



Autoren: Prof. Dr.-Ing. Heinz K. Müller und Dr. Bernard S. Nau

Eine besondere Herausforderung an den Ingenieur ist eine sichere Abdichtung von Maschinen und Anlagen. Wenn es um den unerwünschten Austritt von Flüssigkeiten oder Gasen aus Maschinen, Aggregaten und Anlagen geht, wird die häufig unterschätzte Kunst des Abdichtens zum zentralen Thema.

www.fachwissen-dichtungstechnik.de befasst sich auf allen Ebenen mit dem Vermeiden oder mit der kontrollierten Eindämmung von Leckage. In 24 Fachkapiteln werden die physikalischen Grundlagen und die vielfältigen Techniken des Abdichtens in klarer Sprache und mit prägnanten Bildern beschrieben. **fachwissen-dichtungstechnik** liefert damit die notwendigen Informationen zu Gestaltung, Auswahl, Entwicklung und Betrieb von Dichtungen und Dichtsystemen.

Inhaltsverzeichnis der Fachkapitel

Allgemeine Grundlagen

1. Grundbegriffe der Dichtungstechnik
2. Polymerwerkstoffe
3. O-Ring: Theorie und Praxis
4. Fluidströmung im engen Dichtspalt

Abdichtung bewegter Maschinenteile

5. Hydraulikdichtungen
6. Pneumatikdichtungen
7. Abstreifer
8. Wellendichtringe ohne Überdruck
9. Wellendichtringe mit Überdruck
10. Fanglabyrinth-Dichtungen
11. Stopfbuchs-Packungen
12. Gleitringdichtungen: Grundlagen

13. Gleitringdichtungen: Gestaltung
14. Gleitringdichtungen: Werkstoffe
15. Kolbenringe für Motoren und Verdichter
16. Drosseldichtungen für Flüssigkeiten
17. Drosseldichtungen für Gase
18. Gewinde-Wellendichtungen
19. Zentrifugal-Wellendichtungen
20. Magnetflüssigkeits-Dichtungen
21. Membran- und Faltenbalgdichtungen

Abdichtung ruhender Maschinenteile

22. Flanschabdichtung: Grundlagen
23. Flanschdichtungen: Bauformen
24. Statische Dichtungen: Sonderbauformen

Sponsoren: www.fachwissen-dichtungstechnik.de wird unterstützt von

 ISGATEC [®] Dichten. Kleben. Polymer.	ISGATEC GmbH Am Exerzierplatz1A • 68167 Mannheim Tel:+49(0)621-7176888-0 • Fax:+49(0)621-7176888-8 info@isgatec.com • www.isgatec.com
 SEALWARE [®]	SEALWARE International Dichtungstechnik GmbH Feldbergstr.2 • 65555 Limburg Tel:+49(0)6431-9585-0 • Fax:+49(0)6431-9585-25 info@sealware.de • www.sealware.de
 VERBAND TECHNISCHER HANDEL Fachgruppe Dichtungstechnik	VTH Verband Technischer Handel e.V. Prinz-Georg-Straße 106 • 40479 Düsseldorf Tel:+49(0)211-445322 • Fax:+49(0)211-460919 info@vth-verband.de • www.vth-verband.de
 Xpress seals Dichtungen für Hydraulik	xpress seals GmbH Elbring 14 • 22880 Wedel Tel:+49(0)4103 92828-10 • Fax:+49(0)4103 92828-69 michael.mueller@xpress-seals.com • www.xpress-seals.com



9

Prof.Dr.-Ing. Heinz K. Müller · Dr. Bernard S. Nau

Wellendichtringe mit Überdruck

Allgemeine Anforderungen, prinzipielle Gestaltung der Dichtzone; Elastomer-Radialdichtungen; PTFE-Radialdichtungen; Reibleistung; Druckentlastete Wellendichtringe; Wellenauflfläche, Verschleiß, Vergleich der Reibung verschiedener Bauarten. Literatur.

9.1 EINFÜHRUNG

Wenn der Druck des abzudichtenden Fluids höher ist als 1 MPa (10 bar), werden zumindest bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten in der Regel Gleitringdichtungen verwendet. Diese sind in den *Kapiteln 12 bis 14* behandelt. Im Hinblick auf die Kosten oder den Einbauraum sind die Konstrukteure oft auch an druckbelastbaren Radialdichtungen interessiert. Besonderer Bedarf für bauraumsparende Wellendichtungen besteht bei rotierenden Fluidübertragern, Kompressoren, Mischern, rotierenden Hydraulikpumpen und für Notdichtsysteme von Pumpen in der Verfahrenstechnik. In diesem Kapitel werden die Grundlagen und einige Ausführungen von druckbelastbaren Wellendichtringen behandelt.

9.2 GRUNDSÄTZLICHE ÜBERLEGUNGEN

Bild 1 auf Seite 2 veranschaulicht die charakteristischen Betriebsbedingungen und Anforderungen für druckbelastete Wellendichtringe. Die Dichtung muß radialen Wellenbewegungen leichtgängig folgen können. Da in der Praxis Wellen weder ganz rund sind noch genau um ihr Zentrum rotieren, muß der Dichtring im Bereich des Dichtspalts radialen Schwingbewegungen der Wellenoberfläche folgen können, ohne daß sich der Spalt dabei vergrößert. Der Dichtspalt wird wesentlich von der Feingeometrie der Wellenauflfläche bestimmt und sollte nicht größer als einige Zehntel Mikrometer sein. Praktisch muß aber mit einem radialen Versatz und mit Schwingbewegungen der Wellenachse von hundert Mikrometer und mehr gerechnet werden. Die Dichtung muß deshalb *leichtgängig radialbeweglich* sein. Sind die Gleitflächen breit, so entsteht ein Wärmestau, und die Dichtfläche kann sich überhitzen. Je breiter die Berührfläche, desto höher wird die Temperatur in ihrer Mitte.

