Hilfe von Brinellkugeln (BK) in den Durchmessern $\varnothing BK = 1$ mm, $\varnothing BK = 2,5$ mm, $\varnothing BK = 5$ mm in die Gegenlauffläche eingebracht. Hierzu wurde eine Vorrichtung zur Verwendung einer Hydraulikpresse entwickelt, mit der eine stufenlose Belastung bis zu 500 kg möglich ist. Die aufgebrachte Last wird mit Hilfe einer Kraftmessdose überprüft (Abbildung 4.2, rechts). Dadurch kann eine sehr hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bezüglich der geforderten Dellentiefen realisiert werden.

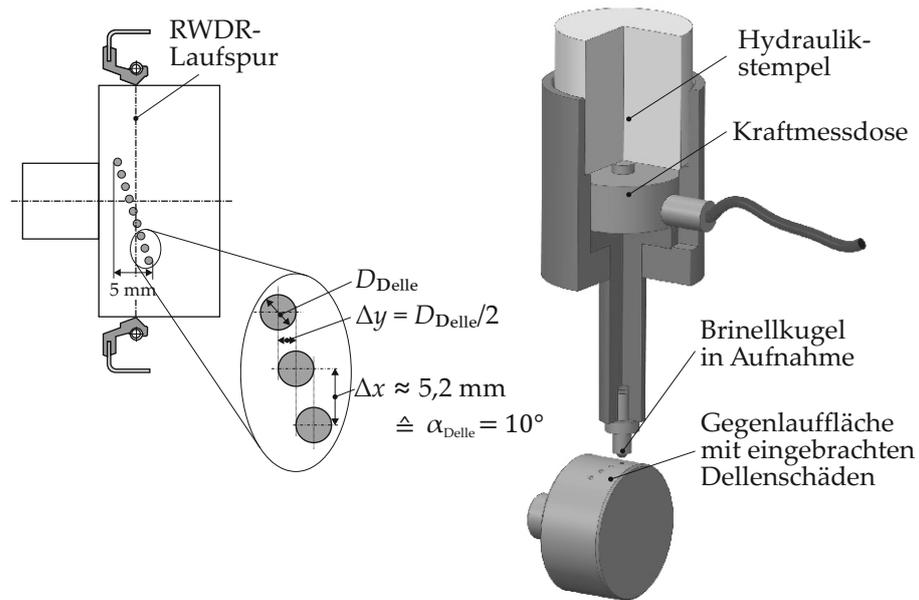


Abbildung 4.2: rechts: Vorrichtung zur Herstellung von Dellenschäden
links: Anordnung der Dellenschäden auf der Gegenauflfläche

Um zu gewährleisten, dass mehrere Versuche auf den Dellenschäden ausgeführt werden können, wurde eine Gesamtbreite der mit Dellen bestückten Fläche von 5 mm vorgesehen. Der axiale Versatz der Dellen wird in Abhängigkeit der zuvor ermittelten Dellen-Durchmesser festgelegt. Der Abstand in tangentialer Richtung beträgt $\Delta y = 5,2 \text{ mm}$. Dies entspricht einem Verdrehwinkel in Wellenachse von $\alpha_{Delle} = 10^\circ$ (Abbildung 4.2, links). Die Parameter zum Erzeugen von Dellen mit $10 \mu\text{m}$ und $15 \mu\text{m}$ Tiefe sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Dellentiefe $10 \mu\text{m}$			
	$\varnothing \text{ BK} = 1 \text{ mm}$	$\text{BK} = 2,5 \text{ mm}$	$\text{BK} = 5 \text{ mm}$
Masse in kg	32	80	160
Tangentialer Versatz in $^\circ$	10	10	10
Axialer Versatz in μm	125	210	320
Anzahl Dellen je Kaskade	40	23	15
Dellentiefe $15 \mu\text{m}$			
	$\varnothing \text{ BK} = 1 \text{ mm}$	$\text{BK} = 2,5 \text{ mm}$	$\text{BK} = 5 \text{ mm}$
Masse in kg	45	110	220
Tangentialer Versatz in $^\circ$	10	10	10
Axialer Versatz in μm	145	245	376
Anzahl Dellen je Kaskade	34	20	13

Tabelle 4.1: Parameter zur Dellenerzeugung

4.2.2 Kratzerschäden

Die Einbringung der *mechanischen Kratzer* erfolgte mit Hilfe einer speziell dafür entwickelten Vorrichtung. Hierbei werden die Kratzer mittels einer Vollhartmetallspitze in die Gegenlaufflächen geritzt. Die Tiefe wird über die Anpresskraft der Spitze eingestellt. Dies geschieht durch die Variation von Gewichten. Die Kratzeranzahl sowie der tangentielle Abstand der Strukturen wird mittels eines Teilapparates eingestellt. Die Variation der Kratzerlänge erfolgt mit Hilfe eines Lineartisches. Durch Rotation des Teilapparates auf dem Lineartisch lässt sich der Kratzerwinkel gegenüber der Wellenachse einstellen.

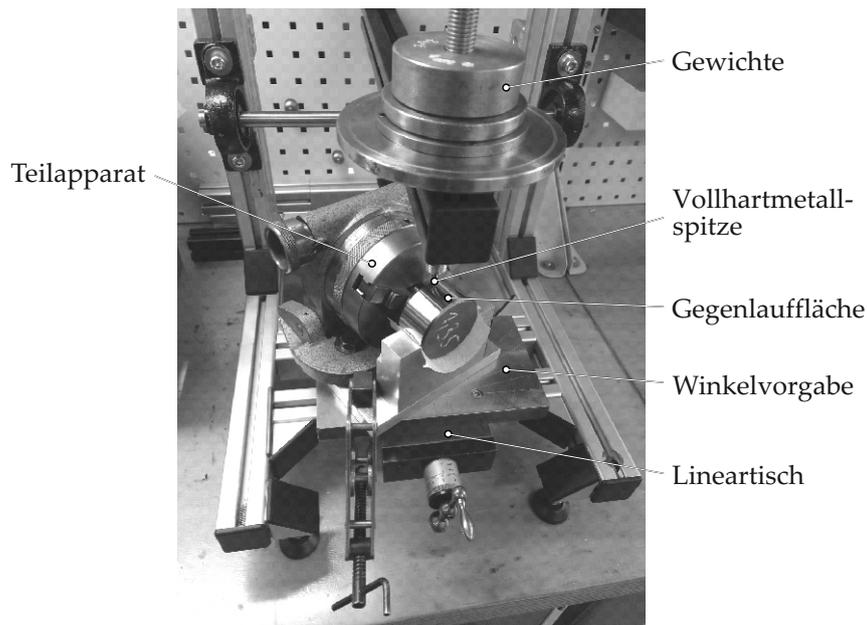


Abbildung 4.3: Vorrichtung zur Erzeugung mechanischer Kratzerschäden

Die *Laserkratzer* wurden von der Firma *KLUG Laserdienstleistungen und Beratung* mittels Ultrakurzpuls-Laser in die Dichtungsgegenlaufflächen eingebracht. Dieses Verfahren erreicht aufgrund der sehr hohen Präzision eine hohe Reproduzierbarkeit. Eine Eigenschaft der Laserbearbeitung mittels des eingesetzten Lasers ist, dass keine Randaufwürfe an den Kratzerrändern vorhanden sind. Aufgrund der kurzen Laserpulse verdampft das Material lokal und es kommt zu einem *kalten Abtrag*. Die fehlenden Randaufwürfe stellen somit eine Abweichung zur Geometrie mechanisch eingebrachter Kratzer dar, weshalb der Einfluss der Randaufwürfe auf das Abdichtverhalten separat untersucht wurde (vgl. Abschnitt 5.2.1.3). Die axiale Kratzerbreite ist, wie bei den Delleschäden auch, auf 5 mm festgelegt, sodass vier Reihen auf einer Gegenlauffläche aufgebracht werden können.

Es wurden Kratzertiefen von 1 bis 24 μm , Orientierungswinkel von 10° bis 80° (Abbildung 4.4; links) und die Kratzeranzahl von 1 bis 1000 in unterschiedlicher Kombination hergestellt. Bei *Mehrfachkratzern* wur-

de zusätzlich der tangential Abstand variiert. Abstände von 0,1 mm, 1 mm sowie gleichmäßig auf den Umfang verteilt wurden untersucht; vgl. Abbildung 4.4; Mitte). Zusätzlich wurde der gegensätzlich Einfluss unterschiedlicher Orientierungen von Mehrfachkratzern innerhalb einer Dichtungslaufspur (Wechselwinkel) untersucht (Abbildung 4.4; rechts).

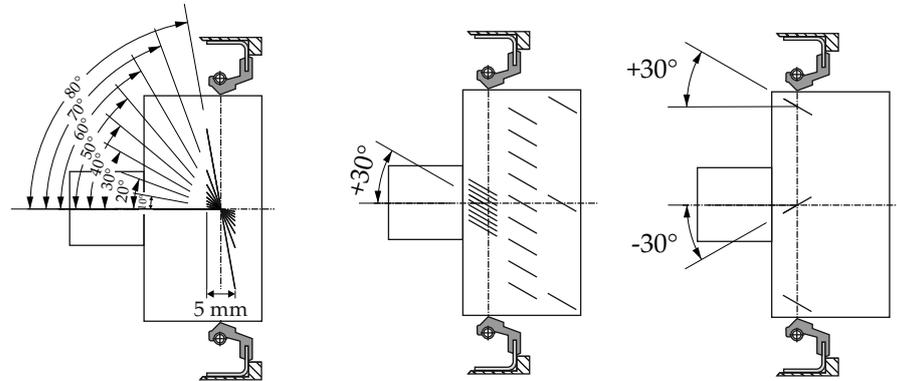


Abbildung 4.4: Beispiele unterschiedlicher Laserkratzer
 links: Einzelkratzer mit Winkelvariation
 Mitte: Mehrfachkratzer mit Abstandsvariation
 rechts: Mehrfachkratzer mit Wechselwinkel

4.3 BEGLEITENDE UNTERSUCHUNGEN

4.3.1 Radial-Kraftmessung von RWDR

Vor Versuchsbeginn wurde die Radialkraft jeder eingesetzten Dichtung gemessen. Diese Maßnahme dient zum Vergleich der Dichtungsexemplare untereinander und zur Deutung von Versuchsergebnissen. Die Radialkraft eines RWDR kann als Gesamtheit der Pressungskräfte verstanden werden, die der Dichtring auf die Gegenlauffläche ausübt. Die Reibung im Dichtkontakt sowie der Verschleiß an der Dichtkante und Gegenlauffläche hängen direkt von der Radialkraft ab. Zu hohe Radialkräfte können starke Reibung bewirken und eine thermische Überlastung des Schmierstoffs sowie des Dichtungswerkstoffes bewirken. Zu geringe Radialkräfte können die Folgefähigkeit der Dichtkante auf der Gegenlauffläche beeinträchtigen und bei hohen Drehzahlen zu Leckage führen. Der Aufbau von Radialkraftmessgeräten wird in DIN 3761-Teil 9 genormt [DIN84b]. Zur Messung der Radialkraft wird der Dichtring mit Schmierstoff benetzt und durch leichte Rotation auf einen geteilten Messzapfen geschoben (Abbildung 4.5). Zwischen den beiden Zapfen-Segmenten befindet sich ein Kraftaufnehmer. Mit diesem wird die Kraft gemessen, mit der die beiden Zapfen-Segmente durch die anliegende Dichtlippe gegeneinander gedrückt werden. Um das Messergebnis nicht zu verfälschen, dürfen die Segmente nicht

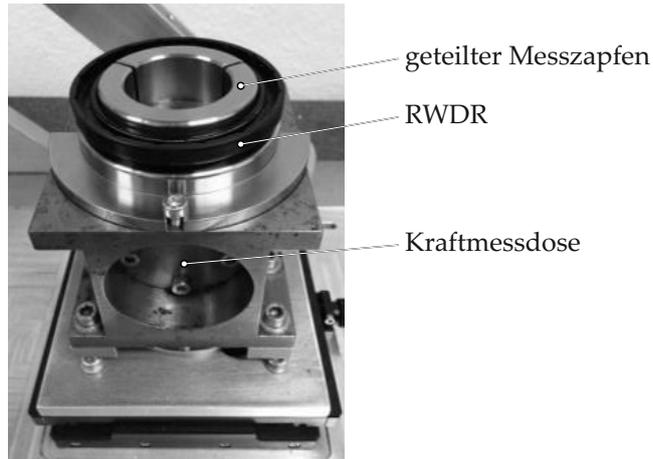


Abbildung 4.5: Radialkraftmessgerät

oder nur sehr wenig nachgeben. Der verwendete Kraftaufnehmer¹ besitzt eine Nachgiebigkeit von $< 80 \mu\text{m}$ und ist unempfindlich auf Quer- und Biegekräfte [Debo5]. Die Radialkraftmessungen erfolgen bei Raumtemperatur. Aufgrund von Relaxationsvorgängen des Dicht-ringelastomers nimmt die Radialkraft mit zunehmender Messdauer ab. Als zielführend hat sich eine Auswertung nach einer Stunde Messdauer herausgestellt, da der Großteil der Radialkraftänderung bereits abgeschlossen ist (vgl. Abbildung 4.6).

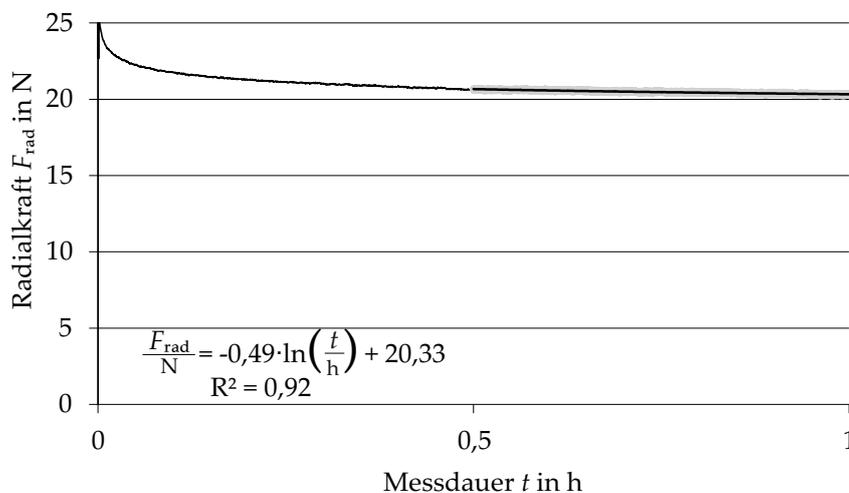


Abbildung 4.6: Beispiel einer Radialkraftmessung an einem Standard-RWDR mit einer Stunde Messdauer

Die Abweichung, die sich durch die Messdauer von einer Stunde im Vergleich zu einer längeren Messdauer ergibt, kann anhand Abbildung 4.7 abgeschätzt werden. Grundlage sind die Radialkraftmessungen von 540 Standard-RWDR (vgl. Abschnitt 4.4.1) bei Raumtemperatur. Ausgewertet wurde die Radialkraft jeder Messung sowohl nach einer

¹ Verwendeter Kraftaufnehmer: HBM Typ U3, Genauigkeitsklasse: 0,2, Nennkraft: 0,5 kN.

Stunde als auch am Ende der Messung. Die Abweichung zwischen den Messwerten wird dann auf den Messwert nach einer Stunde bezogen und ergibt somit die für jede Messung relative Abweichung, bezogen auf den Radialkraftwert nach einer Stunde. Zu erkennen ist das nichtlineare Materialverhalten und die daraus resultierende logarithmische Darstellung der Messdauer. Ferner ist anzumerken, dass die bei Raumtemperatur gemessene Radialkraft nicht die sich im Betrieb einstellende Radialkraft widerspiegelt. Durch eine Temperierung des Ölumpfes und den im Betrieb auftretenden Wärmeeintrag aufgrund von Schmierstoffscherung kann es zu erheblichen höheren Temperaturen im Dichtkontakt kommen, sodass mit einer Radialkraftabnahme gerechnet werden muss. *Engelke* gibt für einen neuen RWDR gleicher Bauform und von vergleichbarem FKM-Material eine relative Änderung der Radialkraft zwischen Raumtemperatur und einer Prüftemperatur von 120 °C von -14,4 % mit Feder bzw. -13 % ohne Feder an [Eng11].

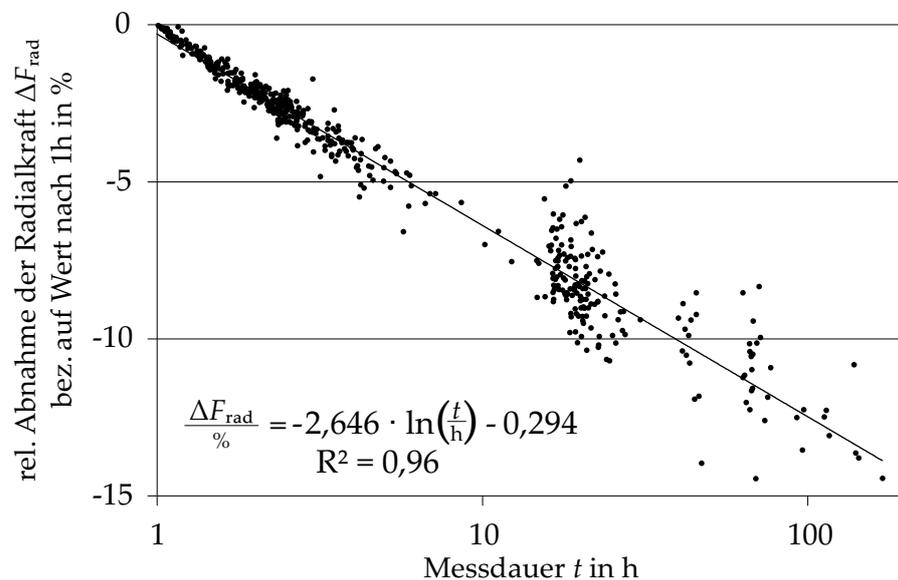


Abbildung 4.7: Relative Abweichung der Radialkraft für Standard-RWDR in Abhängigkeit der Messdauer, bezogen auf den Radialkraftwert nach einer Stunde Messdauer

4.3.2 Technische Ausstattung zur optischen Messung

Zur geometrischen Erfassung der Mikrostrukturen wird ein 3D-Laserscanning-Mikroskop VK-X250 der Firma *Keyence* verwendet (Abbildung 4.8, links). Die Vorgehensweise zur Messung der Kratzer-Strukturgeometrie ist in Abschnitt 4.3.3 beschrieben. Die Messung der Dichtkantenbreiten erfolgt auf einer Glas-Hohlwelle an einem digitalen Auflichtmikroskop VHX-600 der Firma *Keyence* (Abbildung 4.8, rechts).

Die Beschreibung der Vorgehensweise zur Bestimmung der Dichtkantenbreite und -Position erfolgt in Abschnitt 4.3.4.



Abbildung 4.8: Messung von Mikrostrukturen am VK-X250 (links) und Dichtkantenbreiten am VHX-600 (rechts)

4.3.3 Geometrische Analyse der Strukturen

Die Auswertung der Kratzergeometrie erfolgt nach Versuchsende, um die für die Messergebnisse relevanten Größen sowie den Verschleiß an den Strukturen auszuwerten. In Abbildung 4.9 ist die Vorgehensweise am Beispiel eines Einzel-Kratzers exemplarisch dargestellt.

In einer ersten Messung erfolgt die Bestimmung des durch Verschleiß bedingten Abtrags innerhalb der Laufspur (Abbildung 4.9, 1. Messung). Hierbei wird die Laufspurbreite und -tiefe gemessen. Eine differenzierte Untersuchung des Verschleißes der Gegenlauffläche *vor* und *hinter* dem Kratzer² ist zielführend, da die Fehlstellen eine Störung des Dichtkontaktes darstellen, sodass der Schmierfilm lokal zusammenbrechen und es zu einem verstärkten Verschleiß im *Kratzerauslauf* kommen kann. Darauf folgt die Messung der Kratzertiefe, Kratzerbreite und des Kratzerquerschnitts *in tangentialer Richtung* (Abbildung 4.9, 2. Messung). Zusätzlich wird die Kratzerbreite und der Kratzerquerschnitt *orthogonal zur Kratzerflanke* entlang der *Kratzerachse* bestimmt (Abbildung 4.9, 3. Messung).

4.3.4 Messung der RWDR-Dichtkantenbreite und -position

Zur Bestimmung des Dichtringverschleißes wird die Dichtkante nach den Versuchen optisch untersucht. Die Dichtung wird auf eine Glashohlwelle geschoben und mit Hilfe eines digitalen Auflichtmikroskops (vgl. Abschnitt 4.3.2) in Verbindung mit einem Umlenkspiegel die Dichtkantenbreite bestimmt (vgl. Abbildung 4.10). Außerdem kann mit Hilfe des Aufbaus die axiale Dichtkantenposition im Einbauzustand bestimmt werden. Diese Größe ist wichtig, um die unterschied-

² Je nach Drehrichtung im *Kratzereinlauf* bzw. *Kratzerauslauf*.

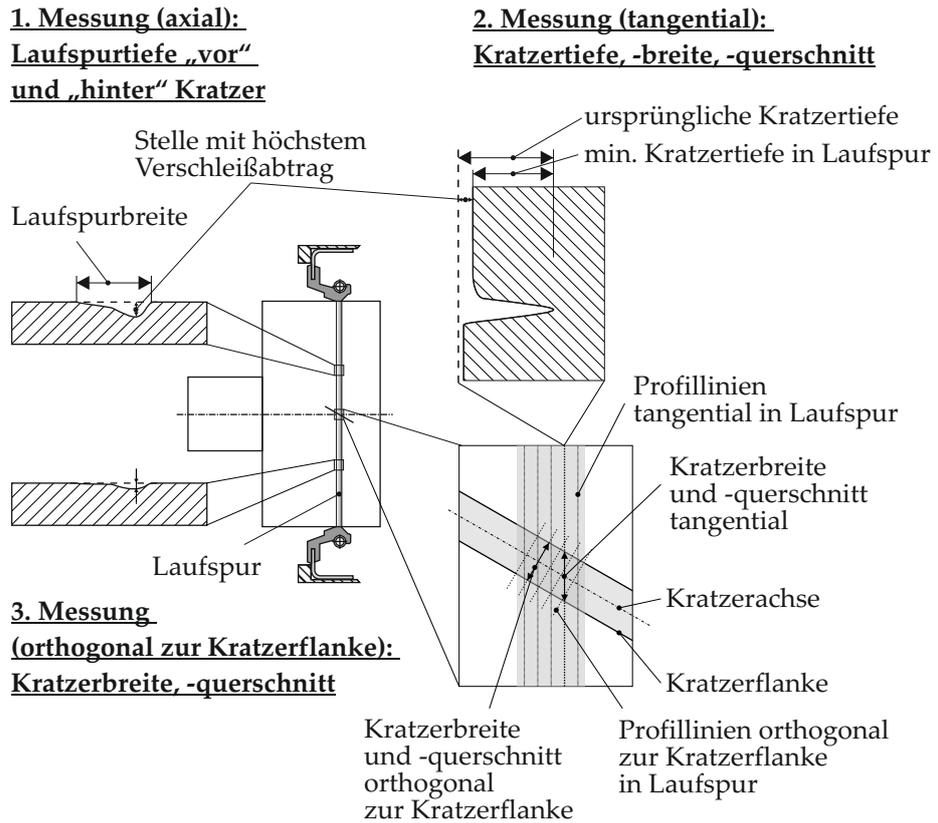


Abbildung 4.9: Vorgehensweise zur Auswertung von Verschleiß und Kratzergeometrie am Beispiel eines Einzel-Kratzers

lichen DichtungsbaufORMen exakt auf den Strukturen positionieren zu können.

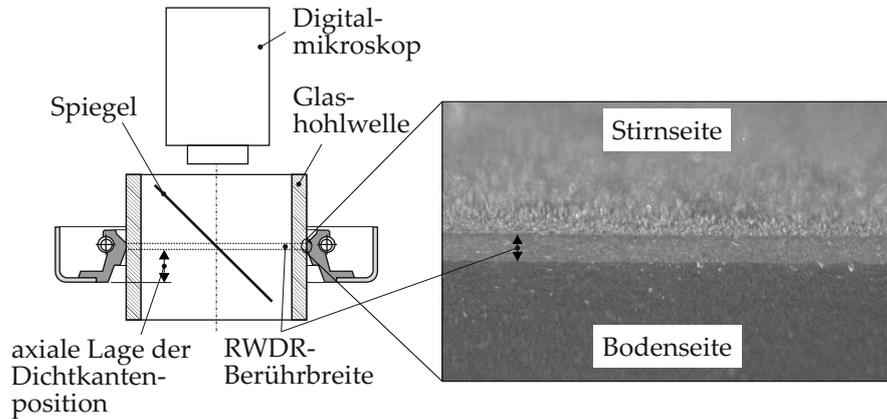


Abbildung 4.10: Messung der RWDR-Dichtkantenbreite und -position auf einer Glashohlwelle

4.4 UNTERSUCHTE DICHTUNGSBAUFORMEN

4.4.1 *Standard-RWDR*

Als Referenzdichtring dient ein *Standard-RWDR* gemäß DIN 3760 Form A mit *glatter* Dichtkante ohne Förderhilfen, aus 75³ FKM 585. Das Material des Außenmantels stellt ein rilliertes Elastomer dar. Die Dichtkante ist stirnseitig abgestochen (vgl. Abbildung 4.11). Die geometrischen Maße betragen 60x75x8 mm.

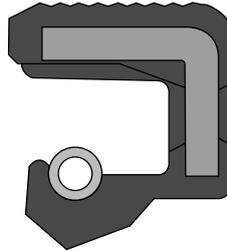


Abbildung 4.11: Standard-RWDR; nach [FST15]

4.4.2 *Einfachdrall-RWDR*

Weiterhin wurde als alternative Dichtungsbauform ein *Einfachdrall-RWDR* untersucht. Diese Bauform weist rechtsgerichtete Drallstege auf, welche somit drehrichtungsabhängig wirksam sind (Abbildung 4.12). Der Dichtlippenwerkstoff ist ein FKM, die geometrischen Maße betragen 60x85x10 mm. Die vorhandene Schutzlippe wird für die Versuche entfernt.

Schutzlippe (für Versuche abgestochen)

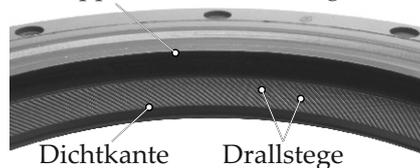


Abbildung 4.12: Einfachdrall-RWDR

³ Härte 75 Shore A.

4.5 VERSUCHSÖL

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein SAE 5W-30 Motorenöl verwendet. Ein vergleichbares Öl kam bereits in [Lei+10] zur Anwendung, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der physikalischen Öleigenschaften gewährleistet wird. Die physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Dichte @ 15 °C in g/cm ³	0,853
Flammpunkt in °C	230
Kinematische Viskosität @ 40 °C in mm ² /s	70,2
Kinematische Viskosität @ 100 °C in mm ² /s	11,7

Tabelle 4.2: Physikalische Eigenschaften des Versuchsöls

Die gemäß DIN 51563 und DIN 51757 berechnete dynamische Viskosität des Öls ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

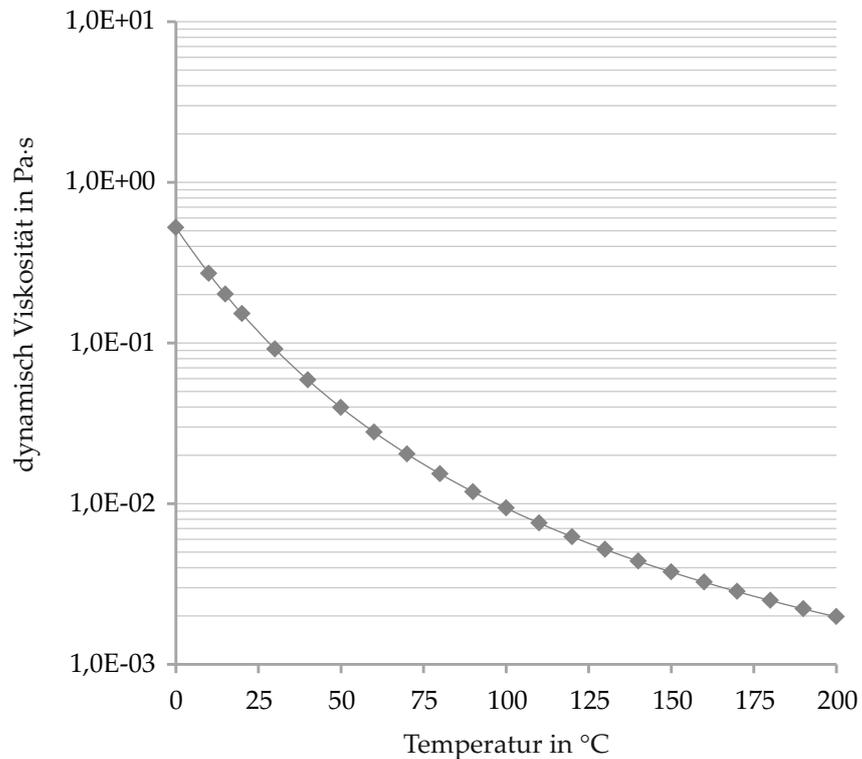


Abbildung 4.13: Berechnete dynamische Viskosität des Versuchsöls; nach DIN 51563 und DIN 51757 [DIN11a; DIN11b]

4.6 PRÜFSTANDSTECHNIK

Zur experimentellen Untersuchung des Einflusses von Strukturen im Dichtkontakt kommen unterschiedliche Prüfstände zur Anwendung. Für die Untersuchung von Dichtsystemleckage wird ein Funktionsprüfstand verwendet. Die Quantifizierung von Dichtsystemleckage sowie RWDR- und Strukturförderwerten erfolgt auf einem Horizontal-Förderprüfstand.

4.6.1 Funktionsprüfstand zur Untersuchung von Dichtsystem-Leckage

Mit Hilfe des Funktionsprüfstands lassen sich Dichtsysteme, bestehend aus Schmierstoff, Dichtung und Gegenlauffläche, auf Leckage untersuchen. Der Prüfstand ist für Langzeitversuche ausgelegt und es können bis zu sechs Prüfkammern mit jeweils einer direkt angetriebenen Welle unabhängig voneinander betrieben werden. Jede Prüfkammer besteht aus einer Dichtringaufnahme und einem vorgesetzten Ölraum (vgl. Abbildung 4.14). Das im Prüfkopf befindliche Öl kann mit Hilfe von Heizpatronen auf die gewünschte Sumpftemperatur aufgeheizt werden. Die Heizpatronen sind dazu in die Mantelfläche der Prüfkammer eingebracht. Die Temperaturüberwachung erfolgt durch Temperatursensoren im Ölsumpf sowie an der Prüfkopfmantelfläche. Die Gegenlauffläche des RWDR bildet ein Wellenzapfen (vgl. Abschnitt 4.1), welcher über eine Spannzange mit dem Antrieb verbunden ist. Die Leckage wird mit Hilfe von Ölauffangbehältern aufgefangen. Diese werden unterhalb einer in der Prüfkammer befindlichen Aussparung positioniert.

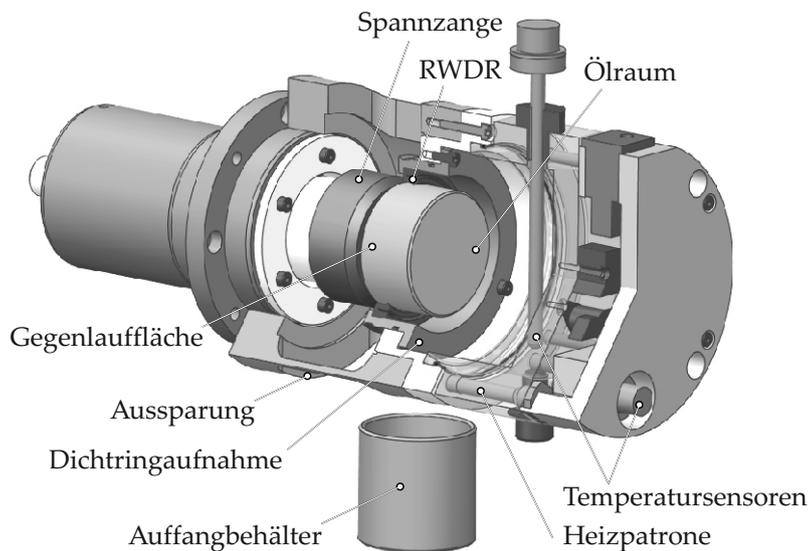


Abbildung 4.14: Prüfkammer des Funktionsprüfstands

4.6.2 Horizontal-Förderprüfstand zur Förderwert-Messung

Mit Hilfe des Horizontal-Förderprüfstandes⁴ lassen sich die Dichtsystemleckage sowie RWDR- und Strukturförderwerte messtechnisch erfassen. Der Prüfstand wurde ursprünglich von *Wennehorst* als barometrisches Messverfahren entwickelt und aufgebaut [WPo8] und später für kontinuierliche Messungen erweitert [MP17]. Mittels eines Direktantriebes und reibungsarmer Spindellagerung können Drehzahlen von bis zu 10.000 U/min erreicht werden. Die Temperierung erfolgt mittels Heizpatronen welche in die Mantelfläche der mit Öl befüllten Prüfkammer eingebracht sind (vgl. Abbildung 4.15). Zur Regelung der Sumpftemperatur erfolgt die Erfassung der Temperatur im Ölsumpf sowie an der Prüfkammermantelfläche. Die Versuchsdichtung wird von zwei Prüfkammern umschlossen. Im Betrieb fördert die Dichtung je nach Einbaurichtung Fluid von einer Prüfkammer in die andere. Das Reibmoment kann mittels einer Drehmomentmesswelle erfasst werden. Diese befindet sich zwischen Motor und Antriebsspindel. Bei Auswertung des Dichtungsreibmoments hat folglich die Messung der Spindelreibung separat zu erfolgen und muss vom Gesamtreibmoment abgezogen werden.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Dichtsystemleckage, wobei der Dichtring auf der einen Seite mit Öl beaufschlagt wird und gegen Luft abdichtet, hat es sich als zielführend herausgestellt, den Prüfstand in ein gravimetrisches Messverfahren umzurüsten. Hierbei wird die Masse des ausgetretenen Fluids mittels Waage erfasst. Durch die gleichzeitige Erfassung der Förderdauer kann somit der durch die Dichtstelle abgeführte Massenstrom bestimmt werden. Aus dem Massenstrom lässt sich, je nach Aufgabenstellung und Einbausituation, die Leckagerate oder der Förderwert berechnen (vgl. Abschnitt 4.8).

⁴ Auch Zweikammer-Dichtungsprüfstand genannt.

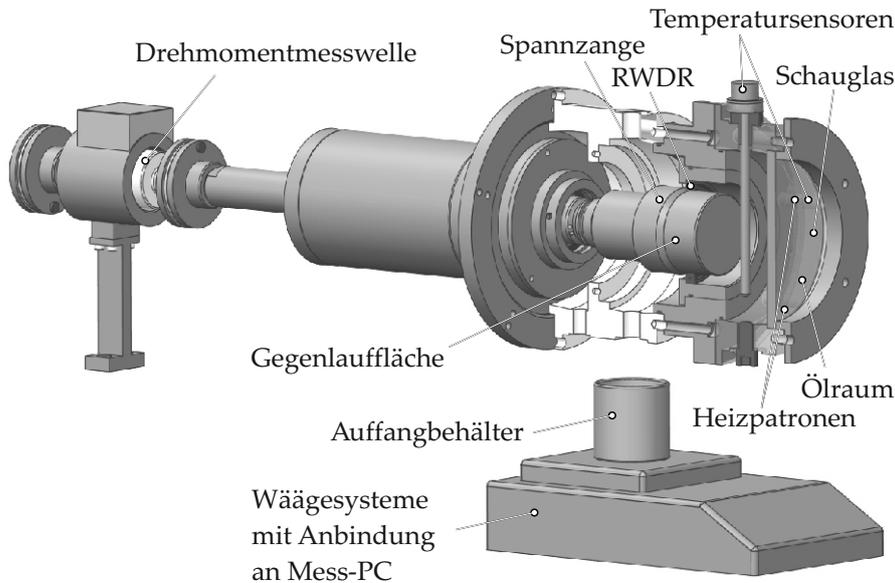


Abbildung 4.15: Horizontal-Förderprüfstand

4.7 DEFINITIONEN ZUR DREHRICHTUNG

Abhängig von der Strukturorientierung auf der Gegenlauffläche und der Wellendrehrichtung ergibt sich unabhängig von der Einbaurichtung des RWDR eine auf die Strukturförderrichtung bezogene Drehrichtung.

Eine *leckagefördernde* Drehrichtung führt laut Modellvorstellung zu einem Ausschleiben des Fluids von der Ölseite zur Luftseite. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Kratzer eine negative Ausrichtung gegenüber der Wellenachse aufweist und die Welle im Uhrzeigersinn (CW) dreht (vgl. Abbildung 4.16, oben). Eine gleiche Schaden- ausrichtung, jedoch bei entgegengesetzter Wellenrotation gegen den Uhrzeigersinn (CCW), führt zu einer *rückfördernden* Drehrichtung. Ausgetretenes Fluid wird in diesem Fall von der Luftseite zurück in Richtung Ölseite gefördert (vgl. Abbildung 4.16, unten).

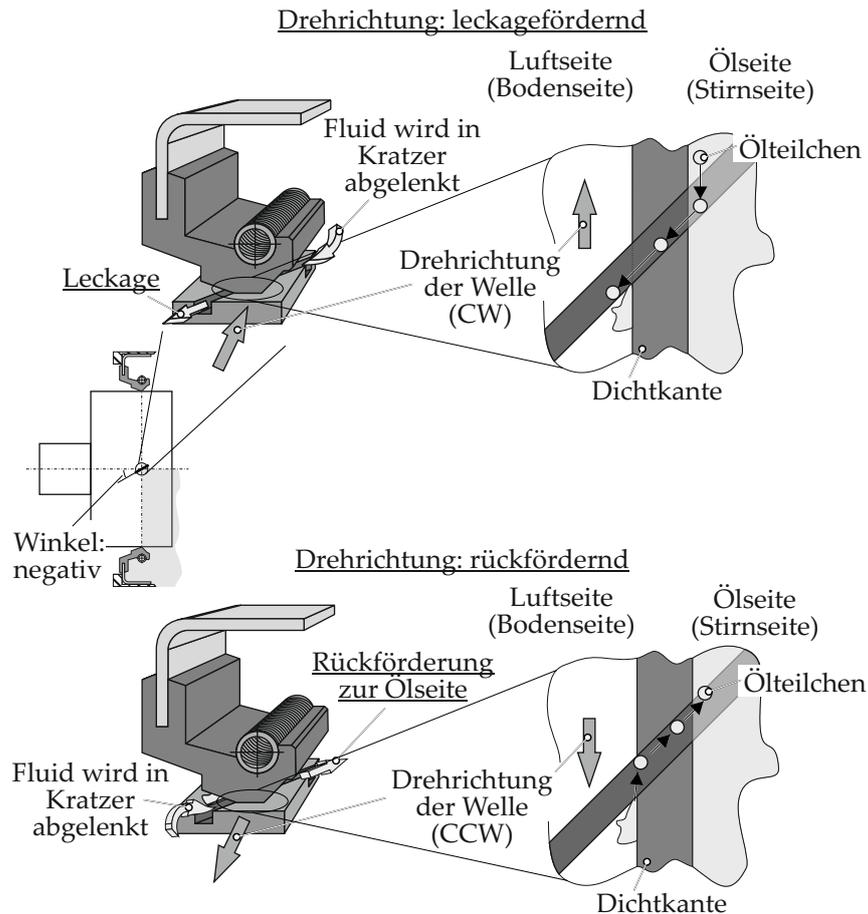


Abbildung 4.16: Definitionen zur Drehrichtung, oben: *leakagefördernd*, unten: *rückfördernd*

4.8 FÖRDERWERT-BESTIMMUNG

Die Förderwirkung von Strukturen im Dichtkontakt lässt sich nicht isoliert messen, da sie stets von der Förderwirkung des RWDR überlagert ist. Zur Quantifizierung der Förderfähigkeit von strukturierten Gegenaufläufen werden im Folgenden zwei Methoden vorgestellt. Die erste Methode beschreibt die Messung der *Leckagerate* und die zweite Methode die Messung des *kombinierten Förderwerts* von RWDR und Gegenaufläufen.

4.8.1 Methode 1: Messung der Leckagerate

Zur Messung der Dichtsystem-Leckage, zum Beispiel bei geschädigter Gegenaufläufen und abdichtend⁵ eingebautem RWDR, hat sich die gravimetrische *Messung der Leckagerate* als zielführend herausgestellt. Hierbei wird das ausgetretene Fluid mittels Waage erfasst und durch die zusätzliche Erfassung der Förderdauer der Massenstrom

⁵ Stirnseite des RWDR zur Ölseite gerichtet.

bzw. die Leckagerate berechnet. Das Messprinzip ist in Abbildung 4.17 aufgeführt. Der Ölstand wird mit Hilfe einer Füllstandsregulierung konstant auf Wellenebene gehalten. Der Vorteil dieser Messmethode ist die Erfassung der Dichtsystem-Leckage in realer, abdichtender Einbausituation, wodurch eine direkte Übertragbarkeit zu Leckageversuchen⁶ hergestellt werden kann. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass nur sehr förderaktive bzw. leckagekritische Strukturen quantifiziert werden können. Diese Strukturen müssen prinzipbedingt einen größeren Förderwert als den RWDR-Förderwert aufweisen. Der RWDR-Förderwert ist mit dieser Methode nicht bestimmbar und erfolgt durch gesonderte Messungen, zum Beispiel auf einer schadenfreien Stelle der jeweiligen Gegenlauffläche. Die Gleitgeschwindigkeit der in dieser Arbeit durchgeführten Messungen beträgt 5 m/s, die Öl-Sumpftemperatur 90°C. Zur Messung der Leckagerate ist eine *leckagefördernde Drehrichtung*⁷ notwendig, bei der die Struktur Fluid von der Ölseite zur Lufseite fördert (vgl. Abbildung 4.17). Untersuchungen haben gezeigt, dass die Dichtkante des Standard-RWDR⁸ einem Einlaufprozess unterliegt, wobei der Förderwert zunächst ansteigt. In Verbindung mit dem hier eingesetzten Schmierstoff⁹ und ungeschädigten Gegenlaufflächen¹⁰ erfolgt der Einlauf bei den oben genannten Betriebsbedingungen innerhalb der ersten 20 Stunden. Um eine ausreichend große Anzahl an Messwerten sicherzustellen, wird die Auswertung der Leckagerate nach 50 Stunden Betriebsdauer ausgeführt.

