

Berger/Kiefer (Hrsg.)

# DICHTUNGS TECHNIK

**JAHRBUCH 2013**

ISGATEC<sup>®</sup>

## Radial-Wellendichtungen analysieren und beurteilen

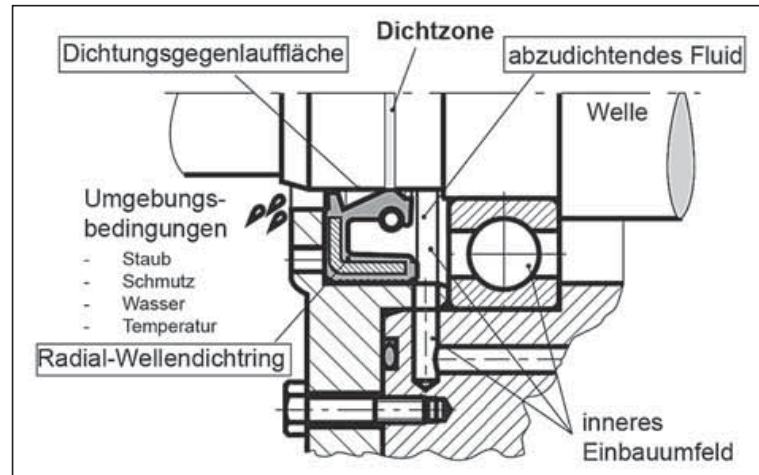
**Radial-Wellendichtringe aus Elastomer (RWDR) sind im industriellen Alltag millionenfach eingesetzte Konstruktionselemente. Ihr Anwendungsbereich erstreckt sich quer über alle Disziplinen des Maschinenbaues. Kaum ein Verbrennungsmotor oder Getriebe kommt ohne die Verwendung von Radial-Wellendichtringen aus. Aufgrund der hohen Anzahl verkaufter Produkte aus diesen Bereichen ist es leicht vorstellbar, dass bereits ein kleiner Prozentsatz ausgefallener Dichtungen und dadurch bedingt auch oft der Ausfall des gesamten Produktes einen großen wirtschaftlichen Schaden darstellt. Nicht zu vergessen, dass ein Produktausfall für den Hersteller schnell mit einem Imageverlust verbunden ist. Insbesondere dann, wenn auch Umweltschäden durch Gefahrstoffe zu erwarten sind.**

Aufgrund dieser Überlegungen ist es daher verwunderlich wie wenig Aufmerksamkeit der vermeintlich einfachen „Radial-Wellendichtung“ in der Entwicklungsphase neuer Produkte beigemessen wird. Dies mag daran liegen, dass ein Radial-Wellendichtring als Katalogware im Vergleich zu den restlichen Komponenten eher günstig ist und lediglich zugekauft wird. Nichtsdestotrotz wird die Dichtungsgegenauflfläche auf dem abzudichtenden Bauteil in den allermeisten Fällen in der unternehmenseigenen Produktion gefertigt. Unwissen oder die Notwendigkeit, Fertigungsschritte zu beschleunigen und somit wirtschaftlicher zu machen, verursachen in der Praxis häufig große Probleme. Diesen Problemen widmen sich Forschungseinrichtungen nunmehr seit über 40 Jahren [1]. Ungünstig gefertigte oder ungeeignete Dichtungsgegenauflflächen sind beinahe alltägliche Problemstellungen. Dies belegen die in der Industrieberatung häufig auftretenden und meist akuten Fälle.

Das in der DIN 3760/3761 empfohlene Standardfertigungsverfahren für Dichtungsgegenauflflächen ist Rundschleifen im Einstich. Durch lange Ausfunkezeiten wird erreicht, dass jedes Korn der Schleifscheibe an möglichst vielen Stellen des Werkstücks eingreift. Dies führt zu gleichmäßigen und zur Abdichtung geeigneten Oberflächen. Von den Dichtungsherstellern werden Ausfunke-

---

Von Dipl.-Ing. Matthias Baumann, Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas  
Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart, [www.ima.uni-stuttgart.de](http://www.ima.uni-stuttgart.de)