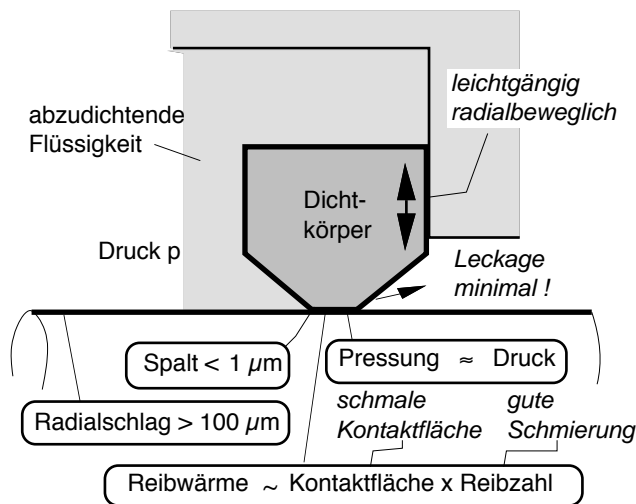


Bild 1
Druckbelastbare
Radialdichtung

Gegebenheiten / Anforderungen

Während ein aus Sinterkohle bestehender Dichtring einer Gleitringdichtung bei 250°C ohne weiteres funktionsfähig bleibt, versagt bei dieser Temperatur eine Elastomerdichtung bereits nach kurzer Zeit und auf Dauer selbst ein PTFE-Werkstoff. Eine möglichst *geringe Reibleistungsdichte* und eine *schmale Kontaktfläche* sind somit wichtige Kriterien für die Betriebssicherheit. Um den Verschleiß klein zu halten, müssen die Gleitflächen *gut geschmiert* sein. Ideal wäre eine völlige hydrodynamische Trennung, aber je dicker der Schmierfilm ist, desto größer ist die Leckage. Deshalb muß ein Kompromiß zwischen Dichtheit und Verschleiß gefunden werden.

Die Dichtflächen werden durch eine übermaßbedingte Vorspannung, und in der Regel zusätzlich durch den Flüssigkeitsdruck, aneinander gepreßt. Die Dichtpressung sollte aber nicht größer sein, als zum sicheren Zuhalten des Dichtspalts erforderlich ist. Besonders bei hohem Druck ist es wichtig, den Dichtkörper hydrostatisch zu *entlasten*. Bild 2 veranschaulicht dieses Prinzip der Druckentlastung. Die Anpressung der Dichtkante durch den Flüssigkeitsdruck ist um so kleiner, je weniger der Druck sie von außen radial anpreßt. Dies ist dann der Fall, wenn die Dichtkante möglichst nahe am niederdruckseitigen Ende des Dichtkörpers liegt. Letztlich bestimmt der Abstand *a* die Größe der vom Flüssigkeitsdruck belasteten Wirkfläche.

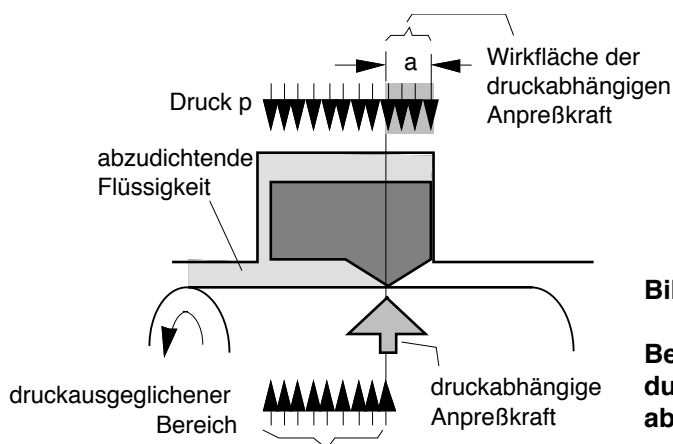


Bild 2

Belastung der Dichtkante
durch den Druck p der
abdichtenden Flüssigkeit

9.3 ELASTOMER - RADIALDICHTUNGEN

Bild 3 zeigt zwei handelsübliche druckbelastbare Elastomer-Wellendichtungen. Um die Anpresswirkung des abzudichtenden Drucks so klein wie möglich zu machen, ist beim Wellendichtring nach Bild 3(a) der Abstand zwischen Dichtkante und Versteifungsring wesentlich kleiner als beim nicht druckbelastbaren Radial-Wellendichtring (s. Kapitel 8). Trotzdem wird die Dichtlippe bei höherem Druck stark abgeplattet. Bei 10 bar ist die Kontaktfläche schon breiter als 1,5 mm, also etwa 10mal so breit wie beim Radial-Wellendichtring. Neben erhöhter Reibung verändert das auch die Pressungsverteilung und somit den Rückfördermechanismus. Deshalb wurde gemäß Bild 3(b) eine angepasste Dichtlippenkontur vorgeschlagen, bei der die Dichtlippe auf der Luftseite eine Hohlkehle aufweist, Bock *et.al.* (2002). Diese Formgebung nimmt sozusagen den erhöhten Verschleiß vorweg, der bei herkömmlicher Formgebung wegen Mangelschmierung der luftseitigen Kontaktfläche entsteht.

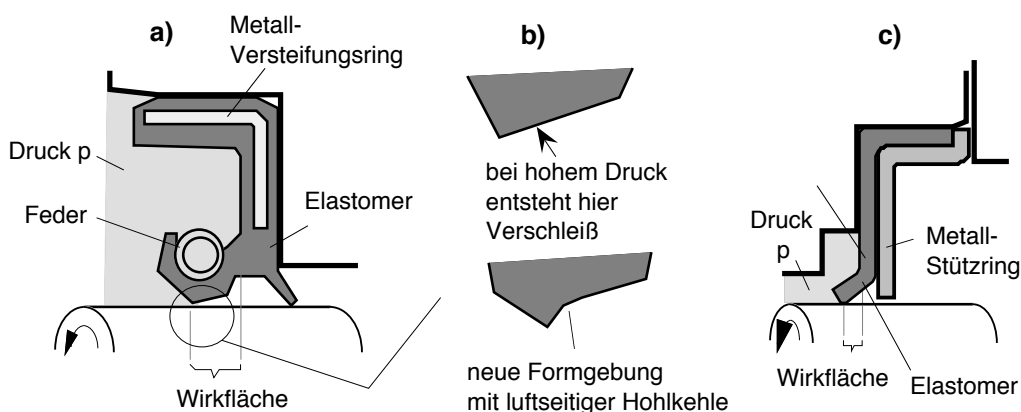


Bild 3 Druckbelastbare Elastomer-Lippendichtungen

Die raumsparende federlose Lippendichtung nach Bild 3(c) hat ebenfalls eine kleine Druckwirkfläche. Um Extrusion zu vermeiden, muß der Spalt zwischen dem Metallstützring und der Welle so klein wie möglich sein. Da keine Anpreßfeder vorhanden ist, muß stets eine ausreichende Spannung im Elastomer vorhanden sein. Kritisch ist somit eine zeitweilig drucklose Betriebsphase nach wärmebedingter Relaxation des Elastomers.

