

Thomas Kunstfeld

Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen

D 93
ISBN 3 - 936100 – 16 – 0

Institut für Maschinenelemente

Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 6170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen

Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Dipl.-Ing. Thomas Kunstfeld
geboren in Kirchheim unter Teck

Hauptberichter: Professor Dr.-Ing. habil. W. Haas

Mitberichter: Professor Dr.-Ing. T. Maier

Tag der Einreichung: 11. Mai 2005

Tag der mündlichen Prüfung: 13. September 2005

Institut für Maschinenelemente

2005

Meinen Eltern

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas, Leiter des Bereichs Dichtungstechnik am Institut für Maschinenelemente, für die Ermöglichung dieser Arbeit sowie für die fachliche und menschliche Unterstützung während ihrer Entstehung.

Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Maier, Leiter des Forschungs- und Lehrgebiets Technisches Design am Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau, danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Direktor des Institut für Maschinenelemente, danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen während meiner Tätigkeit am Institut.

Den Kollegen am Institut, sowie den zahlreichen wissenschaftlichen Hilfskräften und Studenten danke ich für ihre Unterstützung und das besonders angenehme und freundschaftliche Arbeitsklima.

Kirchheim, im September 2005

Thomas Kunstfeld

Inhalt

Abstract	V
Abkürzungen und Formelzeichen	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Dichtmechanismen des Radial-Wellendichtring	3
2.1.1 Die Verzerrungshypothese	4
2.1.2 Die Seitenstromhypothese	6
2.1.3 Die Wischkantenhypothese	6
2.2 Anforderungen an die Wellenoberfläche - Förderung durch Oberflächenstrukturen - Reibung und Verschleiß	7
2.3 Oberflächenmessung und Kenngrößen.....	10
2.4 Entstehung und Bezeichnung von Drall	14
2.5 Herstellung der Wellenoberflächen.....	15
2.6 Förderwertmessung von Dichtring und Dichtsystem.....	16
2.6.1 Öltropfenmethode.....	18
2.6.2 Überflutung der Bodenseite.....	20
2.6.3 Vergleichende Meßmethoden.....	21
2.7 Förderwertmessung der Wellenoberfläche.....	22
3 Versuchseinrichtungen, Versuchsdurchführung und untersuchte Wellenoberflächen	26
3.1 Versuchseinrichtungen	26
3.1.1 Zwölfzellenprüfstand (ZZP).....	26
3.1.2 Sechsspindelprüfstand	28
3.1.3 Einzeldichtungsprüfstand (EDP).....	29

II

3.1.4	Radialkraftmessgerät.....	30
3.1.5	Berührbreitenmessgerät	31
3.1.6	Oberflächentopographiemessgerät mit chromatischem Sensor	32
3.1.7	Drallmessplatz mit Hommel T8000.....	34
3.2	Untersuchungsmethoden.....	35
3.2.1	Förderwertbestimmung der Wellenoberfläche.....	35
3.2.2	Förderwertbestimmung des gesamten Dichtsystems - Modifizierte Zweikammermethode.....	37
3.2.3	240 Stunden Dichtheitsuntersuchung	39
3.2.4	1.000 Stunden Langzeituntersuchung	40
3.2.5	Abzudichtende Flüssigkeiten	41
3.3	Untersuchte Wellenoberflächen.....	41
3.3.1	Im Einstich geschliffene Wellenoberflächen	44
3.3.2	Längs-hartgedrehte Wellenoberflächen	45
3.3.3	Verschleißuntersuchung bei längs-hartgedrehten Wellenoberflächen.....	48
3.3.4	Längs-hartgedrehte Wellenoberflächen Wiper-Schneidengeometrie	49
3.3.5	Hartdrehen ohne axialen Vorschub.....	50
3.3.6	Längs-hartgedrehte Wellenoberflächen, überlagerten Schwingungen	53
3.3.7	Längs-weichgedrehte Wellenoberflächen.....	56
3.3.8	Hartgedrehte Wellenoberfläche aussen-kurzhubgehont (Superfinish)	59
3.3.9	Hartgedrehte Wellenoberfläche mit polierter Mikrostruktur	60
3.4	Übersicht untersuchte Wellenoberflächen und durchgeführtes Untersuchungsprogramm	62
4	Ergebnisse.....	64
4.1	Förderwertbestimmung der Wellenoberflächen.....	64
4.2	240 Stunden Dichtheitsuntersuchung	75
4.2.1	Verschleiß der Dichtringe	75
4.2.2	Verschleiß der Wellenoberflächen.....	75
4.3	1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung.....	76
4.3.1	Verschleiß der Dichtringe	76
4.3.2	Verschleiß der Wellenoberflächen.....	77

4.4	Förderwertbestimmung des Dichtsystems während des Betriebs	78
4.4.1	Verschleiß der Dichtringe.....	84
4.4.2	Verschleiß der Wellenoberflächen	84
4.5	Hartgedrehte Wellenoberfläche aussen-kurzhubgehont (Superfinish).....	87
4.6	Hartgedrehte Wellenoberfläche mit einpolierter Mikrostruktur.....	87
4.7	Drallmessung	92
5	Neuer Ansatz zur Charakterisierung und Bewertung der Topografie von Wellenoberflächen	94
5.1	Auswertung der Topografie mittels Bildverarbeitung.....	95
5.2	Beispielauswertungen von repräsentativen Wellenoberflächen.....	103
5.3	Charakterisierung und Klassifizierung der Wellenoberflächen.....	107
6	Bedeutung für die Praxis – Anwendung der Ergebnisse	111
6.1	Allgemeine Erkenntnis der durchgeführten Untersuchungen	111
6.2	Verfahren zur Qualifizierung von Wellenoberflächen als Gegenauflfläche von Radial-Wellendichtringen	113
6.2.1	Vermessung und Beurteilung der Wellenoberflächentopographie.....	115
6.2.2	Bestimmung der Fördereigenschaften der Wellenoberfläche	115
6.2.3	Dichtheitsuntersuchung im Dichtsystem.....	116
6.2.4	Beobachtung der Systemförderung im Langzeitbetrieb	116
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	117
8	Literatur	120

Abstract

The shaft surface is of crucial importance for the reliable performance of a radial lip sealing system. As the tribological counter piece the shaft surface has both a direct and an indirect influence on the sealing system. The pumping ability may generate leakage. The tribological contact conditions caused by the shaft surface influence the shape and therefore the performance of the elastomer made lip seal. As a matter of fact, the shaft surfaces therefore are usually plunge ground. The grinding process causes high machine and production costs. As a result, the industry carries on a significant effort to find alternative manufacturing methods to replace the plunge grinding process. The goal of this study was on the one hand the examination of alternative shaft surfaces and on the other hand the development of a proceeding for testing and evaluating appropriate shaft surfaces, regarding their suitability as counter face for radial shaft seals.

For that purpose a four-level proceeding was developed during this work. Based on the optically measured 3D-surface topography, the characteristic curves of the shaft surface are computed. This procedure is based on image processing algorithms. The surface texture can be evaluated and classified by means of these characteristic curves.

In the second step the pumping rate of the shaft surfaces is determined in both rotation directions. If the examined shaft surface is further considered as suitable, a functional test of the whole sealing system will be carried out in a third step.

The fourth and last step contains the investigation of the sealing system functionality during an at least 1000 hour lasting period to secure the long-term characteristics. That is why the so called modified two-chamber method was developed. By the measurement of the system pumping rate in regular intervals, its change and thus the change of the sealing function in the whole sealing system can be measured. In this way, the assigned shaft surface and the remaining system components can be judged, regarding their effect on the sealing performance and their long-term characteristics. Thus, extensive investigations will be offered in future due to the possibility of directly “looking” into the sealing system.

VI

The emphasis of the examined manufacturing methods was on the turning process. Parameter studies for traversal turned shaft surfaces were accomplished using unhardened and hardened materials. Following parameters were varied: pitch, edge-radius, influence of machine and/or tool oscillations and tool-wear. Finishing procedures, pitch less turning methods, tangential turning methods and plunge-turning were examined as well.

In principle the turned shaft surfaces, made of hardened or non-hardened steel, are suitable counter faces for radial lip seals. Particularly the hardened lengthwise turned shaft surfaces show low pumping rates and no pumping ability depending on the rotation direction. The non-hardened lengthwise turned shaft surfaces show a partial pumping behaviour dependent on the direction of rotation, which however had no negative effects on the sealing performance. The pitch less turned hardened shaft surfaces are also suitable for the use as counter face in radial lip sealing systems. The very smooth surface leads to low pumping rates and poor interaction with the lip seal.

Finishing procedures or short-stroke hone cause small, diagonally orientated scoring structures that lead to high pumping activity. Strong leakage or unfavourable lubrication conditions in the sealing system are the result. Therefore, these Procedures are not recommendable.

The macroscopic turning spiral has obviously no influence on the pumping characteristic of the shaft surface. Brought in "micro-structures" however show a substantial influence. This leads to the conclusion, that the pumping characteristic of the shaft surface is determined almost exclusively through its "micro-structure", those can be derived order-of-magnitude-wise clearly underneath e.g. a turning spiral (pitch approx. 0.05 to 0.3 mm).

Based on the proceeding presented here, arbitrary shaft surfaces can be examined and judged concerning their sealing suitability. In future, a characteristic value, based on the characteristic curves is conceivable. For the improvement of the statement possibilities further experiences, regarding the effects of certain surface textures or their

shape (e.g. aspect ratio) etc. are necessary. Therefore the observation of the system pumping rate in the entire sealing system offers extensive examination possibilities.

To improve the four-level proceeding to evaluate the shaft surfaces, a direct computation of measured 3D database and a multi purpose filtering strategy, that is not especially fitted on the turning spirals, appears meaningful. Thus the dissolution in depth direction could be improved and standardized. The break even between relevant micro-structures and uninteresting macro-structures should be defined by resuming research work more exactly.

Abkürzungen und Formelzeichen

RWDR		Radial-Wellendichtring
A	mm ²	Fläche
b	mm	Berührbreite
C		Spaltenzahl
D	mm	Durchmesser
DMS		Dehnmessstreifen
EDP		Einzeldichtungsprüfstand
f		Reibzahl
F _r	N	Radialkraft
G		Gümbelzahl
η	mPa·s	dynamische Viskosität
h	mm	Spalthöhe
M _r	Nm	Reibmoment
N		Pixelanzahl
P	W	Reibleistung
p _l	N/mm	Linienpressung
ρ	kg/dm ³	Dichte
R		Zeilenzahl
R _a	μm	arithmetischer Mittenrauwert
R _{max}	μm	maximale Rautiefe
R _z	μm	gemittelte Rautiefe
s		Summe der Filterkoeffizienten
T	K	Temperatur
v	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit
ZZP		Zwölfzellenprüfstand
\dot{V}	ml/h	Volumenstrom

1 Einleitung

Der Radial-Wellendichtring, Bild 1, ist ein millionenfach verbautes Maschinenelement. Von der Waschmaschine über Pumpen bis hin zum Verbrennungsmotor und Fahrzeuggetriebe wird dieser zur Abdichtung druckloser Fluide aller Art an Wellendurchtrittsstellen eingesetzt.

Das Dichtsystem besteht dabei immer aus mindestens drei Komponenten, dem abzudichtenden Fluid, dem Dichtring als Kaufteil und der meist vom Hersteller des Aggregats zu fertigenden Wellenoberfläche. Dieser wird in der aktuellen Diskussion um Kostenreduktion in der Fertigung eine erhöhte Aufmerksamkeit zu teil. Sie wird bislang in der Mehrzahl aller Anwendungsfälle im Einstich geschliffen. Da dieses Verfahren aufgrund teurer Maschinen und langen Bearbeitungszeiten (für Wellenoberflächen im Dichtsystem geforderte Ausfunkzeit: ca. 20 bis 30 s) hohe Herstellungskosten verursacht, ist das Interesse der Industrie an kostengünstigen alternativen Fertigungsverfahren groß.

Eine Alternative zum Schleifen im Einstich ist das Hartdrehen. Hierbei wird das gehärtete Werkstückrohteil gegebenenfalls in einer Aufspannung komplett fertigbearbeitet. Umspannen und teure Schleifbearbeitung fallen weg. Unterschiedliche Drehverfahren sind dabei möglich. Neben dem Standardverfahren Längsdrehen kommt das Drehen im Einstich sowie das Tangentialdrehen in Frage. Jedoch ist die Funktionalität von hartgedrehten Wellenoberflächen in Verbindung mit Radial-Wellendichtringen noch weitgehend unerforscht und in der Praxis entsprechend umstritten. Ungeklärte Ausfälle im Feldversuch, Unwissen bzgl. der zu verwendenden Herstellungsparameter und fehlende Erfahrung mit hartgedrehten Wellenoberflächen führen dazu, dass diese Verfahren nicht oder nur in wenigen Anwendungsfällen eingesetzt werden.

Zusätzlich kommen für Anwendungen mit moderaten Betriebsanforderungen weich bearbeitete Wellenoberflächen in Betracht. Diese bestechen durch die äußerst kosten-

günstige Fertigung, da der Härteprozesse wegfällt. Vergleichbar mit der Situation bei hartgedrehten Wellenoberflächen ist auch hier der verfügbare Erfahrungsschatz nicht hinreichend groß, um entsprechend zuverlässige Anwendungen mit weichgedrehten Wellenoberflächen einsetzen zu können.

Um jedoch eines der angesprochenen Verfahren zuverlässig in der praktischen Anwendung umsetzen zu können, sind genaue Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Fertigungsparametern, erzielter Wellenoberfläche und dichtungstechnischer Wirkung unabdingbar.

1.1 Zielsetzung

Abgeleitet von der beschriebenen Ausgangssituation, ergibt sich die Zielsetzung für die vorliegende Arbeit: Die Erfassung und Beschreibung von Wellenoberflächenstrukturen aus der zeitgemäßen Fertigung und deren Einfluss auf die Dichtqualität von Radial-Wellendichtringen zu bestimmen. Die Arbeiten konzentrieren sich im Wesentlichen auf die folgenden Gesichtspunkte:

- Grundlegende Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Fertigungsparametern und Fertigungsverfahren auf die resultierenden Wellenoberflächen und deren dichtungstechnische Eignung als Gegenauflfläche für Radial-Wellendichtringe. Dabei sollen die Auswirkungen von Fertigungseinflüssen wie Maschinenschwingungen, Werkzeugverschleiß und verwendetem Werkstoff bzw. der Unterscheidung zwischen gehärteten und ungehärteten Wellenoberflächen ebenfalls untersucht werden.
- Entwickeln einer geeigneten Vorgehensweise, von zielführenden Untersuchungsmethoden und von aussagekräftigen Bewertungskriterien zur Beurteilung der Eignung sowie zur Auswahl von Wellenoberflächen als Gegenauflfläche von Radial-Wellendichtringen.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Das tribologische System Radial-Wellendichtung besteht im Wesentlichen aus drei Bestandteilen: dem Dichtring, der Wellenoberfläche und dem abzudichtenden Fluid. In den folgenden Abschnitten sind die Grundlagen zum Verständnis der Funktion und Bewertung des Systems Radial-Wellendichtung erläutert.

2.1 Dichtmechanismen des Radial-Wellendichtring

Der Radial-Wellendichtring (RWDR), Bild 1, fördert Fluid von seiner Bodenseite hin zu seiner Stirnseite. Die Förderung ist unabhängig von der Drehrichtung der Welle.

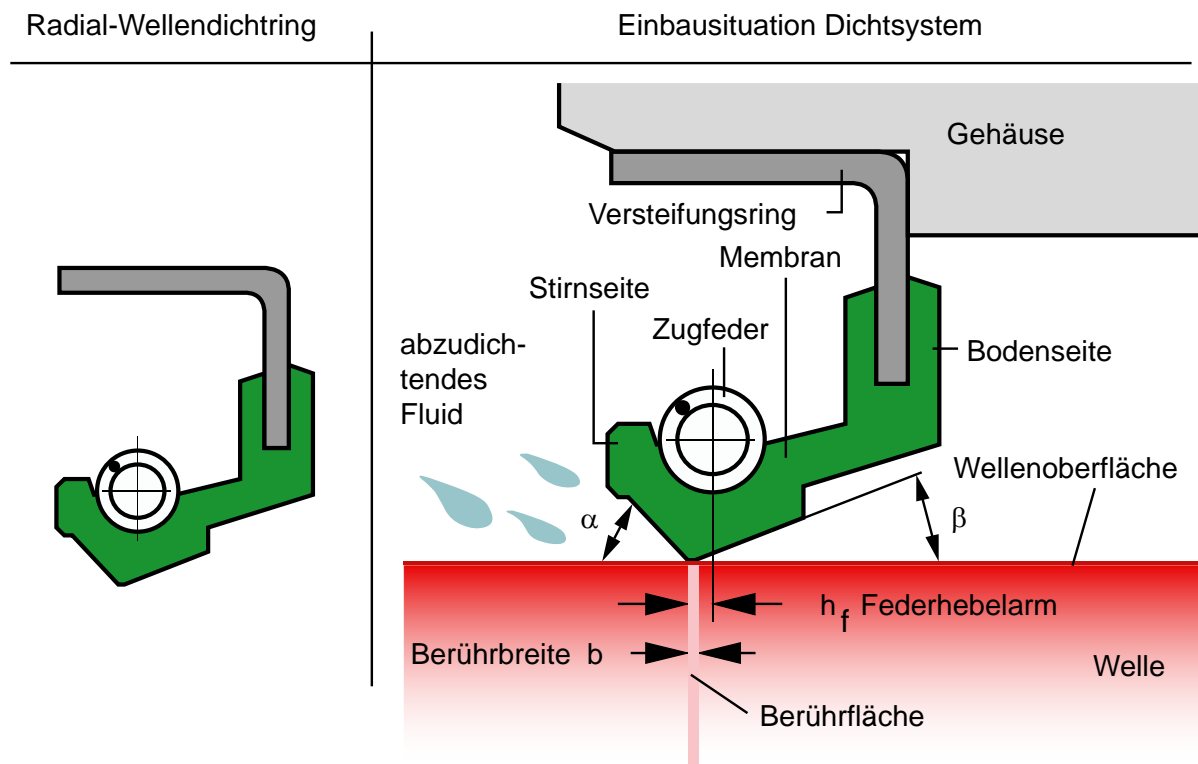


Bild 1: Radial-Wellendichtring, Aufbau, Bezeichnungen und Einbausituation im Dichtsystem

Dieses Verhalten kann in einfachen Versuchen verifiziert werden. Einem RWDR wird etwas niedrig viskoses Öl an der bodenseitigen Berührfläche zur Wellenoberfläche angeboten. Nach wenigen Umdrehungen der Welle fällt das anfängliche Reibmoment steil auf einen geringeren Wert ab. Der Ausgangswert des Reibmomentes wird wieder erreicht, wenn das gesamte Öl von der Bodenseite hin zur Stirnseite gefördert wurde.

In rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen der Dichtkante können axial gerichtete Verschleißspuren, so genannte Schallamachwellen, oder kuppenförmige Rauheitsstrukturen – die für die Förderwirkung verantwortlich gemacht werden – auf der Berührfläche des Dichtringes erkannt werden. Diese förderwirksamen Strukturen auf der Dichtkante entstehen in Wechselwirkung mit der Wellenauflfläche. Aus dieser Erkenntnis resultieren die nachstehend erläuterten Hypothesen (/1/, /2/), welche die Förderwirkung des RWDR erklären können.

2.1.1 Die Verzerrungshypothese

In dieser Hypothese werden die beim Einlauf entstehenden, axial gerichteten Verschleißspuren, die so genannten Schallamachwellen für die Dichtwirkung des RWDR verantwortlich gemacht. Aufgrund der asymmetrischen Kontaktflächenwinkel entsteht im eingebauten Zustand eine annähernd dreiecksförmige Pressungsverteilung unter der Dichtkante (Pressungsmaximum zur Stirnseite hin verschoben), Bild 2.

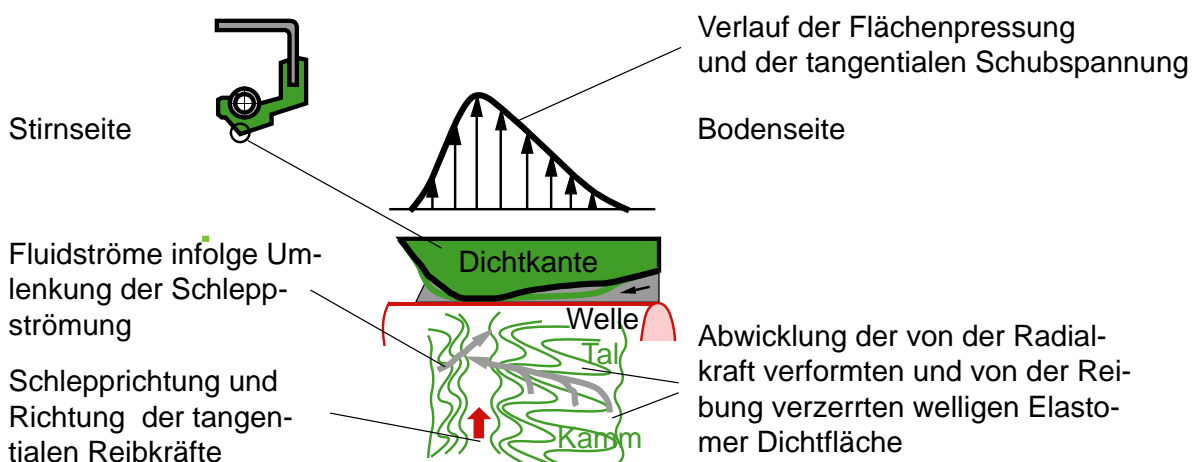


Bild 2: Verzerrungshypothese

Entsprechend der Pressungsverteilung unter der Dichtkante baut sich bei Rotation der Welle die Verteilung der Schubspannung zwischen der Wellenoberfläche und der Berührfläche mit dem Dichtring (Dichtspalt) auf.

Durch diese Schubspannung werden die Verschleißspuren elastisch verformt. Die so entstandenen schräg gerichteten Strukturen fördern jeweils Fluid auf den Bereich der maximalen Pressung im Dichtspalt zu. Infolge der stärkeren Förderung der bodenseitig längeren und flacheren angestellten Strukturen stellt sich in der Überlagerung der beiden Fluidströme ein Förderüberschuss hin zur Stirnseite ein. Die Radial-Wellendichtung ist nach außen hin dicht /1/.

An gelaufenen RWDR können anstatt axial gerichteter Verschleißspuren auch stochastisch verteilte Rauheitserhebungen beliebiger Form beobachtet werden.

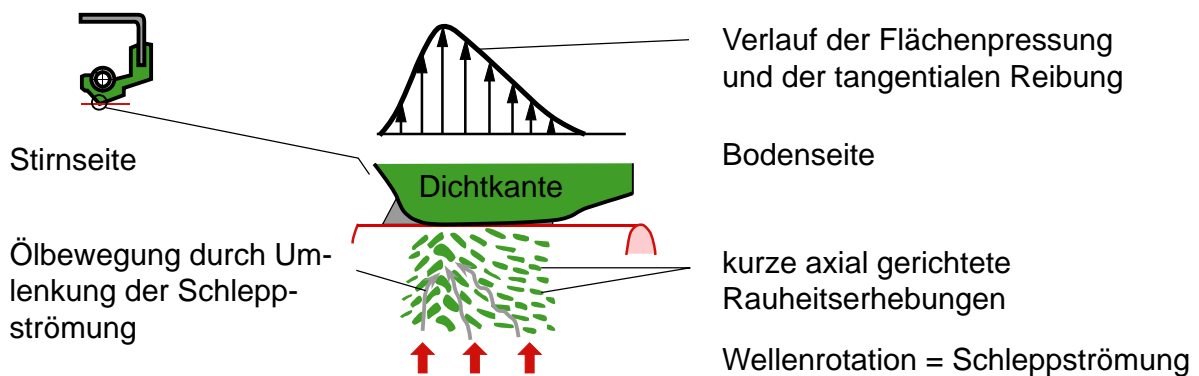


Bild 3: Erweiterte Verzerrungshypothese

Wenn diese Erhebungen überwiegend axial ausgedehnt sind, bilden diese zur Drehrichtung schräg stehende Hindernisse im dünnen Schmierfilm aus. Mitgeschlepptes Öl wird auf nachfolgende Hindernisse kaskadenartig weiter in Richtung Pressungsmaximum umgeleitet. Dabei kann das Pressungsmaximum selbst auch durchströmt werden. Auf diese Weise stellt sich ebenfalls ein zur Stirnseite hin gerichteter Fluidstrom ein, da auch hier wiederum die Erhebungen auf der Bodenseite eine höhere Förderwirkung aufweisen, als die auf der Stirnseite, Bild 3.

2.1.2 Die Seitenstromhypothese

Wie in der Praxis gezeigt werden konnte, stellt sich auch bei nicht überwiegend axial gerichteten, somit rein stochastischen, Rauheitserhebungen eine Förderwirkung des RWDR ein.

Bei rotierender Welle wird Fluid unter den abgeplatteten Rauheitserhebungen tangential hindurchgeschleppt. Unter jeder Rauheitserhebung bildet sich ein sehr enger Schmierspalt. Der lokale Fluiddruck in diesem Spalt ist nahezu identisch mit der lokalen Flächenpressung bei ruhender Welle. Die durch die Rotation hervorgerufene tangentiale Schlepplströmung wird an jeder Rauheitserhebung seitlich abgedrängt, wodurch eine lokale Fluidströmung in axialer Richtung entsteht. Dadurch können Teile des angeschleppten Fluids auf Stirn- und Bodenseite in Richtung des Pressungsmaximums, und letztlich auch darüber hinweg, gepumpt werden (vgl. Bild 2, Seite 4). Da sich auf der flacheren Bodenseite mehr Rauheitserhebungen in Kontakt mit der Wellenoberfläche stehen, ist in der Summe ein Fluidstrom von der Bodenseite zur Stirnseite hin zu beobachten /1/.

In /3/ führt Müller die Seitenstromhypothese und die Verzerrungshypothese zu einem Modell zusammen. Dieses Modell entspricht weitgehend der erweiterten Verzerrungshypothese.

2.1.3 Die Wischkantenhypothese

Liegt die Berührfläche nicht in einer zur Wellenachse senkrechten Ebene, so überstreicht diese eine Wischfläche auf der Wellenoberfläche, welche breiter ist als die eigentliche Berührfläche.

Rotiert die Welle, wird durch die Wischbewegung Flüssigkeit in beide Richtungen durch den engen Dichtspalt geschleppt. Die Förderwirkung hängt von der axialen Pressungsverteilung unter der Dichtkante ab. Bei Bewegung gegen den steilen Pressungsanstieg ist der durch den Schmierspalt geschleppte Fluidfilm, im Vergleich zu der Bewegung gegen den flachen Pressungsanstieg, dünner. Daraus entsteht eine Pumpwirkung in Richtung Stirnseite mit dem steileren Pressungsanstieg. Die Skizze in Bild 4 zeigt eine solche Einbausituation mit Achsversatz /1/, /16/.

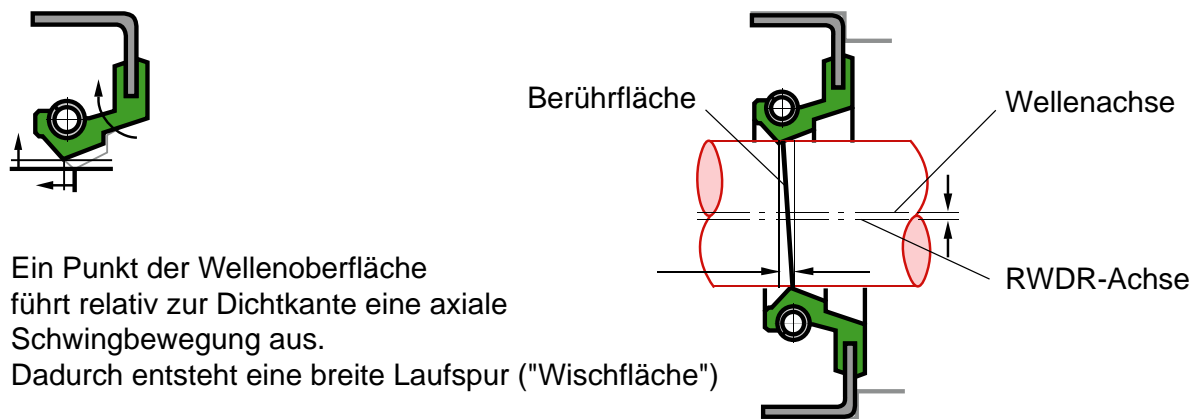


Bild 4: Wischkantenhypothese

Man geht davon aus, dass sich in der Wirklichkeit die beschriebenen Effekte mehr oder weniger stark ausgeprägt überlagern, und so zu einem dichten System Radial-Wellendichtung führen.

2.2 Anforderungen an die Wellenoberfläche - Förderung durch Oberflächenstrukturen - Reibung und Verschleiß

Neben dem Dichtring ist die Wellenoberfläche entscheidend für die Funktion des Dichtsystems. Die Anforderungen an die Wellenoberflächen für Radial-Wellendichtungen nach DIN 3760 / 3761 reduzieren sich auf Angabe der Rauheitskennwerte (gemittelte Rautiefe $R_z = 1$ bis $5 \mu\text{m}$ oder ein Mittenrauwert $R_a = 0,2$ bis $0,8 \mu\text{m}$ und maximale Rautiefe $R_{\text{max}} < 6,3 \mu\text{m}$, gemessen in Achsrichtung) sowie der globalen Forderung nach einer drallfreien Bearbeitung.

Die unterschiedlichen Dichtungshersteller weichen zum Teil geringfügig von diesen Forderungen ab. Freudenberg und SKF CR Dichtungen ergänzen die Vorgaben um den Hinweis, die angegebenen Rauheitswerte nicht zu unterschreiten /33/. Eine zu geringe Rauheit der Wellenoberfläche verursacht eine mangelhafte Schmierstoffversorgung der Dichtkante. Dies führt bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten zu hohen Temperaturen, raschem Verschleiß des Dichtelements und frühem Versagen des Dichtsystems. Für die Wellenoberflächen wird dabei eine Oberflächenhärte von mindestens 55HRC vorausgesetzt. Die Firma Kaco weist zusätzlich darauf hin, dass bei Verwen-

dung von Silikonkautschuken als Dichtringwerkstoff ein Wert von $R_z = 1$ bis $2 \mu\text{m}$ für die Wellenoberfläche anzustreben ist /34/.

Große Aufmerksamkeit im Hinblick auf die Gegenlauffläche von Radial-Wellendichtringen wird der „Drallfreiheit“ der Wellenoberfläche zuteil. Einstimmig wird diese eingefordert und größtenteils das Schleifen im Einstich als Verfahren zu deren Herstellung empfohlen, um dieser Forderung gerecht zu werden. Eine einheitliche Definition der zu vermeidenden Strukturen wird nicht gegeben.

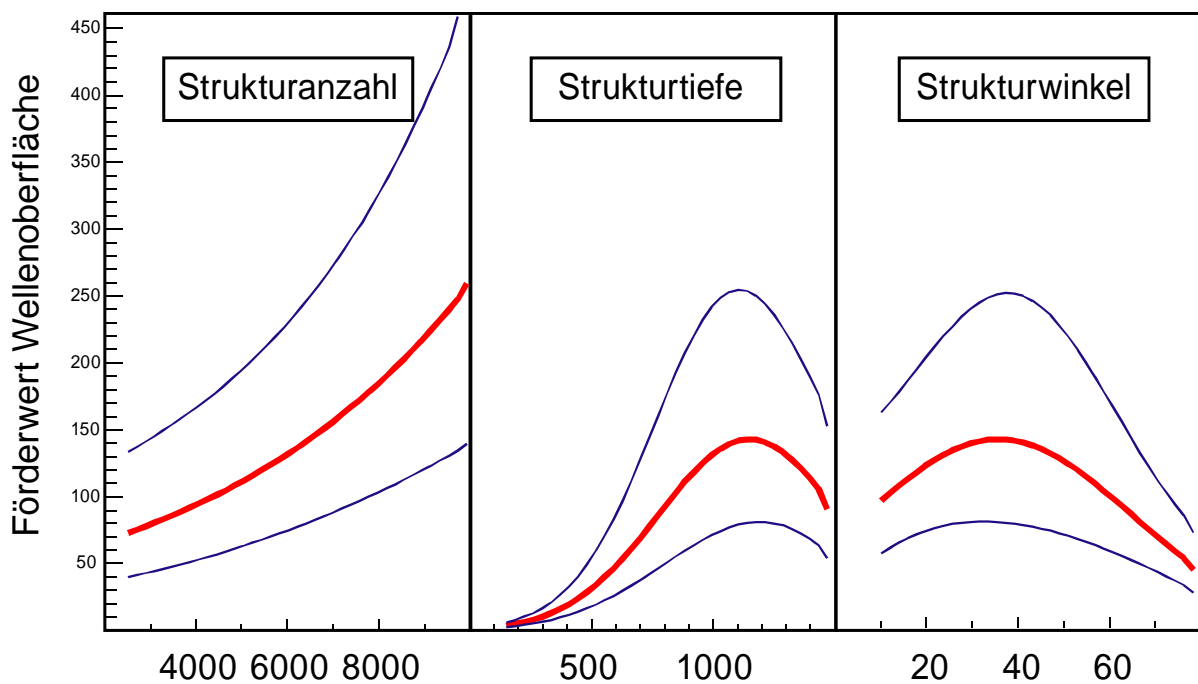


Bild 5: Einfluss der Strukturparameter nach /35/

Buhl /35/ hat sich eingehend mit den grundsätzlichen Auswirkungen von Strukturen auf Wellenoberflächen auseinandergesetzt. Er hat unterschiedliche Strukturausprägungen in den Kategorien Strukturtiefe, Strukturwinkel und absoluter Anzahl systematisch untersucht und stellte fest, dass die Förderung der Wellenoberfläche mit steigender Anzahl der vorhandenen Strukturen zunimmt, Bild 5. Die Strukturtiefe sowie der Winkel der Strukturen zur Wellenachse weisen einen parabolischen Verlauf über der Variationsbreite auf. Die maximale Förderung der Wellenoberfläche wurde bei einer Strukturhöhe von ca. 1100 nm und einem Strukturwinkel von ca. 37° erreicht. Kammler /2/ maß einen Verzerrungswinkel der Strukturen auf der Berührfläche des

Dichtrings von ca. 50°. Wellenstruktur und verzerrte Rauheitsstruktur des Dichtrings stünden in diesem Fall nahezu senkrecht aufeinander.

In einem weiteren Schritt weist Buhl nach, dass sich das Förderverhalten einzelner Strukturklassen auf der Wellenoberfläche bei Überlagerung addiert. Somit kann das Förderverhalten einer Wellenoberfläche, welche mit unterschiedlichen charakteristischen Strukturen besetzt ist, aus den Einzelförderungen der separat analysierten Strukturanteile zusammengesetzt werden.

Im Zusammenspiel mit dem abzudichtenden Fluid legen so Dichtring und Wellenoberfläche – insbesondere durch ihre Fördereigenschaften – die Betriebsbedingungen im Tribosystem Radial-Wellendichtung fest. Abhängig davon bildet sich im Betrieb der dünne Fluidfilm zwischen der Wellenoberfläche und der Dichtkante aus, der eine hydrodynamische Entlastung bzw. Trennung der Gleitflächen bewirkt.

Generell wird der Zustand im Dichtspalt durch die Gümbelzahl G gekennzeichnet. Diese ist eine Funktion von Ölviskosität, Winkelgeschwindigkeit (Drehzahl), Berührbreite und Radialkraft:

$$G = \frac{\eta \cdot \omega}{p_L / b} \quad \text{Gl. 1}$$

- G: Gümbelzahl
- η : dynamische Viskosität
- ω : Winkelgeschwindigkeit
- b: Berührbreite

Wobei die Radialkraft des Dichtrings auf den abzudichtenden Durchmesser bezogen wird, um die Linienpressung p_L als unabhängige Vergleichsgröße zu erhalten.

$$p_L = \frac{F_r}{\pi \cdot D} \quad \text{Gl. 2}$$

- p_L : Linienpressung
- D: Abdichtdurchmesser
- F_r : Radialkraft

Da die dynamische Viskosität des Öls von dessen Temperatur abhängig ist, hängt auch die Gümbelzahl G stark von der Temperatur ab. Der Verlauf der Reibzahl f über der Gümbelzahl G , Bild 6 ähnelt prinzipiell dem Stribeck-Diagramm hydrodynamischer Gleitlager /1/.

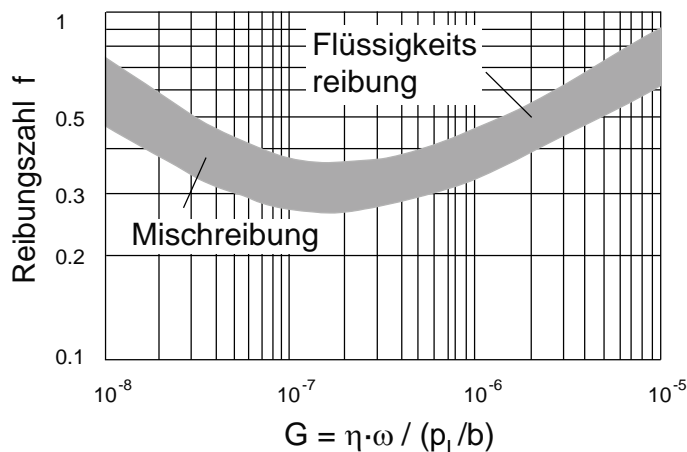


Bild 6: Reibzahl f über Gümbelzahl G

Die Reibleistung des Dichtringes kann so aus den gewonnenen Werten errechnet werden:

$$P = F_r \cdot f \cdot \frac{D}{2} \cdot \omega = M_r \cdot \omega = \frac{M_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad \text{Gl. 3}$$

P: Reibleistung

f: Reibzahl

M_r : Reibmoment

Die Abführung der so entstehenden Wärme muss zur Vermeidung einer thermischen Überlastung des Dichtrings bzw. des Dichtringwerkstoffes gewährleistet sein. Eine thermische Überlastung des Dichtringwerkstoffes führt zu einer massiven Einschränkung der Lebensdauer. Es gilt hierbei die Faustregel, dass 10 K Temperaturerhöhung eine um 50% reduzierte Lebensdauer bewirken /41/.

2.3 Oberflächenmessung und Kenngrößen

Alle technischen Oberflächen weichen mehr oder weniger von der vorgegebenen Gestalt ab. Die Gestaltabweichung wird nach /6/ in sechs Kategorien unterteilt. Es wird

nach Gestaltabweichung der 1. bis 6. Ordnung unterschieden, Bild 7. Zur Beurteilung von Wellenoberflächen für Radial-Wellendichtringe gelten Gestaltabweichungen bis einschließlich der 4. Ordnung als maßgeblich.

Ausgangspunkt für die Beurteilung der Oberflächen und die Kennwertermittlung ist ein zweidimensionaler Tastschnitt oder eine dreidimensionale, durch Aneinanderreihung mehrerer paralleler zweidimensionaler Tastschnitte ermittelte, Oberflächentopografie.

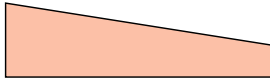



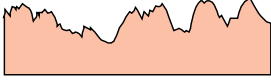
Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichung 	Geradheits- Ebenheits- Rundheits- Abweichung, u.a.	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstücks, falsche Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen (siehe DIN 4761)	Außermittige Einspannung, Form oder Laufabweichung eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeugs
3. Ordnung: Rauigkeit 	Rillen (siehe DIN 4761)	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: Rauigkeit 	Riefen Kuppen Schuppen (siehe DIN 4761)	Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschneide), Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: Rauigkeit Anmerkung: Nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar.	Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: Rauigkeit Anmerkung: Nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar.	Gitteraufbau des Werkstoffs	
Die dargestellten Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung überlagern sich in der Regel zu der Istoberfläche Beispiel: 		

Bild 7: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen nach /6/

Durch die fast ausschließlich eingesetzte taktile Oberflächenmessung mittels Rauheitstaster, welcher typischer Weise einen Tastspitzenradius von 5 µm aufweist, werden sehr feine Rauheitsstrukturen zum Teil nicht mehr erfasst /8/. Insbesondere feine, tiefe Riefen werden nicht detektiert. Die Tastschnitte werden in Achsrichtung entnommen,

d. h. senkrecht zur vorherrschenden Riefenrichtung. Dadurch wird vermieden, dass der Rauheitstaster den umlaufenden Riefen nachläuft und so die Messung unbrauchbar wird.

Die Tastlänge L_t für einen Tastschnitt setzt sich generell aus der Vorlaufstrecke, der Messlänge L_m und der Nachlaufstrecke zusammen. Für die Messlänge sind die Werte 0,4 mm, 1,25 mm, 4 mm, 12,5 mm und 40 mm vorgesehen.

Anhand von Filtern werden aus dem Tastschnitt gezielt die Gestaltabweichungen niedriger Ordnungen rechnerisch entfernt, um das für die Bestimmung der Rauheitskennwerte verwendete Restprofil zu erhalten.

Der *arithmetische Mittenrauwert* R_a ist definiert als der arithmetische Mittelwert der absoluten Werte der Profilabweichungen y von der Profilmittellinie innerhalb der Bezugsstrecke l , Bild 8.

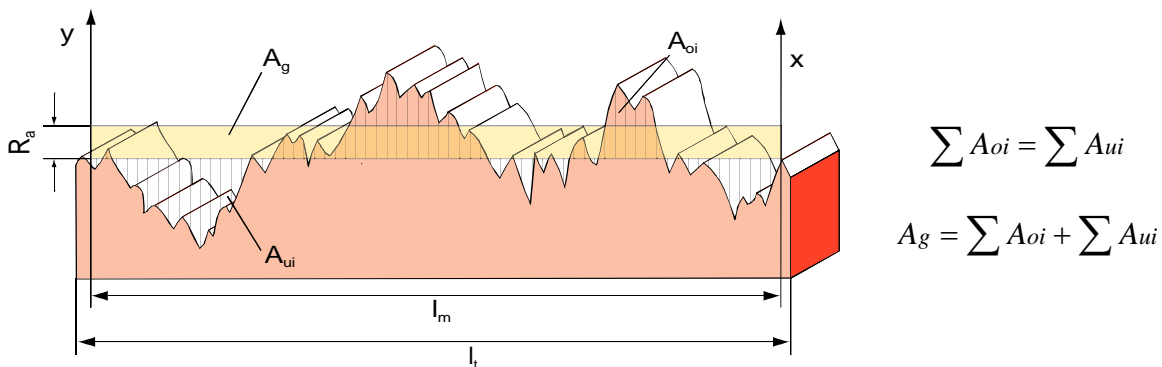


Bild 8: Arithmetischer Mittenrauwert nach /6/

Der Oberflächenkennwert R_a wird unter anderem dazu verwendet, um die fortschreitende Veränderung der Oberfläche durch Werkzeugverschleiß bei spanendem Herstellen von Wellenoberflächen festzustellen. Er unterscheidet nicht zwischen Spitzen und Riefen, erlaubt also keine Aussage über die Art des Profils. Aus diesem Grund eignet sich der Oberflächenkennwert R_a lediglich zum Vergleich gleichartiger Oberflächen. Dieser Sachverhalt ist durch die in Bild 9 dargestellten grundsätzlich unterschiedlichen Profilschnitte mit quasi identischem R_a verdeutlicht.

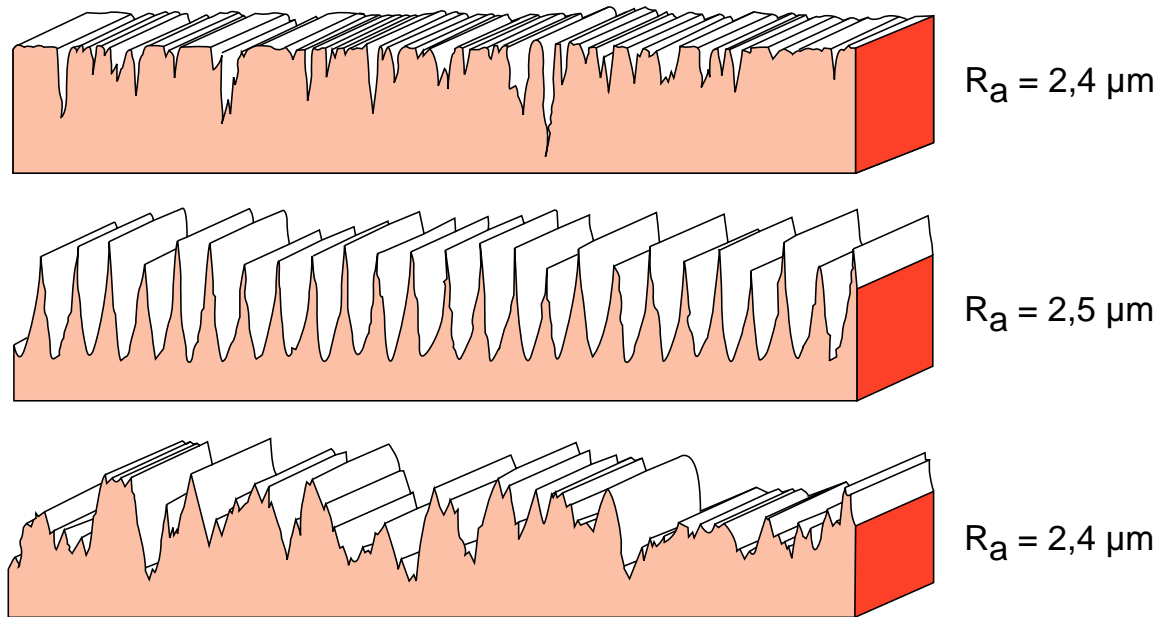


Bild 9: Unterschiedliche Oberflächencharakteristiken mit identischem R_a Wert /7/

Die *gemittelte Rautiefe* R_z ist definiert als der arithmetische Mittelwert aus den Einzelrautiefen z_i von fünf aneinander gereihten Einzelmessstrecken, Bild 10. Dabei wird die größte der fünf Einzelrautiefen als die *maximale Rautiefe* R_{max} bezeichnet.

