











**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

 <b>DICHTOMATIK</b> Any seal. Any time.	<b>DICHTOMATIK</b> GmbH Albert-Schweitzer-Ring 1 • 22045 Hamburg Tel:+49(0)40-66989-0 • Fax:+49(0)40-66989-101 <a href="mailto:mail@dichtomatik.de">mail@dichtomatik.de</a> • <a href="http://www.dichtomatik.de">www.dichtomatik.de</a>
 <b>elringklinger</b> Kunststofftechnik	<b>ElringKlinger</b> Kunststofftechnik GmbH Etzelstrasse 10 • 74321Bietigheim-Bissingen Tel:+49(0)7142-583-0 • Fax:+49(0)7142-583-200 <a href="mailto:info.ekt@elringklinger.com">info.ekt@elringklinger.com</a> • <a href="http://www.elringklinger-kunststoff.de">www.elringklinger-kunststoff.de</a>
 <b>GFD</b>	<b>GFD</b> – Gesellschaft für Dichtungstechnik mbH Hofwiesenstr. 7 • 74336 Brackenheim Tel:+49(0)7135-9511-0•Fax:+49(0)7135-9511-11 <a href="mailto:info@gfd-dichtungen.de">info@gfd-dichtungen.de</a> • <a href="http://www.seals.de">www.seals.de</a>
 <b>ISGATEC</b> G M B H	<b>ISGATEC</b> GmbH Am Exerzierplatz1A • 68167Mannheim Tel:+49(0)621-7176888-0 • Fax:+49(0)621-7176888-8 <a href="mailto:info@isgatec.com">info@isgatec.com</a> • <a href="http://www.isgatec.com">www.isgatec.com</a>
 <b>Parker</b>   Prädifa	<b>Parker Hannifin</b> GmbH ·Dichtungsgruppe Europa Arnold-Jäger-Str.1 • 74321Bietigheim-Bissingen Tel:+49(0)7142-351-0 • Fax:+49(0)7142-351-293 <a href="mailto:sci.seal.eu@parker.com">sci.seal.eu@parker.com</a> • <a href="http://www.praedifa.de">www.praedifa.de</a>
 <b>SEALWARE</b>	<b>SEALWARE</b> International Dichtungstechnik GmbH Feldbergstr.2 • 65555Limburg Tel:+49(0)6431-9585-0 • Fax:+49(0)6431-9585-25 <a href="mailto:info@sealware.de">info@sealware.de</a> • <a href="http://www.sealware.de">www.sealware.de</a>
 <b>VTH Verband Technischer Handel E.V.</b>	<b>VTH</b> Verband Technischer Handel e.V. Prinz-Georg-Straße 106 • 40479Düsseldorf Tel:+49(0)211-445322 • Fax:+49(0)211-460919 <a href="mailto:vth-verband@t-online.de">vth-verband@t-online.de</a> • <a href="http://www.vth-verband.de">www.vth-verband.de</a>
 <b>xpress seals</b> Dichtungen mit Persönlichkeit	<b>xpress seals</b> GmbH Fangdieckstr.70-74 • 22547 Hamburg Tel:+49(0)40-879744510 • Fax:+49(0)40-879744569 <a href="mailto:info@xpress-seals.com">info@xpress-seals.com</a> • <a href="http://www.xpress-seals.com">www.xpress-seals.com</a>



# 21

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

## Membran- und Faltenbalgdichtungen

Grundprinzipien der hermetischen Dichtung. Diffusionsleckage. Schweißdichtung. Starre und elastische Membranen. Elastische Einzelmembran: Übertragungsverhalten, Werkstoffe. Gewellte Metallbälge, geschweißte Metallfaltenbälge, Beanspruchung und Festigkeit. Drehübertrager mit Faltenbalg. PTFE-Faltenbälge. Elastomer-Membranen: Flach-, Sicken- und Rollmembranen. Schutzbälge. Hermetisch abgedichtete Magnetkupplungen: Übertragung der Bewegung mittels Magnetfeld über Topfmembran, typische Konstruktionen, Kühlung, Lagerung in der Prozeßflüssigkeit. Literatur.

### 21.1 EINFÜHRUNG - GRUNDPRINZIP HERMETISCHE DICHTUNG

Methoden zur Minimierung der Leckage gefährlicher Fluide werden in einer Reihe früherer Kapitel diskutiert. Als Lösungen wurden Mehrfachdichtungen und aufwendige Sperrsysteme vorgestellt. In manchen Fällen erfordert jedoch die Herstellung oder der Transport von toxischen oder radioaktiven Substanzen nicht nur eine Minimierung sondern den *völligen* Ausschluß jeglicher Leckage. Diese Forderung kann weder mit mehreren hintereinandergeschalteten Berührungsdichtungen, noch mit „perfekten“ Abstreifern, und bei statischen Dichtungen selbst nicht mit sehr großen Anpreßkräften erfüllt werden. Es ist unvermeidbar, daß kleine Moleküle durch die stochastisch strukturierten und mikroskopisch kleinen Spalte statischer Berührungsdichtungen gelangen, und selbst der allerbeste Abstreifer ist nicht in der Lage, bis auf die mikroskopische Ebene eine Flüssigkeit von einer gleitenden Fläche abzustreifen. Im strengsten Sinn ist nicht einmal eine feste Wand undurchdringlich. Beispielsweise konnten bestimmte Lagerschäden darauf zurückgeführt werden, daß Wasserstoff in den Lagerstahl eindiffundiert war und dadurch eine Versprödung verursacht hat. Wenn man eine evakuierte Glasbirne einige Jahre lang der Atmosphäre aussetzt, findet man darin Helium und andere kleinemolekulare Gase. Ursächlich dafür ist die mit der thermischen Bewegung der Moleküle zusammenhängende Diffusion, und die Diffusionsrate nimmt exponentiell mit der absoluten Temperatur zu und nimmt mit zunehmender Molekülgröße ab. Erst am absoluten Nullpunkt der



Temperatur, wenn jegliche Bewegung der Moleküle aufgehört hat, kommt auch die molekulare Diffusion zu Ruhe.

Die Dichtungstechnik hat im dynamischen und statischen Bereich eine Reihe von „Annähernd-Null-Leckage“-Lösungen anzubieten. Natürlich gibt es, nach dem oben Gesagten, letztlich auch bei diesen Lösungen noch irgend einen Grad der Permeabilität, der aber normalerweise für praktische Zwecke völlig vernachlässigt werden kann. Als eine quasi hermetische Abdichtung wurde in Kapitel 20 beispielsweise die vorwiegend für Gase einsetzbare Magnetflüssigkeitsdichtung vorgestellt.