Unter der Annahme, dass die sich im Dichtkontakt befindlichen Strukturen der Gegenlauffläche den RWDR-Förderwert nicht wesentlich beeinflussen, wird der separat gemessene RWDR-Förderwert FW_{RWDR} auf die gemessene Leckagerate addiert und ergibt somit die approximierte Struktur-Förderrate $FW_{Struktur}$.

$$\text{Leckagerate} = FW_{Struktur} - FW_{RWDR} \quad (4.1)$$

Einsetzen von FW_{RWDR} in Gleichung (4.1):

$$FW_{Struktur} = \text{Leckagerate} + FW_{RWDR} \quad (4.2)$$

- Vorteil: Messung bei realer Einbausituation
- Nachteile: • nur Leckage-kritische Strukturen messbar:
 $FW_{Struktur} > FW_{RWDR}$
 • separate Messung des RWDR-Förderwerts
 ohne Kratzer nötig

⁶ Vgl. Abschnitt 5.2.

⁷ Siehe Definition Abschnitt 4.7.

⁸ Vgl. Abschnitt 4.4.1.

⁹ Vgl. Abschnitt 4.5.

¹⁰ Vgl. Abschnitt 4.1.

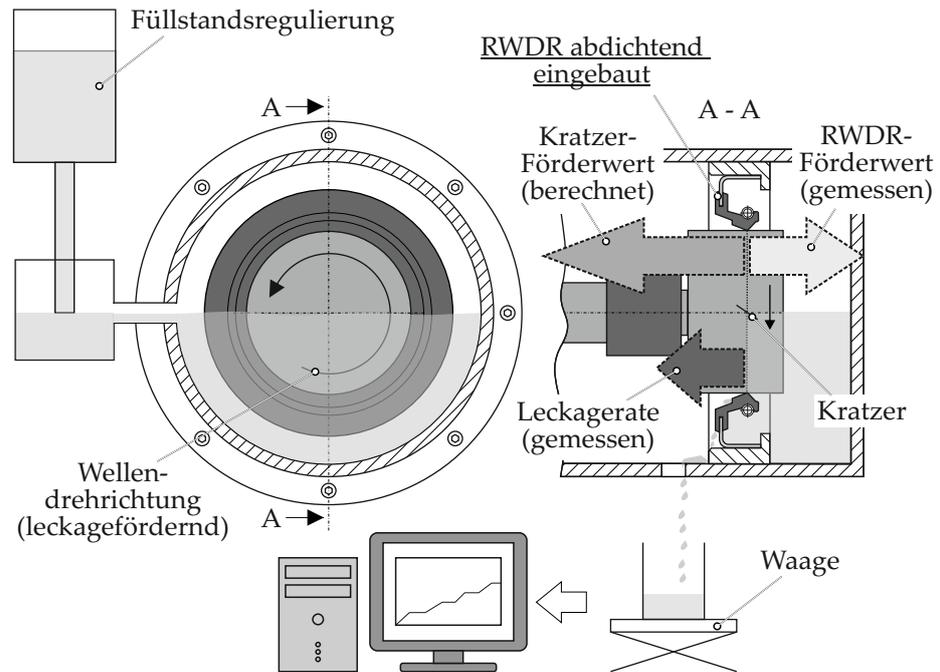


Abbildung 4.17: Prinzip der Leckagemessung

4.8.2 Methode 2: Messung des kombinierten Förderwerts

Zur Quantifizierung von Strukturen mit geringer Förderwirkung und zum Vergleich von Strukturen unterschiedlicher Ausprägung hat sich die *Messung des kombinierten Förderwerts* als zielführend herausgestellt. Hierbei wird die Dichtung invers montiert¹¹. Wird die Wellendrehrichtung variiert, wirken die Förderrichtung der Strukturen und des RWDR, je nach Drehrichtung, gleichgerichtet oder entgegengesetzt (vgl. Abbildung 4.18).

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde eine wechselnde Gleitgeschwindigkeit von ± 5 m/s für jeweils drei Stunden je Drehrichtung und eine Öl-Sumpftemperatur von 90°C eingestellt. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Verwendung des Standard-RWDR¹² in Verbindung mit dem hier eingesetzten Schmierstoff¹³ und ungeschädigten Gegenaufläichen¹⁴ der Einlauf bei der oben genannten wechselnden Gleitgeschwindigkeit innerhalb der ersten 9 Stunden erfolgt. Um eine ausreichend große Anzahl an Messwerten sicherzustellen, wird bei dieser Messmethode eine Gesamtprüfdauer von 18 Stunden ausgeführt. Unter der Annahme, dass der RWDR-Förderwert und der Strukturförderwert für beide Drehrichtungen konstant ist, besteht der Vorteil bei diesem Verfahren in der direkten Berechnung der RWDR- und Strukturförderwerte (vgl.

¹¹ Bodenseite des RWDR zum Öl gerichtet, herausfördernd.

¹² Vgl. Abschnitt 4.4.1.

¹³ Vgl. Abschnitt 4.5.

¹⁴ Vgl. Abschnitt 4.1.

Gleichung (4.5) und (4.6)). Dies ist jedoch nur möglich, solange der RWDR-Förderwert größer als der Strukturförderwert ist, da sonst bei *rückfördernder Drehrichtung*¹⁵ der Struktur keine Masse austritt und somit kein Förderwert ausgewertet werden kann. Zum Vergleich von sehr förderaktiven Strukturen mit Strukturen geringer Förderwirkung¹⁶ bietet sich die Auswertung bei *leckagefördernder Drehrichtung*¹⁷ an. Hierbei besteht der kombinierte Förderwert aus der Summe von RWDR- und Strukturförderwert (vgl. Gleichung (4.7)). Wird zusätzlich der RWDR-Förderwert separat bestimmt, kann in Anlehnung an Gleichung (4.2) mit Gleichung (4.8) ebenfalls der Strukturförderwert abgeschätzt und verglichen werden.

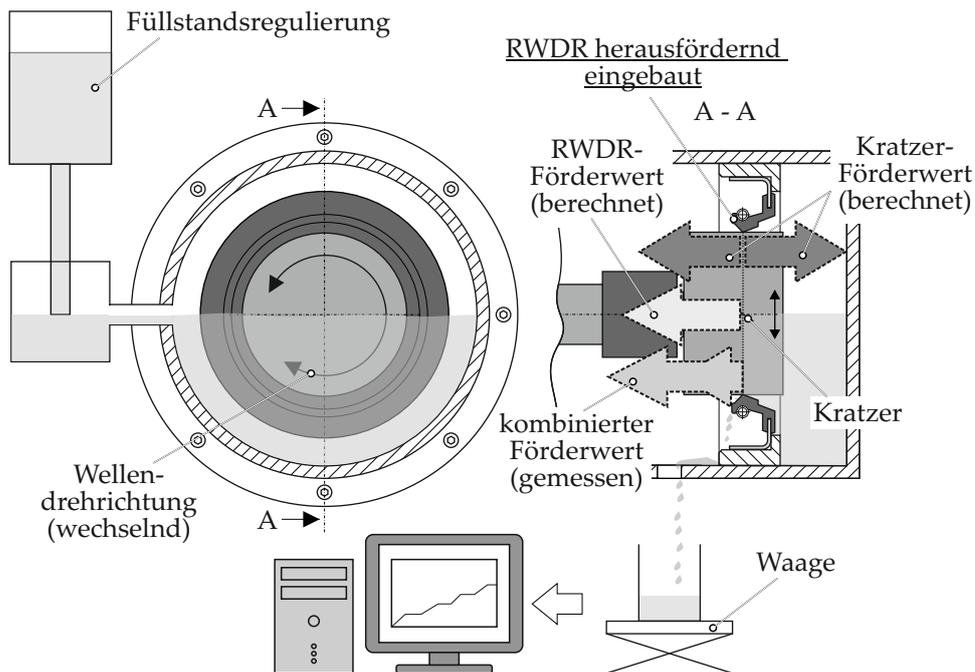


Abbildung 4.18: Prinzip zur Messung des kombinierten Förderwerts

Es gilt:

$$FW_{\text{leckagefördernd}} = FW_{\text{RWDR}} + FW_{\text{Struktur}} \quad (4.3)$$

$$FW_{\text{rückfördernd}} = FW_{\text{RWDR}} - FW_{\text{Struktur}} \quad (4.4)$$

¹⁵ Siehe Definition Abschnitt 4.7.

¹⁶ $FW_{\text{Struktur}} < FW_{\text{RWDR}}$.

¹⁷ Siehe Definition Abschnitt 4.7.

Einsetzen von Gleichung (4.3) in Gleichung (4.4) ergibt:

$$FW_{RWDR} = \frac{FW_{\text{leckgefördernd}} + FW_{\text{rückfördernd}}}{2} \quad (4.5)$$

$$FW_{\text{Struktur}} = \frac{FW_{\text{leckgefördernd}} - FW_{\text{rückfördernd}}}{2} \quad (4.6)$$

$$FW_{\text{kombiniert}} = FW_{RWDR} + FW_{\text{Struktur}} \quad (4.7)$$

$$FW_{\text{Struktur}} = FW_{\text{kombiniert}} - FW_{RWDR} \quad (4.8)$$

- Vorteile:
- Einfluss geringer Strukturturen messbar
 - RWDR- und Strukturförderwerte
direkt berechenbar wenn:

$$FW_{RWDR} > FW_{\text{Struktur}}$$

- Nachteil: Förderwerte bei Leckage-kritischen Strukturen
nicht direkt berechenbar wenn:

$$FW_{RWDR} < FW_{\text{Struktur}}$$

Exemplarisch wird anhand Abbildung 4.19 die Vorgehensweise bei der Berechnung des Förderwertes anhand einer Messung auf einem Kratzer mit 10° Winkel und $15 \mu\text{m}$ Tiefe erläutert.

Wie in Abbildung 4.19 oben zu erkennen ist, startet der Versuch mit einer Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn (CCW) in leckagefördernder Drehrichtung für drei Stunden mit einer Gleitgeschwindigkeit von 5 m/s. Je nach Fördervermögen der Strukturen vergeht eine gewisse Zeit bis das geförderte Fluid bei der Waage ankommt. Die Masse steigt mit fortschreitender Fluidförderung stetig an (vgl. Abbildung 4.19, zweite von oben).

Zu erkennen ist, dass die Förderwirkung der Strukturen bei rückfördernder Drehrichtung (CW) der RWDR-Förderwirkung entgegen wirkt. Der Gradient des Massenverlaufs ist somit in dieser Drehrichtung geringer.

Im nächsten Schritt erfolgt eine Unterteilung des Massenverlaufs in äquidistante Zeitintervalle. Diese werden durch die Marker im Massenverlauf dargestellt. Hierbei hat sich ein Intervall von 15 Minuten Länge als zielführend herausgestellt.

Durch eine lineare Regressionsanalyse des Masseverlaufs innerhalb der Zeitintervalle wird die Steigung sowie der Korrelationskoeffizient für jedes Zeitintervall bestimmt (vgl. Abbildung 4.19, dritte von oben).

Mit Hilfe der Steigung der Massenänderung wird der Förderwert berechnet. Um den Einfluss des Dichtringdurchmessers rechnerisch zu eliminieren, wird der Förderwert auf den Umfang des Wellendurchmessers normiert, sodass der Förderwert auf einen Meter Gleitweg bezogen wird. Der Förderwert wird somit in der Einheit mg/m angegeben. Um eine hohe Güte der berechneten Förderwerte sicherzustellen,

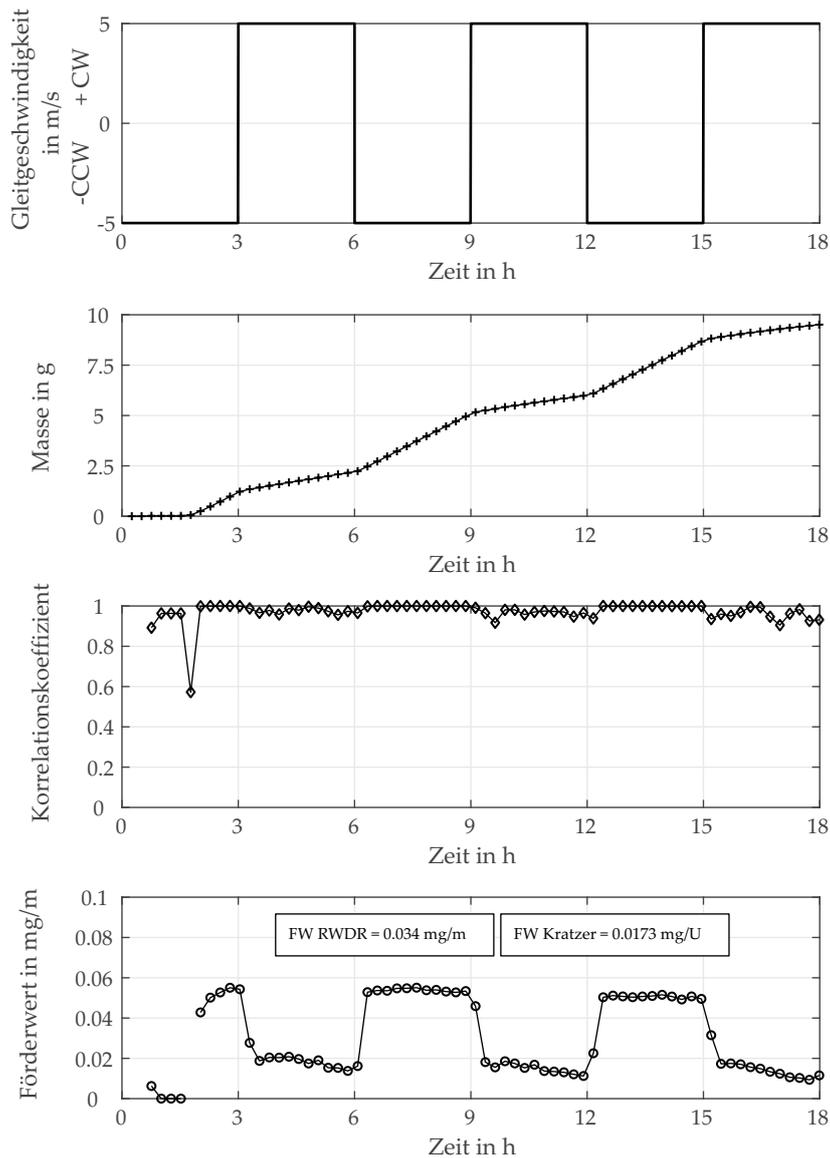


Abbildung 4.19: Beispiel einer Förderwertberechnung

hat es sich als zielführend herausgestellt, für die Förderwertberechnung lediglich Werte mit einem Korrelationskoeffizienten $> 0,81$ zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 4.19, unten).

Wie in Abbildung 4.19 zu erkennen ist, ist der RWDR-Förderwert größer als der Strukturförderwert. Dies ist auch an der positiven Steigungen des Masseverlaufs zu erkennen, sodass die in Abbildung 4.19 unten angegebenen RWDR- und Kratzerförderwerte plausibel erscheinen.

Im folgenden Beispiel weist der Kratzer einen größeren Förderwert auf als der RWDR, sodass bei rückfördernder Drehrichtung keine Masseänderung gemessen werden kann. Ebenfalls liegt eine große Streuung der Korrelationskoeffizienten vor, da die Änderungen sehr gering sind und im Bereich des Messwerttrauschens der Waage liegen.

Die berechneten Förderwerte in Abbildung 4.20 unten sind somit nicht korrekt berechnet. Die Gleichungen (4.5) und (4.6) sind nicht anwendbar.

Wie bereits oben beschrieben, kann in diesem Fall der kombinierte Förderwert aus Gleichung (4.7) oder der Strukturförderwert aus Gleichung (4.8) zum Vergleich mit anderen Strukturen verwendet werden.

Ferner ist ersichtlich, dass es einen gewissen zeitlichen Verzug bei der Berechnung korrekter, drehrichtungsbezogener Förderwerte nach jedem Drehrichtungswechsel gibt. Dies ist auf die Trägheit des Messsystems zurückzuführen, da noch Fluid *nachtropft*, auch wenn die Drehrichtung bereits gewechselt hat.

Die Förderwerte für RWDR und Kratzer sowie der kombinierte Förderwert *FW kombi* in Abbildung 4.20 unten wird aus diesem Grund aus dem Medianwert der bei leakagefördernder Drehrichtung ermittelten Förderwerte berechnet. Dies ist zielführend, da eine Mittelwertbildung durch die *Ausreißer* nach den jeweiligen Drehrichtungswechseln den berechneten Wert verfälschen würden.

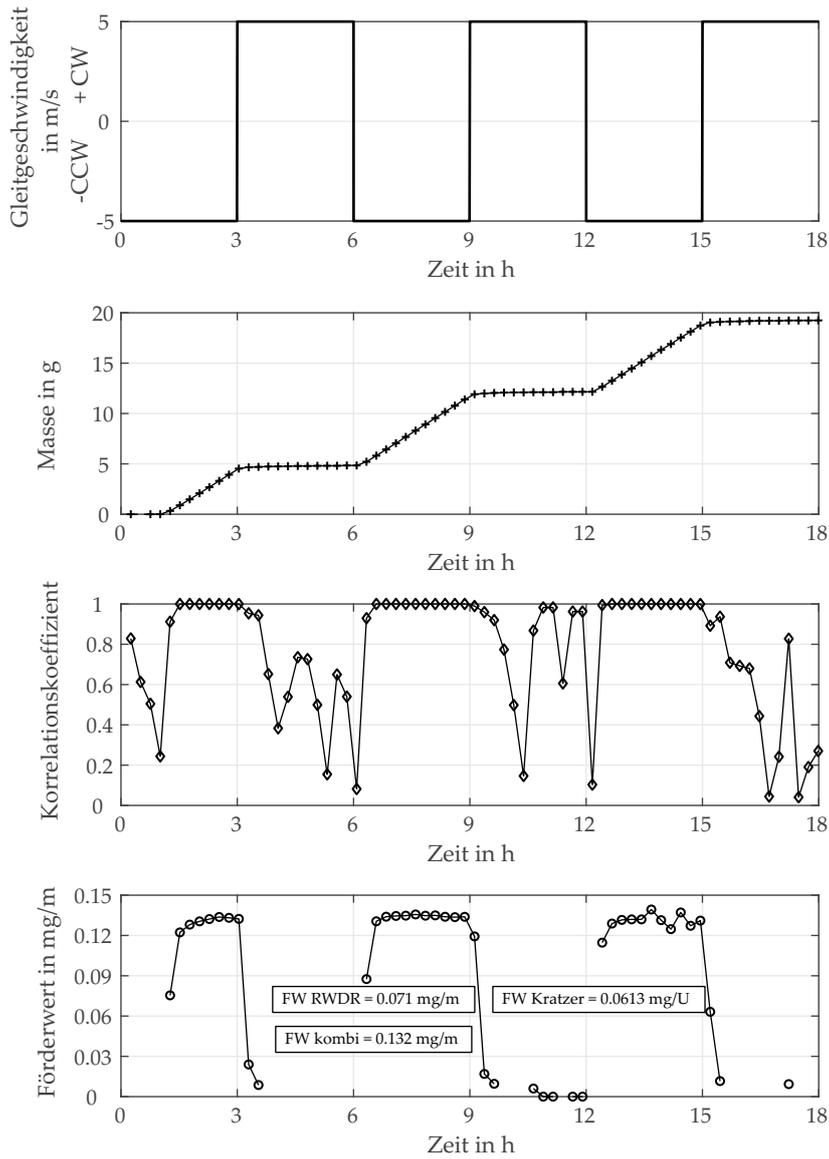


Abbildung 4.20: Beispiel einer nicht zielführenden Förderwertberechnung

4.9 ABLAUF VON LECKAGEVERSUCHEN

Zur Identifikation kritischer Strukturen werden Leckageversuche auf dem in Abschnitt 4.6.1 beschriebenen Funktionsprüfstand durchgeführt. Hierbei wird die jeweilige Dichtungsbauf orm auf einer definierten Struktur untersucht. Es werden jeweils drei Gegenläuflächen mit dem gleichen Strukturtyp und jeweils einer neuen Dichtung untersucht. Auf diese Weise liegen mindestens drei unabhängige Versuchsergebnisse zu jeder Schadensform vor. Die Versuche starten mit einer Gleitgeschwindigkeit von $v_{\text{gleit}} = 5 \text{ m/s}$ für 24 Stunden Betriebsdauer. Ist nach Ende der ersten 24 Stunden keine Leckage detektiert worden, wird die Gleitgeschwindigkeit auf $v_{\text{gleit}} = 15 \text{ m/s}$ erhöht und für weitere 24 Stunden gefahren. Tritt Leckage auf, wird der Versuch

beendet. Das verwendete Öl entspricht dem in Abschnitt 4.5 beschriebene SAE 5W30 Motorenöl. Der Prüfkopf ist bis zur Wellenmitte mit Öl befüllt. Die Ölsumpftemperatur wird konstant auf $T_{\text{Sumpf}} = 90^{\circ}\text{C}$ geregelt. Die Versuchsbedingungen können zusammengefasst Tabelle 4.3 entnommen werden.

Versuchsöl	SAE 5W30 Motorenöl ¹⁸
Ölstand	Wellenmitte
Sumpftemperatur	90 °C
Gleitgeschwindigkeit	5 m/s für 24 Stunden wenn dicht: 15 m/s für weitere 24 Stunden
Drehrichtung	leckagefördernd, rückfördernd ¹⁹
Anzahl Tests	≥ 3 je Strukturtyp

Tabelle 4.3: Versuchsbedingungen bei Leckageversuchen

¹⁸ Vgl. Abschnitt 4.5.

¹⁹ Vgl. Abschnitt 4.7.

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

5.1 VERGLEICH VON KRATZERKONTUREN

Bei den Untersuchungen von Kratzer-Strukturen konnten unterschiedliche Kratzerkonturen ermittelt werden. In Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens kann sich die Kontur der Strukturen unterscheiden.

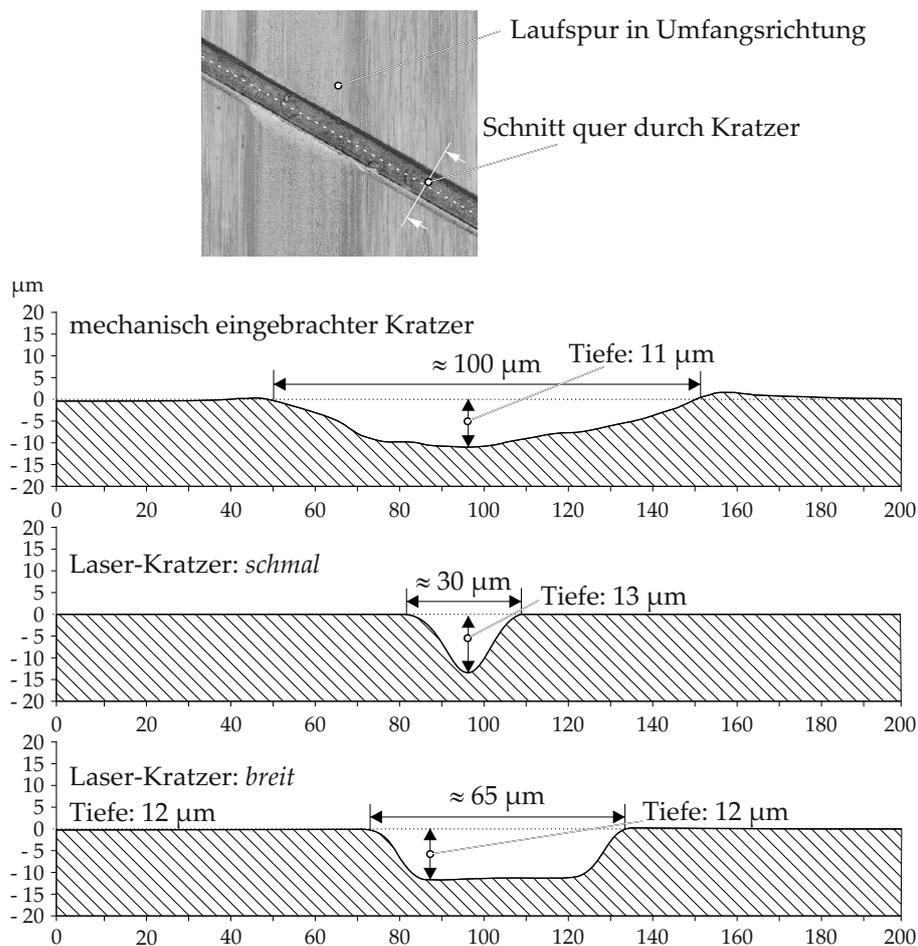


Abbildung 5.1: Vergleich der Kratzerkontur von mechanischen Kratzern und Laser-Kratzern gleicher Tiefe $\approx 12\mu\text{m}$ und 30° Winkel gegenüber der Wellenachse, Schnitt quer durch Kratzer

Bei mechanisch eingebrachten Kratzern ist die Kontur von der verwendeten Werkzeuggeometrie zum *Einritzen* der Kratzer sowie von der Belastung des Werkzeugs abhängig. Je höher die Last, desto tiefer und breiter werden die erzeugten Strukturen. Die Kontur von Laserkratzern ist vor allem abhängig vom eingesetzten Laser. Aufgrund

unterschiedlicher Laser-Verfahren kam es bei der Herstellung der in dieser Arbeit betrachteten Laser-Kratzer zu unterschiedlichen Konturen.

In Abbildung 5.1 sind exemplarisch die Profilschnitte von Einzelkratzern gleicher Tiefe jedoch unterschiedlicher Herstellungsverfahren gegenübergestellt. In Abbildung 5.1 oben ist die Kontur eines mechanisch eingeritzten Kratzers mit einer Tiefe von ca. $11\ \mu\text{m}$ und einer Breite von ca. $100\ \mu\text{m}$ zu erkennen. In Abbildung 5.1 Mitte ist eine *schmale* Kratzerkontur eines $13\ \mu\text{m}$ tiefen Laser-Einzelkratzers dargestellt. Die Breite dieser Struktur beträgt ca. $30\ \mu\text{m}$. Im Vergleich dazu wird in Abbildung 5.1 unten ein *breiter* Laser-Einzelkratzer mit einer Tiefe von $12\ \mu\text{m}$ gezeigt. Dieser Kratzer weist eine Breite von ca. $65\ \mu\text{m}$ auf.

Der Einfluss der unterschiedlichen Konturen wird bei den betreffenden Versuchsergebnissen der folgenden Abschnitte diskutiert.

5.2 LECKAGEVERSUCHE

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Leckageversuche dargestellt. Die Ergebnisse sind für die betrachteten DichtungsbaufORMen gesondert aufgeführt.

5.2.1 Versuche mit Standard-RWDR

5.2.1.1 Referenzversuch auf ungeschädigten Wellen

Um die Abdichtbarkeit der eingesetzten GegenauflÄchen ohne zUSÄtzlichen Einfluss eingebrachter SchÄden zu untersuchen, wurden Leckageversuche gemÄÙ des Versuchsablaufs aus Abschnitt 4.9 auf ungeschÄdigten Bereichen von GegenauflÄchen durchgeföhrt. Hierbei wurden Versuche mit einer Wellendrehrichtung sowohl im Uhrzeigersinn (CW) als auch gegen den Uhrzeigersinn (CCW) ausgeföhrt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Es zeigten sich keine AuffÄlligkeiten, sodass keine Leckage oder erhöhrt Verschleiß auftrat.

Gegenlauf- fläche	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur- Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dreh- richtung	Dichtheit	Versuchsablauf
III 1	nicht messbar	216	237	22,63	165	CCW	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
III 32	nicht messbar	232	238	22,38	137	CCW	ja	
III 63	nicht messbar	278	239	22,31	131	CCW	ja	
III 1	nicht messbar	309	240	22,63	174	CW	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
III 32	nicht messbar	269	241	23,03	206	CW	ja	
III 63	nicht messbar	275	242	21,75	152	CW	ja	
<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> dicht bei 5 und 15 m/s								

Tabelle 5.1: Referenz-Leckageversuche auf ungeschädigten Gegenauflä-
chen, mit Standard-RWDR, je Drehrichtung:
24 h bei 5 m/s
24 h bei 15 m/s

Zusätzlich wurden zwei Versuche mit längerer Versuchsdauer und Drehrichtungswechsel durchgeführt. Hierbei wurden jeweils vier Leckageversuche direkt hintereinander ausgeführt, wobei nach jeweils 48 Stunden¹ die Drehrichtung gewechselt wurde, sodass sich eine Gesamtversuchsdauer von $4 * 48 \text{ Stunden} = 192 \text{ Stunden}$ ergibt. Der Unterschied der beiden Versuche lag in der zu Beginn ausgeführten Drehrichtung, sodass ein Versuch im Uhrzeigersinn (CW) und ein weiterer Versuch gegen Uhrzeigersinn (CCW) gestartet wurde. Diese Versuche zeigten ebenfalls keine Auffälligkeiten hinsichtlich Leckage und Verschleiß (vgl. Abschnitt A.1.1).

Sämtliche Gegenauflä-chen wurden nach demselben Vorgehen gefertigt. Basierend auf den Ergebnissen ist davon auszugehen, dass sich keine kritischen Strukturen aus dem Fertigungsprozess auf den Gegenauflä-chen befinden, die die Ergebnisse der zu untersuchen- den Strukturen beeinflussen. Diese Erkenntnisse werden durch die Förderwertanalysen ungeschädigter Gegenauflä-chen gestützt².

¹ 24 Stunden bei 5 m/s + 24 Stunden bei 15 m/s.

² Vgl. Abschnitt 5.3.1.1.

5.2.1.2 Dellenschäden

Die Ergebnisse der durchgeführten Leckageversuche³ von *Leis und von Hollen* zeigten für Standard-RWDR auf Dellenschäden Leckage ab einer Dellentiefe von ca. 20 µm. Die nächst geringere untersuchte Dellentiefe von 10 µm zeigte keine Leckage.

Ziel war es, den Bereich kritischer Dellen für den Standard-RWDR weiter einzugrenzen. Hierzu wurden Gegenauflflächen mit Dellenschäden mit einer Tiefe von 10 µm und 15 µm gemäß Abschnitt 5.2.1.2 präpariert und in Leckageversuchen gemäß Abschnitt 4.9 untersucht.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. In der linken Spalte ist der Durchmesser der Brinellkugel, mit dem die Eindrücke hergestellt wurden aufgeführt. Daneben sind die Ergebnisse der vom Dichtkontakt überstrichenen Deltiefen und -durchmesser sowie das zugehörige Ergebnis der Schadenstypen dargestellt. Je nach Dellendurchmesser und axialer Position der Dichtkante auf der Gegenauflfläche werden unterschiedlich viele Dellen überlaufen. Die aufgeführten Ergebnisse stellen die mittleren Werte der betroffenen Dellentiefen dar. Die erweiterten Versuchsergebnisse können Abschnitt A.1.2 entnommen werden. Weiße Zellen zeigen Schadenstypen an, bei denen keine Leckage detektiert wurde. Graue Zellen weisen auf Leckage hin.

Die Ergebnisse bestätigen, dass Dellen mit einer Tiefe von 10 µm erfolgreich abgedichtet werden konnten. Ebenfalls konnten Dellen mit einer Tiefe von 15 µm leckagefrei abgedichtet werden. Die untersuchten Dellen weisen Durchmesser von ca. 210 µm bis ca. 670 µm auf. Zu Vergleichszwecken sind ebenfalls die Ergebnisse von *Leis und von Hollen* für Dellentiefen von 20 µm in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Mit Hilfe der Untersuchungen konnte der Bereich kritischer Dellenschäden weiter eingegrenzt werden.

ø Brinell- kugel	Soll-Tiefe		
	10 µm	15 µm	20 µm
mittlere Tiefe und Durchmesser überlaufener Dellenschäden			
ø 1 mm	11,5±0,5 µm (Ø 212±2 µm)	15,1±0,3 µm (Ø 252±4 µm)	22,3±0,5 µm (Ø 165±2 µm); [Lei+10]
ø 2,5 mm	10,6±0,5 µm (Ø 350±5 µm)	14,7±0,6 µm (Ø 418±6 µm)	21,8±1 µm (Ø 309±3 µm); [Lei+10]
ø 5 mm	11,4±0,7 µm (Ø 558±13 µm)	16,2±0,3 µm (Ø 665±10 µm)	

	dicht bei 5 und 15 m/s
	Leckage bei 15 m/s

Tabelle 5.2: Leckageversuche auf Dellenschäden

³ Leckageversuche unter gleichen Versuchsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.9) und mit gleicher Standard-RWDR Bauform (vgl. Abschnitt 4.4.1) durchgeführt [Lei+10; MP17].

5.2.1.3 Mechanisch eingebrachte Einzelkratzer

In der Praxis entstehen kratzerförmige Strukturen in Gegenlaufflächen in den meisten Fällen durch mechanische Einwirkung, zum Beispiel durch eine unsachgemäße Handhabung während des Fertigungs- oder Montageprozesses. In diesen Fällen werden die Kratzer in die Oberfläche *geritzt*. Charakteristisch für diese Schadensform sind die an den Rändern auftretenden *Randaufwürfe*.

Die Einbringung mechanischer Kratzer-Strukturen erfolgt in dieser Arbeit mit Hilfe der in Abschnitt 4.2.2 dargestellten Methode. Zur systematischen Untersuchung stellt sich die Einbringung mechanisch eingebrachter Kratzer-Strukturen als verhältnismäßig aufwändig dar. Die Einbringung mittels Laser weist verfahrensbedingt eine höhere Genauigkeit und Reproduzierbarkeit auf. Dem gegenüber stehen die prozessbedingt fehlenden Randaufwürfe⁴. Um die Vergleichbarkeit der beiden unterschiedlichen Herstellungsverfahren zu untersuchen, werden in diesem Abschnitt zunächst Untersuchungen zum Verschleiß der Randaufwürfe aufgeführt. Darauf folgen die Ergebnisse zur Abdichtbarkeit mechanisch eingebrachter Kratzer-Strukturen.

Die Analyse von Kratzer-Strukturen nach abgeschlossenen Leckageversuchen hat gezeigt, dass die Randaufwürfe mechanisch eingebrachter Kratzerschäden innerhalb der Laufspur abgetragen werden. Zur Untersuchung der Dauer bis zum vollständigen Abtrag wurden mehrere Versuche ausgeführt.

Standard-RWDR									
Gegenlauf- fläche	Kratzer- Winkel in °	mittlere Randaufwurf- höhe; <u>neben</u> <u>Laufspur</u> in µm	mittlere Randaufwurf- höhe; <u>in Laufspur</u> in µm	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dreh- richtung	Dichtheit	Versuchsablauf
II 73	30	4,4 ± 1,2	0,8 ± 0,6	10,7 ± 0,7	nicht messbar	350	leckage- fördernd	ja	1 h bei 5 m/s
			0,7 ± 0,2	10,7 ± 0,7	nicht messbar	390		ja	+ 5 h bei 5 m/s
II 69	30	2,3 ± 0,9	1,5 ± 0,9	13,2±0,7	nicht messbar	300	leckage- fördernd	ja	5 min bei 5 m/s
			0,6 ± 0,3	13,2±0,7	nicht messbar	350		ja	+ 10 min bei 5 m/s

Tabelle 5.3: Versuchsergebnisse zum Einlaufverschleiß:
nach 1 und 6 Stunden Laufzeit (oben)
nach 5 und 15 Minuten Laufzeit (unten)
Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Drehrichtung: leckagefördernd

Ein Versuch, bei dem ein mechanisch eingebrachter Einzelkratzer mit einem Winkel von 30° gegenüber der Wellenachse und einer Kratertiefe von ca. 11 µm in leckagefördernder Drehrichtung untersucht wurde, zeigte, dass nach einer Stunde Betriebsdauer Randaufwürfe von ca. 4

⁴ Siehe dazu Abschnitt 4.2.2.

μm Höhe fast vollständig abgetragen wurden. Weitere fünf Stunden Betriebsdauer führten nur noch zu einem geringen Verschleißfortschritt (vgl. Tabelle 5.3 oben).

Bei einem weiteren Versuch wurde die Versuchsdauer stark verkürzt, sodass eine Verschleißauswertung nach 5 Minuten sowie nach weiteren 10 Minuten Betriebsdauer durchgeführt wurde (vgl. Tabelle 5.3 unten und Abbildung 5.2). Hierbei wurde ein mechanisch eingebrachter Einzelkratzer mit einem Winkel von 30° gegenüber der Wellenachse und einer Kratertiefe von ca. $13\ \mu\text{m}$ in leakagefördernder Drehrichtung untersucht. Die Randaufwurfhöhe betrug vor Beginn ca. $2\ \mu\text{m}$.

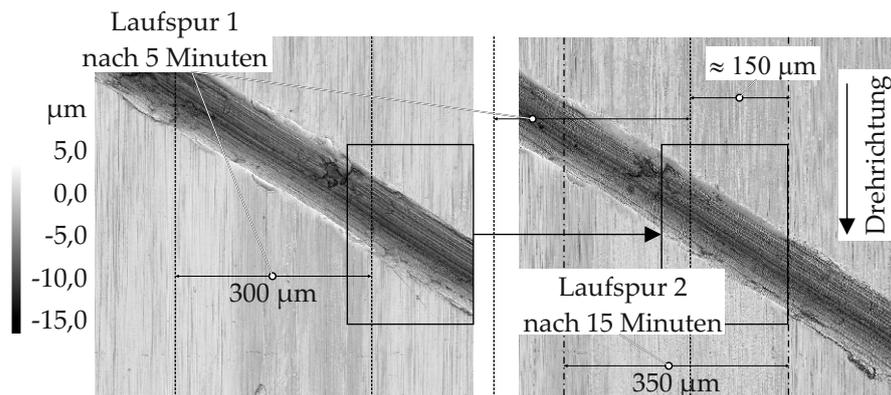


Abbildung 5.2: Abtrag der Randaufwürfe in Laufspur nach 5 Minuten (links) und nach 15 Minuten (rechts); Gleitgeschwindigkeit: $5\ \text{m/s}$, Drehrichtung: leakagefördernd

Es konnte festgestellt werden, dass bereits ein Abtrag der Randaufwürfe innerhalb der ersten 5 Minuten erkennbar ist. Innerhalb der folgenden 10 Minuten wurde dann der Großteil der Randaufwürfe abgetragen. Eine geringe Positionsabweichung zwischen der ersten Laufspur und der zweiten Laufspur von ca. $150\ \mu\text{m}$ aufgrund der erneuten Montage ist erkennbar. Eine Überlagerung der Laufspuren ist dennoch gegeben. Durch die Positionsabweichung wird zusätzlich deutlich, dass Aufwürfe neben der ersten Laufspur von ca. $1,5\ \mu\text{m}$ Höhe innerhalb der Dauer des zweiten Versuchslaufs von 10 Minuten komplett abgetragen werden konnten.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass der Großteil der Randaufwürfe innerhalb der ersten 10 bis 15 Minuten bei einer Gleitgeschwindigkeit von $5\ \text{m/s}$ abgetragen wird. Eine Übertragbarkeit zu Laserkratzern ohne Randaufwürfe kann dadurch sichergestellt werden. Eine Bestimmung der Strukturtiefe gegenüber der Wellenoberfläche und nicht gegenüber der Randaufwürfe ist somit zielführend.

Die Ergebnisse mit mechanisch eingebrachten Einzelkratzern durchgeführten Leakageversuchen sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Hierbei wurden Kratzer mit einem Winkel von 30° gegenüber der Wellenachse und unterschiedlichen Kratzertiefen untersucht.

Es ist zu erkennen, dass bis ca. 12 µm mittlerer Kratzertiefe⁵ die Kratzerstrukturen leckagefrei abgedichtet werden können. Tiefere Kratzer zeigten Leckage unterschiedlicher Stärke (vgl. Tabelle 5.4). Die erweiterten Versuchsergebnisse können Abschnitt A.1.3 entnommen werden.

Diese Ergebnisse bestätigen die Übertragbarkeit der mittels Laser eingebrachten Einzelkratzer (vgl. Tabelle 5.5).

Standard-RWDR								Versuchsablauf
Gegenlauf- fläche	Kratzer- Winkel in °	mittlere Randaufwurf- höhe; <u>neben</u> Laufspur in µm	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspur- tiefe)	Laufspur- Breite in µm	Dichtheit	
II 69		4,1 ± 0,3	5,3 ± 0,2	0,8 ± 0,1	6,1	329	ja	
II 71		5,2 ± 0,4	5,2 ± 0,4	0,9 ± 0,1	6,1	268	ja	
II 73		3,6 ± 0,4	5,1 ± 0,1	1,2 ± 0,0	6,3	335	ja	
II 73		2,2 ± 0,7	9,2 ± 0,3	1,0 ± 0,1	10,2	237	ja	
II 69	30	3,1 ± 1,1	12,5 ± 0,4	nicht messbar	12,5	311	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
II 71		4,2 ± 1,0	11,3 ± 0,3	1,3 ± 0,1	12,6	204	ja	
II 69		1,3 ± 0,2	12,2 ± 0,6	nicht messbar	12,2	230	15 m/s	
II 73		3,4 ± 1,2	13,2 ± 0,7	1,1 ± 0,1	14,3	328	15 m/s	
II 71		3,1 ± 2,8	14,4 ± 1,2	nicht messbar	14,4	329	15 m/s *	
II 69		1,0 ± 0,1	15,1 ± 1,0	1,8 ± 0,3	16,9	256	15 m/s **	

	dicht bei 5 und 15 m/s
	Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	* ca. 11,3 g Leckage ** ca. 23 g Leckage

Tabelle 5.4: Leckageversuch mit mechanisch eingebrachten Kratzerschäden; Kratzerwinkel: 30°, Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Drehrichtung: leckagefördernd

5.2.1.4 Laser-Einzelkratzer

Bei den Versuchen mit Laser-Einzelkratzern wird der Einfluss der Kratzertiefe und dem Kratzerwinkel untersucht. Wie in Abschnitt 5.1 dargestellt, lagen für die Versuche unterschiedliche Kratzerformen vor. Hierbei wird zwischen *schmalen* und *breiten* Laser-Einzelkratzern unterschieden, wobei die schmalen Strukturen einen geringen Querschnitt bei gleicher Tiefe aufweisen (vgl. Abbildung 5.1).