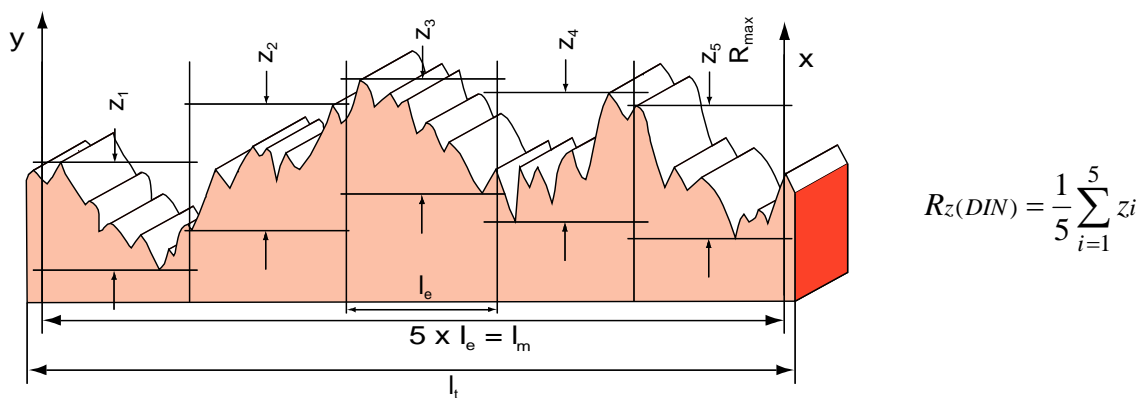


Bild 10: gemittelte Rautiefe R_z nach /6/

Diese Kennwerte reichen aufgrund der Einschränkungen in der Auflösung von feinsten Strukturen des Tastschnittverfahrens, der Uneindeutigkeit der Kennwerte hinsichtlich des zugrunde liegenden Oberflächenprofils und der fehlenden flächenhaften Betrachtung

tung nicht aus, um die Wellenoberflächen dichtungstechnisch relevant zu beschreiben, /8/, /9/, /33/, /34/, /35/, /40/.

2.4 Entstehung und Bezeichnung von Drall

Mit dem Begriff Drall werden im Allgemeinen in axialer Richtung periodische, wellige und dabei umlaufende oder nicht umlaufende, schräg zur Wellenachse orientierte Strukturen bezeichnet. Dichtungstechnisch entscheidend dabei ist nicht die exakte Gestalt und Ausprägung der Strukturen auf der Wellenoberfläche, sondern deren Auswirkung im Dichtsystem Radial-Wellendichtung. Die Strukturen erzeugen meist drehrichtungsabhängig eine Pumpwirkung, die Öl entweder durch den Dichtspalt hindurch fördert (Leckage) oder verhindert, dass ausreichend Öl in den Dichtspalt gelangt. Dies führt zu Mangelschmierung des Dichtrings und verursacht erhöhten Verschleiß.

Rau unterscheidet zwischen drei unterschiedlichen Drallarten auf im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen /10/, /11/.

- Der *Abrichtdrall* ist auf die Abrichtwendel auf der Schleifscheibe zurückzuführen. Diese entsteht beispielsweise durch den Abrichtvorgang mittels eines Einkorndiamanten. Diese Abrichtwendel wird, bei unzureichendem Ausfunken, als mehrgängige Drallstruktur auf der Wellenoberfläche abgebildet.
- Tritt während des Schleifvorgangs eine Parallelitätsabweichung zwischen Werkstückachse und Schleifscheibenachse auf, führt dies zum sog. *Schränkungsdrall*.
- Der *Nulldrall* ist eine Sonderform des Abrichtdralls, wobei der Drallwinkel (Winkel zwischen Drallstruktur und Wellenachse) gleich Null ist.

Grundlegende Betrachtungen zur Drallentstehung und Charakterisierung der entstandenen Wellenoberflächen wurden bereits von Kersten /8/ angestellt. Rau hat ausgehend von diesen Betrachtungen ein Messverfahren entwickelt und entsprechende relevante Kenngrößen abgeleitet /10/, /11/. Dabei wird die mittels 73 gleichmäßig am Umfang verteilter Einzeltastschnitte erfasste Wellenoberfläche nach Autokorrelation der „Topografiedaten“ anhand von Drallwinkel, Drallsteigung, Gängigkeit, Periodenlänge, Dralltiefe und theoretischem Förderquerschnitt charakterisiert.

Diese Drallstrukturen führen in erster Linie zu einer axial gerichteten Förderwirkung der Wellenoberfläche. Abhängig von der Drehrichtung führt dies zu Leckage oder Mangelschmierung der Dichtkante, und somit kurz- oder mittelfristig zum Ausfall des Dichtsystems.

Die Festlegung der Drallkennwerte für im Einstich geschliffene Wellenoberflächen ist ein erster Schritt, um über die als untauglich befundenen Kennwerte nach DIN 4760 (R_a , R_z) hinaus Beurteilungsmöglichkeiten an der Hand zu haben. Jedoch liegen nach unveröffentlichter Aussage hier nur Erfahrungswerte für im Einstich geschliffene Wellenoberflächen vor.

Inzwischen wird diese Mess- und Auswertemethode von unterschiedlichen Herstellern auf dem Markt angeboten.

2.5 Herstellung der Wellenoberflächen

Um der Forderung nach Drallfreiheit /4/, /5/ Rechnung zu tragen, werden die Gegenlaufflächen für Radial-Wellendichtringe üblicher Weise im Einstich geschliffen. Dabei muss, neben einer Reihe weiterer Prozessparameter, ein besonderes Augenmerk auf das Abrichten der Schleifscheibe gelegt und vor allem eine ausreichend lange Ausfunktzeit eingehalten werden.

Werden andere Bearbeitungsverfahren als das Schleifen im Einstich angewendet, entstehen verfahrensbedingte spezifische Strukturen auf den so hergestellten Wellenoberflächen. Diese Strukturen können ähnliche Wirkungen hervorrufen, wie die oben beschriebenen Drallstrukturen beim Schleifen. Insbesondere der beim derzeit favorisierten Längsdrehen entstehende Vorschubwendel wird eine Förderwirkung zugeschrieben. Jedoch gibt es Anwendungsbeispiele, in denen auf längsgedrehten Wellenoberflächen erfolgreich mit Radial-Wellendichtringen abgedichtet wird.

Vogt /28/ empfiehlt Fertigungsparameter mit denen geeignete Gegenlaufflächen für Radial-Wellendichtringe längsgedreht werden können.

Auch für glatt gewalzte oder gestrahlte Wellenoberflächen nennt Vogt entsprechende Fertigungsparameter. Das Nachbearbeiten der Wellenoberflächen durch Schmirgeln,

Superfinischen (Kurzhubhohnen) oder Bandfinishen wird als mögliches Bearbeitungsverfahren genannt /28/, /40/.

Schneider /13/ stellt ein Fertigungsverfahren vor, welches eine gedrehte Wellenoberfläche ohne Vorschubwendel erzeugt. Es können gehärtete Wellenoberflächen mit diesem Drehräumverfahren bearbeitet werden. Die Breite der zu bearbeitenden Fläche ist jedoch durch die Schneidenbreite limitiert. Erste positive Erfahrungen beim Einsatz dieser Wellenoberflächen als Gegenlauffläche für Radial-Wellendichtringe liegen vor.

Trotz einiger erfolgreicher Anwendungen ist die Auswirkung alternativ gefertigter Wellenoberflächen auf die Dichtfunktion nur in groben, qualitativen Zügen bekannt. Systematische Untersuchungen, welche die Zusammenhänge erfassen und Erklärungsansätze liefern, sind bislang nicht veröffentlicht. Es ist bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht gelungen, eine Korrelation zwischen Fertigungsverfahren, Fertigungsparametern, der daraus resultierenden Oberflächentopographie und dem Funktionsverhalten von Radial-Wellendichtsystemen zu finden.

Da die funktionalen Zusammenhänge nicht hinreichend bekannt sind, werden die alternativen Fertigungsverfahren zur Herstellung von Gegenlaufflächen für Radial-Wellendichtringe nicht in der breiten Masse der Anwendungen eingesetzt.

Bewertung der Wellenoberflächen hinsichtlich der Eignung als Gegenlauffläche für RWDR

Auch alternativ gefertigte Wellenoberflächen werden überwiegend mittels der vorgehend kritisierten Kennwerte R_a und R_z bewertet. Nur einzelne Anwender fordern für im Einstich geschliffene Wellenoberflächen die Einhaltung von auf firmeninterner Erfahrung beruhenden Grenzen der Drallkennwerte wie Drallsteigung und Dralltiefe.

2.6 Förderwertmessung von Dichtring und Dichtsystem

Schon bevor die aktive Förderwirkung von Radial-Wellendichtringen bekannt war, bestand der Wunsch, dynamische Dichtstellen bezüglich ihrer Effektivität zu bewerten. Um die Wirkung von hydrodynamischen Dichthilfen zu beurteilen, kamen schon früh die unterschiedlichsten Verfahren zum Einsatz. Symons hat bereits 1973 eine

Übersicht über gängige Methoden zusammengestellt /15/, mit denen der Förderwert von Dichtsystemen bestimmt werden kann. In der jüngeren Literatur werden Varianten dieser Verfahren beschrieben /18/, /26/. Die beschriebenen Verfahren bestimmen einheitlich den Förderwert des gesamten Dichtsystems, bestehend aus Wellenoberfläche und Dichtring. Nur unter der Voraussetzung einer förderneutralen Wellenoberfläche (oder der Annahme einer förderneutralen Wellenoberfläche) kann direkt die Förderwirkung des Dichtrings gemessen werden.

Als Förderwert des Dichtsystems kann der Volumenstrom definiert werden, welcher maximal von der Luftseite auf die Ölseite der Dichtkante fließt. Dieser kann noch mit dem Wellenumfang oder Wellendurchmesser sowie der Drehzahl normiert werden. Der Förderwert kann bis heute nicht berechnet, sondern lediglich gemessen werden. Im stationären Fall gilt:

$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{Gl. 4}$$

Es genügt die Bestimmung des Zeitabschnitts Δt , der für die Förderung eines bestimmten Volumens ΔV benötigt wird. Daraus resultieren zwei mögliche Messprinzipien.

1. Zugabe einer definierten Ölmenge auf der Bodenseite des Dichtrings und Bestimmung der Zeit, nach der das bodenseitige Öl vollständig verschwunden ist
2. Überflutung der Bodenseite mit Öl und Bestimmung der Pegeldifferenz des Ölstands während eines vorgegebenen Zeitintervalls.

Fritzsche /18/ bezeichnet diese beiden Grundfälle als benetzt und überflutet. Weiterhin führt er noch den Zustand „bespritzt“ ein, bei dem die an der Bodenseite des Dichtrings zugeführte Ölmenge größer ist als das Rückfördervermögen, so dass ein Teil des Öls wieder frei abfließt.

Einen maßgeblichen Einfluss haben auch die Verhältnisse auf der Stirnseite (Ölseite) des Dichtrings, wo zwischen Überflutung und leerem Ölsumpf alle Variationen denkbar sind und auch angewandt werden.

In Bild 11 sind die möglichen Anordnungen schematisch dargestellt. Das Messverfahren mit benetzter Bodenseite (Luftseite) des Dichtrings (Öltropfenmethode) weist die

größte Realitätsnähe, das mit überfluteter Luftseite die beste Reproduzierbarkeit auf. Bei der Förderwertbestimmung mit bespritztem Dichtring erscheint die Messung des abfließenden Ölstroms zur Differenzbildung aus angespritztem und abfließendem Ölstrom schwierig.

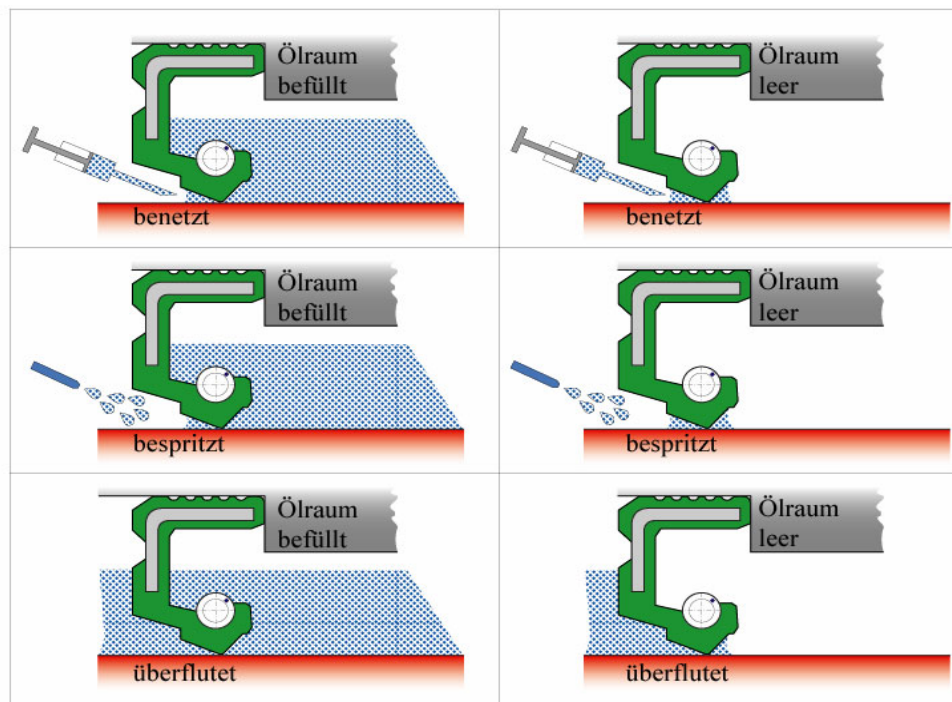


Bild 11: Grundsätzliche Möglichkeiten der Förderwertbestimmung

2.6.1 Öltropfenmethode

Die Öltropfenmethode beruht auf der bereits seit langem bekannten Erfahrung, dass Öltropfen, die sich am Dichtspalt auf der Bodenseite des Dichtrings befinden, nach einiger Zeit in den Ölraum transportiert worden sind. Diese Methode wurde bereits von Symons /15/ zur Bewertung von Dichtringen mit hydrodynamischen Dichthilfen erwähnt. Bei der genaueren Untersuchung des Förderverhaltens von Radial-Wellendichtringen ohne Dichthilfen wurde dieses Verfahren von Hermann /19/, Kammüller /2/ und Müller /1/ wieder aufgegriffen.

Im Versuch wird nun mit Hilfe einer Spritze eine definierte Ölmenge an die Dichtkante gebracht; üblich ist nach Les Horve /20/ ein Volumen von 20µl. Bei rotierender Welle wird die Zeit gemessen, bis das Öl vollständig unter der Dichtlippe durch geför-

dert ist. Les Horve macht aber weder Angaben über die Drehzahlabhängigkeit des Förderwerts noch über günstige Drehzahlbereiche, in denen eine Messung sinnvolle Ergebnisse liefert. Für die Feststellung, wann die Förderung beendet ist, bestehen zwei Möglichkeiten.

Visuelle Bestimmung

Die einfachste Möglichkeit besteht darin, den Meniskus zu beobachten, der sich durch die Ölzugabe an der Bodenseite der Dichtkante bildet. Mit Hilfe eines Mikroskops lässt sich das Verschwinden des Ölrings relativ gut feststellen, das Verfahren ist allerdings schlecht automatisierbar.

Les Horve /20/ beschreibt eine Verbesserung dieses Verfahrens. Dabei wird das zuzugebende Öl vorher noch mit einer fluoreszierenden Substanz versetzt, so dass das Verschwinden des Ölrings leichter feststellbar wird.

Reibmomentmessung

Hermann /19/ stellte fest, dass das Reibmoment von Radial-Wellendichtringen nach der Zugabe von Öl auf der Luftseite deutlich absinkt und am Ende der Förderung wieder sprunghaft auf den alten Wert ansteigt. Durch das Aufzeichnen des Reibmoments über der Zeit lässt sich damit die Dauer der Förderung bestimmen. Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, definiert Hermann einen Dichtheitsfaktor, indem er die Fördermenge in ml/min auf eine Gleitgeschwindigkeit an der Dichtkante von 1 m/s bezieht.

Zur Bestimmung des Reibmoments ist es erforderlich, die Dichtringaufnahme reibungsfrei zu lagern. Ott /21/ verwendet dafür ein Luftlager, Fritzsche /18/ stützt den Dichtringträger über radial angeordnete Biegefedern ab. Ruhl /9/ verwendet dagegen ein Torsionsrohr, das mit Dehnmessstreifen bestückt ist.

Diese Verfahren zeichnet sich durch eine leichte Automatisierbarkeit aus, wobei der Abfall des Reibmoments zu Beginn der Förderung nicht immer genau festgestellt werden kann.

Die Öltropfenmethode wird in der Literatur sowohl mit als auch ohne Ölbeaufschlagung der Stirnseite des Radialwellendichtrings beschrieben. Im zweiten Fall treten an der Stirnseite Kapillarkräfte auf, die die Förderwirkung unterstützen und das Ergebnis daher unter Umständen maßgeblich beeinflussen.

Messfehler entstehen bei dieser Methode durch die Schwierigkeit, das vergleichsweise kleine Ölvolumen auch tatsächlich genau an die Dichtkante zu geben. Besonders bei kleinem Nenndurchmesser der Radialwellendichtringe kommt es häufig vor, dass das zugeführte Öl durch Adhäsionskräfte an der Wellenoberfläche oder der Membran des Dichtrings haftet und nicht bis zur Dichtkante gelangt. Außerdem begünstigt die kurze Messzeit das Auftreten systematischer Fehler, und die Ausbildung eines stationären Förderzustands ist nicht gewährleistet.

2.6.2 Überflutung der Bodenseite

Das Problem der Ölzuführung an die Dichtkante lässt sich am einfachsten durch eine Überflutung der Bodenseite des Dichtrings mit Öl lösen. Dabei sind zwei Varianten zu unterscheiden.

Umgekehrter Einbau

Dieses Verfahren wurde von Kawahara und Hirabayashi /17/ vorgeschlagen. In der an den Vortrag anschließenden Diskussion wurden aber bereits einige Schwächen benannt. So werden Beschädigungen der Welle oder der Dichtkante, die bei normalem Einbau des Dichtrings zu Leckage geführt hätten, nun ebenfalls als Förderwert interpretiert, wodurch das Ergebnis verfälscht wird. Weiterhin sind die Bedingungen für den Dichtring dadurch geändert, dass auf der Stirnseite kein statischer Öldruck vorhanden ist, der im normalen Einsatz der Förderwirkung entgegen wirkt. Andererseits entsteht am stirnseitigen Rand der Dichtkante ein konkaver Meniskus, dessen Kapillarwirkung die Förderung begünstigt.

Zweikammermethode

Die beiden letztgenannten Nachteile beim umgekehrten Einbau können durch die von Britz /23/ vorgestellte Zweikammer-Meßmethode vermieden werden. In einer entspre-

chenden Versuchseinrichtung werden beide Seiten des Radial-Wellendichtrings teilweise oder ganz mit Öl überflutet, so dass der statische Druck ausgeglichen ist und Kapillarkräfte kompensiert werden. Die geförderte Ölmenge lässt sich bei dieser Anordnung durch die Änderung des Ölstands in den beiden Kammern feststellen.

Mit dieser Methode kann die Förderung des Dichtsystems weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen ermittelt werden. Im Hinblick auf die entstehenden und das Messergebnis ggf. verfälschenden Görtler-Taylor-Wirbel, deren Intensität mit steigender Drehzahl zunimmt /21/, sollte die Förderwertbestimmung bei möglichst niedrigen Drehzahlen erfolgen.

2.6.3 Vergleichende Meßmethoden

Bei Symons /15/ und Les Horve /20/ wird noch eine Reihe weiterer Verfahren beschrieben, die jedoch keine Messwerte, sondern nur vergleichende Aussage als Ergebnis haben. Diese werden vor allem zur Prüfung von Dichtringen mit hydrodynamischen Dichthilfen empfohlen. Sie können in zwei Gruppen eingeteilt werden.

Vergleich mit einem gegebenen Förderwert

Auf die Welle werden definierte Förderstrukturen aufgebracht, deren Förderung von der Öl- zur Luftseite gerichtet ist. Falls bei dieser Anordnung keine Leckage auftritt, so ist die Förderwirkung des Dichtringes größer als die der Förderstrukturen auf der Welle.

Vergleich unterschiedlicher Dichtringe

Die Dichtlippe der zu prüfenden Dichtringe wird an einer Stelle des Umfangs definiert beschädigt, so dass dort Öl austreten kann. Tritt im Versuch keine Leckage auf, so reicht die Förderwirkung des Dichtrings aus, um das ausgetretene Öl zurückzupumpen.

Definierter Fehler in der Wellenoberfläche

In die Wellenoberfläche wird eine definierte Riefe eingerollt. Die im Versuch ausgetretene Leckagemenge wird als Beurteilungskriterium für die Güte des Dichtrings bzw. die Wirksamkeit von hydrodynamischen Dichthilfen verwendet.

Das größte Problem bei diesen Methoden ist die Bestimmung des künstlich erzeugten Leckvolumenstroms, der dann als Maß für die Dichtwirkung herangezogen wird. Daher sind auf diese Weise nur qualitative Aussagen über „gute“ und „schlechte“ Dichtringe möglich beziehungsweise darüber, ob die verwendeten hydrodynamischen Dichthilfen tatsächlich die Dichtwirkung unterstützen.

2.7 Förderwertmessung der Wellenoberfläche

Zur Charakterisierung der Wellenoberflächen ist im Gegensatz zu den im vorigen Kapitel vorgestellten Methoden, welche die Gesamtförderung im Dichtsystem bestimmen, der isolierte Förderwert der Wellenoberfläche maßgeblich. Raab entwickelte zu diesem Zweck ein neues Verfahren, mit dem der Förderwert der Wellenoberfläche ermittelt werden kann /26/. In Bild 12 ist die Vorgehensweise dargestellt.

Grundlage dieses Verfahrens ist die Annahme, dass die Förderrichtung der Wellenoberfläche von der Drehrichtung abhängig ist. Der Dichtring wird entgegen seiner normalen Einbaulage montiert, d.h. der Ölsumpf (Ölstand Wellenmitte) befindet sich auf der eigentlichen Luftseite (Bodenseite) des Dichtrings. Das Rückfördervermögen des Dichtrings (vgl. 2.1) sorgt für einen kontinuierlichen Fluidstrom aus dem Ölraum heraus. Die Förderung der Wellenoberfläche wird diesem Fluidstrom überlagert. Die Summe aus Dichtringförderung (FW-RWDR) und der Förderung der Wellenoberfläche (FW-WOF) tropft als Leckage auf der Stirnseite des Dichtringes ab und wird gravimetrisch erfasst.

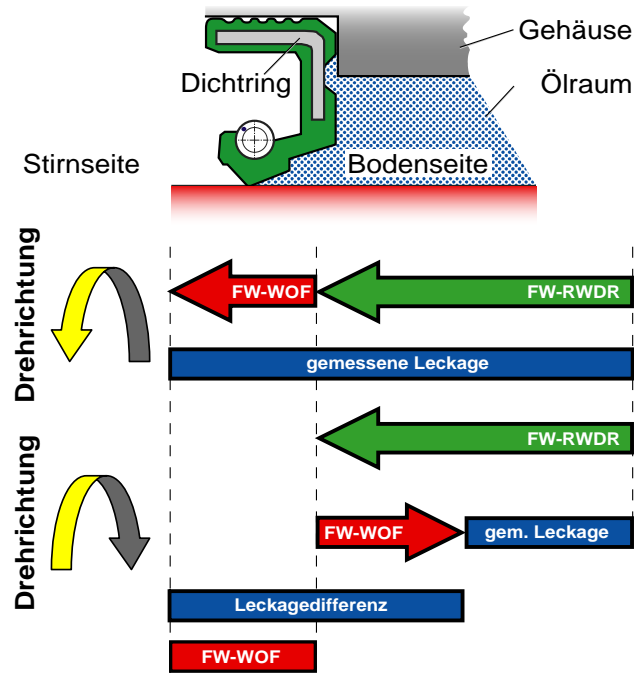


Bild 12: Förderwertbestimmung der Wellenoberfläche nach /26/

Im ersten Durchgang wird die Förderung des gesamten Dichtsystems in einer Drehrichtung bestimmt. Dann wird die Gesamtförderung des Dichtsystems bei umgekehrter Drehrichtung ermittelt. Der Förderwert der Wellenoberfläche ergibt sich dann aus der halbierten Leckagedifferenz aus den beiden Durchgängen mit unterschiedlichen Drehrichtungen.

Bereits bei Vorstellung des Verfahrens weist Raab auf Schwachstellen der Bestimmungsmethode hin. In Bild 13 sind beispielhaft zwei Konstellationen dargestellt, bei denen die Förderwertbestimmung der Wellenoberfläche fehlschlägt.

Entspricht, wie im linken Bildteil dargestellt, die Förderung der Wellenoberfläche nicht der Annahme, dass die Förderrichtung von der Drehrichtung der Welle abhängt, so kann die Förderung der Wellenoberflächen nicht korrekt bestimmt werden. Ebenfalls ist es so nicht möglich, die jeweiligen drehrichtungsabhängigen Förderwerte zu bestimmen.

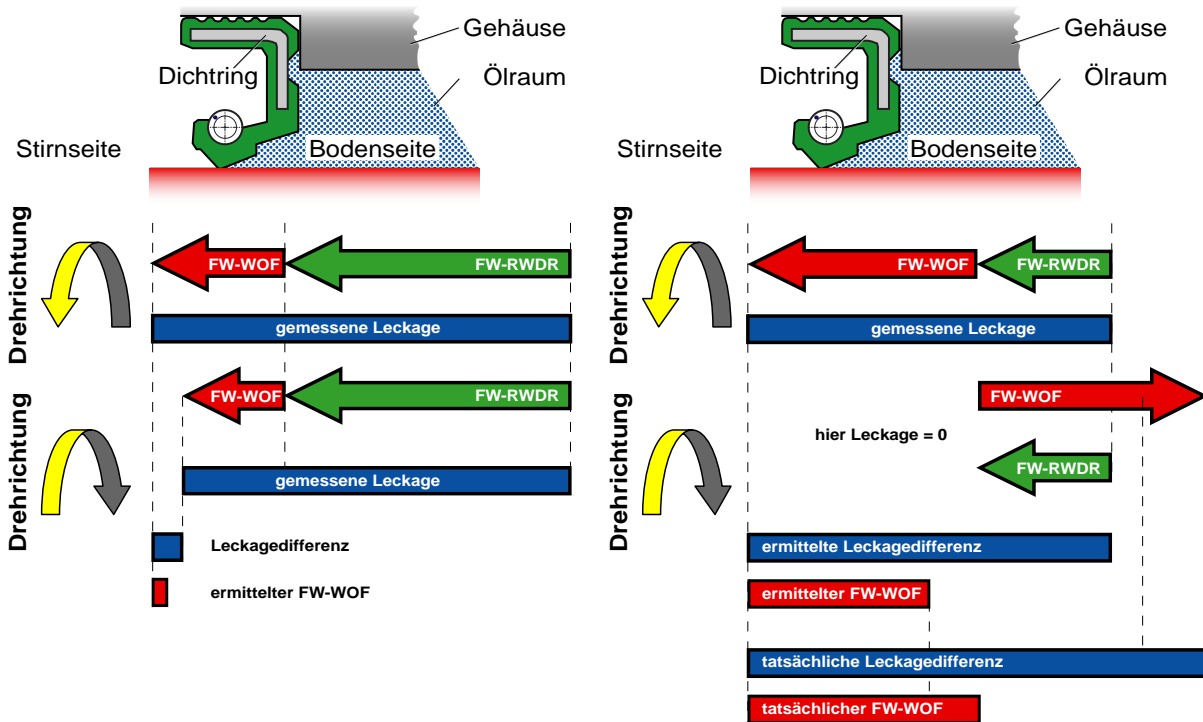


Bild 13: Fehlermöglichkeiten bei Förderwertbestimmung der Wellenoberfläche nach /26/

Übersteigt der Förderwert der Wellenoberfläche die Förderung des Dichtrings so fällt in einer Drehrichtung keine Leckage an. Der Anteil des „Überhangs“ der Förderung der Wellenoberfläche kann nicht ermittelt werden. Der errechnete Förderwert entspricht nicht dem tatsächlichen Förderwert der Wellenoberfläche.

Zusammenfassung zum Stand der Technik

Die Funktionsweise des Radial-Wellendichtrings ist weitestgehend geklärt. Ebenso ist der Einfluss der Gegenauflfläche im Dichtsystem unbestritten. Nicht nur der Dichtring selbst, sondern auch die Wellenoberfläche hat maßgeblichen Einfluss auf die Dichtwirkung. Aus dieser Erkenntnis resultiert die Forderung nach einer „drallfreien“ Wellenoberfläche, wie sie auch in den entsprechenden Normen dokumentiert ist.

Basierend auf jahrzehntelanger Erfahrung wird letztlich einstimmig die im Einstich geschliffene Wellenoberfläche, in Verbindung mit einem Bereich der zulässigen Oberflächenrauheit, als Gegenauflfläche für Radial-Wellendichtringe zur Erfüllung dieser Forderung vorgegeben.

Ebenfalls einhellig wird der Mangel an aussagefähigen Kennwerten zur Beschreibung der dichtungstechnischen Eignung einer Wellenoberfläche festgestellt. Die üblichen Kennwerte R_a , R_z und R_{max} sind hierzu ungeeignet. Eine Möglichkeit bietet hier die Drallmessung nach Rau /10/, /11/. Mit diesem Verfahren können geschliffene Wellenoberflächen anhand einiger Kenngrößen beschrieben, und anhand von Erfahrungswerten klassifiziert werden. Allerdings beschränken sich diese Erfahrungswerte auf eben diese geschliffenen Wellenoberflächen.

Mit alternativ gefertigten Wellenoberflächen wurden bereits mehrere Untersuchungen durchgeführt und auch Erfahrungen im praktischen Einsatz gesammelt. Positive Erfahrungen, die deren Einsatz nahe legen, werden durch Rückschläge aufgrund nicht zweifelsfrei erkennbarer Ursachen entkräftet.

Die Auswirkung der Wellenoberfläche im Dichtsystem kann durch unterschiedliche Messmethoden festgestellt werden. Es existiert eine Vielzahl an Untersuchungsmethoden, um das Gesamtsystem zu beurteilen. Ebenso wird ein Verfahren angewendet, mit dem die Fördereigenschaft der Wellenoberflächen gemessen werden kann. Allerdings weisen diese Verfahren unterschiedliche Schwächen in der Handhabung oder der Aussagekraft auf.

Letztlich bleibt der Wunsch nach einem Kennwert, der es erlaubt, die Wellenoberflächen im Hinblick auf deren dichtungstechnische Eignung eindeutig zu beschreiben.

3 Versuchseinrichtungen, Versuchsdurchführung und untersuchte Wellenoberflächen

Die vorliegende Arbeit baut vorwiegend auf experimentellen Untersuchungen am System Radial-Wellendichtung auf. Es wurden zum Teil neue Untersuchungsmethoden vom Verfasser entwickelt, und die vorhandenen Prüfeinrichtungen entsprechend angepasst.

3.1 Versuchseinrichtungen

Für die Untersuchungen zum Förderverhalten des Dichtsystems, und speziell der Wellenoberflächen, ist die Drehrichtung der Welle von entscheidender Bedeutung. Für die Drehrichtungsangabe gilt für alle Prüfeinrichtungen bei Blickrichtung vom Ölsumpf zur Luftseite des Prüfdichtrings: Rechtslauf bzw. positive Drehzahl im Uhrzeigersinn, Linkslauf bzw. negative Drehzahl gegen den Uhrzeigersinn.

3.1.1 Zwölfzellenprüfstand (ZZP)

Der in Bild 14 dargestellte Zwölfzellenprüfstand dient zur Untersuchung von gleichzeitig zwölf Dichtsystemen. Es wurden die Langzeituntersuchungen sowie die Förderwertmessungen von Wellenoberfläche und Dichtsystem auf dieser Prüfeinrichtung durchgeführt.

An die sechs parallel angeordneten Spindeln kann von beiden Seiten je ein Dichtsystem montiert werden. An jeweils sechs der zwölf Prüfstellen rotiert die Welle in derselben Drehrichtung. Die Spindeln werden über zwei Flachriemen von einem Drehstrom-Asynchronmotor angetrieben, welcher von einem Frequenzumrichter angesteuert wird. Dadurch können beliebige Drehzahlen bis zu 9000 min^{-1} realisiert werden.



Bild 14: Zwölfzellenprüfstand

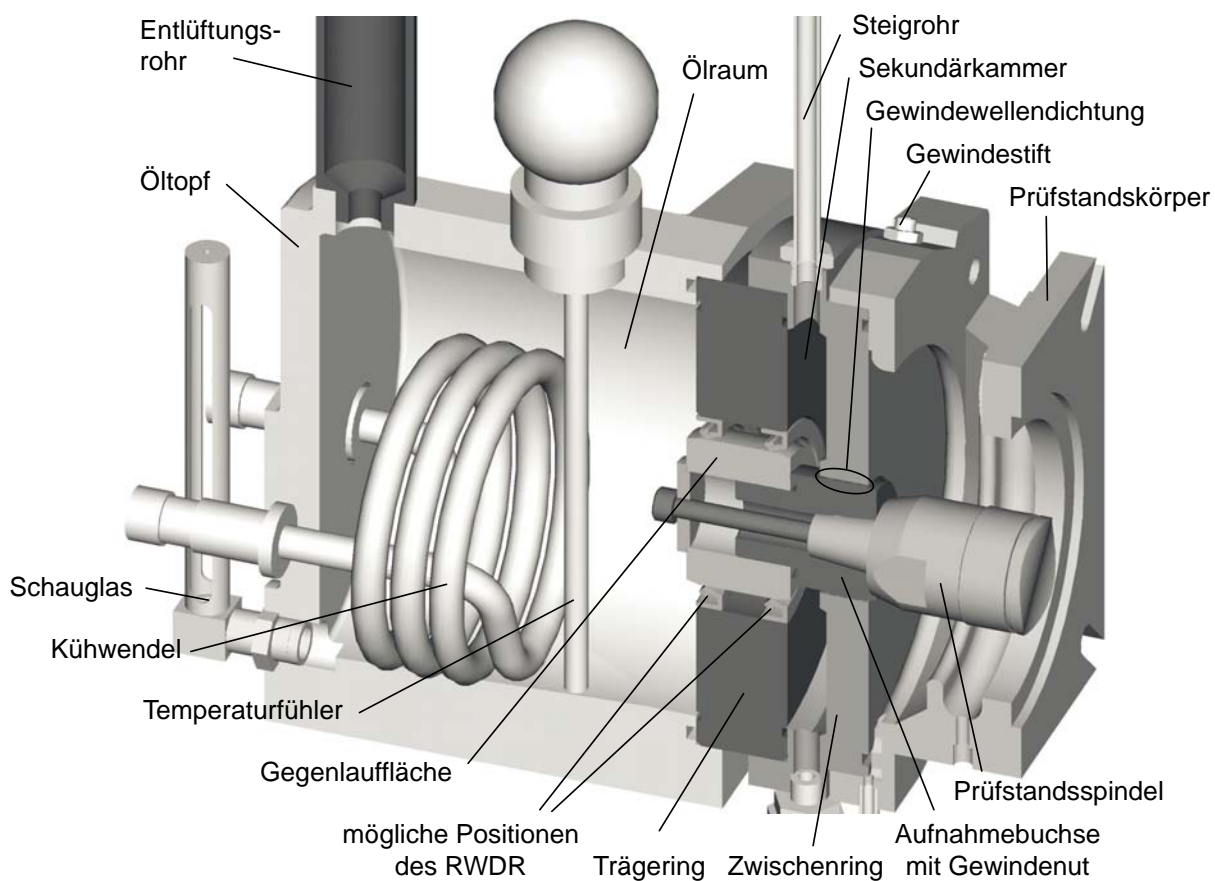


Bild 15: Einzelne Prüfzelle des Zwölfzellenprüfstand im Schnitt

Der Dichtring (RWDR) ist in einem Trägerring montiert und wird zusammen mit dem Öltopf der Prü fzelle am Prüfstandkörper angeflanscht. In Bild 15 ist der Querschnitt durch eine der Prü fzellen mit bereits montierter Versuchsanordnung dargestellt. Die beiden möglichen „Extrempositionen“ des zu montierenden Dichtrings sind hierbei angedeutet.

Temperiert wird der Ölsumpf (0,75 l bei Ölstand Wellenmitte) über die im Boden des Öltopfes integrierte Heizeinheit und die direkt im Ölsumpf befindliche Kühlwendel. Die Ölsumpftemperatur wird jeweils mit einem PT 100 Temperaturfühler erfasst, und kann im Betrieb zwischen 10°C und $130^{\circ}\text{C} \pm 1\text{K}$ eingestellt werden.

Eventuelle Leckage der einzelnen Dichtsysteme wird jeweils mittels eines DMS-Kraftaufnehmers gravimetrisch ermittelt. Erfasst werden die Leckagemesswerte durch einen Trägerfrequenzmessverstärker mit integriertem A/D-Wandler. Ein Messrechner zeichnet die einzelnen Messdaten simultan auf.

3.1.2 Sechsspindelprüfstand

Der Sechsspindelprüfstand ermöglicht die Untersuchung von gleichzeitig sechs Dichtsystemen unter praxisnahen Betriebsbedingungen.

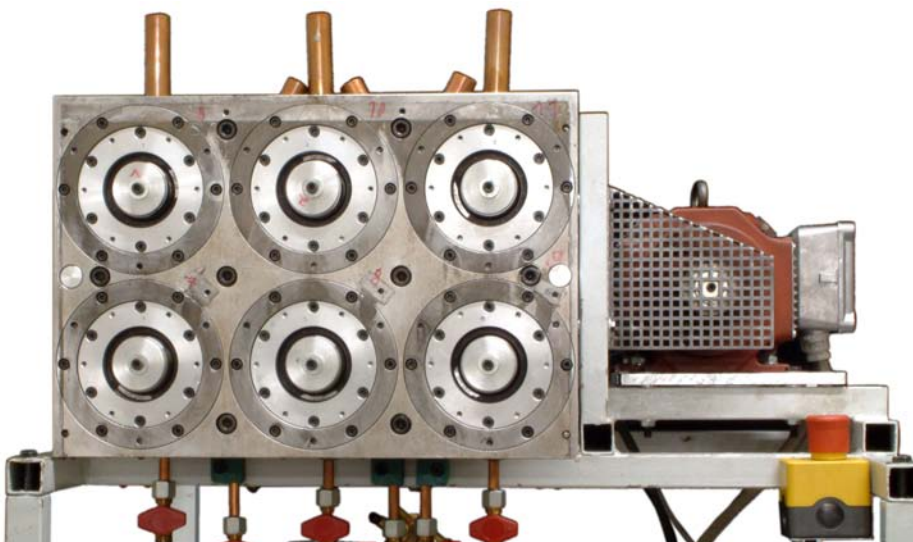


Bild 16: Prü fzellen des Sechsspindelprüfstand

Die einzelnen Prü fzellen enthalten 0,5 l bei Ölstand Wellenmitte und sind nicht temperiert. Ein Gleichstrommotor treibt über einen Zahnriemen die sechs nebeneinander und übereinander angeordneten Spindeln an, Bild 16. Durch Spannrollen wird der Zahnriemen so umgelenkt, dass alle Spindeln dieselbe Drehrichtung aufweisen.

Drehzahlen zwischen 100 min^{-1} und 2000 min^{-1} sind möglich und können stufenlos eingestellt werden. Lagerseitig ist der Ölraum durch einen PTFE-Manschetten-dichtring abgedichtet. Der Ölraum wird von einem transparenten Kunststoffrohr umschlossen, somit können die Strömungsvorgänge im Ölsumpf beobachtet werden. Die Frontplatte nimmt den Dichtringhalter incl. Versuchsdichtring auf und schließt den Ölraum nach vorn ab. Die Dichtringhalter sind derart gestaltet, dass Leckage unmittelbar abläuft und visuell erfasst werden kann. Die Leckage wird nicht gemessen.

3.1.3 Einzeldichtungsprüfstand (EDP)

Der Einzeldichtungsprüfstand, Bild 17, ermöglicht eingehende Untersuchungen am Dichtsystem Radial-Wellendichtung bei unterschiedlichen Randbedingungen.

Die Spindel, an der die Versuchswelle montiert ist, wird von einem Gleichstrom-Scheibenläufermotor, welcher über eine 4-Quadranten-Transistorregelung gespeist wird, angetrieben. Das Drehzahlspektrum reicht von ca. 10 bis 9000 min^{-1} . Über einen programmierbaren Sollwertgeber können beliebige Drehzahlprogramme vorgegeben werden. Das sich im Ölraum befindliche Ölvolume n kann wahlweise durch ein zusätzliches Hydraulikaggregat mit einem definierten Spülölstrom temperiert werden. Alternativ kann ein abgeschlossener Ölsumpf ausgeführt werden.

Der Ölstand ist in beiden Anordnungen beliebig einstellbar. Die Temperatur des Ölsumpfes wird durch einen PT 100-Temperatursensor, die auftretende Leckage der Versuchsdichtung über eine DMS-Wägezelle erfasst. Die Prüfkammer bzw. der Versuchsraum trägt den RWDR und ist im luftgelagerten Stator des EDP angeflanscht und somit nahezu reibungsfrei gelagert. Der Stator wird über einen Kraftaufnehmer am Gehäuse abgestützt, wodurch das im Dichtkontakt zwischen RWDR und Wellenoberfläche der Versuchswelle entstehende Reibmoment genau gemessen werden kann. Die Messwerte werden in einem Trägerfrequenzmessverstärker mit integriertem A/D-

Wandler aufbereitet und von einem Messrechner aufgezeichnet. Die gesamte Luftlager- und Prüfraumeinheit kann relativ zur Spindel axial verschoben werden.

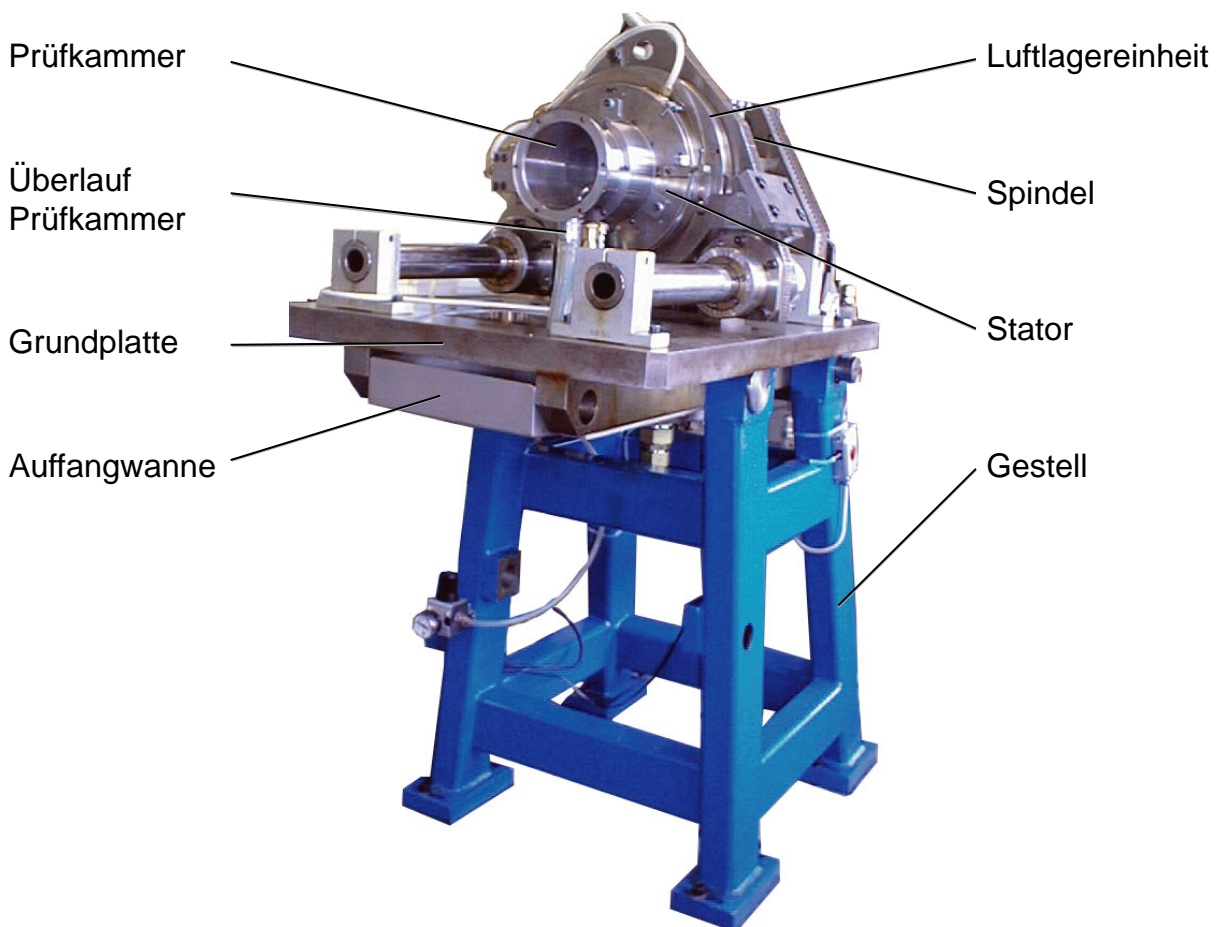


Bild 17: Einzeldichtungsprüfstand

3.1.4 Radialkraftmessgerät

Zur Ermittlung der Radialkraft der Versuchsdichtringe wird ein Zweibackennradimeter nach DIN 3761, Teil 9 eingesetzt. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 18 dargestellt. Eine der Messbacken ist beweglich gelagert und über eine Blattfeder mit hoher Federsteifigkeit abgestützt. Wird der zu vermessende Dichtring aufgeschoben, so verschiebt sich diese Messback im Bereich weniger Mikrometer. Diese Verschiebung ist proportional zur Radialkraft und wird von einem induktiven Wegaufnehmer erfasst. Auf-

grund des im Verhältnis zur Aufweitung des RWDR's geringen Messweges (geringe Radialkraft) ist die Messung weitgehend rückwirkungsfrei.