Die im vorliegenden Kapitel behandelten Dichtungen gehören im Oberbegriff zu den hermetischen Dichtungen. In aller Regel sind die dabei verwendeten Dichtelemente mehr oder weniger elastische dünne Wände, genannt *Membrandichtungen*. Um Membrane beweglicher zu machen werden sie gefaltet, zu *Faltenbalgdichtungen*. Obwohl diese Grundformen die Überschrift des Kapitels bilden, soll als Erstes eine rigorose Methode der hermetischen Abdichtung vorgestellt werden, nämlich die *Schweißdichtung*. So wie Rohre aneinander geschweißt werden, verfährt man in bestimmten Fällen auch mit Flanschen. Bild 1 zeigt drei Beispiele dicht geschweißter Flansche. Die Schweißnaht befindet sich an lippenartigen Vorsprüngen, entweder direkt am Flansch, Bild 1(a) oder an separaten Metallteilen, die wiederum mit dem Flansch verschweißt sind, Bild 1(b). Für hohen Druck und hohe Temperatur werden torusartige Lippen angeformt, Bild 1(c), die aufgrund ihrer Beanspruchung höhere Festigkeit aufweisen. Natürlich ist bei Dichtschweißungen im Fall der Demontage ein höherer Bearbeitungsaufwand erforderlich.

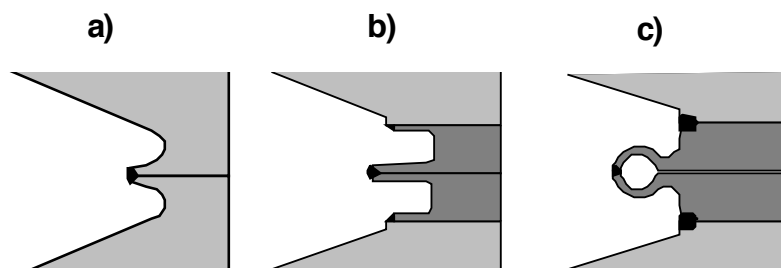
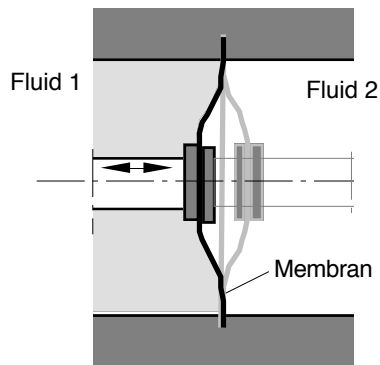
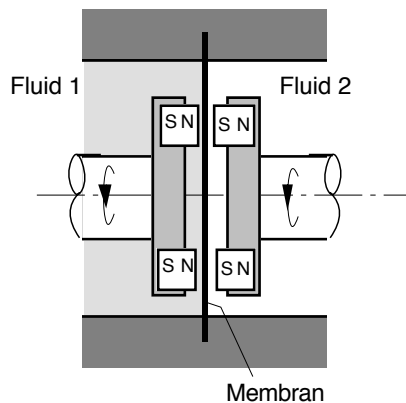


Bild 1 Beispiele von Schweißdichtungen

Die Bilder 2 und 3 zeigen im Prinzip Methoden einer dynamischen hermetischen Dichtung. Wenn linearbewegliche oder winkelbewegliche Maschinenteile hermetisch dicht sein müssen, trennt man die beiden angrenzenden Räume mit einer geschlossenen Wand. Zur Übertragung einer Bewegung ist die elastische Trennwand, eine Membran, mit dem bewegten Maschinenteil und mit dem Gehäuse dicht verbunden, Bild 2. Membrandichtungen bewegen sich reibungsarm, ohne Losbrechwiderstand und ohne Stick-Slip. Diese Eigenschaften sind für die Abdichtung pneumatisch angetriebener Linearmotoren, zum Beispiel für Regelgeräte, besonders vorteilhaft.



**Bild 2**  
Hermetische Abdichtung mit elastischer Membran



**Bild 3**  
Hermetische Abdichtung durch nicht-magnetische Trennwand und magnetische Bewegungsübertragung

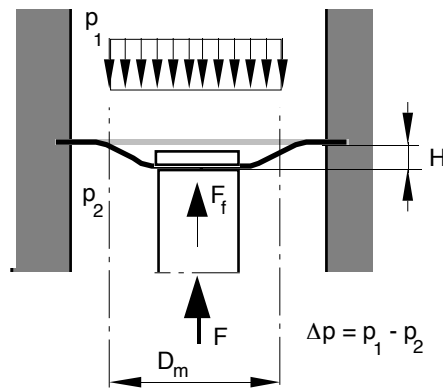
Wenn bei Drehbewegungen der Antriebsstrang durch eine hermetische Dichtung unterbrochen werden muß, kann dies beispielsweise mit einer nichtmagnetischen starren Membran geschehen, wobei die Bewegung mittels Magnetfelder durch die Membran hindurch vom einen Ende des Antriebsstrangs auf dessen anderes Ende übertragen wird, Bild 3.

## 21.2 ELASTISCHE EINZELMEMBRAN

### *Kraftübertragung*

Bild 4 zeigt eine konzentrische Ringmembran, die beispielsweise in Membranpumpen und -Motoren oder in Ventilen verwendet wird. Dabei wirken auf die Membran eine Druckdifferenz  $\Delta p = p_1 - p_2$  und eine externe Axialkraft  $F$ . Die Membran wirkt als Kolben mit dem wirksamen Durchmesser  $D_m$  und dem wirksamen Querschnitt  $A = (\pi/4)D_m^2$ . Wird die Membran aus ihrer neutralen Mittellage um den Hub  $H$  ausgelenkt, reagiert sie infolge ihrer Deformation mit der Rückstellkraft  $F_f$  und für das Kräftegleichgewicht gilt

$$F = \Delta p \cdot A - F_f \quad (1)$$



**Bild 4**  
Kraftwirkungen auf eine  
elastische Ringmembran

Sowohl der wirksame Durchmesser  $D_m$  als auch die Rückstellkraft  $F_f$  verändern sich mit dem Hub. Bei manchen Membranen wächst die Rückstellkraft linear mit dem Hub  $H$ , so daß in diesem Fall gilt:

$$F_f = c \cdot H \quad (2)$$

wobei  $c$  die Federkonstante der Membran ist. In diesem Fall gilt

$$F = \Delta p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_m^2 - c \cdot H \quad (3)$$

Bei größerer Verformung der Membran und beim Gleiten von Membranteilen an der Gehäuse- oder Kolbenwand entsteht im Verlauf der Hin- und Herbewegung eine Hysterese.

