



Autoren:
Prof. Dr.-Ing. Heinz K. Müller
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.

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

 Dichten. Kleben. Polymer.	ISGATEC GmbH Am Exerzierplatz 1A • 68167 Mannheim Tel: +49(0)621-7176888-0 • Fax: +49(0)621-7176888-8 info@isgatec.com • www.isgatec.com
	Parker Hannifin GmbH · Dichtungsgruppe Europa Arnold-Jäger-Str. 1 • 74321 Bietigheim-Bissingen Tel: +49(0)7142-351-0 • Fax: +49(0)7142-351-293 sci.seal.eu@parker.com • www.praedifa.de
	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
 Dichtungen für Hydraulik	xpress seals GmbH Fangdieckstr. 70-74 • 22547 Hamburg Tel: +49(0)40-879744510 • Fax: +49(0)40-879744569 info@xpress-seals.com • www.xpress-seals.com



16

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

Drosseldichtungen für Flüssigkeiten

Drosselbuchsen. Grundlagen und Anordnungen, radial, axial. Zweistufige Abdichtung, Gestaltung von Drosselspalt-Dichtungen, Mehrfachanordnung. Schwimmring: selbsttätige Zentrierung, Druckverlauf und Durchfluß bei konvergentem und exzentrischem Spalt. Elastisch nachgiebige, harte und weiche Drosselbuchsen; Anwendung bei sehr hohem Druck. Radial durchströmte Drosseldichtungen. Literatur.

16.1 EINFÜHRUNG

Für eine dauerhaft zuverlässige Abdichtung von Wellen oder Stangen bei hohem Druck oder hoher Gleitgeschwindigkeit sind *berührungslose Spaltdichtungen* eine erwägenswerte Alternative zu berührenden Dichtungen. Bei Gleitringdichtungen oder Metallpackungen kann es vorkommen, daß unter den genannten Bedingungen durch Verformung der Dichtkörper das Gleichgewicht zwischen spaltschließenden und spaltöffnenden Kräften so gestört wird, daß entweder übermäßig hohe Leckage auftritt, oder die Gleitflächen durch Überhitzung oder Verschleiß zerstört werden. Während die Gleitflächen von Berührungsdichtungen im Betrieb allenfalls einen Spalt der Größenordnung Mikrometer bilden, mißt dieser bei den hier erörterten Drosselspalten immerhin einige Zehn Mikrometer. Die Leckrate ist dann zwar viel größer, aber dafür zuverlässig und stetig, und ihre weitere Behandlung kann vorbereitet werden. Anwendungsbereiche sind beispielsweise Kesselspeisepumpen, Sperröl-Dichtsysteme, Hochdruck-Kolbenpumpen und insbesondere hochzuverlässige Wellendichtungen in Kernkraftanlagen.

16.2 DROSSELBUCHSEN

Es gibt mehrere Arten von berührungslosen Spaltdichtungen. Ein besonders einfaches Konzept mit klarer physikalischer Funktion ist die sogenannte Drosselbuchse, die sowohl bei Wellen als auch bei axialbewegten Stangen eingesetzt werden kann. Um den Spalt möglichst klein