Die Versuchsergebnisse sind als Ergebnisübersicht in Tabelle 5.5 zusammengefasst. Die durchgeführten Messungen werden mit einem Punkt ◦ im Falle eines Versuches ohne Leckage angezeigt. Wird Leckage detektiert, so wird für die jeweilige Tiefen-/Winkelkombination die Gleitgeschwindigkeit aufgeführt, bei der erstmals Leckage auftrat⁶.

⁵ Mittlere Kratzertiefe = Kratzertiefe in Laufspur + Laufspurtiefe.

⁶ Vgl. hierzu den Ablauf von Leckageversuchen in Abschnitt 4.9, Seite 55.

Zusätzlich werden die Ergebnisse extrapoliert, sodass für die Bereiche außerhalb der Messergebnisse eine Prognose hinsichtlich der zu erwartenden Dichtheit gegeben wird.

Kratzeranzahl: 1, mit Standard-RWDR

Kratzerwinkel in °	Laser-Kratzerform	Kratzertiefe in µm						
		3	6	9	12	15 - 16	18	23
10	schmal	/				o	o (15 m/s)	/
	breit	/				o	o (15 m/s)	/
20	breit	/		o	o (15 m/s)	o (5 m/s)	/	
30	schmal	/			o	o (15 m/s)	o (15 m/s)	o (5 m/s)
	breit	/		o	o (15 m/s)	o (5 m/s)	/	
40	breit	/		o (15 m/s)	/			
50	breit	o	o	o (5 m/s)	/			
60	breit	/	o	o (5 m/s)	/			
70	breit	/	o (15 m/s)	o (5 m/s)	/			
80	breit	o	o	o (5 m/s)	/			

	Prognose: dicht; bei 5 und 15 m/s; basierend auf bisherigen Ergebnissen
	dicht; bei 5 und 15 m/s
	Dichtheit und Leakage ohne Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage ohne und mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Prognose: Leakage, basierend auf bisherigen Ergebnissen

Tabelle 5.5: Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Einzelkratzern; Variation: Kratzerwinkel und -tiefe; Standard-RWDR; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Drehrichtung: leckagefördernd

Es zeigt sich, dass *breite* Strukturen im Vergleich zu *schmalen* Strukturen tendenziell bei geringeren Tiefen zu einem Dichtsystemausfall in Form von Leckage führen. Diese Abweichungen lassen sich mit großer Sicherheit durch den unterschiedlichen Struktur-Querschnitt erklären, sodass bei gleichem Winkel und gleicher Tiefe die Leckageneigung mit geringerem Querschnitt abnimmt.

Die Ergebnisse der Leckageversuche für den Standard-RWDR auf Laser-Einzelkratzern zeigen den Einfluss des Kratzerwinkels und der Kratzertiefe auf die Abdichtbarkeit auf. Bis zu einem Winkel von 50° wird der Einfluss des Winkels deutlich. Ab 50° Kratzerwinkel und einer Tiefe von 9 µm trat stets Leckage bei einer Gleitgeschwindigkeit von 5 m/s auf. Bei 40° Kratzerwinkel trat bei 9 µm Tiefe erst bei 15 m/s

Abtropfleckage auf. Bei 20° sowie 30° Kratzerwinkel wurde jeweils Leckage bei einer Tiefe von $12\ \mu\text{m}$ und einer Gleitgeschwindigkeit von $15\ \text{m/s}$ detektiert. Bei 10° Kratzerwinkel verschiebt sich die Leckagegrenze auf eine Kratzertiefe von $15\ \mu\text{m}$. Hierbei trat Leckage mit Abtropfen bei $15\ \text{m/s}$ auf.

Die untersuchten Einzelkratzer mit 70° Kratzerwinkel stellen eine Besonderheit dar. Hierbei trat bei einer Kratzertiefe von $6\ \mu\text{m}$ sowohl Dichtheit als auch Leckage ohne Abtropfen auf⁷.

Die erweiterten Versuchsergebnisse können Abschnitt A.1.4 entnommen werden.

Eine quantitative Darstellung der Einflüsse der Kratzergeometrie auf die Förderfähigkeit findet in Kapitel 5.3 statt.

⁷ Vgl. erweiterte Ergebnisse auf Seite 142.

5.2.1.5 Laser-Mehrfachkratzer – konstanter Abstand: 0,1 mm

Zur Untersuchung des Einflusses der Kratzeranzahl und -tiefe auf die Abdichtbarkeit wurden Leckageversuche durchgeführt. Der tangentielle Abstand zwischen den Kratzern wurde auf 0,1 mm konstant gehalten. Der Kratzerwinkel beträgt bei diesen Untersuchungen 30°.

Kratzerwinkel: 30°
Abstand (tangential): 0,1 mm

Kratzeranzahl	Laser-Kratzerform	Kratzertiefe in µm								
		1	3	4	6	9	12	15	18	23
1	schmal					o	o	o	o	o
	breit					o	o	o	o	o
2	breit					o	o	o	o	o
3	schmal	o					o	o	o	o
	breit					o	o	o	o	o
9	breit	o	o	o	o	o	o	o	o	
20	breit	o	o	o	o	o	o	o	o	
50	schmal					o	o	o	o	o
	breit	o	o	o	o	o	o	o	o	
75	breit					o	o	o	o	o
100	breit					o	o	o	o	o
200	breit	o								

	Prognose: dicht; bei 5 und 15 m/s; basierend auf bisherigen Ergebnissen
	dicht; bei 5 und 15 m/s
	Dichtheit und Leckage ohne Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Dichtheit und Leckage mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage ohne und mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Prognose: Leckage, basierend auf bisherigen Ergebnissen

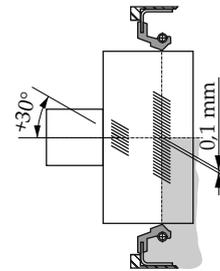


Tabelle 5.6: Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Mehrfachkratzern;
Variation: Kratzeranzahl und -tiefe; Standard-RWDR;
Kratzerwinkel: 30°; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s;
Drehrichtung: leckagefördernd

Die Ergebnisse der Leckageversuche an Laser-Mehrfachkratzern mit schmaler und breiter Kratzerform⁸ sind in der Ergebnisübersicht in Tabelle 5.6 dargestellt.

Die durchgeführten Messungen werden mit einem Punkt \circ im Falle eines Versuches ohne Leckage angezeigt. Wird Leckage detektiert, so wird für die jeweilige Schadensklasse die Gleitgeschwindigkeit aufgeführt, bei der erstmals Leckage auftrat⁹. Zusätzlich werden die Ergebnisse extrapoliert, sodass für die Bereiche außerhalb der Messergebnisse eine Prognose hinsichtlich der zu erwartenden Dichtheit gegeben wird. Die detaillierten Versuchsergebnisse können Abschnitt A.1.5 entnommen werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass mit steigender Kratzeranzahl sowie mit größerer Kratzertiefe die Tendenz zur Leckage steigt. Breite Einzelkratzer konnten bis 9 μm Tiefe, schmale bis 12 μm Tiefe erfolgreich abgedichtet werden. Eine Erhöhung der Anzahl auf zwei führte bei einer Tiefe von 9 μm bereits zu einem Dichtsystem-Ausfall in Form von Leckage. Bei einer Kratzertiefe von 6 μm konnten bis zu drei Kratzer erfolgreich abgedichtet werden. Ab einer Anzahl von neun Kratzern kam es zur Leckage.

Interessant sind die Ergebnisse mit Kratzertiefen $\leq 4 \mu\text{m}$, da diese innerhalb der gängigen Wellen-Rauheitstoleranzen liegen¹⁰. Hier konnte bei einer Anzahl von neun Kratzern erste Leckage¹¹ festgestellt werden. Bei einer Erhöhung auf 20 Kratzer zeigten alle Versuchsergebnisse Abtropfleckage. Bei einer Kratzertiefe von 3 μm trat ab einer Anzahl von 75 Kratzern Leckage auf. Kratzer mit einer Tiefe von 1 μm konnten bis zu einer Anzahl von 200 erfolgreich abgedichtet werden.

⁸ Vgl. Abschnitt 5.1, Seite 57.

⁹ Vgl. hierzu den Ablauf von Leckageversuchen in Abschnitt 4.9, Seite 55.

¹⁰ Vgl. Abschnitt 3.4.

¹¹ Ein Versuch: Leckage, zwei Versuche: Dichtheit.

5.2.1.6 Laser-Mehrfachkratzer – Abstandsvariation

Zusätzlich zur Variation der Kratzeranzahl wurden Versuche mit variiertem Kratzerabstand durchgeführt. Es wurden drei unterschiedliche Abstände untersucht. Der Abstand wurde zwischen 0,1 mm, 1 mm sowie einer gleichmäßigen Verteilung auf dem Umfang variiert. Der Kratzerwinkel beträgt bei diesen Versuchen stets 30°.

Kratzerwinkel: 30°

Kratzer-Anzahl	tangentialer Kratzer-Abstand in mm	Kratzertiefe in µm			
		1	3	6	9
3	0,1			o	o (5 m/s)
	1			o	o (5 m/s)
	62,83 auf Umfang verteilt			o	o (5 m/s)
9	0,1		o	o (5/15 m/s)	
	1		o	o (5 m/s)	
	20,94 auf Umfang verteilt		o	o (5/15 m/s)	
50	0,1		o		
	1		o		
	3,77 auf Umfang verteilt		o		
75	0,1		o	o (5 m/s)	
	2,51 auf Umfang verteilt		o		
100	0,1		o	o (5 m/s)	
	1,88 auf Umfang verteilt		o		
200	0,1	o			
	0,94 auf Umfang verteilt	o			
1000	0,19	o (5 m/s)			
	auf Umfang verteilt	o			

	Prognose: dicht; bei 5 und 15 m/s; basierend auf bisherigen Ergebnissen
	dicht; bei 5 und 15 m/s
	Leckage ohne und mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Prognose: Leckage, basierend auf bisherigen Ergebnissen

Tabelle 5.7: Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Mehrfachkratzern; Variation: Kratzerabstand und -tiefe; Standard-RWDR; Kratzerwinkel: 30°; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s; Drehrichtung: leckagefördernd

Die Ergebnisse der Versuche mit variiertem Kratzerabstand sind zusammengefasst in Tabelle 5.7 aufgeführt. Die detaillierten Versuchsergebnisse können Abschnitt A.1.5 bis Abschnitt A.1.7 entnommen werden.

Die durchgeführten Messungen werden mit einem Punkt \circ im Falle eines Versuches ohne Leckage angezeigt. Wird Leckage detektiert, so wird für die jeweilige Schadensklasse die Gleitgeschwindigkeit aufgeführt, bei der erstmals Leckage auftrat¹². Zusätzlich werden die Ergebnisse extrapoliert, sodass für die Bereiche außerhalb der Messergebnisse eine Prognose hinsichtlich der zu erwartenden Dichtheit gegeben wird.

Es ist zu erkennen, dass bei verhältnismäßig *geringer* Kratzeranzahl von 3 sowie 9 Kratzern, bei gleichzeitig *großer* Tiefe von 6 μm und 9 μm kein Einfluss des Kratzerabstands auf die Abdichtbarkeit festgestellt werden konnte.

Erst bei einer geringeren Kratzertiefe von 3 μm und einer großen Kratzeranzahl von > 50 Kratzern konnte ein Einfluss des Kratzerabstands auf die Abdichtbarkeit ermittelt werden. Hierbei zeigte sich, dass die Leckagetendenz bei 0,1 mm Kratzerabstand größer ist als bei einer gleichmäßigen Verteilung der Kratzer auf dem Wellenumfang. Kratzer mit einer Tiefe von 3 μm zeigten bei einem Abstand von 0,1 mm Leckage, wohingegen Kratzer gleicher Tiefe, gleichmäßig auf dem Umfang verteilt, leckagefrei abgedichtet werden konnten. Erst bei 200 Kratzer mit einer Tiefe von ca. 3,7 μm trat Leckage bei einer Verteilung auf dem Umfang auf. Bei einer Kratzertiefe von 1 μm konnten 200 Kratzer sowohl mit 0,1 mm Abstand als auch, auf den Umfang verteilt, erfolgreich abgedichtet werden.

Eine Erhöhung der Kratzeranzahl auf 1000 bei einer Tiefe von 1 μm führte bei einer Verteilung auf dem Umfang zu einem deutlichen Dichtsystemausfall in Form von Abtropfleckage.

¹² Vgl. hierzu den Ablauf von Leckageversuchen in Abschnitt 4.9, Seite 55.

5.2.1.7 *Laser-Mehrfachkratzer – Wechselwinkel*

Um den Einfluss gegensätzlich angeordneter Strukturen zu untersuchen, wurden Versuche sowohl mit gleicher als auch ungleicher Anzahl gegensätzlich wirkender Kratzer durchgeführt. Es wurde der Einfluss der Tiefe, des Winkels und der Anzahl untersucht. Die Kratzer wurden mit gleichem Abstand, auf dem Umfang verteilt, angeordnet¹³. In Tabelle 5.8 sind die Ergebnisse der Versuche mit $+30^\circ/-30^\circ$ sowie $+70^\circ/-70^\circ$ Wechselwinkeln zusammengefasst dargestellt.

In der linken Spalte ist jeweils eine Übersicht der prinzipiellen Anordnung der Strukturen zueinander dargestellt. Die Dichtkante verläuft hierbei horizontal auf den Strukturen und dichtet die Ölseite gegenüber der Luftseite ab. Die Strukturen bewegen sich gemäß Pfeilrichtung unter der Dichtkante hinweg. Nach rechts gerichtete Strukturen (///) fördern somit Schmierstoff zur Luftseite und sind somit leakagefördernd. Nach links gerichtete Strukturen (\\\) wirken entsprechend entgegengesetzt und fördern Fluid von der Luftseite zurück zur Ölseite. Sie wirken in diesem Fall rückfördernd.

Die durchgeführten Messungen werden mit einem Punkt \circ im Falle eines Versuches ohne Leckage angezeigt. Wird Leckage detektiert, so wird für die jeweilige Schadensklasse die Gleitgeschwindigkeit aufgeführt, bei der erstmals Leckage auftrat¹⁴. Zusätzlich werden die Ergebnisse extrapoliert, sodass für die Bereiche außerhalb der Messergebnisse eine Prognose hinsichtlich der zu erwartenden Dichtheit gegeben werden kann.

Die Untersuchungen mit Kratzern der Anzahl 1 aus Tabelle 5.5 sowie Kratzern der Anzahl 3 und 100¹⁵ aus Tabelle 5.7 dienen als Referenzversuche. Diesen Strukturen wurden zunächst Kratzer gleicher Anzahl und Tiefe, jedoch mit negativem Winkel, gegenübergestellt (vgl. Tabelle 5.8). Die detaillierten Versuchsergebnisse können Abschnitt A.1.8 entnommen werden.

Bei den Leckageversuchen zeigte sich, dass *rückfördernde* Strukturen die Wirkung *leakagefördernder* Strukturen vermindern können. Die Wirkung ist jedoch von der Tiefe und der Anzahl abhängig. Es konnte beobachtet werden, dass zum Beispiel ein Einzelkratzer mit 30° -Winkel und $12\ \mu\text{m}$ Tiefe Leckage erzeugen kann, jedoch bereits ein entgegengesetzter Kratzer diese Wirkung nahezu aufhebt (vgl. Tabelle 5.8). Ein ähnliches Ergebnis ist beim 70° -Einzelkratzer mit einer Tiefe von $6\ \mu\text{m}$ zu beobachten. Bei tieferen Kratzern sowie bei Mehrfachkratzern mit einer Kratzeranzahl von 3 bzw. 6 wurde die Leckageausprägung reduziert. Ferner konnte vereinzelt ein leichter Öl-Feuchtigkeitfilm auf der Bodenseite der Dichtkante ermittelt werden.

¹³ Z.B. zwei Kratzer: 180° Versatz = $94,25\ \text{mm}$ Abstand.

¹⁴ Vgl. hierzu den Ablauf von Leckageversuchen in Abschnitt 4.9, Seite 55.

¹⁵ Mit $+30^\circ$ Winkel, gleichmäßig auf dem Umfang verteilt, gleiche Ausrichtung.

Anordnung: Luftseite ← (Drehrichtung) Ölseite	Kratzer- anzahl x Winkel	Kratzer- anzahl x Winkel	Gesamt- kratzer- Anzahl	tangentialer Kratzer- Abstand in mm	Kratzertiefe in µm				
					3	6	9	12	15
Luftseite / Ölseite	1 x +30°	-	1	-	Diagonal hatching	Diagonal hatching	o	o (15 m/s)	o (5 m/s)
Luftseite / \ Ölseite	1 x +30°	1 x -30°	2	94,25 auf Umfang verteilt	Diagonal hatching	Diagonal hatching	Diagonal hatching	o**	o (15 m/s)
Luftseite /// Ölseite	3 x +30°	-	3	62,83 auf Umfang verteilt	Diagonal hatching	o	o (5 m/s)	Diagonal hatching	Diagonal hatching
Luftseite /// \ Ölseite	3 x +30°	3 x -30°	6	31,42 auf Umfang verteilt	Diagonal hatching	o	o (15 m/s)	Diagonal hatching	Diagonal hatching
Luftseite // // // // // Ölseite	100 x +30°	-	100	1,88 auf Umfang verteilt	o	Diagonal hatching	Diagonal hatching	Diagonal hatching	Diagonal hatching
Luftseite // // // // // \ Ölseite	100 x +30°	100 x -30°	200	0,94 auf Umfang verteilt	o	Diagonal hatching	Diagonal hatching	Diagonal hatching	Diagonal hatching
Luftseite /// Ölseite	3 x +30°	-	3	62,83 auf Umfang verteilt	Diagonal hatching	o	o (5 m/s)	Diagonal hatching	Diagonal hatching
Luftseite // \ Ölseite	2 x +30°	1 x -30°	3	62,83 auf Umfang verteilt	Diagonal hatching	Diagonal hatching	o (15 m/s)	Diagonal hatching	Diagonal hatching
Luftseite / \ Ölseite	1 x +30°	2 x -30°	3	62,83 auf Umfang verteilt	Diagonal hatching	Diagonal hatching	Diagonal hatching	o**	Diagonal hatching
Luftseite / Ölseite	1 x +70°	-	1	-	Diagonal hatching	o (15m/s)	o (5m/s)	Diagonal hatching	Diagonal hatching
Luftseite / \ Ölseite	1 x +70°	1 x -70°	2	94,25 mm, auf Umfang verteilt	Diagonal hatching	Diagonal hatching	o**	o (15 m/s)	o (15 m/s)
Luftseite /// Ölseite	3 x +70°	-	3	62,83 auf Umfang verteilt	o** (5 m/s)	o (5 m/s)	Diagonal hatching	Diagonal hatching	Diagonal hatching
Luftseite // \ Ölseite	2 x +70°	1 x -70°	3	62,83 auf Umfang verteilt	Diagonal hatching	Diagonal hatching	o**	Diagonal hatching	Diagonal hatching

	Prognose: dicht; bei 5 und 15 m/s; basierend auf bisherigen Ergebnissen
	dicht; bei 5 und 15 m/s
**	Versuchsergebnis: dicht; bei 5 und 15 m/s; Feuchtfilm im Bereich der Dichtkante, jedoch nicht über die Bodenfläche hinausgehend
	Dichtheit und Leckage ohne Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Dichtheit und Leckage mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage ohne Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage ohne und mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Prognose: Leckage, basierend auf bisherigen Ergebnissen

Tabelle 5.8: Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Mehrfachkratzern mit Wechselwinkeln; Variation: Kratzeranzahl und -tiefe; Wechselwinkel: +30°/-30°, +70°/-70°; Kratzerabstand: auf Umfang verteilt; Standard-RWDR; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s

Da dieses Ereignis bei den gleichgerichteten Mehrfachkratzern aus Abschnitt 5.2.1.5 nicht beobachtet werden konnte, besteht die Vermutung, dass der Effekt durch die entgegengesetzten Strukturen begünstigt wird. Eine Abnahme bis hin zur Kompensation der Leckage konnte beobachtet werden, wenn die Anzahl *rückfördernder* Strukturen denen der *leckagefördernden* Strukturen überwiegt.

Basierend auf den Ergebnissen besteht die Vermutung, dass mit größerem Winkel, in diesem Fall 70° , eine geringere Anzahl von *Gegenkratzern* zur Kompensation erforderlich ist als bei 30° -Kratzerwinkel.

5.2.2 Versuche mit Einfachdrall-RWDR

Bei diesen Versuchen wurden Strukturen, die für den Standard-RWDR als kritisch identifiziert wurden, mit Einfachdrall-RWDR überprüft, um das Schadenkompensationsvermögen der beiden Dichtungsbauformen zu vergleichen. Aufgrund der makroskopischen Rückförderstrukturen auf der Luftseite der Dichtkante, besitzt die Dichtungsbauform Einfachdrall-RWDR generell eine größere Rückförderwirkung. Zur Untersuchung des Einflusses der Kratzeranzahl und -tiefe auf die Abdichtbarkeit wurden Leckageversuche auf Mehrfachkratzern mit konstantem tangentialen Abstand von 0,1 mm durchgeführt. Der Kratzerwinkel beträgt bei diesen Untersuchungen 30° . Die Ergebnisse sind zusammengefasst in Tabelle 5.9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die auftretende Leckage bei Einfachdrall-RWDR im Vergleich zum Standard-RWDR deutlich geringer ausfällt. Beim Großteil der Versuche trat Leckage ohne Abtropfen auf.

Bei Kratzern mit geringer Tiefe von ca. 3 μm zeigten die Dichtringe eine bessere Dichtwirkung als Standard-RWDR. Es fällt auf, dass die breiten Strukturen aufgrund ihres größeren Querschnitts¹⁶ schlechter abgedichtet werden konnten als die schmalere Strukturen vergleichbarer Tiefe.

Bei geringer Anzahl und großer Tiefe sind die Ergebnisse von Einfachdrall-RWDR und Standard-RWDR hinsichtlich der Leckagegrenze vergleichbar¹⁷. Bei auftretender Leckage ohne Abtropfen war die Ölsammlung innerhalb der Dichtringaufnahme zumeist verbunden mit einer feuchten Erscheinung der Dichtkante auf der Luftseite über die Bodenseite hinaus. Es wird vermutet, dass bei dieser Dichtungsbauform die Luftströmungen im Bereich der Rückförderstrukturen dafür sorgen, dass sich ein geringer Teil des durch die Kratzer zur Luftseite geförderten Fluides als feiner Ölnebel in der Dichtringaufnahme absetzt und sammelt. Bei Standard-RWDR ohne Rückförderstrukturen konnte bei diesen Mehrfachkratzern keine

¹⁶ Vgl. Abbildung 5.1.

¹⁷ Vgl. Ergebnisse Standard-RWDR, Tabelle 5.6 und Ergebnisse Einfachdrall-RWDR, Tabelle 5.9.

ausgeprägte Ölfeuchtigkeit auf der Bodenseite der Dichtungen verzeichnet werden.

Bei Versuchen mit Wechselwinkeln in Verbindung mit Standard-RWDR¹⁸ konnte in einigen Fällen ebenfalls ein Feuchtigkeitsfilm, jedoch in geringerer Ausprägung im Bereich der Dichtkante ermittelt werden. Die detaillierten Versuchsergebnisse können Abschnitt A.2.1 entnommen werden.

Kratzerwinkel: 30°
Abstand (tangential): 0,1 mm

Einfachdrall-RWDR: 

Kratzeranzahl	Laser-Kratzerform	Kratzertiefe in µm						
		1	3	4	6	8-9	12	15
1	schmal							o
	breit							o (5 m/s)
2	breit							o (5 m/s)
3	schmal							o (15 m/s)
	breit							o (5 m/s)
9	schmal							o (15 m/s)
	breit							o (5/15 m/s)
20	breit							o (5/15 m/s)
50	schmal							o
	breit							o (15 m/s)
100	schmal							o
	breit							o (5 m/s)
200	breit							o (5 m/s)

o **	Versuch auf Strukturen mit 1 mm Abstand
	Prognose: dicht; bei 5 und 15 m/s; basierend auf bisherigen Ergebnissen
	dicht; bei 5 und 15 m/s
	Dichtheit und Leckage ohne Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage ohne und mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Leckage mit Abtropfen; bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
	Prognose: Leckage, basierend auf bisherigen Ergebnissen

Einfachdrall-RWDR:

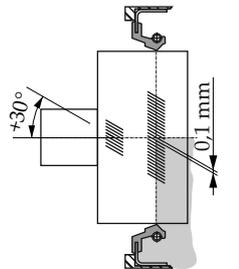


Tabelle 5.9: Ergebnisübersicht der Leckageversuche mit Laser-Mehrfachkratzern; Variation: Kratzeranzahl und -tiefe; Einfachdrall-RWDR; Kratzerwinkel: 30°; Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s; Drehrichtung: leckagefördernd

¹⁸ Vgl. Abschnitt 5.2.1.7.

5.3 FÖRDERWERTUNTERSUCHUNGEN

Mit Hilfe von Förderwertuntersuchungen können die Förderwirkung von Oberflächenstrukturen quantifiziert und die in Abschnitt 5.2 aufgezeigten Leckageereignisse erklärt werden. Zunächst werden die Ergebnisse der Förderwertmessungen ohne Struktureinfluss dargestellt. Hierbei werden die Förderwerte für die Dichtungsbauformen *Standard-RWDR* und *Einfachdrall-RWDR* differenziert aufgeführt und verglichen.

Darauf folgen die Untersuchungsergebnisse für strukturierte Gegenläufigkeiten. Diese Versuche wurden ausschließlich mit dem Standard-RWDR durchgeführt.

5.3.1 Förderwertmessung ohne Struktureinfluss

5.3.1.1 Standard-RWDR

Um den Einfluss der eingebrachten Strukturen zu quantifizieren wurden zusätzlich Förderwertmessungen auf den untersuchten Gegenläufigkeiten auf einem ungeschädigten Teil der Oberfläche durchgeführt. Dazu wurde das in Abschnitt 4.8.2 beschriebene Verfahren mit inverser RWDR-Einbau und wechselnder Drehrichtung ausgeführt. In Abbildung 5.3 sind die Ergebnisse für RWDR-Förderwertmessungen sowohl für die Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn (CCW) als auch im Uhrzeigersinn (CW) aufgeführt. Der Grafik liegen 65 Messungen auf unterschiedlichen Gegenläufigkeiten mit jeweils einem neuen Dichtungsring zugrunde. Die Ergebnisse sind in Form eines *Boxplots* dargestellt, wobei der Median innerhalb der Box zu entnehmen ist. Weiterhin sind die Maximal- und Minimalwerte durch die *Antennen* dargestellt. Die Box repräsentiert den Wertebereich, in dem 50 % der Messdaten liegen. Der Median stellt den Zentralwert dar, bei dem 50 % der Messdaten größer und 50 % kleiner sind. Der obere und der untere Abschluss der Box zeigt das obere und untere Quartil an. 25 % der Messdaten liegen somit innerhalb der Box über dem Median und 25 % darunter. Zu erkennen ist, dass die Förderwerte für beide Drehrichtungen eine vergleichbare Streuung aufweisen, was durch die Länge der Boxen, also dem *Interquartilsabstand*, deutlich wird. Durch die Lage des Medians in der jeweiligen Box lässt sich eine leichte Schiefe erkennen. Die Messergebnisse sind somit nicht symmetrisch um den Medianwert verteilt.

Der Median der RWDR-Förderwerte für die Drehrichtung CCW liegt bei $FW_{RWDR_CCW} = 0,0235 \text{ mg/m}$, der für die Drehrichtung CW bei $FW_{RWDR_CW} = 0,0196 \text{ mg/m}$. Bezogen auf den Förderwert bei CCW-Drehrichtung ergibt sich eine relative Abweichung von 17 % zwischen den Drehrichtungen.

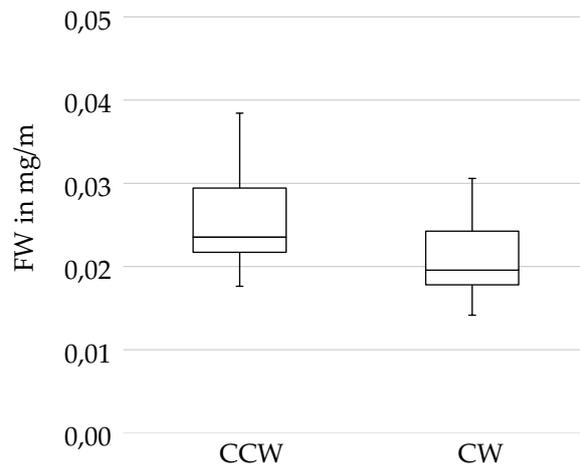


Abbildung 5.3: Standard-RWDR-Förderwerte auf ungeschädigten Gegenlauf-
flächen

Eine Erklärung für diese Abweichung könnte darin liegen, dass die Versuche stets mit einer CCW-Drehrichtung gestartet wurden. Der initiale Einlauf in dieser Drehrichtung könnte der Grund für diesen Unterschied sein. Zu Beginn der Versuche besitzt die Welle noch die ursprüngliche Oberflächenrauheit. Diese sorgt für den notwendigen Einlaufverschleiß an der Dichtkante, sodass sich eine adäquate RWDR-Förderwirkung ausbildet. Gleichzeitig setzt auch bei der Welle ein Einlaufverschleiß ein, sodass die initialen Rauheiten abgetragen werden. Bei erneutem Drehrichtungswechsel sind die Wellenrauheiten nicht mehr so stark ausgeprägt wie zu Versuchsbeginn, sodass die Konditionierung in dieser Drehrichtung geringer ausfallen könnte. Um dieses Erkenntnis abzusichern, sollten weitere Versuche mit entgegengesetzter Start-Drehrichtung erfolgen. Ferner könnten die Unterschiede durch einen leichten Mikro-Wellendrall erklärt werden, wobei die Unterschiede zwischen den Drehrichtungen verhältnismäßig gering ausfallen. Gespräche mit Kollegen in der industriellen Dichtungs-Praxis bestätigen die Erfahrungen zu den oben aufgeführten Beobachtungen. Hierbei wurde von ähnlichen Größenordnungen drehrichtungsabhängiger Förderwertunterschiede berichtet.

Wie in Abschnitt 5.2.1.1 gezeigt, haben die ermittelten Förderwertunterschiede keinen Einfluss auf die Dichtheit und können für die weiteren Untersuchungen vernachlässigt werden.

5.3.1.2 Einfachdrall-RWDR

Zur Quantifizierung der Förderwirkung bei der Dichtungsbauform *Einfachdrall-RWDR* wurden ebenfalls Förderwertmessungen durchgeführt. Aufgrund der Drehrichtungsabhängigkeit der Dichtungsbauform¹⁹ wurden die Versuche nur in der Drehrichtung CW betrieben, sodass bei inversem Einbau die Drallstrukturen die Förderwirkung

¹⁹ Vgl. Abschnitt 4.4.2.

zur Luftseite unterstützen. Die Versuchsdauer betrug 50 Stunden, ansonsten wurden die Versuche mit den gleichen Versuchsbedingungen wie beim Standard-RWDR ausgeführt²⁰.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.4 aufgeführt. Der Grafik liegen Messungen von 7 Dichtungen auf zwei Gegenläufigen zugrunde. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Form eines *Boxplots* dargestellt, wobei der Median innerhalb der Box liegt ist. Weitere Informationen zum Boxplot können Abschnitt 5.3.1.1 entnommen werden.

Zu erkennen ist, dass die Förderwerte eine verhältnismäßig geringe Streuung aufweisen, was durch die Länge der Box, also dem *Interquartilsabstand* deutlich wird. Ein Wert könnte als Ausreißer betrachtet werden, was durch die untere Antenne repräsentiert wird.

Der Median der Einfachdrall-RWDR-Förderwerte liegt bei $FW_{\text{Einfachdrall-RWDR_CW}} = 0,4323 \text{ mg/m}$. Verglichen mit dem Standard-RWDR weist der Einfachdrall-RWDR bei diesem Messverfahren eine ca. 20-fach größere Förderwirkung auf. Zu beachten ist jedoch, dass beim inversen Einbau der Dichtung den Förderstrukturen auf der Bodenseite des Einfachdrall-RWDR sehr viel mehr Fluid angeboten wird, als es im regulären, abdichtenden Einbau der Fall wäre.

Dennoch lassen sich durch diese Erkenntnis die in Abschnitt 5.2.2 dargestellten Versuchsergebnisse der Leckageversuche erklären. Hierbei zeigte sich, dass die Einfachdrall-RWDR insgesamt eine geringere Leckmenge aufzeigte.

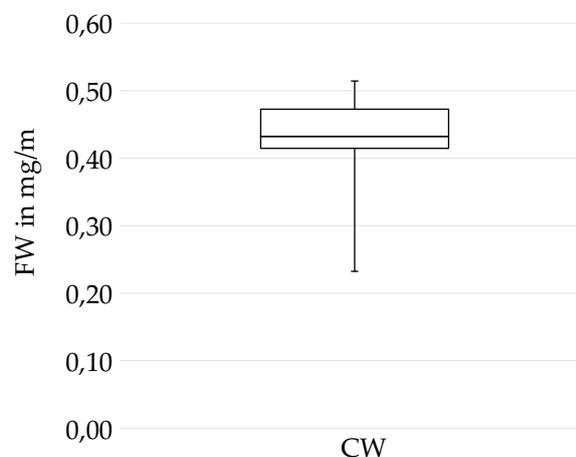


Abbildung 5.4: Einfachdrall-RWDR-Förderwerte auf ungeschädigten Gegenläufigen

5.3.2 Einfluss der Querschnittsfläche

In Abschnitt 5.1, Abbildung 5.1 wurden die Konturen unterschiedlicher Kratzer-Strukturen dargestellt. Es kann zwischen *schmalen* und

²⁰ Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Sumpftemperatur: 90°C, Füllstand: Wellenmitte.

breiten Laserkratzern und mechanisch eingebrachten Kratzern unterschieden werden. In den Leckageversuchen in Abschnitt 5.2.1.4 konnten Abweichungen zwischen *schmalen* und *breiten* Einzel-Kratzern ermittelt werden. Hierbei zeigten breite Strukturen bereits Leckage bei 12 µm Tiefe. Schmale Strukturen konnten zum Teil bis 15 µm Tiefe abgedichtet werden²¹ (vgl. Tabelle 5.5). Mechanisch eingebrachte Kratzer zeigten vergleichbare Ergebnisse wie breite Laser-Kratzer, sodass bei ca. 12 µm Kratzertiefe erste Leckage beobachtet wurde (vgl. Tabelle 5.4).

Ein Vergleich der Kratzerförderwerte und die Untersuchung der Kratzerquerschnitte liefern Erkenntnisse bzgl. der abweichenden Leckageergebnisse.

In Abbildung 5.5 sind exemplarisch die Förderwerte von Einzel-Kratzern mit 30°-Winkel und unterschiedlicher Tiefe aufgeführt. Die Förderwerte sind die, gemäß Gleichung 4.8 berechneten, Struktur-Förderwerte. Außerdem sind der mittlere, minimale sowie maximale RWDR-Förderwert²² aufgeführt.

Die Ergebnisse sind der Größe nach aufsteigend angeordnet.

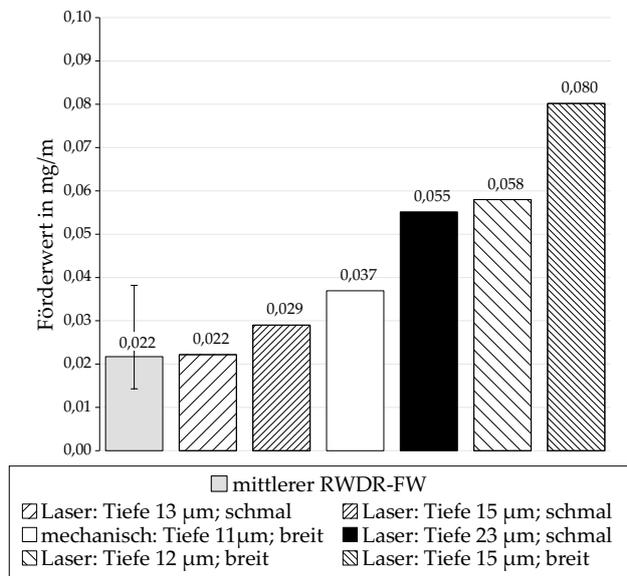


Abbildung 5.5: Gegenüberstellung der Förderwerte unterschiedlicher Einzel-Strukturen; Laserkratzer: schmal/breit; mechanisch eingebrachter Kratzer

Es fällt auf, dass die schmalen Einzel-Kratzer mit 13 und 15 µm Tiefe die geringsten Förderwerte aufweisen. Der mechanisch eingebrachte Kratzer weist trotz geringster Tiefe von 11 µm einen größeren Förderwert auf als die schmalen Laserkratzer mit 13 bzw. 15 µm Tiefe. Die breiten Laserkratzer mit 12 bzw. 15 µm Tiefe zeigen die größten Förderwerte. Diese weisen sogar größere Werte auf als ein schmaler

21 Diese Tiefe stellt bei den schmalen Einzelstrukturen einen Übergangsbereich dar, da es sowohl dichte als auch undichte Versuche gab.

22 Mittelwert für beide Drehrichtungen aus Abschnitt 5.3.1.1, Abbildung 5.3.

Laserkratzer mit mit 23 μm Tiefe. Es lässt sich somit ableiten, dass die gemessene Kratzertiefe als alleinige Bezugsgröße beim Vergleich sehr unterschiedlicher Strukturformen nicht zielführend ist.

Vergleicht man die gemessenen RWDR-Förderwerte mit den Kratzer-Förderwerten, zeigt sich, dass diese eine ähnliche Größe aufweisen wie die schmalen Laser-Kratzer mit 13 und 15 μm Tiefe. Ferner ist zu erkennen, dass die Streubreite der RWDR-Förderwerte, welche durch den minimalen und maximalen Messwert der RWDR-Förderwerte repräsentiert wird, bis in den Bereich des mechanisch eingebrachten Kratzers mit 11 μm Tiefe reicht.

Diese Erkenntnis liefert eine Erklärung der Ergebnisse der oben genannten Leckageversuche. Die Grenze für abdichtbaren Strukturen liegt bei Einzel-Kratzern mit 30° -Winkel bei Strukturen mit einem Förderwert von ca. $\text{FW}_{\text{Struktur}} = 0,04 \text{ mg/m}$.

In Abbildung 5.6, links sind die Querschnittsflächen²³ für die oben aufgeführten Einzelkratzer dargestellt.

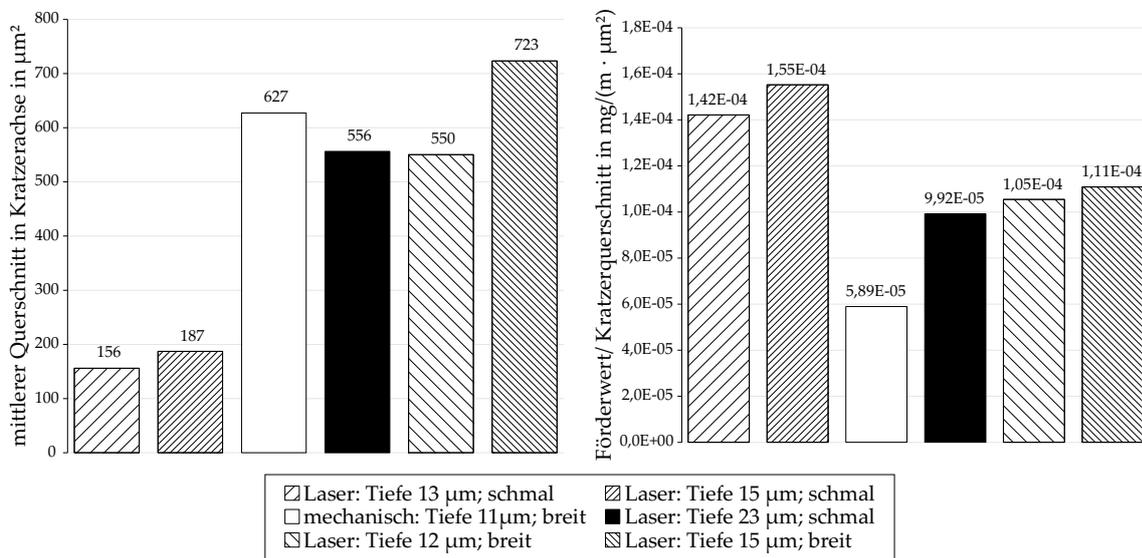


Abbildung 5.6: Vergleich der Querschnittsflächen (links) und auf Querschnitt bezogene Kratzer-Förderwerte (rechts) unterschiedlicher Einzel-Strukturen; Laserkratzer: schmal/breit; mechanisch eingebrachter Kratzer

Ähnlich wie bei der Gegenüberstellung der Förderwerte zeigt sich, dass die schmalen Laserkratzer mit 13 und 15 μm Tiefe die geringsten Querschnittswerte aufweisen und die breiten Laserkratzer vergleichbarer Tiefe tendenziell die größten. Der schmale Laserkratzer mit 23 μm Tiefe weist einen vergleichbaren Querschnitt auf wie der breite Laser-Kratzer mit 12 μm Tiefe. Diese beiden Strukturen zeigen auch ähnliche Förderwerte (vgl. Abbildung 5.5) und in den Leckageversuchen Leckage (vgl. Tabelle 5.5).

²³ In Kratzerachse gemessen, vgl. Abbildung 5.1.

Auffällig ist das Verhalten des mechanisch eingebrachten Kratzers. Dieser weist den zweit größten Querschnitt mit $627 \mu\text{m}^2$ auf. Der gemessene Förderwert des mechanisch eingebrachten Kratzers liegt jedoch zwischen den schmalen Laserkratzern mit 15 und $23 \mu\text{m}$ Tiefe (vgl. Abbildung 5.5).

Betrachtet man den auf den Querschnitt bezogenen Förderwert in Abbildung 5.6, rechts, dann fällt auf, dass die schmalen Laserkratzer förderaktiver²⁴ erscheinen, als die breiten Laserkratzer mit vergleichbarer Tiefe. Außerdem weist der mechanisch eingebrachte Kratzer den geringsten Wert auf.