Wesentliche Kriterien für den Betrieb von Membranen sind das Übertragungsverhalten, die statische Festigkeit und die dynamische Festigkeit. Als Übertragungsverhalten bezeichnet man den Zusammenhang zwischen der auf den Membrankolben einwirkenden Druckdifferenz und der übertragenen Kraft. Bei idealem Übertragungsverhalten ist  $F$  vom Hub unabhängig, also  $D_m$  konstant und  $c = 0$ . Dies gilt annähernd für weiche Gummimembranen bei kleinem Hub  $H$ . Die statische Festigkeit wird bestimmt von der größten Vergleichsspannung in der Membran und von der charakteristischen Art des Versagens. Die Membran muß bei der größten wirkenden Druckdifferenz eine ausreichende Sicherheit gegen Überdehnung oder Bruch aufweisen. Die dynamische Festigkeit (Schwingungsfestigkeit) der Membrankonstruktion wird bestimmt von der größten Spannungsamplitude, von Kerbwirkungen und vom dynamischen Verhalten des Membranwerkstoffs. Zugspannungen sind in der Regel kritischer als Druckspannungen, insbesondere an Kerbstellen.

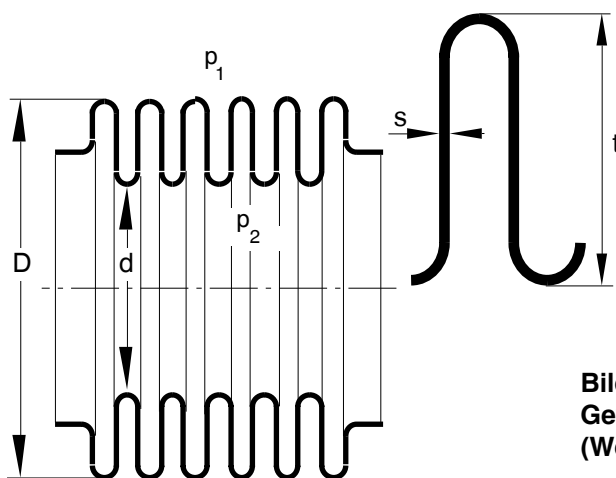
### **Werkstoffe**

Elastische Ringmembranen bestehen aus Metall, PTFE- oder Elastomerwerkstoffen. Wesentliche Kriterien für die Wahl des Membranwerkstoffs ist der Temperatureinsatzbereich sowie die Art und der Druck des abzudichtenden Fluids. Die jeweils günstigste Bauform der Membranen richtet sich nach der Art der Bewegung an der Dichtstelle, der maximalen Druckdiffe-

renz, dem verwendeten Werkstoff und den fertigungstechnischen Möglichkeiten. Metallmembranen ertragen zwar verhältnismäßig große Druckdifferenzen, ihr hoher Elastizitätsmodul beschränkt aber den Hub der Einzelmembran. Ein größerer Hub läßt sich jedoch durch Hintereinanderschalten mehrerer Membranen in Faltenbälgen verwirklichen.

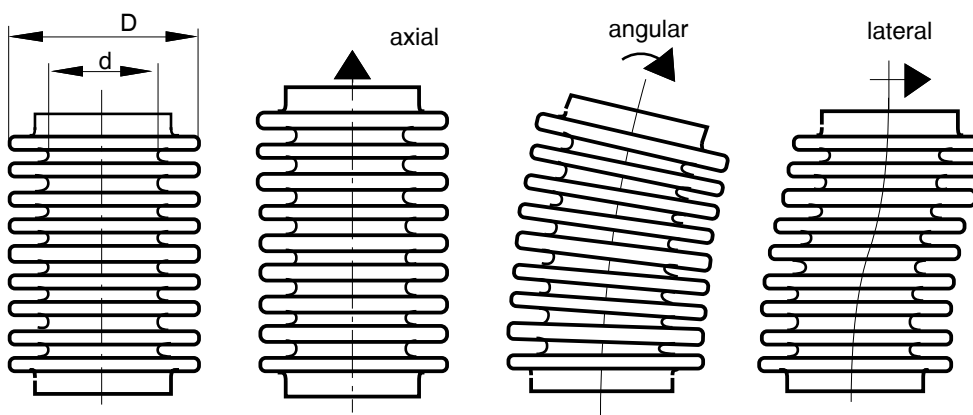
### 21.3 GEWELLTE METALLFALTENBÄLGE

Eine klassische Bauform ist der gewellte Metallfaltenbalg, kurz Wellbalg, Bild 5. Durch stufenweise mechanische oder hydraulische Kaltverformung eines einzelnen dünnwandigen Metallrohrs entsteht ein einwandiger Balg. Mehrwandige Metallfaltenbälge werden aus mehreren ineinandergesteckten Rohren hergestellt.



**Bild 5**  
Gewellter Metallfaltenbalg  
(Wellbalg)

Ein Balg erlaubt axiale, angulare und laterale Bewegungen, Bild 6. Mit dem Außendurchmesser  $D$  und dem Innendurchmesser  $d$  ergibt sich näherungsweise der effektive Durchmesser  $D_m = (D + d)/2$ . Auswahlkriterien für den Balgwerkstoff sind hauptsächlich die Korrosionsbeständigkeit, die Temperaturbeständigkeit und die Verarbeitbarkeit.



**Bild 6** Möglichkeiten der Verformung von Metallfaltenbälgen



Bei hoher Lastspielzahl ist die Biegeschwelfestigkeit oder die Biegewechselfestigkeit ausschlaggebend. Vorwiegend bestehen Wellbälge aus Bronze (CuSn6) oder Tombak (CuZn20). Bei hohen Anforderungen bezüglich aller genannten Kriterien wird beispielsweise Edelstahl (X10CrNiTi 18 9) verwendet. Extrem korrosionsbeständige und hochtemperaturbeständige Bälge werden aus den Nickellegierungen Monel™, Hastelloy C™ und Inconel™ hergestellt.