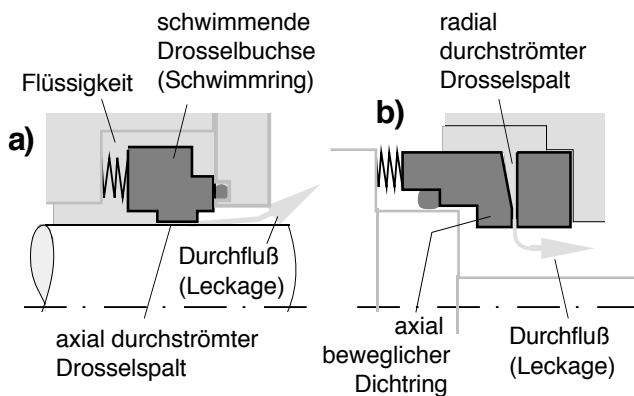


Bild 1
Grundsätzliche
Anordnungen von
Drosselbuchsen
für Flüssigkeiten

- a) Schwimmringdrossel
- b) Stirnspaltdrossel

und unabhängig von radialen Lageänderungen der Welle zu machen, wird der axialdurchströmte Spalt von einer schwimmenden Buchse gebildet. Diese Anordnung wird auch als Schwimmringdichtung oder Schwimmringdrossel bezeichnet, Bild 1(a). Später wird eine Verfeinerung dieses Prinzips erläutert, bei der der Spalt vom Druck des abgedichteten Fluids weiter verkleinert wird. Bei Wellen kann man die Flüssigkeit auch mit einem radial durchströmten Spalt drosseln, Bild 1(b). Diese Stirnspaltdrossel funktioniert im Prinzip wie eine Gleitringdichtung, mit dem Unterschied, daß der Drosselspalt mehr als zehnmals größer ist.

Die in Bild 1 im Prinzip gezeigten Drosseldichtungen haben Spalthöhen von mindestens 10 µm, und ihre Leckraten sind groß im Vergleich zu Berührungsdichtungen. Falls diese nicht aus dem Dichtspalt in die Umgebung austreten dürfen, wird niederdruckseitig eine konventionelle Berührungsdichtung nachgeschaltet und der Leckstrom in geeigneter Weise abgeführt, Bild 2. Das Dichtproblem wird also in zwei Stufen aufgeteilt, Druckabbau in der ersten Stufe und Rückhalten der Leckage in der zweiten. Auf diese Weise kann man sehr hohen Druck und hohe Gleitgeschwindigkeit gleichzeitig beherrschen. Enthält die Flüssigkeit abrasive Partikel, so kann man Erosionsverschleiß im Drosselspalt durch eine verschleißfeste Hartbeschichtung der Spaltwände verhindern. Beim Vergleich der Kosten für ein derartiges Dichtsystem mit anderen Lösungen müssen außer der hochgenauen Bearbeitung der spaltbildenden Bauteile auch der Energieverlust durch die Drosselung des Leckstroms und eventuell die Kosten für die Entsorgung des Leckstroms berücksichtigt werden.

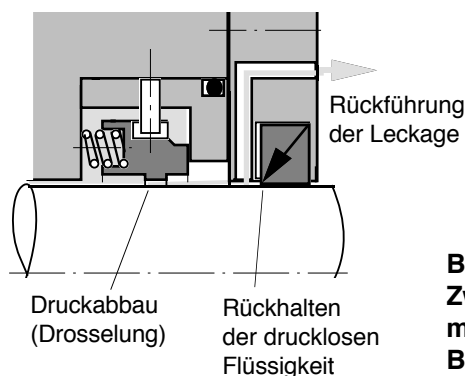


Bild 2
Zweistufige Abdichtung
mit Drosselbuchse und
Berührungsdichtung

16.3 GESTALTUNG VON DROSSELBUCHSEN

Bild 3 zeigt zwei Beispiele von Schwimmring-Drosselbuchsen, die mit der Welle einen Spalt der radialen Höhe h und der axialen Länge L bilden. Der Schwimmring wird von einer Feder und vom Druck an die Gehäusestirnwand angelegt. Bei der Festlegung der mittleren Spalthöhe sind die im Betrieb zu erwartenden thermischen Dehnungsdifferenzen zu beachten. Praktisch sollte der Spalt $10 \dots 20 \mu\text{m}$ hoch sein. Der Schwimmring folgt einer radialen Bewegung der Wellenachse. Falls es dabei zum Streifen kommt, muß durch geeignete Werkstoffkombination der Verschleiß eingeschränkt werden.