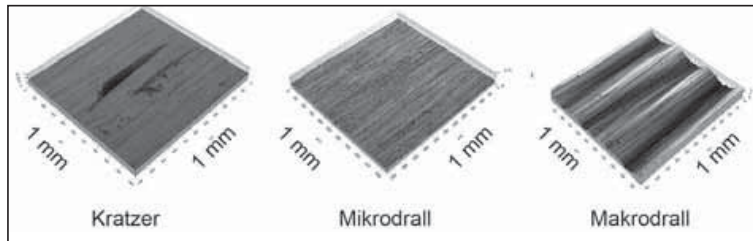


**>>1: Komponenten eines Dichtsystems**

zeiten von 30 s und darüber gefordert. Wird die geforderte Ausfunkzeit drastisch unterschritten, wie es aufgrund der Wirtschaftlichkeit z.B. in der Serienfertigung von Bauteilen notwendig ist, entstehen häufig Dichtungsprobleme, die durch die Dichtungsgegenauflfläche ausgelöst werden. Weiterhin führt auch oftmals die gleichzeitige Verwendung ein und derselben Schleifscheibe, ohne vorheriges Abrichten, sowohl für Dichtungsgegenauflflächen als auch für sonstige Lager- und Funktionsflächen zu ungenügenden Resultaten.

Um zu verstehen, warum die Dichtungsgegenauflfläche zu kritischen Problemen bei der Abdichtung von rotierenden Bauteilen führen kann, ist es wichtig sich daran zu erinnern, dass eine Radial-Wellendichtung ein komplexes tribologisches System ist. Die Komponenten dieses Systems sind der Radial-Wellendichtring, die Dichtungsgegenauflfläche, das abdichtende Fluid sowie das nähere Dichtungsumfeld >>1. Alle Komponenten stehen in direkten und komplexen Wechselwirkungen zueinander und bilden im Betrieb einen empfindlichen Gleichgewichtszustand aus.

Die dynamische Dichtwirkung eines Radial-Wellendichtrings beruht auf seiner Fähigkeit, Fluid aktiv unter der Dichtlippe in das Gehäuseinnere zu fördern. Diese, von der Drehrichtung der Welle unabhängige, Fähigkeit wird mit mehreren Förderhypothesen begründet [2, 3]. Wird dieser empfindliche Fördermechanismus durch ebenfalls axial förderfähige Oberflächenstrukturen auf der Dichtungsgegenauflfläche gestört, kommt es zu unerwünschten Auswirkungen. In Abhängigkeit der Drehrichtung der Welle kann es zu Leckage oder Trockenlauf kommen. Im ungünstigsten Fall übersteigt die



>>2: Verschiedene Drallausprägungen

Förderwirkung der Dichtungsgegenlauffläche die Förderwirkung des Dicht-rings. Direkt auftretende Leckage ist gleichbedeutend mit einem sofortigen Ausfall des Dichtsystems. Trockenlauf oder Mangelschmierung hingegen führt zu einer erhöhten Reibung und somit zu einer thermischen oder abrasiven Schädigung des Radial-Wellendichtrings. Diese Schädigung führt schlussendlich ebenfalls zu Leckage und damit zum Ausfall der Dichtung.

### Drall

Für förderaktive Strukturen auf Dichtungsgegenlaufflächen hat sich im deutschen Sprachgebrauch einheitlich der Begriff „Drall“ verbreitet. Die Definitionen, was Drall eigentlich ist, unterscheiden sich allerdings stark. Aus dichtungstechnischer Sicht ist Drall im weitesten Sinne jede Oberflächenstruktur, die im Dichtkontakt zu einer axialen Fluidförderwirkung führt. Dies beinhaltet makroskopische Kratzer, periodisch umlaufende Strukturen sowie Strukturen in mikroskopischer Größenskala.

>>2 zeigt verschiedene Drallausprägungen, welche nicht selten auch in der industriellen Praxis zu finden sind. Bei der Betrachtung der Größenordnungen der vorgestellten Strukturen wird schnell klar, dass es sich beim Thema „Drall“ um ein Multiskalenproblem handelt. Dieses kann nicht mit einem einzigen Ansatz gelöst werden. Während makroskopische Kratzer noch mit einer vergleichsweise einfachen visuellen Begutachtung – eventuell mittels optischer Mikroskope – beurteilt werden können, müssen für eine Bewertung von Oberflächenstrukturen im Bereich der Welligkeit und Rauheit einer Oberfläche hoch spezialisierte Drallauswertungsverfahren zum Einsatz kommen. Hinzu kommt, dass eine messtechnische Erfassung von Drall für sich alleine derzeit noch nicht ausreicht, da meistens unklar ist bis zu welchen Grenzen eine Drallstruktur noch toleriert werden kann. Erst experimentelle Untersuchungen am realen Dichtsystem berücksichtigen alle Systemkomponenten auf allen Größenskalen und liefern einen sicheren Beweis für die Funktionsfähigkeit einer Dichtungsgegenlauffläche.

Aufgrund der verschiedenen Größen- und Längenskalen und der Notwendigkeit verschiedener Messverfahren zur Erfassung verschiedener Drallausprägungen, liegt es nahe eine Einteilung von Drallstrukturen in verschiedene Drallkategorien vorzunehmen. Bei periodisch und gewindeähnlich ausgeprägten Drallstrukturen spricht man z.B. von Makrodrall. Die Entstehung von Makrodrall lässt sich auf verschiedene Ursachen zurückführen. Grundsätzlich kann z.B. ein zu geringes Schleifaufmaß zu Makrodrall führen. Hierbei bleibt der Drehpass des vorherigen Fertigungsschrittes teilweise erhalten. Eine weitere Quelle für Makrodrall stellt der Abrichtvorgang der Schleifscheibe mit ungünstigen Parametern dar. Wird mit schlecht gewählten Parametern abgerichtet kann sich die vom Abrichtvorgang mit einem Einkorn-Diamantwerkzeug entstehende periodische Struktur auf der Schleifscheibe beim Schleifen auf das Werkstück übertragen. In diesem Fall spricht man von Abrichtdrall. Durch eine Koaxialitätsabweichung zwischen Werkstückachse und der Achse der Schleifscheibe entstandene Drallstrukturen nennt man Schränkungsdrall.

Noch kritischer für ein Radial-Wellendichtsystem ist aber der Mikrodrall. Dieser erzeugt, wie experimentelle Untersuchungen zeigen, im Dichtsystem eine deutlich höhere Förderwirkung als periodischer Makrodrall [4]. Die Erfahrungen zeigen, dass gerade Mikrodrall fast immer unterschätzt wird. Als Mikrodrall werden kurze, stochastisch ausgeprägte und gerichtete Mikrostrukturen bezeichnet. Sie treten sowohl alleine als auch größeren Strukturen überlagert auf. Strukturen dieser Größenordnung weisen eine Breite  $< 10 \mu\text{m}$  und eine Tiefe  $< 5 \mu\text{m}$  auf. Die messtechnische Erfassung gestaltet sich daher schwierig. Es werden hochauflösende optische Messsysteme und neue Herangehensweisen benötigt.

### **Drallmessverfahren**

Zur Erfassung verschiedener Drallstrukturen haben sich drei Drallmessverfahren, darunter eine Eigenentwicklung, die bisher nicht kommerziell verfügbar ist, bewährt. >>3 zeigt eine Übersicht über die Verfahren und deren Eigenschaften.

### **Fadenmethode**

Die Fadenmethode ist das älteste Messverfahren Drall auf Dichtungsgegenläufigen Flächen zu erfassen. Hierbei wird die zu vermessende Welle genau horizontal in ein Backenfutter gespannt, welches sich mit einer definierten Drehzahl in beide Rotationsrichtungen drehen lässt. Um die Welle wird ein mit einem defi-

Drallmessmethode	Vorteile	Nachteile
Fadenmethode	einfach, kostengünstige Umsetzung, Erfassung von Makro- und Mikrodrall	nicht genormt, keine quantitative Aussage, subjektive Beurteilung durch den Prüfer
Drallauswertung nach MBN 31007-7	praxiserprobtes Verfahren, genormte Kennwerte zur Beschreibung von Makrodrall, in kommerziellen Messgeräten verfügbar	Erfassung von Mikrodrall nicht möglich, hohe Messzeiten
Mikrostrukturanalyse	Auswertung von Mikrodrall, 3D Messdaten liegen bereits für Weiterverarbeitung mit alternativen Auswertungsverfahren vor (DIN EN ISO 25178)	noch nicht in kommerzieller Software verfügbar, Erfassung von Makrodrall nicht möglich

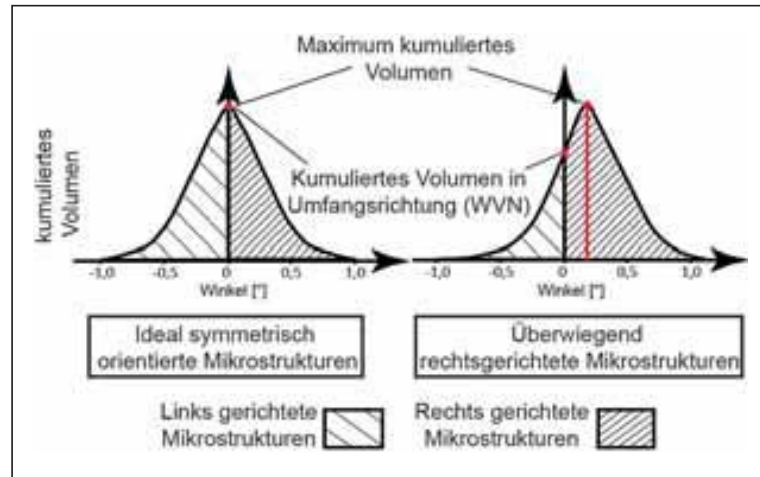
### >>3: Drallmessverfahren und ihre Eigenschaften

nierten Gewicht belasteter Faden gelegt. Erfährt der Faden bei Rotation der Welle durch Drallstrukturen auf der Dichtungsgegenlauffläche eine axiale Kraftkomponente, so wird er sich in axialer Richtung bewegen. Die Ergebnisse dieser Methode sind qualitativer Natur und hängen stark vom Anwender ab. Nur ein erfahrener Anwender kann durchaus eine hohe Erkennungsquote erzielen. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass mit geeigneter Faden- und Parameterwahl sowohl Mikro- als auch Makrodrall erfasst wird. Eine Eigenschaft, die die derzeitig alternativ eingesetzten Messverfahren nicht aufweisen.

#### Drallauswertung nach MBN 31007-7

Ein Messverfahren zur Analyse von periodischem Makrodrall ist die Drallauswertung nach der Daimler Werksnorm MBN 31007-7, welche häufig auch als „CARMEN“ Methode bezeichnet wird. Grundlage für die Drallauswertung bilden 72 axiale Rauheitsschriebe, die mit einem herkömmlichen taktilen Rauheitsmessgerät in einem groben Messraster in 5°-Schritten um den gesamten Umfang und in einem feinen Messraster von 0,5°-Schritten um einen Umfangsabschnitt von 36° erfasst werden. Diese jeweils 72 Tastschriebe werden anschließend zu einer „Pseudotopographie“ zusammengefügt und mittels einer mathematischen Analyse ausgewertet. Das Resultat dieser Analyse sind Drallkenngrößen wie der Drallwinkel, die Dralltiefe u.v.m.

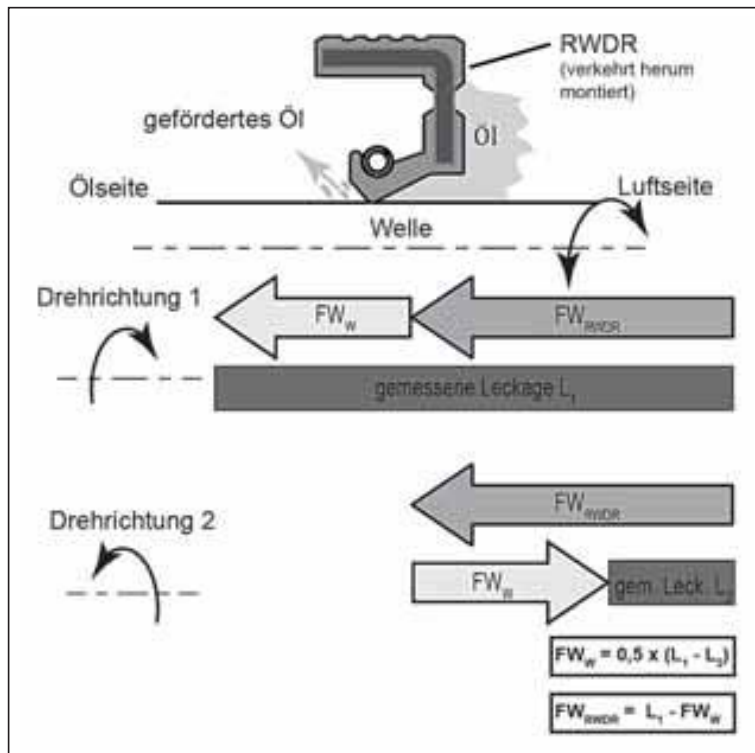
>>4: Schematische Darstellung der Verteilungskurve des kumulierten Strukturvolumens einer idealen einstichgeschliffenen Dichtungsgegenauflä- che (links) sowie einer Dichtungsgegenauflä- che mit deutlichem Mikrodrall (rechts)



### Mikrostrukturanalyse

Ein Verfahren zur Analyse von Mikrodrall ist die zunehmend etablierte und eigenentwickelte Mikrostrukturanalyse [5]. Grundlage hierfür ist eine mit einem optischen Oberflächenmessgerät aufgenommene und hochaufgelöste Oberflächentopographie mit einer Messfeldgröße von 1x1 mm. Da das für die Messungen eingesetzte Messgerät nicht über einen Rotationsvorschub verfügt, muss zunächst die zylindrische Form der Welle von der Oberflächentopographie entfernt werden. Nach dem Entfernen der Zylinderform wird mit einem zweidimensionalen Gaussfilter eine Trennung von Mikrostrukturen und Welligkeit vorgenommen. Dies ist der Ausgangspunkt für ein Segmentierungsverfahren aus dessen Ergebnis jeweils die Lage, Volumen, Position und Orientierung jeder einzelnen segmentierten Mikrostruktur berechnet wird. Auf einstichgeschliffenen Wellenoberflächen werden mit dem vorgestellten Verfahren auf einer Messfeldgröße von 1x1 mm 400 – 800 Mikrostrukturen detektiert. Aufgrund dieser hohen Anzahl an Datensätzen wird das Ergebnis statistisch in Form von Verteilungskurven aufbereitet. Als dichtungstechnisch relevant hat sich hierbei die Verteilung des kumulierten Mikrostrukturvolumens herausgestellt. Zur Berechnung der Verteilungskurve wird das Volumen aller über der gleichen Winkellage orientierten Mikrostrukturen aufsummiert und anschließend über dem Strukturwinkel aufgetragen. Die 0°-Lage gibt dabei exakt die Umfangsrichtung wieder.

Die Darstellung der Ergebnisse in einem Verteilungsschaubild bietet ein großes Potential für die Bewertung von Dichtungsgegenauflä- chen. So wird am Verlauf der Verteilungskurve deutlich, ob eine symmetrische Verteilung des kumulierten Volumens um die Umfangsrichtung vorliegt oder ob in Sum-



>>5: Experimentelle Ermittlung der Systemförderwerte einer Radial-Wellendichtung

me eine größere Anzahl von Strukturen eine von der Umfangsrichtung abweichende Orientierung aufweist. Um einen Schleifprozess hinsichtlich dichtungstechnischer Erfordernisse zu optimieren, können darüber hinaus zum Vergleich die Auswertungsergebnisse einer idealen Dichtungsgegenlauffläche herangezogen werden. >>4 zeigt exemplarisch die resultierende Verteilungskurve bei der Auswertung einer idealen einstichgeschliffenen Dichtungsgegenlauffläche sowie einer Dichtungsgegenlauffläche mit deutlichem Mikrodrall. Mittels einer kontinuierlichen Anwendung der Mikrostrukturanalyse ist es außerdem möglich eine Prozessüberwachung einzurichten. Ändert sich der Verlauf der Verteilungskurve der zu überwachenden Werkstücke über der Zeit, ist dies z.B. ein deutliches Indiz für eine Änderung im Fertigungsprozess.

### Experimentelle Beurteilung von Dichtsystemen

Liegen nun im konkreten Fall die Messergebnisse verschiedener Drallauswertungsverfahren vor, steht man als verantwortlicher Ingenieur oftmals vor dem Problem, eine fundierte Aussage über die Funktion eines Dichtsystems machen zu müssen. Spätestens an dieser Stelle ergeben sich schnell weitere Fragen, welche meist offen bleiben:



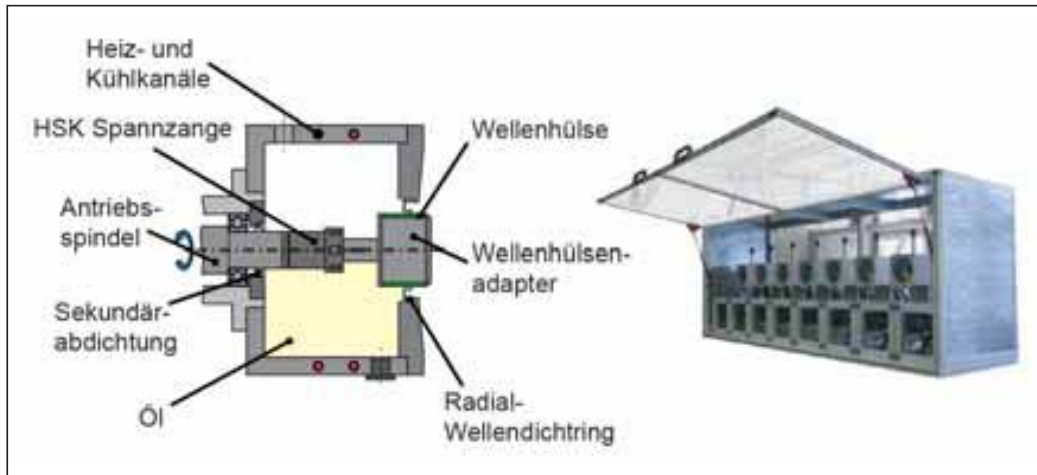
- Bis zu welchem Parametergrenzwert ist Drall tolerierbar?
- Wird Leckage auftreten?
- Ab wann muss mit einer reduzierten Lebensdauer des Dichtelementes gerechnet werden?

Aufgrund der diversen Einflüsse, welchen ein Dichtsystem neben den Einflüssen der Dichtungsgegenlauffläche ausgesetzt ist, lassen sich solche Fragestellungen nur mit sehr viel Erfahrung oder im Versuch beantworten. Eine experimentelle Untersuchung des Dichtsystems ist daher meist ein notwendiger Bestandteil bei einer ausführlichen Analyse von Radial-Wellendichtsystemen.

Die Förderwirkung einer Dichtungsgegenlauffläche im System zu bestimmen ist nicht einfach. Ein Dichtsystem kennt prinzipbedingt nur zwei Zustände: dicht und undicht. Die Frage – „wie gut dicht ein Dichtsystem eigentlich ist?“ – lässt sich nicht ohne Weiteres beantworten. Um dieses Problem zu lösen und eine Aussage über die Güte eines Dichtsystems treffen zu können, wird eine experimentelle Methode eingesetzt, mit der die Systemförderwerte einer Radial-Wellendichtung bestimmt werden können. Hierbei macht man sich die Eigenschaften der einzelnen Systemkomponenten zu Nutze.

Ein in ein Versuchsgehäuse verkehrt herum eingebauter Radial-Wellendichterring fördert bei Rotation der Welle aufgrund der dem Dichtring eigenen Förderwirkung in beide Drehrichtungen kontinuierlich Öl aus dem Gehäuse. Diese austretende Ölmenge wird aufgefangen und gewogen. Da die durch Drall induzierte Förderwirkung der Dichtungsgegenlauffläche von der Drehrichtung der Welle abhängig ist, ergibt sich bei einem Drehrichtungswechsel eine Differenz in der Menge des austretenden Öls. Aus dieser Differenz lassen sich die Förderwerte des Radial-Wellendichttringes und der Dichtungsgegenlauffläche berechnen >>5.

Um Messungen dieser Art durchzuführen, ist es sinnvoll eine hohe Anzahl verschiedener Prü fzellen zur Verfügung zu haben. So bietet z.B. ein für Langzeit- und Funktionsuntersuchungen entwickelter 8-Zellen-Dauerlaufprüfstand die ideale Voraussetzung zur Förderwertmessung an Radial-Wellendichtsystemen. Eine modulare Bauweise mit direkter freier Sicht auf die Dichtstelle ermöglicht eine flexible Nutzung einer oder mehrerer Prüfkammern gleichzeitig >>6. Die Verbindung zwischen Antriebsspindel und zu untersuchender Welle ist mit einem Hohlschaftkegelsystem realisiert. Hierdurch wird die Aufnahme verschiedenster Versuchswellenkörper mit re-



>>6: Modularer Dauerprüfstand mit flexibler Nutzung mehrerer Kammern

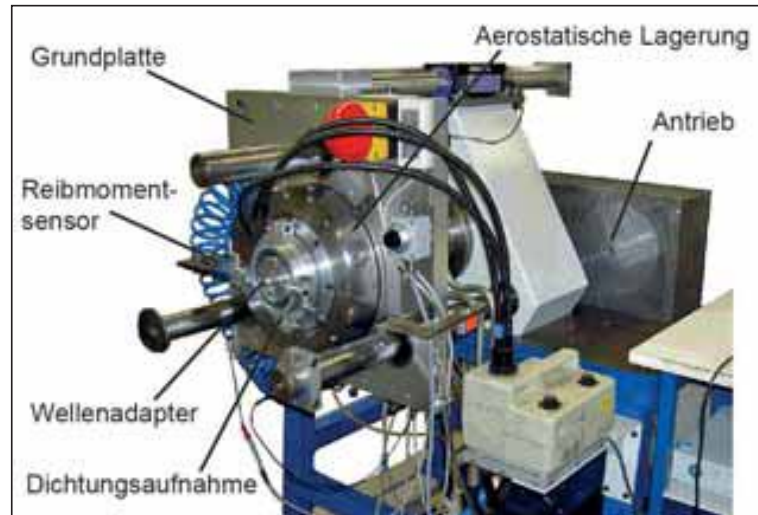
produzierbarem Rundlauf gewährleistet. Mittels Heizpatronen, Kühlaggregat und Temperaturregelung kann die Ölsumpftemperatur in einem Bereich von 10 bis 135 °C geregelt werden. Bei einer maximalen Drehzahl von 10.000 min<sup>-1</sup> und einem maximalen Wellendurchmesser von 120 mm können somit Radial-Wellendichtsysteme bis zu Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 60 m/s untersucht werden.

Werden darüber hinaus zur Abschätzung des Schmierzustandes oder der Lebensdauer eines Dichtsystems weitere Größen wie z.B. das Reibmoment zwischen Radial-Wellendichtring und Dichtungsgegenläufigkeit benötigt, können Funktionsuntersuchungen auf einem Universalprüfstand durchgeführt werden >>7. Dieser ist mit einem aerostatisch gelagerten Messsystem ausgerüstet, was eine hochpräzise Reibmomentmessung ermöglicht. Der Universalprüfstand ist so konstruiert, dass er eine hohe Adaptierbarkeit für sehr viele verschiedene Radial-Wellendichtsysteme aufweist. Mit Hilfe der institutseigenen mechanischen Werkstatt können, falls nötig, innerhalb kurzer Zeit alle Anpassungen durchgeführt werden.

### Fazit

Drall auf Dichtungsgegenläufigkeiten ist ein aktuelles und komplexes Problem, dem oftmals zu wenig Aufmerksamkeit zukommt. Ausfälle von Dichtsystemen treten oft nicht unmittelbar auf, so dass ein spätes Gegensteuern schwierig und teuer wird. Zur Beurteilung von Dichtungsgegenläufigkeiten ist aufgrund verschiedener und unterschiedlich kritischer Drallausprägung-

**>>7: Universalprüfstand mit aerostatischer Lagerung zur hochpräzisen Reibmomentmessung (Bilder: Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart)**



en ein erheblicher messtechnischer und experimenteller Aufwand und ein großes Maß an Erfahrung nötig. Die Ergebnisse eines einzelnen Drallmessverfahrens sind aus diesem Grund nicht ausreichend. Es muss sowohl Makro- als auch Mikrodrall berücksichtigt werden. Bei neuen Produkten oder der Änderung eines Dichtelementes empfiehlt es sich trotz Drallmesstechnik die Funktion des neuen Systems experimentell abzusichern. Um Schäden und Ausfälle zu vermeiden ist dies zwar ein erheblicher, aber dennoch notwendiger und vertretbarer Aufwand. Aufgrund der Komplexität der Problemstellung und im Falle akuter Probleme empfiehlt es sich daher, auf die Beratung von kompetenten Ansprechpartnern zurückzugreifen.

### Literatur

- [1] IMA (Institut für Maschinenelemente): Home Page des Instituts, Online: <http://www.ima.uni-stuttgart.de>, Universität Stuttgart, (Stand: 22.06.2012)
- [2] Kammüller, M.: Zur Abdichtwirkung von Radial-Wellendichtringen, Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1986
- [3] Müller, H.: Fachwissen Dichtungstechnik , Online: <http://www.fachwissen-dichtungstechnik.de>
- [4] Kunstfeld, T.: Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen, Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2005
- [5] Baitinger, G.: Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenlaufflächen, Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2011