Bei druckbelasteten Bälgen sollte der höhere Druck vorzugsweise von außen wirken, da lange innendruckbelastete Bälge instabil ausknicken können. Unter der Voraussetzung, daß der höhere Druck von außen wirkt, gilt für die zulässige Druckdifferenz:

$$\Delta p_{zul} = \text{const} \cdot \sigma_{zul} \cdot \left(\frac{s}{t}\right)^2 \quad (4)$$

Darin sind  $s_{zul}$  die zulässige Spannung des Balgwerkstoffs,  $s$  die Wanddicke und  $t$  die Wellentiefe der Balgwelle (s.Bild 5). In den Produktspezifikationen der Balghersteller findet man Angaben über zulässige Werte für den Druck, den zulässigen Hub und die Federrate der einzelnen Balgwelle, bei axialer, angularer und lateraler Auslenkung. Für die Federrate  $c_a$  bei axialer Zusammendrückung der *einzelnen* Welle eines einwandigen Wellbalgs mit dem Außendurchmesser  $D$  aus einem Werkstoff mit dem Elastizitätsmodul  $E$  gilt:

$$c_a = \text{const} \cdot E \cdot D \cdot \left(\frac{s}{t}\right)^3 \quad (5)$$

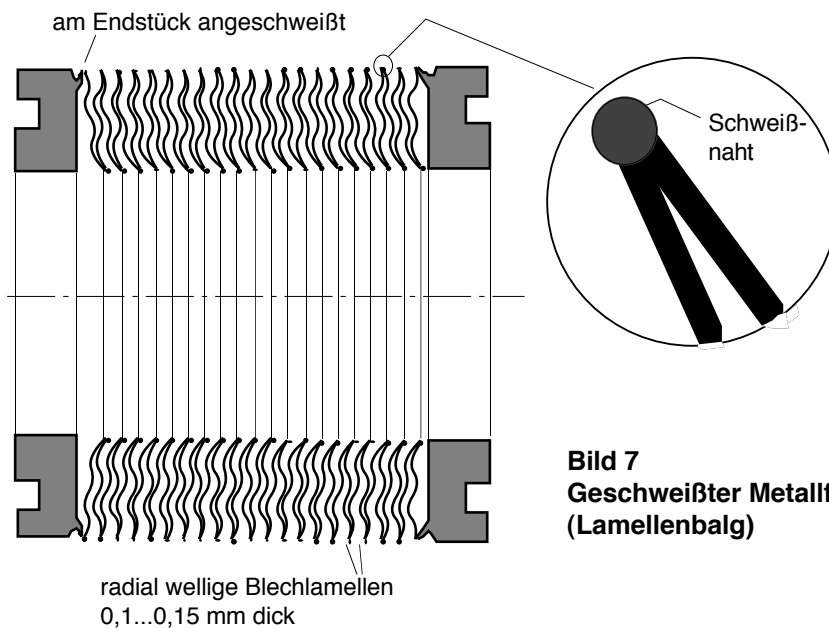
Ist die Federrate der Einzelwelle  $c_a$ , so ist die Federrate eines Balgs mit  $n$  Wellen  $c_n = c_a/n$ .

## 21.4 GESCHWEISSTE METALLFALTENBÄLGE

Aus fertigungstechnischen Gründen kann eine kaltgeformte Welle nicht beliebig schlank ausgeführt werden. Gemessen am zulässigen Hub ist deshalb der erforderliche Bauraum herkömmlicher Wellbälge verhältnismäßig groß. Bälge aus sehr dünnwandigen, an den Rändern verschweißten Membranblechen sind dagegen sehr kurz. Zum Beispiel hat ein Edelstahl-Wellbalg mit  $D = 50$  mm und  $d = 35$  mm bei 30 mm Hub eine Einbaulänge von annähernd 170 mm. Ein geschweißter Metallfaltenbalg ist unter denselben Bedingungen nur 70 mm lang.

Bild 7 zeigt einen typischen geschweißten Metallfaltenbalg aus gestanzten, 0,1..0,15 mm dicken, radial welligen Membranblechen aus Edelstählen oder korrosionsbeständigen Legierungen. Die Bleche werden mittels Schutzgas-, Plasma- oder Elektronenstrahlschweißung ohne Zusatzwerkstoff verbunden. Für den wirksamen Durchmesser gilt hier

$$D_m = \sqrt{\frac{D^2 + d^2}{2}} \quad (6)$$



**Bild 7**  
**Geschweißter Metallfaltenbalg**  
**(Lamellenbalg)**

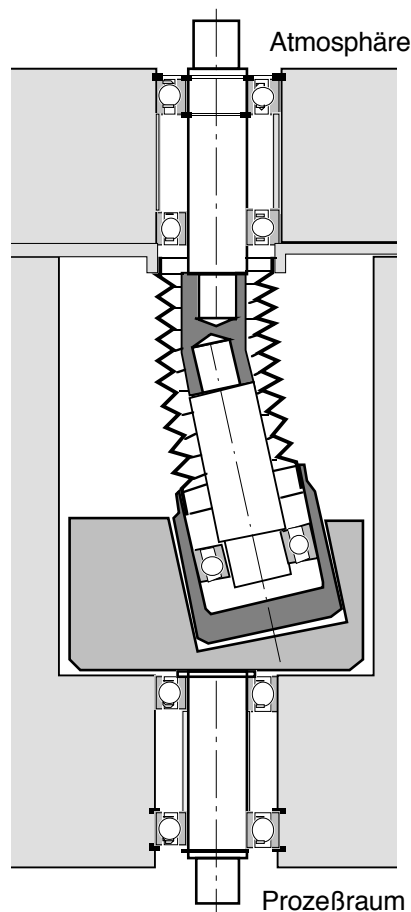
Wirkt der höhere Druck auf der Außenseite des Balgs, verringert sich der wirksame Durchmesser bei zunehmenden Druck geringfügig. Die Standardausführungen geschweißter Metallfaltenbälge sind bis etwa 1 MPa Außendruck belastbar. Für höhere Druckbeanspruchung werden die Bälge mehrwandig mit enger Teilung ausgeführt. Demgemäß ist der Hub je Falte kleiner. Von den Herstellern werden für Sonderanfertigungen mögliche Druckbelastungen bis 70 MPa angegeben.

Infolge der Kerbwirkung an der Innenseite der Schweißnaht können geschweißte Metallfaltenbälge durch Schwingungsbruch versagen. Besonders kritisch sind Zugspannungen in der Nahtwurzel. Deshalb sollten geschweißte Bälge nicht auseinandergezogen sondern vorwiegend von der ungespannten Lage aus *zusammengedrückt* werden. Als Richtwert gilt, daß der Balg auf etwa 30% seiner ungespannten Länge zusammengedrückt werden kann. Kritische Beanspruchungen entstehen auch, wenn der Balg durch Maschinenschwingungen mit seiner Eigenfrequenz angeregt wird. Gegebenenfalls muß die Federkonstante des Balgs oder seine Masse verändert werden. Bei einem großen einwirkenden Frequenzspektrum kann der Balg durch mechanische Reibung oder durch eine Flüssigkeit gedämpft werden..

### ***Drehübertrager mit Faltenbalg***

Da ein Balg nur axiale, angulare und laterale Bewegungen zuläßt, scheint es auf den ersten Blick unmöglich, eine rotierende Welle mit einem Balg hermetisch abzudichten. Bild 8 zeigt jedoch, daß dies dennoch möglich ist. Die Antriebswelle setzt sich als abgewinkelte Achse fort und dreht sich als Kurbel auf einem Kegelmantel. Die Kurbel ist umhüllt von einem Metallfaltenbalg, an dessen Ende ein Topf befestigt ist. Das Ende der Kurbel ist im Topf drehbar gelagert. Der Topf steckt seinerseits außen in einer schrägen Bohrung der Abtriebswelle.