Um den Messwert abzusichern, werden für jeden Dichtring jeweils vier um 90° am Umfang versetzte Messungen durchgeführt. Der Wert für die Radialkraft ist dann der arithmetische Mittelwert der vier Einzelmessungen.

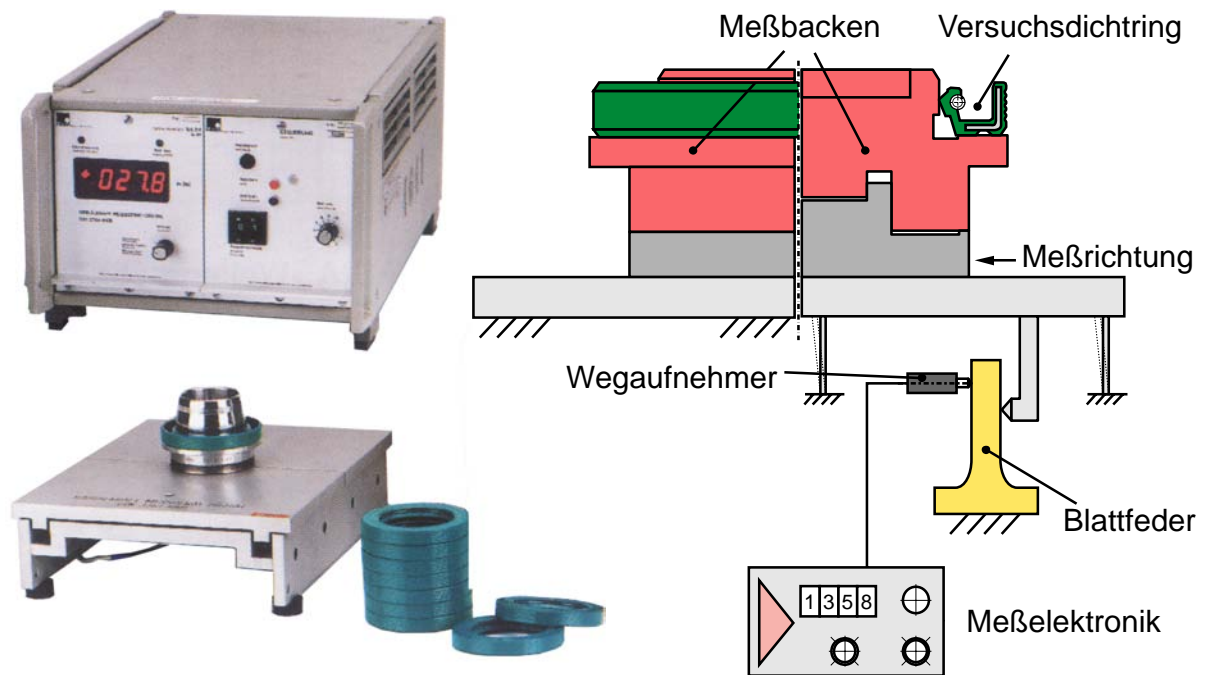


Bild 18: Radiameter nach DIN 3761

Die Messung der Radialkraft wird entsprechend $1/4$, $1/5$ $1/10$ s nach Aufschieben des Dichtrings durchgeführt. Als Triggersignal für den Beginn des Zeitintervalls dient ein einstellbarer Schwellwert der Radialkraft.

3.1.5 Berührbreitenmessgerät

Zur Beurteilung des Verschleißes der Dichtringe wird neben der Messung der Verschleißbreite der Dichtkante im unbelasteten Zustand unter dem Messmikroskop die Berührbreite im Dichtkontakt gemessen. Dazu wurde vom Verfasser ein Berührbreitenmessgerät entwickelt und gebaut. Es ermöglicht die Beobachtung und Vermessung der Berührzone des Dichtrings auf der Wellenoberfläche. Hierzu wird der Radial-Wellendichtring in einem Dichtringträger auf eine Glashohlwelle montiert. Über eine

Rastung können acht definierte Positionen der Dichtkante am Umfang fixiert und beobachtet werden. Hierzu wird die Berührfläche der Dichtkante von einer Xenon-Lichtquelle über einen Lichtwellenleiter und ein Spiegelrohr in Betrachtungsrichtung ausgeleuchtet. Mittels eines Messmikroskops wird über einen in der Glashohlwelle platzierten Umlenkspiegel die Dichtkante betrachtet. Die Berührbreite kann nun mit der im Okular des Messmikroskops befindlichen Strichplatte abgeschätzt (Ablesegenauigkeit max. 0,025 mm), oder der Messuhr genau abgelesen werden.

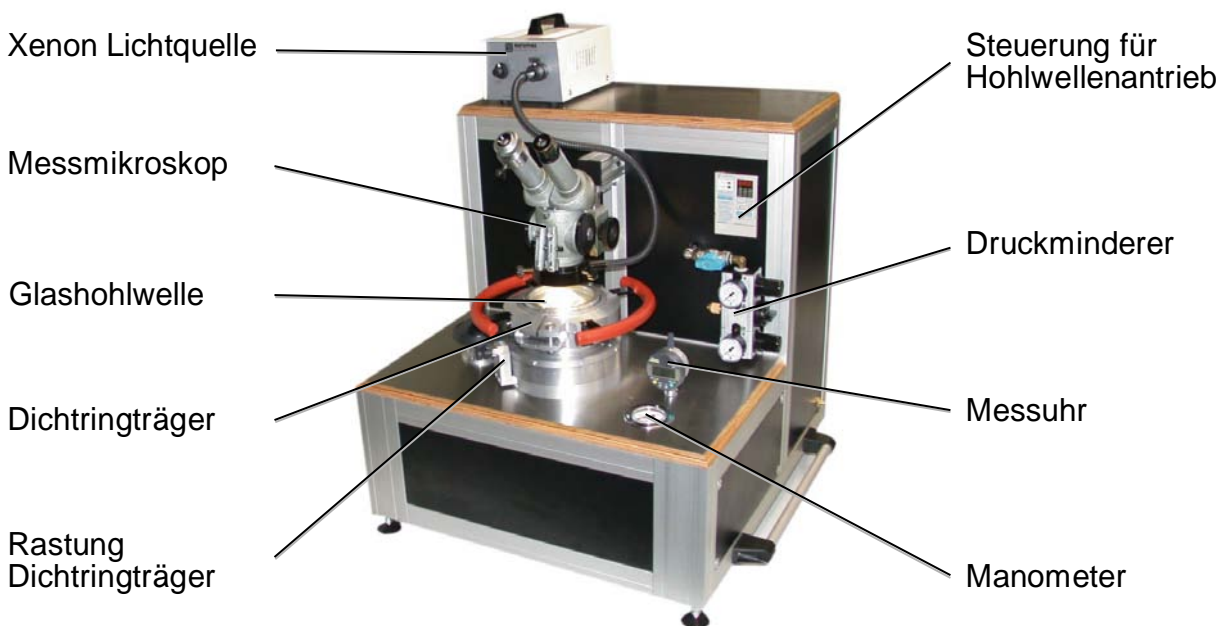


Bild 19: Berührbreitenmessgerät mit rotierender Glashohlwelle

Zusätzlich kann während der Messung die Glashohlwelle rotieren. Drehzahlen von 1 min^{-1} bis 30 min^{-1} sind möglich. Zusätzlich kann der Dichtring mit Druck bis zu 3 MPa beaufschlagt werden. So kann die Zunahme der Berührbreite bei Druckbeaufschlagung, sowie die Bewegung der Dichtkante in Achsrichtung vermessen werden.

3.1.6 Oberflächentopographiemessgerät mit chromatischem Sensor

Um die bereits geschilderten Probleme der taktilen Oberflächenmessung hinsichtlich der Auflösung bzw. Detektierung sehr feiner, schmaler und tiefer Oberflächenstrukturen zu umgehen, wurde zur Messung der Oberflächentopographie das berührungslos arbeitenden FRT MicroProf[®] eingesetzt, Bild 20. Dessen optischer Sensor macht es möglich, auch feinste Kratzer oder Riefen in der Oberflächentopographie darzustellen.

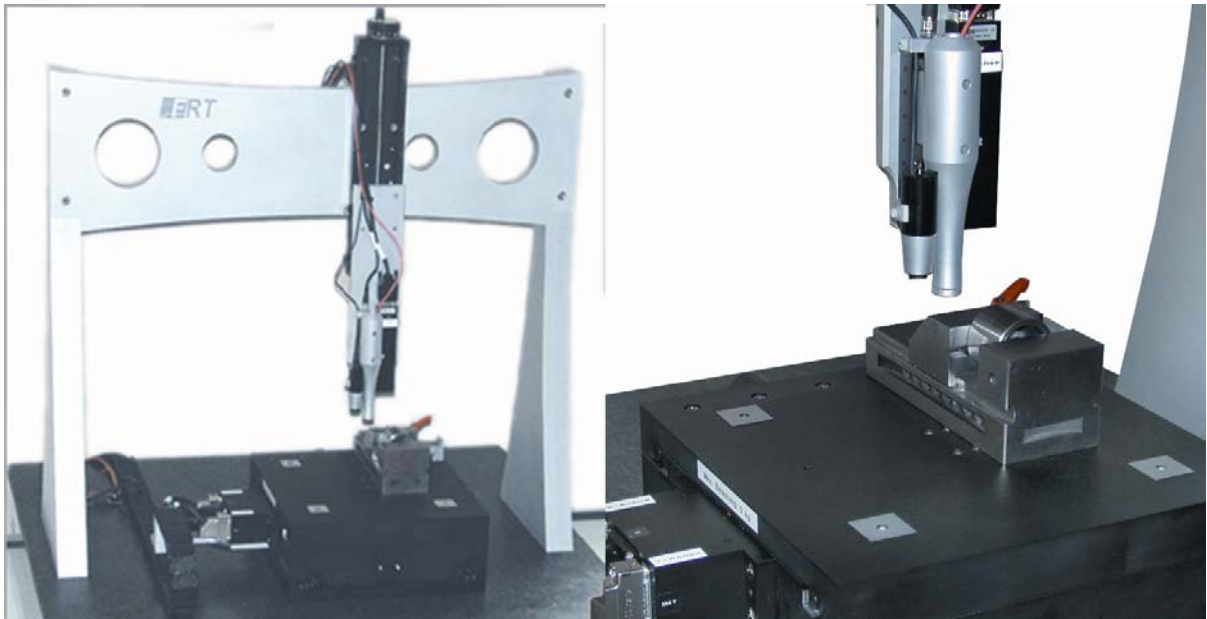


Bild 20: FRT MicroProf®

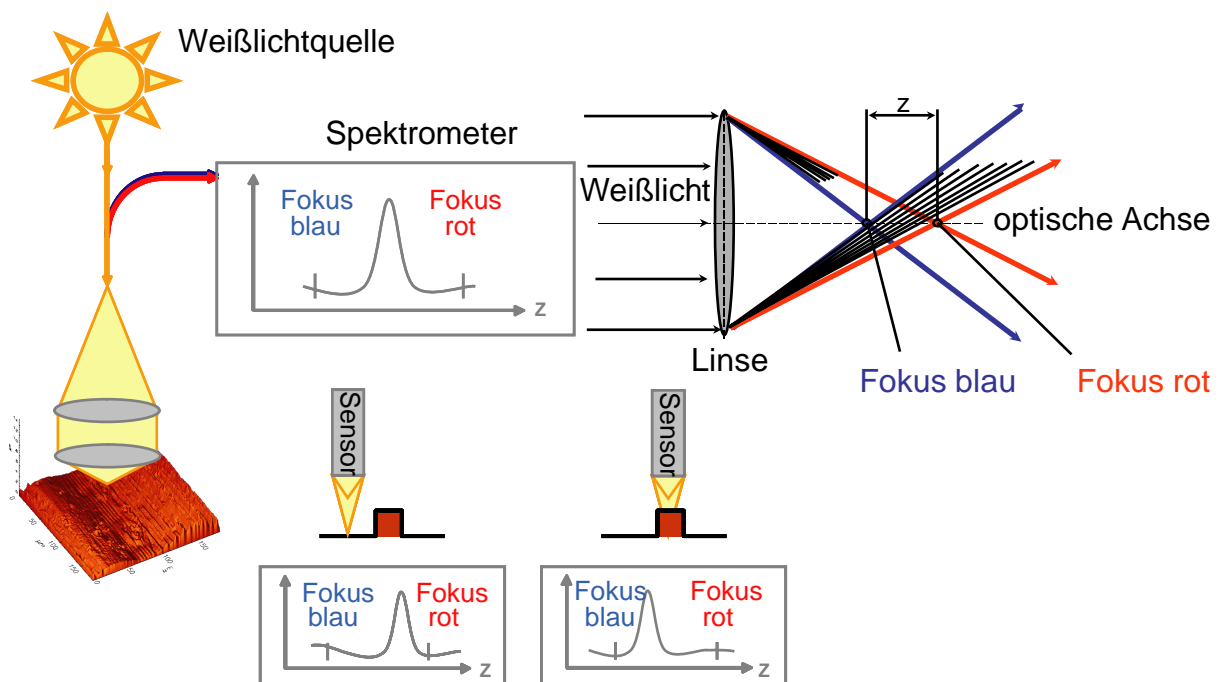


Bild 21: Chromatischer Sensor: Funktionsprinzip

Der optische Sensor arbeitet nach dem Prinzip der chromatischen Aberration, Bild 21. Die Probe wird mit fokussiertem Weißlicht beleuchtet. Eine passive Optik mit großer

chromatischer Aberration fächert das Licht vertikal in Fokuspunkte verschiedener Farbe und somit Höhe auf. Ein Miniaturspektrometer detektiert die Farbe des reflektierten Lichtes und ermittelt anhand einer Kalibriertabelle die Lage des Fokuspunktes und somit die z-Position der Probenoberfläche am jeweiligen Messort. Der gewünschte Messbereich wird mit dem x-y-Tisch abgerastert, wodurch die 3D-Oberflächentopographie erstellt wird.

Es können sämtliche 2D Oberflächenkennwerte nach DIN 4762 und DIN 4776 sowie die äquivalenten 3D Oberflächenkennwerte aus den Topographiedaten errechnet werden. Diese können jedoch aufgrund der nicht durch die Tastspitzengeometrie „geglätteten“ z-Werte geringfügig von taktilell ermittelten Werten abweichen.

Die Leistungsdaten des Oberflächenmessgerätes sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Leistungsdaten FRT MikroProf[®]

Maximales Messfeld	200 x 200 mm ²
Auflösung lateral	0,5 µm
Theoretische Auflösung in z-Richtung	3 nm
Messgenauigkeit in z-Richtung	ca. 50 nm
Messbereich z-Richtung	300 µm (3 mm bei reduzierter Genauigkeit)
Messfleckdurchmesser	ca. 1,5 µm

3.1.7 Drallmessplatz mit Hommel T8000

Der Drallmessplatz auf Basis des Rauheits- und Topografiemessgeräts Hommel T8000 ermöglicht die Bestimmung der Drallkenngrößen einer Wellenoberfläche. Neben der Vorschubeinheit, welche höhenverstellbar an der Säule befestigt ist, wird dazu ein Rotationsvorschub benötigt, Bild 22. Dieser positioniert die zu untersuchende Welle, um die 73 benötigten, gleichmäßig am Umfang verteilten, Tastschnitte aufzunehmen.

Die zugehörige Drallauswertesoftware errechnet die Drallkenngrößen Drallwinkel, Drallsteigung, Gängigkeit, Periodenlänge, Dralltiefe und theoretischem Förderquerschnitt aus der Oberflächentopografie /10/.

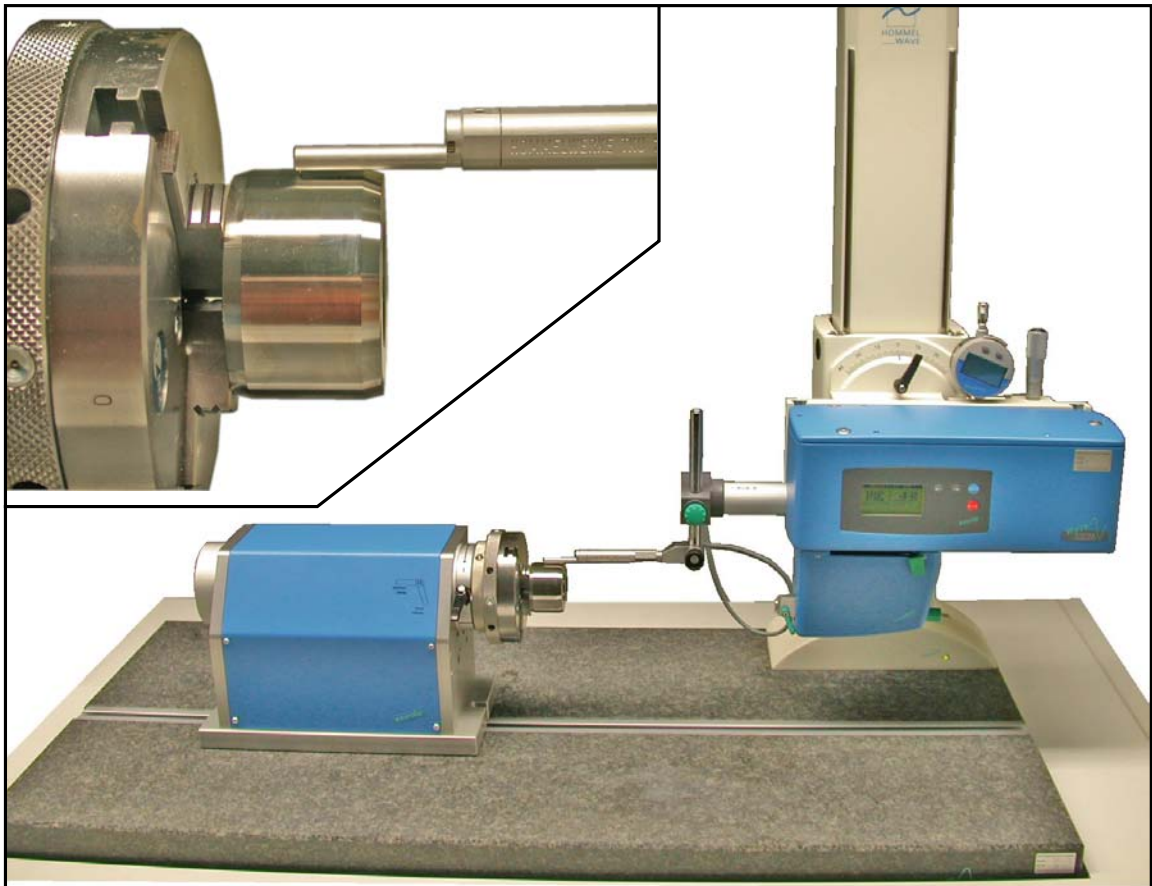


Bild 22: Drallmessplatz mit Hommel T8000

3.2 Untersuchungsmethoden

Zur Charakterisierung unterschiedlicher Wellenoberflächen hinsichtlich ihrer Eignung als Gegenauflfläche für Radial-Wellendichtringe wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Diese sind nachstehend näher erläutert.

3.2.1 Förderwertbestimmung der Wellenoberfläche

Um den Einfluss der Wellenoberfläche an der Förderwirkung des Dichtsystems bestimmen zu können, wird deren Förderung bestimmt. Diese wirkt sich in Überlagerung mit der Förderung des RWDR direkt auf die Dichtheit des Dichtsystems aus. Der Idealfall ist eine weitgehend förderneutrale Wellenoberfläche.

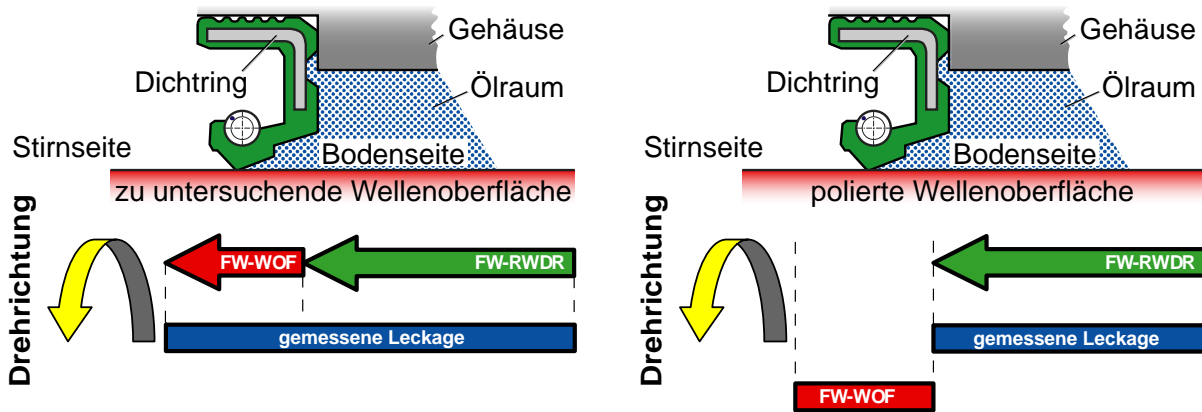


Bild 23: Messprinzip Förderwertbestimmung der Wellenoberfläche

Die Förderung der Wellenoberfläche im Dichtsystem wird durch den so genannten Förderwertversuch bestimmt, Bild 23. Dabei wird der Dichtring entgegen seiner bestimmungsgemäßen Einbaurichtung montiert (Ölsumpf befindet sich auf der Bodenseite). So wird vom Dichtring kontinuierlich Öl auf die Stirnseite gefördert. Das geförderte Öl tropft dort als Leckage ab, und wird gravimetrisch erfasst. Im ersten Schritt des Förderwertversuches wird die Summe der Teilströme aus der Förderung des Dichtrings (FW-RWDR) und der Förderung der originalen Wellenoberfläche (FW-WOF) als Leckagestrom gemessen. Die Messung wird nach einer Einlaufzeit von 24 Stunden gestartet. Über einen Zeitraum von ca. 48 Stunden wird dann der Leckagestrom gemessen. Anschließend wird die Welle gegen eine strukturfrei bearbeitete (polierte), und damit weitestgehend förderneutrale Wellenoberfläche ausgetauscht. Die Leckage wird dann nur durch die Förderung des Dichtrings bewirkt. Diese wird über einen Zeitraum von 30 bis 300 Minuten ermittelt. Die Differenz aus beiden Messwerten ergibt die Förderung (den Förderwert) der originalen Wellenoberfläche.

Durch die permanente Überflutung der Bodenseite ergibt sich eine unrealistische Betriebsituation. Dadurch ist eine Verfälschung des Betriebsverhaltens im Vergleich zur realistischen Einbausituation möglich. Weiterhin ist die Bestimmung des Förderwerts des Dichtrings anhand der polierten Wellenoberfläche hinsichtlich der möglicherweise schlechteren Benetzung mit Öl kritisch zu sehen. Für vergleichende Untersuchungen der Fördereigenschaften der Wellenoberflächen hat sich dieses Verfahren jedoch bewährt.

3.2.2 Förderwertbestimmung des gesamten Dichtsystems - Modifizierte Zweikammermethode

Ausgehend vom Stand der Technik hinsichtlich der Förderwertbestimmung im Dichtsystem, wurde vom Verfasser die modifizierte Zweikammermethode abgeleitet. Hierbei wurden die Vorteile der Zweikammermethode mit der Realitätsnähe der Öltropfenmethode verbunden.

Der Grundgedanke der modifizierten Zweikammermethode besteht darin, eine Sekundärkammer nur für die Dauer der Förderwertbestimmung mit Öl zu fluten, nach erfolgter Messung jedoch wieder zu entleeren, Bild 24. Dadurch können die störenden Einflüsse, wie z.B. die verbesserte Schmierung bei gefluteter Luftseite, auf die Langzeituntersuchung des Dichtsystems minimiert werden, ohne dass die Qualität der Förderwertbestimmung verringert wird. Die ggf. auftretende Leckage des Dichtsystems kann so während der Langzeituntersuchung gemessen werden.

Die Förderwertentwicklung des gesamten Dichtsystems gibt Aufschluss über den Einfluss der Wellenoberfläche im Dichtsystem auf die Langzeiteigenschaften und lässt Vergleiche mit den erprobten, im Einstich geschliffenen, Wellenoberflächen zu. Darüber hinaus können Hinweise zur möglichen Lebensdauer des Dichtsystems gewonnen werden.

Die für die Langzeituntersuchungen eingesetzte Prüfeinrichtung (siehe 3.1.1) ist, wie allgemein üblich, mit einer in den Öltopf eintauchenden Prüfspindel ohne weitere Dichtstelle am Öltopf ausgeführt, Bild 15. Die Sekundärkammer ist im Normalbetrieb nicht mit Öl gefüllt, wodurch deren Abdichtung zur Umgebung (Sekundärabdichtung) über weite Strecken Trockenlaufbedingungen ausgesetzt wird. Da hier berührende Dichtsysteme ungeeignet sind (Verschleiß), wird eine Gewindewellendichtung eingesetzt. Ein weiterer Vorteil der berührungslosen Gewindewellendichtung ist, dass so das Reibmoment der Versuchsdichtung ggf. ohne Störeinfluss durch eine zweite berührende Dichtung gemessen werden könnte. Die Gewindewellendichtung wurde entsprechend den Vorgaben von Heitel /25/ und Krautzig /24/ ausgelegt.

Die Sekundärkammer kann aufgrund der Gewindewellenabdichtung nur bei rotierender Spindel befüllt werden, da andernfalls Leckage auftritt. Die Förderwertbestimmung kann in einem Drehzahlband zwischen 250 min^{-1} (Dichtgrenze der Gewindewellendichtung) und 1500 min^{-1} (Verschäumen des Öls verfälscht Messergebnis) durchgeführt werden. Die Förderwertbestimmung wurde bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} über einen Zeitraum von zwei bis vier Stunden durchgeführt.

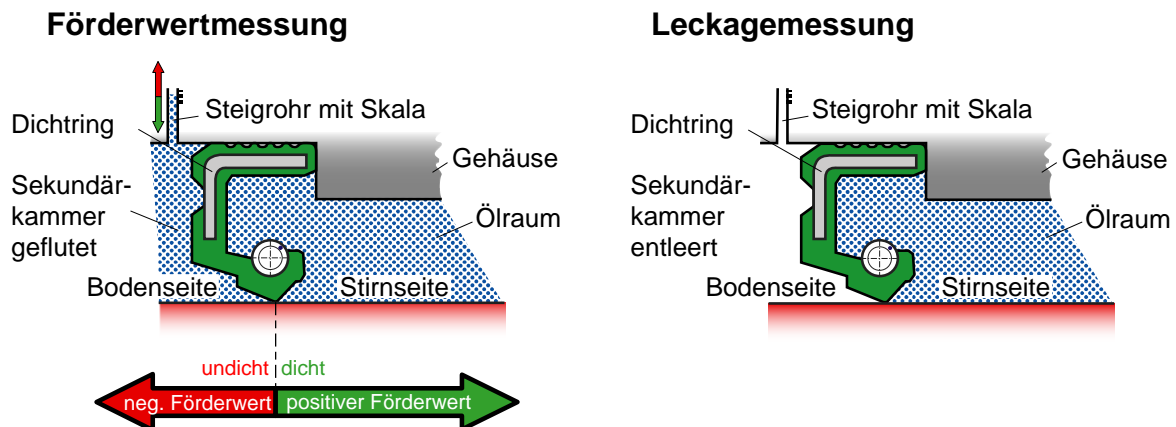


Bild 24: Messprinzip modifizierte Zweikammermethode

Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen wird die Sekundärkammer mit einer Kolbenspritze von unten mit Öl befüllt.

Nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts zwischen Prüfkammer und Sekundärkammer wird der Füllstand im Steigrohr abgelesen und die Zeitmessung gestartet. Nach Ablauf des Zeitintervalls wird erneut der Füllstand abgelesen. Während dessen wird die Temperatur der Prüfkammer ständig beobachtet und beim Ablesen des Füllstands beachtet. Der Quotient aus Füllstandsdifferenz und Messzeit ergibt den Förderwert des Dichtsystems in cm^3/h .

Nach der Entleerung der Sekundärkammer kann die Leckagemessung fortgesetzt werden. Die Sekundärkammer ist so gestaltet, dass dieser zügig entleert werden kann.

Messunsicherheit der Förderwertbestimmung

Obwohl hier durch intermittierende Beobachtung des Förderwerts nur die Tendenz der Förderwertentwicklung ermittelt werden soll, ist die Messunsicherheit bzgl. der ermittelten Absolutwerte von Interesse.

Die Ablesegenauigkeit des geförderten Volumens im Steigrohr aus Polypropylen mit einem Inhalt von 2 ml beträgt $\pm 0,006 \text{ cm}^3$ (Skalenteilung). Bezogen auf das Standard-Messintervall von vier Stunden ergibt sich die Messunsicherheit aus Ablesefehlern zu ca. $0,003 \text{ cm}^3/\text{h}$. Ein weiterer Anteil an der Messunsicherheit stellen Temperaturschwankungen in der Sekundärkammer dar. Die Dichte ρ des verwendeten Öls beträgt bei der Temperatur T [K]

$$\rho = 1063,3 - 0,596 \cdot T \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Volumenzunahme des Öls in der Sekundärkammer ($m_{(RT)} \approx 176 \text{ g}$) bei einer Erwärmung um 1 K beträgt somit $0,13 \text{ cm}^3$. Wiederum bezogen auf das Standard-Messintervall von 4 Stunden ergibt sich die Messunsicherheit aus einer Temperaturabweichung von 1 K zu ca. $0,033 \text{ cm}^3/\text{h}$. Die Temperatur beim Ablesen der Füllstände muss also möglichst gleich sein.

3.2.3 240 Stunden Dichtheitsuntersuchung

In Anlehnung an die Dichtheitsüberprüfung nach /4/, /5/ wurden die Bedingungen für die 240 Stunden Dichtheitsuntersuchungen gewählt. Die Dichtsysteme wurden in beide Drehrichtungen untersucht. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die gegebenenfalls auftretende Leckage wurde visuell erfasst und dokumentiert. Eine genaue Messung der Leckagemenge wurde nicht durchgeführt.

Ziel der Untersuchungen war, den Einfluss der fertigungsbedingten Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten, den Dichtring- und Wellenverschleiß und die Veränderung im Dichtsystem festzustellen.

Tabelle 2: Versuchsparameter 240 Stunden Dichtheitsuntersuchung

Dichtring	BAUM4 X7, FPM
Temperatur	zyklisch, je 20 h: 80°C, 4 h: RT
Öl	SAE 80, Ölstand Wellenmitte
Drehzahl	zyklisch, je 20 h: 1500 min ⁻¹ (u = 3,9 m/s), 4 h: 0 min ⁻¹
Exzentrizität	≤0,1 mm (statisch)

3.2.4 1.000 Stunden Langzeituntersuchung

Aus den mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren und Parameterkombinationen hergestellten Wellenoberflächen wurden für den praktischen Einsatz relevante Beispiele ausgewählt, und damit aufgebaute Dichtsysteme einer 1.000 Stunden Langzeituntersuchung zu unterziehen. Auch hier ist der Einfluss der fertigungsbedingten Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten, den Dichtring- und Wellenverschleiß und die Veränderung im Dichtsystem von Interesse. Die längsgedrehten Versuchswellen sollten dabei verstärkt betrachtet werden, da diese für die praktische Anwendung am interessantesten sind. Um die notwendige statistische Sicherheit zu haben, wurden je untersuchter Parameterkombination sechs Exemplare, in unterschiedlichen Drehrichtungen, geprüft. Tabelle 3 zeigt die Versuchsparameter für die 1.000 Stunden Langzeituntersuchung.

Tabelle 3: Versuchsparameter 1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung

Dichtring	BAUM4 X7, FPM
Temperatur	zyklisch, je 23 h: 80°C, 1 h: 20°C
Öl	Esso SAE 80 W 90, Ölstand Wellenmitte
Drehzahl	zyklisch, je 23 h: 3000 min ⁻¹ (u = 7,8 m/s), 1 h: 0 min ⁻¹
Exzentrizität	≤0,05 mm

Neben der Dichtigkeitsaussage sollte der Verschleiß von Wellenoberfläche und Dichtring untersucht werden. Zur Abschätzung der Eignung der unterschiedlichen Wellen-

oberflächen als Gegenlauffläche spielen die Langzeiteigenschaften, auch aufgrund fehlender Erfahrungswerte, eine große Rolle.

3.2.5 Abdichtende Flüssigkeiten

Für die Förderwertbestimmung der Wellenoberflächen wurde das FVA-Referenzöl Nr. 3 eingesetzt. Die chemische Zusammensetzung wird bei diesen, aus identischer Rohölquelle stammenden, Referenzölen über Jahrzehnte konstant gehalten und garantiert. Somit können Legierungseinflüsse oder der Einfluss von geänderten Additivpaketen ausgeschlossen, und die Vergleichbarkeit der Untersuchungen mit früheren und vor allem zukünftigen Untersuchungen gewährleistet werden.

Da die thermische Stabilität dieser Referenzöle beschränkt ist, wurden zur Vermeidung von Einflüssen durch die Zerstörung des Schmierstoffs oder Verkokungsprodukten für die Langzeituntersuchungen (240 Stunden Dichtheitsuntersuchung, 1.000 Stunden Langzeituntersuchung und Förderwertbestimmung des Dichtsystems) mineralische Standard-Getriebeöle eingesetzt. Es handelt sich hierbei um mineralische Öle der Viskositätsklasse SAE 80. Dies entspricht der Viskositätsklasse des FVA-Referenzöls Nr. 3.

3.3 Untersuchte Wellenoberflächen

Um geeignete Alternativen für das Verfahren „Schleifen im Einstich“ qualifizieren zu können, wurden durch unterschiedliche Fertigungsverfahren hergestellte Wellenoberflächen hinsichtlich ihrer dichtungstechnischen Eignung untersucht. Die verwendeten Fertigungsverfahren sowie die entstandenen Wellenoberflächen sind nachstehend beschrieben.

Die Abmessungen der längsgedrehten Versuchswellen sind in Bild 25 dargestellt. Für Fertigungsverfahren mit beschränkter Bearbeitungsbreite wie das Einstech-Hartdrehen und Tangential-Hartdrehen wurde eine schmalere Lauffläche zugelassen. Die geforderte Härte der Wellenrohlinge beträgt durchgängig $60 \text{ HRC} \pm 2$.

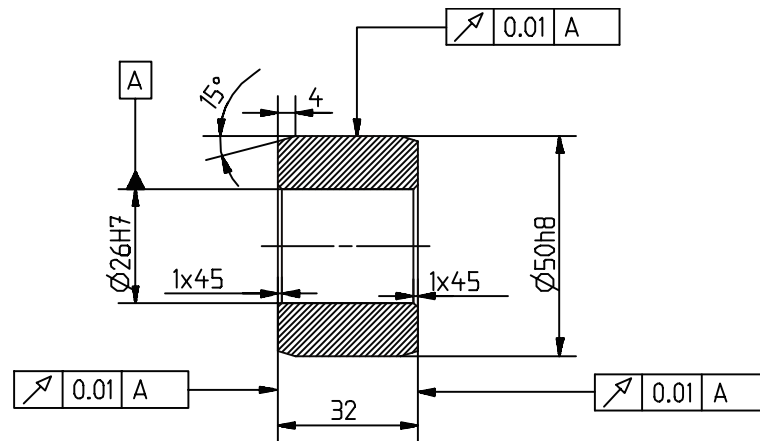


Bild 25: Abmessungen der Versuchswellen

Für das Standardverfahren Längsdrehen ergibt sich der Zusammenhang zwischen der theoretischen Rautiefe R_{th} und den Zerspanungsparametern Vorschub f und Eckenradius r_ε der Schneide wie folgt:

$$R_{th} \approx \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} \quad \text{Gl. 6}$$

Mit dem bekannten Durchmesser D beträgt der Steigungswinkel α der Vorschubwendel:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{f}{\pi \cdot D}\right) \quad \text{Gl. 7}$$

Es wurden je Parametersatz bzw. Fertigungsverfahren vier Versuchswellen gefertigt und untersucht. Die nachfolgend dokumentierten Rauheitswerte der Wellenoberflächen sind jeweils die Mittelwerte aller innerhalb eines Parametersatzes gefertigten Versuchswellen.

Maschinenkonzept

- Schrägbett auf Naturgranit-Basis
- externe Elektro- und Hydraulikversorgungsanlage
- Linearwerkzeugsystem

Spindel

- hydrostatisch gelagert
- Antriebsleistung: 7,2 KW
- maximale Drehzahl: 3400 min⁻¹
- Rundlaufgenauigkeit: < 0,1 µm

Längs- und Planschlitten

- hydrostatisch gelagert
- Wiederholgenauigkeit: < ±0,1 µm
- Positionsgenauigkeit: < 2 µm/150 mm

CNC Steuerung (32-bit)

- Auflösung: 0,05 µm
- Vorschub: 0,001 - 5 m/min
- Geraden-, Kreis- und Splineinterpolation



Bild 26: Präzisionsdrehmaschine Hembrug Slanted Microturn CNC

Die Versuchswellen wurden alle auf derselben Drehmaschine am Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) in Aachen hergestellt. Damit sind maschinenabhängige Einflüsse auszuschließen. Es handelt sich hierbei um eine speziell für präzise Hartdrehbearbeitung optimierte Werkzeugmaschine der Firma Hembrug. Diese ist als vollständig hydrostatisch gelagerte Schrägbett Drehmaschine auf Naturgranit-Basis ausgeführt. Spindel und Führungen werden kontinuierlich mit temperiertem Hydrostatiköl thermisch stabilisiert. Bild 26 zeigt die verwendete Drehmaschine sowie die relevanten technischen Daten.

Im Folgenden werden die unterschiedlich gefertigten Wellenoberflächen mit den jeweilig verwendeten Fertigungsparametern vorgestellt. Um einen Eindruck von der Beschaffenheit der Wellenoberflächen zu erhalten, sind eine 3D-Oberflächentopografie und je ein Profilschnitt in Achs- und Umfangsrichtung abgebildet. Die dargestellten 500 µm x 500 µm umfassenden Oberflächentopografie und die daraus ermittelten Profilschnitte wurden mit dem in 3.1.6 vorgestellten Messgerät bei einer lateralen Schrittweite von einem Mikrometer aufgezeichnet. Die ebenfalls aufgelisteten Rauheitsparameter wurden mit demselben Messgerät, allerdings mit einer Messlänge von

vier Millimetern und einer lateralen Schrittweite von fünf Mikrometern, aufgezeichnet. Bei der Betrachtung ist zu beachten, dass daraus eine vermeintliche „Abweichung“ der aufgelisteten Rauheitswerte von den dargestellten Profilschnitten resultiert. Jedoch kann aus der Messstrecke von 0,5 mm kein aussagekräftiger Rauheitswert ermittelt werden – die aufgelisteten Rauheitswerte entsprechen annähernd den Werten, welche mit dem in DIN 4762 und DIN 4776 zugrunde gelegten Tastschnittverfahren ermittelt werden können. Dahingegen ist zur greifbaren Visualisierung der vorliegenden Oberflächentopografie ein Ausschnitt von 500 μm x 500 μm zweckmäßig.

3.3.1 Im Einstich geschliffene Wellenoberflächen

Als Vergleichsbasis für die Untersuchungen dient die seit Jahrzehnten als Standard eingesetzte und nach /4/ und /5/ im Einstich geschliffene (EGS) Wellenoberfläche. Diese sind als Nadellagerinnenringe in der Sonderausführung EGS erhältlich, und aus Wälzlagerstahl 100 Cr 6 (1.2067) gefertigt. Die Wellenoberflächen entsprechen mit der durchschnittlichen Rautiefe von $R_z = 2,10 \mu\text{m}$ den Vorgaben für Gegenaufläufen von Radial-Wellendichtringen. Die Versuchswellen wurden mit der Bezeichnung „H“ und einer dreistelligen fortlaufenden Nummer gekennzeichnet.

Die Oberflächentopografie, Bild 27, zeigt die für im Einstich geschliffene Wellenoberflächen typische unregelmäßige Ausprägung. Das Rauheitsprofil in Umfangsrichtung ist ähnlich dem in Längsrichtung gemessenen, weist jedoch eine geringere Rauheit ($R_z = 0,49 \mu\text{m}$) auf.

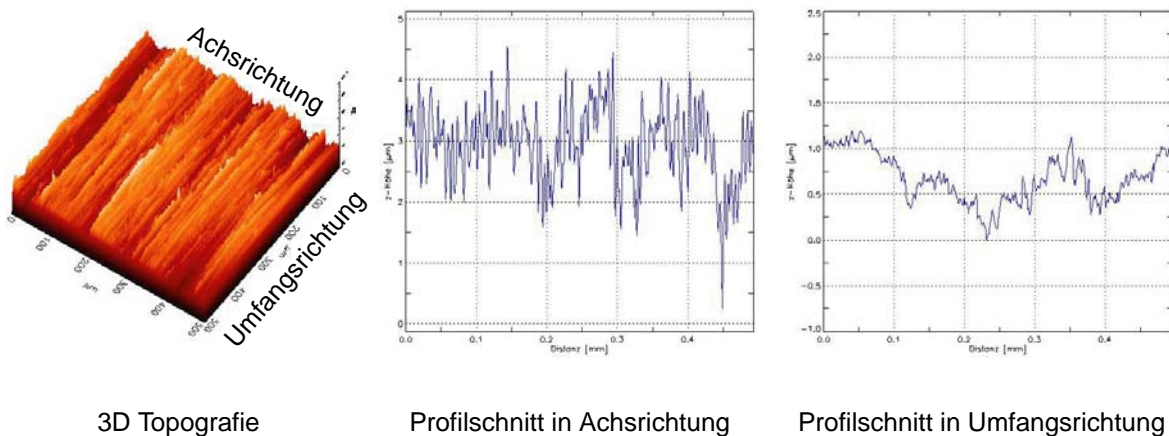


Bild 27: Topografie und Profilschnitte, im Einstich geschliffene Wellenoberfläche

3.3.2 Längs-hartgedrehte Wellenoberflächen

Um die Auswirkung der durch das Längsdrehen entstehenden Vorschubwendel systematisch zu untersuchen, wurden zwei Serien längs-hartgedrehter Versuchswellen gefertigt. Der Einfluss der Vorschubwendel bzw. deren Steigung sollten bei konstanter Oberflächenrauheit ermittelt werden, deshalb wurden zwei Fertigungsserien mit jeweils unterschiedlichem Zielwert der Rautiefe R_Z hergestellt. Die Fertigungsparameter sowie die ermittelten Oberflächenkennwerte sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 dokumentiert.

Es wurde jeweils nach Fertigung der Versuchswellen einer Parameterkombination (entspricht vier Versuchswellen) ein neues Schneidenwerkzeug verwendet, um Verschleißeinflüsse auf die gefertigten Wellenoberflächen zu vermeiden.