Im zulässigen Leistungsbereich ist mit den Wellendichtringen nach Bild 3 ein leckagefreier Betrieb möglich, zumindest ist ihre Leckage kleiner als die von PTFE-Radialdichtungen. Die Hersteller geben für Dichtungen nach Bild 3 einen zulässigen Druckbereich bis ca. 1 MPa an, wobei die tatsächliche Leistungsgrenze vom Elastomer, vom Wellendurchmesser und von der Gleitgeschwindigkeit abhängt. Wichtig ist auch die Wärmeableitung von der Dichtfläche. Die Grenzen für Druck und Drehzahl sind höher, wenn die abzudichtende Flüssigkeit kühlend an der Dichtlippe vorbeiströmt.

9.4 PTFE - RADIALDICHTUNGEN

Radialdichtungen aus PTFE haben gegenüber Elastomerdichtungen zwei wesentliche Vorteile. Erstens hat eine PTFE-Gleitfläche eine feinerklüftete Struktur, die die hydrodynamische Schmierung begünstigt, und zweitens erträgt PTFE höhere Temperaturen. Bild 4 zeigt zwei PTFE-Manschettenringe. Die bei der Herstellung zunächst scheibenförmigen Dichtkörper sind auf der Welle manschettenartig ausgestülpt und durch Übermaß radial vorgespannt. Erwärmt sich die Dichtlippe im Betrieb, so nimmt ihre Anpressung durch Wärmedehnung ab. Dem entgegen wirkt der „Plastic-Memory-Effekt“, durch den sich der PTFE-Werkstoff bei Erwärmung in Richtung seiner ursprünglichen Gestalt zurück verformt. Bei zunehmendem Druck nimmt die Dichtpressung und zugleich auch die axiale Berührbreite der Manschetten-dichtungen zu.

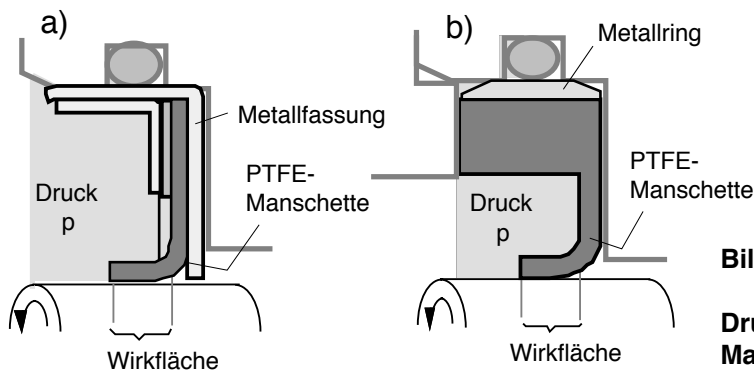


Bild 4

Druckbelastbare PTFE -
Manschetten-dichtungen

9.5 LECKRATEN VON DRUCKBELASTETEN ELASTOMER- UND PTFE-RADIALDICHTUNGEN

In ausgedehnten Laboruntersuchungen wurde bei 1 MPa, Wellen-Ø 50 mm, Drehzahl 1000 min⁻¹ ($v=2,6$ m/s) der zeitliche Verlauf der Ölleckage von jeweils 15 Radialdichtungen aus Fluorpolymer (FKM) nach Bild 3(a), und PTFE-Manschetten-dichtungen nach Bild 4(a) von je sechs verschiedenen Herstellern auf gehärteten und im Einstich geschliffenen Stahlwellen ($R_a=0,2\mu\text{m}$, $R_z=2\mu\text{m}$) gemessen. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

Die FKM-Radialdichtungen waren ca. 1000 Stunden lang dicht, danach begann Leckage, die bis ca. 3000 Stunden auf einen nahezu gleichbleibenden Wert zunahm ($\approx 0,2$ g/h). Die PTFE-Manschetten zeigten von Anfang an Leckage (im Mittel 0,4 g/h), die danach kontinuierlich auf ca. 0,1 g/h abnahm. Beide Dichtungstypen hatten über lange Zeit mittlere Leckraten im Bereich 0,3 g/h. Nach 3600 Stunden überschritt die erste FKM-Radialdichtung eine Leckrate von 1g/h, die erste PTFE-Manschette bereits nach 1600 h. Nach 5000 h hatten 30% der FKM-Radialdichtungen und 50% der PTFE-Manschetten eine Leckrate von mehr als 1 g/h. Ursache für die Leckage war bei den Elastomerdichtungen der Verlust des Rückfördervermögens durch



thermisch bedingte Ablagerungen von Ölkohle. Bei den PTFE-Dichtungen war der Anstieg der Leckage auf Verschleiß zurückzuführen. Die PTFE-Manschetten verschiedener Hersteller zeigten beträchtliche Unterschiede. Offenkundig spielt das PTFE-Compund eine entscheidende Rolle. Jeweils zwei Dichtungen jeder Bauart überstanden 10 000 Betriebsstunden mit Leckraten von weniger als 1g/h. Bei kleinerem Druck und/oder kleinerer Gleitgeschwindigkeit sind bei FKM-Dichtungen längere Betriebszeiten ohne Leckage zu erwarten. Das Thema Leckage von druckbelasteten PTFE-Wellendichtringen wird später noch ausführlicher erörtert.