Die Vermutung liegt nahe, dass nicht nur der Querschnitt, sondern auch die Breite der Strukturen einen entscheidenden Einfluss haben. Wie in Abbildung 5.1 zu erkennen ist, läuft die Dichtkante innerhalb der Laufspur über die Strukturen. Dringt die Dichtkante im begrenzten Maße in die Struktur ein, könnte dies eine Reduktion des freien Querschnitts bewirken. Man könnte sich somit vorstellen, dass das *Eindringen* der Dichtkante in die Struktur und die damit einhergehende Änderung des Querschnitts, bei breiten Strukturen größer ist als bei schmalen Strukturen.

Als Hilfsgröße kann die *effektive Tiefe* t_{eff} berechnet werden. Diese wird als Quotient aus der Querschnittsfläche A_{Struk} und der Struktur-Breite b_{Struk} eines Kratzers berechnet.

$$\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} = \frac{\frac{A_{\text{Struk}}}{\mu\text{m}^2}}{\frac{b_{\text{Struk}}}{\mu\text{m}}} \quad (5.1)$$

Die Breite und Querschnittsfläche können tangential innerhalb der Laufspur oder gegenüber der Kratzerachse bestimmt werden (vgl. Abbildung 5.8). Ein Vergleich der *Messrichtung* und das Verhältnis aus effektiver Tiefe und gemessener Tiefe ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Eine große *effektive Tiefe* müsste somit kritischer hinsichtlich der Strukturabdichtbarkeit sein und einen höheren Strukturförderwert aufweisen als eine kleine.

Die *effektive Tiefe* der oben aufgeführten Einzelkratzer ist in Abbildung 5.7 links dargestellt. Der Querschnitt und die Breite sind jeweils gegenüber der Kratzerachse gemessen (vgl. Abbildung 5.9).

Bei den Laser-Kratzern zeigt sich erneut der Einfluss des Querschnitts bei vergleichbaren Kratzertiefen. Weiterhin fällt auf, dass der verhältnismäßig breite mechanisch eingebrachte Kratzer eine vergleichsweise geringe effektive Tiefe aufweist.

Werden nun die gemessenen Strukturförderwerte aus Abbildung 5.5 mit der effektiven Tiefe der jeweiligen Struktur multipliziert, ergeben sich die Werte in Abbildung 5.7, rechts. Der Förderwert lässt sich somit mit der effektiven Tiefe *gewichten*, sodass man diesen Förderwert als *gewichteten Förderwert* betrachten kann.

²⁴ Förderwert auf einen Kratzerquerschnitt von $A_{\text{Struk}} = 1 \mu\text{m}^2$ normiert.

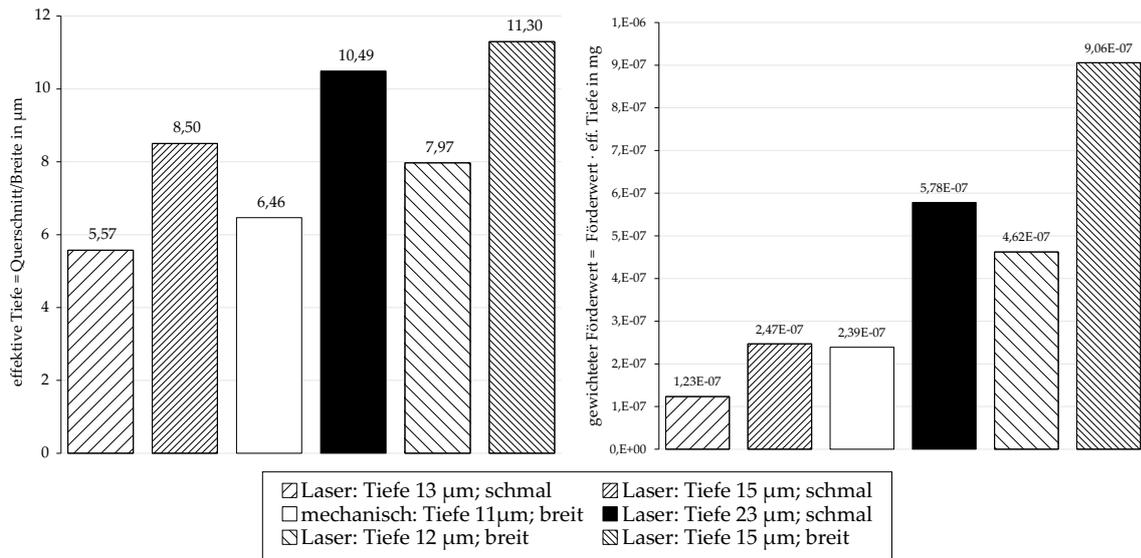


Abbildung 5.7: Vergleich der effektiven Tiefe (links) und den *gewichteten Förderwerten* (rechts) unterschiedlicher Einzel-Strukturen; Laserkratzer: schmal/breit; mechanisch eingebrachter Kratzer

Der gewichtete Förderwert ergibt sich aus:

$$\frac{FW_{\text{Struk,wicht}}}{\text{mg}} = \frac{FW_{\text{Struk}}}{\frac{\text{mg}}{\text{m}}} \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\text{m}} \quad (5.2)$$

Mit Hilfe des *gewichteten Förderwerts* lässt sich die Grenze der abdichtbaren Strukturen hervorheben (vgl. Abbildung 5.7). Leckagekritische Strukturen würden bei den hier betrachteten Strukturen einen Wert von $FW_{\text{Struk,wicht}} \geq 2,4 \cdot 10^{-7}$ mg aufweisen.

In Abbildung 5.9 ist die effektive Tiefe²⁵ über der gemessenen Kratzer-tiefe für die unterschiedlichen Kratzerformen aufgetragen.

Bei der Messung wird zwischen einer Messung *entlang der Laufspur* (*tangential*) und gegenüber der *Kratzerachse* unterschieden (vgl. Abbildung 5.8). Die Breite b_{Struk} und die Fläche A_{Struk} der beiden *Messrichtungen* stehen über den Kratzerwinkel φ_{Struk} miteinander im Verhältnis. Bei konstanter Kratzerbreite und konstanter Kratzer-tiefe (in Kratzerachse) steigt die Breite und somit auch der Querschnitt (in Laufspur) gemäß Gleichung (5.3) an.

$$\frac{b_{\text{Struk, in Laufspur}}}{\mu\text{m}} = \frac{b_{\text{Struk, in Kratzerachse}}}{\frac{\mu\text{m}}{\cos(\varphi_{\text{Struk}})}} \quad (5.3)$$

Aus Abbildung 5.9 wird ersichtlich, dass die mechanisch eingebrachten Strukturen ein vergleichbares Verhältnis zwischen effektiver Kratzer-tiefe (t_{eff}) und gemessener Kratzer-tiefe (t_{mess}) aufweisen wie die

²⁵ Gemäß Gleichung (5.1) berechnet.

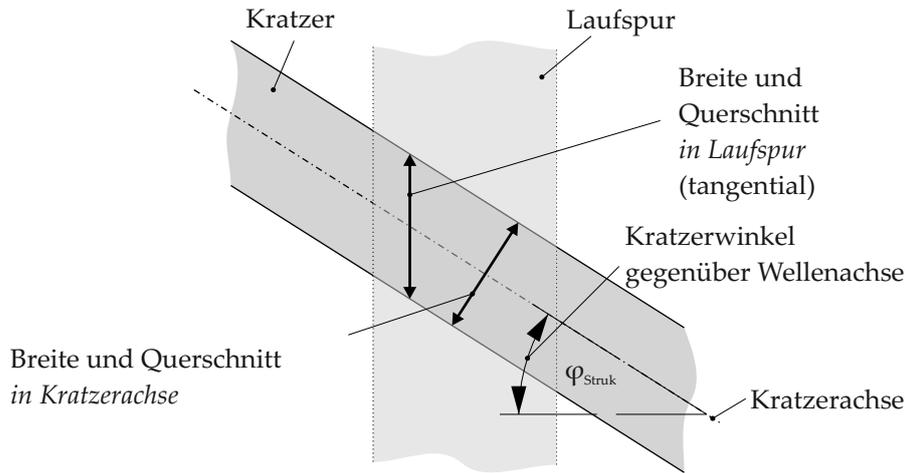


Abbildung 5.8: Definition der Messrichtung in Laufspur und in Kratzerachse

breiten Laser-Kratzern. Die effektive Tiefe ist hierbei um ca. 30 % geringer als die gemessene Kratzertiefe.

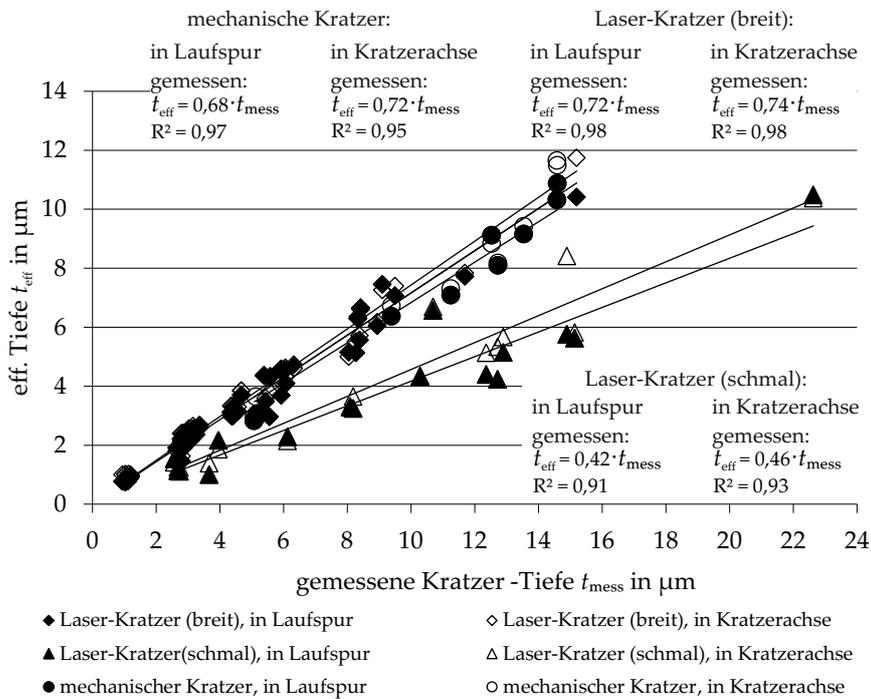


Abbildung 5.9: Vergleich der effektiven Tiefe mit der gemessenen Kratzertiefe unterschiedlicher Strukturen; Laserkratzer: schmal/breit; mechanisch eingebrachter Kratzer

Ferner ist zu erkennen, dass die Ergebnisse in Kratzerachse und in Laufspur vergleichbar sind. Dies korreliert ebenfalls mit den Ergebnissen der Leckageversuche. Wie oben beschrieben, zeigten breite Laser-Einzelkratzer und mechanisch eingebrachte Kratzer eine vergleichbare Dichtheitsgrenze bei $t_{mess} \approx 12 \mu\text{m}$ gemessener Kratzertiefe.

Die schmalen Laser-Kratzer zeigen eine größere Abweichung zwischen der effektiven und der gemessenen Kratzertiefe. Bei diesen Strukturen ist die effektive Tiefe um ca. 60 % geringer als die gemessene Kratzertiefe (vgl. Abbildung 5.9). Dies könnte als Erklärung dafür dienen, dass die Dichtheitsgrenze bei diesen Strukturen zu größeren, gemessenen Kratzertiefen, hin verschoben ist (vgl. Tabelle 5.5).

5.3.3 Einfluss des Winkels

Zur Quantifizierung des Einflusses der Parameter *Kratzertiefe* und *Kratzerwinkel* wurden Förderwertmessungen an Einzelkratzern durchgeführt.

In Abbildung 5.10 sind die Kratzerförderwerte in Abhängigkeit von effektiver Tiefe und dem zugehörigen Winkel aufgetragen. Die Kratzerförderwerte wurden gemäß Gleichung 4.8 berechnet. Zusätzlich sind der mittlere²⁶, der minimale sowie der maximale RWDR-Förderwert aufgeführt.

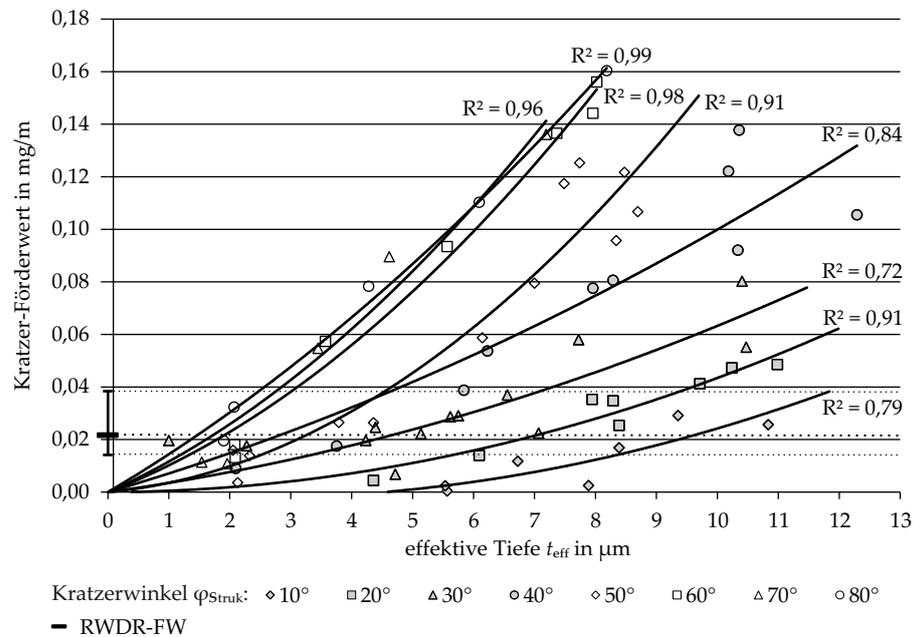


Abbildung 5.10: Einfluss von Kratzertiefe und -Winkel auf den Förderwert von Einzelkratzern

Die Abhängigkeit des Kratzerförderwerts der untersuchten Tiefen-Winkel-Kombinationen wird durch Trendlinien visualisiert. Eine Beschreibung mittels einer quadratischen Regressionsfunktion stellte sich hierbei als zielführend heraus. Für die untersuchten Winkel ist das jeweilige Bestimmtheitsmaß der zugehörigen Regressionsfunktion angegeben. Insgesamt ist eine sehr gute Korrelation zu erkennen.

²⁶ Mittelwert für beide Drehrichtungen aus Abschnitt 5.3.1.1, Abbildung 5.3.

Der funktionale Zusammenhang zwischen Förderwert einzelner Kratzerstrukturen und der effektiven Tiefe t_{eff} sowie der untersuchten Kratzerwinkel φ_{Struk} kann den Gleichungen (5.4) bis (5.11) entnommen werden.

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}} = 10^\circ) = 0,0004 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 - 0,002 \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \quad (5.4)$$

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}} = 20^\circ) = 0,0004 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 + 0,0001 \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \quad (5.5)$$

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}} = 30^\circ) = 0,0003 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 + 0,0032 \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \quad (5.6)$$

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}} = 40^\circ) = 0,0003 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 + 0,0068 \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \quad (5.7)$$

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}} = 50^\circ) = 0,0014 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 + 0,0022 \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \quad (5.8)$$

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}} = 60^\circ) = 0,0013 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 + 0,0089 \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \quad (5.9)$$

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}} = 70^\circ) = 0,0013 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 + 0,0103 \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \quad (5.10)$$

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}} = 80^\circ) = 0,0007 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 + 0,0137 \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \quad (5.11)$$

Es ist zu erkennen, dass der Kratzerförderwert sowohl mit steigender Tiefe als auch mit steigendem Winkel zunimmt. Ferner wird deutlich, dass die Unterschiede bei Winkeln ab 60° und konstanter Tiefe gering ausfallen. Die Strukturen mit 50° Winkel scheinen einen Übergangsbereich darzustellen.

Mittels multipler Regression lassen sich die Auswirkungen von Kratzerwinkel und effektiver Tiefe wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned} \frac{\text{FW}_{\text{Struk}}}{\text{mg/m}} (\varphi_{\text{Struk}}, t_{\text{eff}}) &= 0,000458 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \right)^2 \\ &+ \left(0,000294 \cdot \frac{\varphi_{\text{Struk}}}{^\circ} - 0,00588 \right) \cdot \frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Das Bestimmtheitsmaß des Regressions-Modells liegt bei $R^2 = 0,96$, sodass eine Abschätzung des Kratzerförderwerts von Einzelstrukturen in Abhängigkeit von der effektiven Tiefe und dem Kratzerwinkel für die untersuchten Dichtsysteme mit diesem Modell möglich ist.

Die auf Gleichung (5.12) basierenden Ergebnisse sind in Abbildung 5.11 zusammen mit den erzielten Messergebnissen dargestellt.

Werden zusätzlich die Ergebnisse der Leckageversuche aus Tabelle 5.5 eingefügt, kann ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Kratzerförderwerten und deren Abdichtbarkeit hergestellt werden.

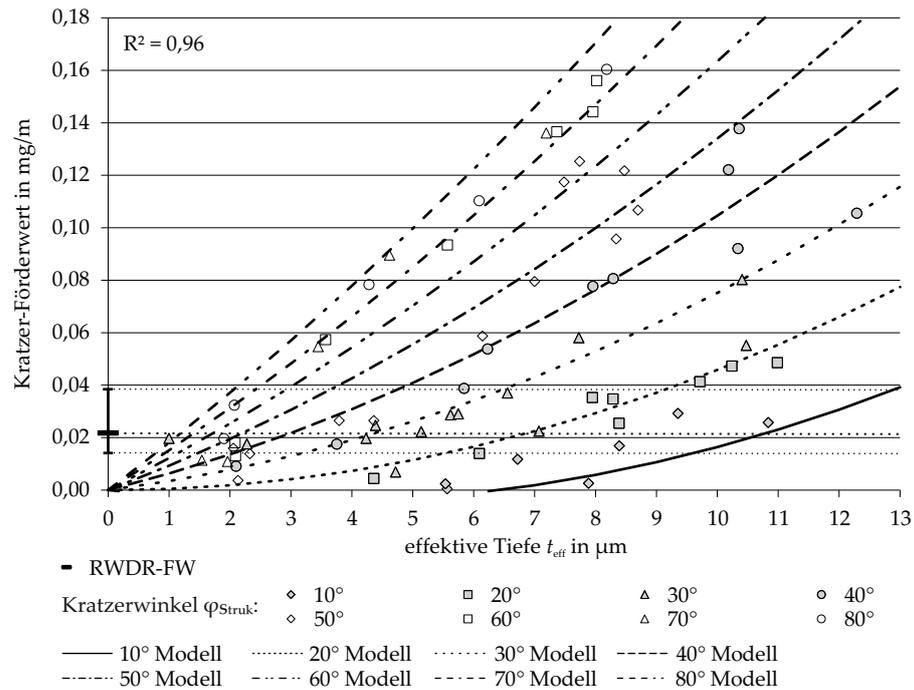


Abbildung 5.11: Vergleich zwischen modellbasierten und gemessenen Einzelkratzerförderwerten

In Abbildung 5.12 sind die Förderwerte der Einzelkratzer sowie die Ergebnisse der zugehörigen Leckageversuche dargestellt, wobei Kreise Strukturen kennzeichnen, die abgedichtet werden können. Kreuze symbolisieren eine mögliche Leckage. Zusätzlich ist die Dichtheitsgrenze dargestellt. Die Dichtheitsgrenze lässt sich durch

$$\frac{\text{FW}_{\text{Struk,grenz}}}{\text{mg/m}}(t_{\text{eff}}) = 0,1151 \cdot \left(\frac{t_{\text{eff}}}{\mu\text{m}}\right)^{-1} \quad (5.13)$$

annähern.

Es ist zu erkennen, dass die Dichtheitsgrenze mit zunehmender Strukturtiefe abnimmt. Ferner kann der Abbildung entnommen werden, dass insbesondere bei großen Strukturwinkeln nur geringe Struktur-tiefen toleriert werden können.

Mit Hilfe von Gleichung (5.12) und (5.13) lässt sich für die untersuchten Einzelkratzer eine noch zulässige Grenztiefe $t_{\text{eff,grenz}}$ in Abhängigkeit des Winkels bestimmen. Diese ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

Der Zusammenhang von Kratzerwinkel φ_{Struk} und Grenztiefe $t_{\text{eff,grenz}}$ lässt sich mittels folgender Gleichung annähern:

$$\frac{t_{\text{eff,grenz}}}{\mu\text{m}}(\varphi_{\text{Struk}}) = 42,645 \cdot \left(\frac{\varphi_{\text{Struk}}}{\circ}\right)^{-0,649} \quad (5.14)$$

Alternativ erweist sich der mittlere RWDR-Förderwert als plausible Dichtheitsgrenze, sodass Strukturförderwerte größer als der RWDR-

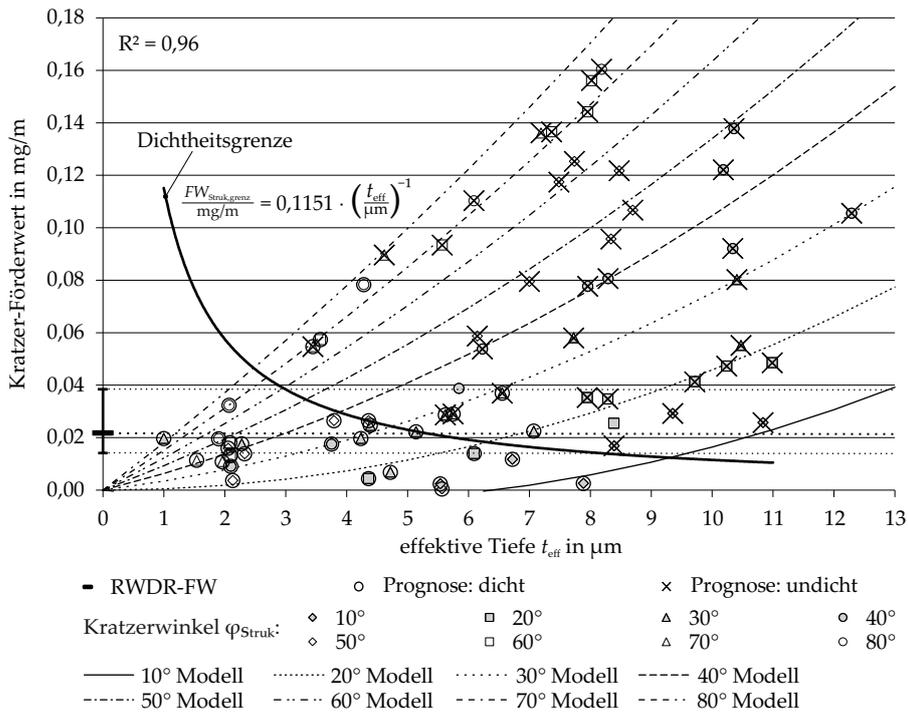


Abbildung 5.12: Abgeleitete Dichtheitsgrenze für Struktur-Förderwerte

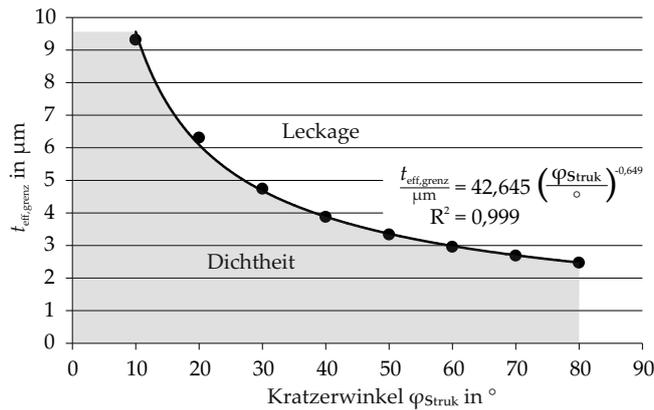


Abbildung 5.13: Ableitung einer noch zulässigen Grenztiefe für Einzelkratzer

Förderwert vermieden werden sollten. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da der RWDR bei der Förderwertmessung, bedingt durch das Messprinzip²⁷, einen anderen Schmierzustand besitzt als im regulären, abdichtenden Einbau.

Wie die Ergebnisse zeigen, ist eine Übertragbarkeit durch den Abgleich mit den Ergebnissen aus den Leckageversuchen²⁸ gegeben.

²⁷ Vgl. Abschnitt 4.8.

²⁸ Hier regulärer, abdichtender Einbauzustand.

5.3.4 Einfluss von Kratzeranzahl und -abstand

Der Einfluss der Kratzeranzahl und des Kratzerabstands auf den Förderwert ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Hierbei sind Mehrfachkratzer mit einem Winkel von $\varphi_{Struk} = 30^\circ$ untersucht worden. Neben den Förderwerten sind auch die Ergebnisse der Leckageversuche den untersuchten Strukturen zugeordnet dargestellt, wobei Kreise um die Messwerte Strukturen darstellen, die abgedichtet werden können. Kreuze symbolisieren die Gefahr einer Leckage. Es ist deutlich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Förderwert und der Kratzeranzahl bei konstanter Tiefe zu erkennen. Mit zunehmender Kart-

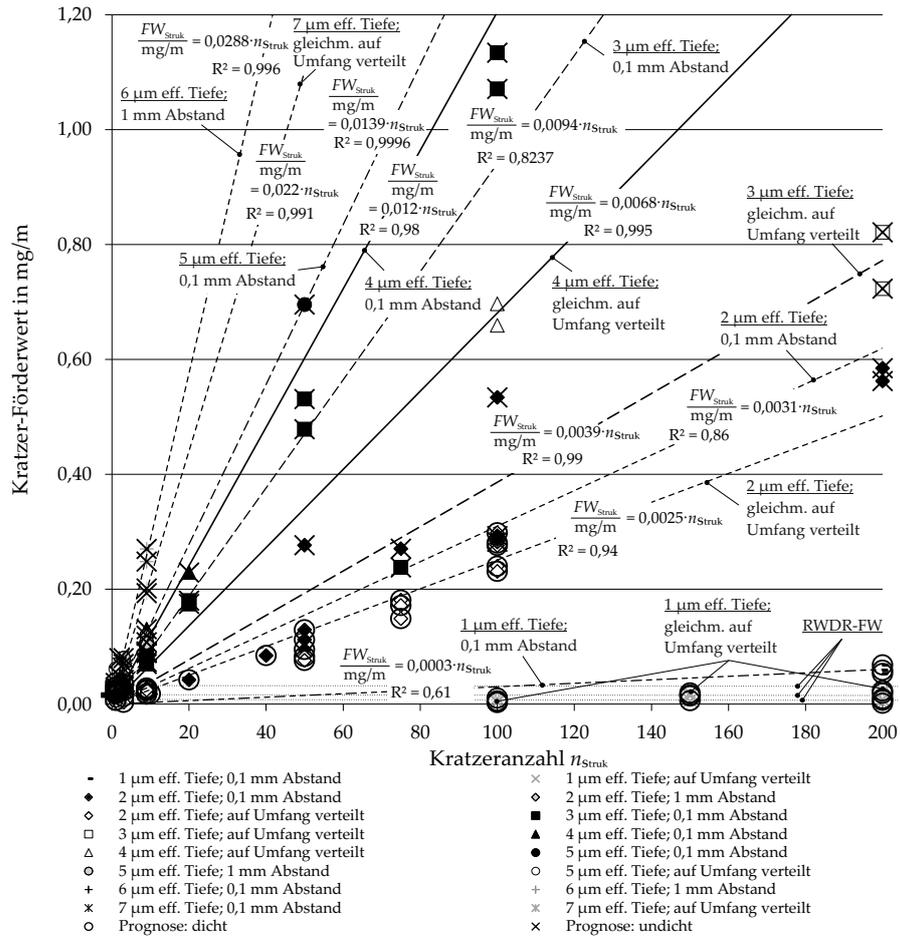


Abbildung 5.14: Einfluss der Kratzeranzahl und des -abstands; bis Anzahl: $n_{Struk} = 200$

zeranzahl steigt der Kratzerförderwert signifikant an. Insbesondere bei Strukturturen von $t_{eff} > 1 \mu m$ ist bei konstanter Anzahl ein deutlicher Anstieg je weiterem Mikrometer Tiefe zu erkennen.

Weiterhin wird der Einfluss des Kratzerabstands auf den Förderwert deutlich. Hierbei zeigen Strukturen mit einem Abstand von 0,1 mm die höchsten Förderwerte je effektiver Tiefe. Strukturen die gleichmäßig auf dem Umfang verteilt sind, weisen einen geringeren För-

derwert auf. Dieser Unterschied wird sowohl mit steigender Anzahl bei bereits geringen Kratzertiefen (siehe Abbildung 5.14) als auch mit steigender Tiefe bei geringer Kratzeranzahl deutlich (siehe Abbildung 5.15). Ein Grund dafür könnte in einem verminderten Eindringen der Dichtkante in die Strukturen vermutet werden. Durch einen geringen Kratzerabstand ist die lokale Anregungsfrequenz des Dichtringwerkstoffes höher als bei einem größeren Kratzerabstand. Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens des Elastomers kommt es lokal zu einer dynamischen Verhärtung, sodass die Eindringfähigkeit herabgesetzt sein könnte [Rino6].

Mit Hilfe dieser Erkenntnis lassen sich auch die Ergebnisse der Leckageversuche mit Abstandsvariation²⁹ deuten. Hierbei zeigen insbesondere Strukturen bei einer Anzahl von 75 bzw. 100 Kratzern unterschiedliche Ergebnisse. Strukturen mit einem Abstand von 0,1 mm zeigten bei Tiefen von 2 µm effektiver Tiefe³⁰ Leckage, wohingegen Strukturen vergleichbarer Tiefe, jedoch gleichmäßig auf den Umfang verteilt, erfolgreich abgedichtet werden konnten. Diese Strukturen spiegeln gerade den Übergangsbereich sehr flacher Strukturen von Dichtheit zu Leckage wider.

Diese Erkenntnis wird durch eine Differenz der Förderwerte bei den 2 µm tiefen Strukturen mit einer Anzahl von 75 sichtbar. Die zugeordneten Leckageergebnisse zeigen den Effekt auf die Abdichtbarkeit im regulären Einbauzustand. Zu beachten ist außerdem, dass bei diesen Strukturen die Förderwerte ca. um den Faktor 10 größer sind als der mittlere RWDR-Förderwert. Dennoch konnten die Strukturen erfolgreich abgedichtet werden.

Selbst bei Strukturen mit 1 µm Tiefe lassen sich Tendenzen zum Abstandseinfluss erkennen. Zu beachten ist jedoch auch, dass der Einfluss dieser Strukturtiefe bei bis zu 200 Kratzern gering ausfällt und im Bereich der RWDR-Förderwirkung liegt. Durch die natürliche Streuung der RWDR-Förderwerte weisen die Messergebnisse der 1 µm tiefen Strukturen aus diesem Grund ein verhältnismäßig geringes Bestimmtheitsmaß von ca. $R^2 = 0,6$ auf (vgl. Abbildung 5.14).

In Abbildung 5.15 wird der Einfluss des Kratzerabstands bei geringerer Kratzeranzahl jedoch bei größerer Tiefe deutlich. Als Beispiel eignen sich die Strukturen mit einer effektiven Tiefe von 6 bzw. 7 µm. Hier zeigen die 6 µm tiefen Strukturen bei einer Anzahl von 9 und einem Abstand von 1 mm größere Förderwerte als die gleichmäßig auf den Umfang verteilten Strukturen mit 7 µm Tiefe. Die Förderwerte sind jedoch so hoch, dass sowohl die Strukturen mit 6 als auch mit 7 µm Tiefe Leckage verursachten.

²⁹ Tabelle 5.7, Seite 68.

³⁰ Entsprechen einer gemessenen Tiefe von ca. 3 µm in Tabelle 5.7, vgl. dazu auch Abbildung 5.9.

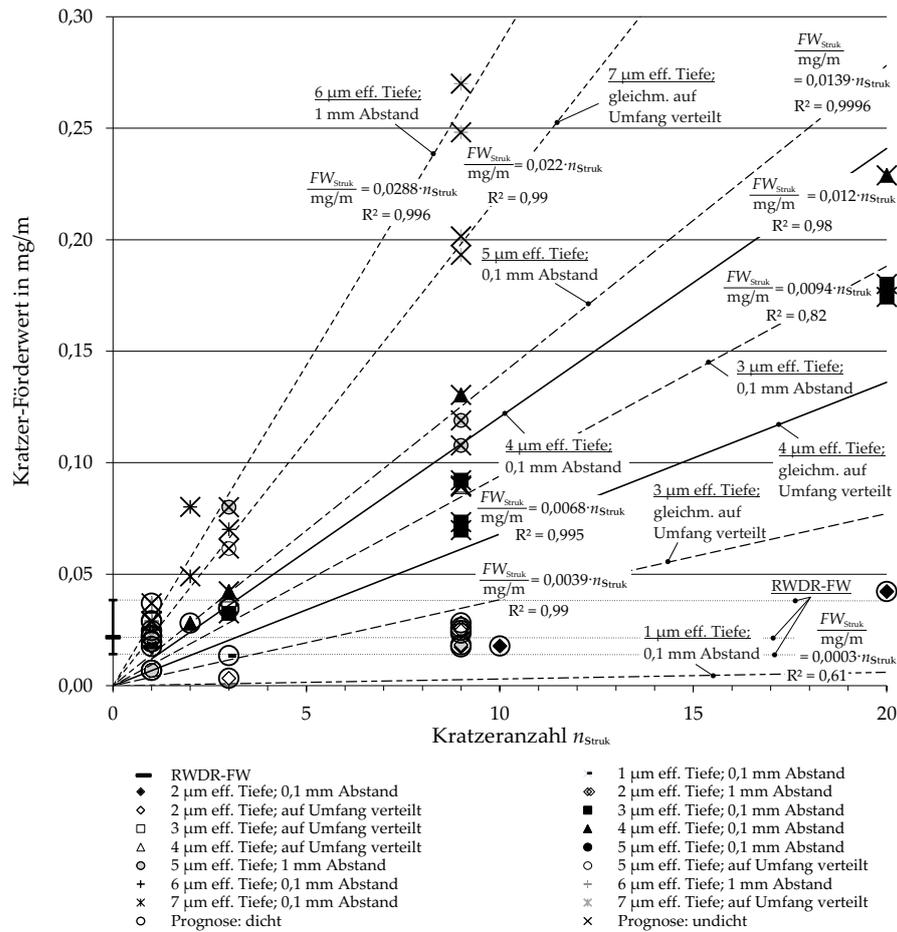


Abbildung 5.15: Einfluss der Kratzeranzahl und des -abstands; bis Anzahl: $n_{Struk} = 20$

5.3.5 Empirisches Gesamt-Modell

Basierend auf den Messergebnissen aus Abschnitt 5.3.3 und Abschnitt 5.3.4 wurde ein empirisches Modell mittels multipler Regressionsanalyse erstellt. Mit Hilfe des Modells lässt sich der Zusammenhang der Parameter *Kratzerwinkel* φ_{Struk} , *effektive Kratzertiefe* t_{eff} , *Kratzeranzahl* n_{Struk} und *Kratzerabstand* a_{Struk} darstellen. In Abbildung 5.16 sind die mittels Gleichung (5.15) berechneten Förderwerte den gemessenen Einzelkratzer-Förderwerten gegenübergestellt. Variiert wurden hierbei die effektive Tiefe t_{eff} und der Winkel φ_{Struk} . Die Anzahl wurde auf $n_{Struk} = 1$ und der Abstand auf $a_{Struk} = \frac{\pi \cdot d_{Welle}}{n_{Struk}} = 188,5 \text{ mm}$ festgelegt. Wie Abbildung 5.16 zu entnehmen ist, liefert das Modell plausible Ergebnisse für die Einzel-Kratzer, sodass sich die Förderwerte der untersuchten Strukturen prinzipiell abschätzen lassen.

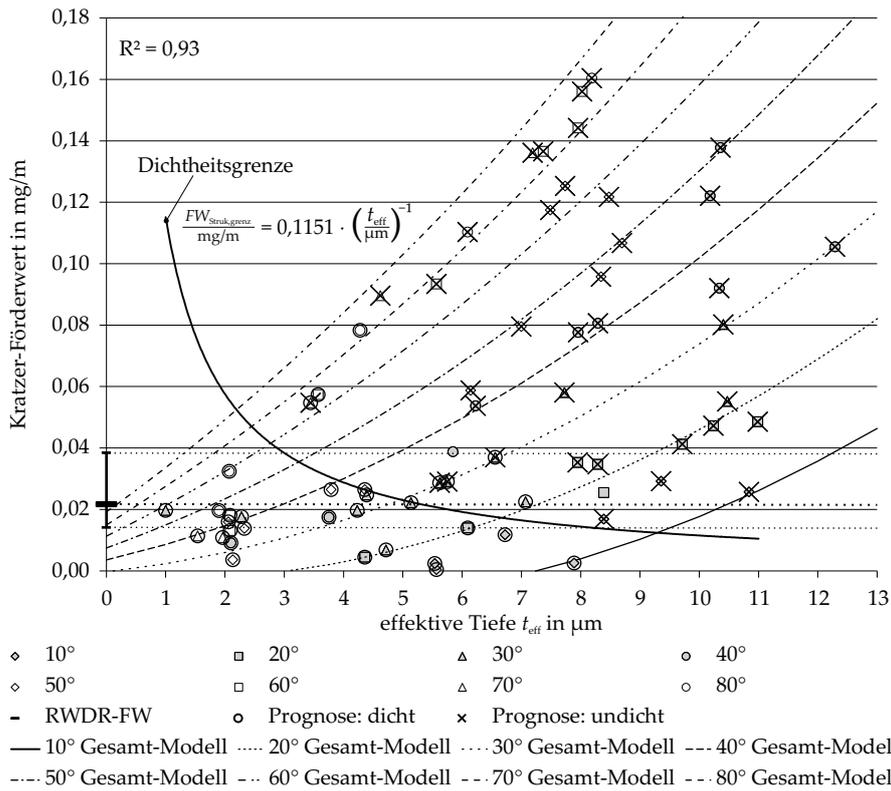


Abbildung 5.16: Vergleich zwischen empirischem Gesamt-Modell und gemessenen Einzel-Kratzerförderwerten

Der funktionale Zusammenhang der Parameter auf den Kratzerförderwert lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned} \frac{FW_{Struk}}{\text{mg/m}} (\varphi_{Struk}, t_{eff}, n_{Struk}, a_{Struk}) = & \frac{n_{Struk}}{1} \left(\frac{0,000128 \cdot \frac{t_{eff}}{\mu\text{m}} - 0,000087}{\frac{a_{Struk}}{\text{mm}}} \right. \\ & + 0,000537 \cdot \left(\frac{t_{eff}}{\mu\text{m}} \right)^2 - 0,011903 \Big) \\ & + \frac{\varphi_{Struk}}{\circ} \cdot \left(0,000387 \cdot \frac{n_{Struk}}{1} + 0,000242 \cdot \frac{t_{eff}}{\mu\text{m}} \right) \\ & - 0,00522 \cdot \frac{t_{eff}}{\mu\text{m}} \end{aligned} \tag{5.15}$$

Das Bestimmtheitsmaß des Gesamt-Modells liegt mit einem Konfidenzintervall von 95 %, bei $R^2 = 0,93$, sodass eine gute Abschätzung des Kratzerförderwerts sowohl für Einzelstrukturen als auch für Mehrfachstrukturen möglich ist.

Die mittels Gleichung (5.15) berechneten Förderwerte für Mehrfachkratzer sind in Abbildung 5.17 und Abbildung 5.18 den Messergebnissen gegenübergestellt. Hierbei wurden die effektive Kratztiefe t_{eff} , die Kratzeranzahl n_{Struk} , sowie der Kratzerabstand a_{Struk} variiert.

Beim Kratzerabstand wurde zwischen $a_{\text{Struk}} = 0,1 \text{ mm}$ und einer gleichmäßigen Verteilung³¹ auf dem Wellenumfang unterschieden. Es ist zu erkennen, dass sich mit dem Modell der Einfluss der untersuchten Parameter darstellen lässt. Die Förderwerte werden tendentiell überschätzt. Der Bereich zwischen 3 und 4 μm weist eine große Spannweite der Messergebnisse zwischen den untersuchten Abständen auf. In diesem Bereich überschätzt das Modell bei 3 μm Tiefe die gemessenen Werte für auf dem Umfang verteilte Strukturen. Strukturen mit einem Abstand von 0,1 mm werden bei dieser Tiefe hingegen unterschätzt.