Tabelle 4: Kennwerte und Fertigungsparameter der längs-hartgedrehten Wellenoberflächen Serie 1

	1A X	1B X	1C X	1D X	1E X
Wellenwerkstoff	20MnCr5 (1.7147)				
Schneide	DCMW11T3 aus CBN 10; gefast & gebürstet				
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	160				
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,057	0,080	0,098	0,113	0,180
Steigung der Vorschubwendel [°]	0,021	0,029	0,036	0,041	0,066
Schnitttiefe [mm]	0,10				
Eckenradius [mm]	0,4	0,8	1,2	1,6	4,75
R_Z Längsrichtung [μm]	2,67	2,44	2,29	2,54	2,21
R_Z Umfangsrichtung [μm]	0,56	0,49	0,56	0,58	0,50

Die Kennzeichnung beinhaltet die Nummer der Serie, den Kennbuchstaben für den Eckenradius der verwendeten Schneide sowie eine fortlaufende Nummer innerhalb der einzelnen Parameterkombination.

Tabelle 5: Kennwerte und Fertigungsparameter der längs-hartgedrehten Wellenoberflächen Serie 2

	2A X	2B X	2C X	2D X
Wellenwerkstoff	20MnCr5 (1.7147)			
Schneide	DCMW11T3 aus CBN 10; gefast & gebürstet			
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	160			
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,083	0,117	0,144	0,166
Steigung der Vorschubwendel [°]	0,030	0,042	0,052	0,060
Schnitttiefe [mm]	0,10			
Eckenradius [mm]	0,4	0,8	1,2	1,6
R _z Längsrichtung [µm]	3,07	2,69	2,83	3,40
R _z Umfangsrichtung [µm]	0,69	0,93	0,66	0,71

Da innerhalb der einzelnen Parameterserie dieselbe Rautiefe angestrebt wurde, hat die Variation des Drehvorschub, und somit der Steigung der Drehwendel zur Folge, dass der Eckenradius der Schneide kontinuierlich gesteigert werden musste. Dadurch wird die Drehwendel mit Zunahme des Vorschubs auch flacher. Der Drehvorschub liegt im Größenordnungsbereich der Berührbreite des Dichtrings (vgl. maßstäbliche Darstellung in Bild 28).

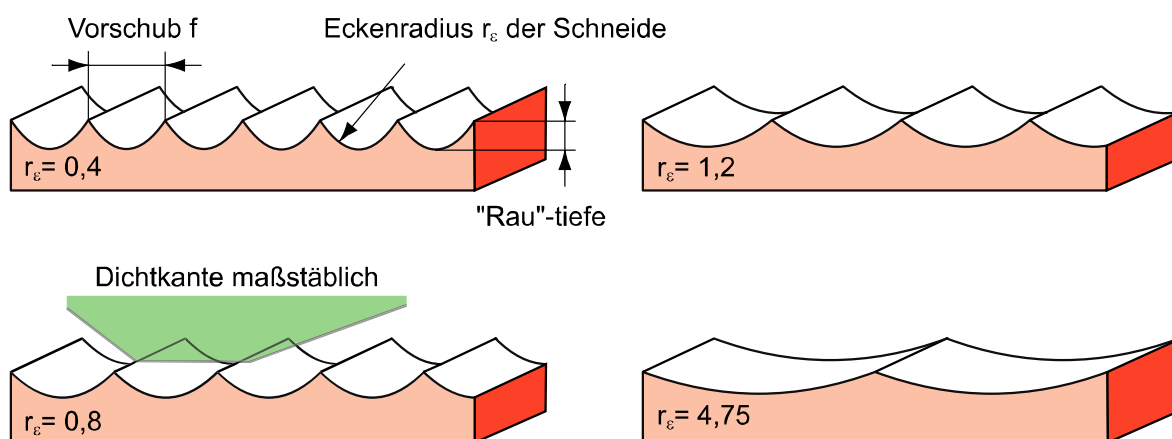


Bild 28: Änderung des Drehwendelquerschnittes

Die in Bild 29 und Bild 30 dargestellten 3D-Oberflächentopografien und Profilschnitte zeigen jeweils die resultierenden Wellenoberflächen, die mit dem geringsten bzw. größten Vorschub gefertigt wurden.

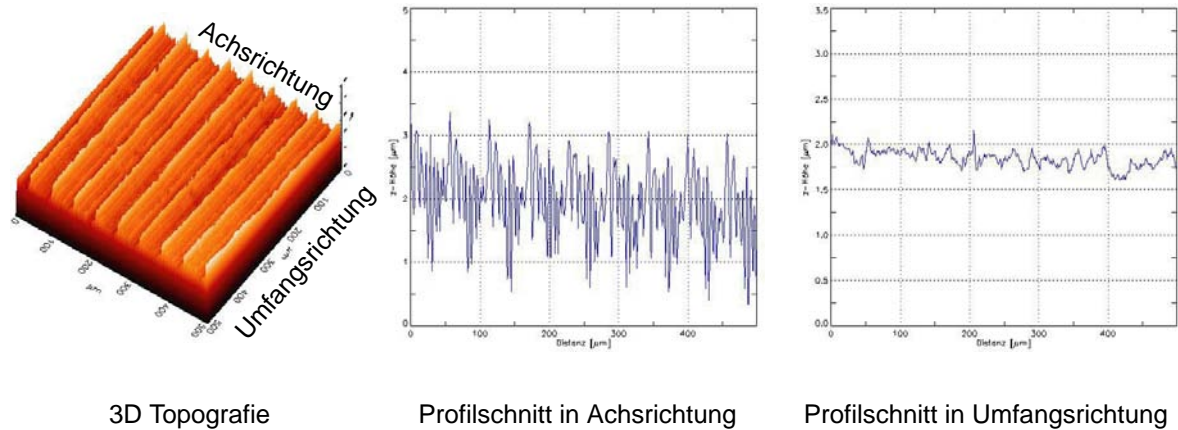


Bild 29: Topografie und Profilschnitte, längs-hartgedreht 1AX

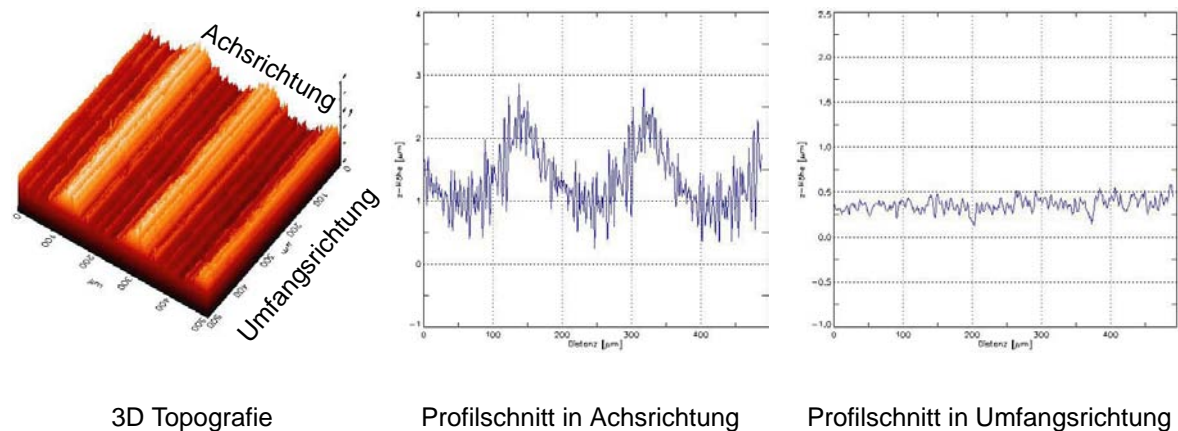


Bild 30: Topografie und Profilschnitte, längs-hartgedreht 1EX

Auffällig ist, dass die sich in Achsrichtung typischerweise ausprägenden Rauheitsprofile stark von dem Rauheitsprofil in Umfangsrichtung unterscheiden. Sie sind vergleichsweise glatt. Die Rauheitswerte (Tabelle 4 und Tabelle 5) belegen diesen Eindruck.

3.3.3 Verschleißuntersuchung bei längs-hartgedrehten Wellenoberflächen

Die Schneide wird im Produktionsprozess bis zum Erreichen des Standzeitende eingesetzt. Dieses wird entweder durch Überschreiten der zulässigen Verschleißmarkenbreite auf der Schneide oder durch Überschreiten der zulässigen Oberflächenrauheit markiert.

Um den Einfluss der verschleißenden Schneide auf die resultierende Wellenoberfläche bzw. deren Abdichtverhalten zu ergründen, wurde an vier Stadien (W1 bis W4) des Werkzeugverschleißes (“**W**ear“) von neuer Schneide bis zum Standzeitende jeweils vier Versuchswellen hergestellt. Die längsgedrehten Versuchswellen der Verschleißuntersuchung sind mit dem Kürzel des Verschleißstadiums und einer fortlaufenden Nummer gekennzeichnet.

Die gesamten Fertigungsparameter sowie die abgewickelten Drehwege der Schneide sind in Tabelle 6 aufgelistet. Die entsprechenden Verschleißwege wurden an durchgehärteten Bauteilen aus demselben Werkstoff mit konstant gehaltener Schnittgeschwindigkeit erbracht.

Tabelle 6: Kennwerte und Fertigungsparameter der Längs-hartgedrehten Wellenoberflächen, Verschleißuntersuchung

	W1 - X	W2 - X	W3 - X	W4 - X
Wellenwerkstoff	20MnCr5 (1.7147)			
Schneide	DCMW11T3 aus CBN 10; gefast & gebürstet			
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	160			
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,050			
Steigung der Vorschubwendel	0,018			
Schnitttiefe [mm]	0,10			
Eckenradius [mm]	0,8			
Abgewickelter Drehweg [m]	0 – 226	2200 – 2425	4504 - 4729	6857 - 7082
R_z Längsrichtung [µm]	1,62	1,80	3,04	3,07
R_z Umfangsrichtung [µm]	0,48	0,53	1,25	0,94

3.3.4 Längs-hartgedrehte Wellenoberflächen Wiper-Schneidengeometrie

Die Wiper-Schneidengeometrie wurde entwickelt, um mit großen Vorschubwerten, die für eine zeitsparende und somit kostengünstige Fertigung notwendig sind, eine geringe Oberflächenrauheit zu erzeugen. Der kleine Schneidenradius an der Hauptschneide geht in einen größeren Radius an der Nebenschneide über, Bild 31.

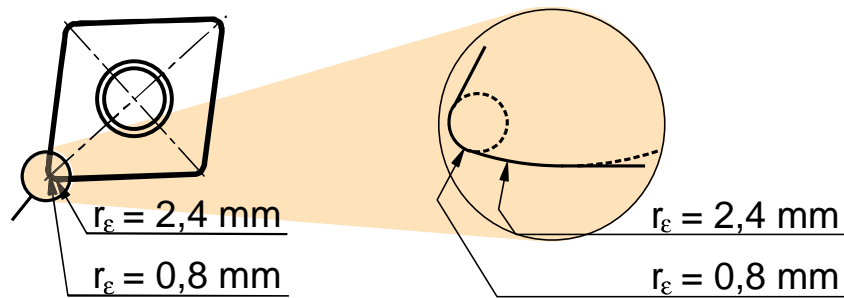


Bild 31: Wiper- Schneidengeometrie

Der Radius der Nebenschneide ist für die entstehende Rauheit der Wellenoberfläche maßgeblich, somit wird nach Gleichung (6) bei identischem Vorschub eine geringere theoretische Rautiefe erreicht. Die Vorschubwendel wird dadurch flacher und breiter.

Tabelle 7: Kennwerte und Fertigungsparameter der längs-hartgedrehten Wellenoberflächen mit Wiper-Schneidengeometrie

	WW 1 X C	WW 2 X C	WW 3 X C
Wellenwerkstoff	20MnCr5 (1.7147)		
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	160		
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,100		
Steigung der Vorschubwendel [°]	0,036		
Schnitttiefe [mm]	0,10		
Eckenradius [mm]	0,8 / 2,4		
Abgewickelter Drehweg [m]	0 - 150	3480 – 3600	18428 – 18548
R _z Längsrichtung [µm]	1,76	2,69	3,15
R _z Umfangsrichtung [µm]	0,47	0,67	0,65

Zusätzlich zu den mit neuwertigem Schneidenwerkzeug gefertigten Wellenoberflächen wurde, analog zur Vorgehensweise beim Längs- Hartdrehen mit Standardschneide, mit fortschreitendem Verschleiß („**W**ear“) der Schneide weitere Versuchswellen gefertigt (drei Verschleißstadien). Die abgewickelten Drehwege, allgemeinen Fertigungsparameter sowie die Oberflächenkennwerte sind in Tabelle 7 dargestellt.

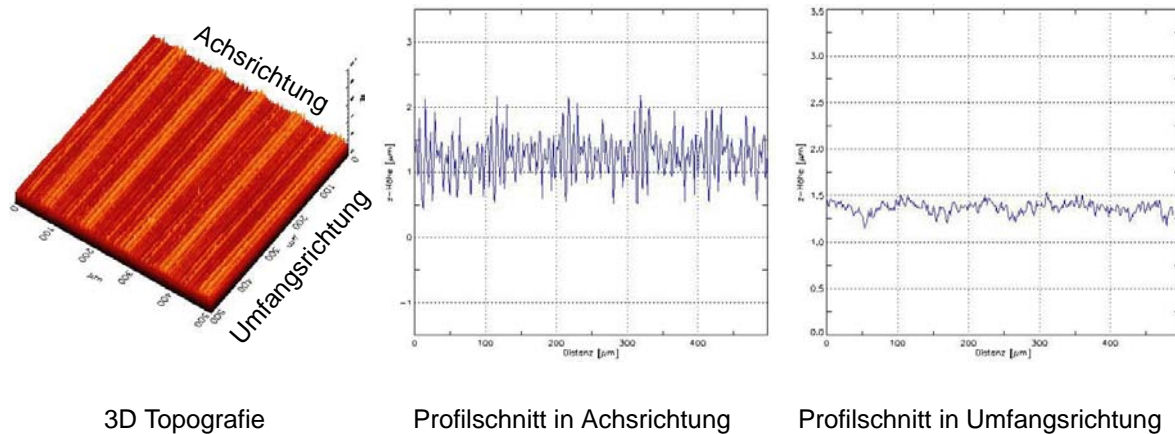


Bild 32: Topografie und Profilschnitte, längs-hartgedreht Wiper-Schneide WW 1 X C

Auch die mit der Wiper-Schneidengeometrie gefertigten Wellenoberflächen weisen einen erheblichen Unterschied der Rauheitsprofile und -werte in Achs- und Umfangsrichtung auf, Bild 32.

3.3.5 Hartdrehen ohne axialen Vorschub

Die Drehwendel aller längsgedrehten Wellenoberflächen stellt im weitesten Sinne einen Drall dar. Die Vorstellung, die Drehwendel könnte eine von der Drehrichtung abhängige Ölförderung hervorrufen, führt trotz nicht nachgewiesenem Zusammenhang zu der Forderung, eine „drallfrei“ gedrehte Wellenoberfläche herzustellen. Zwei kinematisch unterschiedliche Fertigungstechnologien stehen hierzu zur Verfügung.

Einstech-hartgedrehte Wellenoberflächen

Beim Einstechdrehen kommt im Gegensatz zum Längsdrehen ein größerer Bereich der Schneide in Kontakt mit der Werkstückoberfläche. Aufgrund der so entstehenden hohen Passivkräfte können nur limitierte Einstech- bzw. Schnittbreiten realisiert werden. Die für das Forschungsvorhaben gefertigten Wellenoberflächen wurden mit einer Brei-

te von ca. 5 mm hergestellt. Die sich ausbildende Oberflächenrauheit in Achsrichtung ist ein direktes Abbild der Schneidenrauheit. Die Oberflächenkennwerte und Fertigungsparameter der mit „T“ und fortlaufender Nummerierung versehenen Versuchswellen sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Kennwerte und Fertigungsparameter der einstech-hartgedrehten Wellenoberflächen

	T X
Wellenwerkstoff	20MnCr5 (1.7147)
Schneide	TNGN110308 aus CBN 100; gefast & gebürstet
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	160
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,004 – 0,005
Schnitttiefe [mm]	0,10
R_z Längsrichtung [µm]	0,69
R_z Umfangsrichtung [µm]	0,54

Im Unterschied zu den längs-hartgedrehten Wellenoberflächen sind die Rauheitsprofile der im Einstich gedrehten Wellenoberflächen in Achs- und Umfangsrichtung vergleichbar, Bild 33. Auch die jeweiligen Rauheitswerte unterscheiden sich kaum.

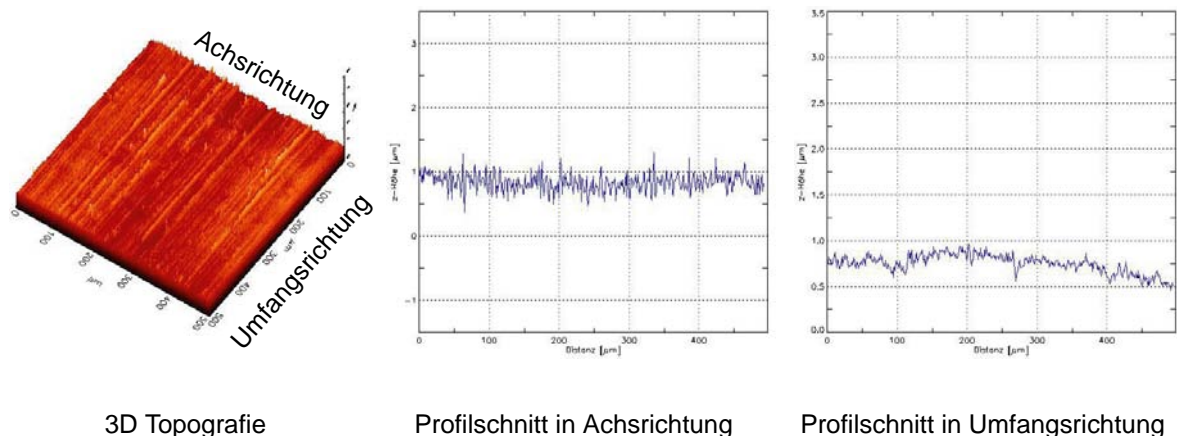


Bild 33: Topografie und Profilschnitte, hartgedreht ohne axialem Vorschub T X

Tangential-hartgedrehte Wellenoberflächen

Ein weiteres Fertigungsverfahren um Wellenoberflächen ohne Vorschubwendel herzustellen, ist das Tangentialdrehen /13/. Im Gegensatz zum Einstechdrehen befindet sich während des Zerspanungsvorganges die Schneide nicht über die gesamte Breite gleichzeitig im Eingriff.

Tabelle 9: Kennwerte und Fertigungsparameter der tangentialgedrehten Wellenoberflächen

	S X
Wellenwerkstoff	20MnCr5 (1.7147)
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	120 - 180
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,10 - 0,30
Schnitttiefe [mm]	0,05 - 0,20
R_z Längsrichtung [µm]	1,94
R_z Umfangsrichtung [µm]	0,55

Der Eingriffspunkt wandert aufgrund der Werkzeugbewegung über die Schneidenbreite hinweg. Dadurch reduzieren sich die Passivkräfte sowie die Schneidenbeanspruchung. Die Fertigungsparameter und Oberflächenkennwerte können Tabelle 9 entnommen werden. Die Versuchswellen sind mit „S“ und einer fortlaufenden Nummer gekennzeichnet.

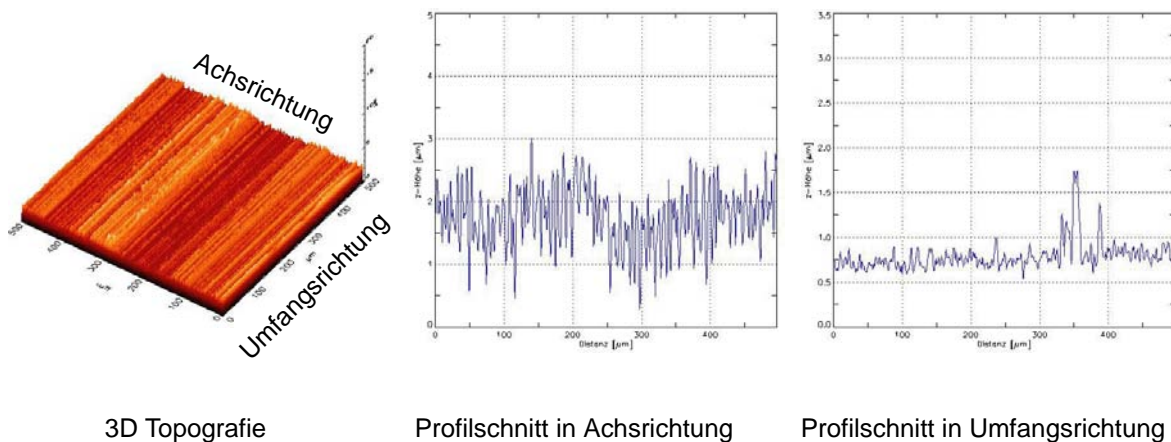


Bild 34: Topografie und Profilschnitte, hartgedreht ohne axialem Vorschub S X

Bild 34 zeigt die 3D-Oberflächentopografie und Rauheitsprofile der tangentialgedrehten Wellenoberflächen. Obwohl auch dieses Fertigungsverfahren ohne axialen Vorschub arbeitet, sind die Rauheitsprofile in Achs- und Umfangrichtung unterschiedlich.

3.3.6 Längs-hartgedrehte Wellenoberflächen, überlagerten Schwingungen

Der Hartdrehprozess bedeutet eine erhöhte Belastung der Zerspanungsmaschine aufgrund der höheren wirkenden Kräfte. Untersuchungen zeigen, dass nicht speziell für den Hartdrehprozess ausgelegte Zerspanungsmaschinen zu Schwingungen neigen. Dadurch kommt es häufig zu Relativbewegungen zwischen Schneidewerkzeug und Werkstück. Ein Beispiel der so entstehenden Schwingungsstrukturen auf der Wellenoberfläche zeigt Bild 35. Die Wellenachse liegt im gezeigten Beispiel horizontal.

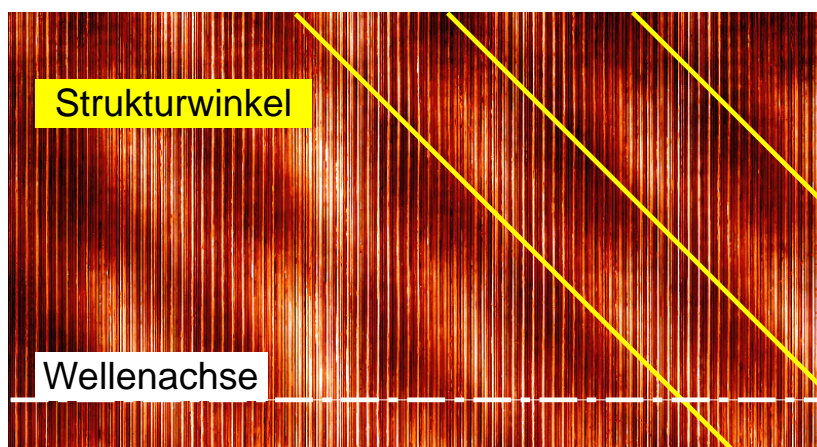


Bild 35: Schwingungsstruktur auf Wellenoberfläche

Abhängig vom Verhältnis der Spindeldrehzahl zur Schwingungsfrequenz bilden sich durch die radialen Schwingungen des Schneidewerkzeuges schräg zur Wellenachse verlaufende Berge und Täler.

Der Einfluss dieser Schwingungsstrukturen auf das Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen sollte systematisch untersucht werden. Dazu mussten diese Schwingungen gezielt auf Werkzeug und Wellenoberfläche aufgebracht werden können. Dies wurde mit einem so genannten Fast-Tool erreicht. Das Funktionsprinzip ist in Bild 36 dargestellt. Mit diesem System kann die radial gerichtete Schwingfrequenz der Schneide zwischen 200 und 1.000 Hz bei Amplituden von 0,6 bis 2,5 μm realisiert

werden. Die erzielbare Amplitude wird mit steigender Frequenz kleiner. Durch Variation des Spindeldrehzahl- Schwingungsfrequenzverhältnisses kann der Winkel der Schwingungsstruktur zur Wellenachse (vgl. Bild 35) eingestellt werden. Unter diesen Rahmenbedingungen wurde mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung ein Versuchsplan ausgearbeitet, um im gesamten Parameterraum Versuchswellen in günstigen Kombinationen zu fertigen.

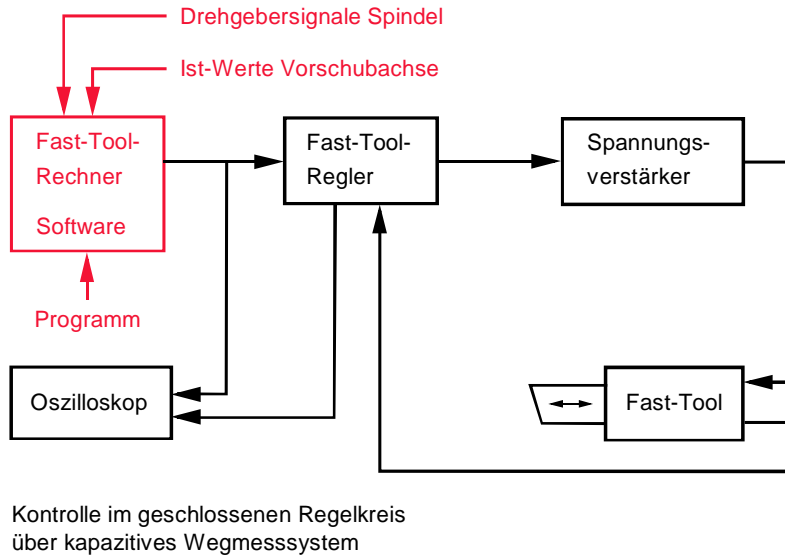


Bild 36: Funktionsprinzip Fast-Tool System

Schwingungswellen ... **S 111 X** ... fortlaufende Nummer

Schwingungsfrequenz [Hz]		Amplitude [μm]		Winkel zur Wellenachse [$^\circ$]	
1	200	1	0,6	1	30
2	520	2	1,6	2	47
3	680	3	1,8	3	63
4	840	4	2	4	55
5	1000	5	2,5	5	80
		6	3		

Bild 37: Bezeichnungsschlüssel Schwingungswellen

Tabelle 10: Kennwerte und Fertigungsparameter der Schwingungswellen, Teil 1

	S 111 X	S 115 X	S 121 X	S 133 X	S 161 X	S 165 X	S 225 X
Wellenwerkstoff	20MnCr5						
Schneide	DCMW11T3 aus CBN 10; gefast & gebürstet						
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	ca. 40						
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,05						
Schnitttiefe [mm]	0,1						
Eckenradius [mm]	0,8						
Steigung der Vorschubwendel [°]	0,018						
Schwingungsfrequenz f [Hz]	200	200	200	200	200	200	520
Schwingungsamplitude radial [µm]	0,6	0,6	1,6	1,8	3	3	1,6
Winkellage zur Wellenachse [°]	30	80	30	55	30	80	80
R_z Längsrichtung [µm]	2,40	2,34	2,44	2,76	2,30	3,68	2,94
R_z Umfangsrichtung [µm]	0,63	0,70	0,71	0,89	0,68	0,72	1,02

Tabelle 11: Kennwerte und Fertigungsparameter der Schwingungswellen, Teil 2

	S 254 X	S 312 X	S 441 X	S 511 X	S 515 X	S 522 X	S 525 X
Wellenwerkstoff	20MnCr5						
Schneide	DCMW11T3 aus CBN 10; gefast & gebürstet						
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	ca. 40						
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,05						
Schnitttiefe [mm]	0,1						
Eckenradius [mm]	0,8						
Steigung der Vorschubwendel [°]	0,018						
Schwingungsfrequenz f [Hz]	520	680	840	1.000	1.000	1.000	1.000
Schwingungsamplitude radial [µm]	2,5	0,6	2	0,6	0,6	1,6	1,6
Winkellage zur Wellenachse [°]	63	47	30	30	80	47	80
R_z Längsrichtung [µm]	3,33	2,36	2,83	2,93	2,55	2,66	2,92
R_z Umfangsrichtung [µm]	1,15	0,92	1,83	1,06	1,31	1,88	1,53

Die so entstandenen Versuchswellen mit den übrigen Fertigungsparametern und Oberflächenkennwerten sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführt.

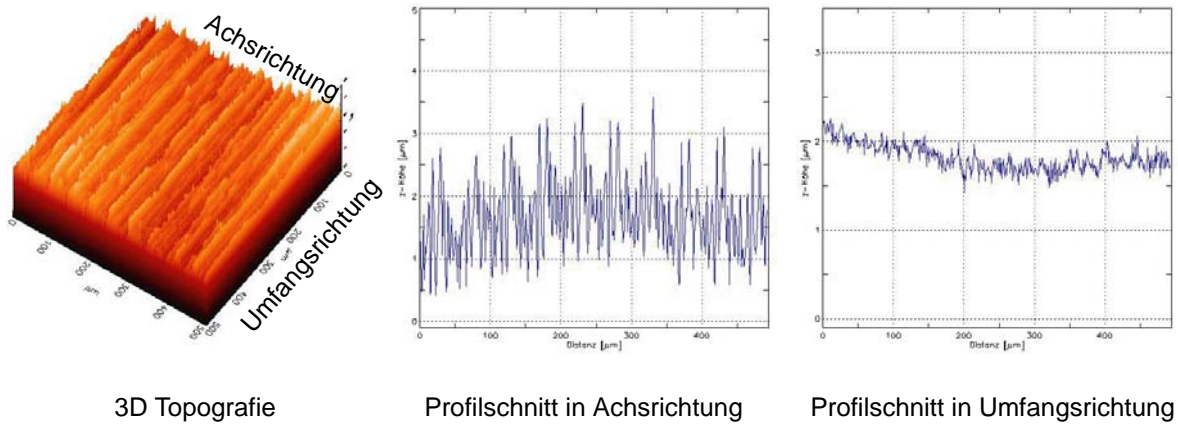


Bild 38: Topografie und Profilschnitte, überlagerte Schwingungen S 115 X

Die in Bild 38 und Bild 39 dargestellten 3D-Oberflächentopografien und Profilschnitte repräsentieren jeweils die Extreme hinsichtlich der Schwingungsfrequenz und Schwingungsamplitude. Bedingt durch die Schwingungsstruktur der Wellenoberflächen ist ein direkter Vergleich der Rauheitsprofile in Achs- und Umfangsrichtung nicht möglich.

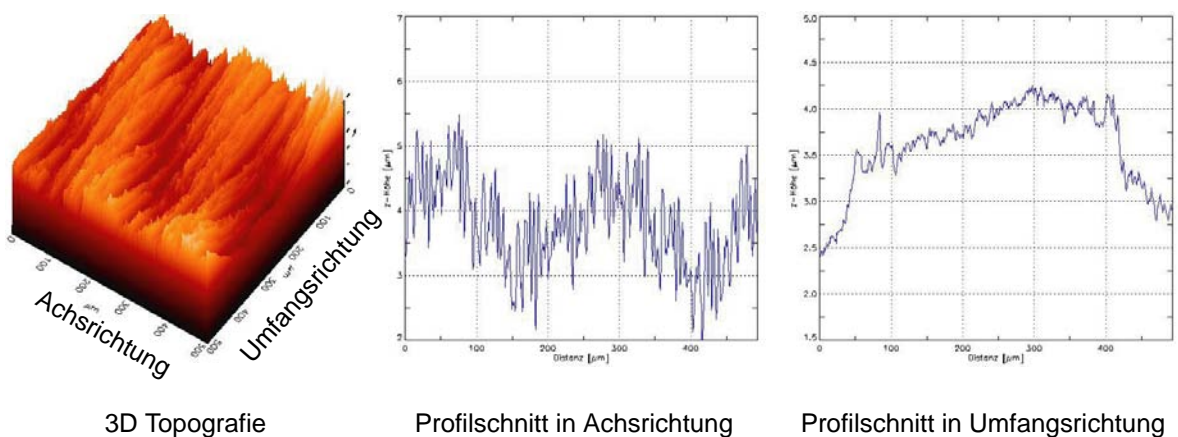


Bild 39: Topografie und Profilschnitte, überlagerte Schwingungen S 525 X

3.3.7 Längs-weichgedrehte Wellenoberflächen

Für Anwendungen mit moderaten Betriebsanforderungen sind weichgedrehte Wellenoberflächen („WH“) eine günstige Alternative. Da der Härteprozess und die anschlie-

ßende Hartbearbeitung der Funktionsflächen wegfällt, können derartige Teile sehr kostengünstig gefertigt werden.

Tabelle 12: Kennwerte und Fertigungsparameter der längs-weichgedrehten Wellenoberflächen, Teil 1

	WH 1 X	WH 2 X	WH 3 X	WH 4 X	WH 5 X	WH 6 X
Wellenwerkstoff	C 45 (1.0503)					
Schneide	CCMT 120404 bzw. CCMT 120412					
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	450	300	450	300	450	300
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,04	0,06	0,06	0,04	0,15	0,22
Schnitttiefe [mm]	0,25					
Eckenradius [mm]	0,4	1,2	1,2	0,4	0,4	1,2
Steigung der Vorschubwendel [°]	0,014	0,022	0,022	0,014	0,054	0,079
R_z Längsrichtung [µm]	1,63	1,47	1,65	2,14	6,03	5,83
R_z Umfangsrichtung [µm]	0,82	0,52	0,55	1,16	0,95	0,84

Tabelle 13: Kennwerte und Fertigungsparameter der längs-weichgedrehten Wellenoberflächen, Teil 2

	WH 7 X	WH 8 X	WH 9 X	WH 10 X	WH 11 X	WH 12 X
Wellenwerkstoff	C 45 (1.0503)					
Schneide	CCMT 120404 bzw. CCMT 120412					
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	300	450	450	300	300	450
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,15	0,22	0,29	0,22	0,29	0,22
Schnitttiefe [mm]	0,25					
Eckenradius [mm]	0,4	1,2	1,2	0,4	1,2	0,4
Steigung der Vorschubwendel [°]	0,014	0,022	0,022	0,014	0,054	0,079
R_z Längsrichtung [µm]	5,84	6,21	9,99	9,55	9,90	9,42
R_z Umfangsrichtung [µm]	0,86	0,77	0,71	0,73	0,77	0,78

Die Fertigungsparameter der Versuchswellen wurden entsprechend der technologischen Möglichkeiten und der Relevanz für den praktischen Einsatz ausgewählt. Be-

wusst wurden auch große Vorschubwerte mit in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, welche zu großen Rautiefen führen. Zusätzlich wurde die Schnittgeschwindigkeit in zwei Stufen variiert. Nach diesen Vorgaben wurde mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung der Versuchsplan mit den entsprechenden Fertigungsparametern ausgearbeitet, Tabelle 12 und Tabelle 13.

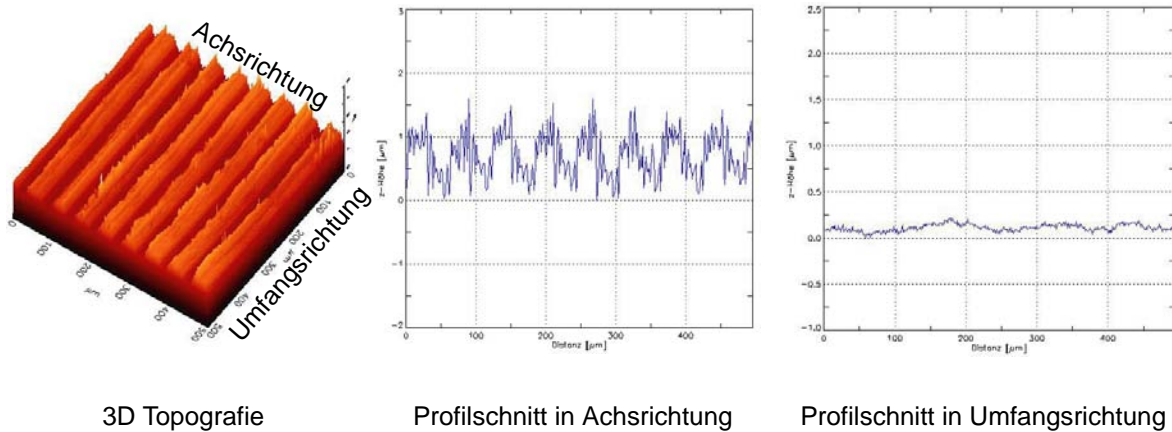


Bild 40: Topografie und Profilschnitte, längs-weichgedreht WH 2 X

Es wurden je Parameterkombination (WH 1 bis WH 12) vier Versuchswellen gefertigt. Die in Bild 40 und Bild 41 dargestellten Oberflächentopografien und Profilschnitte zeigen jeweils die beiden Extrembeispiele hinsichtlich der erzielten Oberflächenrauheit.

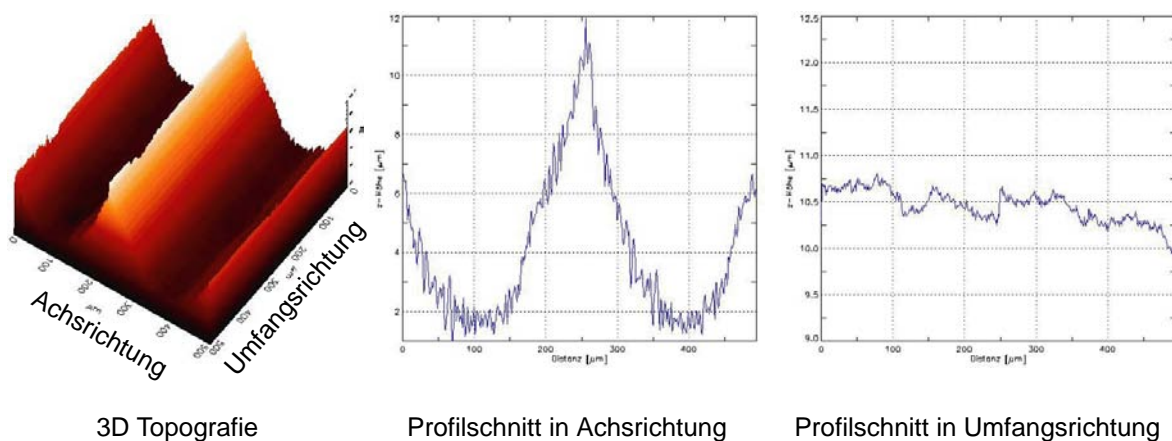


Bild 41: Topografie und Profilschnitte, längs-weichgedreht WH 11 X

Ähnlich der längs-hartgedrehten Wellenoberflächen weisen auch die längs-weichgedrehten Wellenoberflächen starke Unterschiede zwischen den Rauheitsprofilen in Achs- und Umfangsrichtung auf

3.3.8 Hartgedrehte Wellenoberfläche aussen-kurzhubgehont (Superfinish)

Zur „Verbesserung“ der Oberflächenrauheit von Wellenoberflächen wird in der industriellen Praxis oftmals ein Nachbearbeitungsprozess angewendet /14/. Die hier in die Dichtheitsuntersuchungen und Auswertung mittels der Bildverarbeitung einbezogene Wellenoberfläche wurde im ersten Bearbeitungsschritt längs-hartgedreht und anschließend gehont. Dabei wurde ein Materialabtrag von ca. 8 bis 10 μm angestrebt. Die weiteren Fertigungsparameter sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Durch die Nachbearbeitung ergibt sich eine Oberflächenstruktur mit den typischen Kreuzriefen, ähnlich derer von Zylinderlaufflächen in Verbrennungsmotoren, Bild 42. Hierbei ist erkennbar, dass die so entstandene Oberfläche in Achs- und Umfangsrichtung eine nahezu gleichartige Rauheitsstruktur aufweist (Maßstab für Achs- und Umfangsrichtung identisch).

Tabelle 14: Kennwerte und Fertigungsparameter der aussen-kurzhubgehonten Wellenoberflächen

	HF X
Wellenwerkstoff	20MnCr5 (1.7147)
Schneide	NU-CNMA 120408 BN 250
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	140
Vorschub [mm/Umdrehung], Drehprozess	0,16
Schnitttiefe [mm], Drehprozess	0,20
R_z Längsrichtung [μm]	1,42
R_z Umfangsrichtung [μm]	1,15

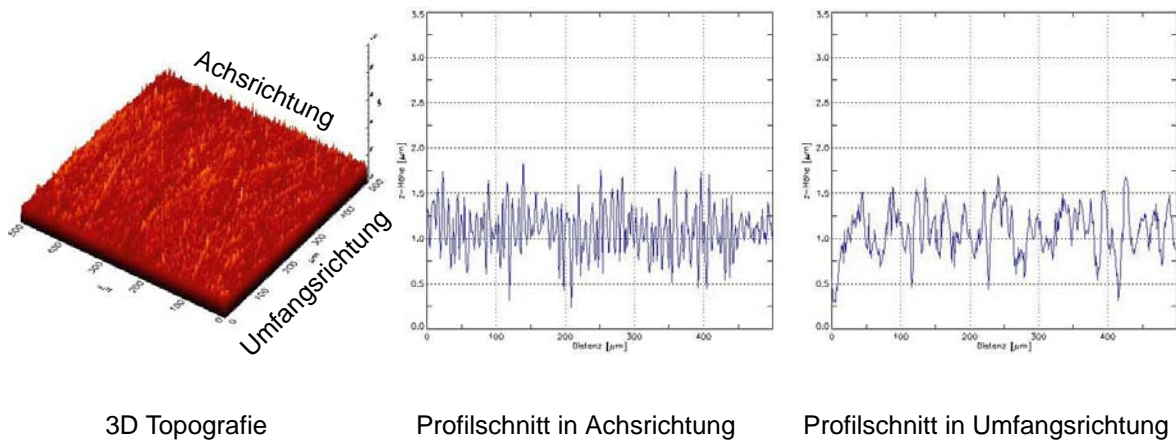
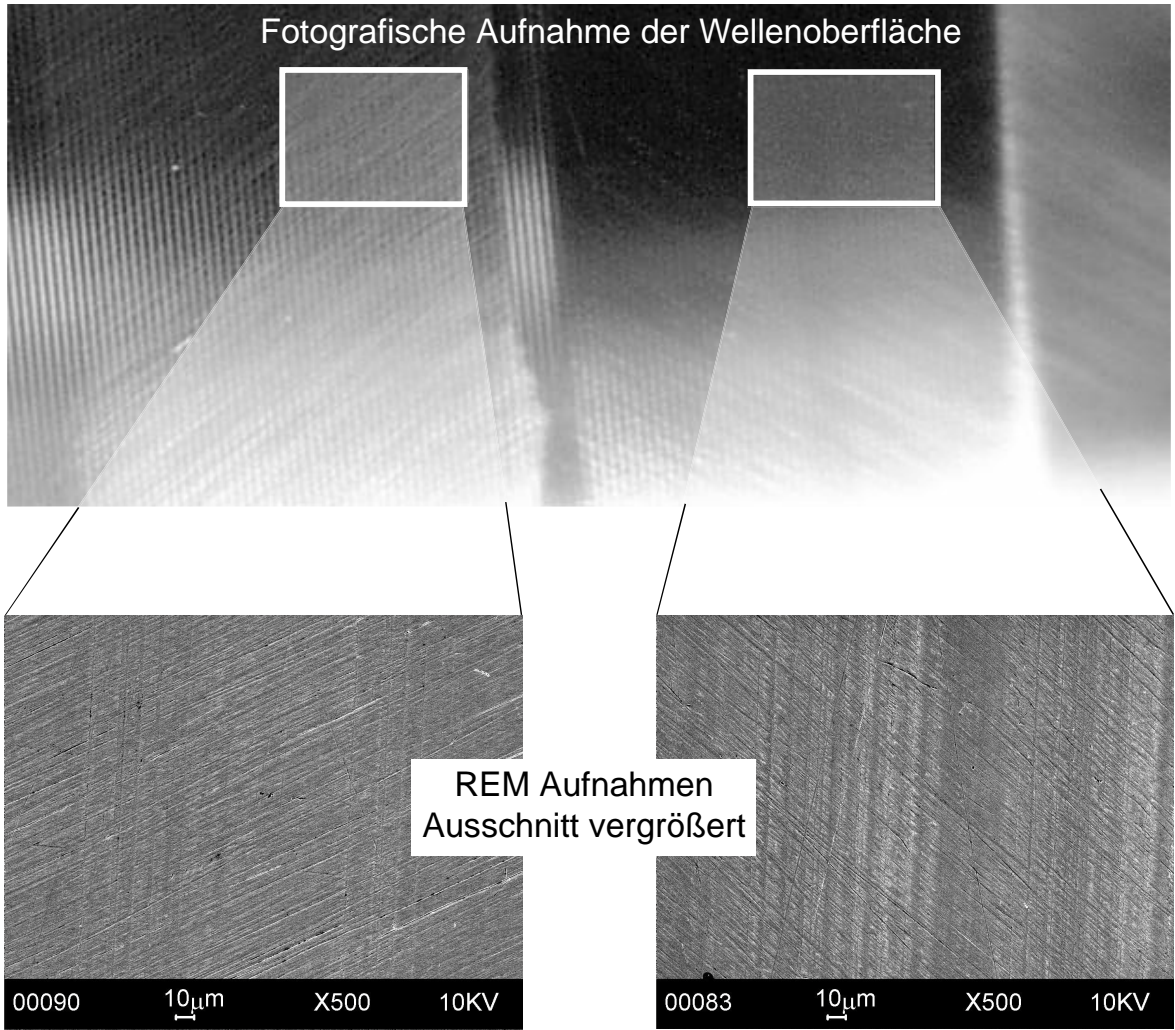


Bild 42: Topografie und Profilschnitte, aussen-kurzhubgehont HF X

3.3.9 Hartgedrehte Wellenoberfläche mit polierter Mikrostruktur

Die zur Oberflächennachbearbeitung eingesetzten Technologien wie Superfinishen (vgl. 3.3.8), Bandfinishen oder Schmirgeln überlagern der durch den Drehprozess entstandenen Drehwendel eine sehr feine „Kratzerstruktur“ in unterschiedlichen Richtungen und Ausprägungen.