9.6 RADIALDICHTUNGEN MIT „ONDULIERTEN“ DICHTFLÄCHEN:

Bei herkömmlichen Radialdichtungen fließt die Reibwärme hauptsächlich über die Welle ab. Die Welle schleppt kaum kühlende und schmierende Flüssigkeit in den Dichtspalt. Mit einem konstruktiven Trick kann dieses Problem entschärft werden. Bild 5(a) zeigt einen O-Ring, der sich niederdruckseitig auf einem in Umfangsrichtung welligen Metallring abstützt. Wird der O-Ring durch einen zweiten welligen Ring und / oder vom abzudichtenden Druck axial deformiert, so nimmt er eine in Umfangsrichtung wellige („ondulierte“) Form an. Nun schleppt die rotierende Welle Flüssigkeit in den Dichtkontakt. Dabei bildet sich ein verhältnismäßig dicker Schmierfilm und dadurch auch eine beträchtliche Leckrate, die jedoch eventuell toleriert werden kann, wenn die Dichtung beispielsweise zwei Ölräume unterschiedlichen Drucks trennt. Ist keine Leckage zulässig, so kann außenseitig hinter dem ondulierten O-Ring zusätzlich ein Radial-Wellendichtring vorgesehen und die Leckage aus dem Zwischenraum abgeleitet werden. Ein ondulierter Dichtring überstreicht auf der Welle eine Fläche, die größer ist als die Kontaktfläche zwischen Dichtring und Welle. Teile der Gleitfläche werden also von der abzudichtenden Flüssigkeit periodisch überflutet und gekühlt.

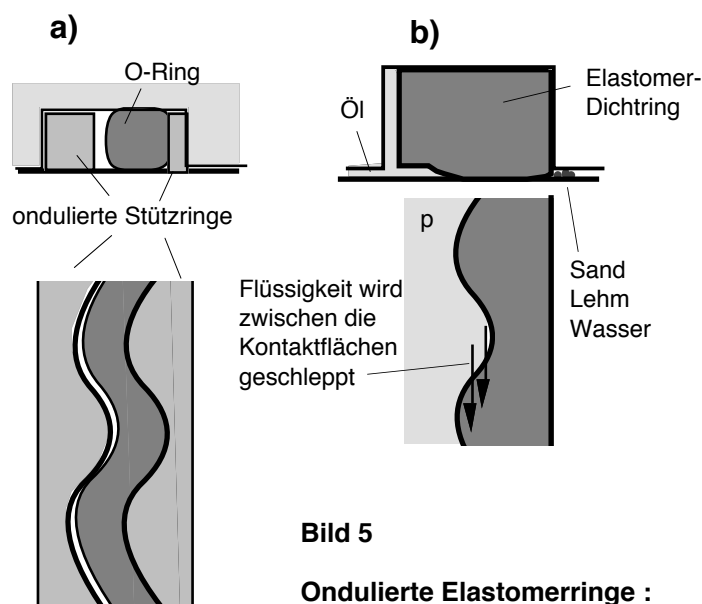


Bild 5

**Ondulierte Elastomerringe :
Verbesserte Schmierung und Kühlung**



Die Elastomerdichtung nach Bild 5(b) besteht aus einem Dichtring (Kalsi-Seal®) mit ungefähr rechteckförmigem Querschnitt, der am inneren Umfang auf der einen Seite eine ondulierende Dichtkante, auf der anderen Seite eine glatte Kante aufweist. Ein besonderer Einsatzbereich dieser Dichtung ist die Abdichtung ölgefüllter Räume von Erdöl-Bohrgeräten gegenüber einer stark mit erosiven Partikeln beladenen Spülflüssigkeit. In großer Wassertiefe steht die Dichtstelle beidseitig unter hohem Druck. Der wellige Dichtrand ist dabei der Ölseite zugekehrt, der glatte der erosiven Flüssigkeit. Auf der Ölseite vermindert ein hydrodynamischer Schmierfilm die Reibung.

9.7 REIBLEISTUNG VON RADIALDICHTUNGEN

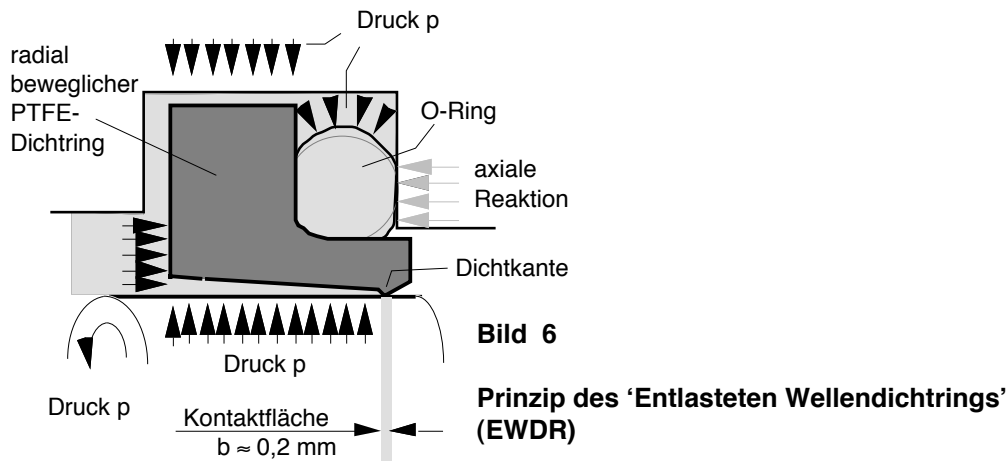
Fluor-Elastomere sind auf Dauer bis etwa 160°C, PTFE-Werkstoffe bis knapp über 200°C beständig. Um mit Radialdichtungen zugleich eine höhere Gleitgeschwindigkeit und höheren Druck beherrschen zu können, bedarf es weiterer Überlegungen hinsichtlich der zu erwartenden Reibleistung. Um insgesamt möglichst wenig Reibwärme zu erzeugen, müssen die gleitenden Dichtflächen so schmal wie möglich sein. Erfahrungsgemäß kann bei druckbelasteten Radialdichtungen eine zuverlässige Abdichtung bereits mit einer Dichtflächenbreite von $b = 0,15 \dots 0,2$ mm erreicht werden. Die auf die Gleitdichtfläche $A = \pi \cdot d \cdot b$ bezogene Reibleistung P wird als *Reibleistungsdichte* bezeichnet, wobei d der mittlere Durchmesser der Gleitdichtfläche ist. Die Reibleistungsdichte ergibt sich als Produkt aus Reibungszahl f , Dichtflächenpressung p_d und Umfangsgeschwindigkeit u