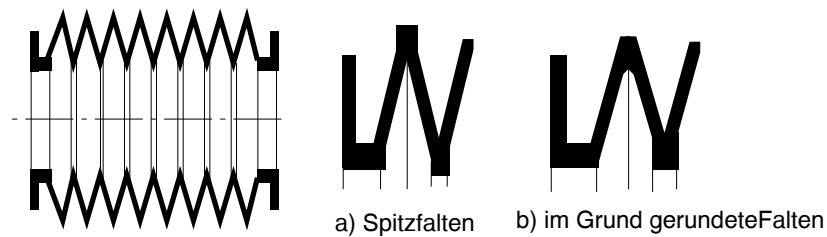


**Bild 8**  
**Metallbälge in einem**  
**Drehübertrager**  
**(Taumelbalg-Dichtung)**

Somit rotiert der Topf auf einem Kegelmantel, ohne sich um seine eigene Achse zu drehen, und der Balg führt seinerseits lediglich eine Taumbewegung aus. Ein derartiges Getriebe eignet sich nicht für hohe Drehzahlen, wohl aber für die Übertragung einer verhältnismäßig langsamen Drehbewegung. Damit werden beispielsweise Drehbewegungen ins Vakuum oder in Räume mit toxischen oder radioaktiven Substanzen übertragen. Bei hohen Sicherheitsanforderungen werden zwei ineinanderliegende Bälge eingesetzt und der Zustand im Zwischenraum dauernd kontrolliert

## 21.5 PTFE - FALTENBÄLGE

Wegen ihrer hervorragenden chemischen und thermischen Beständigkeit werden in der Verfahrenstechnik häufig aus PTFE-Rohren hergestellte Faltenbälge als hermetische Dichtungen verwendet. Im Unterschied zu den Metallfaltenbälgen haben PTFE-Faltenbälge vor allem bei höherer Temperatur praktisch keine nennenswerte Rückstellkraft. Den größten Hub im Verhältnis zur Baulänge erreicht man mit spanlos gestochenen Bälgen mit spitzen Falten, Bild 9(a). Solche Bälge werden bis 0,1 MPa bei maximal 200°C und möglichst nur bei Zusammendrückung des Balgs eingesetzt.



**Bild 9 Faltenbälge aus PTFE**

Etwas höher druckbeanspruchbar sind PTFE-Bälge, deren Falten im Grund ausgerundet sind, Bild 9(b). Mit gerundeten Einstechstählen spanend geformte PTFE-Bälge werden je nach Wanddicke bei Druckdifferenzen bis 0,5 MPa eingesetzt. Für große Durchmesser bis zu 2000 mm und vorwiegend drucklosen Betrieb werden Faltenbälge aus längsverschweißter PTFE-Folie hergestellt, und zur Versteifung im Faltengrund innen und außen mit korrosionsbeständigen Stahlringen verstärkt. Sie dienen beispielsweise als flexible Gas- oder Staubabdichtungen.

## 21.6 ELASTOMER - MEMBRANEN

Elastomer-Membranen werden als Flachmembranen in oszillierenden Pumpen oder für druckbetätigte kurzhubige Stell- und Regelorgane eingesetzt. Für größere Hübe stehen Sicken- und Rollmembranen zur Verfügung. Im Vergleich zu Metallmembranen sind Elastomer-Membranen sehr weich und nachgiebig. Praktisch können alle bekannten Elastomere (*s. Kapitel 2*) zu Membranen geformt werden. Bei Standardanwendungen, beispielsweise in pneumatisch betätigten Geräten, wird NBR verwendet. Die chemisch und thermisch beständigen teuren Fluor-Elastomere (FPM) und Silikon-Elastomere (VMQ) ermöglichen auch die Beherrschung aggressiver Fluide bei hohen und tiefen Temperaturen.

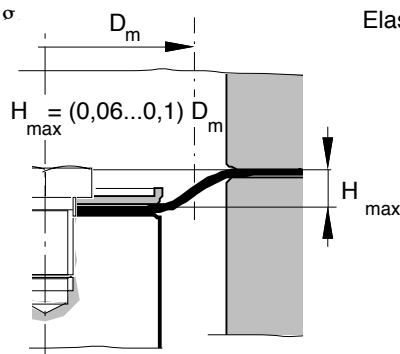
Unverstärkte Elastomer-Membranen sollen nicht gedehnt, also nicht auf Zug beansprucht werden. Sie sind deshalb nur wenig druckbelastbar. Für höheren Druck geeignet sind gewebeverstärkte Elastomer-Membranen, bei denen Gewebefasern die Zugkräfte übertragen.

Je nach Temperatur und verlangter Flexibilität stehen Gewebe aus Polyamid, Polyester, Glas und Kohlefasern zur Verfügung. Beidseitig elastomerbeschichtete Gewebekonstruktionen werden Membranstoffe genannt. Sie stehen abgestuft in Dicken von 0,15...3 mm zur Herstellung von gestanzten oder gezogenen Formmembranen zur Verfügung. Aus Membranstoffen gefertigte Membranen haben eine höhere Biegezugfestigkeit als unverstärkte Elastomer-Membranen und demgemäß eine höhere Lebensdauer.

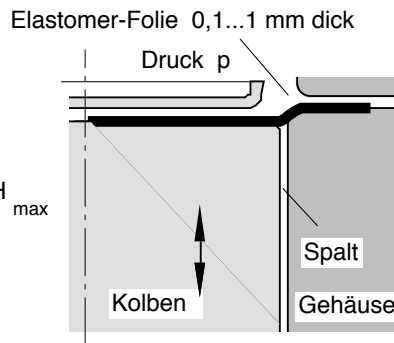


### Flachmembran

Aus Elastomerplatten oder Membranstoffen gestanzte Flachmembranen werden am Rand eingespannt und sind beidseitig druckbelastbar, Bild 10. Um bei unverstärkten Elastomer-Membranen die Endlage des Arbeitshubs ohne Zugspannung erreichen zu können, wird die Membran bei der Montage vor dem Festklemmen geringfügig radial gestaucht, so daß eine kleine Welle entsteht. Wird der Hub auf 6...10% des wirksamen Durchmessers begrenzt, so verformen sich die Membranen ohne Radialfalten. Weiterhin ist es wichtig, die Einspannstellen so zu formen, daß die durchgebogene Membran in den Endstellungen ohne Knick anliegt. Eine Sonderform der Elastomer-Flachmembran ist die 0,2...1 mm dicke „Gummiblattdichtung“, Bild 11. Sie ist auch bei hohem Druck einsetzbar, allerdings nur bei kleinem Hub ( $H < \pm 2$  mm). Um Extrusion zu vermeiden, darf der Spalt hinter dem Gummiblatt nicht größer als 0,1...0,3mm sein, bei leicht abgerundeten Ringkanten. Eine Gummiblattdichtung ist nahezu reibungsfrei und deshalb - bei kleinem Hub - eine attraktive Alternative zu einer gleitenden Berührungsdichtung<sup>σ</sup>