Um die dichtungstechnische Auswirkung solcher überlagerten Mikrostrukturen zu untersuchen, wurde eine längs-hartgedrehte Versuchswelle (Parametersatz 2B) mit sehr feinen Kratzern versehen. Diese wurden mit einem Filzpolierstift und Diamantsuspension unter ca. $\pm 45^\circ$ zur Wellenachse manuell eingebracht. Bild 43 zeigt eine Fotografie der entstandenen Wellenoberfläche.



taktil gemessene 3D-Topografien

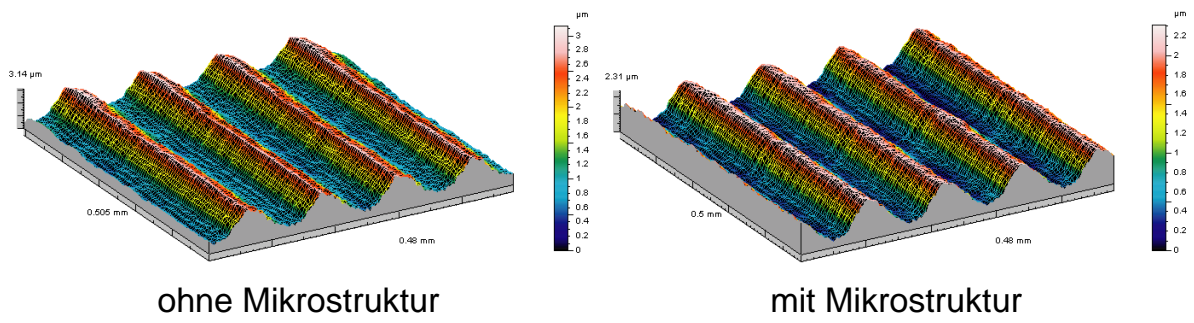


Bild 43: Wellenoberfläche mit polierter Mikrostruktur

Die Rauheitsparameter der Wellenoberfläche haben sich durch die aufgebrachte Mikrostruktur nicht nennenswert verändert. An der 3D-Oberflächentopographie, gemessen mit taktilem Rauheitstaster, kann diese Mikrostruktur nicht erkannt werden, Bild 43.

Diese Wellenoberflächen wurden in einem modifizierten Förderwertversuch, mit gleichzeitiger Reibmomentmessung, untersucht. Ebenfalls wurde eine 1.000 Stunden Langzeituntersuchung durchgeführt.

3.4 Übersicht untersuchte Wellenoberflächen und durchgeführtes Untersuchungsprogramm

Tabelle 15 zeigt die Auflistung aller im Rahmen der Arbeit untersuchten Fertigungsverfahren mit der zugehörigen Bezeichnung.

Tabelle 15: Untersuchte Wellenoberflächen mit Bezeichnungen

Fertigungsverfahren	Bezeichnung
Im Einstich geschliffen	H X
Längs-Hartdrehen	1 A X – 2 D X
Verschleiß der Schneide beim Längs-Hartdrehen	W1-X – W4-X
Längs-Hartdrehen mit Wiper-Schneidengeometrie mit Verschleißbetrachtung	WW 1 X C – WW 3 X C
Einstech-Hartdrehen	T X
Tangential-Hartdrehen	S X
Längs-Hartdrehen mit überlagerten Schwingungen	S 111 X – S 525 X
Längs-Weichdrehen	WH 1 X - WH 12 X
Längs-Hartdrehen mit anschließendem Superfinishen	HF X
Längs-Hartdrehen mit polierten Mikrostrukturen	-

In Tabelle 16 sind den unterschiedlichen Untersuchungsmethoden (siehe Kapitel 3.2, Seite 35 ff) die jeweils untersuchten Wellenoberflächen zugeordnet.

Die aufgelisteten Versuchswellen, welche der 1.000 Stunden Langzeituntersuchung unterzogen wurden, sind durch die mit der modifizierten Zweikammermethode untersuchten Versuchswellen ergänzt. Diese Untersuchung wurde, wenn auch unter leicht

abweichenden Randbedingungen, ebenfalls über mindestens 1.000 Stunden durchgeführt, so dass ebenfalls eine Aussage über das Dichtverhalten getroffen werden kann.

Tabelle 16: Untersuchte Wellenoberflächen je Untersuchungsmethode

Untersuchte Wellenoberflächen Förderwertbestimmung Wellenoberfläche	alle	alle
Untersuchte Wellenoberflächen Förderwertbestimmung im Betrieb	IC2, IC1, H163, H162, WH11-4, WH11-1, T1, T6, S3, WH2-2, WH2-3	IC3, IC4, H161, H164, WH11-3, WH11-2, T4, T2, S4, S7, WH2-1, WH2-4
240 Stunden Dichtheitsuntersuchung	W1-1, W1-3, W3-1, W3-3, W4-1, W4-3, 1E3, 1A3, 1A6, 1B3, 1C3, 1D3, 2B4, 2C1, S3, S4, S5, S6, S7, T3, W1-5, W2-5, W3-5, W4-5	WH11-1, WH11-2, WH11-3, WH2-1, WH2-2, WH2-3, 1E3, 1A6, 1A3, 1B3, 1C3, 1D3, 2B4, 2C1, S3, S4, S5, S6, S7, T1
1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung	1C1, WW21C, 2B2, WW22C-1, 1C3, 2B2 S6, WW22C-2, 1C6, 2B4, S6, WW23C-1, 1C4 2B4 S7 WW23C-2, H152 I, 2B6, WH2-2, WH2-3, WH11-4, WH11-1, T1, T6, S3, S4	2B1, S3, 1C2, 2B2, S4, WW22C-1, 2B2, S6, WW22C-2, 1C6, 2B4, S6, WW23C-1, 2B4, WW23C-2, H152 I, H152 II, WW24C, T2, T4, S7, WH2-1, WH2-4, WH11-2, WH11-3
	Rechtslauf	Linkslauf

4 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchungen dargestellt. Bei der Interpretation der Förderwerte der Wellenoberflächen ist zu beachten, dass für alle vorschubbehafteten Drehverfahren die Steigung der Drehwendel im Linkslauf in negativer Richtung, im Rechtslauf in positiver Richtung orientiert ist. Positive Förderwerte weisen in der vorliegenden Einbausituation in „Leckagerichtung“ (Drehrichtungskonvention siehe Seite 26).

4.1 Förderwertbestimmung der Wellenoberflächen

Der Förderwert der im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen ist stets geringer als $\pm 0,8$ g/h, wobei die Streuung der Messwerte gering ausfällt. Die gemessenen Werte zeigen keine signifikante Abhängigkeit der Förderrichtung der Wellenoberfläche von der Drehrichtung der Welle, Bild 44.

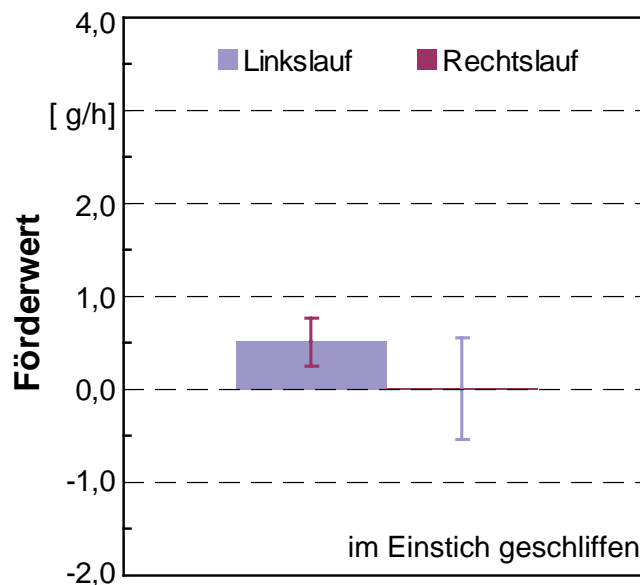


Bild 44: Mittlerer Förderwert der im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen

Die längsgedrehten Wellenoberflächen der Serie 1 (Bild 45) weisen im Linkslauf stets einen positiven Förderwert auf. Die absolute Höhe der Förderwerte ist durchweg gering. Im Rechtslauf kehrt sich die Förderung von anfangs positiver Richtung (bei kleinen Steigungswinkeln) zu negativer Förderrichtung bei steigendem Winkel der Drehwendel um. Mit größer werdendem Steigungswinkel der Drehwendel, und somit auch einer flacheren Ausprägung des Drehwendelquerschnittes, vergrößert sich die Differenz zwischen dem mittleren Förderwert im Linkslauf und mittlerem Förderwert im Rechtslauf. Die Wellenoberflächen der Parametergruppe 1D und 1E zeigen als einzige eine drehrichtungsbezogene Förderrichtung. Jedoch ist die Förderrichtung entgegen der Steigungsrichtung der Drehwendel orientiert. Für die Wellenoberflächen der Gruppen 1A, 1B und 1C kann keine signifikante Abhängigkeit der Förderrichtung von der Drehrichtung abgeleitet werden, da die Förderwerte innerhalb des Streubereiches zufällig variieren.

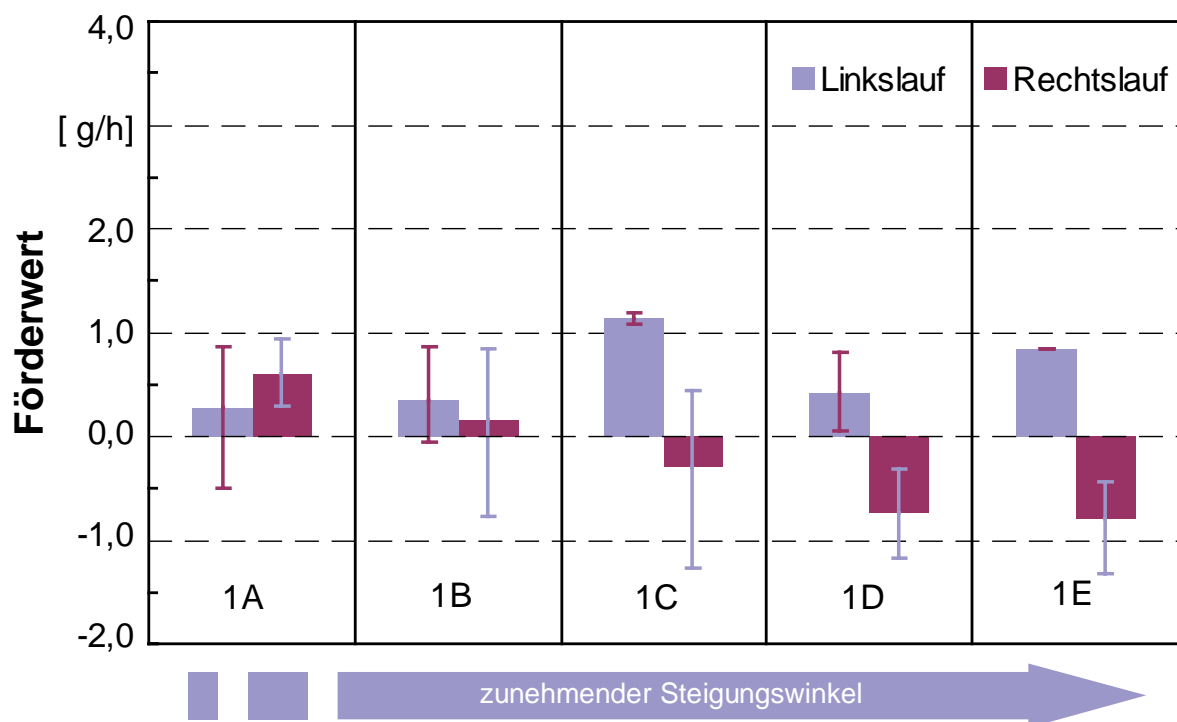


Bild 45: Mittlerer Förderwert der längsgedrehten Wellenoberflächen, Serie 1

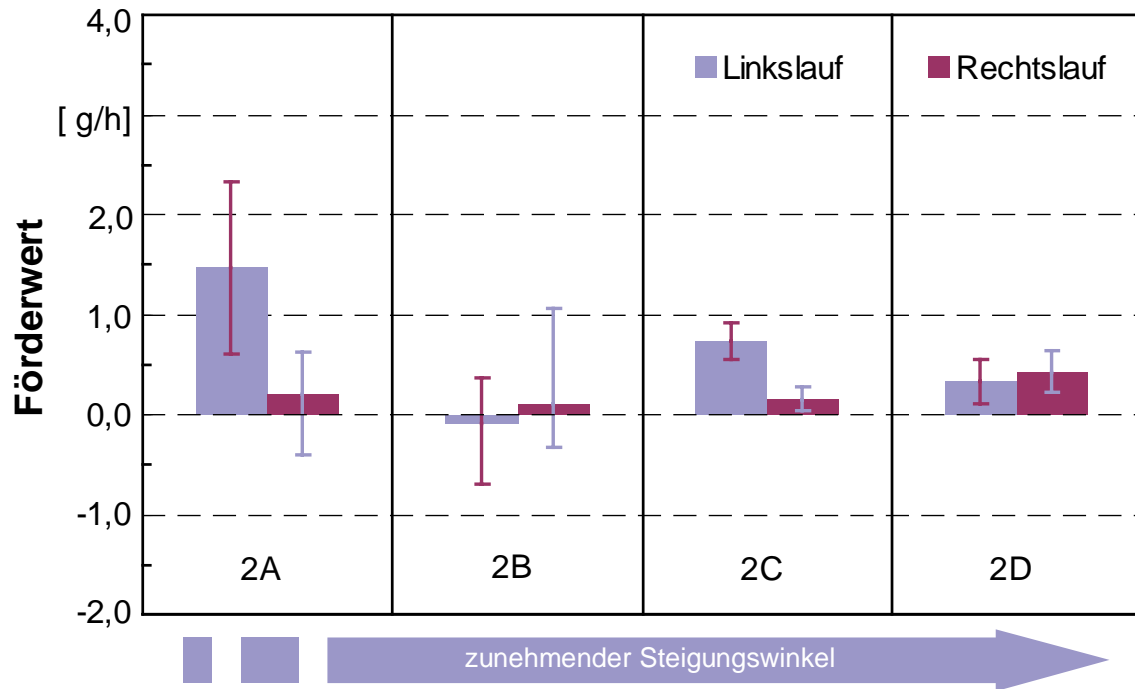


Bild 46: Mittlerer Förderwert der längsgedrehten Wellenoberflächen, Serie 2

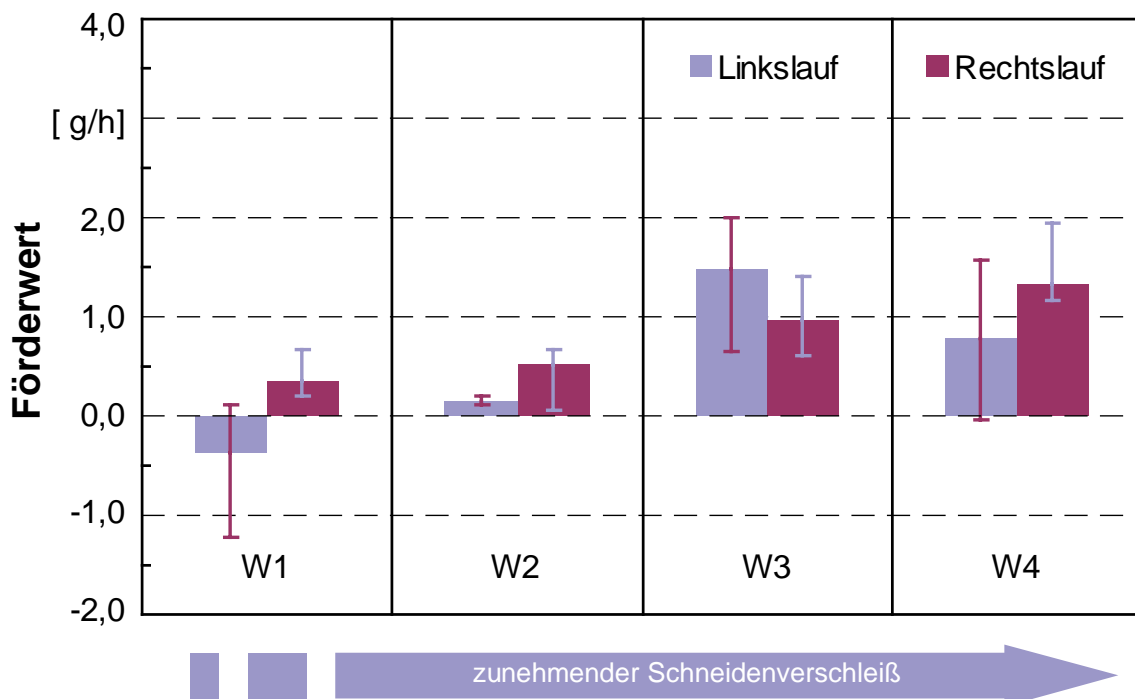


Bild 47: Mittlerer Förderwert der längsgedrehten Wellenoberflächen, Verschleiß-
untersuchung

Die Wellenoberflächen der Serie 2 sind im Vergleich zur Serie 1 rauer. Die ebenfalls geringen Förderwerte sind zufällig in positive oder negative Richtung orientiert. Eine Tendenz zu positiven Werten besteht, Bild 46. Die Streuung der Messwerte wird mit zunehmender Steigung der Drehwendel geringer. Es besteht kein Zusammenhang zwischen Drehrichtung der Welle und der Förderrichtung der Wellenoberfläche.

Die Wellenoberflächen der W-Serie wurden mit zunehmendem Verschleiß der Schneide gefertigt. Die zu Beginn der Standzeit gefertigten Wellenoberflächen weisen geringe Förderwerte auf, die Förderrichtung ist zufällig und zeigt keine Abhängigkeit von der Drehrichtung, Bild 47. Insbesondere im Rechtslauf steigt die Förderwirkung mit zunehmendem Verschleiß stetig an. Der Streubereich der Messwerte im Rechtslauf ist im Vergleich zum Linkslauf geringer. Im Linkslauf können nicht eindeutig ansteigende Förderwerte mit zunehmendem Verschleiß der Schneide festgestellt werden. Die Förderung der Wellenoberflächen sind jedoch in allen Fällen gering ($|FW| < 2 \text{ g/h}$).

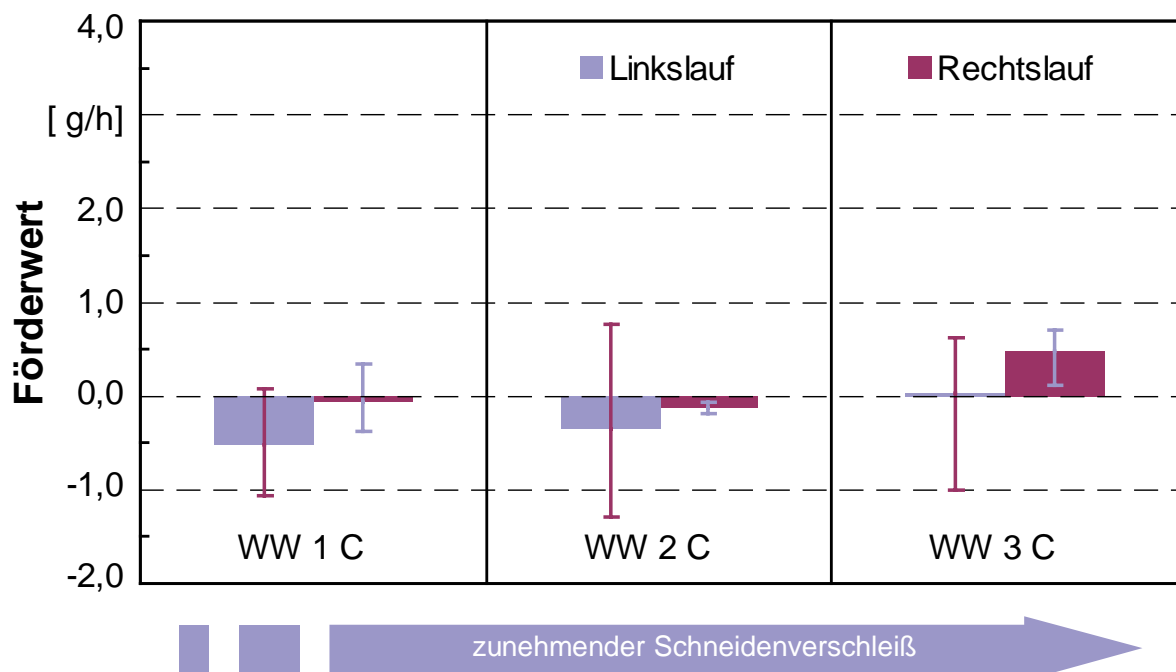


Bild 48: Mittlerer Förderwert der längsgedrehten Wellenoberflächen, Wiper- Schneidengeometrie

In Bild 48 sind die Ergebnisse der Förderwertbestimmung der mittels der Wiper-Schneidengeometrie gefertigten Wellenoberflächen dargestellt. Die Förderwerte sind insgesamt gering. Die Messwerte streuen im Linkslauf mehr als im Rechtslauf. Es kann kein Zusammenhang zwischen Drehrichtung und Förderrichtung erkannt werden. Der fortschreitende Verschleiß des Schneidwerkzeugs hat keinen Einfluss auf die erzielten Förderwerte.

Die einstechgedrehten Wellenoberflächen werden ohne Vorschubbewegung gefertigt. Obwohl somit keine schräg gerichtete Struktur zu erwarten ist, fördern die Wellenoberflächen durchgängig in negativer Richtung. Diese ist unabhängig von der Drehrichtung der Welle. Die absoluten Werte sind gering, die Streuung der einzelnen Messwerte ist mäßig, Bild 49.

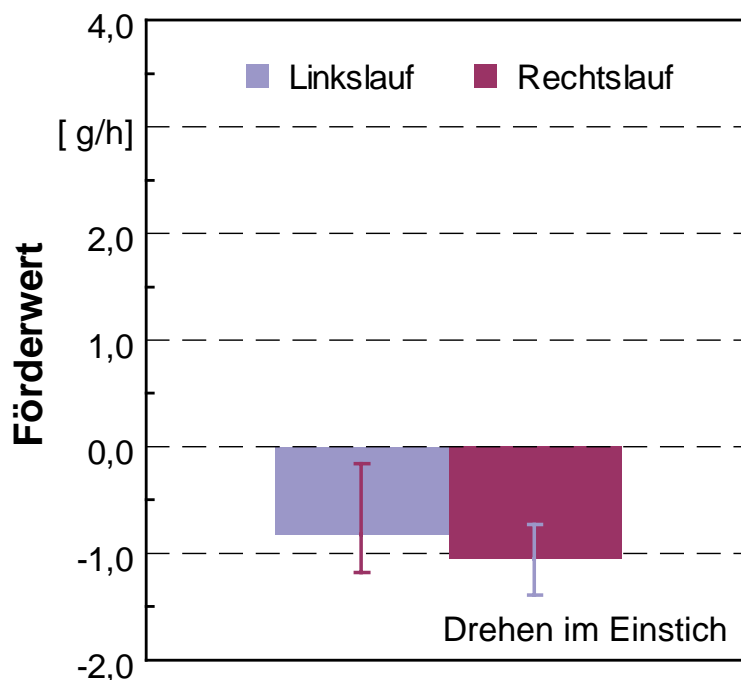


Bild 49: Mittlerer Förderwert der einstechgedrehten Wellenoberflächen

Die tangentialgedrehten Wellenoberflächen weisen ebenfalls keine schräg orientierte Oberflächenstruktur auf. Im Rechtslauf sind die Förderwerte durchweg negativ bei geringer Streubreite. Im Linkslauf treten sowohl positive als auch negative Förderwerte auf. Die Förderwerte sind gering. Die Förderrichtung ist unabhängig von der Drehrichtung, Bild 50.

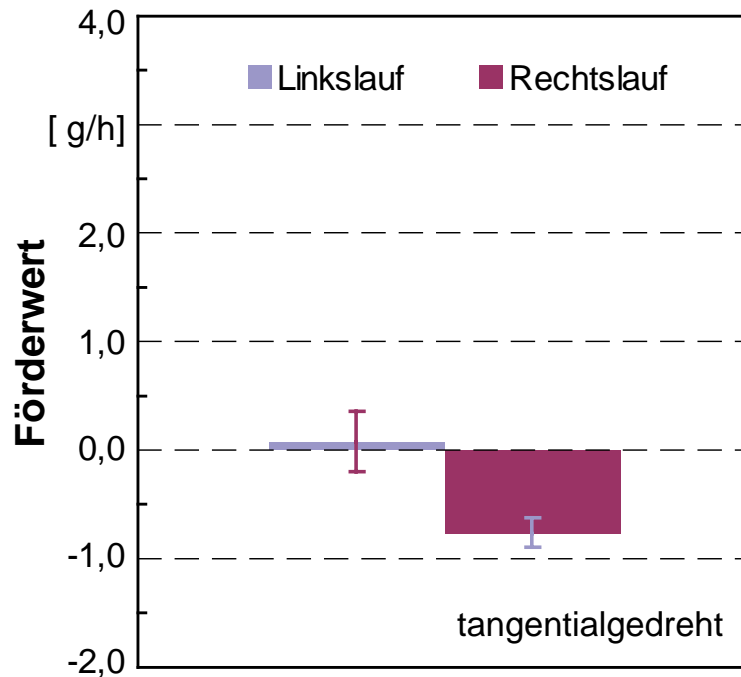


Bild 50: Mittlerer Förderwert der Tangentialgedrehten Wellenoberflächen

Die Ergebnisse der Förderwertbestimmung der Wellenoberflächen mit überlagerten Schwingungen sind in Bild 51 und Bild 52 abgebildet. Die Höhe der Förderwerte ist gering ($|\text{FW}| \leq 1,5 \text{ g/h}$, meist sogar $< 1 \text{ g/h}$). Die Streuung der Messwerte ist im Rechtslauf geringer als im Linkslauf. Offensichtlich ist keine Abhängigkeit der Förderwerte von der Drehrichtung der Welle oder der Veränderung der Parameter Schwingungsfrequenz, Schwingungsamplitude und Winkelorientierung zu erkennen.

Um die Zusammenhänge zwischen den Stellgrößen Schwingungsfrequenz, Schwingungsamplitude und Winkellage mit dem erzielten Förderwert ggf. genauer herauszuarbeiten, wurden die gesamten - auf Basis der statistischen Versuchsplanung (DoE) erzielten Messdaten - einer Regressionsanalyse unterzogen. Durch die Regressionsanalyse wird diese Beobachtung bestätigt. Es kann kein mathematisches Modell bestimmt werden, welches die Daten signifikant abbildet, d.h. es kann kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Stellgrößen Schwingungsfrequenz, Schwingungsamplitude und Winkellage mit dem Förderwert hergeleitet werden.

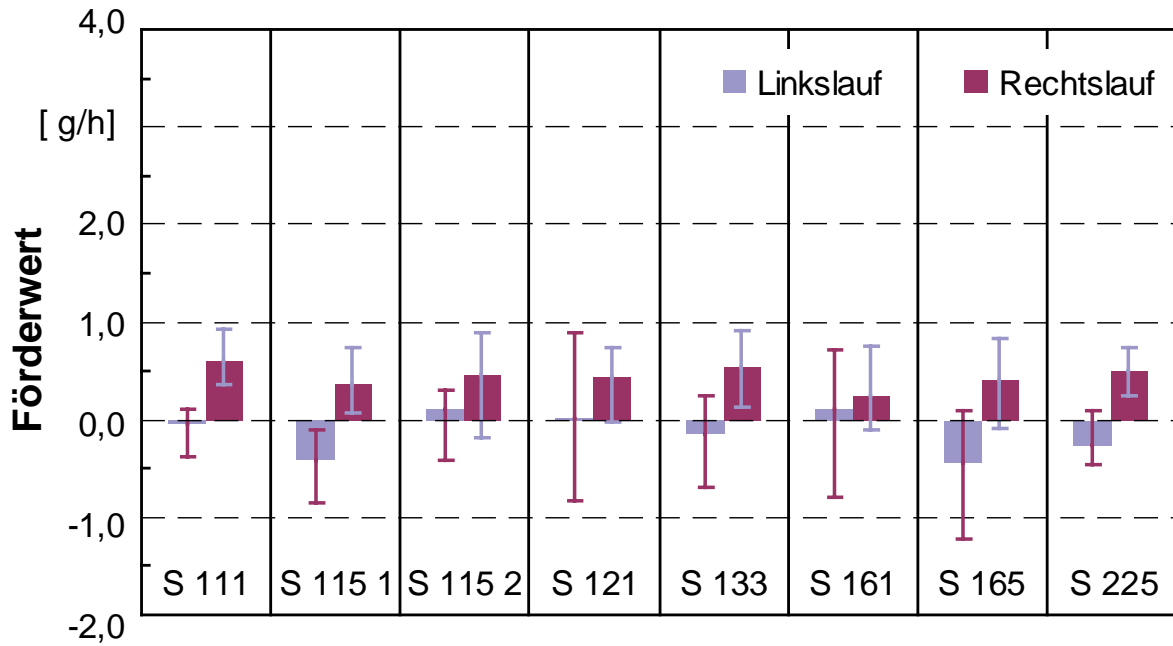


Bild 51: Mittlerer Förderwert der längsgedrehten Wellenoberflächen mit überlagerten Schwingungen, Teil 1 (Nomenklatur siehe Seite 55)

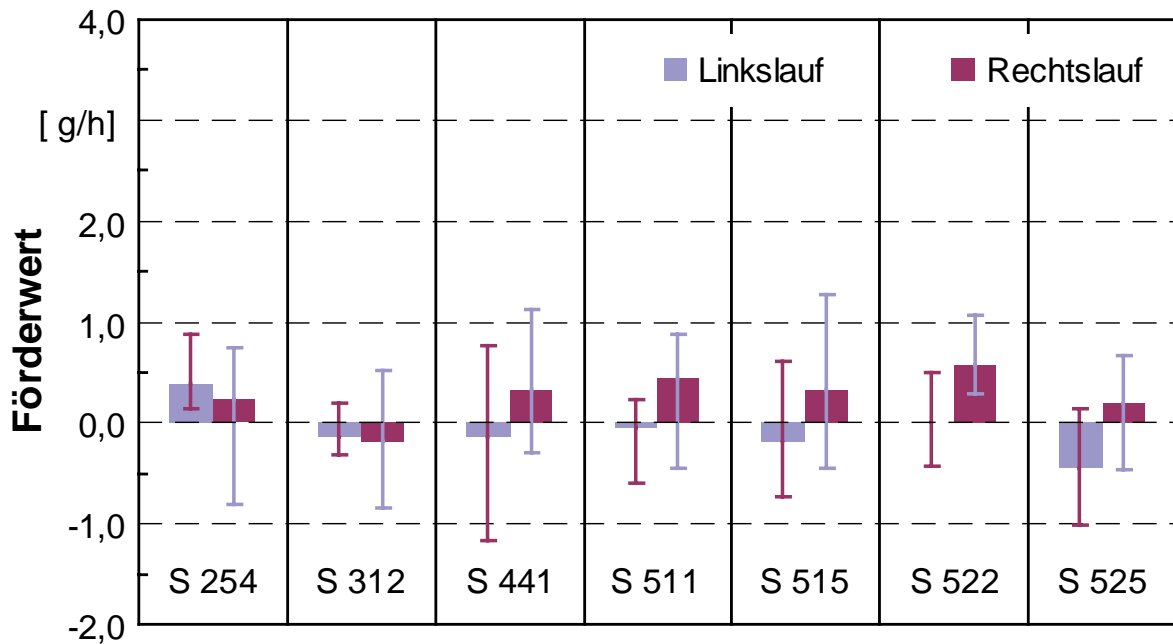


Bild 52: Mittlerer Förderwert der längsgedrehten Wellenoberflächen mit überlagerten Schwingungen, Teil 2 (Nomenklatur siehe Seite 55)

Das Ergebnis der Förderwertbestimmung der weichgedrehten Wellenoberflächen zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen Rechtslauf und Linkslauf, Bild 53 und Bild 54. Im Linkslauf ergibt sich kein Zusammenhang mit den Parametern Steigung der Drehwendel, Oberflächenrauheit, Schnittgeschwindigkeit und Eckenradius. Die Streuung der Messwerte ist verglichen mit dem Rechtslauf größer, die Werte unregelmäßiger. Die Höhe der überwiegend positiven Förderwerte liegen bis auf eine Ausnahme unter 2 g/h.

Im Rechtslauf ist das Bild homogener. Die Streuung der Messwerte ist geringer. Die mittleren Förderwerte sind durchweg positiv. Ausschließlich bei Wellenoberflächen mit geringer Oberflächenrauheit ($R_z = 1$) finden sich negative Förderwerte. Die Förderrichtung der Wellenoberflächen entspricht somit im Rechtslauf der anhand der Drehwendel erwarteten Förderrichtung.

Größere Oberflächenrauheit bewirkt im Rechtslauf höhere Förderwerte, die gesteigerte Schnittgeschwindigkeit verringert die ermittelten Förderwerte. Die Absolutwerte sind verglichen mit den Werten aus dem Linkslauf bis zu zweimal höher.

Die Regressionsanalyse ergibt im Rechtslauf ein Regressionsmodell, welches 88 % der gemessenen Förderwerte abbildet. Mit hoher Signifikanz, d.h. mit hoher Aussagekraft bestätigt das Modell den positiv gerichteten Einfluss der Oberflächenrauheit auf die zu erwartenden Förderwerte (d.h. zunehmende Förderung mit steigender Rauheit).

Im Linkslauf kann kein mathematisches Modell gebildet werden, welches mit annähernd akzeptabler Signifikanz die ermittelten Förderwerte darstellt.

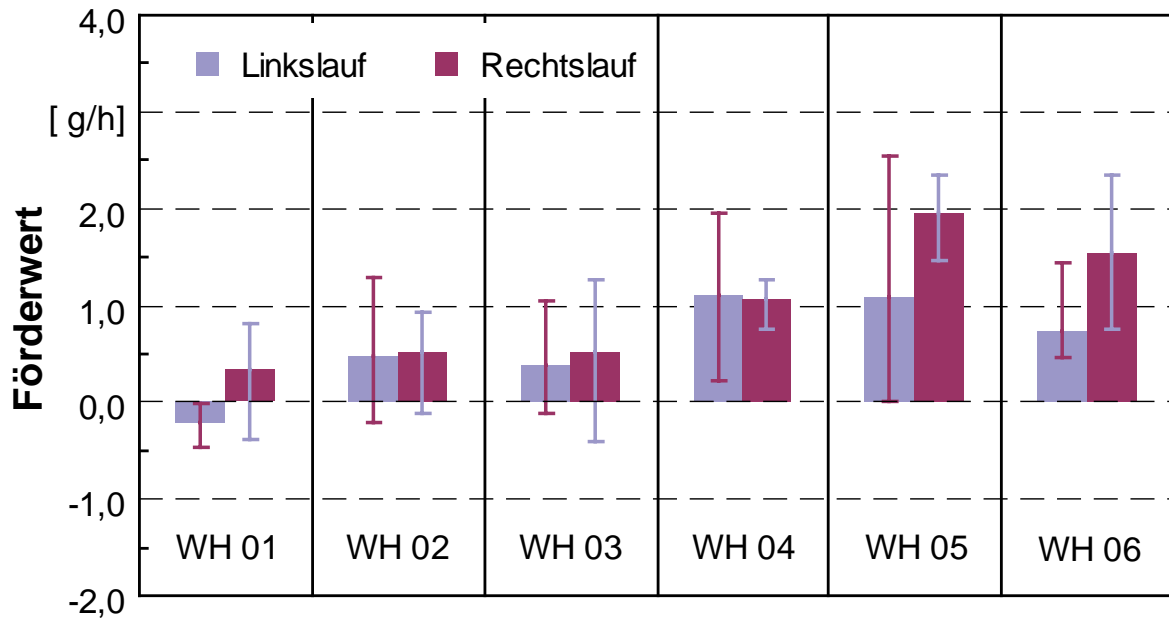


Bild 53: Mittlerer Förderwert der weichgedrehten Wellenoberflächen, Teil 1

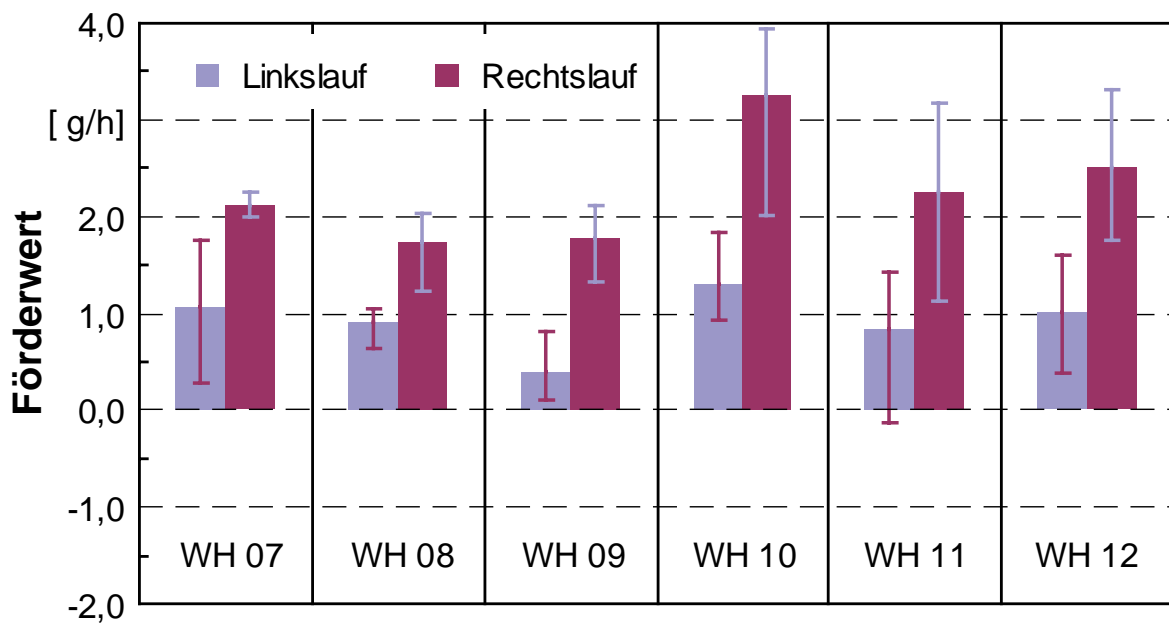


Bild 54: Mittlerer Förderwert der weichgedrehten Wellenoberflächen, Teil 2

Die Häufigkeitsverteilung der im Rahmen der Förderwertuntersuchung der Wellenoberflächen ermittelten Dichtringförderwerte ist in Bild 55 dargestellt. Es wurden insgesamt über 400 Einzelmessungen durchgeführt. Die Hälfte der Dichtringe hat einen Förderwert von mehr als 1,04 g/h, nur einige wenige Dichtringe haben einen Förderwert von über 3 g/h. Im Mittel liegt der Dichtringförderwert bei 1,24 g/h.

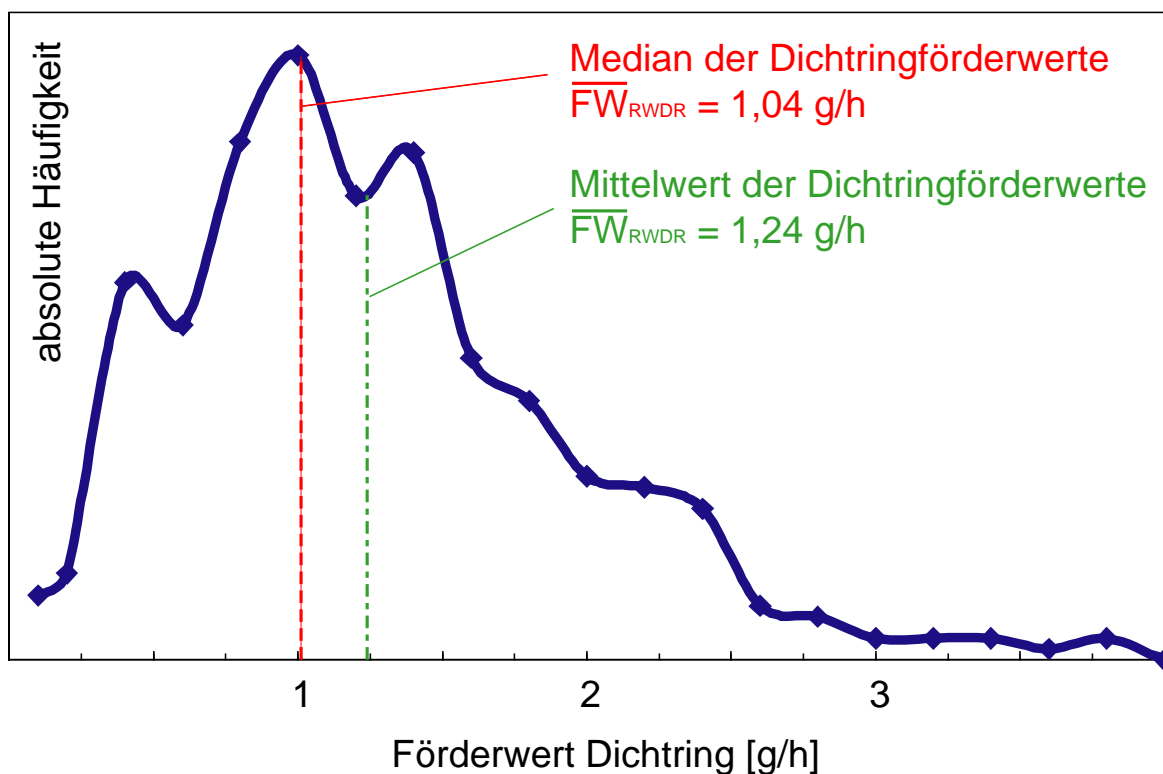


Bild 55: Förderwert der Dichtringe bei den Förderwertuntersuchungen der Wellenoberflächen, Häufigkeitsverteilung

Zusammenfassung und Diskussion der Förderwertbestimmung

Die hier untersuchten Wellenoberflächen sind ausnahmslos von höchster Qualität. Es konnten, wie auch nachfolgend die Dichtheitsuntersuchungen zeigen, keine zu Undichtigkeiten führenden Wellenoberflächen hergestellt und somit auch nicht untersucht werden. Seitens der Förderwertbestimmung sind alle untersuchten hartgedrehten Wellenoberflächen als unkritisch zu bezeichnen. Sie weisen mehrheitlich Förderwerte im Bereich von 1 g/h und weniger auf.

Das Dichtsystem Radial-Wellendichtung ist dicht, solange das Rückfördervermögen des Dichtrings (Dichtringförderwert) die von den übrigen Bestandteilen, z.B. der Wellenoberfläche, herrührenden Leckageströme (Förderung in Leckagerichtung) kompensieren kann. Ausgehend von den ermittelten Dichtringförderwerten sind statistisch gesehen Wellenoberflächen, die einen geringeren Förderwert als 1,0 g/h aufweisen, unkritisch für den Einsatz als Gegenlauffläche in einer Radial-Wellendichtung, da die verursachte Förderung in Leckagerichtung vom Dichtring kompensiert werden kann.

Abweichend zu den hartgedrehten Wellenoberflächen treten bei weichgedrehten Wellenoberflächen mit großen Vorschubwerten (WH5-X bis WH12-X) deutlich höhere Förderwerte auf. Diese können somit nur als eingeschränkt tauglich bewertet werden. Zusätzlich ist hier im Unterschied zu den hartgedrehten Wellenoberflächen ein eingeschränkter Einfluss der Drehwendel auf die Fördercharakteristik, zumindest in einer Drehrichtung, zu beobachten. Es ist zu vermuten, dass die mikroskopische Oberflächenbeschaffenheit, d.h. die der makroskopischen Drehwendel überlagerte Rauheitsstruktur, zu dem abweichenden Förderverhalten führt. Die mit entsprechenden Vorschubwerten hergestellten hartgedrehten Wellenoberflächen zeigen keinen derartigen Einfluss. Dies könnte an den unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften und somit anderen Mechanismen bei der Spanbildung liegen.

Ein ähnlicher Zusammenhang ist durch den fortschreitenden Werkzeugverschleiß bei den längs-hartgedrehten Wellenoberflächen zu beobachten. Die durch den Verschleiß zunehmende Rauheit der Oberfläche, bei gleich bleibender makroskopischer Drehwendel, führt zu erhöhten Förderwerten.