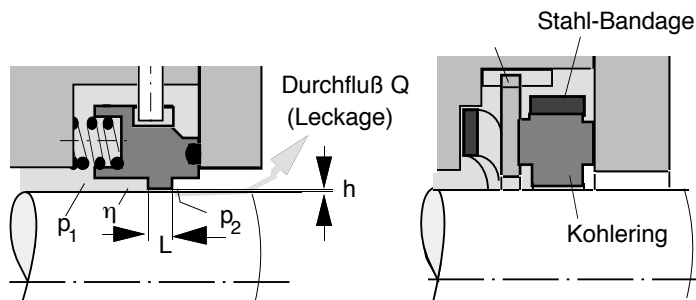


Bild 3
Schwimmring-Drosselspalt-Dichtungen

Leckstrom durch den Drosselspalt

Der Volumenstrom Q durch den Spalt ist

$$Q = \frac{\pi D \Delta p h^3}{12 \eta L} (1 + 1.5\epsilon^2) \quad (1)$$

mit D =Spaltdurchmesser; $\Delta p=p_1-p_2$ =Druckdifferenz; h =Spalthöhe; η =dynamische Viskosität; L =axiale Länge des Drosselspalts, e =Mittenversatz zwischen Wellen- und Bohrungachse und $\epsilon = e/h$ =Exzentrizität. Gleichung 1 gilt für laminare Strömung, was bei Spalten $< 30 \mu\text{m}$ ohne weiteres angenommen werden kann. Eine Überprüfung ist mit Gl.(18), Kapitel 4 möglich. Bei maximaler Exzentrizität ist der Leckstrom 2,5mal größer als bei konzentrischem Spalt. Bei gekippter Lage der Wellenachse nimmt der Durchfluß ab (s.Kapitel 4). Da die Anlage am Gehäuse nicht genau senkrecht zur Wellenachse ist, sollte $L \leq 5 \text{ mm}$ sein. Ein größerer Strömungswiderstand ergibt sich bei mehreren hintereinander angeordneten Schwimmringen, Bild 4. Da die Leckrate mit der dritten Potenz der Spalthöhe abnimmt ist es aber besser, den Spalt so eng wie möglich zu machen.

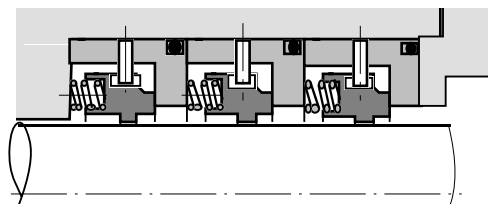


Bild 4
Mehrstufige Schwimmringdichtung

16.4 SELBSTTÄTIGE ZENTRIERUNG EINES SCHWIMMRINGS

Die Bohrung des Schwimmrings ist nach der Montage exzentrisch zur Wellenachse. Um Verschleiß und Leckage klein zu halten, sind alle Mechanismen willkommen, die die Exzentrizität reduzieren. Bei rotierender Welle und exzentrischer Lage des Schwimmrings entsteht - wie bei einem Radialgleitlager - im sichelförmigen Spalt des exzentrischen Schwimmrings eine hydrodynamische Druckverteilung, die den Ring in eine weniger exzentrische Lage drängt. Leider ist aber bei einem radial schwach belasteten Lager die Zentrierwirkung begleitet von einer Schwingungserregung, die die Buchse mit halber Drehfrequenz um die Welle dreht. Bei ungenügender Dämpfung kann es zu einer periodischen Berührung und zu Oberflächenschäden kommen. Man kann aber auch das axiale Druckprofil des Leckstroms zur selbsttätigen Zentrierung des Schwimmrings ausnützen. Hierzu ist es notwendig, daß sich der Spalt axial zur Niederdruckseite hin geringfügig verengt. Bild 5 zeigt einen axial durchströmten, konzentrischen und linear konvergierenden Ringspalt mit dem Spalthöhenverhältnis $\lambda = h_1/h_2$ und dem Spalthöhenverlauf

$$h(x) = h_2 \cdot \left(1 + (\lambda - 1) \cdot \frac{x}{L}\right) \quad (2)$$

Für den Druckverlauf ergibt sich (s. Bild 5):

$$p(x) = \frac{\lambda^2 (2 + (\lambda - 1) \cdot x/L) \cdot x/L}{(\lambda + 1) (1 + (\lambda - 1) \cdot x/L)^2} (p_1 - p_2) + p_2 \quad (3)$$