**Bild 10**  
Elastomer-Flachmembran



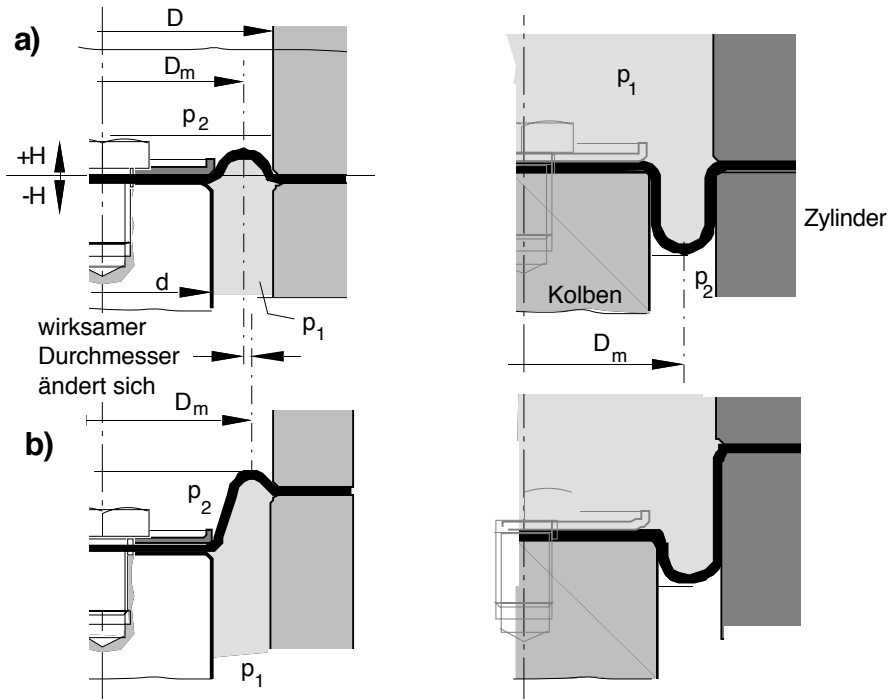
**Bild 11 "Gummiblatt-Dichtung"**  
Sonderform der Elastomer-Flachmembran

### Sickenmembran

Größere Hübe erreicht man mit Sickenmembranen, Bild 12(a). Eine nicht unterstützte Schlaufe (Sicke) führt eine freie Rollbewegung aus, und ist nur einseitig von der konkaven Innenseite her druckbelastbar. Bild 12(b) zeigt, wie die wirksame Fläche sich über dem Hub verändert, weil sich die Lage und der Radius der Schlaufe verändern. Bewegt sich der Kolben zur konkaven Membranseite hin, so wandert der Mittelpunkt der kleiner werdenden Schlaufe nach außen, und die wirksame Fläche nimmt zu. Umgekehrt nimmt die wirksame Fläche ab, wenn sich der Kolben in die andere Richtung bewegt. Der wirksame Durchmesser verändert sich maximal um ein Drittel des Spalts zwischen innerer und äußerer Einspannung. Beispielsweise verändert sich bei einer Sickenmembran mit den Durchmesser 50 mm und 34 mm über einen Hub von 8 mm die Wirkfläche um 13%.

### Rollmembran

Für große Hübe gibt es Rollmembranen, die auf einem Stützkolben und an der Zylinderwand abrollen, Bild 13. Rollmembranen sind nur auf der konkaven Innenseite der Rollschlaufe druck



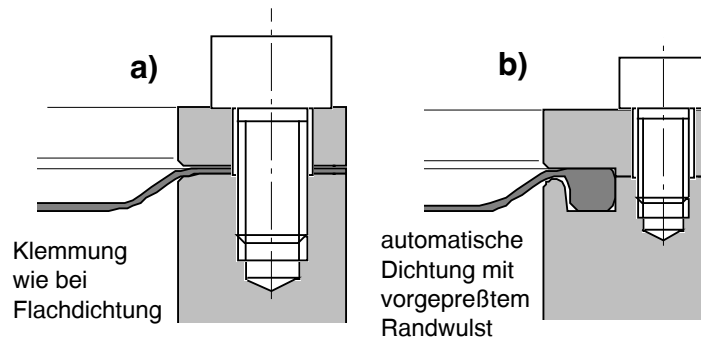
**Bild 12 Sickenmembran**

**Bild 13 Rollmembran**

belastbar. Zur Vermeidung von Spannungsspitzen an der Einspannstelle und am Kolbenkopf werden die Übergänge abgerundet. Die Wand des Rollbalgs hat einen kleineren Umfang wenn sie am Kolben anliegt als wenn sie an der Zylinderwand anliegt. Demgemäß wird der Werkstoff beim Durchgang durch die Schlaufe gebogen und gedehnt. Bei häufigen Bewegungen ist deshalb eine hohe Biegewechselfestigkeit des Membranwerkstoffs erforderlich. Eine hohe statische Festigkeit und zugleich eine hohe Wechselfestigkeit haben 0,5...1 mm dicke gewebeverstärkte Rollmembranen, deren Gewebeeinlage vor dem Einlegen in die Vulkanisierform vorgeformt wird. Der wirksame Querschnitt einer Rollmembrandichtung ändert sich über den Hub kaum, allenfalls bei einer leicht konischen Kolbenkontur. Ein konischer Kolben verbessert die Dauerfestigkeit der Membran. Kolben- und Zylinderoberflächen sollen glatt und ihre relative Exzentrizität nicht größer als 10% der Spaltweite sein. Minimalen Verschleiß der Membran erreicht man mit Kolben und Zylinder aus einem harten Polymerwerkstoff. Keinesfalls darf sich der Kolben im Betrieb verdrehen. Damit die Membran gleichmäßig abrollt, muß sie während der Bewegung stets druckbelastet sein. Bei einer Hubfrequenz >1 Hz sind entsprechend große Zuflußquerschnitte vorzusehen, damit nicht durch Drosselung im Druckmedium ein Unterdruck entsteht und die Membran sich umstülpt.