$$P/A = P / (\pi \cdot d \cdot b) = f \cdot p_d \cdot u$$

Um ein hydrostatisches Abheben der Gleitdichtflächen zu vermeiden, muß die mittlere Dichtflächenpressung p_d am gesamten Umfang mindestens so groß sein wie der abzudichtende Druck p . Die Reibungszahl f gleitender Dichtflächen hängt von vielen tribologischen Einflüssen ab. Dies sind unter anderem die Werkstoffe und die Oberflächenstruktur der Gleitpartner, die Eigenschaften der Flüssigkeit, die Temperatur sowie Abriebteilchen und Fremdpartikel im Dichtspalt. Da sich manche Einflußgrößen fortwährend verändern ist ihr Zusammenspiel komplex. Für die Reibungszahl kann deshalb allenfalls ein Bereich abgeschätzt werden. PTFE bildet zusammen mit den eingelagerten Füllstoffen eine mikroskopisch zerklüftete Kontaktfläche, an deren Rauheitserhebungen sich elasto-hydrodynamische Druckfelder bilden. Erfahrungsgemäß muß nach dem Einlauf bei PTFE-Dichtungen mindestens mit einer Reibungszahl $f = 0,1$ gerechnet werden. Damit ergibt sich rechnerisch beispielsweise bei $p = 3$ MPa und $u = 9$ m/s ($\varnothing 50$ mm; $n=3000$ min⁻¹) für PTFE-Dichtungen eine Reibleistungsdichte von ca. 270 W/cm². Bei Elastomerdichtungen ist die Reibungszahl mindestens doppelt so groß wie bei PTFE-Dichtungen, was unter denselben Betriebsbedingungen eine Reibleistungsdichte von >540 W/cm² (!) ergäbe. Elastomer-Radialdichtungen sind deshalb unter solchen Bedingungen *nicht anwendbar*, sie würden spontan verbrennen.

9.8 DER ENTLASTETE WELLENDICHTRING (EWDR)

Bei einer PTFE-Radialdichtung entsteht bereits bei der Montage durch das Übermaß und wegen des großen E-Moduls eine verhältnismäßig hohe Dichtflächenpressung. Man kann deshalb zunächst fragen, ob eine zusätzliche druckabhängige Anpressung der Dichtflächen überhaupt notwendig ist. Erfahrungsgemäß lautet die Antwort, daß bei richtig konstruierten PTFE-„Dichtkantenringen“ die *vorspannungsbedingte* Dichtpressung *ohne zusätzliche Anpressung* bis zu einem abzudichtenden Druck von mindestens 3 MPa ausreicht. Bei radialen Wellendichtungen mit hoher Vorpressung ist deshalb eine mit dem Druck zunehmende Dichtpressung überflüssig, im Hinblick auf die Reibungswärme ist sie geradezu schädlich. Die Leistungsgrenze von PTFE-Dichtungen kann somit beträchtlich erhöht werden, wenn es gelingt, die vom Flüssigkeitsdruck bewirkte Anpressung der Dichtlippe erheblich zu reduzieren. Mit dem Ziel, einen Dichtkantenring mit minimaler Druck-Wirkfläche zu schaffen, entwickelte der Verfasser den so genannten *Entlasteten Wellendichtring* (EWDR), dessen Wirkprinzip in Bild 6 dargestellt ist.



Ein radial beweglich gelagerter PTFE-Dichtring berührt die Welle mit einer angeformten Dichtkante und stützt sich axial auf einem Elastomer-O-Ring ab. Der O-Ring überträgt den Fluiddruck von außen auf den Dichtring, zugleich dringt der Druck entlang der Welle bis zur Dichtkante vor und entlastet diese von innen.

Bild 7 zeigt zwei EWDR-Kassettdichtungen. Die Kassette nach Bild 7(a) entspricht im Wesentlichen einer umgekehrt eingebauten, herkömmlichen PTFE-Manschettendichtung mit einem zusätzlichen Winkelring und einem dazwischen eingelegten O-Ring. Bei der industriell weiterentwickelten Ausführung [RADIAMATIC EWDR ®] nach 7(b) ist in den PTFE-Ring ein Metallring eingepreßt, der die niederdruckseitige Nutwand bildet. Als Anwendungsgrenzen werden für diese Radialdichtung angegeben: Flüssigkeitsdruck bis 3 MPa; Umfangsgeschwindigkeit bei 1 MPa bis 20 m/s; Temperatur -20°... 200° C; Chem. Beständigkeit entsprechend dem Fluor-Elastomer des O-Rings; Welle 50...65 HRC (je nach Werkstoffpaarung), im Einstich geschliffen, Ra < 0,3 µm.

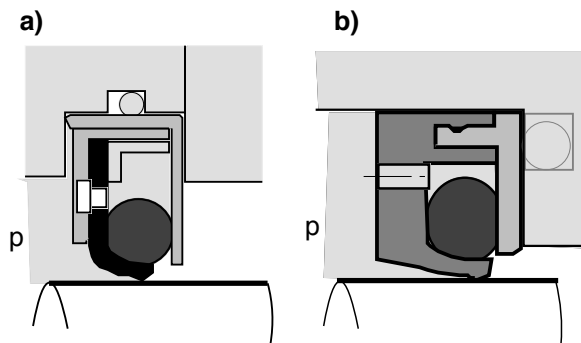


Bild 7

EWDR -Kassettendichtungen

Bild 8 zeigt eine Anordnung mit zwei EWDR-Kassetten zur Fluideinspeisung in ein rotierendes System (Kühl- bzw. Druckflüssigkeit).