Die Ergebnisse für Kratzer mit *geringer Anzahl*, bei denen insbesondere eine *größere Kratzertiefe* über die Abdichtbarkeit entscheidet, sind in Abbildung 5.18 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Förderwerte von der Größenordnung plausibel abgeschätzt werden können.

$$31 \quad a_{\text{Struk}} (n_{\text{Struk}}) = \frac{\pi \cdot d_{\text{Welle}}}{n_{\text{Struk}}}$$

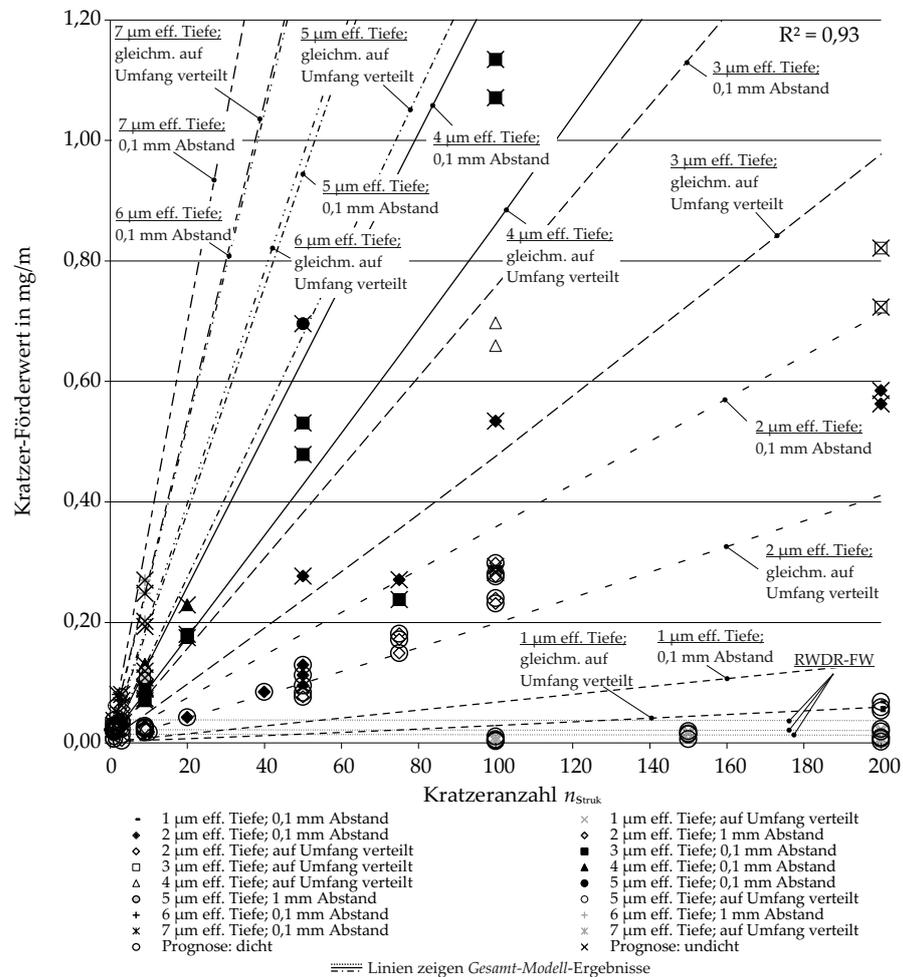


Abbildung 5.17: Vergleich zwischen empirischem Gesamt-Modell und gemessenen Mehrfach-Kratzerförderwerten; bis Anzahl: $n_{\text{Struk}} = 200$

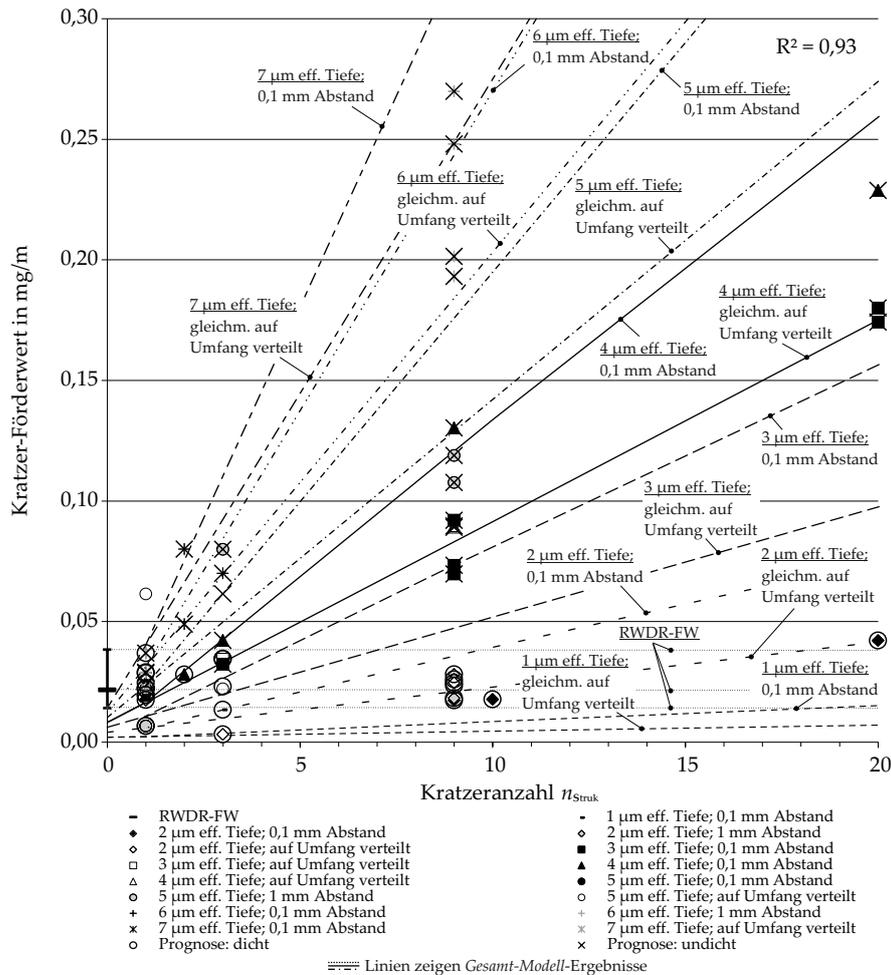


Abbildung 5.18: Vergleich zwischen empirischem Gesamt-Modell und gemessenen Mehrfach-Kratzerförderwerten; bis Anzahl: $n_{Struk} = 20$

5.3.6 Einfluss bei Wechselwinkeln

Mit Hilfe der Förderwertuntersuchungen an Strukturen mit *Wechselwinkel* können die Versuchsergebnisse der Leckageversuche aus Abschnitt 5.2.1.7 erklärt werden. Bei den Leckageversuchen konnte gezeigt werden, dass gegensätzlich angeordnete Strukturen die Leckage vermindern bzw. bei Überschuss rückfördernder Strukturen auch eine Leckage unterbinden können (vgl. Tabelle 5.8). Dieses Verhalten lässt sich durch die Förderwertuntersuchungen quantifizieren.

In Abbildung 5.19 sind die Ergebnisse der 30° -Wechselwinkel dargestellt. Hierbei wurde der Einfluss gegensätzlich angeordneter Strukturen mit gleichem betragsmäßigen Winkel, jedoch bei variiertem Anzahl und Tiefe untersucht. Es sind sowohl die Förderwerte als auch die zugehörigen Versuchsergebnisse der Leckageversuche überlagert dargestellt. Kreise um die Messergebnisse stellen Dichtheit und Kreuze Leckage dar. Die Leckageausprägung wird durch unterschiedliche

Farben dargestellt, wobei schwarze Kreuze Leckage mit Abtropfen und graue Kreuze Leckage ohne Abtropfen darstellen. Die gemessenen Förderwerte für Mehrfachkratzer mit der gleichen Anzahl an Kratzern in positiver und negativer Ausrichtung weisen, verglichen mit Mehrfachkratzern mit konstantem Winkel³² bei leakagefördernder Drehrichtung³³ tendenziell geringere Förderwerte auf. Vor allem ist zu erkennen, dass sich gegenläufige Kratzer gleicher Anzahl nicht vollständig kompensieren. Bei Strukturen mit 50x +30° / 50x -30°-Winkeln konnten tendenziell sogar größere Förderwerte gemessen werden als bei gleichgerichteten Strukturen mit 50x +30°-Winkel. Wird die Anzahl rückfördernder Strukturen im Vergleich zu leakagefördernden Strukturen weiter erhöht, ist deutlich eine Abnahme der Förderwirkung zu erkennen. Dies kann dazu führen, dass *leakagekritische* Strukturen durch entgegen gerichtete Strukturen überkompensiert werden, sodass Dichtheit resultieren kann (vgl. Abbildung 5.19, Versuche mit Kratzeranzahl: 3). Als Dichtheitsgrenze ist in diesem Fall wieder der RWDR-Förderwert zu erkennen. Sobald der Struktur-Förderwert einen ähnlich großen Wert aufweist wie der RWDR-Förderwert, nimmt die Leckageausprägung ab. Liegt der

32 Strukturen gleichmäßig auf dem Umfang verteilt.
 33 Förderwert bei rückfördernder Drehrichtung zum Teil nicht messbar, da $FW_{Struk} > FW_{RWDR}$; vgl. Abschnitt 4.8, Abbildung 4.20.

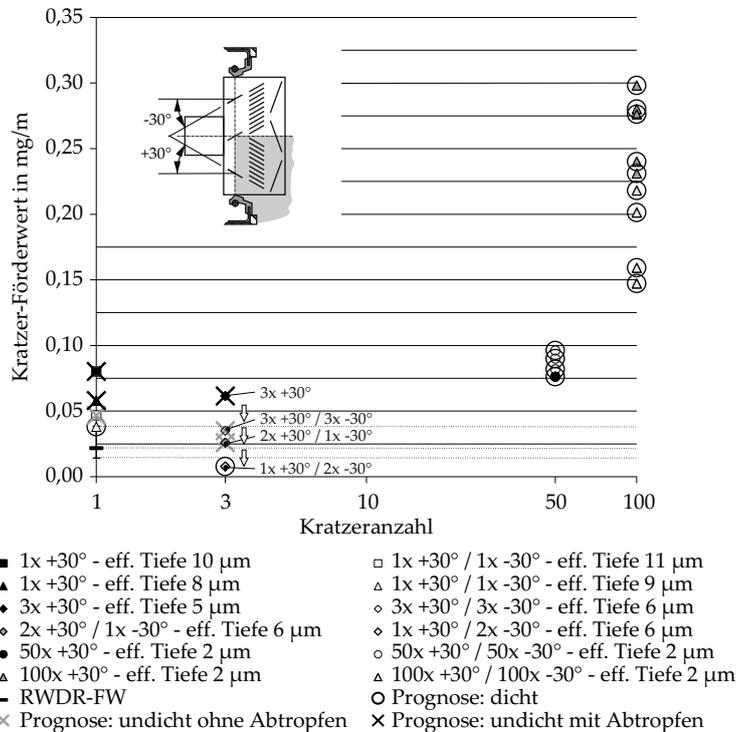


Abbildung 5.19: Förderwertuntersuchungen von Strukturen mit 30°-Wechselwinkeln

Strukturförderwert unterhalb des RWDR-Förderwerts ist keine Leckage erkennbar.

Der Effekt kann bei größerem Strukturwinkeln ausgeprägter beobachtet werden (vgl. Abbildung 5.20). Bei Versuchen mit 70°-Wechselwinkeln und einer Gesamtanzahl von drei Kratzern konnte ein rückfördernder Kratzer bereits zwei leckagefördernde Kratzer kompensieren. Auffällig ist, dass der Förderwert dieser Kratzerkombination deutlich größer ist als der RWDR-Förderwert. Dennoch konnte bei den Leckageversuchen Dichtheit beobachtet werden.

Ein ähnliches Verhalten zeigten auch Strukturen geringer Tiefe und großer Anzahl mit 30°-Winkel (vgl. Abbildung 5.19). Sowohl die gleichmäßig ausgerichteten Strukturen, als auch die wechselseitig angeordneten Kratzer zeigten deutlich größere Förderwerte als der RWDR und dennoch konnte Dichtheit erzielt werden. Es scheint, als würden die wechselseitig wirkenden Strukturen die RWDR-Förderwirkung in diesem Fall sogar unterstützen.

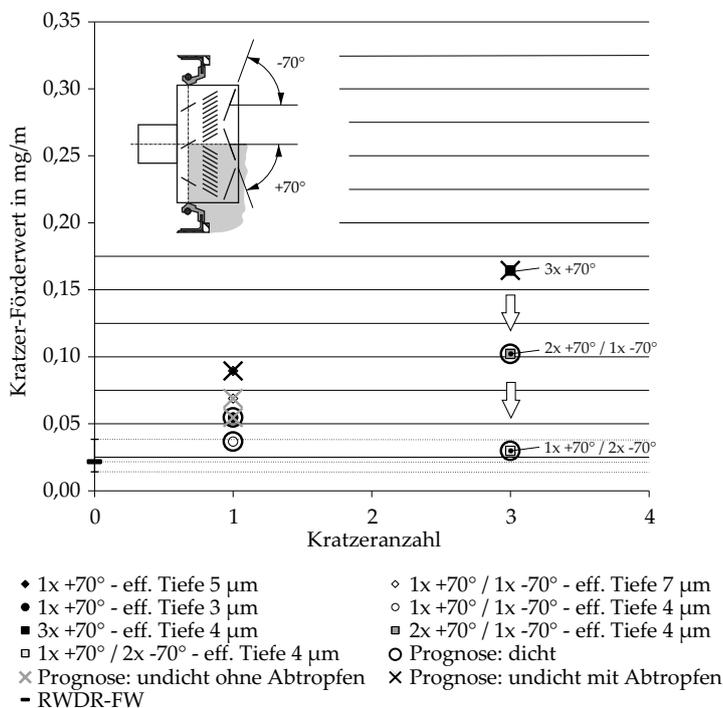


Abbildung 5.20: Förderwertuntersuchungen von Strukturen mit 70°-Wechselwinkeln

Zur Abschätzung einer möglichen Leckage, welche durch Strukturen in RWDR-Gegenläufigkeiten bedingt ist, wird das Fördervermögen der betrachteten Strukturen benötigt. Dazu wurden in dieser Arbeit Strömungssimulationen an Kratzerstrukturen durchgeführt. Die Simulation erfolgte mit dem open source Programm *Elmer* [Rå+22c]. Es wurden sowohl Simulationen mittels Navier-Stokes-Solver (NSS) als auch mittels Reynolds-Solver (RS) durchgeführt.

6.1 GRUNDLAGEN

In diesem Abschnitt werden die strömungsmechanischen Grundlagen der verwendeten Solver beschrieben.

6.1.1 *Newtonsches Fluid*

Die Rheologie vieler Flüssigkeiten¹ sowie die von Schmierstoffen hydrodynamischer und elastohydrodynamischer Anwendungen kann mit den Eigenschaften eines *Newtonschen Fluides* beschrieben werden. Hierbei wird die Reibung vollständig voneinander getrennter Oberflächen durch die reine innere Schmierstoffreibung beschrieben. Diese wird charakterisiert durch die dynamische Viskosität η . *Newton* fand 1687 heraus, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen der Schubspannung τ und der Scherrate s gibt, welcher durch die dynamische Viskosität wie folgt beschrieben werden kann [HSJ04]:

$$\eta = \frac{\tau}{s} \quad (6.1)$$

Die dynamische Viskosität einer Flüssigkeit kann demnach mit dem Widerstand verbunden werden, den diese einer Relativbewegung entgegengesetzt [Det12b]. Dieser Widerstand wird durch die innere Reibung im Fluid hervorgerufen, welche durch das intermolekulare Abgleiten von Fluidmolekülen hervorgerufen wird [HSJ04].

In Abbildung 6.1 sind die Fließkurven unterschiedlicher Schmierstoffe dargestellt, wobei die Schubspannung τ in Abhängigkeit von der Scherrate s dargestellt ist. Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Schubspannung bei einem *Newtonschen Fluid* linear zur Scherrate verhält (vgl. Abbildung 6.1, links). Die Proportionalitätskonstante ist in die-

¹ Zum Beispiel: unlegierte Mineralöle, synthetische Flüssigkeiten, Pflanzenöle, Wasser, Gase [Det12b].

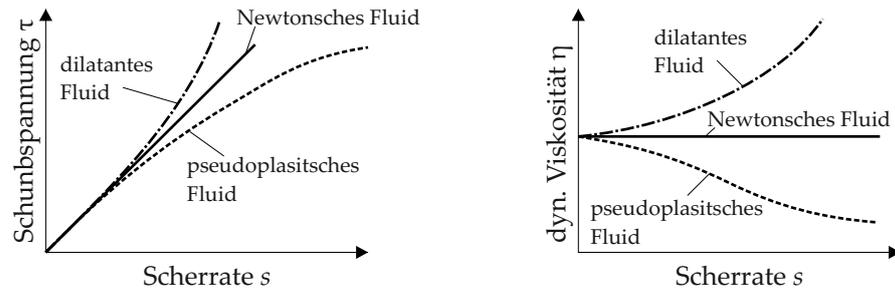


Abbildung 6.1: Typische Fließkurven unterschiedlicher Schmierstoffe, nach [Det12b]

sem Fall die dynamische Viskosität η . Diese ist beim *Newtonschen Fluid* unabhängig von der Scherrate (vgl. Abbildung 6.1, rechts). Bei reinen Mineralölen nimmt die Viskosität bei sehr hohen Scherraten von 10^5 bis 10^6 s^{-1} mit der Scherrate ab, sodass das newtonsche bzw. lineare Verhalten verloren geht und *Scherverdünnung* einsetzt. Das Verhalten lässt sich dann als *pseudoplastisches Verhalten* beschreiben (vgl. Abbildung 6.1, links). Ähnlich verhalten sich zum Beispiel auch Mineralöle mit polymeren Additiven, wobei sich die langen polymeren Moleküle mit zunehmender Scherrate ausrichten und zu einer Viskositätsreduzierung führen [Det12b].

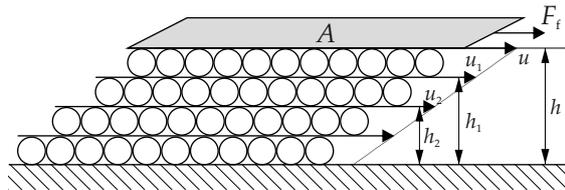


Abbildung 6.2: Geschwindigkeitsgefälle einer *Newtonschen Flüssigkeit*, nach [HS]04]

Mit Hilfe von Abbildung 6.2 lässt sich der Zusammenhang zwischen der Reibkraft F_f , der Relativgeschwindigkeit u und der Schmierpalthöhe h erklären. In diesem Beispiel liegt eine *laminare* oder auch *viskose* Strömung vor. Die Fluidmoleküle sind als Kugeln dargestellt, welche in Schichten übereinander abgleiten. Die Fluidmoleküle haften an der statischen unteren Fläche sowie der bewegten oberen Fläche A . Die obere Fläche wird mit der Relativgleitgeschwindigkeit u gegenüber der unteren Fläche bewegt. Aufgrund der Haftbedingung bewegt sich die obere Molekülschicht ebenfalls mit der Geschwindigkeit u und die untere Lage steht still. Die Molekülschichten dazwischen bewegen sich proportional zum Abstand h der beiden Flächen. Die Scherrate s kann somit definiert werden als:

$$s = \frac{u}{h} = \frac{u_1}{h_1} = \frac{u_2}{h_2} = \dots \quad (6.2)$$

Um eine konstante Relativgeschwindigkeit u zwischen den Oberflächen aufrecht zu erhalten, benötigt es die Kraft F_f , welche proportional zur Fläche A und der Scherrate s ist [HSJo4]. Die Proportionalitätskonstante ist hierbei die dynamische Viskosität η :

$$F_f = \eta \cdot A \cdot s = \eta \cdot A \cdot \frac{u}{h} = \tau \cdot A \tag{6.3}$$

6.1.2 Navier-Stokes-Gleichung

Die *Navier-Stokes-Gleichungen* stellen ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Strömung von linear-viskosen newtonschen Fluiden dar (vgl. Abschnitt 6.1.1). Sie gehen zurück auf *Claude Louis Marie Henri Navier* (1831) und *George Gabriel Stokes* (1849).

Die *Navier-Stokes-Gleichungen* können durch Berücksichtigung des dynamischen Gleichgewichts eines Fluid-Elements (Impulsgleichung) abgeleitet werden, wobei die Oberflächenkräfte, die Volumenkräfte sowie die Trägheitskräfte berücksichtigt werden [HSJo4]. Die an einem Volumenelement angreifende Spannungen sind exemplarisch in Abbildung 6.3 links dargestellt.

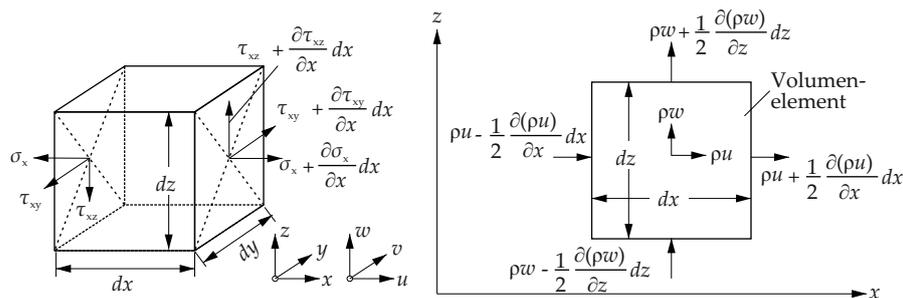


Abbildung 6.3: Spannungen, links nach [SGKo6] und Massenströme, rechts nach [HSJo4] am Volumenelement

Nach *Hamrock* lassen sich die *Navier-Stokes-Gleichungen* im kartesischen Koordinatensystem wie folgt beschreiben [HSJo4]:

$$\underbrace{\rho \frac{Du}{Dt}}_{\text{aus Trägheitskräften}} = \underbrace{\rho X_a}_{\text{aus Volumenkräften}} - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{aus Oberflächenkräften}} - \underbrace{\left[\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\eta \xi_a) + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \right]}_{\text{aus viskosen Kräften}} \tag{6.4}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv}{Dt} = & \rho Y_a - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\eta \xi_a) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dw}{Dt} = & \rho Z_a - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\eta \xi_a) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Die Geschwindigkeiten in x -, y - und z -Richtung sind durch u , v , w gegeben. Die Dichte des Fluids ist durch ρ und die dynamische Viskosität durch η gegeben. X_a , Y_a und Z_a sind Komponenten äußerer Feldkräfte, welche auf ein Volumenelement wirken. Dies kann zum Beispiel die Feldstärke des Schwerfeldes \vec{g} sein. Dementsprechend besitzen diese Komponenten die Einheit m/s^2 .

Die Volumendilatation ξ_a nach Gleichung (6.7) ist gleichbedeutend mit einer Dichteänderung und beschreibt die Expansion des Fluids.

$$\xi_a = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.7)$$

Die *Navier-Stokes-Gleichungen* liefern drei Gleichungen und vier Unbekannte: u , v , w und p , wobei die Viskosität und Dichte als Funktion von der Temperatur und dem Druck beschrieben werden können [HSJ04]. Zur Lösung expliziter Probleme bietet die *Kontinuitätsgleichung* eine weitere Funktion, welche eine Aussage zur Masseerhaltung liefert. Sie beschreibt, dass die Summe der ein- sowie ausfließenden Massen an einem Volumenelement gleich der Massenänderung pro Zeiteinheit durch eine Dichteänderung ist. Die Massenstrombilanz an einem Volumenelement ist in zweidimensionaler Darstellung exemplarisch in Abbildung 6.3 rechts dargestellt. Für das kartesische Koordinatensystem lässt sich die *Kontinuitätsgleichung* zusammenfassen als:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0. \quad (6.8)$$

Eine ausführliche Herleitung der *Navier-Stokes-Gleichungen* sowie der *Kontinuitätsgleichung* kann zum Beispiel [HSJ04; SGK06] entnommen werden.

6.1.3 Reynolds-Gleichung

Tower beobachtete 1883 als erster das hydrodynamische Phänomen an Gleitlagern für Züge. Später bestätigte *Reynolds* 1886 das Auftreten einer hydrodynamischer Schmierfilmbildung und den Aufbau eines

hydrodynamischen Druckes [Rey86]. *Reynolds* leitete aus seinen Untersuchungen die verallgemeinerte *Reynolds'sche Differenzialgleichung* ab, mit deren Hilfe die Druckverteilung in einem Schmierpalt berechnet werden kann [Rey86; HSJ04; Bar10; WH18]. Sie kann sowohl für *hydrodynamische*² Anwendungen mit *starren* Oberflächen als auch für *elastohydrodynamische* Kontakte³ unter Berücksichtigung elastischer Bauteilverformungen angewandt werden. Der Vorteil der *Reynolds-Gleichung* ist der verringerte Rechenaufwand im Vergleich zur Lösung der vollständigen *Navier-Stokes-Gleichungen*. Unter Berücksichtigung der folgenden Annahmen lässt sich die *Reynolds-Gleichung* sowohl aus den *Navier-Stokes-Gleichungen* (6.4) bis (6.6) und der Kontinuitätsgleichung (6.8) als auch direkt aus der Kräfte- und Massenbilanz an einem Mikro-Volumenelement herleiten [WH18]:

1. Volumenkräfte, zum Beispiel durch Gravitation oder Magnetfeld, werden vernachlässigt.
2. Kein Schlupf zwischen Fluid und Oberflächen. Das Fluid bewegt sich an den Oberflächen mit der zugehörigen Oberflächengeschwindigkeit.
3. Der Druck entlang der Schmierpalthöhe ist konstant.
4. Die Schmierfilmhöhe ist im Vergleich zum Oberflächenradius klein, sodass mit der linearen Geschwindigkeit gerechnet werden kann.
5. Das Fluid verhält sich wie ein *Newtonsches-Fluid*
6. Die Strömung ist laminar.
7. Trägheitskräfte sind im Vergleich zu viskosen Kräften gering und können vernachlässigt werden. Ebenso werden lineare oder rotatorische Beschleunigungskräfte vernachlässigt.
8. Die Viskosität entlang der Schmierpalthöhe ist konstant.

Die Annahmen 1. bis 4. lassen sich auf die meisten hydrodynamischen Anwendungen übertragen. Die Annahmen 5. bis 8. werden zur Vereinfachung der Berechnung verwendet und können je nach Anwendungsfall angepasst werden [WH18].

² Zum Beispiel hydrodynamische Gleitlager.

³ Zum Beispiel *weiche EHL* im Kontakt von Elastomer-Dichtungen oder *harte EHL* im Wälzkontakt von Wälzlagern.

Die allgemeine Form der *Reynolds-Gleichung* lautet wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right)}_{\text{Poiseuille- bzw. Druckterm}} &= \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h (u_a + u_b)}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h (v_a + v_b)}{2} \right)}_{\text{Couette- bzw. Keil- und Geschwindigkeitsterm}} \\
 &+ \underbrace{\rho (w_a - w_b) - \rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} - \rho v_a \frac{\partial h}{\partial y}}_{\text{Quetsch- bzw. Verdrängungsterm}} \\
 &+ \underbrace{h \frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{lokale Fluid-Expansion}}
 \end{aligned}
 \tag{6.9}$$

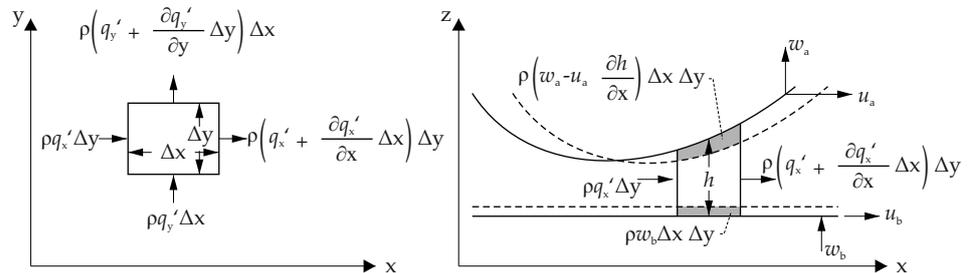


Abbildung 6.4: Massenströme durch rechteckiges Volumenelement, links in x-y-Ebene, rechts in x-z-Ebene; nach [HD81]

Hierbei beschreiben die Indizes a und b die beiden in Relativbewegung zueinanderstehender Oberflächen, mit ihren Geschwindigkeitskomponenten u , v und w . Die Schmierfilmhöhe wird mit h , die Fluidichte mit ρ , die dynamische Viskosität mit η und der Druck mit p angegeben. q' ist der auf eine Einheitsbreite bezogene Volumenstrom mit der Einheit m^2/s (vgl. Abbildung 6.4).

In Gleichung (6.9) beschreibt der *Poiseuille*-Term die Strömung aufgrund von Druckgradienten entlang des Schmierpalts und der *Couette*-Term stellt die Schleppströmung aufgrund der Oberflächengeschwindigkeiten dar. Der *Quetsch*- bzw. *Verdrängungs*-Term resultiert aus einer Änderung der Schmierpalthöhe aufgrund einer Relativgeschwindigkeit in z -Richtung, bei der sich die Oberflächen annähern bzw. voneinander entfernen (w_a, w_b) oder eine Änderung der Schmierpalthöhe in Bewegungsrichtung durch elastische Verformung ($\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}$) auftritt. Der letzte Term beschreibt die *lokale Expansion*, zum Beispiel durch eine Ausdehnung des Fluids aufgrund einer Temperaturerhöhung.

Die ausführliche Herleitung der *Reynolds-Gleichung* kann unter anderem [HS]04; Bar10; WH18] entnommen werden.

6.1.3.1 Kavitation

Die *Reynoldsche Differentialgleichung* (6.9) geht aufgrund der Kontinuitätsgleichung grundsätzlich von einem vollständig mit Fluid gefüllten Schmier-spalt aus. Bei einem symmetrischen Spalt ergibt sich in der konvergenten Einlaufzone ein Überdruck und in der divergenten Auslaufzone ein Unterdruck betragsmäßig gleicher Größe (vgl. Abbildung 6.5 links). Dieser Druckverlauf wird auch als *Sommerfeld-Kurve* beschrieben [BH13].

In der Realität können Schmierstoffe jedoch nur im sehr begrenzten Maße⁴ Zugspannungen aufnehmen. In diesen Unterdruckbereichen kommt es zur *Kavitation* des Schmierstoffs, wobei Gasblasen im Schmierfilm vorliegen. Es kann zwischen *Gaskavitation* und *Dampfkavitation* unterschieden werden. Bei der *Gaskavitation* kommt es beim Unterschreiten eines Löslichkeitsdrucks zum Austritt von im Schmierstoff enthaltenem Gas (vgl. Abbildung 6.5 links). Gaskavitation wird auch als *weiche Kavitation* bezeichnet [Bar10].

Die *Dampfkavitation* erfolgt bei Unterschreiten eines Verdampfungsdrucks (vgl. Abbildung 6.5 links), wobei Dampfblasen entstehen, die bei wieder ansteigendem Druck implodieren und zu Kavitationserosion an den Bauteilen führen können [WH18]. Aus diesem Grund wird die *Dampfkavitation* auch als *harte Kavitation* beschrieben.

Im Kavitationsgebiet liegt eine zweiphasige Strömung aus Gas bzw. Dampf sowie Schmierstoff vor. Der Druck im Kavitationsgebiet wird als Kavitationsdruck p_{cav} bezeichnet und ist abhängig vom Gasgehalt, der Temperatur und den umgebenden Druckbedingungen [Bar10].

Der hydrodynamische Druck bewirkt die Trennung der Oberflächen, da das Integral des Drucks über dem Schmier-spalt der Tragfähigkeit, zum Beispiel eines hydrodynamischen Gleitlagers, entspricht. Dementsprechend würde ein Gleitlager mit symmetrischem Druckverlauf nicht tragfähig sein. Die Berücksichtigung der Kavitation und die möglichst realitätsnahe Modellierung der Kavitationsgebiete stellt eine fortwährende Herausforderung dar.

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Modelle zur Berücksichtigung von Kavitation entwickelt. Hierbei kann zwischen nicht-masseerhaltenden und masseerhaltenden Modellen unterschieden werden. Wie in Abbildung 6.5 rechts dargestellt, unterscheiden sich die Modelle in den Randbedingungen und der Ausprägung der Kavitationsgebiete, wobei das *Gümbel-* und das *Swift-Stieber-*Modell nicht masseerhaltend sind. Im Gegensatz zum *Gümbel-*Modell, bei dem der negative Druck ($p < 0$) nach der Berechnung "abgeschnitten" und auf $p_{\text{cav}} = 0$ gesetzt wird, erfüllt das *Swift-Stieber-*Modell die *Reynolds'schen-Randbedingungen* $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$ sowie $p_{\text{cav}} = 0$ für $p < 0$ bereits während der Berechnung der *Reynolds-Gleichung*. Dadurch

⁴ In der Größenordnung der Oberflächenspannungen [Bar10].

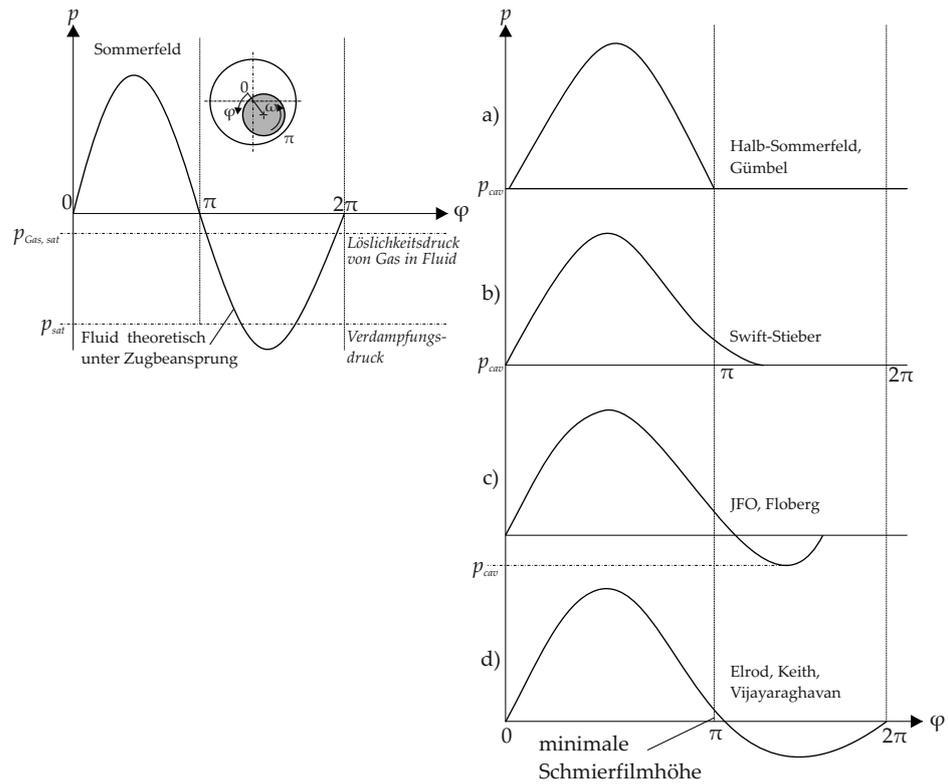


Abbildung 6.5: Druckverlauf eines Gleitlagers mit unterschiedlichen Kavitations-Modellen; nach [BH13]

wird eine Masseerhaltung im Druckgebiet erreicht und der Übergang zwischen Druck- und Kavitationsgebiet wird stetig [Bar10]. Zu den masseerhaltenden Ansätzen zählt unter anderem die von Jakobson und Floberg [JF57] sowie Olson [Ols65] entwickelte JFO-Kavitationstheorie, welche als Ausgangspunkt für die heute verwendeten numerischen Kavitations-Algorithmen gilt [BH13].

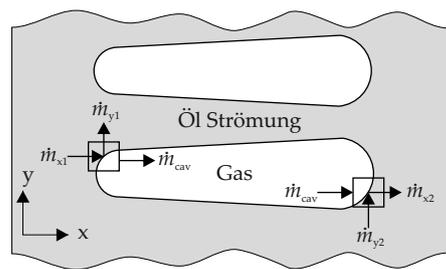


Abbildung 6.6: Typische Kavitationsblasen nach der JFO-Theorie mit Massenstrom-Kontrollvolumina im Entstehungs- und Endbereich; nach [BH13]

Die JFO-Theorie liefert ein vollständiges masseerhaltendes Modell, da die Kontinuitätsgleichung für den Anfangs- bzw. Entstehungsbereich und den Endbereich des Kavitationsgebietes gelöst werden kann (vgl. Abbildung 6.6). Innerhalb des Kavitationsgebietes herrscht

der konstante Druck p_{cav} . Wie beim *Swift–Stieber–Modell* gelten die Kavitations-Randbedingungen $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$. Wie in Abbildung 6.6 zu erkennen ist, kann sich das Kavitationsgebiet in ein streifiges Gebiet aus Schmierstoff- und Gasbereichen unterteilen. In diesem Bereich sorgt lediglich der *Couette–Anteil* für einen Schmierstofftransport [BH13].

Basierend auf der *JFO–Theorie* entwickelten *Elrod* und *Adams* [EA74] und später *Elrod* [Elr81] ein Modell, mit dem die Berechnung der *Reynolds–Gleichung* unter Berücksichtigung von Kavitation möglich ist. Sowohl der Druck- als auch der Kavitationsbereich lässt sich damit in einer Gleichung lösen.

Im Kavitationsgebiet wird von einer quasi-homogenen zweiphasigen Strömung aus Gas und Schmierstoff ausgegangen und das Dichteverhältnis θ_{JFO} , welches auch als Spaltfüllungsgrad bezeichnet wird, eingeführt. Das Dichteverhältnis beschreibt das Verhältnis aus der lokal veränderlichen Dichte ρ und der Bezugsdichte ρ_{cav} , sodass gilt:

$$\theta_{\text{JFO}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{cav}}}. \quad (6.10)$$

Die Bezugsdichte $\rho_{\text{cav}} (p=0) = \rho_{\text{liq}}$ entspricht der Fluidichte bei Atmosphärendruck.

Im Druckbereich ($p > p_{\text{cav}}$) steigt die Dichte ρ an, sodass $\theta_{\text{JFO}} > 1$ gilt. Im Kavitationsgebiet ($p < p_{\text{cav}}$) nimmt die Dichte ab, sodass $\theta_{\text{JFO}} < 1$ gilt. Weiterhin wird für die Lösung der *Reynolds–Gleichung* eine Schalter-Variable g definiert. Die Variable g ist definiert als:

$$\begin{aligned} g &= 0 \text{ wenn gilt: } \theta_{\text{JFO}} < 1 \\ g &= 1 \text{ wenn gilt: } \theta_{\text{JFO}} \geq 1 \end{aligned} \quad (6.11)$$

Mit Gleichung (6.10) und dem Zusammenhang

$$p(\theta_{\text{JFO}}) = p_{\text{cav}} + \beta \cdot \ln(\theta_{\text{JFO}}) \quad (6.12)$$

lässt sich nach [Bar10], mit der dynamischen Schmierstoffviskosität η_{liq} , dem Kavitationsdruck p_{cav} , dem Kompressionsmodul β , der Schmierpalthehöhe h und den Oberflächengeschwindigkeiten u_a und u_b , die allgemeine *Reynolds–Gleichung* wie folgt aufstellen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta \cdot h^3}{12 \cdot \eta_{\text{liq}}} g(\theta_{\text{JFO}}) \frac{\partial \theta_{\text{JFO}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\beta \cdot h^3}{12 \cdot \eta_{\text{liq}}} g(\theta_{\text{JFO}}) \frac{\partial \theta_{\text{JFO}}}{\partial y} \right) \\ = \frac{\partial (\theta_{\text{JFO}} \cdot h)}{\partial x} \frac{(u_a + u_b)}{2} + \frac{\partial (\theta_{\text{JFO}} \cdot h)}{\partial t}. \end{aligned} \quad (6.13)$$

Auch in diesem Fall gelten im Kavitationsgebiet die *Reynolds'schen–Randbedingungen* $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$. Dadurch wird die Schalter-Variable zu $g = 0$ und der Druckterm entfällt. Wie bereits oben bei der

JFO-Theorie beschrieben, basiert der Fluidtransport dann auf dem Schleppströmungs-Anteil.

Das *Elrod-Modell* wurde vielfach aufgegriffen und weiterentwickelt. Weiterführende Informationen dazu können unter anderem [Bul21; Bar10; BH13] entnommen werden.

6.1.3.2 Verwendeter Reynolds-Solver

Der in dieser Arbeit verwendete Reynolds-Solver basiert auf einem von *Woloszynski et al.* modifizierten *Elrod-Ansatz* [WPS15]. Hierbei wurde ein effizienter Algorithmus, welcher als *Fischer-Burmeister-Newton-Schur-Algorithmus* (FBNS) bezeichnet wird, angewandt, um die Reynoldsgleichung zu lösen. Der FBN-Ansatz wurde im Rahmen des Projektes [KP19] in den *Elmer-Reynolds-Solver* integriert und erfolgreich von *Bulut* validiert [Bul21].

Für die Anwendung der *Reynolds-Gleichung* gelten die in Abschnitt 6.1.3 aufgeführten Randbedingungen. Zusätzlich wird eine isotherme Strömung mit starren Oberflächen ohne Relativgeschwindigkeit in y - und z -Richtung vorausgesetzt. Dadurch entfallen der Quetsch- bzw. Verdrängungsterm sowie der Term der lokalen Fluid-Expansion. Die verwendete Reynolds-Gleichung (6.9) lautet dann:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right)}_{\text{Poiseuille-Term}} = \underbrace{\frac{(u_a + u_b)}{2} \frac{\partial (1 - \theta) \rho h}{\partial x}}_{\text{Couette-Term}}. \quad (6.14)$$

Hierbei ist θ der Kavitationsgrad, welcher als Komplementärgröße zum Spaltfüllungsgrad θ_{JFO} dient:

$$\theta = 1 - \theta_{\text{JFO}} = 1 - \frac{\rho_{\text{avg}}}{\rho_{\text{liq}}} \geq 0 \quad (6.15)$$

Zusätzlich gilt [WPS15; Bul21]:

$$(p - p_{\text{cav}}) \theta = 0 \text{ und } p - p_{\text{cav}} \geq 0. \quad (6.16)$$

Wobei p der lokale Druck und p_{cav} der Kavitationsdruck ist.

Im *Druckgebiet* ist $p > p_{\text{cav}}$ und somit $\theta = 0$ und im *Kavitationsgebiet* wird der Druck zu $p = p_{\text{cav}}$ und $\theta > 0$.

Nach *Bulut* lässt sich das Komplementaritätsproblem wie folgt formulieren [Bul21]:

$$p - p_{\text{cav}} + \theta \cdot (1 + \epsilon) - \sqrt{(p - p_{\text{cav}})^2 + \theta^2} = 0 \quad (6.17)$$

Hierbei ist ϵ ein Parameter, der verhindert, dass $p - p_{\text{cav}} = \theta = 0$ wird. Laut [WPS15] kann hier zum Beispiel das *Maschinenepsilon* $\epsilon = 2,22 \cdot 10^{-16}$ ohne Einschränkungen der Genauigkeit gewählt werden.

6.2 VORGEHENSWEISE UND RANDBEDINGUNGEN

Die Vorgehensweise der Strömungssimulation ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Es wurden sowohl mittels Laserscanning-Mikroskop importierte Oberflächen als auch synthetisch generierte Oberflächen untersucht.

Nach dem Import bzw. der Erstellung der Oberflächenstruktur wird die Vernetzung durchgeführt. Für den Reynolds-Solver (RS) wird die Oberfläche der Gegenauflfläche vernetzt. Daraus wird die lokale Schmierfilmhöhe bestimmt. Für den Navier-Stokes-Solver (NSS) wird das zwischen Dichtkante und Wellenoberfläche eingeschlossene Fluidvolumen vernetzt.

Die Simulation erfolgte mit dem open source Programm *Elmer* [Rå+22c]. Hierbei wurden Untersuchungen mit dem NSS sowie dem RS durchgeführt [Rå+22a; Rå+22b].

Nach der Simulation wird der Massenstrom in axialer Richtung ausgewertet und der Strukturförderwert berechnet.

Die Dichtkante wurde als ideal glatt angenommen. Bei synthetisch generierten Strukturen wurde die Oberfläche der Gegenauflfläche ebenfalls als ideal glatt angenommen (vgl. Abbildung 6.8).