### ***Einspannung und Abstützung***

Bild 14 zeigt zwei Ausführungen für die statische Abdichtung an der Einspannstelle von Membranen. Bei höherem Druck wird der Rand der Membran wie eine herkömmliche Flachdich-

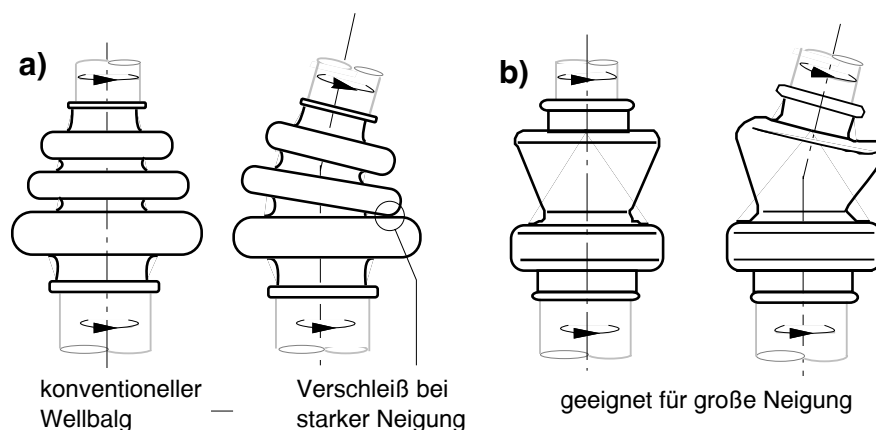


**Bild 14 Einspannung von Elastomer-Flachmembranen**

tung geklemmt, Bild 14(a). Formvulkanisierte Membranen für kleine Drücke gibt es auch mit Randwulst, der bei der Montage um ca. 20% zusammengepreßt wird, Bild 14(b). Der gesamte Kontaktbereich zwischen Membran und Wand muß glatt und gratfrei sein. Der Krümmungsradius am Übergang sollte ca. fünfmal so groß wie die Membrandicke sein. Bei Flachmembranen wechselt die Wandanlage in der Nähe der Einspannstelle, das heißt, die Einspannstelle muß nach beiden Seiten gekrümmte Übergänge aufweisen. Eine Sickenmembrane liegt hingegen im Betrieb immer mit ihrer konvexen Außenseite an der gekrümmten Übergangskontur an. Umfassende Konstruktionsrichtlinien und Anleitungen zur Dimensionierung und zum Betrieb von Elastomermembranen findet man bei Lott (1981) und Flint (1986).

### **Schutzbälge**

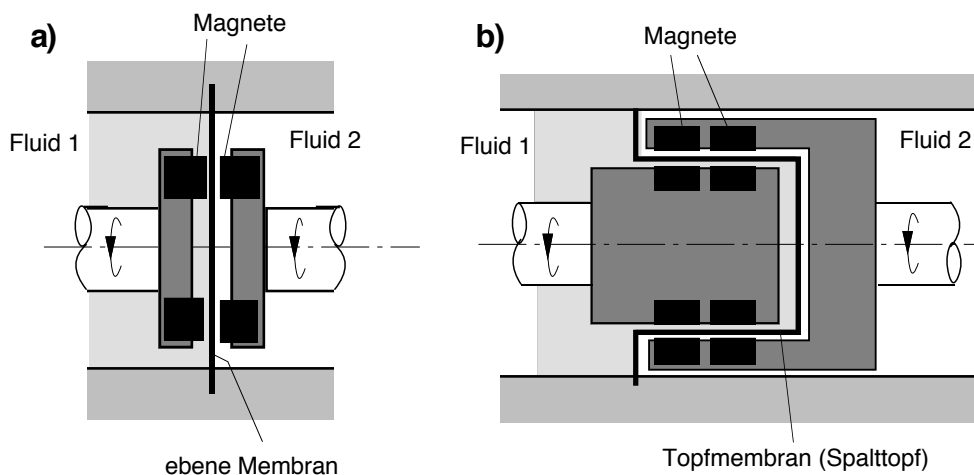
Zur Staub- und Spritzwasserabdichtung an winkelbeweglichen Wellen und Gestängen bieten viele Hersteller eine unübersehbar große Auswahl von Elastomer-Schutzbälgen an. Für die Auswahl im konkreten Anwendungsfall wird auf die Herstellerkataloge verwiesen. Beispielfhaft wird hier ein spezielles Konstruktionsproblem aufgegriffen. Bild 15 zeigt eine Gelenkwellenabdichtung aus dem Fahrzeugbau mit großem Auslenkwinkel. Bei einer herkömmlichen Lösung perforierte der Elastomerbalg nach einiger Zeit, weil die Wellen sich an der Berührsstelle durchscheuerten, Bild 15(a). Mit der Bauform nach Bild 15(b) wurde dieses Problem gelöst.



**Bild 15 Elastomer-Schutzbälge**

## 21.7 HERMETISCHE ABDICHTUNG VON MAGNETKUPPLUNGEN

Die Bewegung eines Maschinenteils kann mittels eines Magnetfelds durch dünne unmagnetische Membranen hindurch übertragen werden. Bild 16 zeigt prinzipielle Anordnungen mit einer dünnwandigen Membran und mit Dauermagneten bestückte Rotoren. Moderne Dauermagnete aus Samarium-Kobalt-Legierungen (SmCo) oder Neodym-Eisen-Bor-Legierungen (NdFeB) erzeugen hohe Feldstärken und erlauben die Übertragung großer Kräfte. NdFeB-Magnete sind bis etwa 100°C den SmCo-Magneten hinsichtlich der Feldstärke deutlich überlegen. Falls jedoch mit Betriebstemperaturen der Magnete bis 250°C zu rechnen ist, sind SmCo-Werkstoffe günstiger.

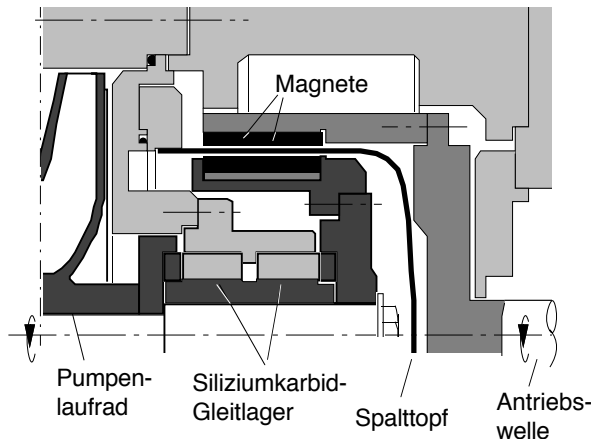


**Bild 16**  
**Prinzipielle Anordnungen zur hermetischen Bewegungsübertragung mit Magnetkraft**

Bei den sogenannten Zentralspalttopfkupplungen mit zylindrischer Membran („Spalttopf“) nach Bild 15(b) können mehr Magnete untergebracht und demgemäß größere Drehmomente übertragen werden als bei der Stirndrehkupplung nach Bild 16(a), bei der zudem die Lager mit dem hohen Axial Schub der Magnetkräfte belastet sind. In der Praxis wird deshalb bei „stopfbuchslosen Pumpen“ und in „Magnetkupplungen“ die Anordnung nach Bild 15(b) verwendet. Bild 17 zeigt eine typische hermetisch abgedichtete Magnetkupplung in einer Kreiselpumpe.