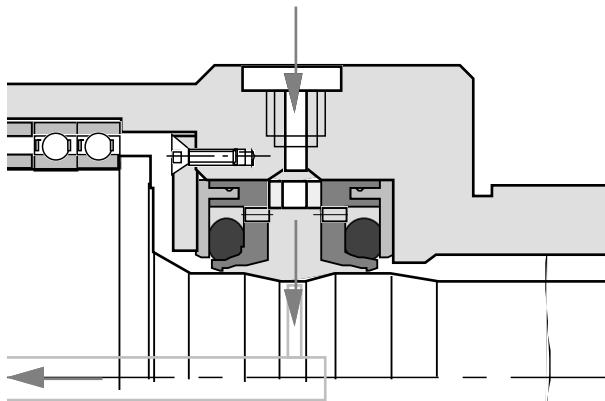


Bild 8

Fluideinspeisung in ein rotierendes System mit zwei Entlasteten Wellendichtringen aus PTFE

Verdrehsicherung : Grundsätzlich muß jeder Wellendichtring gegen Mitdrehen gesichert werden. Die Dichtung versagt, wenn der Dichtring durch die Reibung am Dichtkontakt von der Welle mitgerissen wird. Dies kann bei einer PTFE-Dichtung passieren, wenn sich der Dichtring durch die Reibung erwärmt und zugleich der nach innen wirkende Fluidruck die Wärmedehnung des PTFE-Werkstoffs verhindert. Dies führt quasi zu einer Rückschrumpfung des Dichtrings, so daß dieser nach dem Erkalten die Welle mit einer Radialkraft umspannt, die größer ist als die anfängliche Radialkraft. Deshalb muß in jedem Fall der Dichtring gegen Mitdrehen gesichert werden, z.B. durch einen gehäusefesten Stift . Ein fest ins Gehäuse eingepreßter Wellendichtring (z.B. nach Bild 7) ist in der Regel durch Haftreibung ausreichend gegen Mitdrehen gesichert.

Leckage von PTFE-Wellendichtringen

Oft entsteht Verwirrung, wenn die Anwender von druckbelasteten Wellendichtungen mit dem Wort Leckage konfrontiert werden. Bei modernen Elastomer- oder PTFE-Wellendichtringen an Kurbel- und Getriebewellen ist man leakagefreie Abdichtung gewohnt. Diese Dichtungen laufen aber drucklos, sind selten ganz überflutet, vielmehr oft nur mit Öl bespritzt. Diese



Erfahrungen führen dann zu unerfüllbaren Erwartungen hinsichtlich der viel schwierigeren Aufgabe, unter höherem Druck stehende Flüssigkeiten abzudichten. Zwar können im Prinzip Rückförderelemente in ein Wellendichtsystem integriert werden (s. Kapitel *Gewindewellendichtungen, Gleitringdichtungen*), jedoch beansprucht dies in der Regel einen beträchtlichen zusätzlichen Bauraum. Drucklos abdichtende Radial-Wellendichtringe, und auch druckbelastete Elastomer-Wellendichtringe nach Bild 3 dichten in ihrem Arbeitsbereich bis ca. 1 MPa ohne Leckage dank einer (in *Kapitel 8* beschriebenen) selbsttätigen Rückförderwirkung. Bei druckbelasteten PTFE-Wellendichtringen ist es bislang nicht gelungen, in die Kontaktfläche des Dichtrings eine zuverlässige Rückförderwirkung zu integrieren. Auch sind definiert wirkende mikroskopische Förderstrukturen auf der Wellenoberfläche bislang weder herstellbar noch beständig.

Technisch optimale Dichtheit wird bei einer PTFE-Radialdichtung mit schmaler Berührfläche (z.B. EWDR) dann erreicht, wenn die Dichtflächen nach dem Einlauf möglichst glatt sind und zugleich hinreichend angepreßt werden, so daß im Zustand elasto-hydrodynamischer Schmierung der kleinstmögliche Dichtspalt entsteht. Wenn die Dichtflächen aufeinander gleiten, bildet sich eine mittlere Spalthöhe von der Größenordnung der Rauheit bzw. Welligkeit der Dichtflächen, praktisch sind das einige Zehntel Mikrometer. Flüssigkeitsmoleküle sind jedoch von der Größenordnung Nanometer. Das bedeutet, daß im Dichtspalt viele Molekülschichten Platz finden. Für die Schmierung ist dies günstig und auch erforderlich, aber zugleich bewirkt ein hohes Druckgefälle, daß Flüssigkeitsmoleküle sich im Spalt von der Hochdruckseite zur Niederdruckseite bewegen um schließlich als Leckage auszutreten.

Man kann die mindestens zu erwartende Leckrate grob abschätzen, indem man eine mittlere Spalthöhe von 0,2...0,3 µm annimmt. Tatsächlich ist der Spalt sehr „unruhig“, er verändert sich innerhalb der angenommenen Größenordnung andauernd, zeitlich und örtlich. Dennoch kann man die zu erwartende volumetrische Leckrate Q mit einer Formel abschätzen, die eigentlich nur für einen konzentrischen glatten Ringspalt gilt (s. *Kapitel 4, S.20*):

$$Q = \frac{\pi d \Delta p h^3}{12 \eta b}$$

Berechnet man damit die Leckrate beispielsweise für folgende Parameter: Wellen-Ø $d=50$ mm, axiale Spaltbreite $b=0,2$ mm, Spalthöhe $h=0,2...0,3$ µm, Druckdifferenz $\Delta p=3$ MPa, Viskosität $\eta=10$ mPas (Schmieröl bei 80...100°C), so ergibt sich eine Leckrate zwischen 0,6 und 2 cm³/h. In der Praxis wurden bei der Abdichtung von Schmieröl im Druckbereich 2...3 MPa bei einem EWDR Leckraten von 1...2 g/h gemessen. Bei der Abdichtung von Wasser würde man eine so kleine Leckage nicht erkennen, weil sie durch die Reibungswärme verdampfte.