Basierend auf den experimentellen Untersuchungen wurde die axiale Breite des betrachteten Wellenausschnitts auf 190 μm festgelegt. Dies entspricht dem Mittelwert aus den Laufspur- und Dichtkantenbreiten der mit dem Standard-RWDR durchgeführten Leckageversuche. In tangentialer Richtung wurde ein Ausschnitt von 400 μm für Einzelkratzer bis 50°-Winkel verwendet. Bei größerem Kratzerwinkel vergrößert sich die tangentielle Ausdehnung, wodurch sich der Rechenaufwand erhöht. Die Kratzerbreite (senkrecht zur Kratzerachse) wurde auf 50 μm festgelegt. In tangentialer Richtung ist die Kratzerbreite, abhängig vom Kratzerwinkel, entsprechend größer (vgl. Gleichung (5.3)). Als mittlere Schmierpalhöhe zwischen Dichtkante und Gegenauflfläche wurde eine Höhe von $h_0 = 0,5\mu\text{m}^5$ angenommen. Basierend auf Auswertungen der experimentellen Untersuchungen muss jedoch davon ausgegangen werden, dass der Schmierpalt im Bereich des Kratzers partiell gestört wird und die Dichtkante in die Strukturen eindringt. Insbesondere an den Kratzerflanken konnte deshalb erhöhter Verschleiß beobachtet werden (vgl. Abbildung 6.9). Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass der Schmierpalt im Bereich der Strukturen lokal geringere Werte annimmt.

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Wellenoberfläche und Dichtkante beträgt $v_{\text{gleit}} = 5 \text{ m/s}$. Die Reibung im Dichtkontakt führt zu einem zusätzlichen Wärmeeintrag in das Fluid, sodass die Temperatur im Dichtkontakt größer ist als die Temperatur im Ölsumpf. Die Differenz

5 Eine weitere Reduzierung der Schmierpalhöhe führte bei der Simulation zu Konvergenzproblemen.

aus der Temperatur im Dichtkontakt und der Sumpftemperatur wird auch als *Übertemperatur* bezeichnet [Eng11].

Nach dem Ansatz von *Engelke* [Eng11] wurde eine Übertemperatur von $T_{\text{über}} = 10^\circ\text{C}$ abgeschätzt, wodurch sich eine effektive Dichtkontakttemperatur von $T_{\text{gleit}} = 100^\circ\text{C}$ ergibt.

Die dynamische Viskosität des Öls sowie die Dichte wurden anhand der zuvor berechneten Dichtkontakttemperatur mittels DIN 51563 [DIN11a] und DIN 51757 [DIN11b] zu $\eta(100^\circ\text{C}) = 0,0093 \text{ Pa s}$ (vgl. Abbildung 4.13) und $\rho(100^\circ\text{C}) = 802 \text{ kg/m}^3$ berechnet. Als Rand-

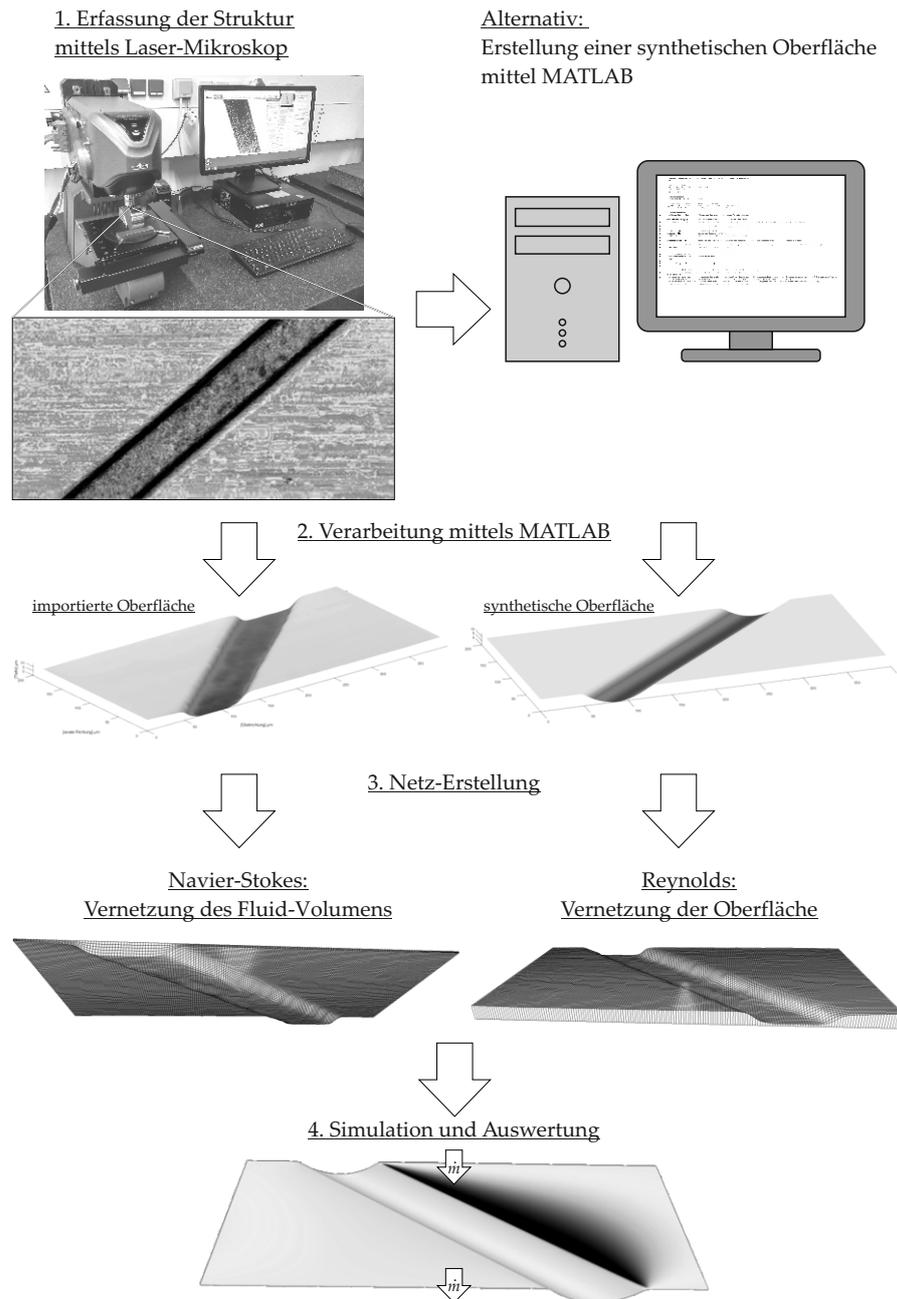


Abbildung 6.7: Vorgehensweise bei der Strömungs-Simulation

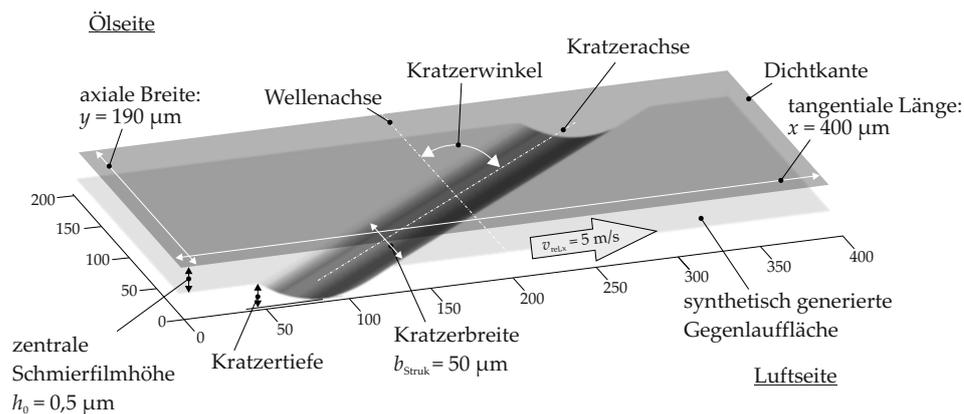


Abbildung 6.8: Größen und Randbedingungen am Beispiel eines synthetisch generierten Einzelkratzers

bedingung wird ein druckloser Zustand zwischen Öl- und Luftseite angenommen.

Die verwendeten Randbedingungen sind zusammengefasst in Abschnitt A.3.1 aufgeführt.

6.3 SIMULATIONSERGEBNISSE

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der an Kratzerstrukturen durchgeführten Strömungssimulationen aufgeführt.

6.3.1 Einzelkratzer

Die mittels Reynolds-Solver (RS) und Navier-Stokes-Solver (NSS) ermittelten Kratzerförderwerte werden exemplarisch für Einzelkratzer mit 50° -Winkel in Abhängigkeit der effektiven Tiefe in Abbildung 6.10 gegenübergestellt. Es wurden sowohl Oberflächen mit synthetisch generierten Einzelkratzern mit einer Kratzerbreite⁶ von $50 \mu\text{m}$ und

⁶ Entspricht der Kratzerbreite zur Kratzerachse, vgl. Abbildung 5.8, Seite 81.

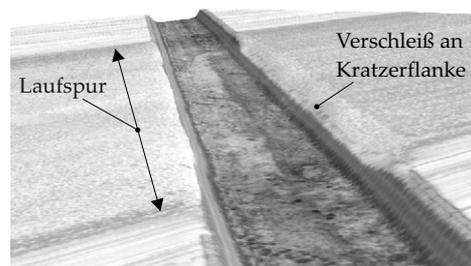


Abbildung 6.9: Verschleiß an Kratzerflanke weist auf partielles Eindringen der Dichtkante in Kratzer hin, nach Leckageversuch an Einzelkratzer mit $9 \mu\text{m}$ Tiefe und 40° -Winkel

100 μm sowie mittels Laserscanning-Mikroskop importierte Oberflächen simuliert.

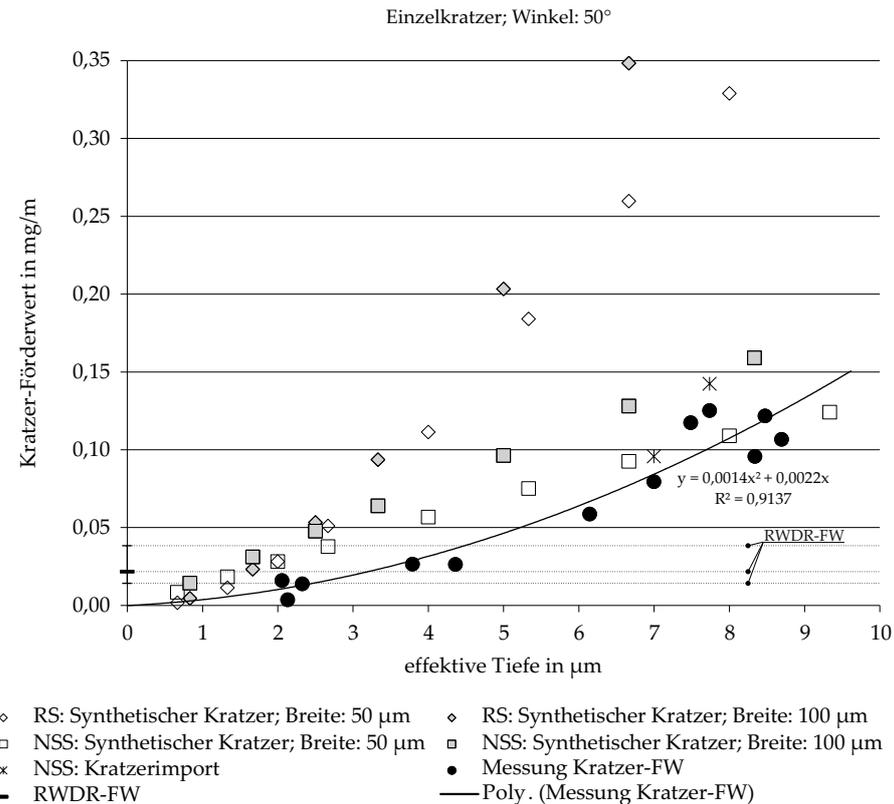


Abbildung 6.10: Simulationsergebnisse an Einzel-Kratzern mit 50°-Winkel

Zusätzlich sind zum Vergleich die aus Abschnitt 5.3.3 berechneten Kratzerförderwerte sowie der gemessene mittlere RWDR-Förderwert samt Streubreite dargestellt. Außerdem ist die den Messergebnissen zugehörige Regressionsfunktion aufgeführt.

Allgemein ist zu erkennen, dass die Förderwerte der Strukturen mit 100 μm Breite größer sind als die Strukturen mit 50 μm Breite, was zu erwarten ist. Dennoch ist auch zu erkennen, dass die berechneten Förderwerte bei doppelter Breite nicht um den gleichen Faktor ansteigen. Der Querschnitt der breiten Strukturen ist um den Faktor 2,5 größer als die schmalere Strukturen gleicher Tiefe. Die daraus resultierenden Förderwerte⁷ sind um den Faktor 1,7 größer.

Wie bereits in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, hat sich die effektive Tiefe als zielführende Vergleichsgröße herausgestellt, um die Förderwirkung unterschiedlicher Strukturen zu vergleichen, da diese sowohl den Querschnitt als auch die Breite der Struktur berücksichtigt (vgl. Gleichung (5.1)). Die reale Kratzertiefe fällt je nach Kratzergeometrie etwas größer aus (vgl. Abschnitt 5.3.2). Bei den hier verwendeten synthetisch erzeugten 100 μm breiten Kratzern beträgt die reale Kratzertiefe $t_{100 \mu\text{m}} = 1,2 \cdot t_{\text{eff}}$ bei den 50 μm breiten Kratzern $t_{50 \mu\text{m}} = 1,5 \cdot t_{\text{eff}}$. Die

⁷ Bezogen auf die Berechnung mit dem Navier–Stokes–Solver.

Geometrien der synthetisch erzeugten Strukturen können Abschnitt A.3.2 entnommen werden.

Beim Vergleich der Ergebnisse der beiden eingesetzten Solver zeigt sich, dass ab einer effektiven Tiefe von ca. 2 μm die Abweichung zwischen RS und NSS mit steigender Tiefe zunimmt. Unterhalb einer effektiven Tiefe von 2 μm liegen die mittels RS ermittelten Förderwerte etwas unterhalb der mittels NSS berechneten Ergebnisse. Bei einer effektiven Tiefe von 2 μm sind die Ergebnisse vergleichbar (vgl. Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 links).

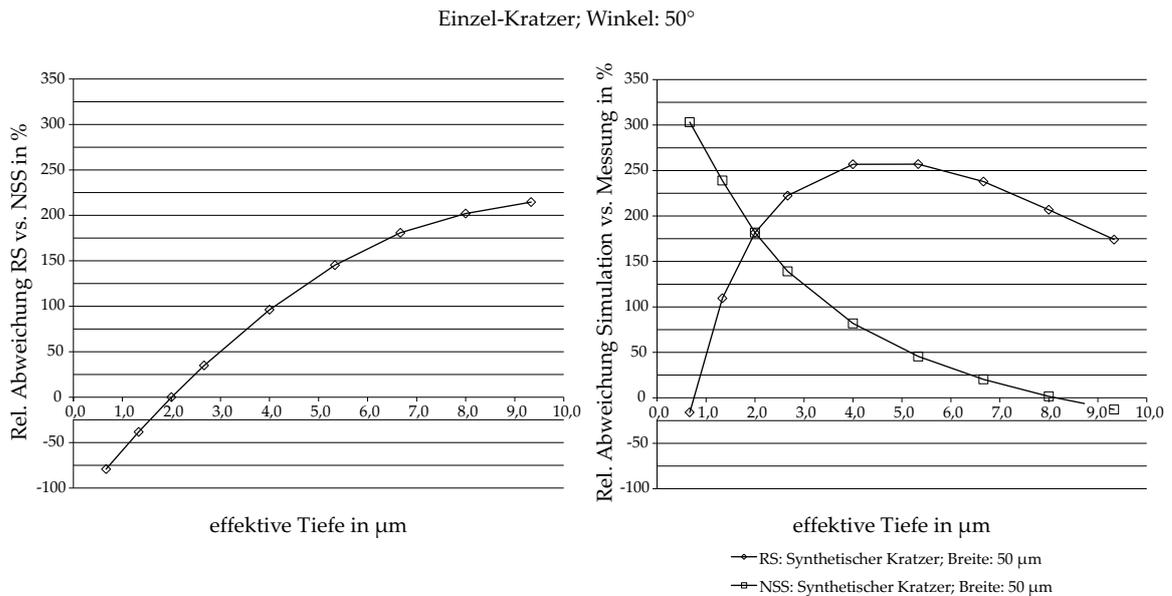


Abbildung 6.11: Relative Abweichung der Simulationsergebnisse zwischen RS, NSS und Messergebnissen bei 50°-Einzelkratzern

Zur Bestimmung und Visualisierung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse wird die relative Abweichung zu den Messergebnissen⁸ verwendet. In Abbildung 6.11 rechts sind die relativen Abweichungen der mittels RS und NSS simulierten Einzelkratzer mit 50 μm Kratzerbreite zu den zugehörigen Messwerten aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse des RS bei effektiven Tiefen bis 2 μm geringere relative Abweichungen zu den Messwerten aufweisen als die Ergebnisse des NSS. Ab 2 μm divergieren die Ergebnisse, sodass bei größeren Kratzertiefen die Ergebnisse des NSS besser mit den Messergebnissen korrelieren. Die simulierten Ergebnisse überschätzen dabei tendenziell die Messergebnisse bis zu einer effektiven Tiefe von ca. 8 μm . Die Abweichungen liegen hierbei in der Größenordnung des mittleren gemessenen RWDR-Förderwerts (vgl. Abbildung 6.10 und 6.11 rechts). Durch Hinzunahme der Simulationsergebnisse importierter Kratzergeometrien mit ca. 7 bis 8 μm effektiver Tiefe zeigt sich

⁸ Die relative Abweichung wird zu den mittels Regressionsfunktion (vgl. Abbildung 6.10) berechneten Messwerten bestimmt.

ein vergleichbares Verhalten. Auch hier wird der aus den Messergebnissen berechnete Kratzerförderwert ebenfalls um ca. den mittleren RWDR-Förderwert überschätzt (vgl. Abbildung 6.10).

Aufgrund der mit steigender Strukturtiefe zunehmenden Abweichung der mittels RS berechneten Ergebnisse (Abbildung 6.11 links) wird im folgenden Abschnitt die Anwendbarkeit des RS auf die hier untersuchten Strukturen untersucht.

6.3.2 Einfluss des Struktur-Aspektverhältnisses

Wie bei den in Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 links dargestellten Ergebnissen zu erkennen ist, weisen die mittels RS berechneten Ergebnisse mit zunehmender Strukturtiefe signifikante Abweichungen zu den Ergebnissen des NSS und den Messergebnissen auf.

Aus diesem Grund soll hier der Einfluss der Strukturgeometrie auf die Anwendbarkeit des RS überprüft werden.

In Abschnitt 6.1.3 sind die Annahmen aufgeführt, die die Anwendbarkeit der *Reynolds-Gleichung* auf ein hydrodynamisches Problem definieren. Hierbei wird davon ausgegangen, dass zum einen die Schmierfilmhöhe im Vergleich zum Oberflächenradius klein ist und dass zum anderen Trägheitskräfte vernachlässigt werden können, da diese im Vergleich zu viskosen Kräften gering ausfallen.

Um das Verhältnis von Trägheitskräften zu viskosen Kräften zu untersuchen, kann die *Reynolds-Zahl* Re betrachtet werden.

Allgemein wird die *Reynolds-Zahl* definiert als [HS]04]:

$$Re = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Viskose Kräfte}} = \frac{\rho \cdot u \cdot l}{\eta}. \quad (6.18)$$

Hierbei ist ρ die Schmierstoffdichte in kg/m^3 , u die Geschwindigkeit des Fluids in x -Richtung in m/s , l die charakteristische Länge in x -Richtung in m und η die dynamische Viskosität in Pa s .

Hamrock schlägt für die Untersuchung geschmierter Reibkontakte die *modifizierte Reynolds-Zahl* Re_x für die Bewegung in x -Richtung vor [HS]04]:

$$Re_x = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Viskose Kräfte}} = \frac{\rho \cdot u \cdot h^2}{\eta \cdot l} \quad (6.19)$$

Hierbei wird zusätzlich die Schmierfilmhöhe h in m als charakteristische Länge in z -Richtung berücksichtigt. Laut *Hamrock* muss bei hydrodynamischen Anwendungen die *modifizierte Reynolds-Zahl* Re_x die Größenordnung von h/l annehmen und *wesentlich* kleiner als $Re_x \ll 1$ sein, wenn die viskosen Kräfte die Trägheitskräfte überwiegen.

Im Folgenden wurde die *modifizierte Reynolds-Zahl* Re_x sowie das Verhältnis der Schmierfilmhöhe h und der charakteristischen Länge l

auf die untersuchten Einzelkratzer übertragen, sodass der Einfluss des Aspektverhältnisses untersucht wurde. Die Schmierfilmhöhe wird dabei maßgeblich durch die Kratzeriefe t bestimmt. Die charakteristische Länge l entspricht bei diesen Untersuchungen der Kratzerbreite b in tangentialer Richtung, sodass das Verhältnis t/b betrachtet wird. Da die Kratzerbreite⁹ in tangentialer Richtung mit steigendem Winkel zunimmt, wird die *Reynolds-Zahl* in Abhängigkeit vom Kratzerwinkel und der Kratertiefe untersucht.

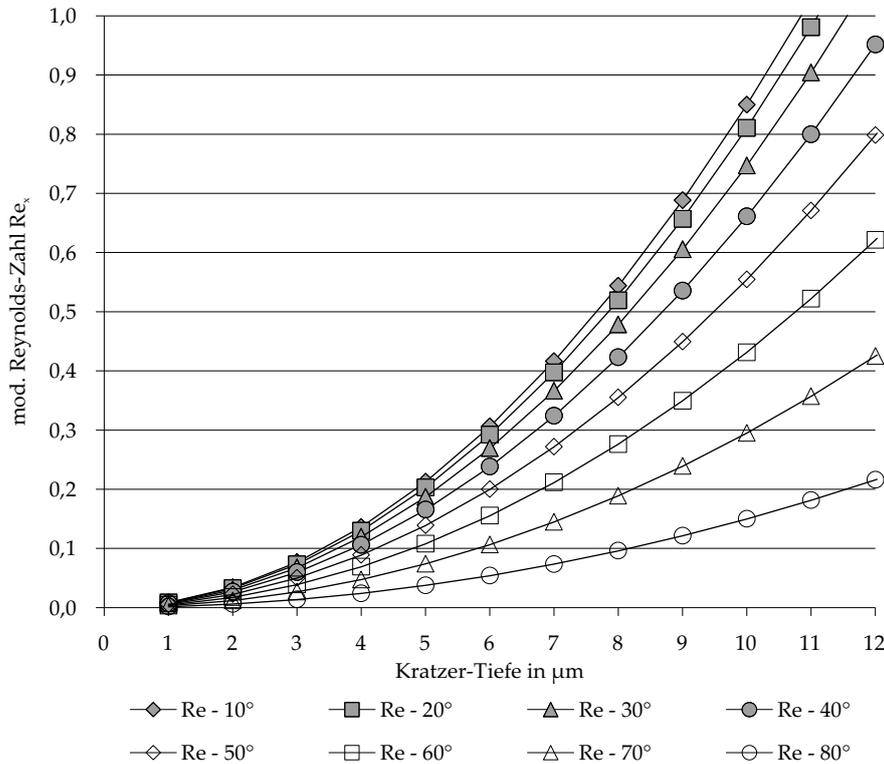


Abbildung 6.12: Modifizierte Reynolds-Zahl Re_x von Einzelkratzern

In Abbildung 6.12 sind die Ergebnisse der nach Gleichung (6.19) berechneten *Modifizierten Reynolds-Zahl* Re_x bei variiertem Kratzerwinkel in Abhängigkeit zur Kratzeriefe aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass die *Reynolds-Zahl* mit steigender Kratzeriefe quadratisch ansteigt. Insbesondere bei Strukturen mit geringem Kratzerwinkel, bei denen die Kratzerbreite in tangentialer Richtung verhältnismäßig gering ausfällt (vgl. Tabelle A.9) und damit das Aspektverhältnis groß wird, steigt die *Reynolds-Zahl* stark an. Bei 10°- und 20°-Winkeln nimmt die *Reynolds-Zahl* bei einer Tiefe von 11 µm bereits einen Wert nahe $Re_x = 1$ an, was der oben genannten Forderung einer viskosen Strömung¹⁰ widerspricht.

Die Ergebnisse der *modifizierten Reynolds-Zahl* Re_x und des Aspektverhältnisses t/b in Abhängigkeit zum Kratzerwinkel und zur Kratzeriefe

⁹ Die für Gleichung (6.19) verwendeten Parameter sind in Tabelle A.9 zusammengefasst aufgeführt.

¹⁰ Forderung: $Re_x \ll 1$ [HS]04].

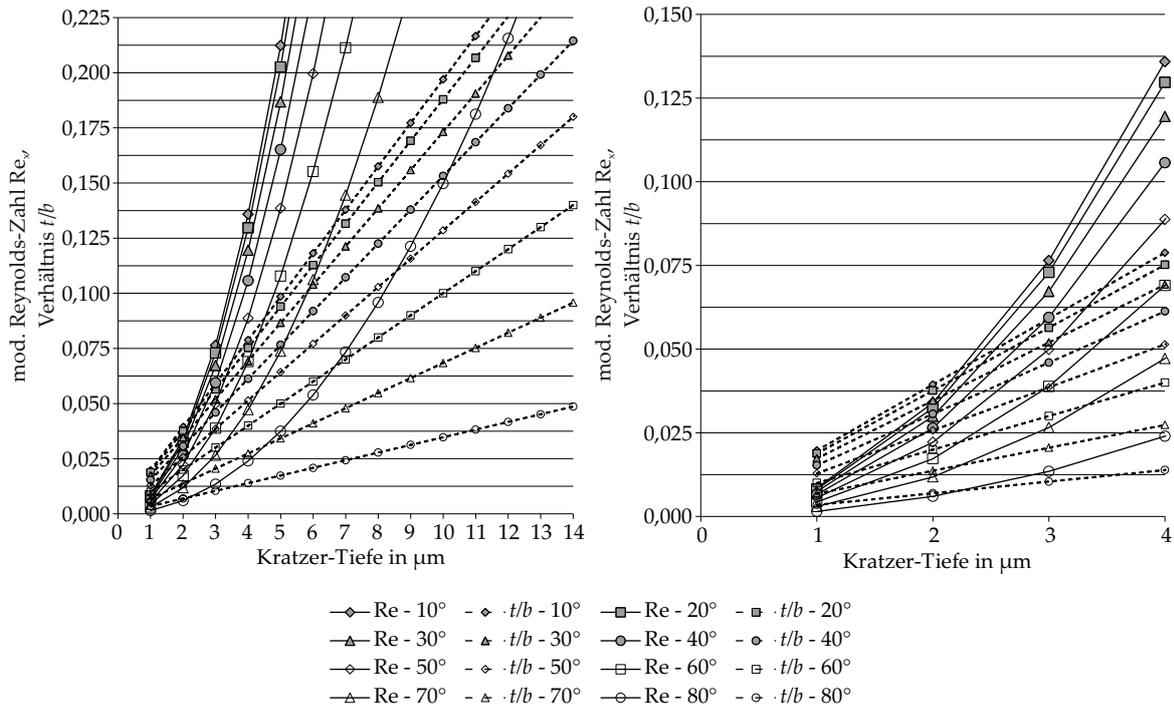


Abbildung 6.13: Vergleich der *modifizierten Reynolds-Zahl* Re_x und des Aspektverhältnisses t/b von Einzelkratzern

fe werden in Abbildung 6.13 dargestellt. Wobei Abbildung 6.13 rechts eine detaillierte Darstellung des Bereichs bis 4 µm Kratzertiefe bietet. Es fällt auf, dass insbesondere ab einer Kratzertiefe von 3 µm die *Reynolds-Zahl* und das Aspektverhältnis stark auseinanderlaufen. Der Schnittpunkt der *Reynolds-Zahl*-Kurven und der Aspektverhältnis-Kurven liegt für die aufgeführten Strukturen zwischen 2 und 3 µm Kratzertiefe. In diesem Bereich weisen die *Reynolds-Zahlen* und die Aspektverhältnisse die gleiche Größe auf. Ebenfalls ist in diesem Bereich die Forderung $Re_x \ll 1$ erfüllt.

Die Abweichungen der Simulationsergebnisse des RS mit steigender Kratzertiefe in Abschnitt 6.3.1 lassen sich somit plausibel dadurch begründen, dass die Trägheitskräfte bei diesen Strukturen die viskosen Kräfte überwiegen und die *Reynolds-Gleichung* ihre Anwendbarkeit verliert.

6.3.3 Mehrfachkratzer

Neben Einzelkratzern waren auch Mehrfachkratzer Gegenstand der Untersuchung. Zur Untersuchung von Mehrfachkratzern wurden unter anderem Kratzer mit 30°-Winkel, einer Anzahl von 50, einer Tiefe von 2,8 µm und 0,1 mm tangentialem Abstand untersucht. Die Geometrie wurde den realen Kratzern nachempfunden. In Abbildung 6.14 ist die Kontur eines Kratzers, in tangentialer Richtung geschnitten, dargestellt.

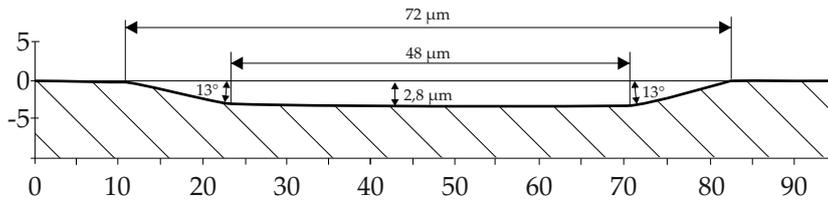


Abbildung 6.14: Geometrie eines Kratzers innerhalb der Laufspur (tangential); Kratzeranzahl: 50, Winkel: 30° , Tiefe: $2,8 \mu\text{m}$, Kratzerabstand: $0,1 \text{ mm}$

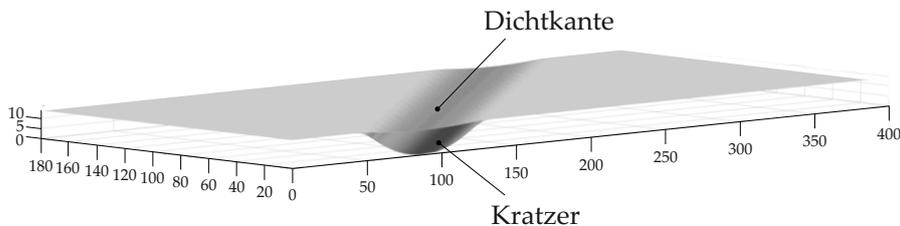


Abbildung 6.15: Nachstellung der Eindrückung einer Dichtung von $2 \mu\text{m}$ in einen $14 \mu\text{m}$ tiefen Kratzer (synthetische Oberfläche)

Wie bereits in Abschnitt 6.2 beschrieben, muss davon ausgegangen werden, dass der Schmierpalt im Bereich des Kratzers partiell gestört wird und die Dichtkante in die Strukturen eindringt. Insbesondere bei flachen Strukturen von ca. 2 bis $3 \mu\text{m}$ Tiefe ist vermutlich mit einer signifikanten Interaktion der Dichtkantenrauheiten zu rechnen. Bei tieferen Strukturen konnte erhöhter Verschleiß an den Kratzerflanken beobachtet werden (vgl. Abbildung 6.9). Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass der Schmierpalt im Bereich der Strukturen lokal geringere Werte annimmt. Um dies zu untersuchen, wurde der Struktur-Querschnitt durch ein Eindringen der Dichtung in die Kratzer künstlich verringert (vgl. Abbildung 6.15).

In Abbildung 6.16 sind die Simulationsergebnisse für die Mehrfachkratzer mit 50 Kratzern und einem tangentialen Kratzerabstand von $0,1 \text{ mm}$ sowie einem Winkel von 30° aufgeführt. Zusätzlich sind die zugehörigen Messergebnisse aus den Förderwertuntersuchungen aus Abschnitt 5.3.4 aufgeführt.

Es wurden sowohl Untersuchungen mit dem RS als auch dem NSS ausgeführt.

Es zeigt sich, dass die Simulationsergebnisse des RS und NSS bei der ursprünglich untersuchten Tiefe von $2,8 \mu\text{m}$ vergleichbar sind. Dennoch überschätzen die Simulationsergebnisse die Messergebnisse ohne zusätzliche Eindrückung signifikant um den Faktor 12.

Wie exemplarisch in Abbildung 6.15 dargestellt, wurde zusätzlich eine unterschiedlich starke Eindrückung der Dichtkante in die Strukturen simuliert. Die Tiefenreduktion umfasst Größen von $1,5$ bis $2 \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 6.16).

Es ist zu erkennen, dass mit steigender Eindrückung der Förderwert deutlich reduziert wird. Durch eine simulierte Eindrückung von $2 \mu\text{m}$,

was bei einer Kratzertiefe von 2,8 µm einer Tiefenreduktion von 71 % entspricht, wird eine relative Abnahme des simulierten Förderwerts beim RS von 92 % und beim NSS von 77 % erzielt. Der Unterschied der Simulationsergebnisse bei sehr flachen Strukturen bzw. großer Eindrückung könnte durch das Kavitationsgebiet in den Strukturen zu erklären sein, welches durch den NSS nicht berücksichtigt wird. In Abbildung 6.17 ist die Zunahme des Kavitationsgebietes mit abnehmender Kratzertiefe exemplarisch an Einzelkratzern dargestellt. Durch die angenommene Tiefenreduktion aufgrund der Dichtkanten-eindrückung in die Strukturen passen die Simulationsergebnisse des RS zwar sehr gut zu dem messtechnisch ermittelten Ergebnis, eine Eindrückung von 2 µm Tiefe ist jedoch kritisch zu betrachten, da bei diesen Strukturen kein erhöhter Verschleiß in dieser Größenordnung ermittelt werden konnte.

Ein ähnliches Verhalten konnte auch bei tieferen Strukturen geringerer Anzahl beobachtet werden. In Abbildung 6.18 sind die Simulationser-

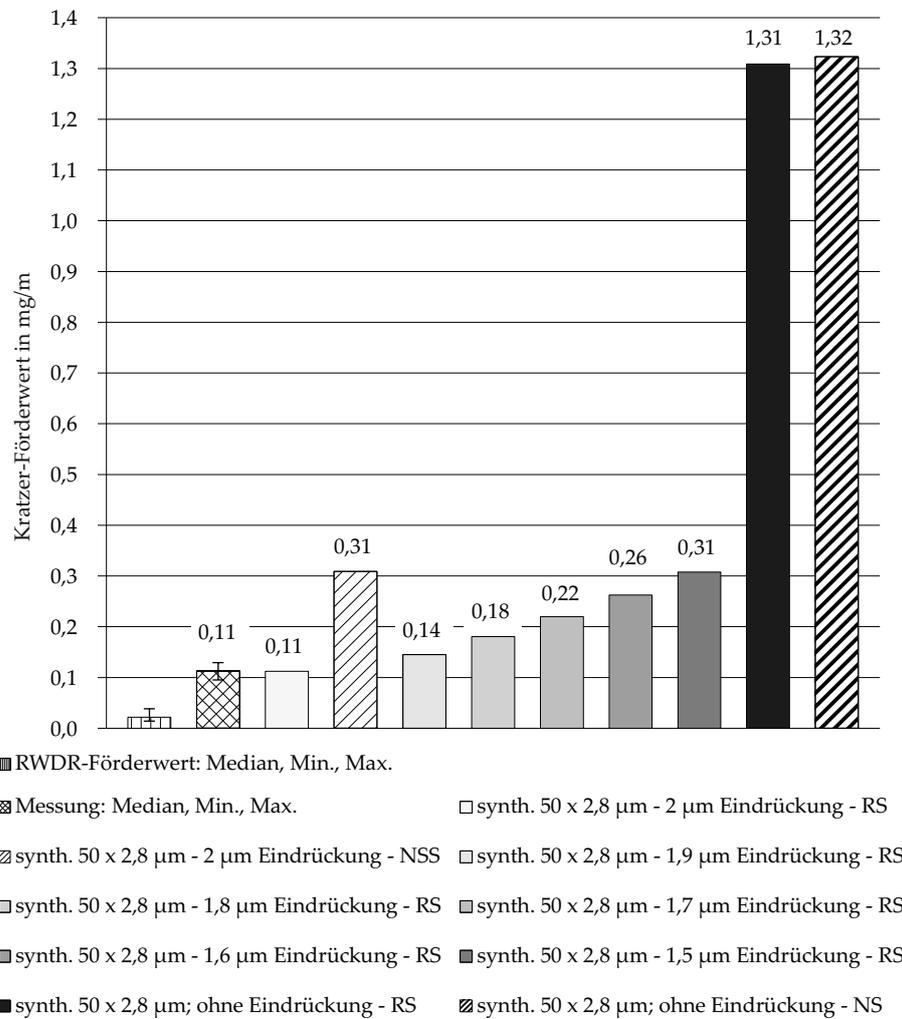


Abbildung 6.16: Simulationsergebnisse von Mehrfachkratzern; Kratzeranzahl: 50, Tiefe: 2,8 µm, Winkel: 30°, Kratzerabstand: 0,1 mm

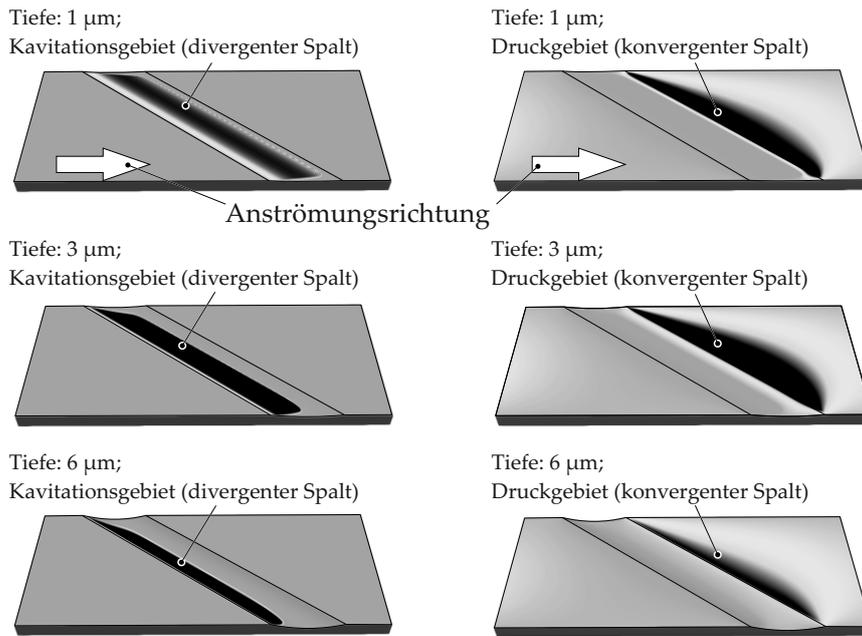


Abbildung 6.17: Druck- und Kavitationsbereiche an Einzelkratzern unterschiedlicher Tiefe

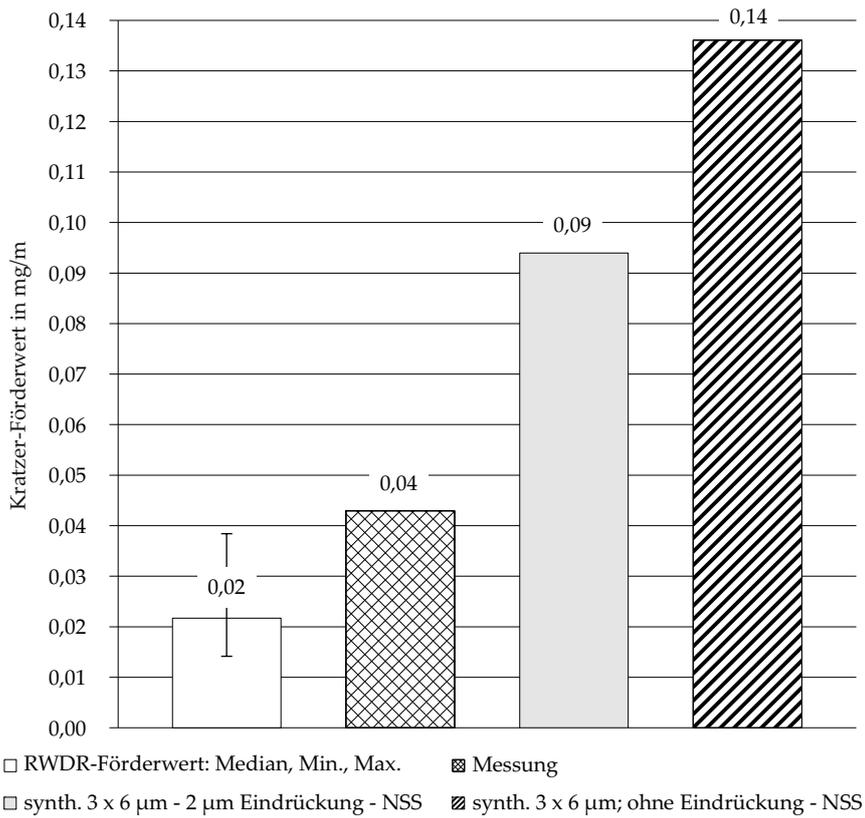


Abbildung 6.18: Simulationsergebnisse von Mehrfachkratzern; Kratzeranzahl: 3, Tiefe: 6 μm, Winkel: 30°

gebnisse von Mehrfachkratzern der Anzahl 3 mit einer Tiefe von 6 μm synthetisch nachgebildet worden. Die Simulation erfolgte aufgrund der Strukturtiefe mit dem NSS.

Auch hier weichen die Simulationsergebnisse von den Messergebnissen ab. Die Abweichung beträgt ca. Faktor 3. Eine simulierte Eindrückung der Dichtung und eine daraus resultierende Tiefenreduktion von 2 μm entspricht bei 6 μm Kratzertiefe 33 %. Dies führt zu einer relativen Abnahme des Förderwerts um 36 %.