Der vom Spalttopf umschlossene Innenrotor trägt zwei Ringe mit Dauermagneten. Außerhalb des Spalttopfs dreht sich, bestückt mit einer gleichen Anzahl von Magneten, der aus Weicheisen bestehende Antriebsrotor. Die eigentliche Dichtung ist der aus Edelstahl oder einer Nickellegierung bestehende Spalttopf.

Bei nicht rotierender Welle, wenn kein Drehmoment übertragen wird, stehen die Magnete paarweise radial übereinander. Beginnt der antreibende Außenrotor zu drehen, so verschieben sich die äußeren Magnete tangential zu den inneren. Das Magnetfeld durchsetzt den Spalttopf nun schräg, und seine tangentialen Komponenten übertragen ein Drehmoment.



**Bild 17**  
**Hermetisch abgedichtete**  
**Magnetkupplung in einer**  
**Kreiselpumpe**

In modernen Pumpen werden auf diese Weise Drehmomente bis 300 Nm magnetisch übertragen. Die größte Tangentialkraft ist erreicht, wenn die Magnete am Umfang um die Hälfte des tangentialen Abstands der Magnetpole relativ zueinander verschoben sind. Dieser Zustand darf jedoch praktisch nicht erreicht werden, weil nach Überschreiten dieses Maximums die Kupplung durchdreht und die Drehmomentübertragung zusammenbricht. Dieser Fall kann auch eintreten, wenn aus irgend einem Grund das Laufrad der Pumpe blockiert. Moderne Dauermagnete werden auch bei längerem Durchdrehen nicht entmagnetisiert, falls ihre Temperatur dabei in Grenzen bleibt. Jedoch kann sich der Spalttopf beim Ausbleiben der Kühlung durch Wirbelströme exzessiv erwärmen. Deshalb sollte eine Maschine mit Magnetkupplung im Fall des Durchdrehens möglichst schnell abgestellt werden. Falls es Betriebstemperatur und Druck zulassen, können Wirbelströme auch mit einem Spalttopf aus Polymerwerkstoff vermieden werden.

Die mit der Lagerung des inneren Rotors verbundenen Probleme dürfen nicht unterschätzt werden. Die Lager der Laufradwelle laufen in der Prozeßflüssigkeit und müssen mit ihr geschmiert werden. Wälzlager kommen hierfür nicht in Frage. Um mit allen möglichen Prozeßflüssigkeiten als Schmiermittel zurechtzukommen, werden in der Praxis hydrodynamische Gleitlager aus verschleiß- und korrosionsfestem Siliziumkarbid verwendet. Ein derartiges Lager darf nicht trocken laufen, was aber passieren kann, wenn die Flüssigkeit im Lagerraum verdampft. Eine effektive Kühlung ist deshalb unabdingbar. Innerhalb des Spalttopfs entsteht Wärme durch Lagerreibung, Flüssigkeitsverwirbelung, und durch Wirbelströme im Spalttopf. Die Prozeßflüssigkeit muß deshalb den Innenraum des Spalttopfs durchströmen, wobei aber abrasive oder magnetisierbare Partikel vor dem Eintritt in den Spalttopf herausgefiltert werden müssen. Der Investitionsaufwand für eine Pumpe mit hermetisch abgedichteter Magnetkupplung ist also beträchtlich und keinesfalls geringer als bei Verwendung einer Doppel-Gleitringdichtung mit zirkulierender Sperrflüssigkeit oder mit einer außenseitigen, gasgeschmierten Gleitringdichtung. Der Hauptvorteil ist hier die „Null-Leckage“. Beim Vergleich der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit dieser alternativen Wellendichtsysteme sind die entscheidenden Faktoren die Art der abzudichtenden Prozeßflüssigkeit und die Betriebsbedingungen.



## 21.8 LITERATUR

- Nothdurft, H.:* Eigenschaften von Metallbälgen. Regelungstechnik 5, 1957
- Matheny, J.D. :* Bellows spring rate. Machine Design 34, 1962
- Seifert, K.:* Metallbälge. Fertigungstechnik und Betrieb 13, 1963
- Matt, R.J.:* High temperature metal bellows seals for aircraft and missiles accessories. Trans ASME, Ser.B, Journ.of Engg. 85, 1963
- König, K.:* Metallbälge - ihre Anwendung, Herstellung und Lebensdauer. Die Technik 19, 1964
- Trutnovsky, K.:* Der Metallbalg, Technische Rundschau 59, 5, 1967
- Kayser, H.:* Anwendungsmöglichkeiten nahezu reibungsfreier hermetischer Kolbendichtungen. Konstruktion 23, 1971
- Trutnovsky, K.:* Berührungsdichtungen. Berlin, 1975
- Lott, H.J.:* Membranen. Konstruktion-Elemente-Methoden (KEM) 8, 9, 1981
- Kawahara, Y., Nikamoto, H., Terai, K. :* A study of failure phenomena of diaphragms. 10th Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Innsbruck, 1984
- Flint, K.:* Rolling diaphragms. Technical File No. 143, Engineering, March 1986
- anon. Engineered Sealing - a new Approach, World Pumps, March 1986
- Münnich, R.:* Faltenbälge. in „Dichtungen in der Verfahrenstechnik“, Resch, 1987
- Newby, T.:* Sealing options for pumps. Chemical Engineer, April 1988
- Ebeling, R., Ervens, W.:* Vergleich technischer Dauermagnetwerkstoffe und entsprechender Einsatzgebiete. KEM, Feb. 1989
- Waidner, P.:* Magnetkupplungen. Chemie-Technik 19 (1990), Nr. 6





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

Inhaber und Betreiber der Domain [www.fachwissen-dichtungstechnik.de](http://www.fachwissen-dichtungstechnik.de) ist Prof. Dr. Heinz Konrad Müller, Otl-Aicher-Str. 48, D-80807 München, Deutschland.

Der gesamte Inhalt der unter der Domain [www.fachwissen-dichtungstechnik.de](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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.