Auch im *Kapitel 12* (Gleitringdichtungen) wurde dargelegt, daß und weshalb man mit Leckraten von mindestens einigen Gramm pro Stunde rechnen muß. Schon geringfügige Verformungen der Dichtflächen können die Leckage drastisch erhöhen. Falls diese prinzipiell unvermeidbare Leckage nicht in die Umgebung gelangen darf müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. Die Leckage kann durch Mehrfachabdichtung in einem Sperrkammersystem und/oder



mit zusätzlichen Rückförderelementen zurückgehalten und abgeleitet werden. Dies erfordert aber mehr Bauraum und meist einen wesentlich höheren Aufwand. Beispiele dazu findet man ebenfalls in *Kapitel 12*

9.9 WERKSTOFFPAARUNG - VERSCHLEISS - DICHTHEIT

Ein wesentliches Kriterium für die Gebrauchsdauer einer PTFE-Radialdichtung ist einerseits die Verschleißfestigkeit von Dichtung und Gegenlauffläche und andererseits deren Konformität nach dem Einlauf. Grundsätzlich verschleißt sowohl das PTFE-Compound als auch die Wellenoberfläche. Neuere Untersuchungen zeigten, daß es dabei weniger auf die absolute Härte der Wellenoberfläche als vielmehr auf deren *Bearbeitung* und auf eine geeignete *Paarung* von Dichtungs- und Wellenwerkstoff ankommt. Untersucht wurden verschiedene PTFE-Compounds mit den Füllstoffen Kokskohlepulver, Kohlefaser, Glasfaser sowie verschiedenen proprietären PTFE-Kunststoffgemischen im Kontakt mit gehärteten Stahlwellen und mit unterschiedlichen keramischen Beschichtungen. Tribologisch ideal ist eine sehr harte Wellenlauffläche mit leicht *welligen*, überwiegend *plateauartigen* Bereichen, bei der die Kanten der angeschnittenen *Porenkrater abgerundet* sind. Letzteres erfordert jedoch einen sehr hohen Fertigungsaufwand.

Als brauchbarer Kompromiß erwies sich die Paarung einer gehärteten, feingeschliffenen Stahlwelle mit Dichtungen aus einem PTFE- Kokskohle-Compound. Günstiger sind Spritzschichten aus Chromoxid (Cr_2O_3) im Kontakt mit speziellen PTFE/Kunststoff-Compounds, die toleranter gegenüber der Wellenbearbeitung sind, aber ebenfalls ein mindestens zweistufiges Feinschleifen mit Diamantschleifscheiben (D 76 / D 30) erfordern. Die Porenkrater von Cr_2O_3 -Laufflächen könnten prinzipiell durch zweistufiges „Weichpolieren“ mit $15\mu\text{m}/3\mu\text{m}$ -Diamantsuspension abgerundet werden, jedoch gibt es für eine derartige Bearbeitung von Wellenoberflächen bislang noch kein geeignetes industrielles Verfahren.

Bei Dichtungen zählt jedoch nicht allein die Verschleißbeständigkeit sondern vor allem eine möglichst kleine Leckage. Allgemein nimmt die Leckage zu, wenn sich an der Kontaktfläche des Dichtkörpers durch selektiven Verschleiß (Auswaschen von PTFE oder Füllstoffanteilen) zwischen harten, eingelagerten Fasern ein „Labyrinthspalt“ bildet. Hier ist es ratsam, sich die Erfahrungen der Hersteller von proprietären PTFE-Compounds zunutze zu machen.

9.10 REIBUNG VERSCHIEDENER RADIALDICHTUNGEN

Bild 9 zeigt die bei der Abdichtung von Öl im Labor gemessene Reibung verschiedener druckbelasteter Wellendichtungen. Um eine Umrechnung auf andere Wellendurchmesser zu vereinfachen, zeigt das Diagramm die tangentielle Reibkraft F_r einer Dichtung pro Meter Umfang $\varphi = F_r / (\pi \cdot d)$. Das Reibmoment einer Dichtung ist $M = 0,5 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \varphi$.

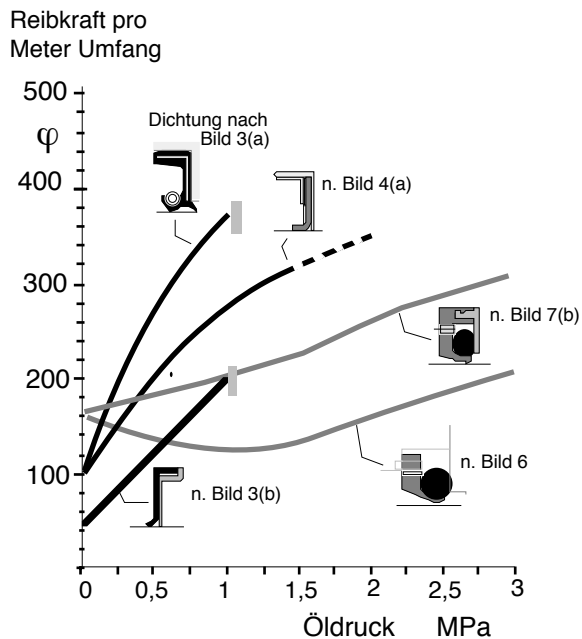


Bild 9
Reibung verschiedener Radialdichtungen in Abhängigkeit vom Öldruck

Für die Reibleistung ergibt sich $P = \pi \cdot d \cdot \varphi \cdot v$, wenn die Dichtung auf dem Durchmesser d mit der Geschwindigkeit v gleitet.

Bei einem Druck $< 0,5$ MPa hatte der federlose Elastomer-Lippenring entsprechend Bild 3(b), die kleinste Reibung von allen untersuchten Dichtungen. Im Bereich zwischen 0,5 und 1 MPa lag die Reibung dieses Dichtrings im selben Bereich wie die der Entlasteten Wellendichtringe (EWDR). Die herkömmlichen druckbelastbaren Wellendichtringe nach den Bildern 3(a) und 4(a) hatten hingegen bereits bei $p < 0,25$ MPa eine deutlich höhere Reibung als alle anderen Dichtungen. Die Reibleistung eines federangepreßten Elastomer-Wellendichtrings ist bei 0,26 MPa bereits so groß wie die einer EWDR-Kassettendichtung bei 3 MPa. Bemerkenswert ist der verhältnismäßig flache Reibungsverlauf der Entlasteten Wellendichtringe. Die beiden EWDR-Anordnungen (s. Bilder 6 und 7(b)) zeigen in Bild 9 in Abhängigkeit vom Druck einen unterschiedlichen Reibungsverlauf. Dies hängt mit der unterschiedlichen axialen Beweglichkeit ihrer PTFE-Dichtkörper zusammen.