6.3.4 *Diskussion: Simulation vs. Messung*

Der Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messergebnissen zeigt, dass es trotz des vereinfachten Modells (glatte Dichtkante, konstante Schmierpalhöhe, glatte Gegenlauffläche) gelingt, unter bestimmten Bedingungen die Strukturförderwerte abzuschätzen. Dennoch sind weitere Untersuchungen nötig, um das Verständnis der Abdichtbarkeit von Strukturen zu erweitern und die Förderwerte der Strukturen und des beteiligten RWDR zufriedenstellend abzuschätzen. Die Ergebnisse zeigen die Grenzen der Anwendbarkeit unterschiedlicher Berechnungsansätze auf die betrachteten Strukturen auf.

Die korrekte Nachbildung der Strukturen im Dichtkontaktbereich stellt eine große Herausforderung dar. Insbesondere bei flachen Strukturen, die in der Größenordnung der Oberflächenrauheiten der Dichtkante und Gegenlauffläche liegen, sind Abweichungen durch die vereinfachten Annahmen zu erkennen. Die Interaktion der Strukturen mit der Dichtkante und der dadurch potentiell reduzierte Förderquerschnitt sind für die erfolgreiche Abschätzung der Struktur-Förderwerte von hoher Bedeutung.

Die Bewertung der Simulationsergebnisse erfolgt derzeit durch die Annahmen eines konstanten mittleren RWDR-Förderwerts, gemessen auf unstrukturierten Wellenabschnitten, welcher als Offset von den Messergebnissen des kombinierten Förderwerts abgezogen wird. Ein Einfluss der Strukturen auf den RWDR-Förderwert, insbesondere bei großer Strukturanzahl, muss weiter untersucht werden, um die Simulationsergebnisse korrekt bewerten zu können.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von mesoskopischen Strukturen auf Gegenauflflächen von Radial-Wellendichtringen im Hinblick auf deren Abdichtbarkeit untersucht. Die Größenordnung der untersuchten Strukturen stellt einen Übergang zwischen den auf der Gegenauflfläche und der Dichtkante vorherrschenden Oberflächenrauheiten im unteren einstelligen Mikrometerbereich (mikroskopische Strukturen) und signifikant tieferen Strukturen bis in den zweistelligen Mikrometerbereich mit Strukturbreiten bis in den dreistelligen Mikrometerbereich (mesoskopische Strukturen) dar.

Die untersuchten Strukturen wurden in die Dichtungsgegenauflflächen eingebracht und repräsentieren Strukturen, die in Form von Dellen oder Kratzern auftreten können. Diese Strukturen können zum Beispiel durch die Fertigung, den Transport oder die Montage in die Oberflächen eingebracht werden. Generell sind solche Strukturen gemäß der heute geltenden Normen zu vermeiden.

Für die Untersuchungen wurden in als drallfrei identifizierte Gegenauflflächen Kratzerschäden mit definierter Anzahl, Geometrie und Ausrichtung untersucht. Die Kratzer wurden überwiegend mittels Laser eingebracht. Versuche mit mechanisch eingebrachten Kratzern bestätigen die Vergleichbarkeit mit Laserkratzern.

Es wurden Kratzer unterschiedlicher Tiefe, Orientierung, Anzahl und Anordnung auf Dichtheit überprüft. Als Dichtungsbauformen wurden Standard-RWDR ohne Rückförderhilfen sowie Einfachdrall-RWDR auf ihr Schadenskompensationsvermögen untersucht.

In Leckageversuchen wurden kritische Fehlstellen identifiziert. Die Untersuchungen bestätigen, dass sowohl die Tiefe, die Orientierung und die Anzahl von Kratzern innerhalb des Dichtkontakts einen erheblichen Einfluss auf die Dichtheit des Dichtsystems haben können. Mit steigendem Winkel gegenüber der Wellenachse und größerer Tiefe nimmt die Tendenz zur Leckage zu.

Der Einfluss unterschiedlicher Kratzerkonturen wurde dargestellt. Um eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten hat sich die effektive Tiefe als zielführende Vergleichsgröße herausgestellt. Diese ergibt sich aus dem Quotient des Strukturquerschnitts und der Strukturbreite.

Darüber hinaus zeigten sich bei Mehrfachkratzern Einflüsse des Kratzerabstands sowie deren gegenseitige Ausrichtung auf die Abdichtbarkeit. Mehrfachkratzer mit einem Abstand von 0,1 mm zeigten bei gleicher Anzahl und Ausrichtung tendenziell höhere Förderwerte und

eine stärkere Leckagetendenz als Kratzer mit einer gleichmäßigen Verteilung auf dem Umfang.

Eine weitere wichtige Erkenntnis stellt die Tatsache dar, dass bereits eine geringe Anzahl an Kratzern mit Tiefen im Bereich der tolerierbaren Oberflächenrauheit in Kombination mit einem Standard-RWDR zu einer beachtlichen Leckage und damit zum Ausfall des Dichtsystems führen kann.

Untersuchungen mit gegensätzlich wirkenden Strukturen zeigten tendenziell eine Abschwächung der Leckage bzw. eine Verschiebung der Leckagegrenze. Eine vollständige gegenseitige Kompensation bei gleicher Anzahl konnte jedoch ausgeschlossen werden. Ferner spielt auch bei diesen Strukturen der Winkel eine entscheidende Bedeutung, sodass rückfördernd angeordnete Strukturen mit großem Winkel tendenziell besser leckagefördernde Strukturen kompensieren als Strukturen mit kleinerem Winkel.

Die Leckageversuche mit Einfachdrall-RWDR zeigen, dass die auftretende Leckagemenge im Vergleich zum Standard-RWDR deutlich geringer ausfällt. Beim Großteil der Versuche trat Leckage ohne Abtropfen auf. Bei Kratzern mit geringer Tiefe, zum Beispiel 3 μm , zeigten die Einfachdrall-RWDR eine verbesserte Dichtwirkung. Bei geringer Anzahl und großer Tiefe, zum Beispiel zwei Kratzer mit 9 μm Tiefe, sind die Ergebnisse von Einfachdrall-RWDR und Standard-RWDR hinsichtlich der Leckagegrenze vergleichbar.

In umfangreichen Messungen wurden die Förderwerte der RWDR und Kratzer-Strukturen quantifiziert und mit den Ergebnissen der Leckageversuche korreliert. Durch die Superposition der Messergebnisse wurden die Kratzer-Förderwerte abgeschätzt.

Basierend auf den experimentellen Ergebnissen wurde ein empirisches Gesamt-Modell aufgestellt, mit dessen Hilfe die Strukturförderwerte in Abhängigkeit der Tiefe, des Winkels, der Anzahl und des Abstands für die in dieser Arbeit verwendeten Versuchsbedingungen abgeschätzt werden können.

Zur theoretischen Abschätzung der kratzerbedingten Leckage wurden Strömungssimulationen ausgeführt, mit denen die Fluidströmung durch die Kratzer im Dichtkontakt berechnet wurde. Hierzu wurde das Open Source Programm *ELMER* verwendet. Es wurden sowohl synthetisch generierte Modell-Kratzer als auch importierte reale Kratzergeometrien analysiert.

Zur Simulation wurden Berechnungen mit dem in *ELMER* implementierten Navier-Stokes- und Reynolds-Solver ausgeführt und die Ergebnisse der Strukturförderwerte miteinander verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung des Reynolds-Solvers insbesondere für geringe Struktur Tiefen bis ca. 3 μm zielführend ist. Bei größeren Tiefen divergieren die Ergebnisse zwischen Reynolds-Solver und Navier-Stokes-Solver. Es ist anzunehmen, dass bei steigender Kratzertiefe und den sich daraus ergebenden Aspektverhältnissen, die

Trägheitskräfte im Fluid zunehmen, sodass die *Reynolds-Gleichung* nicht mehr zuverlässig anwendbar ist. Der Vorteil des in dieser Arbeit verwendeten Reynolds-Solvers liegt wiederum in der Berücksichtigung von Kavitation, welche insbesondere bei Strukturturen bis ca. $1\ \mu\text{m}$ ausschlaggebend sein könnte.

Für Strukturen größer $3\ \mu\text{m}$ hat sich die Berechnung mittels Navier-Stokes-Solver als zielführend herausgestellt.

Ferner sind die tatsächlichen Kontaktverhältnisse zwischen Strukturen und Dichtkante von entscheidender Bedeutung, insbesondere bei der Untersuchung geringer Strukturturen in der Größenordnung der allgemein tolerierbaren Wellenrauheiten. Das Eindringen der Dichtkante in die Strukturen auf mikroskopischer Ebene und der daraus resultierende reduzierte Förderquerschnitt ist für die erfolgreiche Abschätzung der Strukturförderwerte von hoher Bedeutung, sodass in diese Richtung weitere Untersuchungen anzustreben sind. Zielführend wären diesbezüglich optische Untersuchungen mit transparenten Gegenauflflächen [KP19]. In Kombination mit laserinduzierter Fluoreszenz könnten die realen Kontaktverhältnisse optisch sichtbar gemacht werden¹ und somit genauere Annahmen für die Modellbildung getroffen werden. Denkbar wäre auch ein Aufbau mit ortsfesten Strukturen und relativ dazu gleitender Dichtkante, sodass es sich um eine rotierende Dichtung handelt [Pel22]. Dies könnte optische Vorteile mit sich bringen.

Es ist zu beachten, dass die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen einen begrenzten Versuchsraum darstellen. Weitere Versuchsbedingungen wie zum Beispiel geänderte Gleitgeschwindigkeiten, Schmierstoffviskositäten, Elastomerwerkstoffe oder Temperaturen sollten auf deren Einfluss überprüft werden.

¹ Siehe dazu [WP09; Wen16; Bul21].

LITERATUR

- [AG96] Josef Affenzeller und Heinz Gläser. *Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren*. Wien und New York: Springer, 1996. ISBN: 3-211-82577-0.
- [Arn14] J Arnecke P.and Seewig. „A Strategy for Micro-Twist Characterization on the Shaft in a Rotary Shaft Sealing System“. In: *International Sealing Conference : 18th ISC, Stuttgart, Germany, Oct. 8 - 9, 2014*. VDMA Fluidtechnik, 2014.
- [Arn17] Philipp Arnecke. *A measurement method for characterising micro lead on ground shaft surfaces*. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, 2017.
- [BLP09] P. Baart, P.M. Lugt und B. Prakash. „Review of the lubrication, sealing, and pumping mechanisms in oil- and grease-lubricated radial lip seals“. In: *PROCEEDINGS- INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART J JOURNAL OF ENGINEERING TRIBOLOGY* 223.3 (2009), S. 347–358. ISSN: 1350-6501.
- [Bai11] Gert Baitinger. *Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenläufigen Flächen*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2011.
- [Bar10] Dirk Bartel. *Simulation von Tribosystemen: Grundlagen und Anwendungen*. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010. ISBN: 9783834896568. DOI: 10.1007/978-3-8348-9656-8.
- [Bau17] Matthias Baumann. *Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenläufigen Flächen - Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2017.
- [BL17] Eberhard Bock und Tim Lechner. In: *Handbuch Dichtungspraxis*. Hrsg. von Alexander Riedl. Vulkan Verlag, 2017. Kap. 6 Radialwellendichtringe. ISBN: 9783802722141.
- [BH13] Minel J. Braun und William M. Hannon. „Cavitation Formation and Modeling“. In: *Encyclopedia of Tribology*. Hrsg. von Q. Jane Wang und Yip-Wah Chung. Boston, MA: Springer US, 2013, S. 318–334. ISBN: 978-0-387-92897-5. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_29.
- [Brig93] Robert V. Brink. *Handbook of fluid sealing*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1993. ISBN: 0070078270.
- [Buh06] Steffen Buhl. *Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenläufigen Flächen und Fluid*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2006.

- [Bul21] Dilek Bulut. *Cavitation and film formation in hydrodynamically lubricated parallel sliding contacts*. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT), 2021.
- [DIN96] DIN3760:1996-09. *Radial-Wellendichtringe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1996.
- [DIN84a] DIN3761-1:1984-01. *Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge; Begriffe; Maßbuchstaben, zulässige Abweichungen, Radialkraft*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1984.
- [DIN83] DIN3761-2:1983-11. *Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge; Anwendungshinweise*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1983.
- [DIN84b] DIN3761-9:1984-1. *Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge; Prüfung; Radialkraft-Meßgerät-Digital*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1984.
- [DIN84c] DIN3761:1984-01. *Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1984.
- [DIN11a] DIN51563:2011-04. *Prüfung von Mineralölen und verwandten Stoffen - Bestimmung des Viskosität-Temperatur-Verhaltens - Richtungskonstante m*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [DIN11b] DIN51757:2011-01. *Prüfung von Mineralölen und verwandten Stoffen - Bestimmung der Dichte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [Deb05] Christoph Debler. *Bestimmung und Vorhersage des Verschleißes für die Auslegung von Dichtungen*. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT), 2005.
- [Det12a] Ludger Deters. In: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Hrsg. von Waldemar Steinhilper und Bernd Sauer. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. Kap. 11 Lagerungen, Gleitlager, Wälzlager. ISBN: 978-3-642-24303-5.
- [Det12b] Ludger Deters. In: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Hrsg. von Waldemar Steinhilper und Bernd Sauer. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. Kap. 10 Reibung, Verschleiß und Schmierung. ISBN: 978-3-642-24303-5.
- [Elr81] H. G. Elrod. „A Cavitation Algorithm“. In: *Journal of Lubrication Technology* 103.3 (Juli 1981), S. 350–354. ISSN: 0022-2305. DOI: 10.1115/1.3251669.
- [EA74] H. Elrod und M. Adams. „A computer program for cavitation and starvation problems“. In: *CAVITATION AND RELATED PHENOMENA IN LUBRICATION, 1st Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. 1974, S. 37–41. ISBN: 0852983247.

- [Eng11] Tobias Engelke. *Einfluss der Elastomer-Schmierstoff-Kombination auf das Betriebsverhalten von Radialwellendichtungen*. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT), 2011.
- [FST15] FST. *Technisches Handbuch - Simmerringe und Rotationsdichtungen*. 2015. URL: <https://www.fst.com/-/media/files/fst,-d-,com/technical-manuals/de/fst-technisches-handbuch-2015-kap01-simmerringe-und-rotationsdichtungen.pdf>.
- [Guo+16] Fei Guo, Xiaohong Jia, Longke Wang und Yuming Wang. „The effect of axial position of contact zone on the performance of radial lip seals with a texturing shaft surface“. In: *Tribology International* 97 (2016), S. 499–508. ISSN: 0301-679X.
- [HS07] Philip C. Hadinata und Lyndon Scott Stephens. „Soft Elastohydrodynamic Analysis of Radial Lip Seals With Deterministic Microasperities on the Shaft“. In: *Journal of Tribology* 129.4 (2007), S. 851–859.
- [HD81] Bernard J. Hamrock und Duncan Dowson. *Ball bearing lubrication : the elastohydrodynamics of elliptical contacts*. New York: Wiley; 1981. ISBN: 047103553X.
- [HSJ04] Bernard J. Hamrock, Steven R. Schmid und Bo O. Jacobson. *Fundamentals of fluid film lubrication*. Bd. 169. New York: Dekker, 2004. ISBN: 0824753712.
- [HS85] Waldemar Hermann und Hans-Werner Seffler. „Neue Erkenntnisse für den Abdichtmechanismus von Radial-Wellendichtungen“. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 87 (9). Springer Verlag, 1985.
- [Hor96] Leslie A. Horve. *Shaft seals for dynamic applications, Mechanical engineering*. Bd. 107. Boca Raton, Fla.: M. Dekker; 1996. ISBN: 0824797167.
- [ISO07] ISO6194-1:2007-09. *Radial-Wellendichtungen mit elastomeren Dichtelementen - Teil 1: Nennmaße und Toleranzen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [JF57] B. Jakobsson und L. Floberg. „Finite journal bearing, considering vaporization“. In: *Transactions of Chalmers University of Technology* 190 (1957).
- [Jen91] Bernhard Jenisch. *Abdichten mit Radial-Wellendichtungen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen*. Dissertation. Universität Stuttgart, 1991.

- [Jia+11] X. Jia, S. Jung, W. Haas und R. F. Salant. „Numerical simulation and experimental study of shaft pumping by laser structured shafts with rotary lip seals“. In: *TRIBOLOGY INTERNATIONAL, Special Issue: ECOTRIB 2009*. TRIBOLOGY INTERNATIONAL, Special Issue: ECOTRIB 2009 44.5 (2011), S. 651–659. ISSN: 0301-679X.
- [JV95] D. E. Johnston und R. Vogt. „Rotary Shaft Seal Friction, The Influence of Design, Material, Oil and Shaft Surface“. In: *International congress, PAPERS- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS NEW YORK*. 950764. SAE International; 1995.
- [Joh86] D.E. Johnston. „Rotary shaft seals“. In: *Tribology International* 19.4 (1986). Dynamic Sealing Special Issue, S. 170–174. ISSN: 0301-679X.
- [Jun12] Steffen Jung. *Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenlaufflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2012.
- [Kam86] Matthias Kammüller. *Zur Abdichtwirkung von Radial-Wellendichtringen*. Dissertation. Universität Stuttgart, 1986.
- [Kas69] Günter Kassen. *Beschreibung der elementaren Kinematik des Schleifvorganges*. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1969.
- [KAH78] Yoshio Kawahara, Masato Abe und Hiroshi Hirabayashi. „Effect of Surface Condition of Lip on Sealing Phenomena of Oil Seals“. In: *Automotive Engineering Congress und Exposition, Detroit; Paper 780405*, 1978.
- [KAH80] Yoshio Kawahara, Masato Abe und Hiroshi Hirabayashi. „An Analysis of Sealing Characteristics of Oil Seals“. In: *ASLE Transactions* 23.1 (1980), S. 93–102.
- [KH79] Yoshio Kawahara und Hiroshi Hirabayashi. „A Study of Sealing Phenomena on Oil Seals“. In: *ASLE Transactions* 22.1 (1979), S. 46–55.
- [Ker92] Gerhard Kersten. *Optische und antastende Prüfung der Gegenlauffläche von Radial-Wellendichtringen*. Dissertation. Düsseldorf, 1992.
- [KP19] M. Klüppel und Gerhard Poll. *Verbesserung der Verschleißfestigkeit von Radialwellendichtungen im oszillierenden Reibkontakt*. 2019.
- [Koe72] W. Koenig. *Entwicklung einer praktischen Messmethode zur Erfassung und Darstellung der räumlichen Schneidverteilung im Schneidenraum von Schleifscheiben*. 1972.

- [Kun05] Thomas Kunstfeld. *Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2005.
- [Kuz69] Dennis C. Kuzma. „Theory of the Mechanism of Sealing with Application to Face Seals“. In: *Journal of Lubrication Technology* 91.4 (1969), S. 704–712.
- [Lei54] Johan Lein. „Mechanische Untersuchungen an Dichtungsringen für rotierende Wellen“. In: *Konstruktion* 6. Springer Berlin Heidelberg; 1954, S. 384–389. ISBN: 978-3-662-23302-3, 978-3-662-25335-9.
- [Lei+10] Alexander Leis, Jan von Hollen, Eduard Reithmeier und Gerhard Poll. *Stochastische Strukturen - Auswirkungen stochastischer Strukturen von Gegenauflflächen auf die Funktion von Radialwellendichtringen*. Frankfurt: Forschungskuratorium Maschinenbau e. V., Forschungsvorhaben Nr. 281, Heft 307, 2010.
- [Li12] Wei Li. *Experimental benchmarking of surface textured lip seal models*. Dissertation. University of Kentucky, 2012.
- [MSS09] M. Marquart, B. Sauer und J. Seewig. „3D-Oberflächenanalyse einer RWDR-Laufläche unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 25178“. In: *Reibung, Schmierung und Verschleiß : Forschung und praktische Anwendungen; 50. Tribologie-Fachtagung, 21. bis 23. September 2009 in Göttingen*. GfT; 2009. ISBN: 9783000288241.
- [MP17] Mark Matus und Gerhard Poll. *Auswirkung stochastischer Strukturen von Gegenauflflächen auf die Funktion von Radialwellendichtringen*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 706 I, FVA-Heft 1211, 2017.
- [Mü87] Heinz Konrad Müller. „Concepts of sealing mechanism of rubber lip type rotary shaft seals“. In: *Proc. 11th Intl. Conf. on Fluid Sealing*. 1987, S. 698–709.
- [Mü90] Heinz Konrad Müller. *Abdichtung bewegter Maschinenteile : Funktion - Gestaltung - Berechnung - Anwendung*. Waiblingen: Medienverl. Müller; 1990. ISBN: 3920484002.
- [Oli95] Sylvio Jose Ribeiro de Oliveira. *Das nichtnewtonsche Verhalten von Fluiden bei hohen Schergefällen als Erklärung der Schmierungs- und Dichtvorgänge bei Radialwellendichtringen*. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Konstruktionstechnik II, 1995.
- [Ols65] K.O. Olsson. „Cavitation in dynamically loaded bearings“. In: *Transactions of Chalmers University of Technology* 308 (1965).

- [Ott83] Gerhard Walter Ott. *Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radial-Wellendichtringen*. Dissertation. Universität Stuttgart, 1983.
- [Ott14] Kathrin Ottink. *Betriebsverhalten von Wälzlagerschutzdichtungen: experimentelle Untersuchungen und Berechnungsansätze*. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT), 2014.
- [OP13] Kathrin Ottink und Gerhard Poll. *Wälzlagerdichtungen: Schutzdichtungen für Wälzlager II*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 432 II, FVA-Heft 1053, 2013.
- [Ott74] Dennis Lee Otto. „Triangular Asperities Control Seal Leakage and Lubrication“. In: 740201. SAE International; 1974.
- [Pel22] Veith Pelzer. *Analyse zum Dichtverhalten von rotierenden Radial-Wellendichtringen*. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT), 2022.
- [Pol00] Gerhard Poll. „A contribution to the discussion on radial lip seal“. In: 3. *Hamburger Dichtungstechnisches Kolloquium Dynamische Dichtungen* (2000).
- [Pol12] Gerhard Poll. In: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Hrsg. von Waldemar Steinhilper und Bernd Sauer. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. Kap. 12 Dichtungen. ISBN: 978-3-642-24303-5.
- [Qia84] De-sen Qian. „The Sealing Mechanism and Design Factors of Radial Lip Seals for Crankshafts“. In: *Neiranji Gongcheng/Chinese Internal Combustion Engine Engineering* 5 (1984), S. 10–13.
- [RMA04] RMA. *Oil Seal Technical Bulletin – Shaft Finish Requirements for Rotary Lip Seals, RMA Handbook OS-1-1, Second Edition*. Rubber Manufacturers Association/Rubber Manufacturers Association, 2004.
- [Raa98] Henry Raab. *Einfluß der Wellenlauffläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtringen*. Frankfurt: Forschungskuratorium Maschinenbau e.V, Forschungsvorhaben Nr. 211, Heft 239, 1998.
- [Rå+22a] P. Råback u. a. *Elmer FEM – Elmer Models Manual*. 2022. URL: <http://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerModelsManual.pdf>.
- [Rå+22b] P. Råback u. a. *Elmer FEM – Elmer Solver Manual*. 2022. URL: <http://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerSolverManual.pdf>.

- [Rå+22c] P. Råback u. a. *Elmer FEM – open source multiphysical simulation software*. 2022. URL: <http://www.elmerfem.org>.
- [Rey86] Osborne Reynolds. „IV. On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beauchamp Tower’s Experiments, including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 177 (1886), S. 157–234. DOI: 10.1098/rstl.1886.0005.
- [Rin06] Meike Rinnbauer. *Technische Elastomerwerkstoffe: Basis für Hightech-Lösungen in der Dichtungs- und Schwingungstechnik*. Bd. 293. Landsberg: Die Bibliothek der Technik, Verlag Moderne Industrie, 2006. ISBN: 3937889426, 9783937889429.
- [SKF13] SKF. *Wellendichtungen*. PUB SE/P1 10919/2 DE. 2013. URL: https://www.skf.com/binaries/pub41/Images/0901d196802a262f-10919_2-DE-Wellendichtungen_tcm_41-129139.pdf.
- [Sal99] R. F. Salant. „Theory of lubrication of elastomeric rotary shaft seals“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 213.3 (1999), S. 189–201. DOI: 10.1243/1350650991542938.
- [Sal10] R. F. Salant. „Soft elastohydrodynamic analysis of rotary lip seals“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 224.12 (2010), S. 2637–2647. DOI: 10.1243/09544062JMES2181.
- [Sch+20] Felix Schiefer, Mark Matus, Frank Bauer und Gerhard Poll. *Schädliche Strukturen (Drall): Erkennen und bewerten von schädlichen Strukturen auf RWDR-Gegenläufigen*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 805 I, FVA-Heft 1386, 2020.
- [SGK06] Hermann Schlichting, Klaus Gersten und Egon Krause. *Grenzschicht-Theorie*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. ISBN: 9783540329855.
- [SB13] Peter Schuler und Frank Bauer. *Weiche Dichtungslauflächen II: Einfluss weichgeschliffener Gegenläufigen auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 570 I, FVA-Heft 1049, 2013.
- [SH13] Peter Schuler und Werner Haas. *Weiche Dichtungslaufläche: Einfluss der Fertigungsparameter von weich bearbeiteten Wellen auf die Dichtfunktion von Elastomerdichtungen*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 570 I, FVA-Heft 1048, 2013.

- [Sch59] Karl-Eugen Schwartz. *Zerspanungsablauf und Schleifergebnis beim Aussenrundsleifen*. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1959.
- [SS04] Ravinder B. Siripuram und Lyndon Scott Stephens. „Effect of Deterministic Asperity Geometry on Hydrodynamic Lubrication “. In: *Journal of Tribology* 126.3 (2004), S. 527–534.
- [Sym73] James D. Symons. „Elastohydrodynamic Sealing Systems“. In: International Automotive Engineering Congress Detroit, Michigan; Paper 730049, 1973.
- [Thi19] Stefan Thielen. *Entwicklung eines TEHD-Tribosimulationsmodells für Radialwellendichtringe*. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik (MEGT), 2019.
- [Thi+18] Stefan Thielen u. a. „Functional investigation of zero lead radial shaft seal counter-surfaces turned with a special method“. In: *Tribology International* 118 (2018), S. 442–450. ISSN: 0301-679X.
- [TB17] Jan Totz und Frank Bauer. *Weiche Dichtungslaufflächen III: Einfluss weichgeschliffener Gegenlaufflächen auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 570 III, FVA-Heft 1230, 2017.
- [Tre20] Trelleborg. *Rotationendichtungen*. 2020. URL: <https://www.trelleborg.com/de-de/seals/resources/catalogs-and-brochures>.
- [VDI16] VDI3393:2016-10. *Eingrenzung von Schleif Fehlern*. VDI-Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2016.
- [VLW97] H. Van Leeuwen und W. Wolfert. „The Sealing and Lubrication Principles of Plain Radial Lip Seals: An Experimental Study of Local Tangential Deformations and Film Thickness“. In: *TRIBOLOGY SERIES, Tribology, Leeds-Lyon symposium; 23rd, Tribology*. Bd. 32. Elsevier; 1997, S. 219–232. ISBN: 0444828095, 0444416773.
- [WS09] Katherine H. Warren und Lyndon Scott Stephens. „Effect of Shaft Microcavity Patterns for Flow and Friction Control on Radial Lip Seal Performance – A Feasibility Study“. In: *Tribology Transactions* 52.6 (2009), S. 731–743.
- [WH18] Shizhu Wen und Ping Huang. *Principles of tribology*. Hoboken, NJ: Wiley; 2018. ISBN: 9781119214915, 1119214904, 9781119214908, 1119214912, 1119214920, 9781119214922. DOI: 10.1002/9781119214908.

- [WPO9] B. Wennehorst und G.W.G. Poll. „Investigations into the tribological characteristics of radial lip seals - LIF and friction measurements“. In: *Fluid Sealing, International Conference on Fluid Sealing*, 20. Cranfield: BHR Group; 2009, S. 213–229. ISBN: 978-1-85598-113-3.
- [Wen16] Bengt Wennehorst. *On lubrication and friction in soft rough conformal sliding contacts: experimental and theoretical contributions to the discussion on elastomer shaft seal tribology*. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT), 2016.
- [WPO8] Bengt Wennehorst und Gerhard Poll. *Wälzlagerdichtungen: Schutzdichtungen für Wälzlager*. Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Forschungsvorhaben Nr. 432 I, FVA-Heft 876, 2008.
- [WPS15] Tomasz Woloszynski, Pawel Podsiadlo und Gwidon Stachowiak. „Efficient Solution to the Cavitation Problem in Hydrodynamic Lubrication“. In: *Tribology Letters* 58 (Apr. 2015). DOI: 10.1007/s11249-015-0487-4.

ANHANG

A.1 LECKAGEVERSUCHE MIT STANDARD-RWDR

A.1.1 Referenzversuche ohne Schaden

Standard-RWDR								
Gegenlauf- fläche	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur- Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dreh- richtung	Dichtheit	Versuchsablauf
II 28	1,4±0,1	254	43	19,3	87	CW	ja	
						CCW		
						CW		
						CCW		
II 29	1,8±0,2	244	37	19,6	121	CW	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
						CCW		
						CW		
						CCW		
II 30	1,1±0,2	264	39	19,2	129	CW	ja	
						CCW		
						CW		
						CCW		

dicht bei 5 und 15 m/s

Tabelle A.1: Referenzversuche ohne Schaden, Standard-RWDR,
Gesamtdauer 192 Stunden
Drehrichtungswechsel nach jeweils 48 Stunden:
24 Stunden bei 5 m/s + 24 Stunden bei 15 m/s, Start: CW

Standard-RWDR

Gegenlauf- fläche	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur- Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dreh- richtung	Dichtheit	Versuchsablauf
II 28	0,9 \pm 0,1	330	41	20,4	148	CCW	ja	
						CW		
						CCW		
						CW		
II 29	1,9 \pm 0,1	290	47	19,9	131	CCW	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
						CW		
						CCW		
						CW		
II 30	2,7 \pm 0,4	253	50	19,8	110	CCW	ja	
						CW		
						CCW		
						CW		

	dicht bei 5 und 15 m/s
--	------------------------

Tabelle A.2: Referenzversuche ohne Schaden, Standard-RWDR,
Gesamtdauer 192 Stunden
Drehrichtungswechsel nach jeweils 48 Stunden:
24 Stunden bei 5 m/s + 24 Stunden bei 15 m/s, Start: CCW

A.1.2 Leckageversuche - Dellenschäden

Gegenlauf- fläche	Ø BK	Soll- Tiefe in µm	durchlaufene Dellen Nr.	Dellentiefe in µm	Dellen- durchmesser in µm	
II 41	1,0 mm	10 µm	12	11,80	214	
		10 µm	13	11,04	209	
	2,5 mm	10 µm	11	9,88	343	
		10 µm	12	10,37	343	
	5,0 mm	10 µm	13	10,56	347	
		10 µm	7	11,04	558	
II 42	1,0 mm	10 µm	8	11,18	547	
		10 µm	16	11,04	211	
		10 µm	17	11,73	212	
	2,5 mm	10 µm	18	11,13	214	
		10 µm	15	10,79	350	
	5,0 mm	10 µm	16	10,63	356	
		10 µm	17	10,11	347	
		10 µm	9	11,00	551	
	II 43	1,0 mm	10 µm	10	11,06	554
			10 µm	11	11,97	213
10 µm			12	12,38	213	
10 µm			13	11,36	212	
2,5 mm		10 µm	14	11,40	207	
		10 µm	11	10,89	354	
		10 µm	12	10,33	350	
5,0 mm		10 µm	13	11,41	355	
		10 µm	7	12,53	580	

dicht bei 5 und 15 m/s

Tabelle A.3: Erweiterte Ergebnisse - Leckageversuche auf Dellenschäden mit 10 µm Tiefe

Gegenlauf- fläche	Ø BK	Soll- Tiefe in µm	durchlaufene Dellen Nr.	Dellentiefe in µm	Dellen- durchmesser in µm
II 37	1,0 mm	15 µm	10	14,94	251
		15 µm	11	15,29	255
	2,5 mm	15 µm	10	15,10	425
		15 µm	11	14,99	421
	5,0 mm	15 µm	6	16,46	661
		15 µm	7	15,79	657
II 38	1,0 mm	15 µm	16	15,4	256
	2,5 mm	15 µm	14	14,94	418
		15 µm	15	15,06	422
	5,0 mm	15 µm	8	16,50	682
	1,0 mm	15 µm	11	15,09	246
		15 µm	12	14,64	250
II 39	2,5 mm	15 µm	11	14,15	415
		15 µm	12	13,8	407
	5,0 mm	15 µm	6	16,35	665
		15 µm	7	16,09	661

dicht bei 5 und 15 m/s

Tabelle A.4: Erweiterte Ergebnisse - Leckageversuche auf Dellenschäden mit 15 µm Tiefe

A.1.3 Leckageversuche - Mechanisch eingebrachte Einzelkratzer

Standard-RWDR											
Gegenlauf- fläche	Kratzer- Winkel in °	mittlere Randaufwurf- höhe; <u>neben</u> <u>Laufspur</u> in µm	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspur- tiefe)	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
II 69	30	4,1 ± 0,3	5,3 ± 0,2	0,8 ± 0,1	6,1	329	233	22,39	147	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
II 71		5,2 ± 0,4	5,2 ± 0,4	0,9 ± 0,1	6,1	268	231	25,05	159	ja	
II 73		3,6 ± 0,4	5,1 ± 0,1	1,2 ± 0,0	6,3	335	232	24,29	127	ja	
II 73		2,2 ± 0,7	9,2 ± 0,3	1,0 ± 0,1	10,2	237	249	22,78	145	ja	
II 69		3,1 ± 1,1	12,5 ± 0,4	nicht messbar	12,5	311	236	23,3	156	ja	
II 71		4,2 ± 1,0	11,3 ± 0,3	1,3 ± 0,1	12,6	204	234	21,44	127	ja	
II 69		1,3 ± 0,2	12,2 ± 0,6	nicht messbar	12,2	230	250	22,87	155	15 m/s	
II 73		3,4 ± 1,2	13,2 ± 0,7	1,1 ± 0,1	14,3	328	235	22,88	165	15 m/s	
II 71		3,1 ± 2,8	14,4 ± 1,2	nicht messbar	14,4	329	248	21,75	144	15 m/s *	
II 69		1,0 ± 0,1	15,1 ± 1,0	1,8 ± 0,3	16,9	256	246	22,34	124	15 m/s **	

 dicht bei 5 und 15 m/s
 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
 * ca. 11,3 g Leckage ** ca. 23 g Leckage

Tabelle A.5: Leckageversuch mit mechanisch eingebrachten Kratzerschäden;
Kratzerwinkel: 30°, Gleitgeschwindigkeit: 5 m/s, Drehrichtung:
leckagefördernd

A.1.4 Leckageversuche - Laser-Einzelkratzer

A.1.4.1 10° Kratzerwinkel

Form: breit Solltiefe in µm: 12
 mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 11,9 ± 0,3

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
10	--	--	--	586	19,8	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	591	20,5	--	ja	
	11,0±0,3	0,89	260	597	18,2	129	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit Solltiefe in µm: 15
 mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 14,7 ± 0,3

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
10	14,7±0,2	nicht messbar	286	276	21,4	214	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	14,9±0,2	nicht messbar	355	277	21,4	200	15 m/s	
	14,5±0,2	nicht messbar	315	278	20,9	182	15 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: schmal Solltiefe in µm: 16
 mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 16,3 ± 1,5

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
10	15,1±1,0	2,1±0,1	277	73	19,0	100	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	14,7±0,8	nicht messbar	279	75	18,7	105	ja	
	15,4±0,7	1,7±0,2	213	78	19,3	108	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: schmal Solltiefe in µm: 20
 mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 18,4 ± 0,8

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
10	19,4±0,7	nicht messbar	249	113	20,4	132	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	19,6±0,4	nicht messbar	339	114	19,6	131	15 m/s	
	16,1±0,2	nicht messbar	247	115	19,0	136	15 m/s	

dicht bei 5 und 15 m/s

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.4.2 20° Kratzerwinkel

Form: breit Solltiefe in µm: 9

mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 8,7 ± 0,2

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
20	--	nicht messbar	--	587	19,4	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	nicht messbar	--	592	19,9	--	ja	
	8,7±0,15	nicht messbar	219	598	20,5	133	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit Solltiefe in µm: 12

mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 12,0 ± 0,6

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
20	12,3±0,5	nicht messbar	373	268	21,6	196	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	12,0±0,2	nicht messbar	282	269	22,3	163	15 m/s	
	11,8±0,2	nicht messbar	236	270	22,1	200	15 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: breit Solltiefe in µm: 15

mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 15,3 ± 0,8

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
20	15,1±0,1	nicht messbar	302	255	22,3	152	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	15,0±0,1	nicht messbar	374	256	20,8	144	5 m/s	
	15,8±0,8	nicht messbar	365	257	22,2	148	15 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.4.3 30° Kratzerwinkel

Form: breit		Solltiefe in μm :		9				
mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		9,2		\pm 0,2				
Kratzer-Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
30	--	--	--	588	19,5	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	593	19,4	--	ja	
	9,2 \pm 0,22	nicht messbar	251	599	19,3	134	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: schmal		Solltiefe in μm :		12				
mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		13,7		\pm 0,7				
Kratzer-Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
30	13,4 \pm 0,3	nicht messbar	305	56	19,5	110	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	11,1 \pm 0,4	2,0 \pm 0,2	246	57	20,0	183	ja	
	10,8 \pm 0,4	3,9 \pm 0,1	211	58	19,4	178	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit		Solltiefe in μm :		12				
mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		11,9		\pm 0,7				
Kratzer-Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
30	11,8 \pm 0,4	nicht messbar	193	265	22,0	155	15 m/s *	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	11,6 \pm 0,5	nicht messbar	197	266	22,2	156	15 m/s *	
	12,3 \pm 0,2	nicht messbar	294	267	20,7	151	15 m/s *	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: breit		Solltiefe in μm :		15				
mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		14,8		\pm 0,3				
Kratzer-Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
30	15,5 \pm 0,2	nicht messbar	249	258	20,7	197	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	14,3 \pm 0,2	nicht messbar	312	259	22,4	139	5 m/s	
	14,6 \pm 0,1	nicht messbar	199	264	21,6	190	5 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: schmal Solltiefe in μm : 16

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 15,5 \pm 0,6

Kratzer-Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
30	14,2 \pm 0,2	nicht messbar	265	4	20,6	119	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	12,9 \pm 0,3	2,4 \pm 0,2	190	5	19,9	181	15 m/s	
	13,8 \pm 0,4	3,3 \pm 0,1	197	8	19,9	155	15 m/s	

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: schmal Solltiefe in μm : 16

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 17,4 \pm 0,8

Kratzer-Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
30	15,3 \pm 0,5	1,6 \pm 0,2	236	25	18,9	178	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	13,4 \pm 0,3	5,1 \pm 0,2	74	27	18,4	147	ja	
	14,6 \pm 0,4	2,3 \pm 0,2	218	31	18,8	159	15 m/s	

 dicht bei 5 und 15 m/s

 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: schmal Solltiefe in μm : 20

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 18,4 \pm 2,4

Kratzer-Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
30	20,3 \pm 0,8	nicht messbar	290	66	19,4	135	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	19,2 \pm 1,2	nicht messbar	310	67	19,5	130	15 m/s	
	15,7 \pm 1,9	nicht messbar	250	69	19,9	109	15 m/s	

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: schmal Solltiefe in μm : 25

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 23,3 \pm 0,9

Kratzer-Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
30	23,3 \pm 0,5	nicht messbar	229	71	18,8	99	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	23,2 \pm 0,5	nicht messbar	286	72	18,9	91	5 m/s	
	23,4 \pm 0,5	nicht messbar	237	74	18,9	89	5 m/s	

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.4.4 40° Kratzerwinkel

Form: breit Solltiefe in µm: 9
 mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 9,1 ± 0,8

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
40	8,9±0,1	nicht messbar	352	284	23,6	157	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	9,0±0,3	nicht messbar	314	285	22,3	169	15 m/s	
	8,4±0,7	1,0±0,1	252	286	23,6	149	15 m/s	

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.4.5 50° Kratzerwinkel

Form: breit Solltiefe in µm: 3
 mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 3,1 ± 0,2

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
50	3,0±0,1	nicht messbar	375	289	23,6	151	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	3,1±0,1	nicht messbar	252	290	22,3	167	ja	
	3,1±0,1	nicht messbar	318	291	22,1	140	ja	

 dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit Solltiefe in µm: 6
 mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 6,0 ± 0,2

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
50	6,1±0,1	nicht messbar	371	296	22,6	146	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	5,8±0,1	nicht messbar	249	297	22,1	157	ja	
	6,0±0,1	nicht messbar	341	298	22,5	146	ja	

 dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit Solltiefe in µm: 9
 mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 9,1 ± 0,8

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
50	8,4±0,3	0,9±0,0	263	300	23,3	133	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	8,2±0,7	1,1±0,1	231	301	23,2	147	5 m/s	
	8,7±0,3	nicht messbar	250	302	23,2	169	5 m/s	

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.4.6 60° Kratzerwinkel

Form: breit Solltiefe in µm: 6

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 6,2 ± 0,2

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
60	6,0±0,1	nicht messbar	164	304	23,3	131	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; dann: wenn dicht, 24 h bei 15 m/s
	5,8±0,1	nicht messbar	286	305	22,6	122	ja	
	5,9±0,1	0,9±0,0	350	306	24,3	146	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit Solltiefe in µm: 9

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 9,0 ± 0,2

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
60	8,9±0,1	nicht messbar	214	310	23,2	121	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; dann: wenn dicht, 24 h bei 15 m/s
	9,1±0,1	nicht messbar	235	311	23,9	108	5 m/s	
	9,1±0,1	nicht messbar	316	312	21,4	131	5 m/s	

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.4.7 70° Kratzerwinkel

Form: breit Solltiefe in µm: 6
 mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 5,5 ± 0,5

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
70	5,4±0,4	nicht messbar	532	314	23,1	131	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	4,5±0,2	nicht messbar	395	315	23,8	125	ja	
	5,7±0,2	0,9±0,1	289	316	22,6	150	15 m/s	

dicht bei 5 und 15 m/s
 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: breit Solltiefe in µm: 6
 mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 5,7 ± 0,3

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
70	5,5±0,1	0,6±0,04	242	333	22,1	170	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	5,0±0,24	nicht messbar	367	335	22,6	164	ja	
	6,0±0,07	nicht messbar	278	336	23,5	173	15 m/s	

dicht bei 5 und 15 m/s
 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: breit Solltiefe in µm: 6
 mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 6,4 ± 1,0

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
70	5,7±0,1	0,8±0,1	350	401	23,1	171	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	4,9±1,0	1,2±0,1	262	402	21,8	167	ja	
	5,7±0,1	0,8±0,1	325	403	22,1	142	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s
 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: breit Solltiefe in µm: 9
 mittlere Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 8,5 ± 0,4

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
70	7,7±0,2	0,5±0,1	263	386	22,7	107	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	7,9±0,3	0,8±0,1	285	387	23,1	148	5 m/s	
	--	--	--	388	21,7	--	5 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.4.8 80° Kratzerwinkel

Form: breit Solltiefe in µm: 3

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 3,4 ± 0,4

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
80	2,9±0,09	0,6±0,04	359	322	23,0	114	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	3,0±0,17	0,7±0,29	454	323	21,5	190	ja	
	2,9±0,1	nicht messbar	363	324	22,9	172	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit Solltiefe in µm: 6

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 6,1 ± 0,3

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
80	5,9±0,08	nicht messbar	351	328	22,3	157	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	5,8±0,17	0,6±0,1	251	329	22,7	154	ja	
	5,4±0,19	0,5±0,17	275	330	22,8	163	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit Solltiefe in µm: 9

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 8,4 ± 0,2

Kratzer-Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur-Tiefe in µm	Laufspur-Breite in µm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
80	8,4±0,2	nicht messbar	228	381	21,9	171	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	382	23,7	--	5 m/s	
	--	--	--	383	22,1	--	5 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.5 Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; 0,1 mm Kratzer-Abstand

A.1.5.1 Kratzer-Anzahl: 1

Die Ergebnisse mit Kratzer-Anzahl: 1 können Abschnitt A.1.4.3, Seite 138 und Seite 139 entnommen werden.