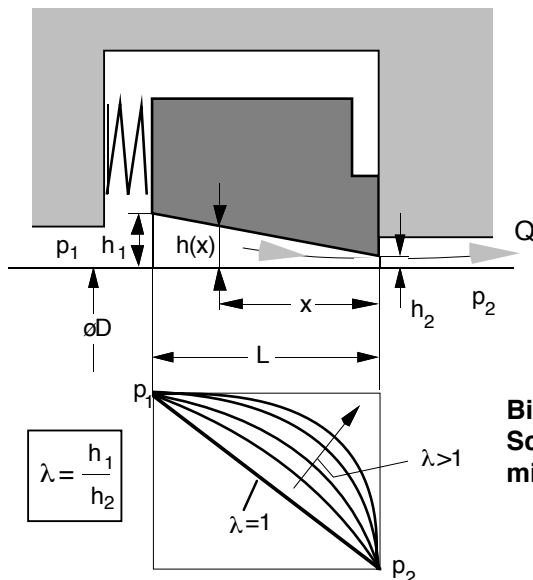


Bild 5
Schwimring-Spaltdichtung
mit linear konvergierendem Spalt

Ist die Achse des Schwimmrings exzentrisch zur Wellenachse versetzt, so ändert sich das Verhältnis von Eintrittsspalthöhe zu Austrittsspalthöhe über den Umfang und damit auch die Form des Druckprofils. Bild 6 zeigt einen exzentrisch versetzten Schwimring mit in

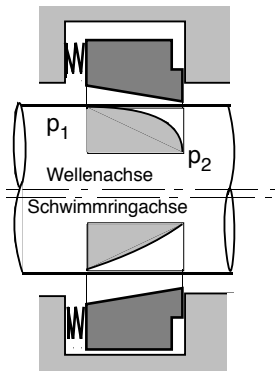


Bild 6
Hydrostatische Zentrierwirkung beim
Schwimmring mit konvergierendem Spalt

Strömungsrichtung konvergierendem Spalt. Der mittlere Spaltdruck ist auf der Seite mit dem kleinsten Spalt größer als gegenüber. Damit entsteht eine zentrierende Kraft F_z . Diese Zentrierkraft ist jedoch unter praktischen Bedingungen ($1 = h_1/h_2 = 2..2,5$) verhältnismäßig klein. In der Regel ist bei flüssigkeitsdurchströmten Schwimmringen die hydrodynamische Zentrierkraft infolge der Wellenrotation größer.

Leckrate bei konisch-exzentrischer Drosselbuchse

Der Durchfluß durch einen Drosselspalt mit konischer Bohrung beträgt bei konzentrischer Lage

$$Q = \frac{\pi D \Delta p h_2^3}{12 \eta L} \cdot \frac{2 \lambda^2}{\lambda + 1} \quad (4)$$

Ist der Spalt zusätzlich noch exzentrisch, so beträgt der Durchfluß:

$$Q = \frac{\pi D \Delta p h_2^3}{12 \eta L} \left(\frac{2 \lambda^2}{1 + \lambda} + (1 + \lambda) \frac{3}{4} \varepsilon^2 \right) \quad (5)$$

16.5 ELASTISCH NACHGIEBIGE DROSSELBUCHSEN

Vom Druck verformte Drosselbuchse: Je nach Gestaltung, Werkstoff und Druckdifferenz verformt sich der Dichtkörper einer Schwimmringdichtung. Die Verformung hängt ab von den Kräften, die einerseits von außen und andererseits vom Spalt her auf den Dichttring einwirken. Bild 7 zeigt schematisch die vom Druck verursachte Verformung einer Drosselbuchse. Auf die Außenfläche wirkt stets der volle Druck. Da im axial durchströmten Spalt der Druck abfällt, ist am Spaltende der Druck von außen wesentlich größer als der Druck im Spalt. Dies bewirkt eine elastische Einschnürung der Drosselbuchse. Der Spalt konvergiert also in Strömungsrichtung.

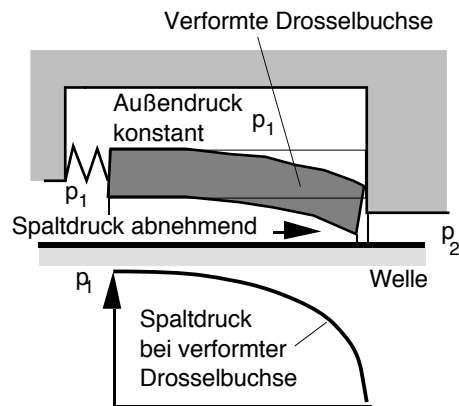


Bild 7
Druckverlauf bei einer vom Druck verformten Drosselbuchse

tung und der Druck fällt deshalb zum Spaltende hin immer steiler ab. Der Spalt kann aber am Ende nicht schließen, weil sonst der Durchfluß unterbunden wäre und im ganzen Spalt der volle Druck herrschte. Tatsächlich stellt sich im Gleichgewicht zwischen Außendruck, Innendruck und den elastischen Rückstellkräften des Dichtkörpers eine bestimmte Spaltform ein.