Die im Bild 9 angegebenen Reibungswerte sind nur hinsichtlich ihres generellen Verlaufs aussagekräftig. Im Betrieb ändert sich die Reibung der einzelnen Dichtungen immer wieder, vor allem infolge der verschleißbedingten Veränderung des tribologischen Zustands im Dichtspalt. Das Reibmoment schwankt oft durch Verschleißpartikel im Dichtspalt. Sie bewirken zunächst eine Zunahme des Festkörperkontakts, der später beim Austreten der Partikel aus dem Spalt wieder abnimmt.

Kühlung: Entscheidend für einen sicheren Betrieb thermisch hochbelasteter Radialdichtungen ist, daß die Reibwärme durch *Kühlung* bei einer für den Dichtring zulässigen Temperatur



abgeführt wird. Hierfür ist es günstig, wenn die abzudichtende Flüssigkeit an der Dichtung vorbeiströmt (keine Toträume!). Bei hochbelasteten Gleitringdichtungen von Kreiselpumpen gilt zur Abführung der Reibleistung eine Zirkulationsströmung durch den Dichtungseinbau-raum als selbstverständlich. Auch bei hochbelasteten Radialdichtungen muß der Konstrukteur nach Möglichkeiten suchen, durch Ausnutzung von Zentrifugalkräften oder Schlepplströmungen einen Flüssigkeitsaustausch im Bereich der Dichtung herbeizuführen. Die Vorteile der Radialdichtungen - kleiner Bauraum, preisgünstige Dichtelemente- dürfen nicht durch physikalisch unerfüllbare Wünsche (z.B. Null-Leckage bei PTFE-Dichtungen) und technisch unzulässige Maßnahmen (unzureichende Kühlung) verspielt werden.

9.11 LITERATURHINWEISE

Martini, L.J.: Sealing rotary shafts with O-Rings, Machine Design, Feb. 1977

Bähr, G.: Radialwellendichtringe als Druckdichtungen in der Hydraulik, Fluid, Jan. 1984

Wolf, A.: Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbarem Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen, Dissertation 1987, Universität Stuttgart.

Kalsi, M.S.: Development of a new high pressure rotary seal for abrasive environments, 12th Int. Conf. on Fluid Sealing, B.H.R.A., Brighton, 1989

Kreutzer, S.: Sicheres Abdichten bei extremen Belastungen, Der Konstrukteur 7-8, 1989

Bock, K.-D., Schlingmann, K.-H.: MM-wie Memory Membrane, KEM, 1990, H.1

Müller, H.K., Wäschle, P.: EWDR - eine neue druckbelastbare Wellendichtung, Antriebstechnik 29 (1990), Nr. 10, S. 76 - 81.

Wäschle, P.: Entlastete Wellendichtringe, Dissertation 1992, Universität Stuttgart .

Wüstenhagen, G.: Beitrag zur Optimierung des entlasteten Wellendichtrings, Dissertation 1995, Universität Stuttgart,

Müller, H.K., Nau, B.S.: Fluid Sealing Technology, Principles and Applications, M.Dekker Inc., New York, 1998, ISBN 0-8247-9969-0

Olbrich, O., Haiser, H., Haas, W.: Lebensdauer druckbelastbarer Wellendichtungen, Antriebstechnik 39 (2000), Nr. 2

Haiser, B.H.: PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen, Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.



Hinweise auf Inhaber, Urheberrecht und Verwertung von *www.fachwissen-dichtungstechnik.de*

Inhaber und Betreiber der Domain www.fachwissen-dichtungstechnik.de ist Evelyn Voigt-Müller, Samlandstr. 38, 81825 München, Deutschland.

Der gesamte Inhalt der unter der Domain www.fachwissen-dichtungstechnik.de veröffentlichten Internetpublikation einschließlich der Fachkapitel, die als PDF herunterladbar sind, ist urheberrechtlich geschützt und darf insgesamt oder in Teilen ausschließlich für den persönlichen Gebrauch ohne Vergütung kopiert und verwendet werden. Zitate sind mit Angabe der Quelle ausführlich zu kennzeichnen. Jede anderweitige Verwendung oder Verwertung, Vervielfältigung, Übersetzung, Nachdruck, Vortrag, Entnahme von Abbildungen, Funksendung, Mikroverfilmung und Speicherung auf elektronischen Datenträgern ist vergütungspflichtig und bedarf der schriftlichen Genehmigung durch den Inhaber der Domain (s.o.).

Inhaber des Urheberrechts (Copyright ©) und verantwortlich für den Inhalt von www.fachwissen-dichtungstechnik.de sind die Autoren Dr. Heinz Konrad Müller und Dr. Bernard S. Nau.

Hinweise auf den Inhalt bezüglich Handelsnamen, Warenzeichen und den gewerblichen Rechtsschutz:

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenzeichen usw. in www.fachwissen-dichtungstechnik.de berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten sind und von jedermann benutzt werden dürfen.

Ein Teil der in www.fachwissen-dichtungstechnik.de beschriebenen oder im Bild wiedergegebenen Dichtelemente und Dichtsysteme sind, ohne dass darauf hingewiesen ist, durch Patentanmeldungen, Patente oder Gebrauchsmuster rechtlich geschützt. Insofern berechtigen die wiedergegebenen Beschreibungen und Bilder nicht zu der Annahme, dass die beschriebenen oder dargestellten Gegenstände im Sinne des gewerblichen Rechtsschutzes als frei zu betrachten sind und von jedermann hergestellt oder benutzt werden dürfen. Für die Richtigkeit der Wiedergabe der in www.fachwissen-dichtungstechnik.de direkt oder indirekt zitierten Vorschriften, Richtlinien und Normen sowie für die Anwendbarkeit der konstruktiven Regeln und Hinweise im Einzelfall übernehmen die Autoren und der Betreiber der Domain keine Gewähr.