Die Förderwertbestimmung eignet sich gut, um einen Eindruck hinsichtlich der Fördercharakteristik der unterschiedlichen Wellenoberflächen zu erhalten. Anhand dieser Förderwerte kann ein erstes Urteil über die Eignung der betreffenden Wellenoberfläche als Dichtringgegenlauffläche gefällt werden. Durch das hier vorliegende sehr einheitliche Bild der sich ergebenden Förderwerte, ist jedoch eine detailliertere Differenzierung der Eignung der einzelnen Wellenoberflächen bzw. der zur Herstellung eingesetzten Fertigungsverfahren nicht möglich.

4.2 240 Stunden Dichtheitsuntersuchung

Die untersuchten Dichtsysteme (siehe Tabelle 16, Seite 63) waren über die gesamte Dauer der 240 Stunden Dichtheitsuntersuchung dicht. Es konnte keine abtropfende Leckage festgestellt werden. Die Bodenseite der Dichtringe war nicht mit Öl bzw. Ölnebel benetzt.

4.2.1 Verschleiß der Dichtringe

Ein Indiz hinsichtlich der Beanspruchung der Dichtringe im tribologischen System Radial-Wellendichtung ist die Verschleißbreite der Dichtkante. Die Verschleißbreite der Dichtringe lag überwiegend zwischen 0,15 mm und 0,35 mm, wobei die Verschleißbreite auf geschliffenen Wellenoberflächen üblicherweise im Bereich von 0,2 mm liegt. Der Zustand der Dichtkanten war gut. Die maximalen Verschleißbreiten von 0,35 mm bis 0,45 mm traten an den Dichtringen auf, welche auf den längshartgedrehten Versuchswellen der Verschleißserie (W2 bis W4) im Rechtslauf gelaufen sind. Die zugehörigen Wellenoberflächen und auch die Bodenseite der Dichtringe waren leicht mit trockenem Dichtringabrieb überzogen.

4.2.2 Verschleiß der Wellenoberflächen

Die Laufspuren waren größtenteils nur eingelätet bzw. optisch glänzend, die Grundstruktur jedoch noch vorhanden und ein Welleneinlauf nicht messbar. Auffällig waren die Wellenoberflächen der Verschleißserie Längs-Hartdrehen.

Tabelle 17: Welleneinlauf nach 240 Stunden Dichtheitsuntersuchung

Wellenbezeichnung	Drehrichtung der Welle	Tiefe der Einlaufspur
Verschleißserie Längs-Hartdrehen W2	Rechtslauf	6 µm
Verschleißserie Längs-Hartdrehen W3	Rechtslauf	17 µm
Verschleißserie Längs-Hartdrehen W4	Rechtslauf	25 µm
Tangentialdrehen	Linkslauf	3 µm, 12 µm
Längsdrehen 1C	Linkslauf	7 µm

Der Welleneinlauf betrug dort bis zu 25 μm , und korrelierte mit dem vorhandenen trockenen Dichtringabrieb auf der Wellenoberfläche, Tabelle 7. Der Welleneinlauf bzw. die Tiefe der Laufspur war unabhängig von der Drehrichtung der Versuchswellen.

4.3 1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung

Die untersuchten Dichtsysteme (siehe Tabelle 16, Seite 63) sind über die gesamte Dauer der 1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung dicht geblieben. Es konnte keine abtropfende Leckage festgestellt werden. Die Bodenseite der Dichtringe war nicht mit Öl bzw. Ölnebel benetzt.

4.3.1 Verschleiß der Dichtringe

Um nach Ablauf der 1.000 Stunden Langzeituntersuchung eine detaillierte Aussage über die jeweilige Beanspruchung treffen zu können, wurde die Verschleißbreite und die Berührbreite der Dichtringe vermessen.

Tabelle 18: Mittelwerte des Verschleißzustands der Dichtringe nach 1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung

Wellenbezeichnung	Drehrichtung der	Berührbreite	Verschleißbreite
Längsdrehen 1C	Linkslauf	0,21 mm	0,22 mm
Längsdrehen 1C	Rechtslauf	0,20 mm	0,20 mm
Längsdrehen 2B	Linkslauf	0,20 mm	0,15 mm
Längsdrehen 2B	Rechtslauf	0,22 mm	0,23 mm
Im Einstich geschliffen	Linkslauf	0,25 mm	0,30 mm
Tangentialdrehen	Linkslauf	0,19 mm	0,20 mm
Tangentialdrehen	Rechtslauf	0,21 mm	0,19 mm
Längsdrehen Wiperschneide	Linkslauf	0,21 mm	0,19 mm
Längsdrehen Wiperschneide	Rechtslauf	0,21 mm	0,21 mm

Die Mittelwerte von Berührbreite und Verschleißbreite für die einzelnen Parameterkombinationen sind in Tabelle 18 aufgelistet. Der Verschleiß der Dichtkanten war durchweg im moderaten bzw. üblichen Bereich. Der größte Verschleiß entstand in

Kombination mit einer im Einstich geschliffenen Wellenlauffläche (Verschleißbreite = 0,47 mm). Der Dichtringverschleiß war nicht von der Drehrichtung abhängig.

4.3.2 Verschleiß der Wellenoberflächen

Bei einigen Versuchswellen wurde ein geringer Welleneinlauf gemessen, Tabelle 19. Dabei kann keine Abhängigkeit von Drehrichtung oder verwendeter Wellenlauffläche abgelesen werden. Die Dichtstelle, welche bereits hinsichtlich der Verschleißbreite auffällig war, wies den stärksten Welleneinlauf (Wellenoberfläche im Einstich geschliffen) auf. Die übrigen Wellenoberflächen zeigten keinen messbaren Welleneinlauf. Zum Teil wurde die Laufspur (Umfangsrichtung) durch den Dichtkantenkontakt leicht geglättet.

Tabelle 19: Welleneinlauf nach 1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung

Wellenbezeichnung	Drehrichtung der Welle	Tiefe der Einlaufspur
Im Einstich geschliffen	Linkslauf	8 μm
Längsdrehen Wiperschneide	Rechtslauf	2 μm
Tangentialdrehen	Rechtslauf	2,6 μm
Längsdrehen Wiperschneide	Linkslauf	1,5 μm

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Dichtheitsuntersuchungen

Die Dichtheitsuntersuchungen bestätigen die Ergebnisse der Förderwertbestimmung der Wellenoberflächen. Alle Dichtstellen blieben dicht.

Die untersuchten Wellenoberflächen sind für den Einsatz als Dichtringgegenlauffläche für Radial-Wellendichtringe geeignet. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass die eingesetzte Fertigungsmaschine den höchsten Anforderungen hinsichtlich Maschinensteifigkeit und Präzision entsprach. Auch die übrigen Fertigungsbedingungen genügten höchsten Anforderungen. Die so erhaltenen Wellenoberflächen sind von entsprechend hoher Qualität. Weiterhin waren die Bedingungen für die 240 bzw. 1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchungen im Hinblick auf das Ziel, den Einfluss der verschieden ge-

fertigten Wellenoberflächen auf die Dichtigkeit und die Veränderung des Dichtsystems im Betrieb zu erfahren, bewusst moderat gewählt worden. So wird sichergestellt, dass keine übermäßige chemische oder thermische Veränderung des verwendeten Öls (Verkokung) und des Dichtringes (Verhärtung) die Untersuchungsergebnisse verfälscht.

Der in wenigen Fällen aufgetretene geringe Welleneinlauf ist unkritisch. Er kann nicht mit einem speziellen Fertigungsverfahren oder Fertigungsparametern in Zusammenhang gebracht werden. Eine mögliche Ursache kann, trotz sorgfältiger Montage und Verwendung von neuem Öl, leichte Verschmutzung im Bereich des Dichtrings sein. Auch die Füllstoffe im Fluorelastomer der verwendeten Dichtringe können die Ursache für den Welleneinlauf sein.

4.4 Förderwertbestimmung des Dichtsystems während des Betriebs

Bei Dichtsystemen mit ausgewählten Wellenoberflächen (siehe Tabelle 16, Seite 63) wurde die Entwicklung des Förderwerts über die Betriebsdauer von 1.000 bzw. 1500 Stunden beobachtet. Dabei wurde der Systemförderwert in Intervallen von ca. 100 Stunden gemessen (vgl. Kapitel 3.2.2, Seite 37). Bei allen Dichtsystemen (Ausnahme T4 LL, Bild 61) konnte ein Abfall der Förderwirkung im Verlauf der Dichtheitsuntersuchung d.h. mit zunehmender Betriebsdauer, beobachtet werden. Bei einem Dichtsystem trat im Verlauf dieser Untersuchungen geringe Leckage auf (Bild 57). Das undicht gewordene Dichtsystem zeigte einen negativen Förderwert. Leckagebeginn und „Nulldurchgang“ des Systemförderwerts waren in zeitlicher Nähe zueinander zu beobachten.

Die in Bild 56 dargestellten Förderwerte der im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen zeigen einen ausgeglichenen Verlauf. Es treten keine großen Schwankungen des Förderwerts auf. Das Anfangsniveau der Förderung liegt im Bereich zwischen 0,10 und 0,23 ml/h. Der mittlere Rückgang des Systemförderwerts liegt zwischen 0,04 ml/h je 1.000 Stunden (Welle H163) und 0,10 ml/h je 1.000 Stunden (Welle H164). Die Drehrichtung der Welle in den untersuchten Dichtsystemen hat keinen erkennbaren Einfluss auf das Förderniveau zu Beginn oder den Rückgang des Fördervermögens.

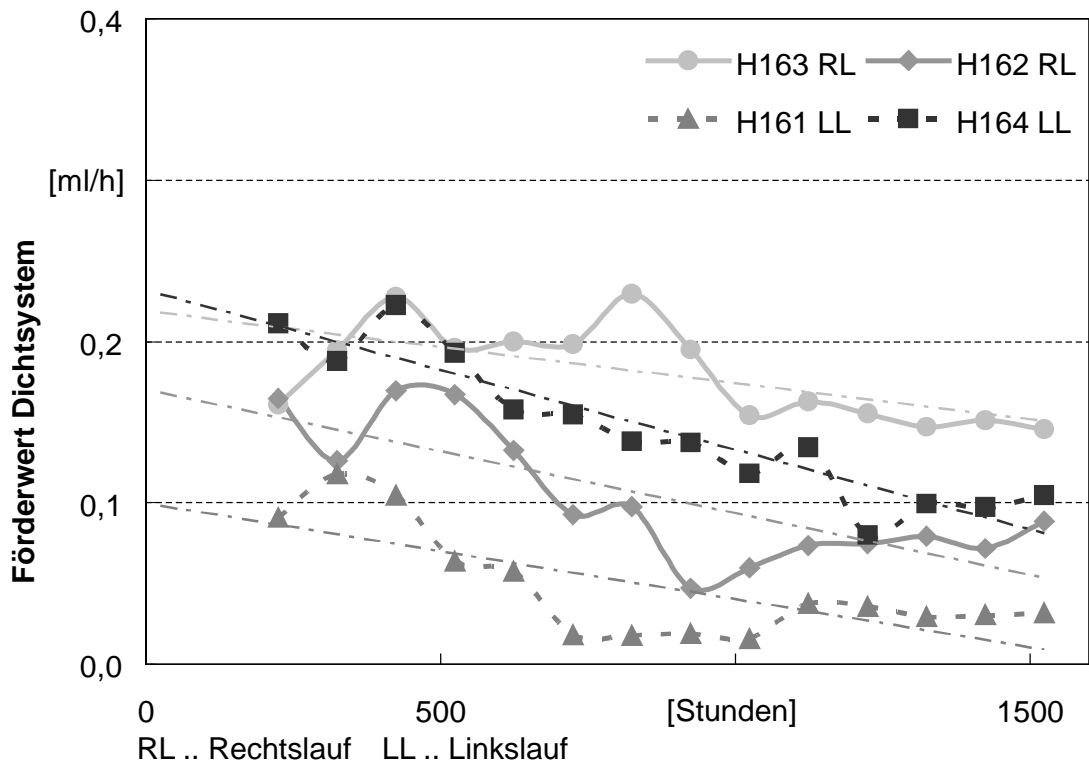


Bild 56: Förderwertentwicklung Dichtsystem, Wellen im Einstich geschliffen

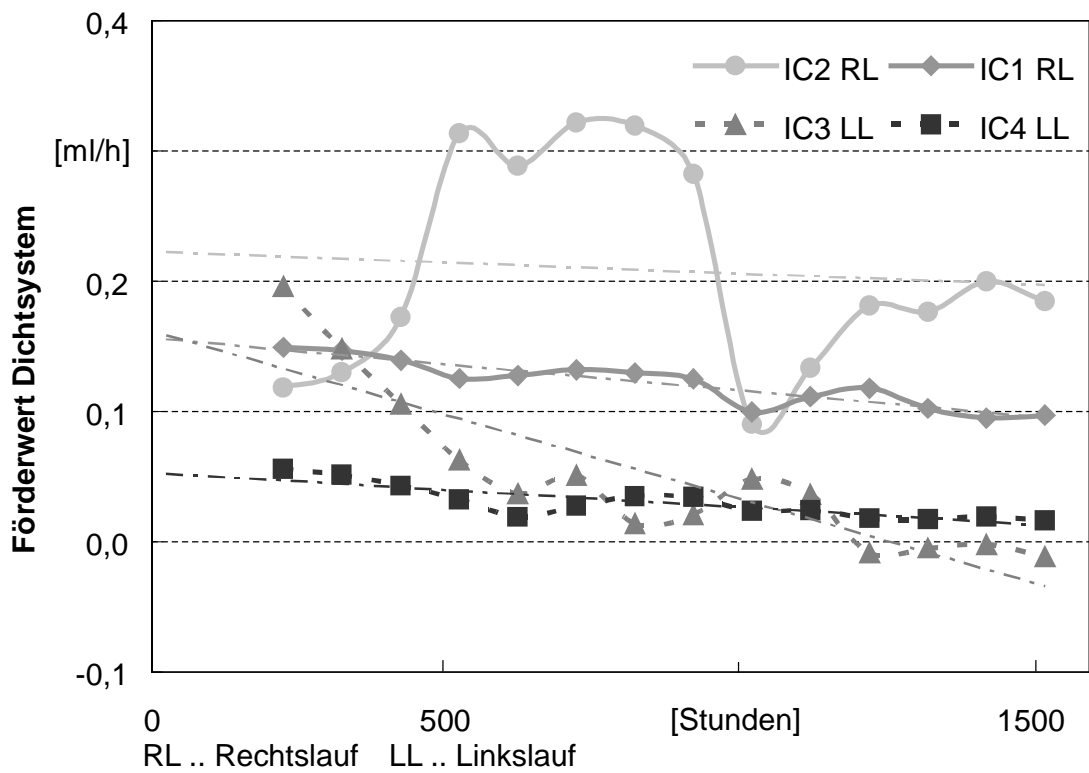


Bild 57: Förderwertentwicklung Dichtsystem, Wellen längs-hartgedreht

Das Anfangsniveau des Systemförderwerts der Dichtsysteme mit hartgedrehten Wellenoberflächen ist vergleichbar mit dem der im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen. Es ergibt sich jedoch ein z. T. sehr unruhiger Verlauf des Förderwerts über die Einsatzdauer, Bild 57 - Welle 1C2. Auch der mittlere Rückgang des Systemförderwerts – dieser liegt zwischen 0,02 ml/h je 1.000 Stunden (Welle 1C2) und 0,10 ml/h je 1.000 Stunden (Welle 1C3) – ist vergleichbar mit den Werten der im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen. Obwohl die hartgedrehten Wellenoberflächen die gewindeähnliche Drehwendel aufweisen, welche entsprechend der „Gewindesteigung“ bei Rechtslauf in Leckagerichtung fördern würde, kann hier dieser Drehrichtungszusammenhang bzgl. des Förderwertniveaus nicht beobachtet werden. Das Dichtsystem mit der hartgedrehten Welle 1C3 weist ab ca. 1200 Stunden Laufzeit einen negativen Systemförderwert und somit Leckage auf. Die Drehwendel müsste entsprechend der Modellvorstellung als Fördergewinde hier entgegen der Leckagerichtung arbeiten (Linkslauf).

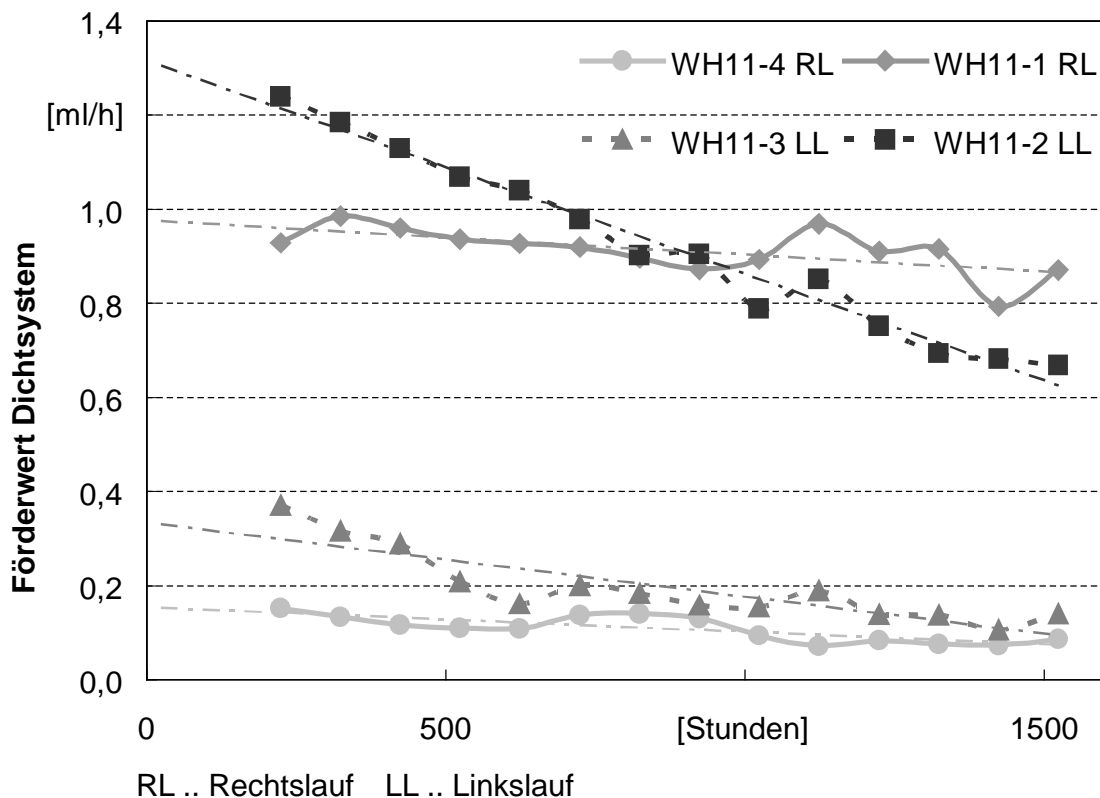


Bild 58: Förderwertentwicklung Dichtsystem, Wellen längs-weichgedreht (1)

Die Dichtsysteme mit weichgedrehten Wellenoberflächen der Parameterkombination WH 11 ($R_z \approx 9,5 \mu\text{m}$) zeigen ein teilweise deutlich höheres Anfangsniveau des Förderwerts, wobei die Lage des Anfangsniveaus nicht von der Drehrichtung des Dichtsystems abhängt, Bild 58. Somit kann hier ebenfalls der Einfluss der Drehwendel auf die Förderung des Dichtsystems im Sinne eines Fördergewindes ausgeschlossen werden. Allerdings ist der Rückgang des Systemförderwerts im Linkslauf (Drehwendel arbeitet in „Dichtrichtung“) ungefähr um den Faktor 10 größer als im Rechtslauf (Drehwendel arbeitet in „Leckagerichtung“). Er liegt zwischen 0,05 bzw. 0,07 ml/h je 1.000 Stunden (Welle WH 11-1, WH 11-4) und 0,20 bzw. 0,50 ml/h je 1.000 Stunden (Welle WH 11-2, WH 11-3).

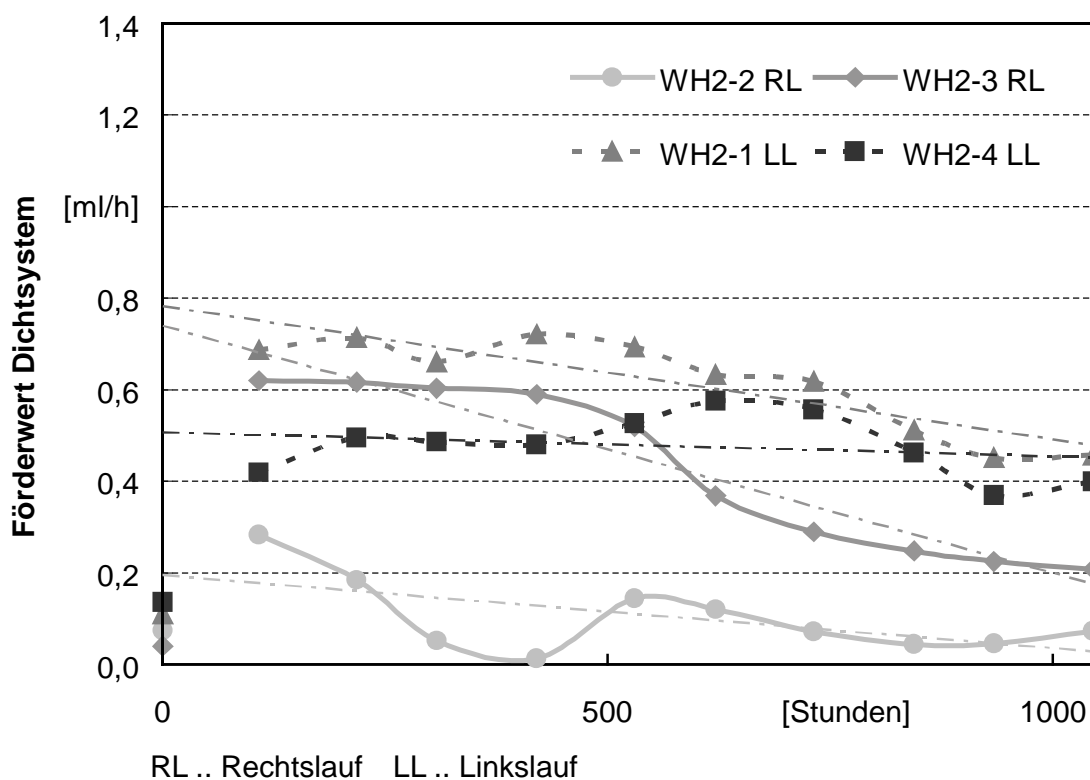


Bild 59: Förderwertentwicklung Dichtsystem, Wellen längs-weichgedreht (2)

Auch die Dichtsysteme mit weichgedrehten Wellenoberflächen der Parameterkombination WH 2 zeigten, verglichen mit den hartgedrehten oder im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen, ein höheres Niveau des Systemförderwerts zu Beginn. Diese lagen zwischen 0,3 ml/h und 0,7 ml/h. Im Gegensatz zu den weichgedrehten Wellenoberflächen WH 11 war der Rückgang der Systemförderung nicht von der Drehrichtung ab-

hängig. Auch hinsichtlich des Startniveaus war kein Zusammenhang ersichtlich. Insgesamt war der Verlauf der Systemförderwerte über die Laufzeit ausgeglichen mit monoton abnehmender Tendenz.

Die Systemförderwerte der Dichtsysteme mit tangentialgedrehten Wellenoberflächen wiesen ebenfalls einen monoton fallenden Verlauf auf, wobei das Niveau zu Beginn leicht über dem der im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen lag, Bild 60. Sowohl hinsichtlich des sich ausbildenden Startniveaus als auch dem Rückgang der Systemförderwerte im Verlauf der Versuchsdauer war kein Einfluss der Drehrichtung vorhanden.

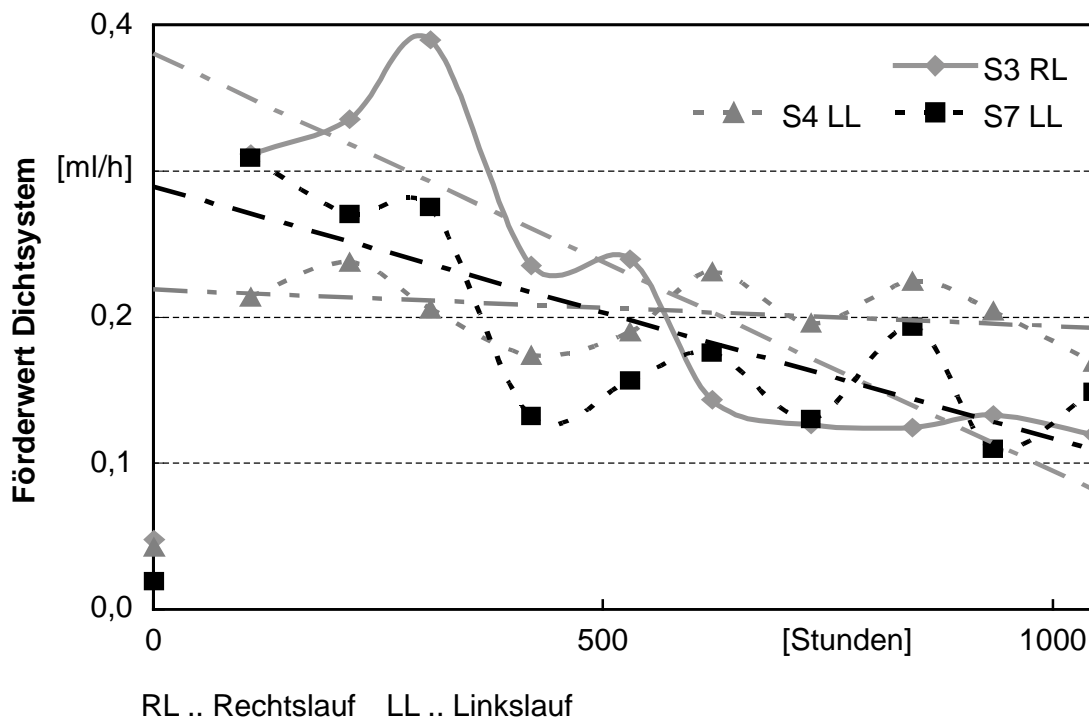


Bild 60: Förderwertentwicklung Dichtsystem, Wellen tangentialgedreht

In Bild 61 sind die Förderwerte der Dichtsysteme mit im Einstich gedrehten Wellenoberflächen über der Laufzeit dargestellt. Der Verlauf der Systemförderwerte ist teilweise schwankend (Welle T1, T6 – beide im Rechtslauf). Das Startniveau ist mit dem der Dichtsysteme mit im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen vergleichbar. Auffällig ist das abweichende Verhalten der Systemförderwerte im Fall der Welle T4 im Linkslauf. Sie weisen einen stetig leicht ansteigenden Verlauf über die Versuchsdauer

auf. Die übrigen Dichtsysteme zeigen analog zu den restlichen Dichtsystemen einen stetigen Rückgang der Systemförderung mit fortschreitender Betriebsdauer.

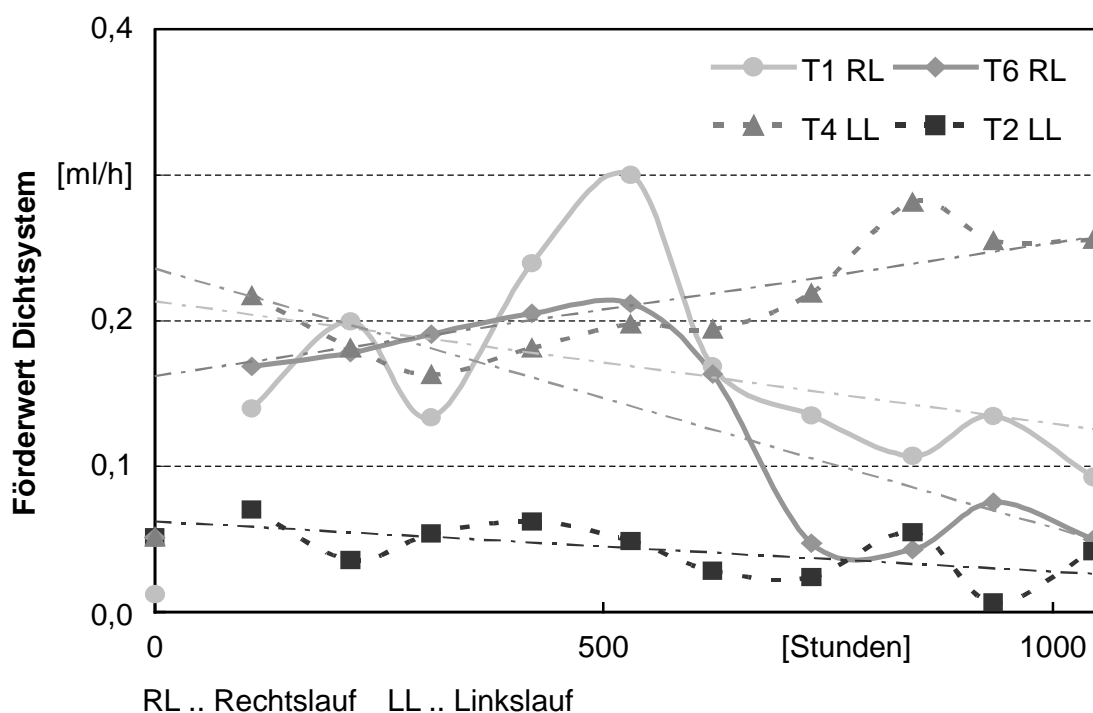


Bild 61: Förderwertentwicklung Dichtsystem, Wellen im Einstich gedreht

Betrachtet man die gemessenen Systemförderwertverläufe insgesamt, so stellt man eine Gemeinsamkeit aller Dichtsysteme bzw. der Förderwertentwicklung fest. Die Dichtsysteme weisen zu Beginn der Laufzeit, d.h. mit null Laufstunden, einen in etwa gleichen, sehr geringen Systemförderwert auf (isolierte Werte zum Zeitpunkt „0“ in Bild 59, Bild 60 und Bild 61). Das charakteristische Startniveau des Systemförderwerts eines jeden Dichtsystems bildet sich erst innerhalb des ersten Betriebszeitraums (hier ca. 100 Stunden) in Abhängigkeit von der eingesetzten Wellenoberfläche aus. Dieser Effekt ist bekannt, und wird als Konditionierung des Dichtrings bezeichnet. Er kann hier durch die Messung des Systemförderwerts im Betrieb wiederum nachgewiesen werden /2/, /20/.

4.4.1 Verschleiß der Dichtringe

Der Verschleiß der Dichtringe war nicht auffällig. Die Mittelwerte der Berührbreiten der unterschiedlichen Wellenoberflächen-Parameterkombinationen bewegten sich im Bereich zwischen 0,17 mm und 0,28 mm, Tabelle 20.

Die Berührbreiten zeigten keine Abhängigkeit von der Drehrichtung der Wellen im Dichtsystem, die Abweichungen von den jeweiligen Mittelwerten waren gering.

Tabelle 20: Mittlere Berührbreiten der Dichtringe nach der Förderwertmessung im Betrieb

Wellenbezeichnung	Berührbreite im Linkslauf	Berührbreite im Rechtslauf
Im Einstich geschliffen	0,26 mm	0,26 mm
Längsdrehen 1C	0,21 mm	0,23 mm
Längsdrehen WH 2	0,24 mm	0,28 mm
Längsdrehen WH 11	0,28 mm	0,19 mm
Tangentialdrehen	0,17 mm	0,19 mm
Einstechdrehen	0,18 mm	0,20 mm

4.4.2 Verschleiß der Wellenoberflächen

Die Wellenoberflächen der Dichtsysteme, welche der Förderwertmessung im Betrieb unterzogen wurden, zeigten durchweg einen relativ hohen Welleneinlauf im Dichtkantenbereich. In Bild 62 sind die jeweiligen Verschleißwerte für die unterschiedlichen Wellenoberflächen im Rechts- und Linkslauf aufgetragen. Auffällig hierbei war, dass der Welleneinlauf auf den weichgedrehten Wellenoberflächen im Vergleich zu den übrigen, harten, Wellenoberflächen nicht deutlich höher ausfiel. Lediglich die weichen Wellenoberflächen mit der Parameterkombination WH 2 wiesen geringfügig höhere Verschleißwerte auf. Dabei ist zu beachten, dass diese Wellenoberfläche im Vergleich zu den weichgedrehten Wellenoberflächen mit der Parameterkombination WH 11 die geringere Oberflächenrauheit in Achsrichtung aufweist.

Diese Verschleißwerte wichen von den nach der 1.000 Stunden Langzeituntersuchung – teilweise auf denselben Wellenoberflächen – gemessenen Werten trotz gleicher Be-

triebsdauer deutlich ab. Eine schlüssige Erklärung für diese Tatsache konnte nicht gefunden werden.

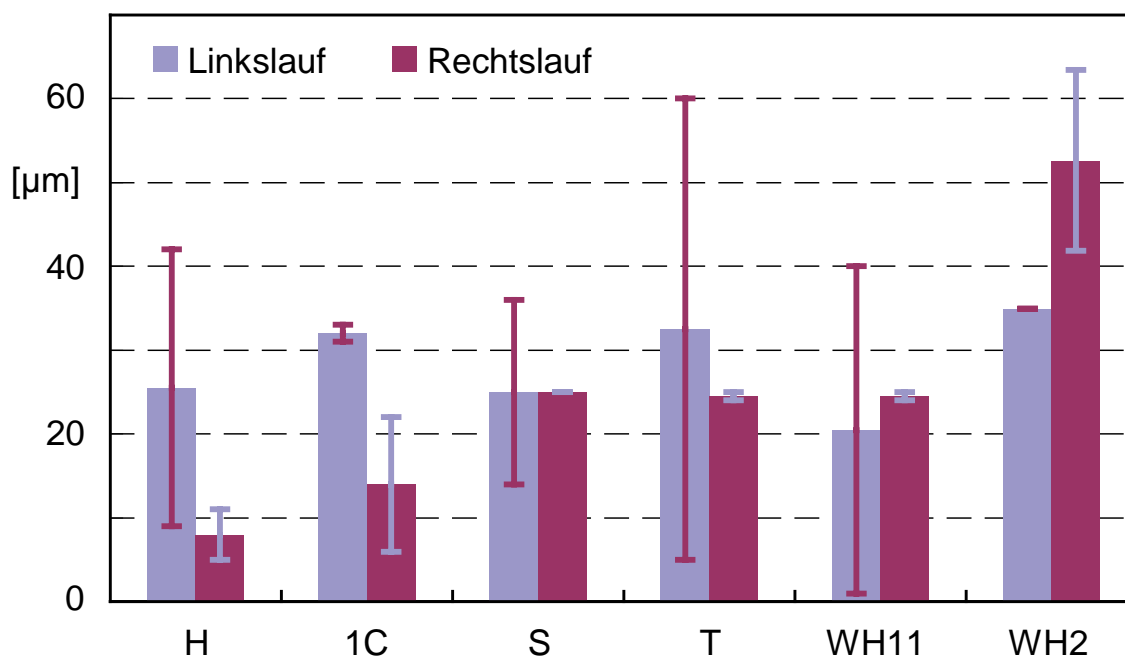


Bild 62: Verschleiß der Wellenoberflächen (Welleneinlauf), Förderwertmessung im Betrieb

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Förderwertbestimmung während des Betriebs

Mit dem vorgestellten Verfahren kann nun über die Dauer einer Langzeitdichtheitsuntersuchung das Rückfördervermögen eines Dichtsystems gemessen werden. Die Entwicklung des Systemförderwerts abhängig von der Betriebsdauer eröffnet verschiedene Beurteilungsmöglichkeiten für Dichtsysteme.

Anhand dieser Methode können die Auswirkungen der unterschiedlichen Wellenoberflächen auf die Langzeitdichteigenschaften ermittelt werden. Dies ist ein wichtiger Baustein in der Qualifizierung von alternativ gefertigten Wellenoberflächen als Dicht-ringgegenauflfläche. Da dieses Verfahren versuchstechnisch aufwändig ist, eignet es sich vor allem zur letztendlichen Absicherung nach positiven Voruntersuchungen.

Eine weitere Aussagemöglichkeit ergibt sich aus der Beobachtung des Dichtsystems über die Betriebsdauer. Anhand des Anfangsniveaus der Systemförderung kann die

generelle Dichtsicherheit bzw. „Dichtreserve“ des Dichtsystems beurteilt werden. Geht man von einem gleichmäßigen Rückgang der Förderung aus, kann bei entsprechend hohem Ausgangsniveau über längere Zeit sicher abgedichtet werden. Kritisch wird eine hohe Förderung im Dichtsystem, wenn dadurch die Schmierung unter der Dichtkante beeinträchtigt wird (Mangelschmierung). Hier bietet das angewandte Verfahren künftig die Möglichkeit, durch weitere Untersuchungen Grenzwerte in Erfahrung zu bringen, die für die jeweiligen Dichtsysteme maßgeblich sind.

Letztlich ergibt sich durch Extrapolation des Förderwertverlaufs die Möglichkeit, nach beliebig langer Betriebszeit auf die potentiell mögliche Standzeit der Dichtstelle zu schließen. Die Vorhersage basiert in diesem Fall auf der Annahme, dass sich der Verlauf des Systemförderwerts über die Betriebsdauer annähernd linear verhält. Die hier dokumentierten Versuchsergebnisse legen diese Annahme nahe. Im Fall der ausgefallenen Dichtstelle (hartgedrehte Wellenoberfläche, Welle 3) hätte man nach Ablauf einer Versuchsdauer von ca. 550 Stunden den Ausfall dieser Dichtstelle bei einer Laufzeit von ca. 650 Stunden prognostiziert. Real ausgefallen ist die Dichtstelle jedoch erst nach ca. 1200 Stunden. Eine präzise Datierung ist somit nicht möglich, sondern lediglich eine grobe Abschätzung auf Basis der momentanen Daten.

Es zeigte sich anhand der Ergebnisse der Förderwertmessung im Betrieb, dass unabhängig von der makroskopisch vorhandenen Drehwendel auf der Wellenoberfläche die sich abhängig vom Werkstoff und Fertigungsverfahren ausbildende Mikro-Oberflächenstruktur von entscheidender Bedeutung für die Dichtwirkung im Dichtsystem ist. Dies kann an dem Vergleich der Systemförderwerte der hartgedrehten Wellenoberflächen der Parameterkombination 1C mit den weichgedrehten Wellenoberflächen der Parameterkombination WH 2, die aufgrund der Fertigungsparameter eine ähnliche Drehwendel aufweisen, verdeutlicht werden. Die sich beim Zerspanen des weichen Ck45 Werkstoffes ausbildende, im Mikrobereich „griffigere“, Oberflächenstruktur ruft einen wesentlich höheren Systemförderwert hervor, als dies die „glattere“ Oberflächenstruktur der hartgedrehten Wellenoberfläche bewirkt. Somit ist die Mikrooberflächenstruktur von entscheidender Bedeutung für die Konditionierung des Dichtrings im Dichtsystem und damit auch für die Dichteigenschaft des Gesamtsystems.

Dass einen erhöhter Verschleiß der Wellenoberflächen im Verlauf der Förderwertmessung auftrat, ist sicherlich kritisch zu betrachten. Ungeachtet dessen konnte jedoch die Förderwertentwicklung, auch mit ausreichender Reproduzierbarkeit, beobachtet und so neue Erkenntnisse gesammelt werden. Vor dem Hintergrund einer späteren Bewertung der Tauglichkeit der verwendeten Wellenoberfläche geben die offensichtlich ungünstigen Bedingungen hinsichtlich des Verschleißes zusätzliche Sicherheit für die Bewertung, die durch weiterführende Untersuchungen gestützt werden muss.

4.5 Hartgedrehte Wellenoberfläche aussen-kurzhubgehont (Superfinish)

Die Dichtheitsuntersuchung der aussen-kurzhubgehonten Wellenoberflächen musste bereits nach kurzer Zeit, unabhängig von der Drehrichtung, wegen sehr starker Leckage abgebrochen werden. Die starke Förderwirkung der kreuzförmig angeordneten Oberflächenstruktur konnte in den untersuchten Dichtsystemen nicht von der Rückförderwirkung der Dichtringe ausgeglichen werden. Offenbar rief die Oberflächenstruktur trotz der scheinbar symmetrischen Ausprägung eine starke Förderung in Leckagerichtung hervor.

Aussen-kurzhubgehonten Wellenoberflächen sind letztlich nicht bzw. nur bedingt als Gegenauflfläche für Radial-Wellendichtringe geeignet. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Untersuchungen von Raab /26/.

4.6 Hartgedrehte Wellenoberfläche mit einpolierter Mikrostruktur

Im Gegensatz zur taktilen Rauheits- bzw. Topographiemessung kann mit dem in Kapitel 3.1.6 beschriebenen optischen Messgerät FRT MicroProf[®] die eingebrachte Mikrostruktur erfasst werden. In Bild 63 ist die 3D-Topographie dieser Wellenoberfläche abgebildet. Die nur wenige zehntel Mikrometer tiefe Mikrostruktur ist klar erkennbar.

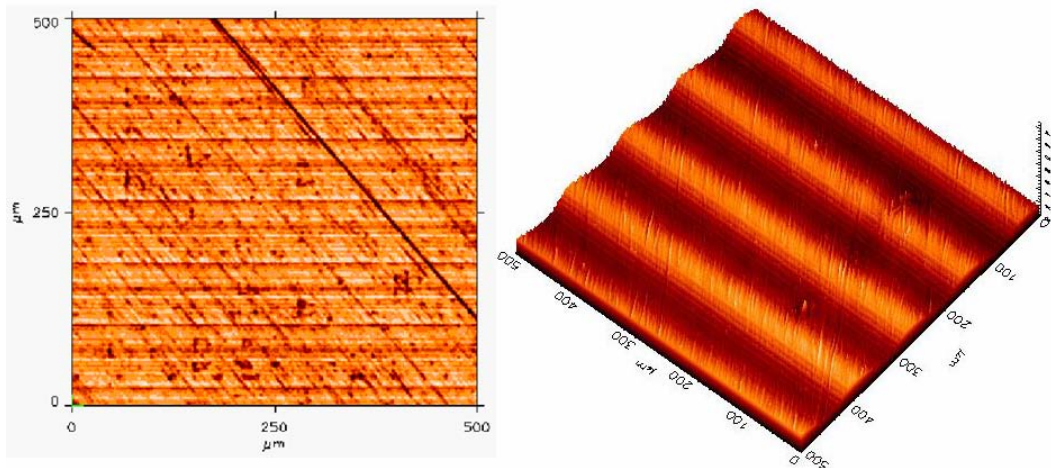


Bild 63: Überlagerte Mikrostruktur auf längs-hartgedrehter Wellenoberfläche

Um die dichtungstechnischen Auswirkungen der überlagerten Mikrostrukturen zu untersuchen, wurde die Versuchswelle einer modifizierten Förderwertuntersuchung unterzogen, Bild 64 oben. Das Ergebnis der modifizierten Förderwertuntersuchung der drei Laufspuren (ohne Mikrostruktur, Mikrostruktur + 45° und Mikrostruktur - 45°) ist in Bild 64 unten dargestellt. Aufgetragen ist die Leckage über der Zeit. Auf der reinen Drehstruktur wurde eine konstante Leckage von 1,25 g/h bei einem Reibmoment von 0,26 Nm gemessen. Die Leckage setzt sich zusammen aus der Pumpwirkung des Dichtrings und der Förderwirkung der Wellenoberfläche.

Im Laufspurbereich B, Drehstruktur und + 45°-Mikrostruktur, wurde eine konstante Leckage über mehrere Stunden von 6 g/h ermittelt. Das Reibmoment der Dichtstelle war im Vergleich zu der Anordnung auf der reinen Drehstruktur geringer.

Im Laufspurbereich C ist die Drehstruktur mit der Mikrostruktur unter - 45° zur Wellenachse orientiert überlagert. Die Dichtstelle weist in dieser Konstellation keine Leckage auf, jedoch wurde ein um ca. 20 % höheres Reibmoment festgestellt.