Weicher Schwimmring: Bild 8 zeigt eine als Verbundkörper gestaltete elastische Schwimmring-Spaltdichtung. Die mit einem Spannring aus Elastomer verbundene PTFE-Manschette bildet den druckabhängigen Drosselspalt. Die Flüssigkeit dringt in den äußeren Ringraum ein und belastet den Spannring radial. Die PTFE-Dichtfläche ist so strukturiert, daß die Flüssigkeit zwischen Welle und PTFE-Manschette eindringen kann. Im Gleichgewicht zwischen dem abfallenden Spaltdruck und der radialen Belastung stellt sich selbsttätig ein enger Spalt ein. Der Durchfluß durch den Drosselspalt beträgt bei Wasser einige Milliliter pro Minute.

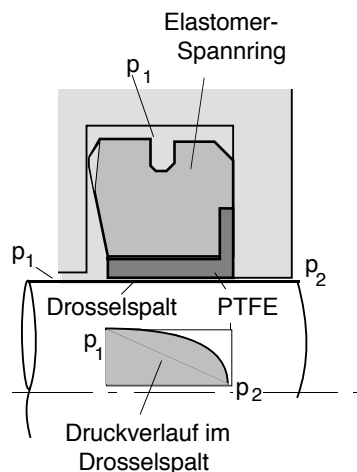


Bild 8
Schwimmring-Spaltdichtung mit PTFE-Manschette und Elastomer-Spannring

Harte Drosselbuchse: Auch bei einer metallischen oder keramischen Drosselbuchse kann bei sehr hohem Druck durch elastische Einschnürung die Leckrate wirkungsvoll vermindert werden. Praktisch wird die Veränderung der Spaltform mit Finiten Elementen berechnet, wobei hier die Deformationen von Innen- und Außenteil zu ermitteln sind. Bild 9 zeigt eine Höchst-

druckdichtung für einen Tauchkolben, der zum Zweck der Materialprüfung einen schwel-
 lenden Öldruck von 300...500 MPa erzeugt. Ein radial vorgespannter Elastomerring dient als
 Nebenabdichtung und überträgt zugleich den Flüssigkeitsdruck auf die Außenwand der zylind-
 rischen „Dichtlippe“ des metallischen Dichtrings. Mit dieser geometrisch einfachen Anord-
 nung konnte in der Praxis die Leckrate beträchtlich vermindert werden. Bei der Berechnung
 war es erforderlich, die nichtlineare Abhängigkeit der Viskosität vom Druck zu berücksichti-
 gen. Grundsätzlich scheint auch für die Tauchkolben ölgeschmierter Gas-Hochdruckverdich-
 ter (s. Kapitel 15) anstelle von konventionellen Metallpackungen der Einsatz elastischer Dros-
 selbuchsen möglich zu sein.