A.1.5.2 Kratzer-Anzahl: 2

Form: breit		Anzahl:		2				
		Solltiefe in μm :		6				
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		5,8		\pm 0,4		
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	5,8 \pm 0,19	nicht messbar	248	340	22,5	180	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	5,6 \pm 0,24							
	6,0 \pm 0,14	nicht messbar	260	341	22,7	176	ja	
	6,1 \pm 0,09							
	5,8 \pm 0,12	nicht messbar	307	342	22,5	178	ja	
	5,7 \pm 0,06							

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit		Anzahl:		2				
		Solltiefe in μm :		9				
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		8,6		\pm 0,3		
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	8,5 \pm 0,22	1,1 \pm 0,19	---	340	22,5	180	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	8,5 \pm 0,15							
	8,6 \pm 0,05	nicht messbar	260	341	22,7	176	15 m/s	
	8,6 \pm 0,1							
	8,5 \pm 0,14	nicht messbar	290	342	22,5	178	5 / 15 m/s	
	8,6 \pm 0,13							

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.5.3 Kratzer-Anzahl: 3

		Anzahl:	3					
Form: schmal		Solltiefe in μm :	3					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,6		±	0,9			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
	2,7±0,2	nicht messbar	273	94	18,2	136	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	2,6±0,3							
	2,8±0,2							
0,1	2,5±0,2	nicht messbar	183	95	18,0	72	ja	
	2,6±0,3							
	2,5±0,7							
	2,7±0,2	nicht messbar	309	96	18,9	87	ja	
	2,9±0,1							
	2,5±0,2							

dicht bei 5 und 15 m/s

		Anzahl:	3					
Form: breit		Solltiefe in μm :	6					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		5,7		±	0,5			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
	5,9±0,12	nicht messbar	229	350	21,4	172	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	5,7±0,20							
	5,5±0,24							
0,1	5,6±0,12	nicht messbar	224	351	21,9	149	ja	
	5,9±0,18							
	5,8±0,13							
	5,8±0,16	nicht messbar	331	352	24,0	167	ja	
	5,8±0,18							
	5,7±0,15							

dicht bei 5 und 15 m/s

Anzahl: 3

Form: schmal Solltiefe in μm : 9

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 8,4 \pm 0,9

Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	8,7 \pm 0,2	nicht messbar	303	90	19,5	95	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	8,4 \pm 0,3							
	8,8 \pm 0,6							
	8,3 \pm 0,2	nicht messbar	339	92	18,6	105		
	8,3 \pm 0,2							
	8,4 \pm 0,2							
	8,5 \pm 0,3	nicht messbar	298	93	19,6	110	5 m/s	
	8,2 \pm 0,3							
	8,0 \pm 0,3							

 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Anzahl: 3

Form: breit Solltiefe in μm : 9

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 8,6 \pm 0,4

Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	8,5 \pm 0,12	nicht messbar	219	356	22,7	126	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	8,5 \pm 0,08							
	8,0 \pm 0,05							
	8,5 \pm 0,12	nicht messbar	248	357	23,0	171		
	8,9 \pm 0,23							
	9,0 \pm 0,20							
	8,5 \pm 0,08	nicht messbar	160	358	22,4	150	5 m/s	
	8,7 \pm 0,05							
	8,8 \pm 0,10							

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: schmal		Anzahl: 3		Solltiefe in μm : 12		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 10,8 \pm 1,0		
Kratzerabstand in mm	Kratztiefe in Laufspur in μm	Laufspurtiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	11,9 \pm 0,3	nicht messbar	253	86	20,4	103	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	11,8 \pm 0,3							
	11,3 \pm 0,2							
	11,1 \pm 0,2	nicht messbar	332	88	18,6	96	5 m/s	
	10,7 \pm 0,3							
	10,6 \pm 0,2							
	9,5 \pm 0,6	nicht messbar	288	89	18,7	100	5 m/s	
	10,4 \pm 0,4							
	9,8 \pm 0,4							

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.5.4 Kratzer-Anzahl: 9

		Anzahl:		9					
Form: breit		Solltiefe in μm :		3					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,9		\pm		0,04			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	2,9 \pm 0,04	nicht messbar	286	396	22,7	170	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s;	
	--	--	--	397	22,5	--	ja	wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	--	--	--	398	23,3	--	ja		

 dicht bei 5 und 15 m/s

		Anzahl:		9					
Form: breit		Solltiefe in μm :		4					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		4,7		\pm		0,3			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	--	--	--	718	20,0	--	ja *	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s;	
	4,2 \pm 0,13	nicht messbar	271	719	19,6	122	ja *	wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	4,3 \pm 0,14	0,8 \pm 0,18	234	720	18,9	106	5 m/s		

 dicht bei 5 und 15 m/s

* leichte Ölfeuchte an Dichtkante

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

		Anzahl:		9					
Form: breit		Solltiefe in μm :		6					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		5,8		\pm		0,3			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	5,8 \pm 0,26	nicht messbar	250	408	23,0	228	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s;	
	--	--	--	409	24,2	--	5 m/s	wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	5,8 \pm 0,13	nicht messbar	188	410	23,1	270	5 m/s		

 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.5.5 *Kratzer-Anzahl: 20*

		Anzahl:	20					
Form: breit		Solltiefe in μm :	3					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,8	\pm	0,2				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	--	--	--	446	19,1	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	2,8 \pm 0,21	nicht messbar	251	447	20,3	191	ja	
	--	--	--	448	18,9	--	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

		Anzahl:	20					
Form: breit		Solltiefe in μm :	4					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		4,3	\pm	0,1				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	--	--	--	715	19,8	--	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	4,3 \pm 0,07	nicht messbar	216	716	20,2	93	5 m/s	
	--	--	--	717	19,8	--	5 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

		Anzahl:	20					
Form: breit		Solltiefe in μm :	6					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		5,8	\pm	0,1				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	5,8 \pm 0,12	nicht messbar	204	460	20,4	137	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	461	19,8	--	5 m/s	
	--	--	--	462	20,4	--	5 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.5.6 Kratzer-Anzahl: 50

		Anzahl:		50					
Form: breit		Solltiefe in μm :		3					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,9		\pm 0,2			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	--	--	--	484	19,5	--	ja	je Drehrichtung:	
	2,9 \pm 0,17	nicht messbar	418	485	20,0	127	ja	24 h bei 5 m/s;	
	--	--	--	486	19,5	--	ja	wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	

 dicht bei 5 und 15 m/s

		Anzahl:		50					
Form: breit		Solltiefe in μm :		4					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		4,2		\pm 0,1			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	--	--	--	711	19,6	--	5 m/s	je Drehrichtung:	
	4,2 \pm 0,07	nicht messbar	128	712	20,1	90	5 m/s	24 h bei 5 m/s;	
	--	--	--	713	21,5	--	5 m/s	wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

		Anzahl:		50					
Form: schmal		Solltiefe in μm :		4					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		3,9		\pm 0,7			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	3,9 \pm 0,5	nicht messbar	318	105	19,0	125	5 m/s	je Drehrichtung:	
	4,0 \pm 0,4	nicht messbar	292	106	19,5	128	5 m/s	24 h bei 5 m/s;	
	3,9 \pm 0,2	nicht messbar	236	107	19,5	93	5 m/s	wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.5.7 *Kratzer-Anzahl: 75*

	Anzahl:	75						
Form: breit	Solltiefe in μm :	3						
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		3,2	\pm	0,2				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	3,2 \pm 0,19	nicht messbar	243	604	20,1	113	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	605	18,6	--	5 m/s	
	--	--	--	606	19,2	--	5 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.5.8 *Kratzer-Anzahl: 100*

	Anzahl:	100						
Form: breit	Solltiefe in μm :	3						
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,8	\pm	0,2				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	2,8 \pm 0,15	nicht messbar	398	580	19,0	106	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	2,8 \pm 0,08	nicht messbar	291	581	18,5	111	5 m/s	
	--	--	--	582	20,0	--	5 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.5.9 *Kratzer-Anzahl: 200*

	Anzahl:	200						
Form: breit	Solltiefe in μm :	1						
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		1,0	\pm	0,1				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	1,0 \pm 0,05	nicht messbar	256	723	19,9	125	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	724	20,3	--	ja	
	--	--	--	725	20,1	--	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

A.1.6 Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; 1 mm Kratzer-Abstand

A.1.6.1 Kratzer-Anzahl: 3

		Anzahl:		3					
Form: breit		Solltiefe in μm :		6					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		5,5		\pm		0,5			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
1	5,6 \pm 0,11	nicht messbar	452	376	22,8	146	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	5,5 \pm 0,11								
	5,6 \pm 0,10								
	5,5 \pm 0,23	nicht messbar	435	377	22,4	144	ja		
	5,5 \pm 0,16								
	5,4 \pm 0,08								
	5,7 \pm 0,23	nicht messbar	346	378	20,4	141	ja		
	5,6 \pm 0,22								
	5,5 \pm 0,17								

dicht bei 5 und 15 m/s

		Anzahl:		3					
Form: breit		Solltiefe in μm :		9					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		7,9		\pm		0,6			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
1	8,2 \pm 0,15	nicht messbar	334	372	23,1	127	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	7,9 \pm 0,13								
	7,6 \pm 0,14								
	7,9 \pm 0,33	nicht messbar	173	373	21,5	134	15 m/s		
	7,8 \pm 0,31								
	7,6 \pm 0,23								
	8,1 \pm 0,17	nicht messbar	267	374	22,4	151	5 m/s		
	8,0 \pm 0,16								
	8,4 \pm 0,16								

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.6.2 *Kratzer-Anzahl: 9*

		Anzahl:	9					
Form: breit		Solltiefe in μm :	3					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,9	\pm	0,1				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
1	2,9 \pm 0,13	nicht messbar	310	423	20,1	174	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	424	20,8	--	ja	
	--	--	--	425	21,4	--	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

		Anzahl:	9					
Form: breit		Solltiefe in μm :	6					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		5,7	\pm	0,2				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
1	5,6 \pm 0,18	nicht messbar	291	418	20,8	257	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	5,8 \pm 0,08	nicht messbar	323	419	21,1	267	5 m/s	
	--	--	--	420	21,8	--	5 m/s	

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.6.3 *Kratzer-Anzahl: 50*

		Anzahl:	50					
Form: breit		Solltiefe in μm :	3					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,8	\pm	0,3				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
1	--	--	--	478	20,08	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	479	19,87	--	ja	
	2,8 \pm 0,26	nicht messbar	301	480	19,31	120	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

A.1.7 Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; gleichmäßig auf Umfang verteilte Kratzer

A.1.7.1 Kratzer-Anzahl: 3

				Anzahl:		3			
Form: breit				Solltiefe in μm :		6			
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		5,4		\pm 0,2			
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	5,6 \pm 0,06	nicht messbar	318	367	22,11	184	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	5,4 \pm 0,12								
	5,1 \pm 0,12								
62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	--	nicht messbar	--	368	--	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	--	nicht messbar	--	369	--	--	ja		

dicht bei 5 und 15 m/s

				Anzahl:		3			
Form: breit				Solltiefe in μm :		9			
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		8,5		\pm 0,2			
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	8,4 \pm 0,08	0,5 \pm 0,02	289	363	23,15	139	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	8,1 \pm 0,05								
	7,5 \pm 0,13								
62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	--	--	--	364	21,69	--	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	--	--	--	365	23,52	--	5 m/s		

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.7.2 Kratzer-Anzahl: 9

	Anzahl:	9						
Form: breit	Solltiefe in μm :	3						
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,7	\pm	0,3				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
20,94 gleichmäßig auf Umfang verteilt	2,6 \pm 0,22	nicht messbar	308	431	20,30	217	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	2,7 \pm 0,22	nicht messbar	199	432	20,94	226	ja	
	--	--	--	433	21,35	--	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

	Anzahl:	9						
Form: breit	Solltiefe in μm :	6						
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		5,2	\pm	0,4				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
20,94 gleichmäßig auf Umfang verteilt	5,2 \pm 0,35	nicht messbar	345	440	19,85	173	5 / 15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	441	19,80	--	5 / 15 m/s	
	--	--	--	442	19,34	--	5 / 15 m/s	

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.7.3 Kratzer-Anzahl: 50

	Anzahl:	50						
Form: breit	Solltiefe in μm :	3						
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,7	\pm	0,3				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
3,77 gleichmäßig auf Umfang verteilt	--	--	--	468	20,63	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	469	19,84	--	ja	
	2,7 \pm 0,28	nicht messbar	297	470	20,25	176	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

A.1.7.4 *Kratzer-Anzahl: 75*

		Anzahl:		75					
Form: breit		Solltiefe in μm :		3					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,8		\pm		0,6	
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
2,51 gleichmäßig auf Umfang verteilt	2,8 \pm 0,42	nicht messbar	251	610	18,76	116	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s;	
	--	--	--	611	19,49	--	ja	wenn dicht, dann:	
	2,8 \pm 0,46	nicht messbar	271	612	20,14	128	ja	24 h bei 15 m/s	

dicht bei 5 und 15 m/s

A.1.7.5 *Kratzer-Anzahl: 100*

		Anzahl:		100					
Form: breit		Solltiefe in μm :		3					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		3,2		\pm		0,4	
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
1,88 gleichmäßig auf Umfang verteilt	3,0 \pm 0,26	nicht messbar	231	560	19,04	119	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s;	
	--	--	--	561	19,76	--	ja	wenn dicht, dann:	
	2,9 \pm 0,26	0,4 \pm 0,09	292	562	19,96	131	ja	24 h bei 15 m/s	

dicht bei 5 und 15 m/s

A.1.7.6 Kratzer-Anzahl: 200

		Anzahl:		200					
Form: breit		Solltiefe in μm :		3					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		3,7		\pm 0,2			
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,94 gleichmäßig auf Umfang verteilt	3,7 \pm 0,2	nicht messbar	186	732	18,66	132	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	--	--	--	733	20,05	--	5 m/s		
	--	--	--	734	18,55	--	5 m/s		

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

		Anzahl:		200					
Form: breit		Solltiefe in μm :		1					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		1,0		\pm 0,1			
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,94 gleichmäßig auf Umfang verteilt	--	--	--	576	19,30	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	--	--	--	577	20,08	--	ja		
	1,0 \pm 0,12	nicht messbar	347	578	20,99	159	ja		

 dicht bei 5 und 15 m/s

A.1.7.7 Kratzer-Anzahl: 1000

		Anzahl:		1000					
Form: breit		Solltiefe in μm :		1					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		1,0		\pm 0,1			
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radialkraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,94 gleichmäßig auf Umfang verteilt	1,1 \pm 0,12	nicht messbar	230	737	21,91	144	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	--	--	--	738	19,75	--	5 m/s		
	--	--	--	739	18,74	--	5 m/s		

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.8 Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; Wechselwinkel

A.1.8.1 +/- 30°, Kratzer-Anzahl: 2

Anzahl: 2
 Form: breit Solltiefe in µm: 12
 mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 12,3 ± 0,6

Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
Luftseite /\n 1 x +30° 1 x -30° Ölseite	94,25 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+30	11,4±0,16	1,0±0,20	253	634	20,06	108	ja*	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
		-30	12,1±0,19							
		+30	--	0,8±0,38	200	635	20,24	--	ja*	
		-30	--							
		+30	11,3±0,22	0,8±0,38	200	636	19,60	106	ja*	
		-30	10,9±0,28							



dicht bei 5 und 15 m/s

* leichte Ölfeuchte an Dichtkante

Anzahl: 2
 Form: breit Solltiefe in µm: 15
 mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 13,8 ± 0,6

Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
Luftseite /\n 1 x +30° 1 x -30° Ölseite	94,25 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+30	11,6±0,23	0,8±0,31	243	625	18,98	131	15 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
		-30	12,1±0,18							
		+30	--	0,9±0,24	148	626	20,35	--	15 m/s	
		-30	--							
		+30	14,4±0,21	0,9±0,24	148	627	19,18	115	15 m/s	
		-30	13,8±0,29							



Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.8.2 +/- 30°, Kratzer-Anzahl: 3

Anordnung:		Form: breit		Anzahl: 3		Solltiefe in µm: 9		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 8,8 ± 0,8				
<u>Luftseite</u>	<u>Ölseite</u>	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf	
<u>Luftseite</u> / \	<- Drehrichtung <u>Ölseite</u>	62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+30	8,2±0,44	0,6±0,14	268	670	19,49	122	15 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
			+30	7,5±0,45								
			-30	9,0±0,39	--	--	--	671	19,57	123		15 m/s
			+30	--								
			-30	--	672	18,58	115	15 m/s				
			+30	--								
			-30	--	672	18,58	115	15 m/s				
			+30	--								
-30	--	672	18,58	115	15 m/s							
+30	--											



Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Anordnung:		Form: breit		Anzahl: 3		Solltiefe in µm: 9		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 9,0 ± 0,9				
<u>Luftseite</u>	<u>Ölseite</u>	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf	
<u>Luftseite</u> / \	1 x +30° 2 x -30° <u>Ölseite</u>	62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+30	8,1±0,35	0,6±0,07	239	677	20,31	136	ja*	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
			-30	9,1±0,66								
			-30	8,0±0,44	--	--	--	678	19,91	124		ja*
			+30	--								
			-30	--	679	20,06	135	ja*				
			+30	--								
			-30	--	679	20,06	135	ja*				
			+30	--								
-30	--	679	20,06	135	ja*							
+30	--											



dicht bei 5 und 15 m/s

* leichte Ölfeuchte an Dichtkante

A.1.8.3 +/- 30°, Kratzer-Anzahl: 6

		Anzahl: 6				Solltiefe in µm: 6				mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 5,9 ± 1,0	
Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf	
Luftseite /// \\ 3 x +30° 3 x -30° Ölseite	31,42 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+30	6,2±0,24	nicht messbar	288	707	18,52	121	ja	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
		+30	5,0±0,18								
		+30	5,1±0,14								
		-30	6,5±0,23								
		-30	6,3±0,29								
		-30	5,7±0,32								
		+30	--								
		+30	--								
		+30	--								
		-30	--								
		-30	--								
		-30	--								
		+30	5,5±0,53								
		+30	5,7±0,15								
		+30	5,6±0,31								
		-30	6,1±0,39								
		-30	6,3±0,34								
		-30	6,3±0,29								

dicht bei 5 und 15 m/s

Form: breit
 Anzahl: 6
 Solltiefe in μm : 9
 mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 9,4 \pm 1,0

Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in $^\circ$	Kratztiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur- Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
Luftseite /// \\\ 3 x +30° 3 x -30° Ölseite	31,42 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+30	8,9 \pm 0,23	0,8 \pm 0,13	191	702	18,86	104	15 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
		+30	7,1 \pm 0,13							
		+30	7,0 \pm 0,09							
		-30	9,2 \pm 0,25							
		-30	8,9 \pm 0,30							
		-30	7,8 \pm 0,30							
	+30		-	-	-	703	19,37	-	15 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	+30									
	+30									
	-30									
	-30									
	-30									
			1,2 \pm 0,56	145	704	19,34	102	15 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
+30	8,7 \pm 0,3									
+30	8,3 \pm 0,26									
+30	7,8 \pm 0,44									
-30	9,1 \pm 0,57									
-30	8,8 \pm 0,2									



Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.8.4 +/- 30°, Kratzer-Anzahl: 200

		Form: breit		Anzahl: 200		Solltiefe in µm: 3		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm: 3,4 ± 0,5			
Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf	
Luftseite //////////////// 100 x +30° 100 x - 30° Ölseite	0,94	gleichmäßig auf Umfang verteilt	+30	3,2±0,08	0,7±0,18	243	616	18,74	151	ja	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
			+30	2,5±0,23							
			+30	2,3±0,28							
			-30	2,7±0,21							
			-30	2,8±0,18							
			-30	2,6±0,13							
			+30								
			+30								
			+30	--							
			-30	--							
			-30	--							
			-30	--							
			+30								
			+30								
+30	--										
-30	--										
-30											
-30											

dicht bei 5 und 15 m/s

A.1.8.5 +/- 70°, Kratzer-Anzahl: 2

		Anzahl:		2						
		Form: breit		Solltiefe in µm:		6				
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm:		6,0 ± 0,5						
Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
Luftseite /\n 1 x +70° 1 x -70° Ölseite	94,25 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+70	--	--	--	656	19,72	--	ja*	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
		-70	--	--	--					
		+70	5,1±0,24	nicht messbar	326	657	19,21	132	ja*	
		-70	5,6±0,36							
		+70	5,9±0,15	0,7±0,09	295	658	19,28	162	ja*	
		-70	6,1±0,17							



dicht bei 5 und 15 m/s

* leichte Ölfeuchte an Dichtkante

		Anzahl:		2						
		Form: breit		Solltiefe in µm:		9				
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm:		8,4 ± 0,7						
Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
Luftseite /\n 1 x +70° 1 x -70° Ölseite	94,25 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+70	8,8±0,14	0,6±0,22	337	648	19,72	105	15 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
		-70	8,5±0,15							
		+70	7,1±0,28	nicht messbar	378	649	19,37	109	15 m/s	
		-70	7,9±0,54							
		+70	--	--	--	650	18,65	--	15 m/s	
		-70	--							



Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

		Anzahl:		2						
		Form: breit		Solltiefe in µm:		12				
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm:		11,5 ± 0,8						
Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf
Luftseite /\n 1 x +70° 1 x -70° Ölseite	94,25 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+70	11,8±0,15	0,7±0,23	223	641	19,89	116	15 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
		-70	11,0±0,25							
		+70	9,3±0,10	0,6±0,15	199	642	18,45	97	15 m/s	
		-70	10,7±0,55							
		+70	10,7±0,12	0,5±0,09	249	643	18,70	99	15 m/s	
		-70	12,0±0,26							



Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.1.8.6 +/- 70°, Kratzer-Anzahl: 3

		Anzahl:		3							
		Form: breit		Solltiefe in µm:		3					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm:		3,2		±		0,4			
Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf	
Luftseite /// 3 x +70° Ölseite	62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+70	2,9±0,21								
		+70	3,1±0,19	0,6±0,10	282	698	20,40	137	ja*		
		+70	2,8±0,09								
		+70	2,9±0,12	zu gering; nicht messbar	174	699	19,02	108	5 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
		+70	9,6±0,13 **								
		+70	2,7±0,11								
		+70	--	--	--	700	18,65	--	ja*		
		+70									



dicht bei 5 und 15 m/s * leichte Ölfeuchte an Dichtkante
Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

** fehlerhafte Fertigung (Wert bei mittlerer Kratzertiefe unberücksichtigt)

		Anzahl:		3							
		Form: breit		Solltiefe in µm:		6					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in µm:		5,8		±		0,4			
Anordnung: Luftseite <- Drehrichtung Ölseite	Kratzer- abstand in mm	Winkel in °	Kratzertiefe in Laufspur in µm	Laufspur- Tiefe in µm	Laufspur- Breite in µm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in µm	Dichtheit	Versuchsablauf	
Luftseite /// 3 x +70° Ölseite	62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+70	4,8±0,05	zu gering; nicht messbar							
		+70	5,8±0,28		172	692	18,34	107	5 m/s		
		+70	6,5±0,14								
		+70	5,8±0,10	zu gering; nicht messbar	220	693	20,27	122	5 m/s	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
		+70	6,5±0,24								
		+70	5,1±0,10								
		+70	--	--	--	694	22,21	--	5 m/s		
		+70									



Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Anzahl: 3

Form: breit

Solltiefe in μm : 6

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 5,6 \pm 0,8

Anordnung: <u>Luftseite</u> < Drehrichtung <u>Ölseite</u>	Kratzer- abstand in mm	Winkel in $^\circ$	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur- Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf		
<u>Luftseite</u> // \	2 x +70° 1 x -70°	62,83 gleichmäßig auf Umfang verteilt	+70	4,5 \pm 0,30	0,7 \pm 0,09	249	683	18,38	130	ja*	Drehrichtung: CCW 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
			+70	4,6 \pm 0,17								
			-70	5,4 \pm 0,34	0,6 \pm 0,13	288	684	20,02	145	ja*		
			+70	4,8 \pm 0,18								
			+70	4,8 \pm 0,22	--	--	--	685	19,63	--		ja*
			-70	5,3 \pm 0,55								
			+70									
			+70									
			-70									



dicht bei 5 und 15 m/s

* leichte Ölfeuchte an Dichtkante

A.2 LECKAGEVERSUCHE MIT EINFACHDRALL-RWDR

A.2.1 Leckageversuche - Laser-Mehrfachkratzer; 0,1 mm Kratzer-Abstand

A.2.1.1 Kratzer-Anzahl: 1

Form: breit		Anzahl:		1					
		Solltiefe in μm :		9					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		10,0		\pm		0,3	
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
--	9,6 \pm 0,13	0,8 \pm 0,2	628	ED 50	22,0	358	ja *	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s;	
--	9,5 \pm 0,14	0,7 \pm 0,1	612	ED_II 46	18,9 ***	329	ja	wenn dicht, dann:	
--	9,5 \pm 0,08	nicht messbar	409	ED_II 47	21,5	345	ja	24 h bei 15 m/s	

dicht bei 5 und 15 m/s

* leichte Ölfeuchte an Dichtkante

*** Messung nach Versuch

Form: breit		Anzahl:		1					
		Solltiefe in μm :		12					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		12,2		\pm		0,3	
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
--	12,1 \pm 0,16	nicht messbar	561	ED 31	22,2	344	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s;	
--	--	--	--	ED 32	21,4	--	5 m/s	wenn dicht, dann:	
--	12,2 \pm 0,2	nicht messbar	429	ED 33	22,7	362	5 m/s	24 h bei 15 m/s	

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Form: schmal		Anzahl:		1					
		Solltiefe in μm :		15					
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		14,2		\pm		1,0	
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
--	14,6 \pm 0,5	nicht messbar	448	ED_II 3	21,4	244	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s;	
--	15,4 \pm 0,6	nicht messbar	417	ED_II 5	21,0	228	ja	wenn dicht, dann:	
--	12,5 \pm 0,7	nicht messbar	366	ED_II 8	21,0	234	ja	24 h bei 15 m/s	

dicht bei 5 und 15 m/s

Anzahl: 1

Form: breit Solltiefe in μm : 15

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 15,2 \pm 0,2

Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
	15,4 \pm 0,10	nicht messbar	592	ED 28	26,7	332	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
--	--	--	--	ED 29	22,8	--	5 m/s	
	15,0 \pm 0,2	nicht messbar	711	ED 30	25,3	324	5 m/s	

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.2.1.2 *Kratzer-Anzahl: 2*

Anzahl: 2

Form: breit Solltiefe in μm : 9

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 8,9 \pm 0,2

Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
	8,8 \pm 0,14 9,0 \pm 0,16	nicht messbar	537	ED 34	23,0	360	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
0,1	--	--	--	ED 35	20,6	--	5 m/s	
	--	--	--	ED 36	23,4	--	5 m/s	

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Anzahl: 2

Form: breit Solltiefe in μm : 12

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 12,0 \pm 0,2

Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
	12,0 \pm 0,14 11,9 \pm 0,11	nicht messbar	592	ED 19	24,5	347	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
0,1	--	--	--	ED 20	25,7	--	5 m/s	
	--	--	--	ED 21	24,0	--	5 m/s	

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

				Anzahl:		2			
Form: breit				Solltiefe in μm :		15			
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		15,1		\pm 0,2			
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	$15,0 \pm 0,14$	nicht messbar	586	ED 16	26,2	343	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	$15,1 \pm 0,10$								
	--	--	--	ED 17	22,2	--	5 m/s		
	--	--	--	ED 18	24,6	--	5 m/s		

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.2.1.3 Kratzer-Anzahl: 3

				Anzahl:		3			
Form: breit				Solltiefe in μm :		6			
		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		6,3		\pm 0,2			
Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur-Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs-Nr.	Radial-kraft in N	Dichtkanten-Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	--	--	--	ED 43	22,4	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	$5,8 \pm 0,10$	$0,8 \pm 0,18$	455	ED 44	24,9	312	5 m/s		
	$6,0 \pm 0,06$								
	$6,0 \pm 0,07$								
	$5,9 \pm 0,09$	nicht messbar	491	ED 45	22,2	357	ja		
	$5,8 \pm 0,13$								
$5,8 \pm 0,05$									

dicht bei 5 und 15 m/s

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Anzahl: 3

Form: schmal Solltiefe in μm : 9

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 7,8 \pm 1,9

Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	7,4 \pm 0,8	nicht messbar	338	ED_II 20	23,2	329	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	8,1 \pm 0,8								
	7,9 \pm 0,7								
	7,0 \pm 1	nicht messbar	300	ED_II 21	22,1	245	15 m/s		
	8,0 \pm 0,4								
	7,9 \pm 0,3								
	8,0 \pm 0,4	nicht messbar	382	ED_II 22	22,0	324	ja		
	7,9 \pm 0,4								
	7,9 \pm 0,4								

	dicht bei 5 und 15 m/s
	Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Anzahl: 3

Form: schmal Solltiefe in μm : 12

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 10,9 \pm 2,8

Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
0,1	10,7 \pm 1,0	nicht messbar	410	ED_II 12	21,4	248	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	12,0 \pm 0,5								
	11,6 \pm 0,4								
	9,5 \pm 1,7	nicht messbar	374	ED_II 13	22,3	319	15 m/s		
	10,7 \pm 0,8								
	11,7 \pm 0,9								
	10,0 \pm 0,9	nicht messbar	-	ED_II 14	21,2	271	15 m/s		
	10,6 \pm 1,0								
	10,9 \pm 0,3								

	Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
--	--

		Anzahl:		3					
Form: breit		Solltiefe in μm :		9					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		8,4		\pm		0,2			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
	8,5 \pm 0,11	nicht messbar	548	ED 10	24,2	344	ja		
	8,6 \pm 0,08								
	8,2 \pm 0,13								
0,1	--	--	--	ED 11	20,9	--	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
	--	--	--	ED 12	22,6	--	ja		

dicht bei 5 und 15 m/s

A.2.1.4 Kratzer-Anzahl: 9

		Anzahl:		9					
Form: breit		Solltiefe in μm :		6					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		6,0		\pm		0,2			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
	--	--	--	ED 40	22,5	--	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
0,1	6,0 \pm 0,1	nicht messbar	401	ED 41	23,2	350	5 / 15m/s		
	5,9 \pm 0,13	nicht messbar	625	ED 42	25,0	334	5 m/s		

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

		Anzahl:		9					
Form: schmal		Solltiefe in μm :		9					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		7,9		\pm		0,5			
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf	
	7,8 \pm 0,2	nicht messbar	387	ED_II 23	22,0	232	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s	
0,1	8,2 \pm 0,3	nicht messbar	356	ED_II 24	20,8	350	15 m/s		
	7,6 \pm 0,3	nicht messbar	445	ED_II 25	22,4	351	ja		

dicht bei 5 und 15 m/s

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Anzahl: 9

Form: breit Solltiefe in μm : 9

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 8,3 \pm 0,1

Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
1	8,1 \pm 0,08	nicht messbar	485	ED 37	30,4	350	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	8,5 \pm 0,11	nicht messbar	483	ED 38	23,5	340	ja *	
	--	--	--	ED 39	22,6	--	5 m/s	

 dicht bei 5 und 15 m/s * leichte Ölfeuchte an Dichtkante

 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.2.1.5 Kratzer-Anzahl: 20

Anzahl: 20

Form: breit Solltiefe in μm : 4

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 4,3 \pm 0,2

Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	--	--	--	ED 25	24,3	--	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	4,3 \pm 0,16	nicht messbar	467	ED 26	25,3	354	15 m/s	
	--	--	--	ED 27	24,0	--	5 m/s	

 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

Anzahl: 20

Form: breit Solltiefe in μm : 6

mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 5,8 \pm 0,2

Kratzer-abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	5,8 \pm 0,12	nicht messbar	609	ED 7	22,6	347	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	5,8 \pm 0,13	nicht messbar	581	ED 8	21,1	301	5 / 15m/s	
	--	--	--	ED 9	24,9	--	5 m/s	

 Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

 Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.2.1.6 Kratzer-Anzahl: 50

		Anzahl:	50					
Form: schmal		Solltiefe in μm :	4					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		4,0	\pm	0,8				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	4,2 \pm 0,6	nicht messbar	368	ED_II 31	21,9	364	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	3,9 \pm 0,4	nicht messbar	421	ED_II 32	21,0	383	ja	
	4,0 \pm 0,3	nicht messbar	444	ED_II 33	21,2	273	ja	

	dicht bei 5 und 15 m/s
--	------------------------

		Anzahl:	50					
Form: breit		Solltiefe in μm :	4					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		4,4	\pm	0,6				
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	4,4 \pm 0,60	nicht messbar	552	ED 1	23,1	330	15 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	ED 2	20,9	--	ja **	
	--	--	--	ED 3	22,1	--	15 m/s	

	dicht bei 5 und 15 m/s
--	------------------------

** nicht auf Schaden gelaufen

	Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit
--	--

A.2.1.7 Kratzer-Anzahl: 100

		Anzahl:	100					
Form: breit		Solltiefe in μm :	3					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		2,8	\pm	0,2				
Kratzer- abstand in mm	Kratztiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	2,8 \pm 0,15	nicht messbar	398	ED 13	22,3	325	ja *	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	ED 14	25,7	--	ja *	
	--	--	--	ED 15	22,5	--	ja *	

dicht bei 5 und 15 m/s * leichte Ölfeuchte an Dichtkante

		Anzahl:	100					
Form: schmal		Solltiefe in μm :	4					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		4,3	\pm	0,4				
Kratzer- abstand in mm	Kratztiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	4,2 \pm 0,3	nicht messbar	453	27	21,1	292	ja	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	4,2 \pm 0,4	nicht messbar	413	29	21,9	355	ja	
	4,4 \pm 0,4	nicht messbar	484	30	21,6	308	ja	

dicht bei 5 und 15 m/s

		Anzahl:	100					
Form: breit		Solltiefe in μm :	4					
mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm :		4,3	\pm	0,4				
Kratzer- abstand in mm	Kratztiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	4,3 \pm 0,40	nicht messbar	563	ED 4	23,5	338	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	ED 5	23,8	--	5 m/s	
	--	--	--	ED 6	23,1	--	5 m/s	

Leckage ohne Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit

A.2.1.8 Kratzer-Anzahl: 200

Form: breit		Anzahl: 200		Solltiefe in μm : 3		mittlere Kratzertiefe (Kratzer- + Laufspurtiefe) in μm : 4,3 \pm 0,4		
Kratzer- abstand in mm	Kratzertiefe in Laufspur in μm	Laufspur- Tiefe in μm	Laufspur-Breite in μm	Dichtungs- Nr.	Radial- kraft in N	Dichtkanten- Breite (auf Hohlwelle) in μm	Dichtheit	Versuchsablauf
0,1	3,0 \pm 0,13	nicht messbar	443	ED 46	24,4	361	5 m/s	je Drehrichtung: 24 h bei 5 m/s; wenn dicht, dann: 24 h bei 15 m/s
	--	--	--	ED 47	23,4	--	ja *	
	2,9 \pm 0,16	nicht messbar	414	ED 48	26,7	340	ja *	
	--	--	--	ED 49	25,0	--	5 m/s	
--	--	--	--	ED_II 45	22,0	--	ja	

	dicht bei 5 und 15 m/s	* leichte Ölfeuchte an Dichtkante
	Leckage mit Abtropfen bei aufgeführter Gleitgeschwindigkeit	

A.3 SIMULATION

A.3.1 Randbedingungen für Reynolds-Solver und Navier-Stokes-Solver

Folgende Randbedingungen (BC¹) wurden für den Reynolds-Solver (RS) und den Navier-Stokes-Solver (NSS) verwendet (vgl. Abbildung A.1):

	RS	NSS
BC 1	periodisch zu BC 2	-
BC 2	-	-
BC 3	$p_{\text{amb}} = 0,1 \text{ MPa}$	-
BC 4	$p_{\text{amb}} = 0,1 \text{ MPa}$	-
BC 5	-	$v_x = 5 \text{ m/s}$
BC 6	-	$v_x = 0 \text{ m/s}$
$v_{\text{rel},x}$	5 m/s	-
p_{cav}	0 Pa	-
h_0	0,5 μm	-
η (100 °C)	0,0093 Pa s	-
ρ (100 °C)	802 kg/m ³	-

Tabelle A.6: Solver-Randbedingungen

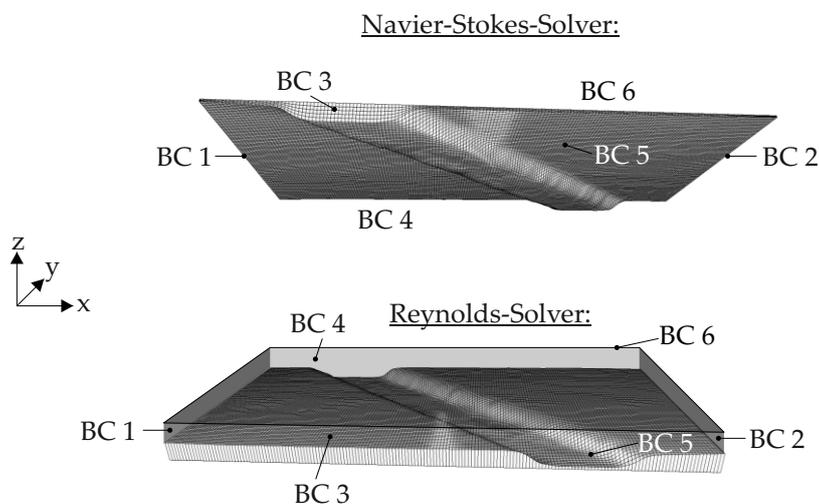


Abbildung A.1: Übersicht der Randbedingungen (BC) von Navier-Stokes-Solver (NSS) und Reynolds-Solver (RS)

¹ Randbedingung: engl. Boundary Condition (BC)

A.3.2 Geometrien der untersuchten Einzelkratzer

Winkel in °		50
Breite (in Kratzerachse) in μm		50
Breite (tangential) in μm		78
Kratzer-Tiefe in μm	Querschnitt in μm^2	eff. Kratzer-Tiefe in μm
1	52	0,7
2	104	1,3
3	156	2,0
4	208	2,7
6	312	4,0
8	416	5,3
10	520	6,7
12	624	8,0
14	728	9,3

Tabelle A.7: Geometrie synthetischer Einzelkratzer; 50 μm Breite

Winkel in °		50
Breite (in Kratzerachse) in μm		100
Breite (tangential) in μm		156
Kratzer-Tiefe in μm	Querschnitt in μm^2	eff. Kratzer-Tiefe in μm
1	130	0,8
2	260	1,7
3	390	2,5
4	520	3,3
6	780	5,0
8	1040	6,7
10	1300	8,3
12	1560	10,0
14	1820	11,7

Tabelle A.8: Geometrie synthetischer Einzelkratzer; 100 μm Breite

ρ (100 °C) in kg/m ³	802
η (100 °C) in Pa s	0,0093
u in m/s	5
Kratzerbreite (in Kratzerachse) in μm	50
Kratzertiefe in μm	1-14
<hr/>	
Kratzer-Breite (tangential)	in μm
b (10°)	50,8
b (20°)	53,2
b (30°)	57,7
b (40°)	65,3
b (50°)	77,8
b (60°)	100,0
b (70°)	146,2
b (80°)	287,9

Tabelle A.9: Parameter zur Berechnung der *modifizierten Reynolds-Zahl* Re_x unterschiedlicher Einzelkratzer

LEBENS LAUF

PERSÖNLICHE DATEN

Name Mark Philipp Matus (geb. Schroeder)
Geburtsdaten 31.01.1985 in Hannover
Nationalität deutsch
Familienstand verheiratet, zwei Kinder

BERUFSTÄTIGKEIT

April 2022 – heute *ZF CV Systems Hannover GmbH*
Juni 2013 – März 2022 *Leibniz Universität Hannover,*
Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT):
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Nov. 2008 – Mai 2013 *Leibniz Universität Hannover,*
Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT):
Wissenschaftliche Hilfskraft

STUDIUM

Okt. 2013 Förderpreis der Gesellschaft für Tribologie (GfT),
für Diplomarbeit
Okt. 2005 – März 2013 *Leibniz Universität Hannover,*
Maschinenbaustudium (Diplom)

AUSLANDSERFAHRUNGEN

Mai 2011 – Okt. 2011 6-monatiges ingenieurnahes Fachpraktikum
bei *Delphi Diesel Systems* in Gillingham, England

SCHULE

Aug. 1997 – Juni 2004 *Georg-Büchner Gymnasium, Letter*
Abschluss: Abitur

COLOPHON

This document was typeset using the typographical look-and-feel `classicthesis` developed by André Miede and Ivo Pletikosić. The style was inspired by Robert Bringhurst's seminal book on typography "*The Elements of Typographic Style*". `classicthesis` is available for both \LaTeX and \LyX :

<https://bitbucket.org/amiede/classicthesis/>