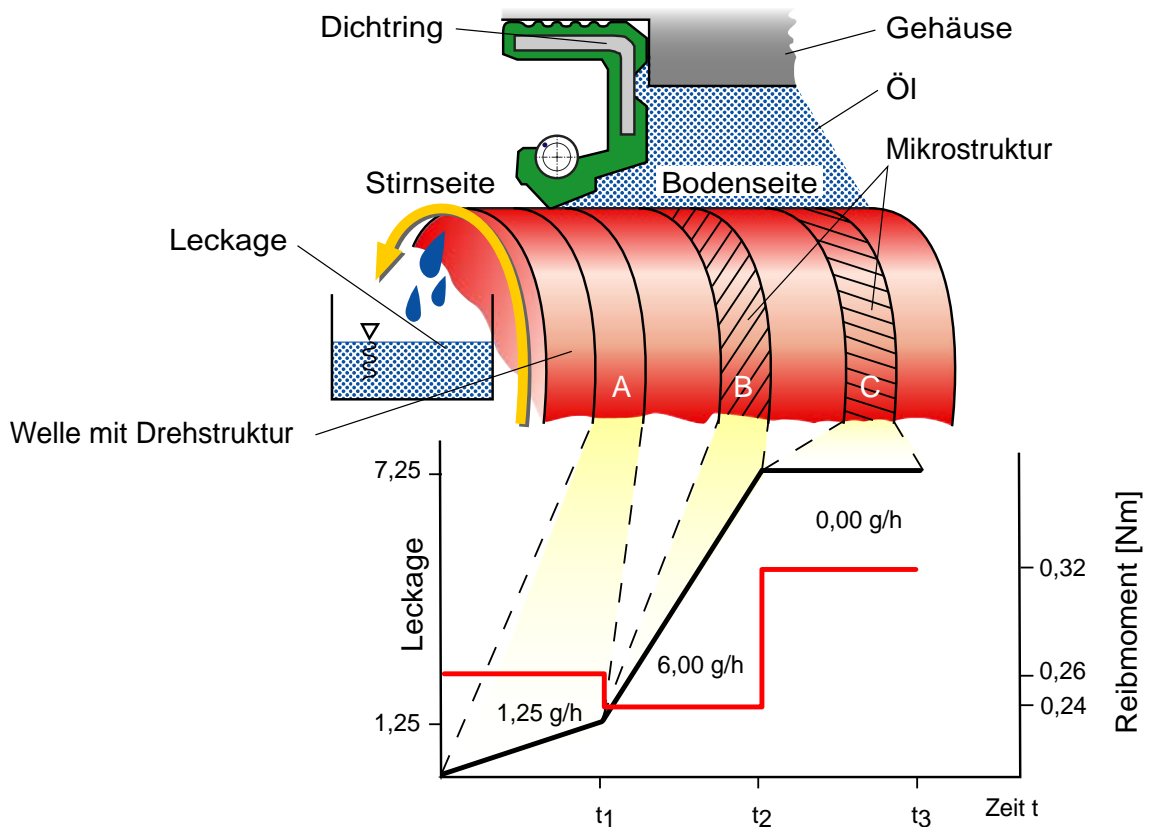


Bild 64: Modifizierter Förderwertversuch mit Mikrostruktur Versuchswelle

Nimmt man an, dass die Mikrostrukturen unter positivem sowie negativem Winkel zur Wellenachse gleich stark wirken, so ergibt sich hier rechnerisch eine „negative“ Förderung von ca. 3,5 g/h d. h. die Förderwirkung der Wellenoberfläche überstieg die Pumpwirkung des Radial-Wellendichtrings deutlich. Dadurch befindet sich weniger Öl zwischen Dichtring und Wellenoberfläche. Die Reibung im tribologischen Kontakt wird höher.

Die längs-hartgedrehte Wellenoberfläche mit überlagerter Mikrostruktur wurde auch der 1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung unterzogen. Dabei wurde die Laufspur des Dichtrings in den Oberflächenbereich gelegt, auf dem sich die überlagerte Mikrostruktur befand. Die Mikrostruktur war dabei in $+45^\circ$ orientiert. Dies führte dazu, dass bereits von der ersten Laufstunde an starke Leckage auftrat (ca. 1 g/h). Durch die starke Leckage sank innerhalb von 300 Stunden Laufzeit der Ölstand bis unterhalb der Wellenunterkante ab. Dies hatte zur Folge, dass keine Leckage mehr anfiel und der Dichtring ohne Sumpfschmierung ca. 70 h praktisch trocken lief. Nachdem der Ölverlust

ausgeglichen wurde (Ölstand Wellenmitte), trat über einen Zeitraum von ca. 300 Stunden keine bzw. nur geringe Leckage auf. Anschließend stieg die Leckagerate wieder stetig auf das Anfangsniveau von ca. 1 g/h an.

Die Mikrostruktur auf der Wellenoberfläche war, trotz Mangelschmierung und daraus resultierender hoher thermischer Belastung (ca. 200 °C - annähernd zu charakterisieren anhand der Anlassfarbe der Wellenoberfläche), am Ende des Versuchs nahezu unverändert vorhanden. Der Dichtring weist keinen übermäßigen Verschleiß bzw. Ablagerungen auf.

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse mit hartgedrehter Wellenoberfläche und polierter Mikrostruktur

Die Ergebnisse zeigen, dass die in die Wellenoberfläche einpolierten Mikrostrukturen einen erheblichen Einfluss auf deren Fördercharakteristik haben. Die Mikrostrukturen im Größenordnungsbereich von einigen zehntel Mikrometern Tiefe sind im Vergleich zu der makroskopischen Drehwendel, welche eine Steigung von mehreren hundertstel bis einigen zehntel Millimeter haben, deutlich kleiner.

Dabei ist zu beachten, dass die im vorliegenden Beispiel eingebrachten Strukturen in einer extremen Winkellage von $\pm 45^\circ$ zur Wellenachse liegen. Ebenso ist deren absolute Anzahl groß.

Jedoch untermauert das Ergebnis die Feststellung, dass die Ausprägung der Drehwendel bzw. die Drehparameter von hart- oder weichgedrehten Wellenoberflächen an sich praktisch keinen Einfluss auf die Förderung der Wellenoberfläche haben. Somit ist die Ursache für undichte Dichtsysteme mit alternativ gefertigten Wellenoberflächen, aber auch von standardmäßig im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen, schwerpunktmäßig im Bereich der Mikrostrukturen zu suchen. Dabei spielen sicherlich Anzahl, Homogenität, Tiefe und Winkellage zur Wellenachse hinsichtlich der Auswirkung auf die Förderung der Wellenoberfläche eine Rolle, was durch weitere Untersuchungen festgestellt werden könnte.

Der während der 1.000 Stunden Dichtheitsuntersuchung aufgetretene „Quasi-Trockenlauf“ des Dichtsystems hat das Rückfördervermögen des Dichtringes dahingehend beeinflusst, dass dieser in den darauf folgenden 300 Stunden nach Ergänzung des

Ölsumpfes die (wohl unveränderte) Förderung der Wellenoberfläche in Leckagerichtung kompensieren konnte. Die geänderten tribologischen Bedingungen könnten durch einen geringfügig höheren Verschleiß eine „rauere“ Oberfläche des elastomeren Werkstoffs der Dichtkante hervorgerufen haben. Diese erhöhte Rauheit bewirkte eine gesteigerte Förderwirkung des Dichtrings (vgl. /2/, /16/, /41/).

Nachdem die gestiegene Pumpwirkung des Dichtrings unter „Normalbedingungen“ wieder abnahm, stellte sich auch die ursprüngliche Leckage wieder ein. Eine Dichtstelle ist also so lange dicht, wie der Dichtring in der Lage ist, den Fluidstrom der Wellenoberfläche in „Leckagerichtung“ zu übertreffen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die im vorliegenden Fall aufgetretene positive Veränderung der Fördereigenschaft des Dichtrings durch „schlechtere“ Betriebsbedingungen, hier Mangelschmierung, nicht generell erwartet werden kann. Wird ein Dichtring über zu lange Zeit (abhängig unter anderem vom Dichtringwerkstoff) mit mangelhafter oder ganz ohne Schmierung betrieben, führt dies zu dessen Zerstörung.

Hier liegt die Gefahr von förderintensiven Wellenoberflächen für Dichtsysteme begründet. Fördert die Wellenoberfläche stark in den abzudichtenden Raum hinein, ist das Dichtsystem zu Beginn dicht. Jedoch führt die ungünstige Schmierungs- und Kühlungssituation zu schneller Alterung (Verhärtung/Verschleiß), was letztlich zum frühzeitigen Ausfall des Dichtsystems führt.

Offensichtlich wird der negative Einfluss einer förderintensiven Wellenoberfläche im umgekehrten Fall durch starke Leckage ab der ersten Betriebsstunde. Die Wellenoberfläche fördert zuviel Öl in Leckagerichtung, was vom Dichtring nicht kompensiert werden kann. Die Dichtstelle wird undicht.

Für eine funktionierende Dichtstelle ist also eine möglichst förderneutrale Wellenoberfläche als Idealfall anzusehen und somit zu fordern.

4.7 Drallmessung

Mit der in Kapitel 3.1.7 beschriebenen Messeinrichtung wurde je eine Wellenoberfläche der untersuchten Fertigungsverfahren (Tabelle 15, Seite 62) vermessen. Die Drallkennwerte sowie der jeweils zugehörige Drehvorschub sind in Tabelle 21 dargestellt.

Neben dem sich aus der Steigung der „Drallstruktur“ ergebenden Winkel ist die Dralltiefe ein entscheidendes Beurteilungskriterium. Entsprechend der Erfahrungswerte, allerdings nur im Zusammenhang mit geschliffenen Wellenoberflächen, gilt eine Dralltiefe ab ca. $0,3 \mu\text{m}$ als kritisch. Im Sonderfall Nulldrall (siehe Kapitel 2.4, Seite 14) sind Werte bis maximal $0,5 \mu\text{m}$ zulässig.

Tabelle 21: Drallkennwerte der unterschiedlich gefertigten Wellenoberflächen

Wellenbezeichnung	Steigung [mm]	Vorschub f [mm]	Winkel [°]	Wellenlänge [mm]	Gangzahl	Dralltiefe [μm]	Förderquerschnitt [μm^2]
1A4	0,06	0,057	2	0,06	1	0,648	19
1E2	0,17	0,180	5	0,17	1	0,765	65
S 115-2	0,05	0,05	2	0,05	1	0,431	11
S 525-4	8,5	0,05	3°35'	0,25	34	0,376	46
S4	0	-	0	0,33	0	0,456	46
T4	0	-	0	0,33	0	0,204	12
W4-4	0,05	0,050	2	0,05	1	1,74	45
WH11-3	0,33	0,290	10	0,33	1	5,47	903
WH2-2	0,06	0,060	2	0,06	1	0,536	16
WW35C	0,1	0,100	3	0,1	1	1,3	68

Die Drehwendel wird als „Drallstruktur“ erkannt, und deren Abmessungen überwiegend richtig bestimmt (Ausnahme: Schwingungswelle S 525-4). Nach den Grenzwerten für die maximal zulässige Dralltiefe sind alle Wellenoberflächen, mit Ausnahme der tangentialgedrehten und der einstechedrehten Wellenoberfläche (Sonderfall Nulldrall), nicht als Gegenauflfläche für Radial-Wellendichtringe geeignet.

Dies widerspricht den Ergebnissen der Förderwertmessungen und der Dichtheitsuntersuchungen. Eine Erklärung hierfür ist, dass die auf Erfahrungswerten beruhenden Grenzwerte nur für geschliffene Wellenoberflächen gültig sind.

Die Schwachpunkte hinsichtlich der Erkennung von Mikrostrukturen aufgrund des Tastschnittverfahrens, welches dieser Messmethode zugrunde liegt, bleiben ebenfalls bestehen.

5 Neuer Ansatz zur Charakterisierung und Bewertung der Topografie von Wellenoberflächen

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass bei längsgedrehten Wellenoberflächen nicht die Vorschubwendel der Auslöser von Undichtigkeiten ist. Eine wesentlich größere Auswirkung haben Mikrostrukturen auf der Wellenoberfläche. Die Oberflächenkennwerte R_a und R_z bieten aufgrund ihrer Definition sowohl bei zweidimensionaler als auch bei dreidimensionaler Betrachtung keine dichtungstechnisch relevante Beurteilungsmöglichkeit hinsichtlich dieser sehr kleinen Oberflächenstrukturen. Bei der taktilen Oberflächenmessung werden Strukturen dieser Größenordnung aus den bereits dargelegten Gründen nicht erfasst. Dadurch können diese auch nicht ausgewertet werden.

Da die verfügbaren Oberflächenkennwerte, auf 2D-Tastschnittverfahren basierend, keine dichtungstechnische Qualifizierung der Wellenoberfläche erlauben, wird eine andere Auswertungs- und Bewertungsstrategie benötigt. Besonderen Wert wurde auf die flächige, und somit dreidimensionale Betrachtung gelegt. Entsprechend der untersuchten Wellenoberflächen lag bei der Entwicklung dieser Vorgehensweise der Schwerpunkt auf gedrehten Wellenoberflächen, wobei jedoch die Oberflächendaten beliebiger Wellenoberflächen auswertbar sein sollten.

Die Ausgangsbasis für die Auswertung und Qualifizierung sind die berührungslos erfassten 3D-Oberflächendaten. Betrachtet wird jeweils ein Flächenausschnitt mit $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$. Die laterale Schrittweite betrug hierbei in x- und y-Richtung jeweils $1\ \mu\text{m}$.

5.1 Auswertung der Topografie mittels Bildverarbeitung

Um eine Charakterisierung der Wellenoberflächen anhand der ggf. vorhandenen Mikrostruktur vornehmen zu können, wurde vom Verfasser das Verfahren der Bildanalyse zu Auswertung der Oberflächentopografie gewählt. Die Bildanalyse wird mit der Software MATLAB[®] R12 und dem Zusatzmodul „Image Processing Toolbox“ durchgeführt. Die im Rahmen einer Bildanalyse durchgeführten Einzelschritte entsprechen meist nachstehendem Schema /38/.

1. Bildaufnahme
2. Bildvorverarbeitung
3. Festlegen des Arbeitsbereiches (Teilausschnitte im Ausgangsbild oder gesamtes Bild sind hierbei denkbar)
4. Erzeugen von Objekten
5. Berechnung von Objekteigenschaften
6. Auswertung der Objekteigenschaften/Entscheidung über die Korrektheit der vorhandenen Objekte

Grundsätzlich entsteht bei der Bildvorverarbeitung aus dem Ausgangsbild ein neues, dem Ausgangsbild ähnliches, sich aber in bestimmter Hinsicht von diesem unterscheidendes Bild. Dies kann beispielsweise ein verbesserter Kontrast sein. Dabei wird jedoch der Informationsgehalt des Ausgangsbildes nicht verändert, also keine „neuen“ Informationen gewonnen oder hinzugefügt, sondern vorhandene Informationen lediglich hervorgehoben und verdeutlicht.

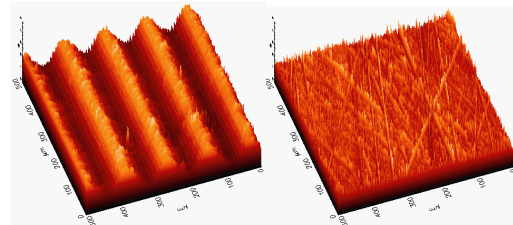
Die Verfahren der Bildvorverarbeitung werden in zwei Bereiche getrennt. Die *Punktoperationen* verwenden zur Berechnung des Ergebnispunktes, abhängig von der Verarbeitungsfunktion, lediglich den Wert des Ausgangspunktes. Zu den Punktoperationen wird auch die Bildarithmetik gezählt, welche zwei oder mehr Bilder miteinander verknüpfen, jedoch ebenfalls ausschließlich den jeweiligen Bildpunkt der entsprechenden Bildkoordinate.

Die *Lokalen Operationen* beziehen eine bestimmte Nachbarschaft des jeweiligen zu berechnenden Bildpunktes in dessen Berechnung mit ein. So kann z.B. die Helligkeit des Ergebnispunktes der Mittelwert der ihn umgebenden Punkte im Ausgangsbild darstellen.

Topografiemessung
FRT MicroProf

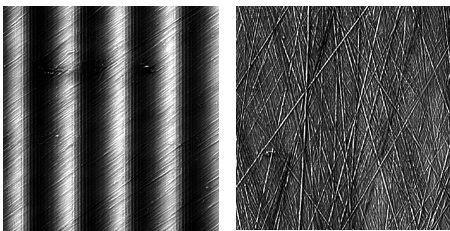


3D Topografie



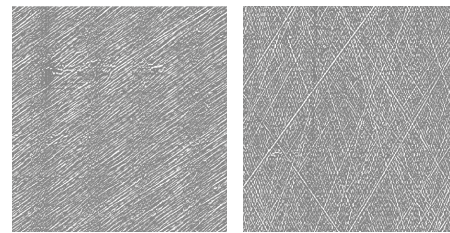
mit Drehstruktur ohne Drehstruktur

2D Graustufenbild

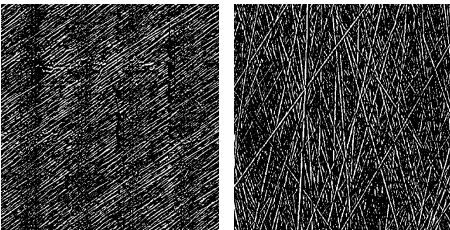


mit Drehstruktur ohne Drehstruktur

Entfernung des regelmäßigen
Strukturanteils, Histogrammausgleich

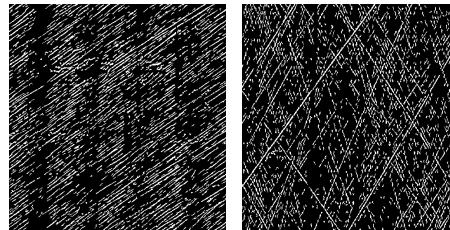


schwelleabhängige Binarisierung
Schwellwert [70%, 80%, 90% grau]



Labeln der zusammenhängenden
Bereiche, Strukturerkennung

Entfernung der Bereiche bestehend
aus weniger als 5 oder 10 Pixel



Klassifizierung der Bereiche nach
Aspect Ratio und Orientierung

Ausgabe der
charakteristischen Kennkurven

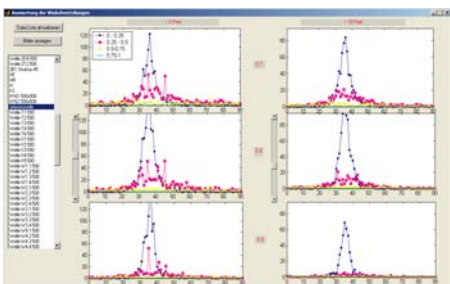


Bild 65: Vorgehensweise bei der Bildanalyse und Charakterisierung

Die einzelnen Schritte der hier durchgeführten Auswertung sind in Bild 65 dargestellt und nachfolgend näher erläutert. Zunächst wird ausgehend von der 3D-Topografie-messung mit dem FRT MicroProf[®] ein 2D-Falschfarbenbild der jeweiligen Wellenoberfläche erzeugt und in ein Graustufenbild mit 256 Graustufen überführt (Farbtiefe 8 Bit). Die Darstellung wird jeweils so ausgerichtet, dass die Wellenachse im Bild waagrecht orientiert ist. Dies stellt dann das so genannte Ausgangsbild dar. Entsprechend der Messauflösung entspricht die laterale Schrittweite von einem Mikrometer in der gemessenen Oberflächentopografie genau einem Pixel im Graustufenbild. Die Auflösung in z-Richtung ist abhängig von der jeweiligen tatsächlichen Ausdehnung der betrachteten Wellenoberfläche, und somit variabel.

Da der regelmäßige makroskopische Strukturanteil (hier: Drehstruktur) keine primäre Auswirkung auf die Dichteigenschaften hat, wird diese in einem ersten Schritt der Bearbeitung rechnerisch entfernt. Hierzu wird ein linearer Filter eingesetzt. Lineare Filter gehören zu den gängigsten lokalen Operationen. Der Grauwert des Pixels im Ergebnisbild ergibt sich aus den Grauwerten einer bestimmten Gruppe des Ausgangsbildes, auch Umgebung oder Nachbarschaft genannt. Speziell bei Filtern wird der Begriff Operator oder Filtermaske verwendet.

Im mathematischen Sinne ist der Grauwert g an der Stelle (x^*, y^*) das Ergebnis der Abbildungsfunktion f , welche auf alle Grauwerte g_i der zur Nachbarschaft N^* des Punktes gehörenden Punkte angewendet wird. Der verwendete lineare Filter kann somit folgendermaßen beschrieben werden.

$$g(x^*, y^*) = g(x, y) - \left(\frac{1}{s} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} f_{cr} g(x^* - dx + c, y^* - dy + r) \right) \quad \text{Gl. 8}$$

mit

$R = 10$.. Anzahl der Zeilen der Filtermaske

$C = 1$.. Anzahl der Spalten der Filtermaske

$dx = 0$.. Abstand zwischen Zielpunkt und linkem Filtermaskenrand

$dy = 0$.. Abstand zwischen Zielpunkt und oberem Filtermaskenrand

$s = 10$.. Summe der Filterkoeffizienten

Dadurch wird letztlich durch eine Punkt für Punkt Verarbeitung von jeder Bildzeile der Mittelwert der folgenden zehn Bildzeilen subtrahiert. Der regelmäßige Anteil der Oberflächenstruktur (Drehwendel) wird entfernt, ohne dass die vorhandene Mikrostruktur im Bild beeinflusst wird.

Anschließend wird eine Grauwerttransformation durchgeführt. Durch diese Normierung wird unabhängig vom Kontrast des Ausgangsbildes eine vergleichbare Ausgangsbasis für die weitere Verarbeitung erreicht. Angewendet wird hier das Verfahren der Histogrammebnung. Im Histogramm eines Bildes ist die Häufigkeit, mit der jeder der 256 Grauwerte vorkommt, aufgelistet.

Mathematisch betrachtet wird dabei jeder Grauwert g des Ausgangsbildes durch einen Grauwert g' ersetzt, der sich aus der relativen Häufigkeit aller darunter liegender Grauwerte ergibt.

$$g' = 255 \sum_{i=0}^g \frac{N_i}{N} \quad \text{Gl. 9}$$

mit

- N_i .. Anzahl der Pixel mit Grauwert i
- N .. Gesamtzahl der Pixel im Ausgangsbild

Nach Abschluss dieser Bildvorverarbeitungsoperationen wird die eigentliche Auswertung durchgeführt.

Um die eventuell vorhandenen Mikrostrukturen analysieren zu können, wird das vorverarbeitete Bild binär segmentiert. Bei der Binärsegmentierung wird das Ausgangsbild in ein Ergebnisbild transformiert, in dem lediglich zwei Zustände für jeden Pixel möglich sind, schwarz (0) oder weiß (1). Hierbei wird festgelegt, welche Bereiche des Graustufenbildes auf die binären Zustände Weiß und Schwarz abgebildet werden. Dies geschieht anhand von einem oder mehreren vorgegebenen Schwellwerten. Im vorliegenden Fall wird der Schwellwert auf drei Stufen – 70% Grau, 80% Grau und 90% Grau – variiert. Dadurch entsteht jeweils ein Ergebnisbild, in dem vorhandene Riefen oder Kratzer als zusammenhängende weiße Bereiche dargestellt sind. Durch die unterschiedlichen Schwellwerte wird letztlich die Tiefe einer als Kratzer erkannten Struktur festgelegt. Aufgrund fehlender Erfahrungswerte hinsichtlich der relevanten Tiefe der

Strukturen wurde hier im ersten Schritt mehrere Werte in die Auswertung eingezogen, um die Auswirkung dieser unterschiedlichen „Tiefenschwellen“ im Hinblick auf das Ergebnis der abschließenden Klassifizierung beurteilen zu können. Ebenso wird dadurch der unterschiedlichen Auflösung der Ausgangsbilder bzw. Messdaten in z-Richtung Rechnung getragen.

Diese zusammenhängenden Bereiche werden im anschließenden Verarbeitungsschritt zu jeweils einem Objekt zusammengefasst und gekennzeichnet. Hierbei werden Zusammenhängende Bereiche nach der Definition der so genannten 8er-Nachbarschaft gebildet. Entgegen der Definition der 4er-Nachbarschaft, die nur die orthogonal angrenzenden Punkte als Nachbarn eines Bildpunktes erkennen, werden dabei auch die diagonal angrenzenden Bildpunkte als Nachbarn erkannt, Bild 66.

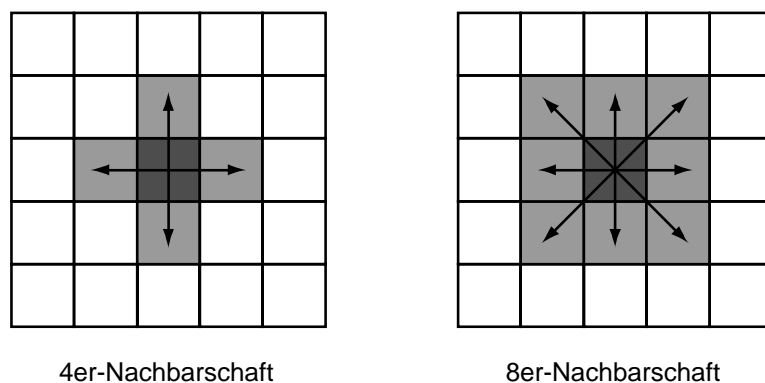


Bild 66: Unterschiedliche Definition der Punktnachbarschaft

Anschließend wird jeder zusammenhängende Bereich als ein Objekt definiert und gekennzeichnet bzw. „gelabelt“. Durch diesen Schritt ist es möglich, die einzelnen Objekte (= Oberflächenstrukturelemente) analytisch weiterzuverarbeiten und die spezifischen Eigenschaften zu ermitteln.

Mit diesem Schritt werden aus der Ansammlung von nicht näher bestimmten, mit unterschiedlichen Grauwerten belegten, Pixelschar die als dichtungstechnisch relevant geltenden Strukturelemente herausgelöst. Diese können weiterhin als Objekt mit definierten geometrischen Abmessungen weiterverarbeitet und bewertet werden.

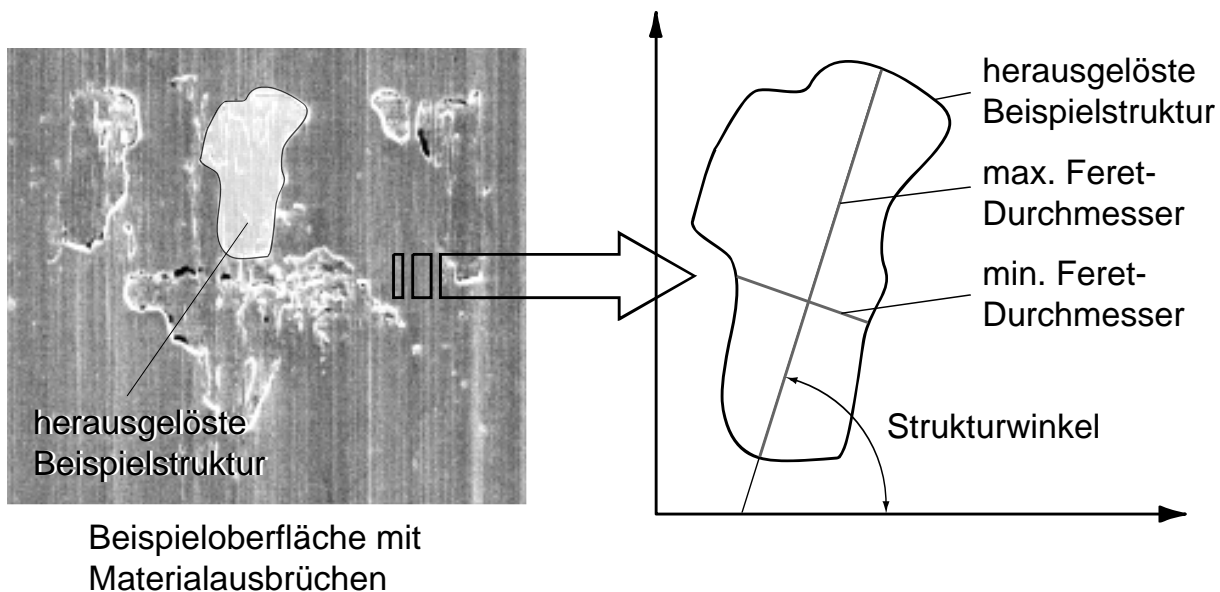
Von jedem dieser Objekte werden nun die größte und die kleinste Längenausdehnung bestimmt. Die geschieht anhand des so genannten Feret-Durchmessers. Dieser beschreibt die Länge der Projektion eines Objektes auf eine Koordinatenachse. Der maximale Feret-Durchmesser ist dementsprechend der maximale Abstand zweier Punkte des Objektes. Die Richtung dieser längsten Sehne ist gleichzeitig die Orientierungsrichtung des betrachteten Objektes. Mit einer weiteren Kenngröße, dem minimalen Feret-Durchmesser, kann somit das Objekt, in diesem Fall der Strukturanteil, beschrieben werden.

Zum einen gibt das Breiten-Längenverhältnis, auch Aspect-Ratio (AR) genannt, Aufschluss auf die Gestalt des jeweiligen Objekts (Riefe, Kratzer oder Lunker, Delle).

Zum anderen kann durch die Orientierungsrichtung des maximalen Feret-Durchmessers die Winkelorientierung des betrachteten Strukturobjektes ermittelt werden. Hierbei ist die Vertikale zur Wellenachse (Umfangsrichtung) als Bezugsachse mit Winkelorientierung 0° gesetzt. Die Strukturmerkmale und die unterschiedlichen Aspect-Ratio-Klassen sind in Bild 67 zusammengestellt.

Gewertet werden bis zu diesem Zeitpunkt alle Objekte, welche aus mindestens zwei zusammenhängenden Pixels bestehen. Problematisch bei dieser Vorgehensweise ist, dass die Anordnungsmöglichkeiten zusammenhängender Pixel geringer Anzahl beschränkt sind. So wird eine deutliche Häufung bei systematisch bedingten Winkelorientierungen von z.B. 45° oder $17,5^\circ$ beobachtet. Um Verfälschungen der Kennkurven für die zu beurteilenden Wellenoberflächen vermeiden zu können, wird für die Auswertung zunächst ein Filter verwendet, der Bereiche mit weniger als fünf bzw. zehn Pixeln unberücksichtigt lässt. Es zeigt sich jedoch, dass selbst bei Strukturen bestehend aus mehr als fünf Pixeln diese systematisch bedingten Häufungen (systembedingte Peaks) auftreten, Bild 68.

Die übrigen Strukturen werden abhängig vom verwendeten Schwellwert und Pixelanzahlfilter in absoluter Anzahl über der Winkelorientierung aufgetragen. Somit ergeben sich sechs unterschiedliche Kennkurven, welche die Häufigkeitsverteilung der Oberflächenstrukturen der jeweiligen Aspect-Ratio-Klassen in den jeweiligen Winkelorientierungen wiedergeben.



$$\text{Aspect Ratio (AR)} = \frac{\text{min. Feret-Durchmesser}}{\text{max. Feret-Durchmesser}}$$

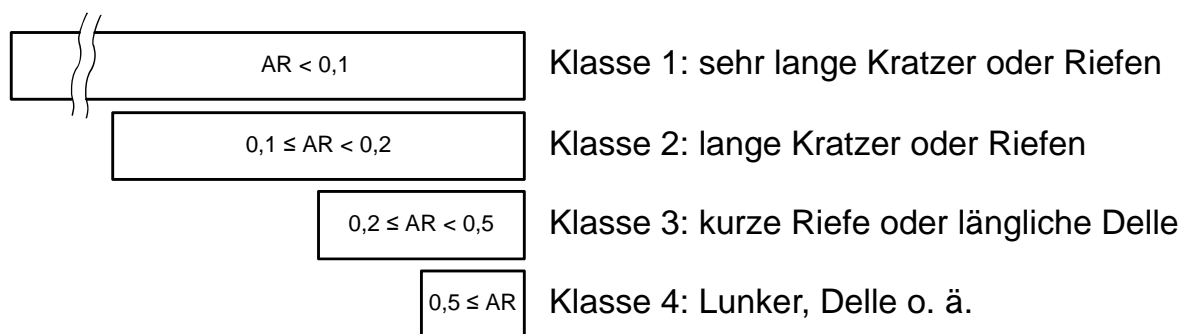


Bild 67: Kennzeichnende Strukturmerkmale, Bestimmung des Aspect-Ratio

Mit diesen werden die Wellenoberflächen beurteilt. Auf der eigens erstellten Benutzeroberfläche können die Kennkurven der unterschiedlichen Wellenoberflächen ausgewählt werden, und die Darstellung durch die y-Achsenkalierung angepasst werden. Bild 68 zeigt eine beispielhafte Darstellung der Benutzeroberfläche mit den sechs Kennkurven.

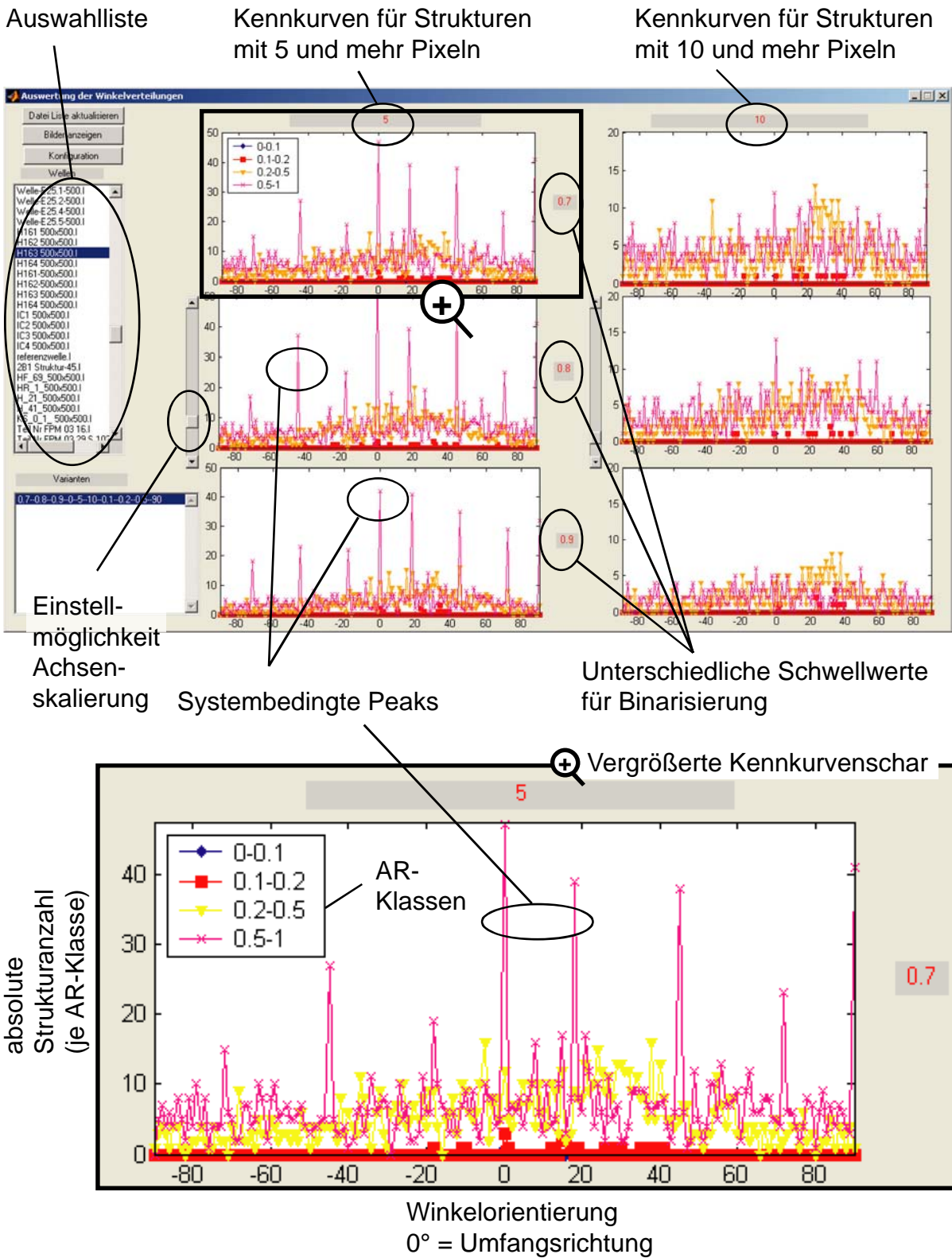


Bild 68: Benutzeroberfläche der Auswertesoftware mit Beispielauswertung einer im Einstich geschliffenen Wellenoberfläche bestehend aus sechs Kennkurvenscharen

Aufgrund der unterschiedlichen Häufigkeiten für die Darstellung von Strukturen mit mehr als fünf bzw. zehn Pixeln, kann erkannt werden, ob die Wellenoberfläche eher viele kleinere Strukturelemente aufweist, oder großflächige Strukturelemente dominieren (ein Pixel entspricht $1 \times 1 \mu\text{m}^2$).

Die einzelnen Kurven der vier AR-Klassen geben Aufschluss über die vorherrschende Strukturkategorie und die jeweilige Winkelorientierung der Strukturelemente. Die genaue Auswirkung von Strukturelementen der einzelnen AR-Klassen kann durch weiterführende Untersuchungen genauer festgestellt werden. Sind diese bekannt, kann durch die Einteilung der Strukturelemente in unterschiedliche AR-Klassen eine Gewichtung der verschiedenen Klassen abhängig von ihrer dichtungstechnischen Auswirkung durchgeführt werden.

5.2 Beispielauswertungen von repräsentativen Wellenoberflächen

Sämtliche in dieser Arbeit vorgestellten Wellenoberflächen wurden mit dem in Kapitel 3.1.6 beschriebenen FRT MicroProf[®] vermessen. Die Oberflächentopografien wurden entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet, um die charakteristischen Kennkurven der Oberflächenmikrostruktur zu erhalten. Die in Bild 68 dargestellte Beispielauswertung zeigt die charakteristischen Kennkurven für eine im Einstich geschliffene Wellenoberfläche.

Die Kennkurven dieser Wellenoberfläche zeigt eine ausgeglichene Häufigkeitsverteilung der auftretenden Strukturen über den gesamten Winkelbereich. Die Wellenoberfläche kann als quasi-isotrop bezeichnet werden. Eine derartige Oberfläche gilt als ideal für den Einsatz als Dichtringgegenauflfläche. Analog dazu stellen sich die charakteristischen Kennkurven der ohne axialen Vorschub hartgedrehten Wellenoberfläche dar, Bild 69. Es ist keine Häufung von Strukturanteilen in einer Vorzugsrichtung zu verzeichnen, lediglich eine sehr geringe Anzahl von umlaufenden Riefen, die von der Schneidenrauheit herrühren, ist festzustellen.

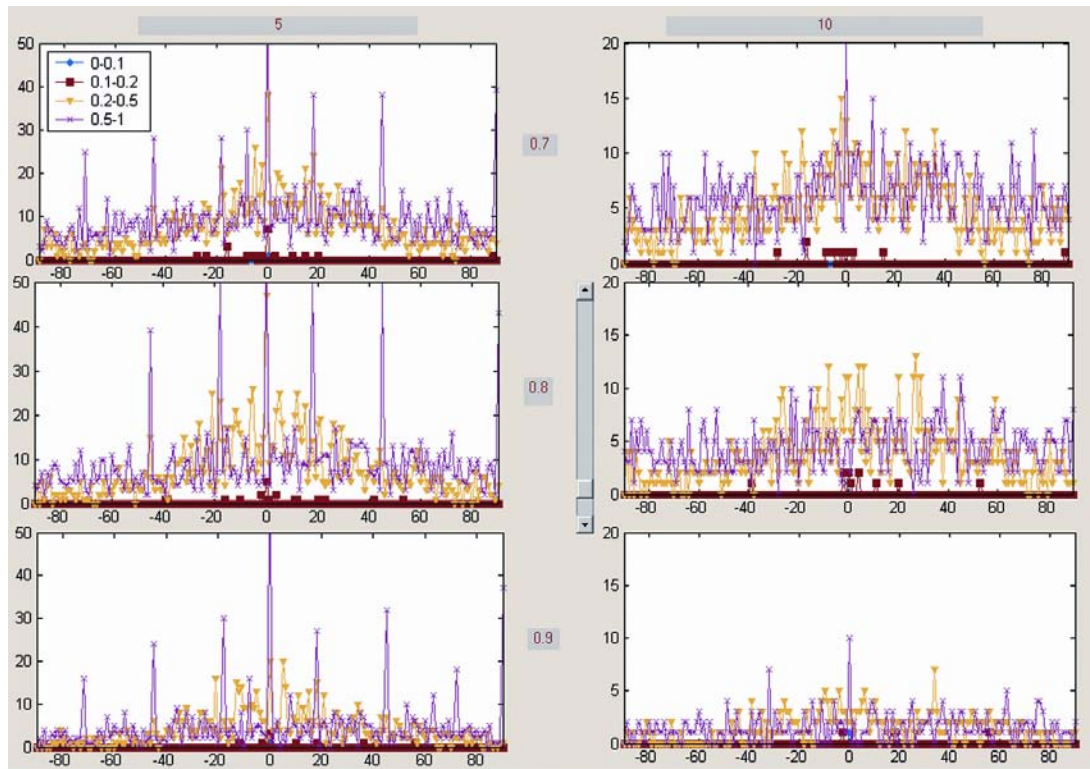


Bild 69: Beispielauswertung einer ohne axialen Vorschub hartgedrehten Wellenoberfläche

Bild 70 zeigt die beispielhafte Ausprägung der Kennkurven für eine längs-hartgedrehten Wellenoberfläche. Nach Filterung der Drehwendelstruktur ist bei dieser Wellenoberfläche in keiner der vier Aspect-Ratio-Klassen eine Vorzugsrichtung der Strukturen zu erkennen.

Die in Bild 71 dargestellten charakteristischen Kennkurven der längs-weichgedrehten Wellenoberfläche weist eine Häufung von länglichen Strukturen auf, die ihren Schwerpunkt in Umfangsrichtung hat. Die abweichend zu den mit ähnlichen Vorschubwerten gefertigten längs-hartgedrehten Wellenoberflächen vorhandenen Strukturen lassen auf grundlegende Unterschiede der Vorgänge beim Zerspanen und die sich somit ergebende Mikrostruktur auf den längs-weichgedrehten Wellenoberflächen schließen.

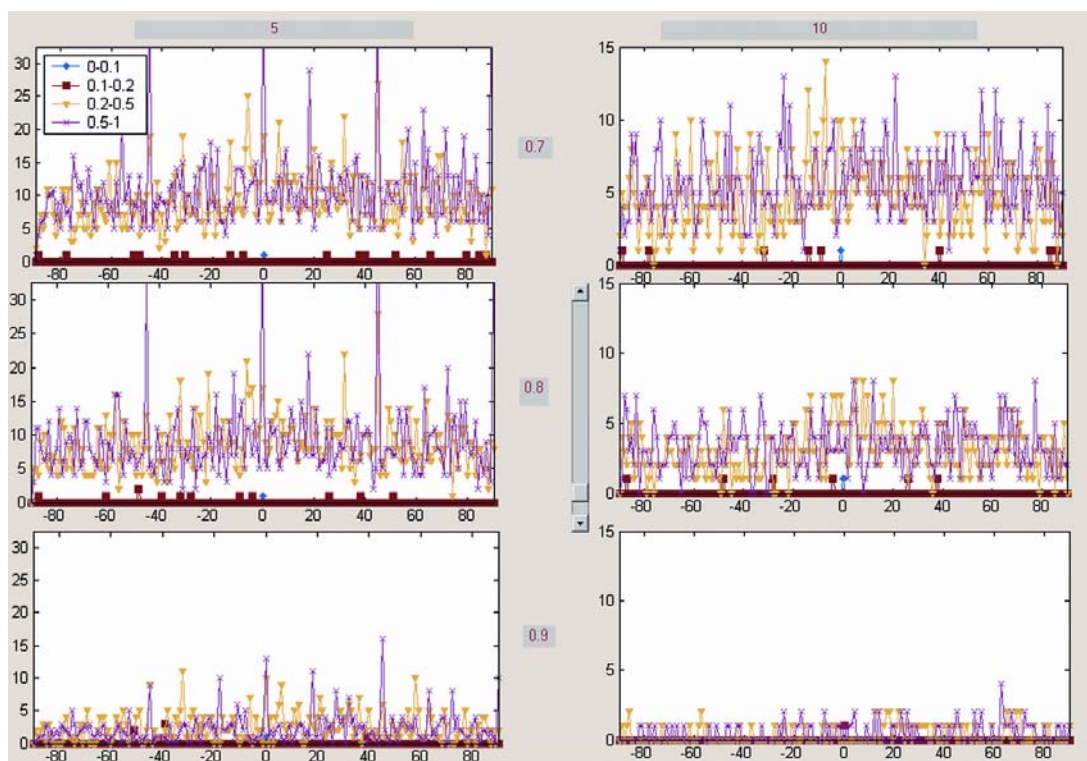


Bild 70: Beispielauswertung einer längs-hartgedrehten Wellenoberfläche

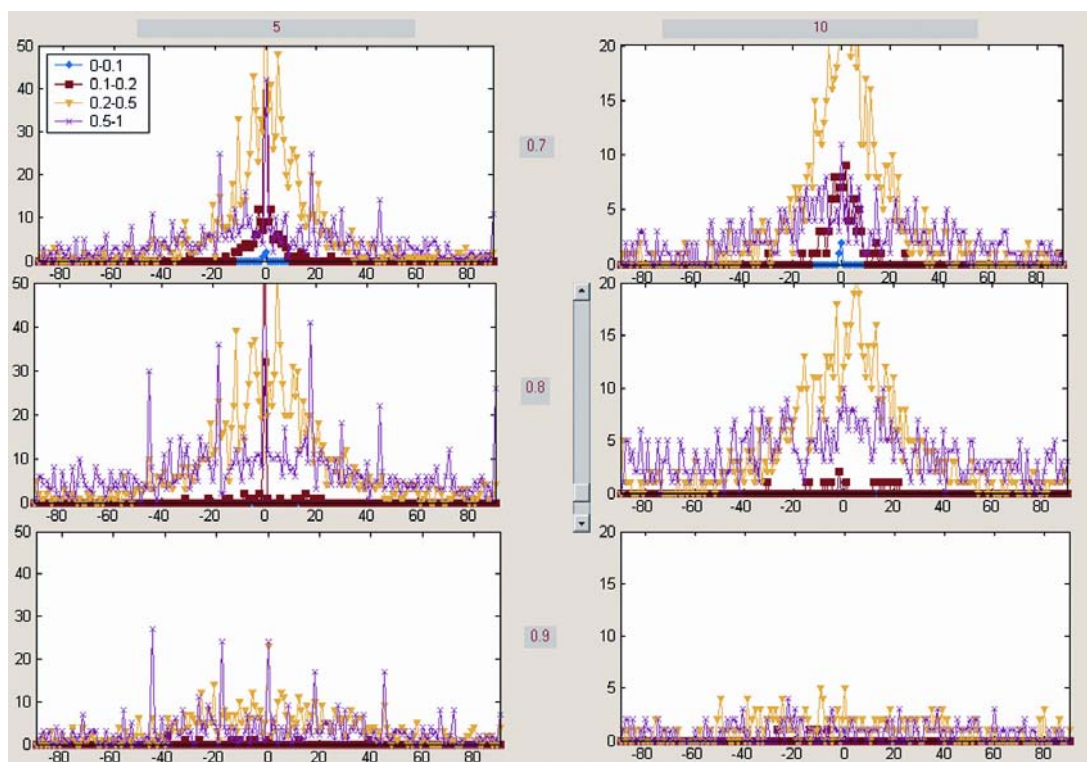


Bild 71: Beispielauswertung einer längs-weichgedrehten Wellenoberfläche

Die charakteristischen Kennkurven der durch Außenkurzhubhonen hergestellten Wellenoberflächen (Bild 72) zeigen eine deutliche Häufung der Strukturzahl im Bereich der so genannten Honwinkel. Entsprechend sind die Schwerpunkte der Häufung nahezu symmetrisch zur Umfangsrichtung verteilt.