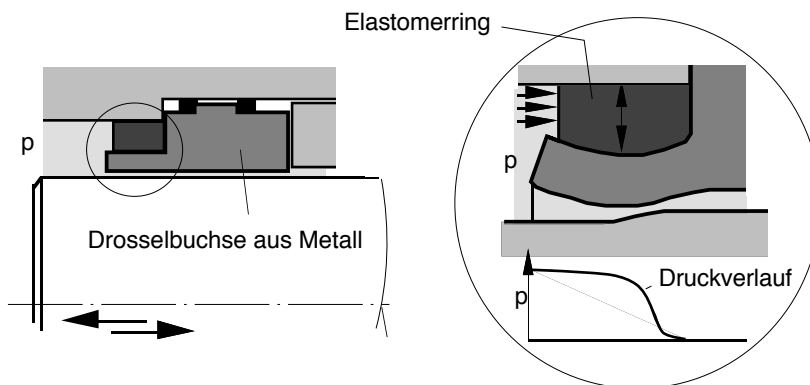


Bild 9 Verformbare Drosselspaltabdichtung für extrem hohen Druck

16.6 RADIAL DURCHSTRÖMTE DROSSELSPALT-DICHTUNGEN

Im Prinzip funktioniert eine radial durchströmte Drosselspalt-Dichtung wie eine Gleitring-
 dichtung, Bild 10. Die Drosselspalt-Dichtung wird jedoch so ausgelegt, daß ihr Spalt minde-
 stens zehnmals so groß ist wie bei einer Gleitringdichtung. In Kapitel 12, (Bild 15 und Gl.(5))
 ist im Detail beschrieben, wie bei einer Gleitringdichtung infolge des hydrostatischen Spalt-
 drucks und abhängig von der Spaltkonvergenz sich ein stabiler Spalt einstellt. Damit sich zum
 Beispiel ein 10µm hoher Drosselspalt einstellt, werden die Stirnflächen der in Bild 10 gezeig-
 ten Drosselspalt-Dichtung so bearbeitet, daß der Spalt am Außendurchmesser etwa 20µm

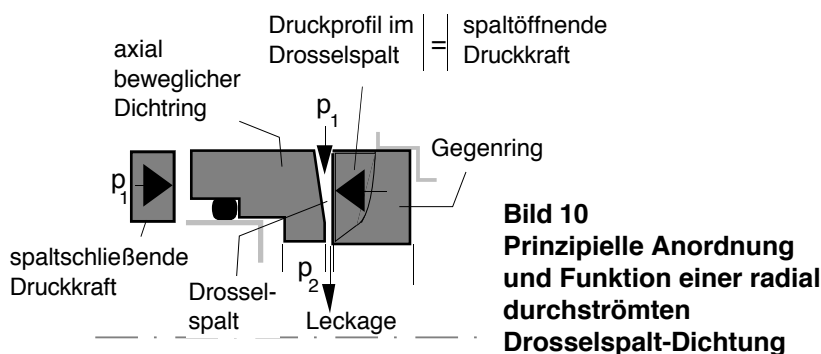


Bild 10
 Prinzipielle Anordnung
 und Funktion einer radial
 durchströmten
 Drosselspalt-Dichtung



größer ist als am Innendurchmesser. Den Leckstrom des Drosselspalts kann man näherungsweise mit G_l (6), Kapitel 12, berechnen. Im Hinblick auf eine gute Spaltstabilität und die Herstellkosten ist es günstig, eine der Stirnflächen mit einem kegeligen und einem planen Teilbereich herzustellen. Das Prinzip der automatischen Spalteinstellung funktioniert auch mit anders gestalteten Spaltwänden. Für entsprechende Hinweise und Berechnungen wird der Leser auf die Literatur am Ende dieses Kapitels verwiesen (z.B. Koga 1987; Müller 1990).

16.7 LITERATUR

Stair, W. K.: Liquid buffered bushing seals for large gas circulators. 1st Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Harlow 1961

Fisher, M.J.: A study of the suitability of a hydrostatic seal for boiler feed pumps. BHRA report RR 776, 1963

Loch, E.: Schwimmring-Dichtungen. Konstruktion 16 (1964), H. 8

Goldwag, E.: Hydrostatic seals for water turbine shafts. 2nd. Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Harlow 1964

Parry, J.: Development of reciprocating seals for very high pressures. 3rd. Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Cranfield, 1967

Bussemaker, E. J.: Development of floating ring type shaft seals for centrifugal compressors. 5th. Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Cranfield, 1971

Breit, F.E.: Die Kreiszylinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit veränderlicher, druckabhängiger Spaltweite. Diss. 1973, Universität Stuttgart

O'Donoghue, J.P.: A review of positive clearance radial face seals. in: Review and bibliography on aspects of fluid sealing, BHRA, Cranfield, 1972

Nendzig, G.: Useage of bushing seals in connection with oscillating positive-displacement pumps. 9th Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Cranfield, 1981

Andersson, B.: Design of Conical Clearance Seals, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1985

Koga, T.: Hydrostatic non-contact seal and its application to extreme condition, 10th. Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Cranfield, 1987

Watson, S., Nau, B. S.: Analysis of a novel rotary seal. 11th. Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Cranfield, 1987

Müller, H. K.: Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnell laufenden Wellen. Inst. A für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1969

Kanters, A.F.C.: On the calculation of leakage and friction of reciprocating elastomeric seals, Thesis, T.U. Eindhoven, (Appendix 2.1), 1990.

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



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.