

Innovation durch Kooperation - Analyse handelsüblicher Radialdichtelemente und Entwicklung einer neuen Bauform mit erweiterten Leistungsgrenzen

**Dipl.-Ing. Markus Olbrich, Dr.-Ing. Werner Haas
Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart**

**Dr.-Ing. Guido Wüstenhagen
Merkel Freudenberg Fluidtechnic, Hamburg**

1 Einleitung

In vielen Bereichen der Technik sind Fluide unter Druck bei gleichzeitig hoher Gleitgeschwindigkeit zuverlässig abzudichten. Alternativ zu den verhältnismäßig teuren, komplexen und groß bauenden Axial-Gleitringdichtungen werden für Drücke kleiner 1 MPa preisgünstige, klein bauende Polymer-Radialdichtungen angeboten. Steigende Leistungsanforderungen hinsichtlich Druck und Gleitgeschwindigkeit führen dazu, daß die Einsatzgrenzen diese Dichtelemente überschritten werden. Am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart wurde ein Dichtsystem mit einem neuen Funktionsprinzip entwickelt. Der „Entlastete Wellendichtring“ hat ein wesentlich erweitertes Leistungsspektrum. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Merkel Freudenberg Fluidtechnic, Hamburg, liegt jetzt ein praxisreifes, fertigungs- und montagetechnisch optimiertes, innovatives Dichtelement vor.

2 Herkömmliche druckbelastbare Polymer-Radialdichtungen

Steigen Druck und Gleitgeschwindigkeit, erreichen herkömmliche Polymer-Radialdichtungen, z.B. Radial-Wellendichtringe, **Bild 1**, rasch ihre Einsatzgrenzen. Sie versagen durch thermische Überlastung der Dichtkante und Ablagerung von Ölkohle. Hauptursache ist die mit dem Druck der abzudichtenden Flüssigkeit

übermäßig zunehmende Anpressung der Dichtlippe an die Welle. Proportionalitätsfaktor ist in erster Näherung die axiale Wirkfläche des Drucks, die durch die Länge der Dichtlippe konstruktiv festgelegt ist. Entsprechend steigen die Reibleistung und die thermische Belastung infolge der Umfangsgeschwindigkeit. Die Wärme staut sich unter der Dichtkante und führt zum Verbrennen der Dichtkante und des abzudichtenden Öls. Eine übliche Größe zum Beschreiben der Einsatzgrenze von Dichtungen ist der „pv-Wert“, das Produkt aus dem Druck p der abzudichtenden Flüssigkeit und der Umfangsgeschwindigkeit v der Welle an der Dichtkante.

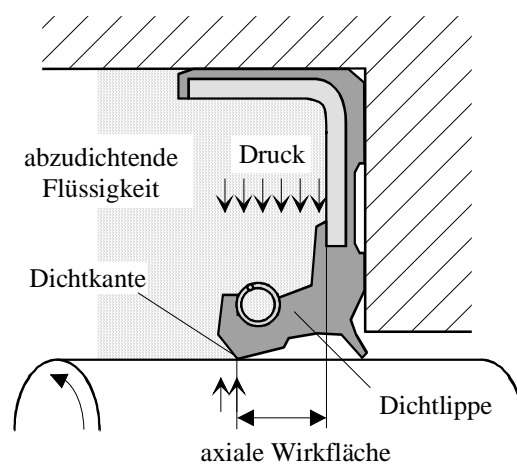
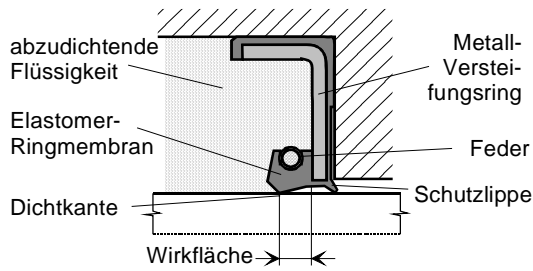


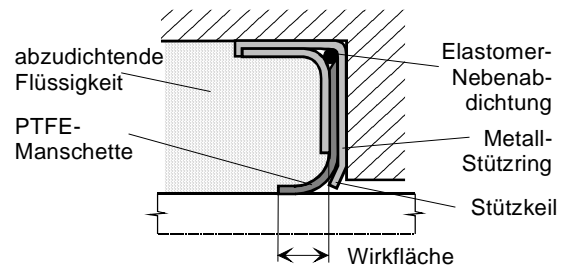
Bild 1: Radial-Wellendichtring

Um die Druckbelastbarkeit zu steigern werden Bauformen von nicht druckbelastbaren Radialdichtungen üblicherweise nur modifiziert. Unter Verwendung verkürzter, verstärkter und abgestützter Dichtlippen sowie reibungsreduzierter und thermisch stabilerer Werkstoffe lassen sich die Einsatzgrenzen steigern. Funktionsbedingt ist dies nur in einem beschränkten Maß möglich. Die Dichtlippe bis zur Dichtkante muß weiterhin eine Mindestlänge aufweisen, um sich aufgeweitet auf der Welle ausreichend flexibel und unempfindlich gegenüber Toleranzen zu verhalten. Andernfalls droht die radiale Anpressung und damit die zuverlässige Dichtfunktion durch Fertigungs- und Lauftoleranzen sowie durch Alterung und Verschleiß zumindest teilweise verloren zu gehen. Standardbauformen druckbelastbarer Wellendichtungen sind:

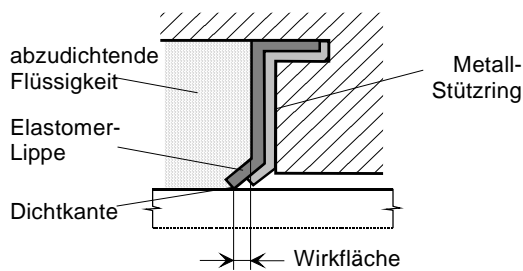
- druckbelastbare Radial-Wellendichtungen, **Bild 2a**,
- Lippendichtungen, **Bild 2b**, und
- PTFE-Manschetten, **Bild 2c**.



a) druckbelastbarer Radial-Wellendichtring



c) PTFE-Manschette



b) Lippendichtung

Bild 2: Ausführungen druckbelastbarer Polymer-Wellendichtungen

Druckbelastbare Radial-Wellendichtringe (DWDR), Bild 2a: Dies sind modifizierte Bauformen der vielfach eingesetzten, nicht druckbelastbaren Radial-Wellendichtringe nach DIN 3760/61, Bild 1. Durch Verkürzen der Ringmembran (Dichtlippe) wird die Wirkfläche des angreifenden Drucks reduziert. Die verstärkte Dichtlippe und der massive Versteifungsring geben dem Dichtring eine größere Stabilität. Die angeformte Dichtkante bewirkt eine schmale Berührbreite und eine definierte axiale Pressungsverteilung im Dichtspalt. Verwendet werden in der Regel die Elastomer-Werkstoffe NBR (Nitril-Butadien) und bei höheren Temperaturen und Reibleistungen FPM (Fluorpolymer).

Lippendichtungen: Wie beim DWDR wird die Druckstabilität durch eine kurze Elastomerlippe mit angeformter Dichtkante und Abstützung an einem Metallring realisiert, Bild 2b. Um eine möglichst kleine Wirkfläche zu erhalten, wird die Lippe sehr kurz ausgeführt. Auf eine Anpressfeder muß deshalb verzichtet werden. Zum Einsatz kommen ebenfalls die Elastomer-Werkstoffe NBR und FPM.

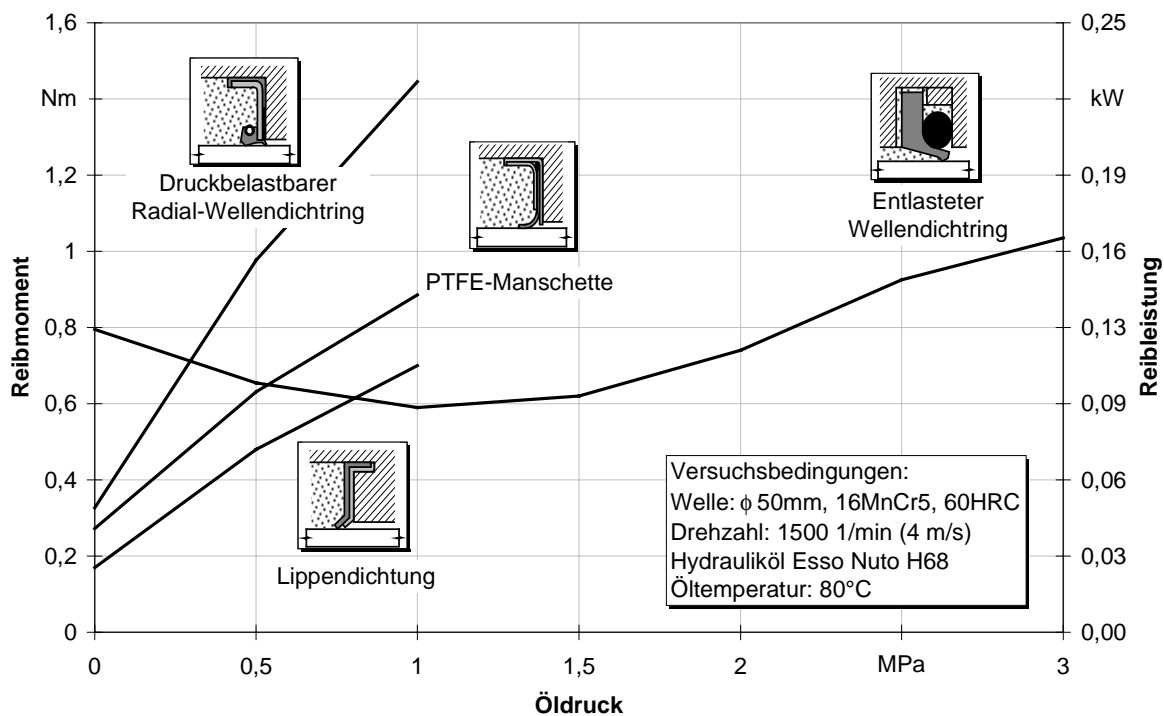


Bild 3: Reibmomente von Standardausführungen druckbelastbarer Wellendichtungen

PTFE-Manschetten: Gegenüber den Elastomerdichtungen werden die PTFE-Manschetten meist ohne angeformte Dichtkante ausgeführt, Bild 2c. Eine PTFE-Scheibe wird in ein Gehäuse gepreßt, vor dem Einsatz aufgeweitet und dabei plastisch verformt. Als Dichtungswerkstoff wird Polytetrafluorethylen (PTFE) verwendet. Zur Verbesserung der mechanischen und tribologischen Eigenschaften werden Füllstoffe, vorzugsweise Kohle, Kohle- und Glasfaser, Graphit, Ekonol oder Molybdändisulfid beigemischt. Diese PTFE-Compounds zeichnen sich gegenüber den Elastomeren durch eine wesentlich größere Steifigkeit, eine höhere thermische und chemische Stabilität und eine geringere Reibung aus.

3 Betriebsverhalten

Bild 3 zeigt das am Institut gemessene druckabhängige Reibmoment einiger druckbelastbarer Radialdichtungen bei 80°C Öltemperatur. Das Reibmoment herkömmlicher Dichtelemente (druckbelastbarer Radial-Wellendichtungen, Lippendichtungen und PTFE-Manschetten) nimmt mit ansteigendem Druck proportional zur Größe der Wirkfläche zu. In Standardausführungen liegen die Einsatzgrenzen dieser Dichtelemente bei 1 MPa /1/.

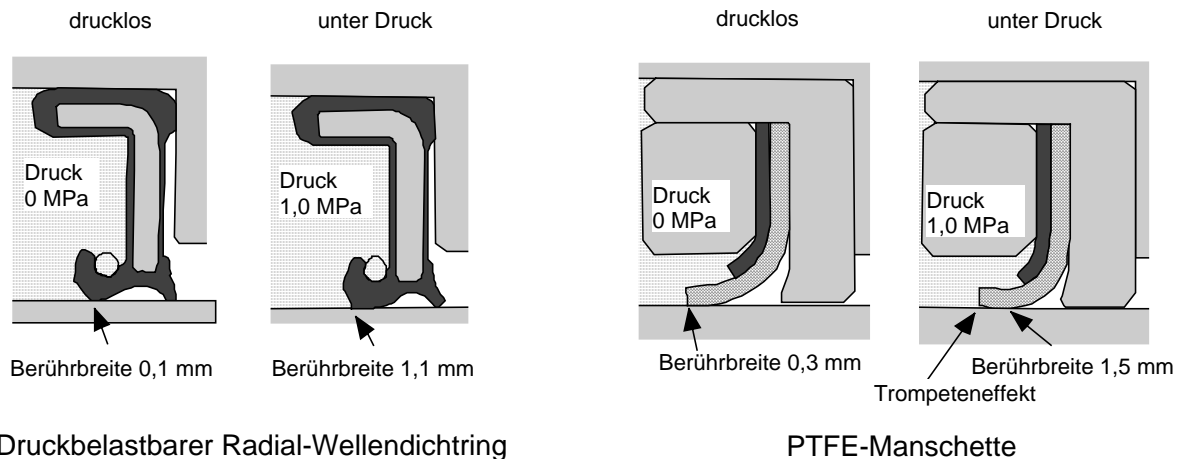


Bild 4: Verformung druckbelastbarer Polymer-Wellendichtungen im Profilschnitt: drucklos und unter Druck

Durch die zusätzliche Anpressung des Drucks verformen sich die Dichtelemente teilweise erheblich. Exemplarisch zeigt das **Bild 4** die Nachbildungen von Fotografien eingegossener Dichtungen im drucklosen Zustand und unter Druck. Die Berührbreiten und damit die Scherkräfte im Dichtspalt nehmen bei Druckbelastung deutlich zu. Wird die dadurch entstehende Wärme nicht ausreichend abgeführt, verkocht das abzudichtende Öl im Bereich der Berührbreite. **Bild 5** zeigt die Welle eines bei 1 MPa nach 6000h Laufzeit infolge Ölverkokung ausgefallenen Dichtsystems mit einem druckbelastbaren Radial-Wellendichtring aus Fluorpolymer. Deutlich zu erkennen sind die Ölkohleablagerungen auf der Welle vor der Dichtkante, zwischen Dichtkante und Staubschutzlippe und hinter der

Staubschutzlippe. Zum Ausfall des Dichtsystems führten vermutlich losgebrochene Ölkohlepartikel, die in den Dichtspalt wanderten. Durch die so erzeugten makroskopischen Spalte konnte das Öl ungehindert austreten.

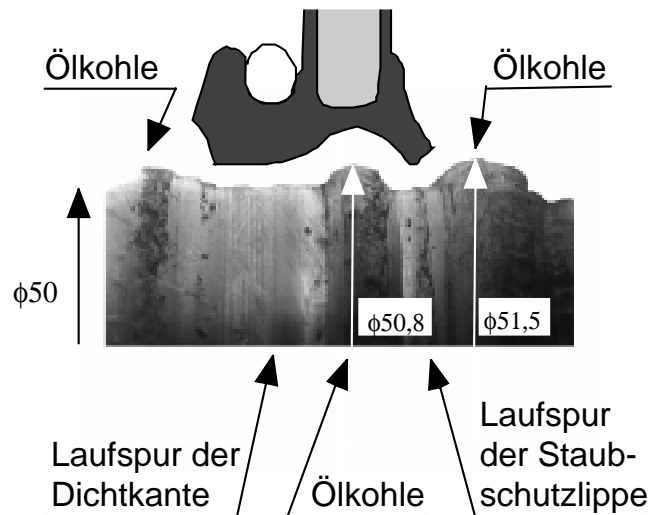


Bild 5: Ablagerungen von Ölkohle auf einer Stahlwelle
(1MPa, 1000min⁻¹, 6000h, ESSO Nuto H68)

Die hohen Temperaturen im Dichtspalt und die zyklische Belastung der Dichtung durch fertigungsbedingte Rundlaufabweichungen führen bei Elastomerdichtungen zum Verspröden des Werkstoffs und zu Rissen quer über die Berührbreite /2/. Ein makroskopischer Verschleiß der Elastomerdichtungen ist nur bei thermischer Überlastung festzustellen. Demgegenüber weisen gehärtete Stahlwellen deutliche Laufspuren auf. In einer 3D-Topographiemessung, **Bild 6**, wurden auf einem kleinen Wellenausschnitt sowohl die Ölkohleablagerungen als auch die Laufspuren der Dichtkante und der Staubschutzlippe eines druckbelastbaren Radial-Wellendichtrings erfaßt. Der aus der 3D-Topographiemessung gewonnene 2D-Meßschrieb zeigt eine 30µm tiefe Laufspur in der Welle. Entsprechend seiner Pressungsverteilung hat der Radial-Wellendichtring in der Welle seine Negativform erzeugt.

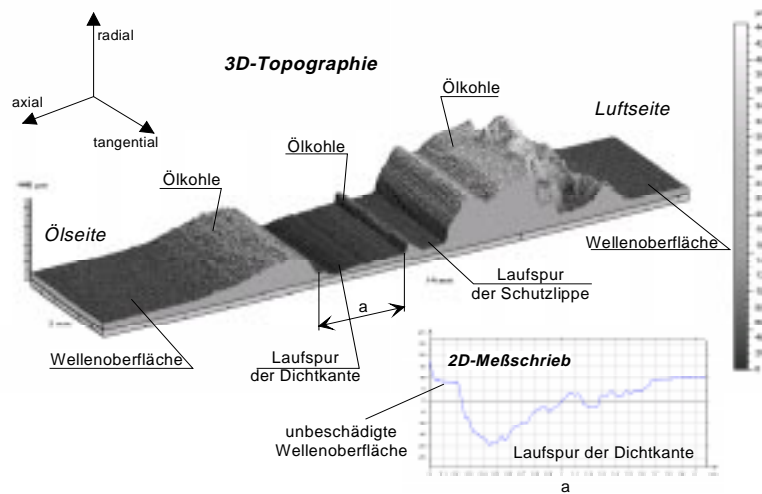


Bild 6: 3D-Topographie einer gehärteten Stahlwelle mit aufbackener Ölkohle und Laufspur eines Radial-Wellendichtrings (1MPa, 1000min⁻¹, 10000h, ESSO Nuto H68)

Im Gegensatz zu den Elastomerdichtungen ist bei PTFE-Manschetten ein deutlicher Verschleiß des Dichtelements festzustellen. Verstärkt wird er durch den Trompeten- und Kniehebeleffekt /3, 4/ der bei mehreren Manschetten im Bereich des maximal zulässigen Drucks auftritt. Dabei knickt die Membran im Biegeradius ab und stützt sich dort verstärkt auf die Welle (Kniehebeleffekt). Im vorderen Bereich hebt die Membran von der Welle ab (Trompeteneffekt), Bild 4. Durch die lokale Pressungserhöhung verschleißt die Membran im Auflagebereich verstärkt. Bei mehreren Manschetten war die Membran bereits nach wenigen tausend Stunden so verschlissen, daß sich Risse bildeten, durch die Öl austrat, **Bild 7**.

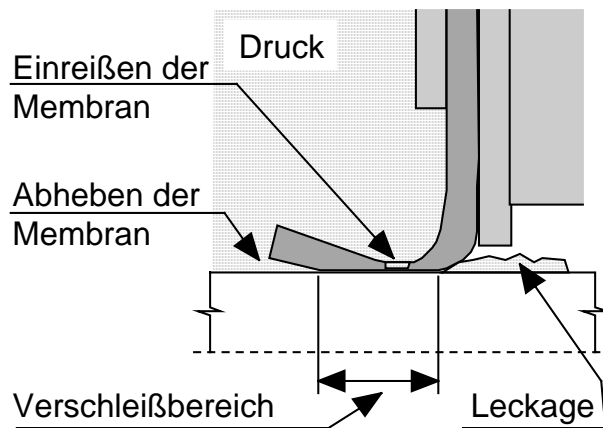


Bild 7: Durch Trompeten- und Kniehebeleffekt verursachter Verschleiß und Rißbildung einer druckbelasteten PTFE-Manschette

4 Eine neue Bauform: Der Entlastete Wellendichtring

Unter den beschriebenen Bedingungen stoßen bestehende Bauformen druckbelasteter polymerer Wellendichtungen an ihre Einsatzgrenzen. Funktionsbedingt ist nur mittels „Sonderausführungen“ ein höherer Druck abzudichten. Dies geht zu Lasten anderer Betriebsparameter (Gleitgeschwindigkeit, radiale Beweglichkeit, Reibung, ...). Zum sicheren Abdichten von Drücken größer 1MPa bei gleichzeitig hoher Gleitgeschwindigkeit ist ein neues Dichtungsprinzip notwendig.

Durch systematische Entwicklung einer neuartigen Radialdichtung am Institut für Maschinenelemente ließen sich die Leistungsgrenzen deutlich steigern. Eine Analyse der funktionsbedingten Anforderungen ergab folgende Gestaltungsrichtlinien für eine druckbelastbare Radialdichtung /5/, **Bild 8a**:

- möglichst schmale Berührbreite,
- Dichtpressung nicht größer als erforderlich durch minimale Wirkfläche,
- leichtgängige radiale Beweglichkeit,
- zuverlässige Reibmomentabstützung und
- günstige Schmierung und Kühlung der Dichtfläche.

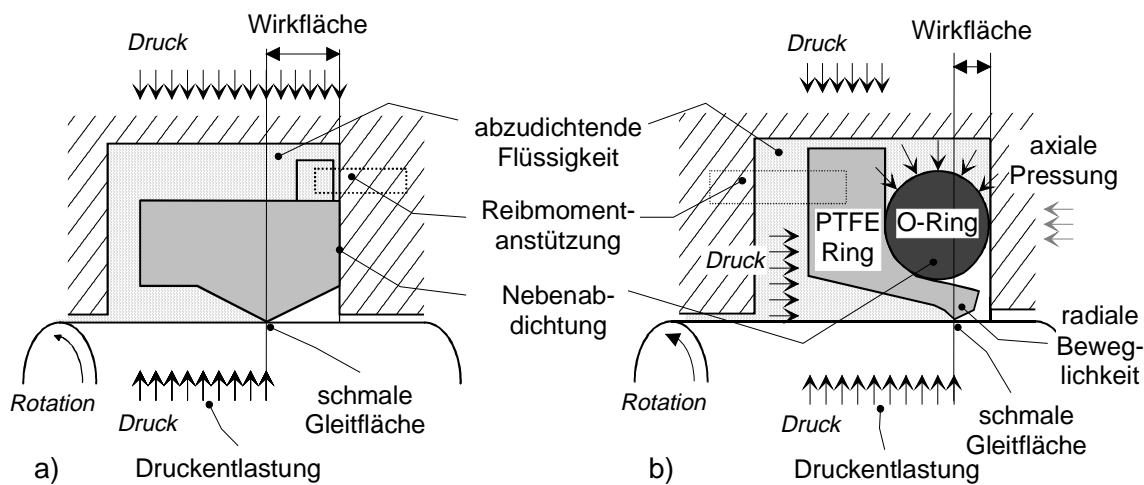


Bild 8 a) Prinzip der teilweise druckentlasteten Radialdichtung
 b) Umsetzung im entlasteten Wellendichtring

Das in **Bild 8b** dargestellte patentierte Funktionsprinzip des entlasteten Wellendichtrings (EWDR) /6/ ist die Umsetzung einer teilweise druckentlasteten Radialdichtung entsprechend dieser Gestaltungsrichtlinien. Der entlastete Wellendichtring besteht aus einem PTFE-Ring und einem Elastomer-O-Ring. Eine ausgeprägte Dichtkante, die eine schmale Berührbreite auch bei steigendem Druck sicherstellt, ist an einer radial flexiblen Dichtlippe angeformt. Der PTFE-Ring stützt sich axial auf dem Elastomer-O-Ring ab. Der Elastomer-O-Ring überträgt den auf die Wirkfläche anstehenden Flüssigkeitsdruck auf die schmale Gleitfläche der Dichtkante. Die Druckentlastung reduziert die Wirkfläche durch den Druck der abzudichtenden Flüssigkeit, der radial von innen auf die Dichtlippe wirkt. Die Dichtlippe ist so hydrostatisch abgestützt. Das Reibmoment stützt ein formschlüssig in Gehäuse und PTFE-Ring eingreifender Stift ab. Das Dichtprinzip des EWDR wurde am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart in zwei aufeinanderfolgenden, von der DFG und der Merkel Freudenberg Fluidtechnik geförderten Forschungsprojekten zu einem funktionsfähigen Dichtelement entwickelt /7, 8/.

5 Reibmoment und Einsatzgrenzen

Im Vergleich zu den herkömmlichen Radialdichtungen ist das Reibmoment des EWDR nahezu druckunabhängig mit einem flachen Anstieg im oberen Druckbereich, Bild 3. Das erweiterte Leistungsspektrum stellt **Bild 9** dar. Der Entlastete Wellendichtring dichtet Flüssigkeiten bis zu einem Druck von 3 MPa und gleichzeitig 10 m/s Gleitgeschwindigkeit zuverlässig ab.

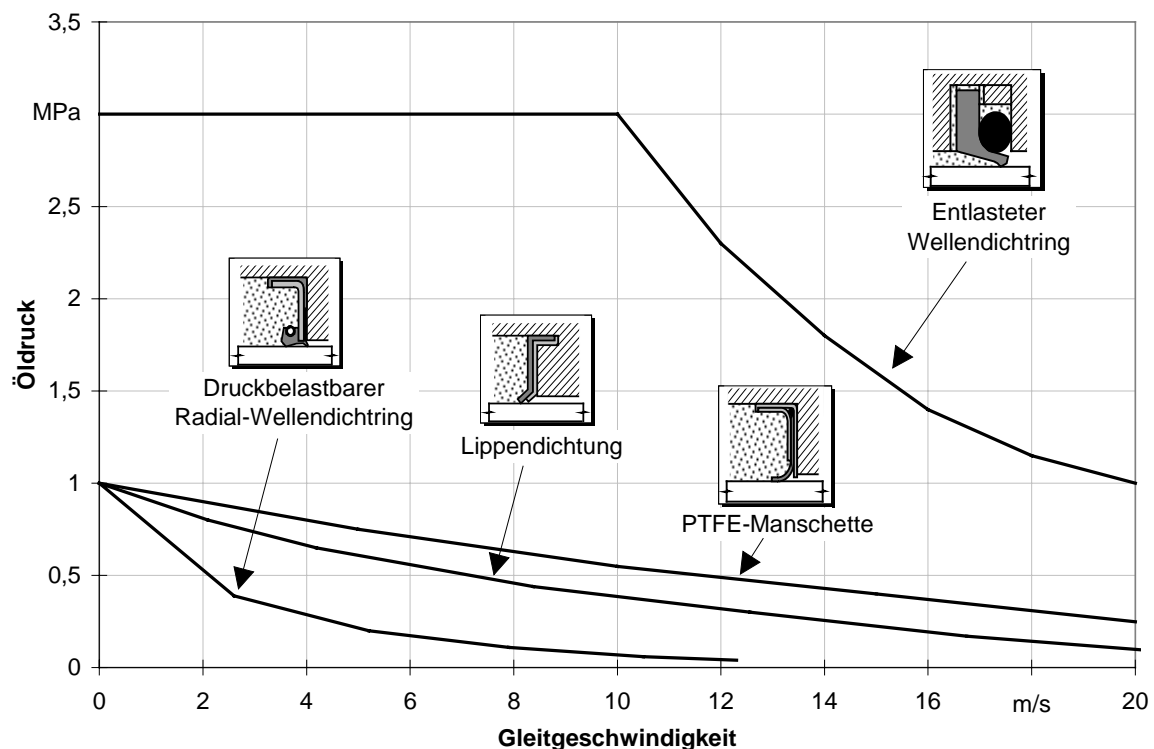


Bild 9: Grenzen des Einsatzbereichs verschiedener druckbelastbarer Radialdichtungen

6 Entlasteter Wellendichtring als RADIAMATIC EWDR

Das Funktionsprinzip des Entlasteten Wellendichtrings ist im Produkt RADIAMATIC EWDR der Firma Merkel Freudenberg Fluidtechnik verwirklicht. **Bild 10** zeigt die mit Hilfe der Finiten-Element-Analyse gestaltete Bauform des RADIAMATIC EWDR. Das funktionsfähige Dichtelement aus der Universitätsforschung wurde unter Fertigungs-, Handhabungs-, Montage- und Kostenaspekten optimiert. Zur besseren Handhabbarkeit muß die mehrteilige Dichtung aus Elastomer-O-Ring und PTFE-Ring

als ein fest gefügtes Bauteil vorliegen. Dies erleichtert die Montage im Aggregat wesentlich. Durch die Möglichkeit die Dichtung im einseitig offenen Einbauraum zu montieren, reduziert sich nicht nur der Aufwand bei der Montage, sondern auch der Aufwand für die Gestaltung und Fertigung des konstruktiven Umfelds im Aggregat. Das zur Gehäusefixierung des RADIAMATIC HTS II /9/ - eine PTFE-Manschette - entwickelte Prinzip wurde auf den RADIAMATIC EWDR übertragen. Hier fließen die Erfahrung und bewährte Fertigungstechnologie eines benachbarten Produkts ein und ermöglichen eine kostengünstige Lösung mittels eines einteiligen Stahlkäfigs. Die Übertragung des Flüssigkeitsdrucks in den Ringraum über dem Elastomer-O-Ring wurde durch eine einfache, im Dichtelement integrierte Bohrung gelöst.

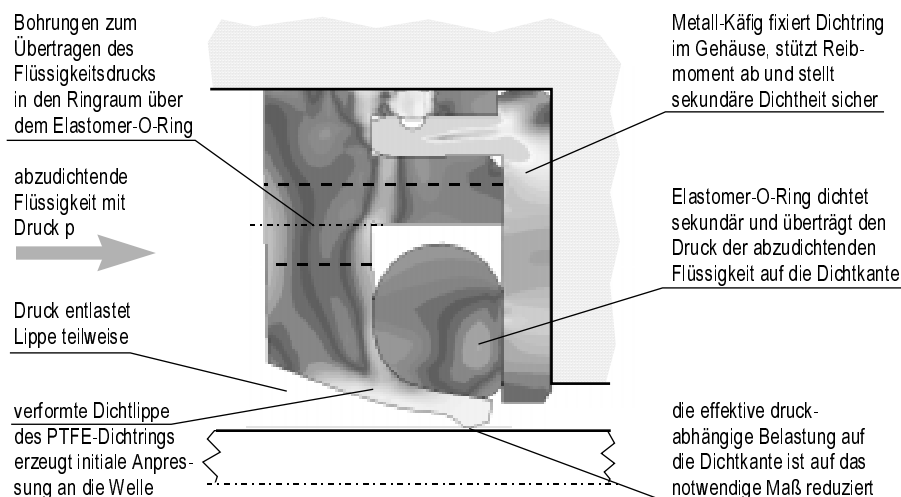


Bild 10: RADIAMATIC EWDR: FE-Simulation mit max. Hauptspannungen bei einem Flüssigkeitsdruck von 3 MPa

Das Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Dichtungshersteller ist eine druckbelastbare Radialdichtung mit den Vorteilen:

- gleichzeitig hoher Druck der abzudichtenden Flüssigkeit und hohe Umfangsgeschwindigkeit ($p v_{\max}$ -Wert = 30 MPa m/s gegenüber $p v_{\max}$ -Wert < 10 MPa m/s bei herkömmlichen druckbelastbaren Radialdichtungen,
- zuverlässige Dichtfunktion bei Temperatur- und Druckwechseln,

- einfache Montage durch Kassettenbauweise für beliebige Nenn-Durchmesser ab 12 mm,
- axial kurzer, einseitig offener Bauraum,
- Vakuum und in Maßen Druckumkehr möglich,
- niedrige Verlustleistung und Wärmeentwicklung auch bei hohem Druck und
- niedrige Leckagerate.

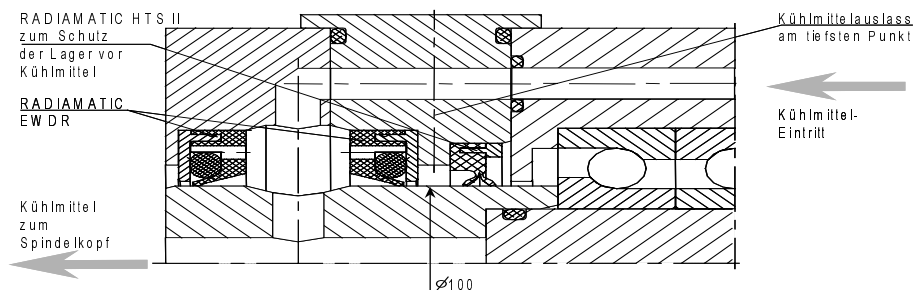


Bild 11: RADIAMATIC EWDR in der Drehdurchführung einer Werkzeugmaschinen­spindel (1,4 MPa, 3000 1/min)

Bei diesen Eigenschaften sind die Einsatzmöglichkeiten des RADIAMATIC EWDR vor allem in Drehdurchführungen für Kühlmittel und hydraulische Steuerflüssigkeiten, **Bild 11**, in Pumpen und Verdichtern sowie als Sicherheits- oder Sperrdichtung in Ergänzung zu Gleitringdichtungen, **Bild 12**. Bild 11 zeigt den erfolgreichen Einsatz des RADIAMATIC EWDR in der Drehdurchführung einer Werkzeugmaschinen­spindel. Kühlmittel wird unter Druck durch das Spindelgehäuse über die Drehdurchführung in die rotierende Spindel geführt. Von dort tritt das Kühlmittel am Werkzeug aus. Kühlmitteldruck (1,4 MPa) und Spindeldrehzahl (3000 1/min bei Wellendurchmesser 100mm) treten gleichzeitig auf. Besonders geeignet ist der RADIAMATIC EWDR in Drehdurchführungen mit mehreren Kanälen. Geringer Bauraum und niedrige Reibleistung sind in diesem Fall ausschlaggebende Vorteile.

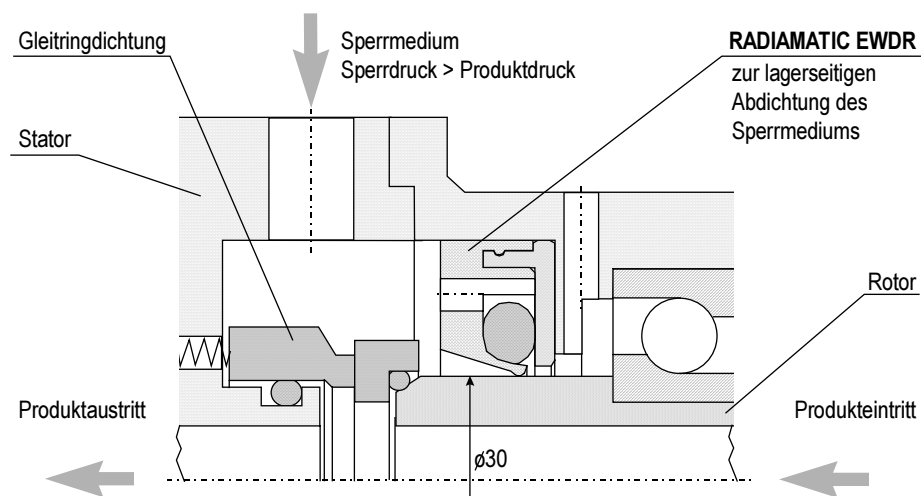


Bild 12: RADIAMATIC EWDR als Sicherheitsdichtung
in Ergänzung zu Gleitringdichtungen

7 Zusammenfassung

Durch die Zusammenarbeit zwischen Universität und Dichtungshersteller ergänzten sich die Erfahrungen und Arbeitsmethoden bei der Entwicklung einer patentierten druckbelastbaren Radialdichtung, dem RADIAMATIC EWDR. Modernste Berechnungsverfahren wie die Finite-Element-Analyse, neuste Erkenntnisse über das Werkstoffverhalten von PTFE-Compounds wie der Plastic-Memory-Effect, Neuentwicklungen und bewährte Funktionsprinzipien wie die Gestaltung des Metallkäfigs fanden Eingang in die Funktions-, Fertigungs- und Montageoptimierung. Das Ergebnis systematischer Analyse und konsequenter Umsetzung der ermittelten Gestaltungsrichtlinien ist ein innovatives Produkt mit einem wesentlich erweiterten Leistungsspektrum. So wird auch in Zukunft eine enge Zusammenarbeit auf dem Gebiet dichtungstechnisch relevanten Fragen einen Nutzen für die Universität, den Dichtungshersteller und vor allem für den Anwender bringen.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ Olbrich, M.; Haas, W.: Betriebsverhalten druckbelastbarer Polymer-Wellendichtungen. Antriebstechnik 36 (1997) Nr.1.
- /2/ Heine, S.: Ein Beitrag zur Abdichtung der Kurbelwelle von KFZ-Motoren mit technischem Kunststoff (Thermoplast). X. Internationales Dichtungskolloquium, Steinfurt: 22./23. April 1997.
- /3/ Pohl, H.; Schomburg, U.: Parameterstudie an PTFE-Manschetten. X. Internationales Dichtungskolloquium, Steinfurt: 22./23. April 1997.
- /4/ Kitazawa, K.: Criteria for Outward Curling of Tubes. Journal of Engineering for Industry, November 1993, Vol. 115.
- /5/ Müller, H.K.: Abdichtung bewegter Maschinenteile. Medienverlag Ursula Müller, Waiblingen, 1990.
- /6/ Schutzrechte: DE 3616689 C1(Dichtungsanordnung); EP 0 268 624 B1; US 4,889,349.
- /7/ Wäschle, P.; Müller, H.K.: PTFE-Shaft Seal for Higher Pressures. 13th Int. Conf. On Fluid Sealing; Brügge, Belgium: 7-9 April 1992; BHRA; S. 685-692.
- /8/ Wüstenhagen, G.: Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings. Dissertation 1995. Universität Stuttgart, Institutsbericht Nr. 59.
- /9/ Schlingmann, K. H.: Praktisch keine Leckage. Chemie Anlagen Verfahren. Januar 1994.