Bild 73 zeigt die charakteristischen Kennkurven für die längs-hartgedrehte Wellenoberfläche mit einpolierten Mikrostrukturen. Deutlich ist die massive Häufung von Strukturen in einem sehr schmalen Band zu erkennen. Zusätzlich kann an der gleichmässigen Häufigkeitsverteilung der Strukturzahl über alle vier Aspect-Ratio-Klassen hinweg abgelesen werden, dass hier eine sehr deutlich ausgeprägte Strukturierung der Wellenoberfläche vorliegt. Diese Wellenoberfläche ist nach den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen als Gegenlauffläche für Radial-Wellendichtringe weitgehend ungeeignet.

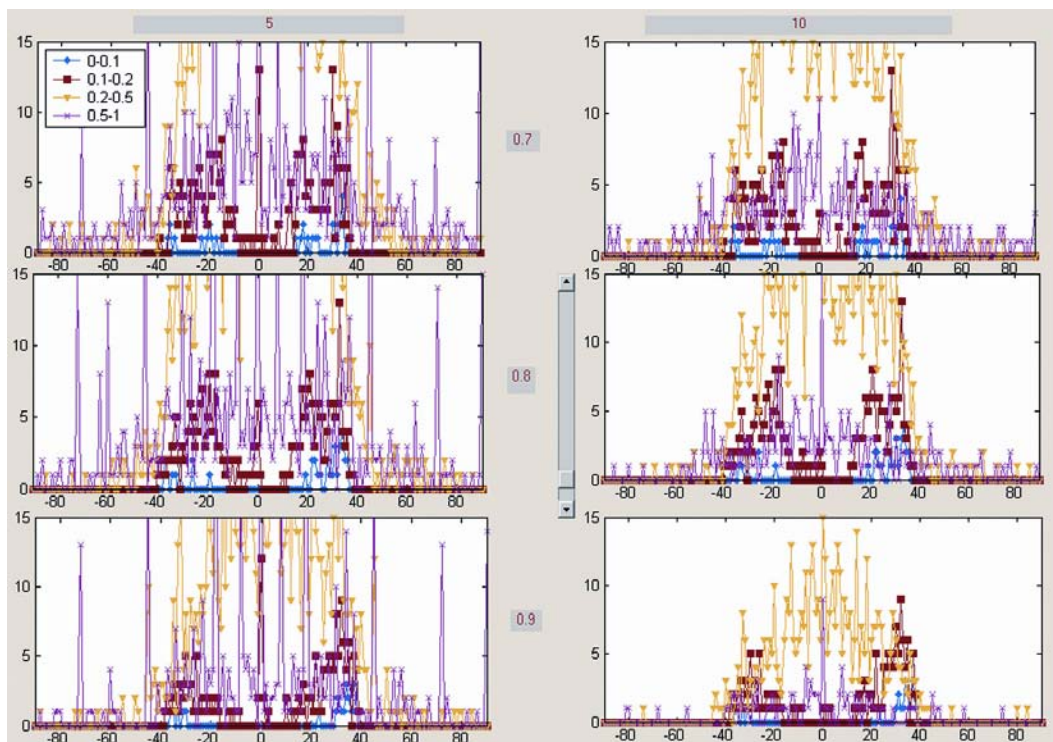


Bild 72: Beispielauswertung einer außenkurzhubgehonten Wellenoberfläche

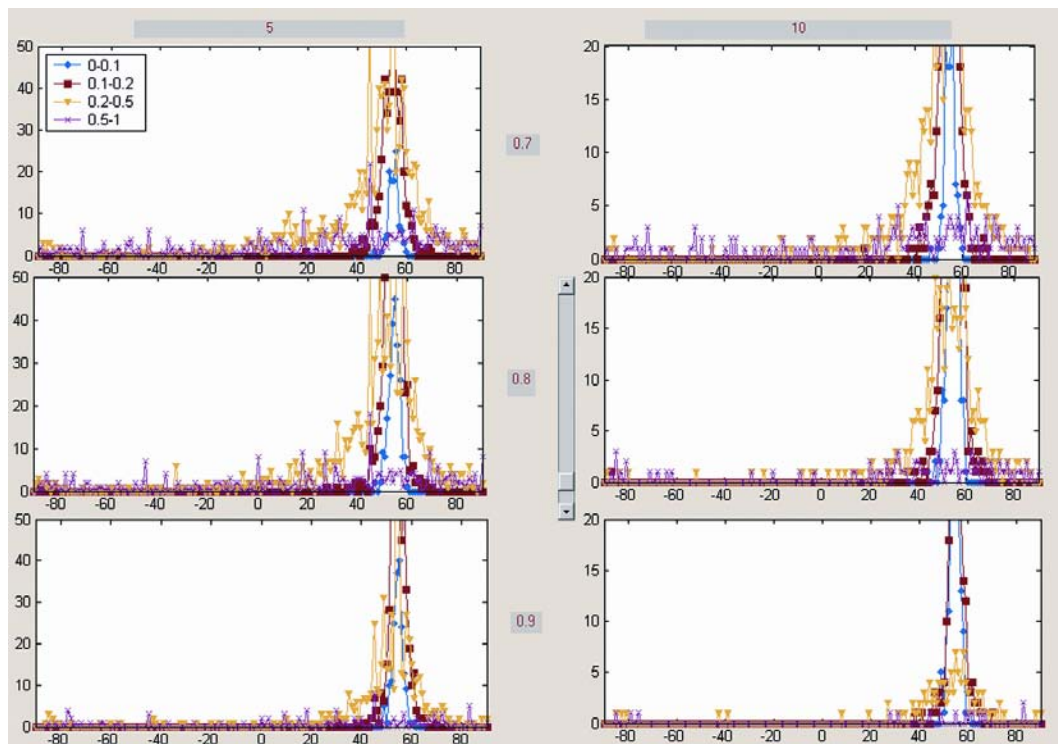


Bild 73: Beispielauswertung der längs-hartgedrehten Wellenoberfläche mit polierten Mikrostrukturen

5.3 Charakterisierung und Klassifizierung der Wellenoberflächen

Die Auswertung aller untersuchten Oberflächentopografien zeigt, dass die Kennkurven der Wellenoberflächen entsprechend der dargestellten Beispielauswertungen in vier prinzipiell unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden können.

Kategorie eins repräsentiert die Großzahl der untersuchten Wellenoberflächen. Die charakteristischen Kennkurven zeigen ein weitgehend ausgeglichenes Bild. Es gibt keine Aspect-Ratio-Klasse, welche bei einer bestimmten Winkelorientierung eine Häufung aufweist. Die dichtungstechnischen Untersuchungen dieser Wellenoberflächen haben kein auffälliges Verhalten hervor gebracht, der Einsatz als Dichtringgegenlauffläche kann bei diesen Wellenoberflächen empfohlen werden. Die im Einstich geschliffenen Wellenoberflächen sind in dieser Kategorie einzuordnen

Kategorie zwei ist ebenfalls durch eine Vielzahl der Wellenoberflächen repräsentiert. Die Kennkurven wiesen eine Häufigkeitsverteilung auf, die bei Winkeln um 90° ihren

Schwerpunkt hat. Die absolute Häufigkeit der Strukturen, die eine Pixelanzahl von zehn oder mehr Pixeln aufweisen, ist jedoch gering. Ein Grossteil der längsgedrehten Wellenoberflächen befindet sich in dieser Kategorie, und ist nach den durchgeführten Untersuchungen zum Einsatz als Dichtringgegenauflflächen geeignet.

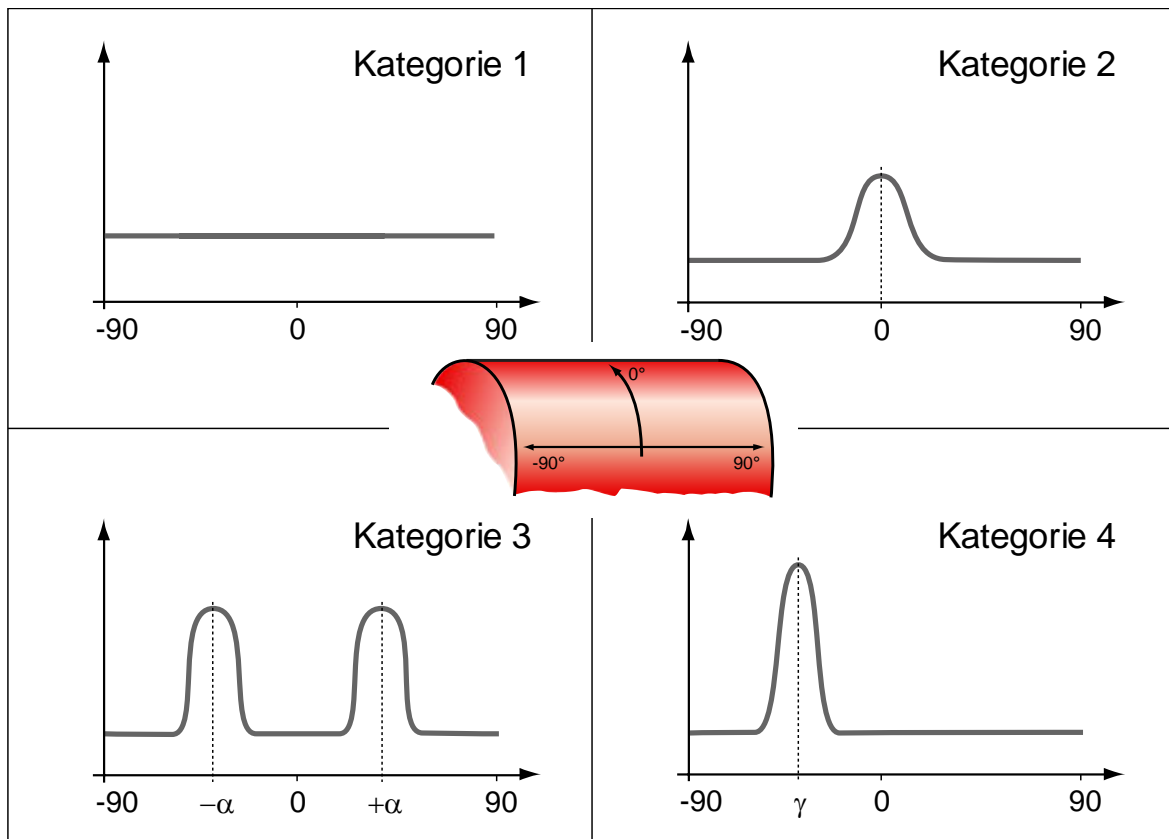


Bild 74: Kategorisierte charakteristische Kennkurven, schematisch

Kategorie drei enthält unter anderem die supergefinishten Wellenoberflächen. Die Kennkurven zeigen zwei Winkelorientierungsschwerpunkte der Oberflächenstrukturen. Typisch für diese Art der Oberflächenbearbeitung sind die entstehenden Kreuzriefen, die eine zu 90° nahezu symmetrische Winkelverteilung ergeben. Diese Wellenoberflächen erzeugen durch die erhöhte Förderaktivität einen sehr dicken Schmierfilm zwischen Dichtring und Wellenoberfläche. Bei exakt symmetrischer Verteilung der Strukturen bezüglich der Umfangsrichtung und identischen Häufigkeit der Strukturanteile würde man dabei eine richtungsneutrale Förderung erwarten. In der Realität sind jedoch geringe Abweichungen von diesem Idealfall zu erwarten, wodurch eine gerichtete Förderwirkung und somit ein großes Leckagerisiko entsteht. Als Dichtringgegen-

lauffläche sind derartige Wellenoberflächen aufgrund des hohen Risikos nicht oder nur eingeschränkt zu empfehlen. Aufgrund des sich ausbildenden dicken Schmierfilms zwischen Dichtring und Wellenoberfläche entsteht eine geringe Reibung im Dichtsystem.

Kategorie vier enthält Wellenoberflächen, die als Dichtringgegenlauffläche gänzlich ungeeignet sind. Die Anzahl der vorhandenen Mikrostrukturen ist groß. Die vorhandenen Strukturen sind hauptsächlich aus den Aspect-Ratio-Klassen eins und zwei, also lange Kratzer oder Riefen. Ein repräsentatives Beispiel stellt hier die Modellwelle mit polierten Mikrostrukturen dar. Diese Art der Oberflächenstrukturen führen zu einer sehr starken Förderaktivität der Wellenoberflächen und somit zu kritischen Betriebsbedingungen im Dichtsystem, unabhängig von der Drehrichtung (Mangelschmierung oder Leckage). Die charakteristischen Kennkurven der jeweiligen Kategorien sind in Bild 74 skizziert.

Durch Erfahrungswerte kann mit dieser Klassifizierungsmethode eine seitens des Dichtverhaltens unbekannte Wellenoberfläche in kurzer Zeit eingeordnet werden. Zeigen die charakteristischen Kennkurven bereits, dass eine Wellenoberfläche einer kritischen Kategorie vorliegt, ist eine weitere Untersuchung oder der Einsatz als Dichtringgegenlauffläche nicht weiter sinnvoll.

Kritische Betrachtung / Diskussion

Die vorgestellte Vorgehensweise zur Auswertung und Qualifizierung von Wellenoberflächen bzw. deren Oberflächentopografie stellt einen entscheidenden Schritt dar, die umfangreiche Problematik der dichtungstechnisch relevanten Beschreibung von Wellenoberflächen zu bearbeiten. Es steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die 3D-Oberflächencharakteristik von Wellenoberflächen aus dichtungstechnischer Sichtweise quantifizierbar gemacht werden kann. Seitens des Anwenders dieser Methodik wird noch ein hohes Maß an Fachkenntnis und auch Hintergrundwissen hinsichtlich der dichtungstechnischen Zusammenhänge vorausgesetzt.

Weitere Untersuchungen, die zu mehr Erfahrung und auch spezifischem Wissen für die Einordnung der verschiedenen Oberflächenausprägungen und dem sich ergebenden

„Fingerabdrucks“ der Wellenoberfläche in Gestalt der charakteristischen Kennkurven ist unabdingbar, um daraus ein in der Breite anwendbares Werkzeug gestalten zu können. Die Grenzen zwischen dichtungstechnisch wirksamer und somit relevanten, und dichtungstechnisch uninteressanten Oberflächenstrukturen müssen systematisch ergründet werden. Dazu müssen künftig vor allem Wellenoberflächen untersucht werden, die im Betrieb Leckage hervorgerufen haben. Eine möglichst umfassende Kenntnis von dichtungstechnisch „schädlichen“ Oberflächenstrukturen und der jeweiligen charakteristischen Merkmale ermöglicht eine sichere Klassifizierung von Wellenoberflächen.

Die vorgestellte Methode kann jedoch aufgrund der Messdatengewinnung keine Oberflächenstrukturen, welche sich über den gesamten Umfang der Wellenoberfläche ausdehnen, erfassen. Diese würden bestenfalls als durchgehende Struktur mit entsprechend kleinem Aspect-Ratio erfasst werden. Hier könnte eine Erweiterung der Klasseinteilung sinnvoll sein, kombiniert mit mehreren am Umfang verteilten Messungen.

Der allseits artikulierte Wunsch nach einem „einzigem“ aussagekräftigen Kennwert zur Beurteilung von Wellenoberflächen als Gegenauflfläche von Radial-Wellendichtringen ist somit nach wie vor nicht erfüllt. Jedoch könnte z.B. in Kombination mit der Drallmessung eine geringe Zahl von signifikanten Kennwerten festgelegt werden, um künftig die dichtungstechnische Eignung von Wellenoberflächen zu beschreiben.

6 Bedeutung für die Praxis – Anwendung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die erzielten Erkenntnisse auf die praktische Anwendung übertragen werden.

6.1 Allgemeine Erkenntnis der durchgeführten Untersuchungen

Um alternative Fertigungsverfahren zur Herstellung von Wellenoberflächen zum Einsatz als Gegenauflage in Radial-Wellendichtungen zu qualifizieren wurden über 400, vor allem mit unterschiedlichen Drehverfahren, hergestellten Wellenoberflächen untersucht. Nahezu alle haben sich als geeignet erwiesen.

Zur Eignungsbeurteilung der einzelnen Wellenoberflächen wurde der Förderwert der Wellenoberfläche gemessen, in unterschiedlichen Dichtheitsversuchen der Einfluss der Wellenoberflächen auf die Veränderung und den Verschleiß im Dichtsystem festgestellt und der Verlauf der Fördereigenschaft des gesamten Dichtsystems erfasst. Die einzelnen, zum Teil vom Verfasser entwickelten, Verfahren sind mit unterschiedlichem Anspruch an die Versuchseinrichtung, das Wissen und die Erfahrung des Durchführenden und auch die zur Durchführung der Untersuchung benötigten Zeit belegt.

Mit der Förderwertmessung der Wellenoberfläche kann mit relativ geringem Zeitaufwand die untersuchte Wellenoberfläche hinsichtlich der grundsätzlichen Eignung eingeordnet werden. Es zeigte sich, dass die untersuchten Wellenoberflächen ausnahmslos eine, wenn auch größtenteils nur geringe, Förderung aufweisen. Ein Dichtsystem ist solange dicht, wie die Dichtringförderung in der Lage ist, den durch die Wellenförderung entstehenden Leakagestrom zu kompensieren. Anhand der ebenfalls ermittelten Dichtringförderwerte können – für die hier verwendete Dichtring- und Durchmesserkombination – Wellenoberflächen mit Förderwerten kleiner als 1,0 g/h als unkritisch bezeichnet werden. Die von diesen Wellenoberflächen hervorgerufenen Leakageströ-

me können von den qualitativ hochwertigen Dichtringen ausreichend sicher kompensiert werden.

Die Dichtheitsuntersuchungen erlauben, nach der absolvierten Laufzeit, eine Beurteilung der eingesetzten Bestandteile im Dichtsystem. Dichtheit, Verschleiß und Alterung der Systemkomponenten kann beobachtet werden. Die untersuchten Dichtsysteme mit alternativ gefertigten Wellenoberflächen waren dicht.

Durch die aufwändige Beobachtung des Systemförderwerts im Betrieb können detailliert die Auswirkungen einzelner Systemkomponenten auf das Betriebsverhalten beobachtet werden. Hier wurde die in der Literatur bereits beschriebene Konditionierung des Dichtrings im Dichtsystem abhängig von den beteiligten Systemkomponenten erneut bestätigt. Der Verlauf der Systemförderung zeigte überwiegend, dass die Systemförderung mit fortschreitender Betriebsdauer rückläufig ist. Das Anfangsniveau der Systemförderung, welches eine Aussage über die Dichtreserve eines Dichtsystems erlaubt, ist unabhängig von der Drehrichtung und kann auf identisch hergestellten Wellenoberflächen unterschiedlich ausfallen. Eine Prognose über die Entwicklung des Systemförderwerts und somit der Lebensdauer kann durch Extrapolation abgegeben werden.

Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse können die folgenden Aussagen hervorgehoben werden:

- Abdichten auf gedrehten Wellenoberflächen ist problemlos möglich
- Nicht gehärtete Wellenoberflächen sind ebenfalls als Gegenlauffläche von RWDR geeignet
- Die „Feinstruktur“ der Wellenoberfläche ist verglichen mit der „Grobstruktur“ (z.B. Drehwendel) wesentlich für die dichtungstechnischen Eigenschaften
- Das Dichtvermögen des Dichtrings ändert sich über die Lebensdauer – Konditionierung und Alterung sind messbar
- Rauheitskennwerte – vor allem in Achsrichtung ermittelt – sind nicht aussagefähig hinsichtlich der dichtungstechnischen Eigenschaften von Wellenoberflächen

6.2 Verfahren zur Qualifizierung von Wellenoberflächen als Gegenlauf- fläche von Radial-Wellendichtringen

Die vorgestellten Untersuchungen und die neu entwickelte Auswertemethode der Oberflächentopografie (Kapitel 5.1) werden zu einem Qualifizierungsverfahren zusammengefasst. Dadurch können beliebige Wellenoberflächen beurteilt werden. Um ein bislang unerprobtes Fertigungsverfahren zur Herstellung von Gegenlaufflächen von Radial-Wellendichtringen zu qualifizieren, können die im Folgenden vorgestellten Schritte abgearbeitet werden. In Bild 75 ist die Vorgehensweise in einem Ablaufdiagramm dargestellt.

Da eine umfassende und vollständige Untersuchung sehr zeit- und anlagenintensiv ist, wurde auf eine strategisch günstige Vorgehensweise Wert gelegt. Hierbei steigt der zeitliche und versuchstechnische Aufwand, gleichzusetzen mit dem entsprechenden Kostenaufwand, mit jeder „bestandenen“ Untersuchung. Die Aussage hinsichtlich der Eignung der untersuchten Wellenoberfläche wird ebenfalls mit jedem „bestandenen“ Test sicherer.

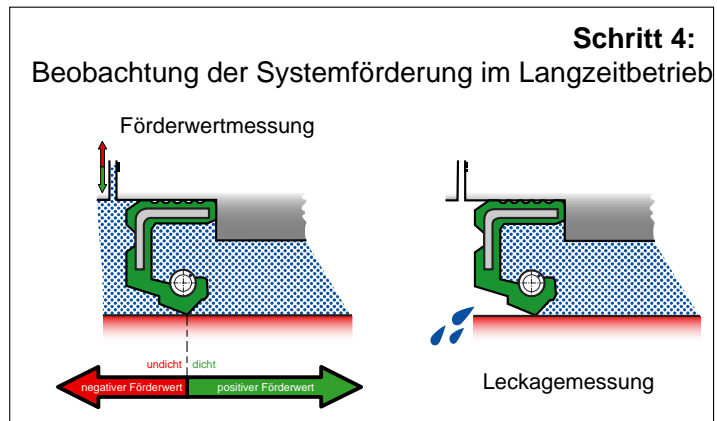
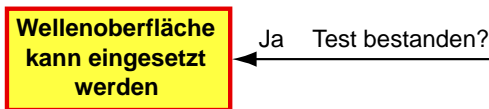
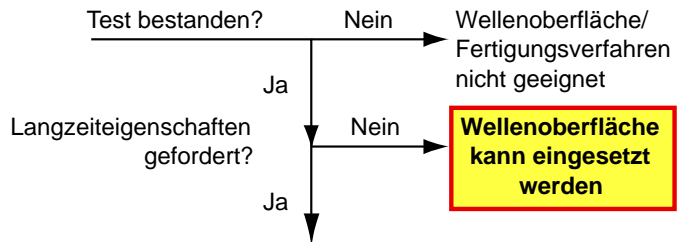
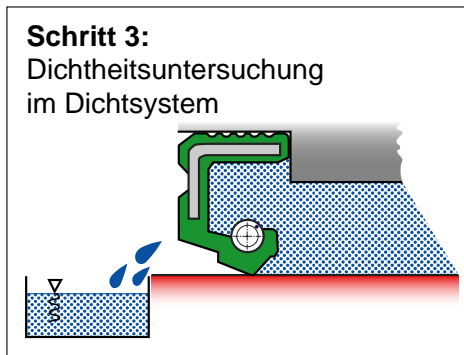
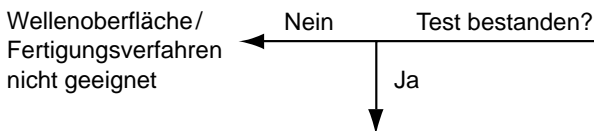
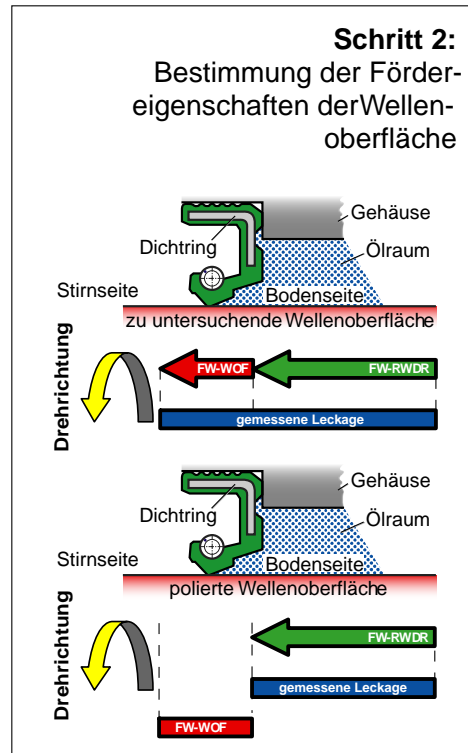
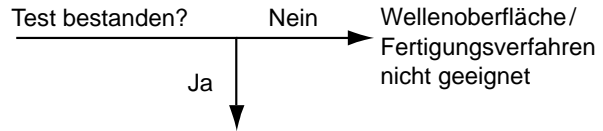
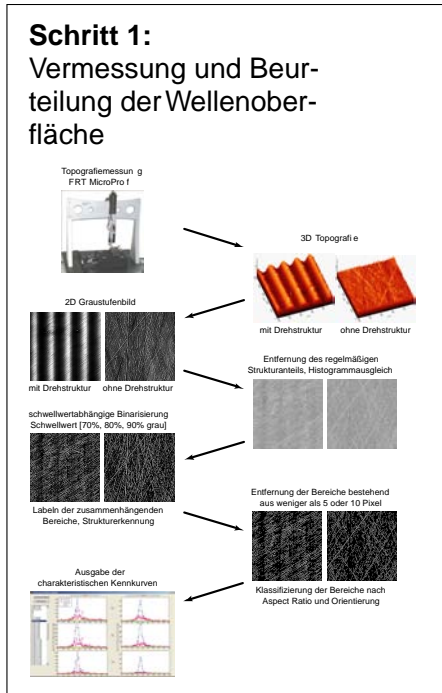


Bild 75: Schema zur Vorgehensweise bei der Qualifizierung einer Wellenoberfläche

Diese Vorgehensweise bietet eine Alternative zu der reinen Absicherung durch Dichtheitsuntersuchungen („Freigabetests“), wie sie z.B. in den entsprechenden Normen vorgeschlagen sind. Dadurch kann der Versuchsaufwand gezielter eingesetzt, und so ein weiteres Feld an in Frage kommenden Wellenoberflächen untersucht werden. Allerdings erfordert diese Vorgehensweise ein erhöhtes Maß an Wissen und Verständnis im Hinblick auf das System Radial-Wellendichtung. Ebenso ist eine umfangreiche Ausstattung seitens der Messtechnik und der Versuchseinrichtungen erforderlich.

6.2.1 Vermessung und Beurteilung der Wellenoberflächentopographie

Der erste Schritt bei der Qualifizierung einer beliebigen Wellenoberfläche stellt die Topografiemessung und Auswertung nach der in Kapitel 5.1 beschriebenen Methode dar. Dadurch können prinzipiell ungeeignete Wellenoberflächen, die beispielsweise charakteristische Kennkurven der Kategorie drei oder vier aufweisen, bereits ausgeschlossen werden. Der Aufwand ist bis zu diesem Zeitpunkt mit ca. 45 min je untersuchter Wellenoberfläche relativ gering. Somit können auch breit angelegte Untersuchungen von unterschiedlichen Fertigungsparametern, Fertigungseinrichtungen oder Werkstoffen erfolgen.

6.2.2 Bestimmung der Fördereigenschaften der Wellenoberfläche

Spricht nach der Auswertung der Oberflächentopografie nichts gegen die Eignung der Wellenoberfläche, so kann der nächste Schritt der Untersuchungen erfolgen. Durch die Bestimmung der Fördereigenschaften der Wellenoberfläche kann deren Einfluss im Dichtsystem Radial-Wellendichtung abgeschätzt werden. Durch den Vergleich mit bereits positiv erprobten Wellenoberflächen erhält man zusätzliche Sicherheit. Die generellen Kriterien bei der Beurteilung der Fördereigenschaften der Wellenoberfläche ist der Betrag und die Richtung der Förderung, sowie die Variationsbreite bei Untersuchung von mehreren Wellenoberflächen gleicher Machart.

Die Untersuchung von mehreren Exemplaren ist im Sinne der statistischen Absicherung der Ergebnisse unumgänglich, da die Messwerte stark streuen. Dadurch ergibt

sich in diesem Stadium der Qualifizierung ein bereits gehobener Aufwand (ca. 3-4 Tage je Wellenoberfläche) seitens der durchzuführenden Untersuchungen.

6.2.3 Dichtheitsuntersuchung im Dichtsystem

Wird auch die Förderwertuntersuchung mit positivem Ergebnis abgeschlossen, erfolgt eine erste Untersuchung des Dichtverhaltens der Wellenoberfläche im Dichtsystem. hierzu wird eine 240 Stunden Dichtheitsuntersuchung mit Leckageerfassung durchgeführt. Besonders wichtig ist hier wiederum die statistische Absicherung der Ergebnisse. Ratsam ist die Untersuchung von mindestens sechs Dichtsystemen mit identisch gefertigter Wellenoberfläche.

Für Anwendungen mit geringen Anforderungen seitens der Lebensdauer kann nach erfolgreichem Abschluss dieser Untersuchung bereits eine ausreichend sichere Einsatztauglichkeit attestiert werden.

6.2.4 Beobachtung der Systemförderung im Langzeitbetrieb

Um Aufschluss über die Langzeiteigenschaften des Dichtsystems zu erhalten, wird die abschließende Beobachtung der Systemförderung im Verlauf einer Langzeit-Dichtheitsuntersuchung von ca. 1.000 bis 1.500 Stunden Dauer durchgeführt. Dabei sind die Höhe und der Verlauf der Systemförderung sowie ebenfalls die Variationsbreite der Förderwertverläufe zwischen mehreren Exemplaren der untersuchten Wellenoberfläche von Bedeutung. Anhand dieser Untersuchung kann, bei positivem Ergebnis, dem Dichtsystem die für geforderte lange Standzeiten nötige Dichtsicherheit bescheinigt werden.

Durch diese Methode können unter Umständen sehr lange Dichtheitsuntersuchungen mit Laufzeiten von bis zu 10.000 Stunden vermieden werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Für ein zuverlässig funktionierendes Dichtsystem Radial-Wellendichtung ist die Wellenoberfläche von entscheidender Bedeutung. Als tribologischer Partner des Dicht-rings ist die Wellenoberfläche direkt durch die gegebenenfalls vorhandene Eigenförde-rung und indirekt durch die Beeinflussung der Dichtringförderung für die Gesamtfunk-tion ausschlaggebend. Dieser Bedeutung wird durch strenge Vorgaben hinsichtlich der Herstellung und Ausprägung der Wellenoberfläche in den gültigen Normen Rechnung getragen.

Kostenreduktion und Prozessoptimierung erfordern Alternativen zu dem Jahrzehnte alte Fertigungsverfahren für Wellenoberflächen härten und im Einstich schleifen. Im Rahmen dieser Arbeit sollten einerseits in Frage kommende alternative Wellenoberflä-chen untersucht werden, und andererseits eine Vorgehensweise entwickelt werden, mit der entsprechende Wellenoberflächen hinsichtlich ihrer Eignung als Gegenlauffläche für Radial-Wellendichtringe erprobt und beurteilt werden können.

Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine vierstufige Vorgehensweise entwickelt. Ausgehend von der berührungslos optisch vermessenen 3D-Oberflächentopografie werden dabei für die vorliegende Wellenoberfläche anhand eines auf der Bildverarbei-tung beruhenden Verfahrens charakteristische Kennkurven ermittelt. Anhand dieser Kennkurven kann die Oberflächenstruktur beurteilt, und durch typische Merkmale klassifiziert werden.

Im zweiten Schritt wird der Förderwert der Wellenoberflächen in beiden Drehrichtun-gen gemessen. Gilt die untersuchte Wellenoberfläche weiterhin als geeignet, wird im dritten Schritt ein erster Funktionstest im Dichtsystem durchgeführt.

Im vierten und letzten Schritt wird die Funktionalität des Dichtsystems über einen län-geren Zeitraum beobachtet, um die Langzeiteigenschaften abzusichern. Dazu wird die vom Autor entwickelte modifizierte Zweikammermethode eingesetzt. Durch die Mes-

sung des Systemförderwerts in regelmäßigen Abständen, kann dessen Veränderung und somit die Veränderung der Dichtfunktion im Betrieb vermessen werden. Die eingesetzte Wellenoberfläche, aber auch alle übrigen Systemkomponenten können so hinsichtlich der Auswirkung auf die Dichtfunktion und Langzeiteigenschaften beurteilt werden. Dadurch sind künftig weitreichende Untersuchungen am Dichtsystem mit der Option, in das Dichtsystem „hineinzublicken“, möglich.

Der Schwerpunkt der so untersuchten alternativen Fertigungsverfahren lag im Bereich der Drehverfahren. Es wurden Parameterstudien für längsgedrehte Wellenoberflächen unter Verwendung von ungehärteten und gehärteten Werkstoffen durchgeführt. Variiert wurde: Vorschub, Schneidenradius, Einfluss von Maschinen- bzw. Werkzeug-schwingungen und Schneidenverschleiß. Zusätzlich wurden Nachbearbeitungsverfahren und Drehverfahren ohne axialen Vorschub, wie das Tangentialdrehen und das Drehen im Einstich untersucht.

Grundsätzlich sind die längsgedrehten Wellenoberflächen, hart oder weich, als Gegenlauffläche für Radial-Wellendichtringe geeignet. Speziell die längs-hartgedrehten Wellenoberflächen zeigen kein drehrichtungsabhängiges Förderverhalten und geringe Förderwerte. Die längs-weichgedrehten Wellenoberflächen zeigen ein teilweise von der Drehrichtung abhängiges Förderverhalten, welches jedoch keine negativen Auswirkungen auf das Dichtverhalten hatte.

Auch die ohne axialen Vorschub hartgedrehten Wellenoberflächen sind geeignet, wobei die sehr „glatten“ Oberflächen zu geringen Förderwerten der Wellenoberfläche und des Dichtrings führen. Die durch Bandfinishen oder Kurzhubhonen hervorgerufenen, sehr feinen und meist schräg zur Wellenachse gerichteten, Riefenstrukturen sind äußerst förderintensiv. Sie können zu großer Leckage oder ungünstigen Schmierungsbedingungen im Dichtsystem führen. Diese Verfahren sind damit keine taugliche Alternative.

Die makroskopische Drehwendel hat offensichtlich keinen Einfluss auf die Fördereigenschaft der Wellenoberfläche, eingebrachte Mikrostrukturen jedoch zeigen einen erheblichen Einfluss. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Fördereigenschaften der Wellenoberfläche fast ausschließlich von deren „Mikrostruktur“ bestimmt werden, die

größenordnungsmäßig deutlich unterhalb z.B. einer Drehwendel (Steigung ca. 0,05 bis 0,3 mm) liegt.

Anhand der hier vorgestellten Vorgehensweise können beliebige Wellenoberflächen dichtungstechnisch geprüft und beurteilt werden. Künftig ist eine direkte Kennwertbildung aus den vorliegenden charakteristischen Kennkurven denkbar. Zur Verbesserung der Aussagemöglichkeiten sind weitere Erfahrungswerte hinsichtlich der Auswirkungen bestimmter Oberflächenstrukturen, Ausprägungen (z.B. Breiten-Längenverhältnis) etc. nötig. Dazu bietet unter anderem die Beobachtung des Systemförderwerts im Betrieb weitreichende Untersuchungsmöglichkeiten.

Die direkte Auswertung der Topografiedaten und eine universelle, nicht gezielt auf Drehstrukturen ausgelegte, flächige Filterung der Ausgangsoberfläche erscheint sinnvoll. Dadurch könnte die Auflösung in Tiefenrichtung verbessert und vereinheitlicht werden. Durch weiterführende Forschungsarbeiten sollte die Grenze zwischen relevanten Mikrostrukturen und uninteressanten Makrostrukturen genauer definiert werden.

8 Literatur

- /1/ Müller H. K.: Abdichtung bewegter Maschinenteile. Medien-Verlag U. Müller, 1990.
- /2/ Kammüller, M.: Zur Abdichtwirkung von Radial-Wellendichtringen. Dissertation am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart 1986.
- /3/ Müller, H. K. et al.: www.fachwissen-dichtungstechnik.de .
- /4/ Deutsches Institut für Normung DIN 3760.
- /5/ Deutsches Institut für Normung DIN 3761.
- /6/ Deutsches Institut für Normung DIN 4760.
- /7/ Rometsch, R.; Letzner, R.-D.: Rauheitsmessung – Theorie und Praxis. Firmenpublikation der Hommelwerke GmbH, 1993.
- /8/ Kersten, G.: Optische und antastende Prüfung der Gegenlaufläche von Radial-Wellendichtringen. Dissertation Universität Hannover, VDI Verlag 1992.
- /9/ Ruhl, C.: Ein Beitrag zur Wirkungsweise von Radialwellendichtringen unter Berücksichtigung von Rauheitsinduzierter Hydrodynamik und radialen Verlagerungen der Gegenlaufläche. Dissertation, Uni Kaiserslautern, 2001.
- /10/ Rau, N.; Seibold, M.: Drallstrukturen geschliffener Dichtflächen beurteilen. Werkstatt und Betrieb Nr. 11, 1997.
- /11/ Rau, N; Seibold, M; Kruppke, V.: Drallstrukturen geschliffener Dichtflächen beurteilen. Tagungsband, 11th International Sealing Conference Dresden, 1992.
- /12/ Rau, N; Seibold, M; Kruppke, V.: Messtechnische Beobachtungen zum Funktionsverhalten von gedrehten Dichtflächen. Tagungsband, 13th International Sealing Conference Stuttgart, 5. + 6. Oktober 2004.

- /13/ Schneider, J.; Schreiber, L.: Mit dem Tangentialdrehen zu drallfreien Oberflächen., Werkstatt und Betrieb Nr.6, 2002.
- /14/ Schibisch, D. M.; Friedrich, U.: Superfinish-Technologie: Feinste Oberflächen für höchste Präzision. Verlag Moderne Industrie, 2001.
- /15/ Symons, J. D.: Elastohydrodynamic Sealing Systems. SAE Technical Paper Series, Paper 730049, 1973.
- /16/ Jenisch, B.: Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen. Dissertation am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart 1991.
- /17/ Kawahara, Y.; Hirabayashi, H.: A Study of Sealing Phenomena on Oil Seals. ASLE Transactions, Vol. 22-1, pp. 46-55, 1979.
- /18/ Fritzsche, R.: Ein Beitrag zur Untersuchung des Verhaltens von Radial-Wellendichtringen aus Elastomer- und Polytetrafluoräthylen-Material bei speziellen Betriebsbedingungen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994.
- /19/ Hermann, W.; Seffler, H. W.: Neue Erkenntnisse für den Abdichtmechanismus von Radial-Wellendichtringen. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 87 (1985) 9, S. 475-484.
- /20/ Les Horve, A.: Shaft seals for dynamic applications. New York: Dekker, 1996.
- /21/ Ott, G. W.: Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibungsverhalten von Radialwellendichtringen. Dissertation am Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1983.
- /22/ Rajakovics, G. E.: On the sealing Mechanism of Fluid Seals. 5th international Conference on Fluid Sealing, Warwick, Paper A6, BHRA, Cranfield, pp. 49-61, 1971.

- /23/ Britz, S.: Ein Beitrag zur Erfassung der Funktionsprinzipien dynamischer Wellendichtungen unter besonderer Berücksichtigung des Radialwellendichtungs. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1988.
- /24/ Krautzig, J.: Auslegung konzentrischer Gewindewellendichtungen bei laminarer Strömung und konstanter Viskosität. Dissertation, ETH Zürich, 1985.
- /25/ Heitel, K.: Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellen-Dichtungen im laminaren Bereich. Berichte aus dem Institut A für Maschinenelemente, Dissertation, Universität Stuttgart, 1977.
- /26/ Raab, H.; Haas, W.: Wellenlaufflächen. Einfluss der Wellenlauffläche auf das Dichtverhalten von Radial- Wellendichtungen. Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., Vorhaben Nr. 211, Heft Nr. 239, 1998.
- /27/ Kunstfeld, T.; Haas, W.: Erfassung und Beschreibung von Wellenoberflächenstrukturen aus der zeitgemäßen und zukünftigen Fertigung und deren Einfluss auf die Dichtqualität von Radial-Wellendichtungen. Abschlussbericht. FKM Forschungshefte Nr. 279, Frankfurt 2004.
- /28/ Vogt, R.; Metzner, H.: Bearbeitung von Wellenoberflächen für Radialwellendichtungen. Firmenschrift Freudenberg, 1997.
- /29/ Bodschwinn, H.: Rauheitsmessung zur Bewertung der Funktionseigenschaften technischer Oberflächen; Prüfen und Bewerten von Oberflächenschutzschichten, VDI-Gesellschaft für Werkstofftechnik, 1988, Seite 165 – 182.
- /30/ Jagger, E. T.: Rotary Shaft Seals: The sealing mechanism of synthetic rubber seals running at atmospheric pressure. Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 171, No. 18, 1957.
- /31/ Jagger, E. T.: Study of lubrication of synthetic rubber rotary shaft seals. Proceedings of the Conference on Lubrication and Wear, Paper 93, pp. 409-415, 1957.
- /32/ Jagger, E. T.; Wallace, D.: Further experiments on the sealing mechanism of a synthetic rubber lip type seal operating on a rotary shaft. Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 187, No. 29, 1973.

- /33/ N. N.: CR Dichtungen, Firmenkatalog der Firma CR Industries, Katalog Nr. 4006 T, 1995.
- /34/ N. N.: Radia-Wellendichtringe. Firmenkatalog der Firma Kaco GmbH + Co Dichtungswerke, 1998.
- /35/ Buhl, S.: Ermittlung von Kennwerten zur Beurteilung der Topographie technischer Oberflächen insbesondere hinsichtlich deren Reibungs-, Verschleiß- und Dichtverhalten. Abschlussbericht Teil 2, FVA Forschungsheft Nr. 667, 2002.
- /36/ Kunstfeld, T.; Haas, W.: Standzeitprognose durch Förderwertmessung während Langzeitversuchen. Tagungsband V. Hamburger Dichtungstechnisches Kolloquium Dynamische Dichtungen, 3. + 4. Juni 2004.
- /37/ Kunstfeld, T; Haas, W.: Zuverlässig abdichten mit Radial- Wellendichtringen: alternative Fertigungsverfahren zur Herstellung von Wellenauflflächen. Tagungsband, 13th International Sealing Conference Stuttgart, 5. + 6. Oktober 2004.
- /38/ Demant, C.; Streicher-Abel, B.; Waszkewitz, P.: Industrielle Bildverarbeitung. Springer Verlag , 2002.
- /39/ The MathWorks Inc.: Image Processing Toolbox User's Guide, 2003.
- /40/ Stadler, R; Vogt, R.: Dichtungs- und Verschleißverhalten von Simmerringen unter besonderer Berücksichtigung der Wellenoberflächentopographie. Tagungsband GFT Tagung Göttingen, 2000.
- /41/ Hoepke, Erich; 5 Mitautoren: Dichtungstechnik mit gummielastischen Dichtungen und Formteilen im Fahrzeug- und Maschinenbau. Expert Verlag, 2000.
- /42/ Kunstfeld, T; Haas, W.: Shaft Surface Manufacturing Methods for Rotary Shaft Lip Seals. Sealing Technology – An International Newsletter. July 2005, Seiten 5-9.

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

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

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

Nr.	Verfasser	Titel
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahradpumpen mit pulsationsarmer Sonderverszahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper - und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau