

Ohne Grundwissen geht es nicht

Dichtungen sind wichtige Bauteile aller technischen Systeme – von Autos genauso wie von Küchenmaschinen, Raumfähren, Fahrradventilen, Kern- und Windkraftwerken, Wasserhähnen, Werkzeugmaschinen oder verfahrenstechnischen Anlagen. Trotzdem werden sie in der Forschung, der Lehre und allzu oft auch in der Praxis sträflich vernachlässigt. Ob dies aus Nachlässigkeit oder fehlendem Wissen geschieht, sei dahingestellt. Fakt ist – gleichgültig ob Entwickler, Konstrukteur, Fertiger, Monteur, Betreiber, Instandhalter, Einkäufer oder Qualitätssicherer – ohne fundiertes dichtungstechnisches Grundwissen geht es nicht. Die nachfolgenden Ausführungen sind eine Fortführung des Beitrages im DICHUNGSTECHNIK JAHRBUCH 2013 und bauen auf den Ausführungen auf.

Endete der letzte Beitrag mit den Grundeinflüssen auf das tribologische System „Dichtung“ und dessen wichtigen Basisfunktionen, liegt der Fokus jetzt auf der Fragestellung, wie die Dichtung im Bereich des Dichtkontaktes und insbesondere das Dichtelement selbst zu gestalten sind. Grundlage ist wie immer die physikalische Funktion, aus der sich dann auch die „Grenzen“ ergeben.

Dichtungen für linear bewegte Maschinenteile

Lineare Bewegung gibt es vielfach in der Hydraulik, der Pneumatik, bei Linearführungen und in allen Hubkolbenmaschinen (Motoren und Verdichter). Die drei wesentlichen dynamischen Dichtungsarten in Hydrauliksystemen sind: Kolbendichtungen, Stangendichtungen und Abstreifer. Wie arbeiten nun diese Dichtungen?

Grundfunktion

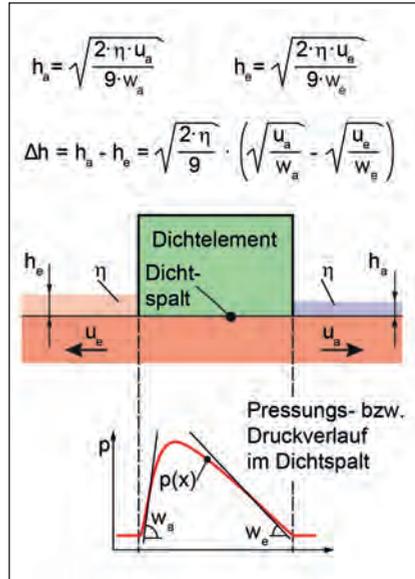
Eine Dichtung ist statisch dicht, wenn die Dichtkante überall ausreichend angepresst ist. Bewegt sich ein Maschinenteil unter der Dichtung aus einem flüssigkeitsgefüllten Raum heraus, so bleibt infolge von Adhäsion immer ein dünner Schmierfilm darauf haften. Dieser lässt sich mechanisch durch Abwischen, Abschaben oder Abkratzen nie vollständig entfernen. Ist die Pressungsverteilung im Dichtkontakt in Bewegungsrichtung bekannt, z.B. durch eine Finite-Elemente-Rechnung, kann bei elastischen Dichtelementmaterialien eine mittlere Schmierfilmdicke h_g abgeschätzt werden $\gg 1$. Grundlage dafür ist die inverse Reynolds-

gleichung. Diese Schmierfilmdicke h_a ist abhängig von der Viskosität η , der Ausfahrgeschwindigkeit u_a und dem steilsten Gradient w_a der Pressungsverteilungskurve $p(x)$ in Bewegungsrichtung. Dasselbe gilt für das einfahrende Maschinenteil (Indizes e), wenn außerhalb genügend Flüssigkeit zur Verfügung steht. Dicke Schmierfilme entstehen also bei hohen Geschwindigkeiten und flachen maximalen Gradienten, dünne bei kleinen Geschwindigkeiten und steilen maximalen Gradienten.

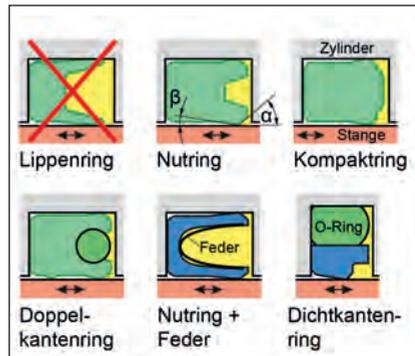
Hydraulik-Stangendichtung

Ist nun bei einer Stangendichtung in der Hydraulik die potenziell einschleppbare Schmierfilmdicke h_e größer als die ausgeschleppte h_a , wird diese vollständig wieder eingeschleppt und die Dichtung ist dynamisch dicht. Bei positivem $\Delta h \gg 2$, ist die Dichtung dynamisch undicht und bei negativem Δh dynamisch dicht. Deshalb haben Hydraulik-Stangendichtungen, neben kurzen, scharfkantigen, stabilen Dichtlippen (Nutting), ölseitig immer einen wesentlich steileren Pressungsgradient als luftseitig. Dies wird in erster Linie erreicht durch einen steilen Dichtkantenwinkel α ölseitig und einen flachen Dichtkantenwinkel β luftseitig,

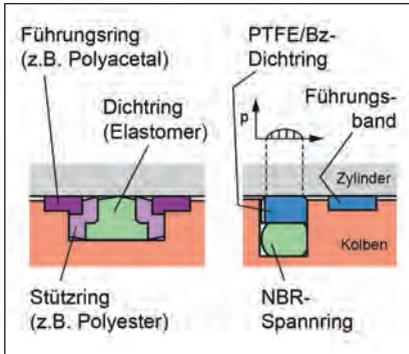
>>1. Beim Dichtkantenring aus PTFE-Compound oder hartem Polyurethan ist dies besonders ausgeprägt umgesetzt. Beim alten Lippenring hingegen ist, infolge der langen dünnen Dichtlippe, der ölseitige maximale Pressungsgradient w_a immer flach und damit der Schmierfilm h_a dick. Dynamische Leckage ist somit vorprogrammiert. Beim Doppelkantenring bestimmt die Dichtkante mit dem



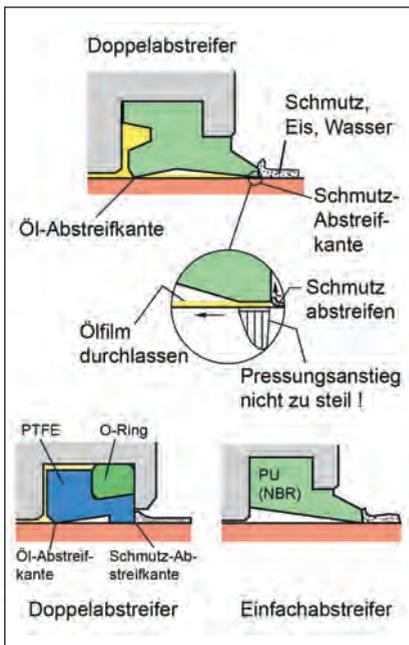
>>1: Schmierfilmdicke h bei Linearbewegung



>>2: Verschiedene Hydraulik-Stangendichtungen



>>3: Symmetrische Hydraulik-Kolbendichtungen



>>4: Abstreifer für Hydraulik-Stangen

steilsten Pressungsgradienten die Schmierfilmdicke. Die zweite Dichtkante dient in erster Linie der Reibungsminderung, weil sich der Ringrücken erst bei höherem Druck durch Querverformung vollständig an die Stange anlegen kann. Dafür gibt es auch noch andere Maßnahmen, wie eine Rillierung des Dichtungsrückens oder eine Noppenstruktur. Mit steigendem Druck verformen sich die Dichtungen immer mehr. Der „Trick“ ist, die nicht zu vermeidende Verformung positiv zu gestalten bzw. möglichst lange hinauszuögern. Irgendwann aber werden die maximalen Pressungsgradienten ungünstig – w_e steigt. Dynamische Leckage tritt auf. Mehrere, von einander unabhängige Dichtungen hintereinander eingebaut schaffen dann Abhilfe. Es bildet sich ein Zwischendichtungsdruck p_z und der überlastete erste Dichting wird entlastet. Diese Anordnung wird als Tandem bezeichnet. Achtung: Mit mehreren Dichtkanten an einem Dichting wird diese Funktion nicht erreicht.

Flüssigkeitstrennung

Zwei mit verschiedenen Flüssigkeiten gefüllte Räume lassen sich nur mit zwei Rücken an Rücken eingebauten Stangendichtungen gegeneinander abdichten. Dabei muss der Abstand der beiden Dichtungen zwingend größer als die Hublänge sein. Wenn nicht, kommt es zur Vermischung der Flüssigkeiten.

Kolbendichtung

Nur einseitig flüssigkeitsbeaufschlagte Kolben werden mit Dichtelementen abgedichtet, die analog zu Stangendichtungen gestaltet sind. Liegt auf beiden Seiten dieselbe Flüssigkeit an, verwendet man Dichtelemente mit symmetrischer flacher Pressungsverteilung >>3. Dadurch bildet sich schon bei geringer Geschwindigkeit ein dicker Schmierfilm. Das System ist dann reibungs- und verschleißarm. Eine geringe dynamische Leckage spielt am Kolben keine Rolle. Zwei Rücken an Rücken eingebaute Dichtelemente mit asymmetrischer Pressungsverteilung sind hier eine gefährliche Anordnung und zu vermeiden.

Abstreifer

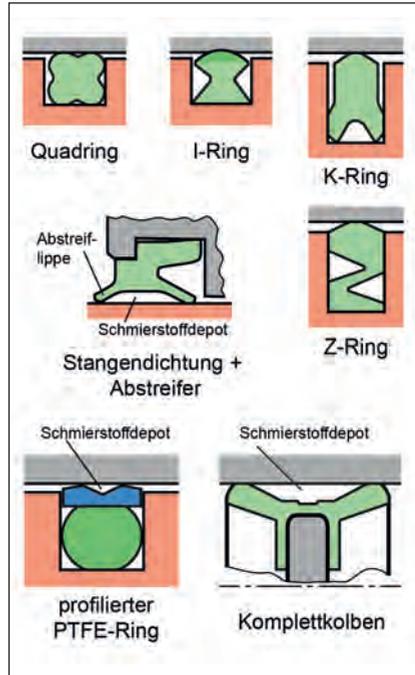
Schmutz und Wasser von der einfahrenden Stange abzustreifen, aber den Schmierfilm beim Einfahren vollständig durchzulassen, ist die schwierigste Aufgabe im Dichtsystem. Dazu darf der Pressungsanstieg der Abstreifer-Kante außen nicht „zu steil“ sein >>4. Der Abstreifer erzeugt sonst Leckage. Doppelabstreifer mindern den eventuell von der Stangendichtung durchgelassenen dicken Schmierfilm noch etwas. Abstreifer günstig zu gestalten, erfordert das größte Know-how.

Lauffläche

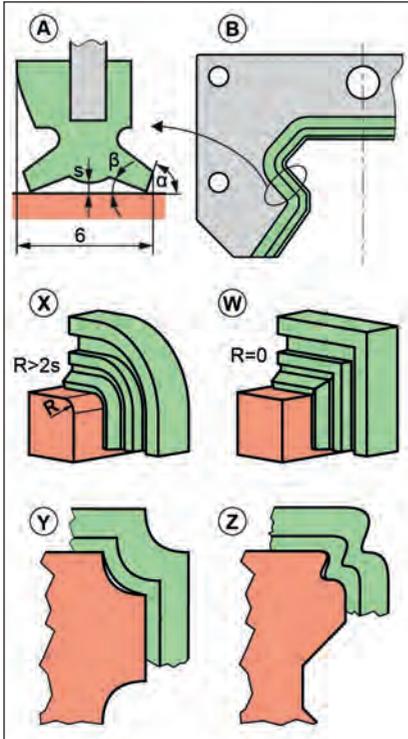
Da Hydraulikdichtringe – infolge des hohen Drucks – sehr stark angepresst werden, muss deren Lauffläche relativ glatt sein. $R_z = 0,4$ bis $1,6 \mu\text{m}$ bei einem Traganteil von 50 bis 70% in einer Schnitttiefe von $c = 0,25 R_z$, ausgehend von $c_{\text{ref}} = 5\%$ sind gängige Werte. Pneumatikdichtringe sind viel weniger stark angepresst. Deshalb sind dort etwas größere R_z -Werte bei ähnlichem Traganteil ausreichend.

Pneumatik-Dichtungen

In der Pneumatik ist der Druck gering ($< 1 \text{ MPa}$) und das Fluid kompressibel, äußerst niederviskos und nicht schmierfähig. Pneumatik-Systeme werden nur einmal



>>5: Typische Pneumatik-Dichtungen



>>6: Abstreifer-Gestaltung für Führungsbahnen

in ihrem „Leben“ bei der Montage geschmiert. Der Schmierfilm mindert Reibung und Verschleiß und sorgt für gute Gasdichtheit, indem er feinste Rauheitskanäle verschließt. Ohne Schmierfilm gibt es keine Gasdichtheit. Pneumatik-Dichtungen dürfen also den Schmierfilm keinesfalls abstreifen, sondern müssen ihn gleichmäßig erhalten, indem sie leicht auf ihn aufgleiten. Sie werden demzufolge schmierstoffhaltend, radial nachgiebig, mit geringer Anpressung und möglichst flacher Pressungsverteilung ausgelegt >>5. Hydraulikdichtringe sind also für die Pneumatik völlig untauglich, obwohl sie makroskopisch häufig ähnlich aussehen.

Führungsbahnabstreifer

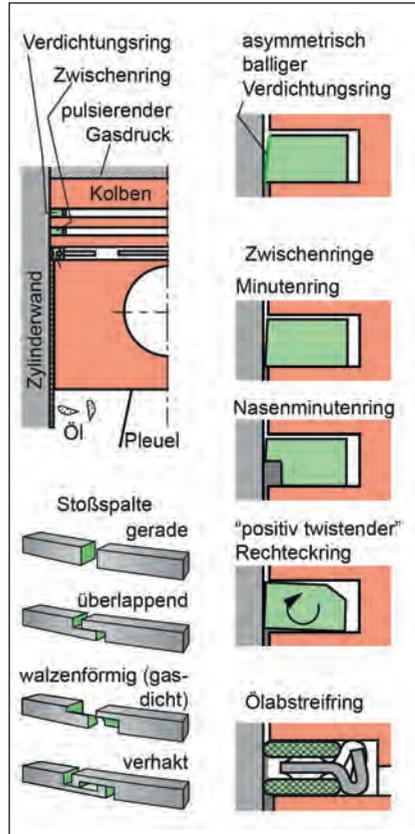
Führungsbahnabstreifer müssen den Schmierstoff in der Führung sowie Fremdfluid und Partikel draußen halten. Kritisch sind die Stirnabstreifer. Gute Dichtheit wird mit zwei kurzen steifen Dichtlippen, die mit relativ ge-

ringem Vorspannweg und schmaler Berührbreite definiert angepresst werden, erreicht. Hier gilt wie bei Hydraulikstangendichtungen: steiler Pressungsgradient und zusätzlich kein flacher Keilspalt in Bewegungsrichtung. Der in >>6 gezeigte Abstreiferquerschnitt A erfüllt bei einer Werkstoffhärte von 90 bis 95 ShA, einem Vorspannweg von $s = 0,4 \text{ mm}$, $\alpha = 65^\circ$ und $\beta = 20^\circ$ die Anforderungen ausgezeichnet. Gute Abstreifwirkung bedingt eine ausreichende Anpressung. Dies wirkt sich auf die Reibung negativ aus. Besonders reibungsarme Abstreifer sind immer undicht. Scharfe Innen- oder Außenecken W, z.B. an Profilschienenführungen B, sind nicht abdichtbar. Es sind immer Radien X von $R > 2 \cdot s$ notwendig. Fasen sind nicht ausreichend. Ebenso nicht abdichtbar sind kleine Innenradien Y und enge Radienfolgen Z. Entweder reißt der Abstreifer ein oder er kommt gar nicht zur Anlage. Generell gilt: Je „runder“ das Bauteil bei Axialbewegung, umso besser ist es abdichtbar. Die Rauheit der Führung darf bei $R_z 1$ bis $4 \mu\text{m}$ liegen. Damit sich

Partikel nicht verkleben, muss die Rauheitsstruktur zwingend in Bewegungsrichtung zeigen. Auch Quer-„Kratzer“ sind extrem schädlich.

Hubkolbenmaschinen

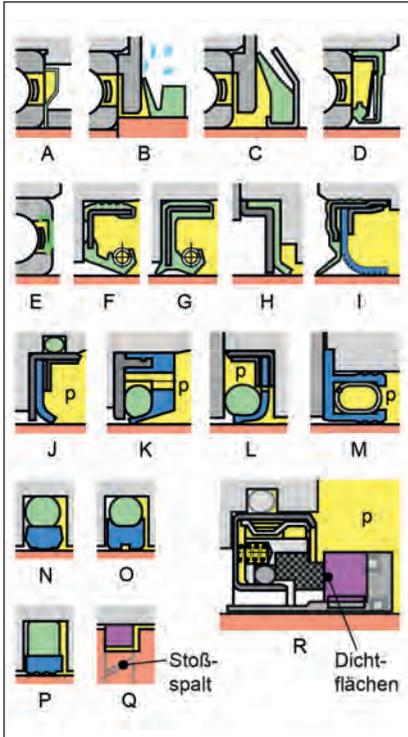
Die Kolben von Motoren und Verdichtern werden meist mit metallischen Kolbenringen mit Stoßspalt abgedichtet. Der Stoßspalt ist für die Montage und zum Ausgleich der Temperaturdehnung unabdingbar. Ist die Temperatur moderat, werden auch Hochleistungskunststoffe wie PEEK o.ä. eingesetzt. Kolbenringe werden nur leicht vorangepresst und sind so gestaltet, dass sie einen mikrometerdünnen Schmierfilm erzeugen, auf diesen aufschwimmen und stets zusätzlich vom gerade wirkenden Druck angepresst werden. Dadurch ist der Druck im Schmierfilm zwischen den Dichtflächen immer größer als der abzudichtende Gasdruck. Dazu ist ihre Lauffläche im Mikrometerbereich komplex konturiert (Hydrodynamik). So kann man Gase bis auf den Stoßspalt vollständig abdichten – bei geringstem Verschleiß und Ölverbrauch. Meist werden mehrere Kolbenringe hintereinander eingesetzt >>7. Sie bilden für die Stoßspaltleckage ein stark drosselndes Labyrinth und erzeugen einen gleichmäßigeren, dünnen Schmierfilm. Dafür erhöhen sie die Reibung. Die Stoßspaltleckage kann aber auch durch einen aufwändigen Stoßspaltverschluss minimiert oder vermieden werden. Für vollständige Dichtheit muss der Stoßspalt axial und radial verschlossen sein.



>>7: Dichtringe für Hubkolbenmaschinen

Berührende Dichtungen für drehende Maschinenteile

Drehend bewegte Maschinenteile sind sehr zahlreich in der Technik. Die Betriebsbedingungen für die eingesetzten Dichtungen entsprechend vielfältig. Dies



>>8: Kleine Auswahl berührender Wellendichtungen

führt zu einer Vielzahl unterschiedlichster Dichtringe und Dichtsysteme mit ebenso unterschiedlichen Eigenschaften. >>8 zeigt eine kleine Auswahl. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist, ob die Dichtfunktion axial (A-D, Q, R) oder radial erfolgt. Bei axialer Dichtfunktion können für den Dichtring im Prinzip beliebige Werkstoffe eingesetzt werden und die Gestaltungsfreiheit ist groß. Bei radialer Dichtfunktion kommen nur nachgiebige und vor allem elastische Werkstoffe in Frage, was die Gestaltungsfreiheit und Einsatzgrenzen stark einschränkt. Alle Dichtringe besitzen eine Dichtkante oder zumindest eine sehr schmale Dichtfläche – mit Ausnahme von I, Q und R. Wo fertigungstechnisch Strukturen für bessere Schmierung oder Dichtheit in die Dichtfläche eingebracht werden, ist eine gewisse Breite für die Funktion notwendig.

Dichtkanten (sehr kleine Dichtfläche A_D) haben bei geringer Anpresskraft F_N und damit geringer Verformung des Bauteils eine hohe mittlere Flächenpressung p_m ($p_m = F_N/A_D$). Sie dichten dadurch gut ab und die Reibung R ($R \sim A_D$) ist niedrig.

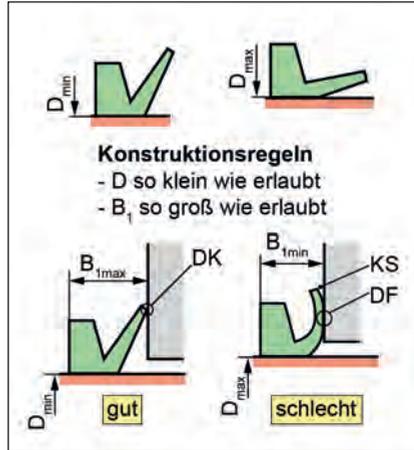
Schutzdichtungen

Dichtungen wie A bis E in >>8 bezeichnet man als Schutzdichtungen. Sie schützen vorzugsweise fettgeschmierte Lager zum einen vor Schmierstoffverlust und zum anderen vor Kontamination durch Schmutz. Sie dichten idealerweise axial und nutzen die Fliehkraft, um Schmutz abzuweisen. Zu diesen Dichtringen gehört auch der V-Ring B. Die Anpressung seiner Dichtlippe und damit die Reibung nehmen mit steigender Drehzahl infolge Fliehkraft ab und können Null werden. Ist er – im zulässigen Rahmen (D_{max} , $B1_{min}$) – ungünstig eingebaut, >>9, stellt

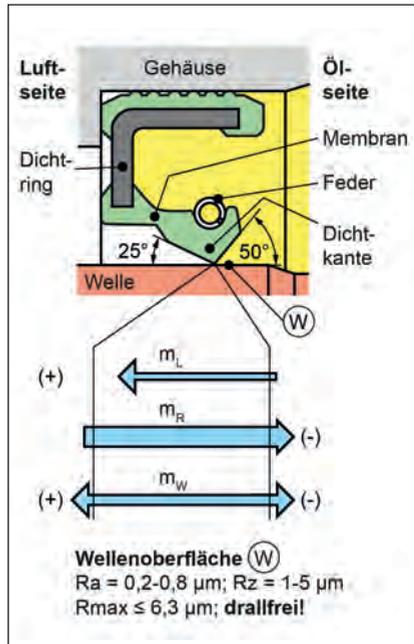
sich anstatt einer Dichtkante DK eine Dichtfläche DF mit geringer Pressung und vorgeschaltetem Keilspalt KS ein. Dies ist für Dichtgüte und Reibung extrem ungünstig. Fazit: Man kann also mit ein- und demselben Dichtelement bei identischen Betriebsbedingungen sowohl eine „gute“ als auch – ohne das entsprechende Wissen – eine „schlechte“ Dichtstelle konstruieren.

Radial-Wellendichtringe aus Elastomer (RWDR)

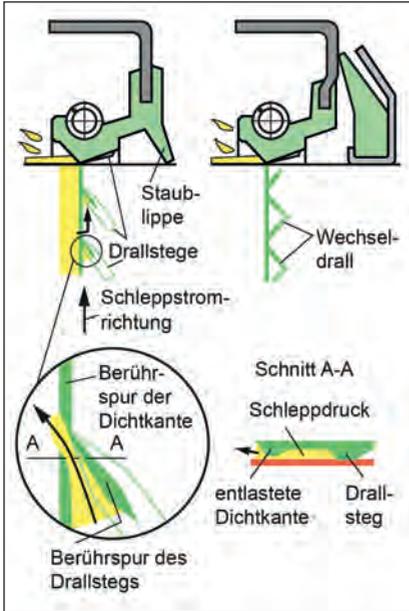
Klassische RWDR, F in $\gg 8$, sind äußerst häufig eingesetzte Dichtelemente, um insbesondere drucklos anstehendes Schmieröl, aber auch andere Fluide, abzudichten. Temperaturen von -40 °C bis $+150\text{ °C}$ und Gleitgeschwindigkeiten bis 40 m/s sind bei Öl, abhängig von Werkstoff und Wellendurchmesser, damit beherrschbar. Wird deren Dichtkante im Neuzustand mit einer mittleren Pressung von ca. 1 MPa angepresst, sind die Dichtringe statisch perfekt dicht und unterliegen einem geeigneten Einlaufverschleiß. Durch Einlaufverschleiß – Aufrauen der ca. $0,15\text{ mm}$ schmalen Dichtfläche – werden RWDR zu aktiven Dichtelementen und sind damit auch dynamisch ausgezeichnet dicht. Die aufgrund der unterschiedlichen Dichtkantenwinkel (steiler Winkel zur Ölseite) asymmetrisch verzerrte Rauheitsstruktur erzeugt einen Rückförderstrom m_R , der größer ist als der potenzielle Leckagestrom m_L



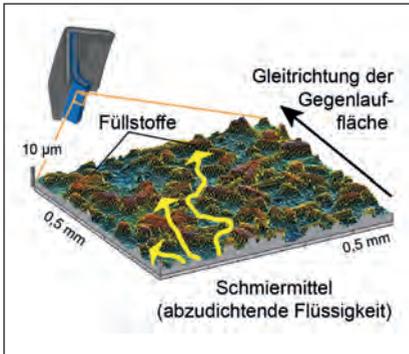
>>9: Dichtring – gut und schlecht eingebaut



>>10: Klassischer Radial-Wellendichtring - Funktionselemente und Wirkungsweise



>>11: Hydrodynamische Dichthilfen und „Schutzlippen“



>>12: Gleitfläche eines gelaufenen PTFE-Compounds – Füllstoff Glasfaser

>>10. Damit gelangt kein Öl ganz nach außen. Diesen Effekt gibt es nur bei Radial-Wellendichtringen aus Elastomer. Wird diese dichtringimmanente Förderung gestört (Verhärtung, Ablagerungen), wird die Dichtstelle undicht – oder dann, wenn die Wellenoberfläche m_w zusätzlich fördert >>10. Fördert sie zu viel nach außen, wird die Dichtung sofort undicht. Fördert sie nach innen, sind die Dichtflächen unzureichend geschmiert und die Dichtstelle fällt durch Verschleiß oder Überhitzung früh aus. Deshalb werden, neben einer bestimmten Rauheit, förderneutrale (drallfreie) Wellenoberflächen verlangt >>10 – eine absolut notwendige, aber äußerst schwer zu erfüllende Forderung. Andere radial wirkende Wellendichtringe aus Elastomer – wie z.B. E und H in >>8 – funktionieren auch wie beschrieben.

Eine lange, dünne Membran lässt die Dichtkante des RWDR Radialbewegungen der Welle gut nachfolgen. Eine metallische Feder kompensiert die im Laufe der Zeit und durch Temperatur stark nachlassende Pressung aus der Elastomerdehnung. Eine Schutzlippe soll Schmutz und Wasser von der Dichtkante fernhalten. Besonders wichtig ist dies bei RWDR mit hydrodynamischen Dichthilfen. Dies sind schräge, erhöhte Strukturen (Drallsteg) auf der Luftseite der Dichtkante

>>11. Diese erfassen durchgedrungenes Öl und pumpen es wieder in den Ölraum zurück. Das Prinzip lautet: Geringe „Leckage“ zulassen, erfassen und zu-

rückpumpen. Natürlich wird auch alles andere, was der Dichtkante außen „angeboten wird“, verstärkt in den Ölraum gepumpt. Viel besser als radial wirkende Schutzlippen sind wegen der helfenden Fliehkraft axial wirkende – Beispiel >>11 rechts oben.

PTFE-Manschettendichtungen

Reicht die chemische/thermische Beständigkeit von Elastomeren nicht mehr aus, werden PTFE-Werkstoffe eingesetzt. Die Manschette ohne zusätzliche metallische Feder ist die übliche Form für drucklos eingesetzte Dichtringe aus PTFE-Compound >>8 I, J. Dichtringe aus PTFE-Compound sind statisch und dynamisch viel weniger gut dicht als Dichtringe aus Elastomer. Dafür ertragen sie eher Trockenlauf oder Mangelschmierung sowie sehr hohe (> 250 °C) und sehr tiefe (< -30 °C) Temperaturen. Sie bilden auch nur passive Dichtungen. PTFE-Compound ist ca. 150-mal steifer als Elastomer und enthält harte, grobe Füllstoffe >>12. Damit kann es sich der Welle im Mikrobereich nicht vollständig anpassen. Flüssigkeit wird so auch statisch durch Kapillarkräfte nach außen transportiert. Die Wellenoberfläche wird zumindest feucht. Trocken betrieben sind solche Dichtringe deshalb auch nicht gasdicht.

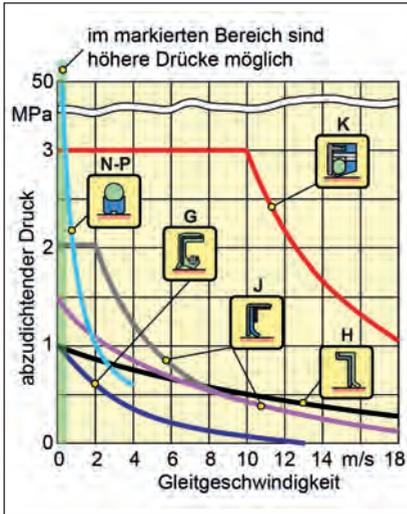
PTFE-Compound bildet nicht, wie Elastomere das selbständig tun, eine rückfördernde Struktur aus – wie alle anderen Kunststoffe auch nicht. Für gute dynamische Dichtheit wird deshalb fertigungstechnisch eine rückfördernde Spiralrille eingebracht >>8 I. Statisch sind solche Dichtringe undicht. Deshalb darf die Dichtstelle im Stillstand weder bespritzt noch überflutet sein.

Tipp: Ölseitig ein gut anliegender geschlossener Ring, danach mit etwas axialem Abstand eine „grobe“ Spiralrille mit steilen Flanken, damit Kapillarkräfte das Öl zwischen den Dichtflächen halten, ermöglichen auch überflutete Dichtstellen, die statisch und dynamisch in eine Drehrichtung dicht sind!

Die Wellenoberfläche darf bei Manschettendichtungen aus PTFE-Compound glatter sein als bei RWDR. Dies mindert den Verschleiß. Mit stabilen, abgestützten Manschetten ohne Spiralrille können auch Drücke bis etwa 2 MPa abgedichtet werden >>8 J. Geringe Leckage ist bei Druck jedoch unvermeidlich.

“Wellendichtungen für Fluide unter Druck”

Nachdem seither in erster Linie von Wellendichtungen ohne Druckbelastung die Rede war, geht es nun um Wellendichtungen für Fluide unter Druck.



>>13: Leistungsfähigkeit von Radialdichtungen für Druck

Radial wirkende Dichtringe

Druck verformt filigrane Dichtringe aus weichem Material, wie sie für Fluide ohne Druck eingesetzt werden, unzulässig. Deshalb müssen druckbelastbare Dichtringe stabil gebaut >>8 G bis H und bei höherem Druck zusätzlich aus einem festen Material sein, >>8 J bis R. Die zulässige Gleitgeschwindigkeit sinkt dabei rasch. Das Flächenverhältnis k – druckbelastete Fläche A1 zu Dichtfläche A – sollte bei Radialdichtungen nur wenig größer als 1 sein. Sonst wird die Dichtfläche mit steigendem Druck übermäßig angepresst. Die Reibung steigt extrem schnell und die ertragbare Gleitgeschwindigkeit bzw. die Einschaltdauer sinken dramatisch. Der klassische

Weg beim RWDR ist, die Membran zu kürzen und zu verstärken sowie den metallischen Versteifungsring zur Abstützung bis nahe an die Welle zu ziehen >>8 G bis H. Dies geht zu Lasten der radialen Beweglichkeit. Deshalb ist so nur eine Teilentlastung möglich ($k \gg 1$) und damit $p \times v$ -Werte um 1 MPa·m/s. Dichtringe der Bauart K bis L können voll entlastet ausgeführt werden ($k \leq 1$) und bestehen aus dem festeren Material PTFE-Compound. Man nennt sie „entlastete Wellendichtringe“. Das Flächenverhältnis k ist über den axialen Abstand der schmalen Dichtkante von der niederdruckseitigen Nutwand beliebig einstellbar. Damit sind bis zu mittleren Drücken von $p = 3$ MPa Gleitgeschwindigkeiten von $v = 10$ m/s möglich. Dies entspricht einem $p \times v$ -Wert von 30 MPa·m/s. >>13 vermittelt einen Eindruck der Leistungsfähigkeit. Rotordichtungen M bis P sind je nach Bauart und Werkstoff für höhere Drücke bis hin zu 50 MPa einsetzbar. Die maximale Gleitgeschwindigkeit ist meist auf < 2 m/s beschränkt. Der mit Rotordichtungen erreichbare mittlere $p \times v$ -Wert beträgt 2,5 MPa·m/s, in Einzelfällen bis 6,5 MPa·m/s. D.h., bei höheren Drücken ist nur noch Schleichgeschwindigkeit oder Aussetzbetrieb mit nur kurzen Betriebszeiten (schwenken, positionieren) möglich. Grund ist die hohe Reibleistung und die daraus resultierende starke Erwärmung. Aktives Kühlen erhöht die Leistungsgrenzen wesentlich – ist aber aufwändig und deshalb unpopulär. Wegen der starken Anpressung müssen bei einer

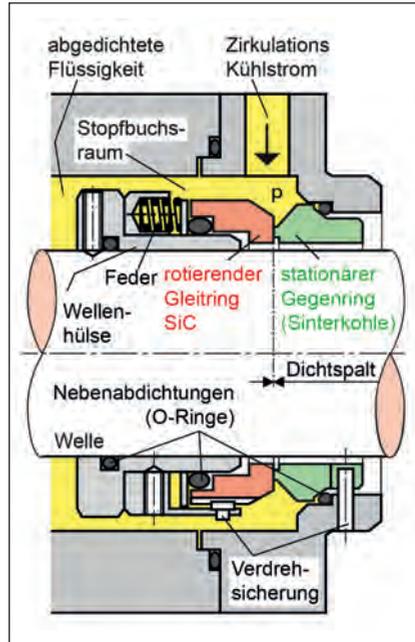
radial wirkenden Druckabdichtung die Wellenoberflächen wie bei Hydraulikdichtungen hart und glatt sein – Rz um $1\ \mu\text{m}$ bei M_R 70% in $c = \frac{1}{2} Rz$ Tiefe sind gängige Werte. Bei Druckabdichtung mit „härteren“ Materialien ist immer mit geringer Leckage zu rechnen.

Gleitringdichtungen und Kolbenringe

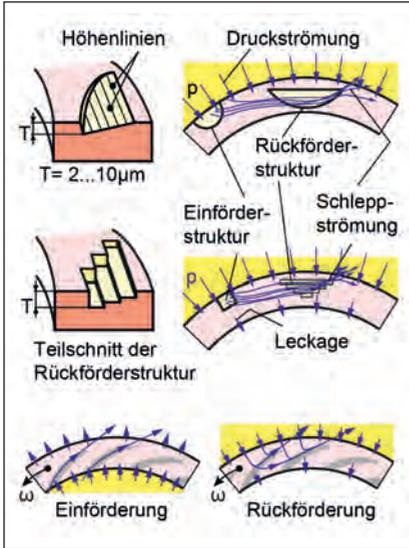
Mit den komplexen, teuren und großbauenden axial wirkenden Gleitringdichtungen ist fast alles möglich >>8 R – hohe Gleitgeschwindigkeit, hoher Druck oder beides gleichzeitig. Möglich sind $p \times v$ -Werte bis zu mehreren $1000\ \text{MPa}\cdot\text{m/s}$. Es ist nur eine Frage des Aufwands und der Kühlung. >>14 zeigt die Bauteile am Beispiel einer einfachen Standard-Gleitringdichtung. Die Dichtfunktion findet zwischen den extrem eben und fein geläppten Stirnflächen von Gleit- und Gegenring statt,

die von Federn aneinander gepresst werden und die sich bei höherer Gleitgeschwindigkeit natürlich um mindestens ein paar 10tel μm sicher trennen müssen. Dann tritt unvermeidbar etwas Fluid durch den Spalt aus. Verschleiß wird über den Gleitring durch die Federn automatisch nachgestellt. Einer der beiden Ringe besteht meist aus feinverschleißfähigem, gesintertem und imprägniertem Kohlenstoff. Der andere aus einem extrem harten und verschleißbeständigen Material, wie z.B. Siliziumcarbid (SiC). Damit sind Gleitringdichtungen für im Mikrometerbereich fertigungstechnisch strukturierte Gleitflächen prädestiniert. SiC – und damit die Struktur – verschleißt hier nicht. Dies ist wichtig! Denn die Strukturtiefe muss im Bereich der Spalthöhe, also bei wenigen μm liegen >>15. Sonst sind die Strukturen hydrodynamisch unwirksam. Durch Strukturieren kann

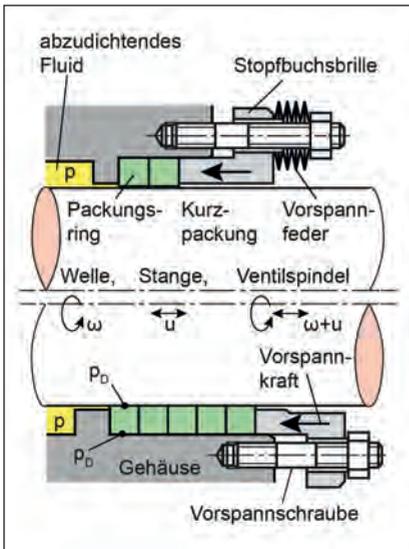
- die Spalthöhe vergrößert oder
- die Leckage gemindert oder
- die Gleitflächenkühlung verbessert oder
- die Reibung reduziert oder
- von jedem etwas erreicht werden.



>>14: Gleitringdichtung und Bauteile



>>15: Strukturieren von Gleitflächen – hydrodynamisch wirksam



>>16: Stopfbuchsichtung und ihre Elemente

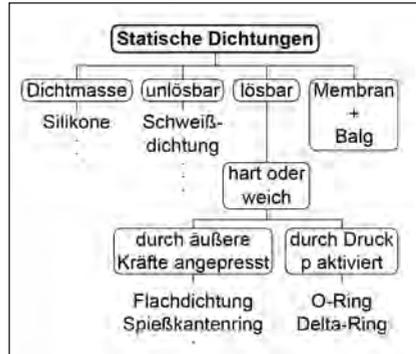
Damit ist klar: Gleitringdichtungen gibt es nur für einfache Anwendungen bei niedriger Gleitgeschwindigkeit und geringem Druck (ca. 2,5 MPa) „von der Stange“. Hochleistungs-Gleitringdichtungen müssen für jeden Anwendungsfall berechnet und konstruiert werden. Dafür benötigt der Gleitringdichtungs-Entwickler eine exakte Angabe der zu erwartenden Betriebsbedingungen. Der feinverschleißfähige Ring unterliegt bei jedem Betriebspunktwechsel einem „Anpassungverschleiß“. Deshalb haben Gleitringdichtungen bei kontinuierlichem Betrieb eine viel längere Lebensdauer als bei diskontinuierlichem Betrieb.

Kolbenringe werden auch für drehend bewegte Maschinenteile eingesetzt >>8 Q. Sie sind einfach, sehr klein, werden gehäusespannend in geschlossene Wellennuten eingebaut und dichten mit erheblicher Stoßspaltleckage axial gegen die rotierende Nutwand ab. Gehäuseintern eingesetzt spielt die Leckage keine Rolle, z.B. bei Drehübertragern in Getrieben. Sie macht sich nur als Wirkungsgradverlust bemerkbar. Da die Leckage kühlt und schmiert, werden $p \times v$ -Werte von 48 MPa·m/s erreicht; mit raffiniert strukturierter Gleitfläche sogar bis 380 MPa·m/s. Dies zeigt, was mit ausgefuchster Strukturierung hydrodynamisch erreichbar ist. Letztlich sind Kolbenringe nichts anderes als Einfachst-Gleitringdichtungen. Hier wie da

gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten.

Stopfbuchsichtungen

Die Stopfbuchsichtung ist die klassische Wellen- und Stangendichtung schon des frühen Maschinenbaus. Sie ist sehr einfach aufgebaut >>16 unten. Weiches Packungsmaterial wird über die Stopfbuchsbrille axial verpresst und erzeugt durch Querdehnung die radiale Dichtpressung p_D . Obwohl Stopfbuchsichtungen gravierende Nachteile bezüglich Reibung, Gleitgeschwindigkeiten, funktionsnotwendiger Leckage und Wartung haben, sind sie noch immer unverzichtbar. Die Vielfalt des verfügbaren Packungsmaterials macht es auf einfache Weise möglich, auch widrigste Betriebsbedingungen hinsichtlich Druck, Temperatur und „Chemie“ bei hoher Zuverlässigkeit zu beherrschen. Auch muss zum Packungsaustausch oder zur -ergänzung nur die Stopfbuchsbrille etwas zurückgezogen, aber nicht wie bei geschlossenen Dichtringen die Maschine zerlegt werden. Günstig sind kurze Packungen (zwei Packungsringe). Sie haben viel weniger Reibung als lange und benötigen deshalb nur wenig Leckage zur Kühlung. Und wenn sie über Federn vorgespannt werden, ist die kurze Stopfbuchsichtung auch noch weitgehend wartungsfrei.



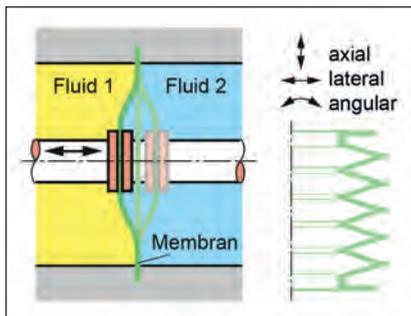
>>17: Systematische Einteilung statischer Dichtungen

Statische Dichtungen

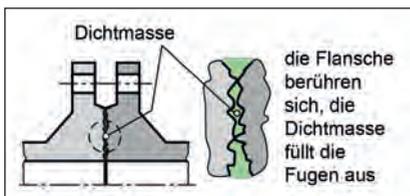
Nicht nur bewegte Maschinenteile müssen abgedichtet werden sondern auch zueinander ruhende. Die dazu notwendigen Dichtungen nennt man statische Dichtungen. Obwohl die Bauteile zueinander „ruhen“ können doch Mikrobewegungen auftreten, die aber für die Funktion des Geräts nicht notwendig, sondern allenfalls schädlich sind. Eingeteilt werden statische Dichtungen wie in >>17 gezeigt.

Membranen und Bälge

Membranen und Bälge sind Zwitterwesen. Sie dichten bewegte Maschinenteile bei begrenzter Bewegung durch Verformen ab, ohne dass es an der Dichtstelle zu einer Gleitbewegung kommt >>18. Es wird also statisch abgedichtet. Dies hat hinsichtlich Reibung und Dichtheit große Vorteile. Mehrere hintereinander geschaltete Mem-



>>18: „Hermetische“ Abdichtung mittels Membran oder Balg



>>19: Dichtmasse als Flanschdichtung

branen nennt man Balg. Ein Balg erlaubt größere axiale sowie zusätzlich angulare und laterale Bewegungen. Als Werkstoff kommt von Gummi über Kunststoff bis hin zu Stahl alles in Frage.

Unlösbare Dichtungen

Dichtungen, die bei der Demontage auf jeden Fall zerstört werden, nennt man „unlösbare Dichtungen“. Jede kraftleitende Schweiß-, Löt-, Kleb- und mit Abstrichen jede Pressverbindung an Behältern oder Rohrleitungen ist auch gleichzeitig eine Dichtung. Entsprechend penibel ist sie auszuführen. Daneben gibt es noch flexible Dichtelemente zum Einschweißen in Rohrleitungen, die Relativbewegungen ausgleichen, aber keine Kräfte leiten können. Auch Dichtmassen zählen prinzipiell zu den unlösbaren Dichtungen da auch sie bei der Demontage zerstört werden.

Dichtmassen

Dichtmassen sind pastöse oder flüssige Dichtmittel, die auf jede beliebige Flanschform aufgetragen werden können. Sie sind damit völlig geometrieunabhängig und der Auftrag ist leicht zu automatisieren – zwei gravierende Vorteile. Sie passen sich der Mikro- und Makrostruktur der Dichtflächen ausgezeichnet an, weshalb sie auch für sehr raue Dichtflächen geeignet sind >>19. Sie härten bzw. polymerisieren dort dann überwiegend zu elastischen oder duroplastischen Dichtkörpern aus, die meist an den Dichtflächen anhaften. Dichtmassen dichten also zuvorderst nicht durch Pressung sondern durch Haftung. Damit sind sie wie Klebstoffe auf chemisch/physikalisch perfekt vorbereitete saubere Dichtflächen angewiesen – auch bei der Wiedermontage. Dies bereitet häufig Probleme. Während Dichtmassen nach der Montage nicht sofort belastbar sind (Aushärtung, Polymerisation), sind die löslichen Feststoffdichtungen hingegen sofort betriebsbereit.

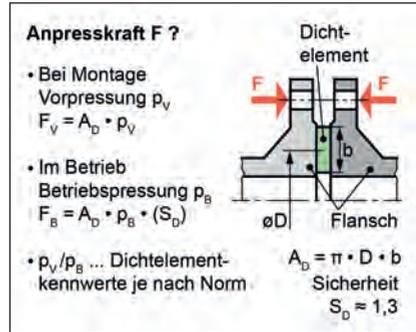
Lösbare Dichtungen

Lösbare Dichtungen dichten durch Pressung ab. Diese muss auf der gesamten Dichtungslänge und unter allen Betriebsbedingungen stets ausreichend hoch sein. Das ist bei von äußeren Kräften angepressten Dichtungen nur aufwändig zu erreichen. >>20 zeigt das prinzipielle Vorgehen bei der Auslegung. Bei der Montage muss die Vorpressung p_v erreicht werden damit sich Flansche und Dichtelement durch elastische und vor allem

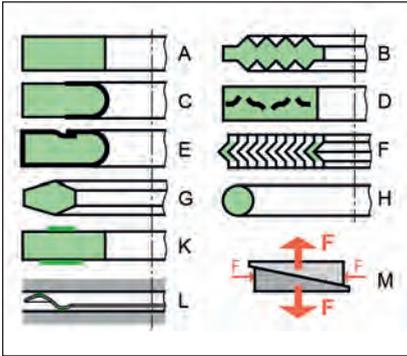
plastische Verformung ausreichend aneinander anpassen. Diese Vorpressung ist z.B. bei Flachdichtungen um ein Vielfaches höher als die Betriebspressung p_B , die im Betrieb unter allen Belastungen mindestens bestehen bleiben muss. Es darf auch nicht zu stark angepresst werden, weil dies das Dichtelement zerstört. Anzustreben ist, mit möglichst geringen Kräften auszukommen. Große, punktuell eingeleitete Kräfte verformen die Bauteile stark und verhindern eine gleichmäßige Pressung auf der gesamten Dichtungslänge. Das ist sehr ungünstig. Unbedingt zu beachten sind hier auch die gravierenden Einflüsse des Dichtungsumfeldes. Die Kennwerte p_v , p_B und für die jeweils maximal zulässige Pressung sind für verschiedene Dichtungsarten, Werkstoffe und Hersteller unterschiedlich. Sie müssen Herstellerpublikationen entnommen werden. Bezeichnung, Inhalt und Größe der Kennwerte variieren je nach verwendetem Regelwerk (Norm). In modernen Regelwerken beziehen sich die Kennwerte immer auf eine bestimmte Leckageklasse L. Es gibt fünf Leckageklassen: L1, L0, L1... L0,0001. Die jeweils maximal zulässige spezifische Leckagerate λ beträgt 1, 0,1...0,0001 mg/s·m (Milligramm pro Sekunde und Meter Dichtungslänge). Hier wird also nicht mehr nur „dicht“ verlangt, sondern richtigerweise die messbare zulässige Leckage definiert. Dies ist ein eminenten Fortschritt.

Flach- und metallische Profildichtungen

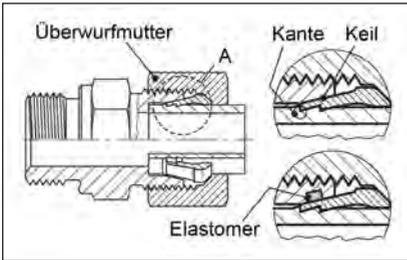
Flachdichtungen, A in >>21, sind dünne Dichtelemente für ebene Flächen, die durch äußere Kräfte angepresst werden. Es gibt sie entsprechend ihrer mannigfaltigen Einsatzbedingungen aus einer fast unübersehbaren Vielfalt an Werkstoffen und Werkstoffkombinationen – von Papier über Kork, Gummi, Kunststoff, Graphit, Glimmer usw. bis hin zu Metallen für höchste Drücke und tiefste Tempe-



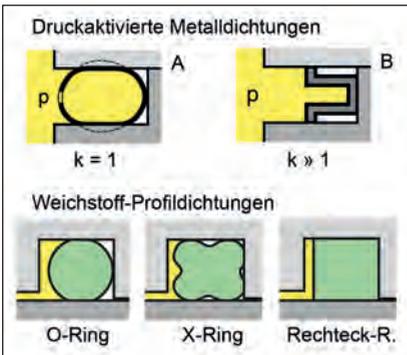
>>20: Prinzipielle Auslegung lösbarer Dichtungen, angepresst durch äußere Kräfte



>>21: Statische Dichtungen und Kraftverstärkung durch Keilprinzip



>>22: Schneidring-Rohrverschraubung (Keil + Kante + weicher Elastomer)



>>23: Druckaktivierte Dichtelemente

raturen. Sie werden z.B. ummantelt >>21 E, ganz oder teilweise beschichtet >>21 C, mit Einlagen aus festen Werkstoffen verstärkt >>21 D oder aus unterschiedlichen Werkstoffen (hart/weich) gewickelt >>21 F. Müssen harte Werkstoffe mit hoher Fließgrenze bzw. feste Werkstoffe mit hohem E-Modul (Stahl 210 GPa, Gummi 0,01 GPa) verwendet werden, können die Kräfte für die notwendige Anpressung ins Unermessliche ansteigen. Eine Lösung ist, die eigentlichen Dichtflächen zu verkleinern – ggf. bis zur extrem schmalen Dichtkante. Die Kammprofildichtung, B in >>21, hat anstatt einer breiten Dichtfläche wie A nur noch vier Kanten. Auf diesen Kanten wird nun mit moderaten Kräften eine sehr hohe Pressung für die notwendige Anpassung erzielt. Auch alle Metallprofildichtungen – Metall steht hier für harten Werkstoff – wie z.B. G oder H mit ihrer balligen Dichtfläche, folgen genau diesem Gestaltungsprinzip. Eine zweite Möglichkeit ist, das harte Dichtelement weich zu beschichten – am besten nur partiell auf einer „schmalen“ Spur >>21 K, z.B. mit einer dünnen Elastomerauflage. Der „harte“ Werkstoff bringt dann die Festigkeit und das Elastomer bei mäßiger Anpressung eine ausgezeichnete Anpassung. Die Metall-Sickenringdichtung >>21 L folgt genau diesem Prinzip. Das gesickte (Halbsicke) dünne Federstahlblech bringt Elastizität und Stabilität und die Elastomerauflage im Sicken-

bereich eine kleine Leckageklasse. Ein Beispiel hierfür ist eine „moderne“ Zylinderkopf-Dichtung. Letztlich kann zur Kraftverstärkung noch das Keilprinzip, M in >>21, ausgenutzt werden. Geringe Kräfte in Keillängsrichtung erzeugen große Kräfte in Keilquerrichtung, die dann hohe Pressungen ermöglichen. In >>22 ist eine Schneidring-Rohrverschraubung dargestellt, wie sie in der Praxis milliardenfach eingesetzt wird. Alle drei Prinzipien – Kante, Keil und weiche „Beschichtung“ – sind dort gleichzeitig angewandt.

Druckaktivierte Metaldichtungen

Bei druckaktivierten Dichtungen, A und B in >>23, wird über äußere Kräfte oder durch Verformung nur noch eine ausreichende Vorpressung p_v aufgebracht. Dieser Vorpressung überlagert sich dann entsprechend dem Flächenverhältnis k der abzudichtende Druck p zur Betriebsdichtpressung p_B . Es gilt stets: $p_B = p_v + k \cdot p$. Damit ist bei $k \geq 1$, völlig unabhängig vom abzudichtenden Druck, stets ausreichende Dichtheit gewährleistet. Dieses Prinzip wird auch Selbstverstärkung genannt. Natürlich sind auch hier anpassungsfähige Beschichtungen möglich.

Weichstoff-Profildichtungen

Auch Weichstoff-Profildichtungen werden extern nur mit p_v vorgepresst und beziehen ihre Dichtpressung p_B ebenfalls aus dem Systemdruck p . Bei Elastomeren oder gummiähnlichem Polyurethan ist infolge deren Elastizität und Inkompressibilität (Querkontraktionszahl $\nu = 0,5$) stets $k = 1$ und es gilt: $p_B = p_v + p$. Die Pressung im Betrieb ist also immer um die Vorpressung größer als der Systemdruck. Dies wird auch als „automatischer Dichtmechanismus“ bezeichnet. Das Vorpressmaß Δd liegt üblicherweise bei 10 bis 30% der Profilhöhe d . Die Nutbreite b bei $1,35 \cdot d$, damit das Elastomer Platz zum Verformen hat >>24. Typische Vertreter der äußerst häufig eingesetzten Weichstoff-Profildichtungen sind der O-Ring, der X-Ring und der Rechteck-Ring aus NBR, EPDM, FKM oder PU >>23. Jede beliebige andere Form ist möglich.

Kraftnebenschluss

Während Flach- und metallische Profildichtungen fast immer im Krafthauptschluss liegen – alle Betriebskräfte gehen über das Dichtelement – liegen druckaktivierte Metaldichtungen und Weichstoff-Profildichtungen immer im Kraftnebenschluss. Dies bedeutet, das Dichtelement „sieht“ außer dem Systemdruck keinerlei weiteren Betriebskräfte. Es kann sich also ungestört seiner eigentlichen Aufgabe – abdichten – widmen. Dies wirkt sich auf Leckagerate und Betriebssicherheit positiv aus.

Berührungsfreie Dichtungen

Bisher wurden praktisch ausschließlich die Belange berührender Dichtungen besprochen. Berührungsfreie Dichtungen haben mit und ohne Bewegung nie Festkörperkontakt. Die offenen Spalte und Kammern können aber durch sperrende Fluide „verschlossen“ sein. So könnten die beiden Dichtstellen einer Sperrkammerdichtung als berührungsfreie Dichtungen ausgeführt sein.

Besondere Eigenschaften

Kein Festkörperkontakt und dadurch:

- kein Verschleiß,
- kaum Erwärmung,
- keine Wärmeleitung,
- freie Werkstoffwahl,
- kein Schmierstoff nötig (trockenlauffähig),
- funktionell beliebige Geschwindigkeit,
- keine Änderung der Dichtwirkung,
- unendliche Lebensdauer und
- absolute Zuverlässigkeit.

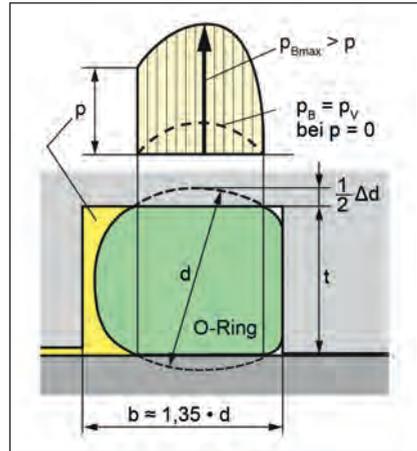
Das sind gravierende Vorteile einer berührungslosen Dichtung. Nachteilig sind nur folgende Eigenschaften:

- nur wenig handelsüblich,
- relativ aufwändig,
- eventuell hoher Durchfluss oder nur dynamisch dicht.

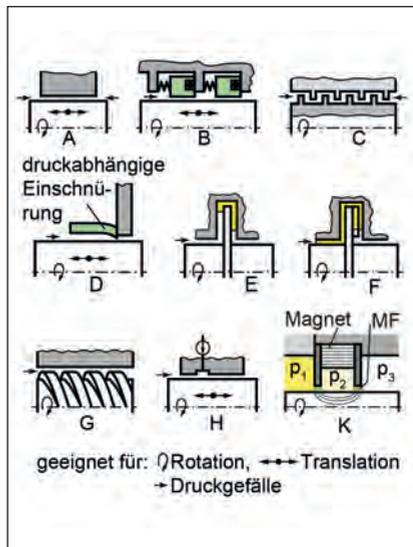
Drossel- und Sperrdichtungen

Drosseldichtungen, A bis D in >>25, haben einen relativ hohen Durchfluss. Das spielt aber z.B. bei Gas-, Dampf- oder Wasserkraftmaschinen keine Rolle, solange der Wirkungsgrad ausreichend hoch bleibt. Deren Leckage ist unschädlich. Da ist die Funktionssicherheit entscheidend. Hohe Drücke werden kaskadenartig durch mehrere hintereinander, meist schwimmend angeordnete Drosselspalte abgebaut >>25 B. Dies ermöglicht enge Spalte trotz großer radialer Wellenbewegung. Oder man nutzt den Druck zur Spaltverengung durch elastische Verformung >>25 D. Bei laminarer Strömung hat der enge, glatte Spalt den höchsten Strömungswiderstand, bei turbulenter Strömung der Labyrinthspalt >>25 C. Laminar durchströmte, einfach gestaltete Drossel- und Sperrdichtungen sind relativ genau berechenbar – turbulent durchströmte mit komplexer Geometrie nur „grob abzuschätzen“. Charakteristisch für Sperrdichtungen, E bis K in >>25, ist ein

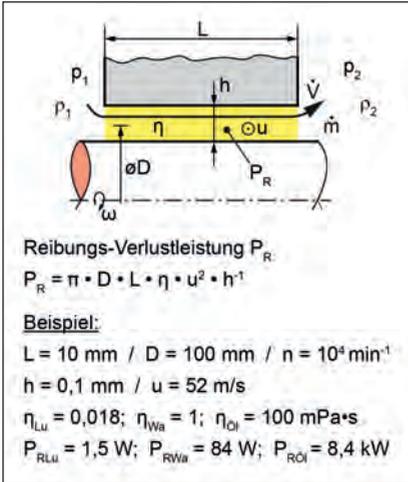
Sperrfluid. Sperrfluid kann das abdichtende Fluid selbst >>25 F oder ein Fremdfluid >>25 E sein. Meist ist das Sperrfluid eine Flüssigkeit, seltener ein Gas. Fliehkraft-Dichtungen >>25 E, F eignen sich besonders für schwere Fluide, Gewindewellen-Dichtungen >>25 G für zähe, z.B. für Kunststoffschmelzen. Beide „leben“ vom physikalischen Effekt „mitschleppen“. Bei der relativ weitspaltigen (> einige 10tel mm) Fliehkraft-Dichtung wird das mitgeschleppte Fluid aufgestaut und so ein abdichtender Sperrdruck erzeugt. Bei der Gewindewellen-Dichtung wird das im sehr engen Spalt (einige 100stel mm) in Umfangsrichtung mitgeschleppte Fluid durch schrägstehende Strukturen (Gewinde) in Achsrichtung abgelenkt und so ein Rückförderstrom induziert. Beide Systeme sind nicht stillstands dicht und benötigen eine separate Stillstandsichtung. Bei der Magnetflüssigkeits-Dichtung >>25 K werden die Spalte mit einer magnetisierbaren Flüssigkeit gefüllt. Sie wird von einem Magnetfeld dort festgehalten und verschließt den Spalt hermetisch, statisch und dynamisch. Eine Stufe widersteht einem Gasdruck von 2 - 5 · 10⁴ Pa (0,2 bis 0,5 bar). Es können beliebig viele Stufen hintereinander geschaltet werden. Bei der gesperrten Drossel-Spaltichtung >>25 H wird das Sperrfluid über einen Ringkanal aktiv in den Spalt gepresst. Verwendet man dazu ein Gas (Luft) kommt man u.a. zu den nachher beschriebenen Sperrluft-Dich-



>>24: Eingebaute Weichstoff-Profildichtung unter Druck p – Beispiel: O-Ring



>>25: Prinzipdarstellung verschiedener Drossel- und Sperrdichtungen

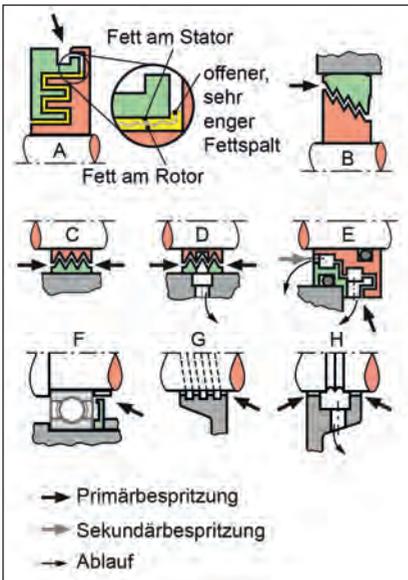


>>26: Reibungs-Verlustleistung in fluidgefüllten Spalten

tungen. Gasgesperrte Spaltdichtungen haben eine äußerst geringe Reibungs-Verlustleistung P_R . Befindet sich im Spalt in >>26 Öl, wird bei den dortigen Beispielbedingungen eine Reibleistung von $P_{ROl} = 8.400 \text{ W}$ erzeugt. Bei Wasser wären es noch $P_{RWa} = 84 \text{ W}$. Und bei Luft noch ganze $P_{RLu} = 1,5 \text{ W}$ – also ungefähr 1/5.600 von Öl. Diese sehr geringe Verlustleistung ist auch der große Vorteil von Gasfilm-Gleitringdichtungen.

Berührungsfreie Schutzdichtungen

Berührungsfreie Schutzdichtungen schützen vorzugsweise fettgeschmierte Lager vor Fettverlust und grobem Schmutz. Dafür gibt es fast beliebig viele Ausführungen >>27. Nur wenige sind auch für (leichte) Flüssigkeitsbeaufschlagung geeignet >>27 D, E, H. Das liegt in erster Linie am Ablauf aus der Dichtung. >>25 B bis E sind Beispiele handelsüblicher Elemente. Die einfachste berührungsfreie Schutzdichtung ist die Stauscheibe >>27 F. Sie kann auch als Deckscheibe ins Lager selbst integriert sein, ähnlich der berührenden Lagerdichtung E in >>8. Fettgefüllte Labyrinth, A in >>27, wirken dann besonders gut, wenn sich durch Scherung ein enger Luftspalt im Fett bildet. Zum einen ist dann die Reibung niedrig (Temperatur). Zum andern haften dann Schmutzpartikel direkt am Eingang an den Fettschichten und verbleiben dort. Bei geschlossener Fettfüllung würden sie durch



>>27: Auswahl berührungsfreier Schutzdichtungen

„Walken“ des Fettes immer weiter in den Dichtspalt transportiert.

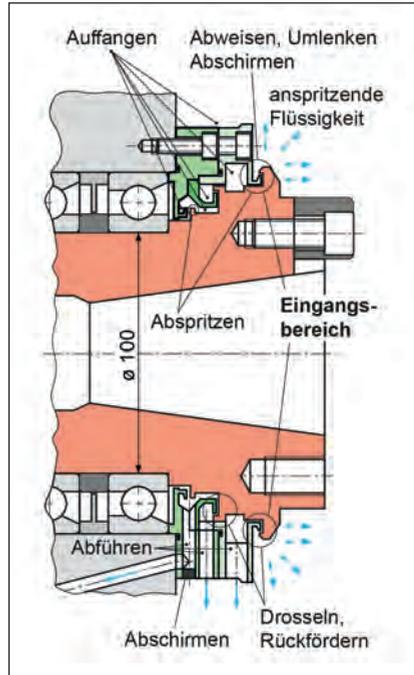
Fangkammer-Dichtungen

Günstig gestaltete Fangkammer- und Sperrluft-Dichtungen widerstehen auch stärkster Flüssigkeitsbespritzung – und zwar bei jeder Drehzahl >>28. Äußerst wichtig ist, dass im Eingangsbereich die anspritzende Flüssigkeit bestmöglich daran gehindert wird, in den Innenbereich einzudringen. Mit einer Eingangsgestaltung wie H in >>29 gelingt dies optimal. Durch Fangrinne und überdecktem Stirnspalt kann kein schneller Flüssigkeitsstrahl den Spalteneingang direkt treffen. Es entsteht so gut wie kein Staudruck >>30, weswegen nur sehr wenig Flüssigkeit eindringt, im Gegensatz zu A oder D in >>29. Bei drehender Welle wird diese dann im Stirnspalt durch Fliehkraft sofort wieder zurückgefördert. Trotzdem noch eingedrungene Flüssigkeit fängt man im Innern durch Fangkammern

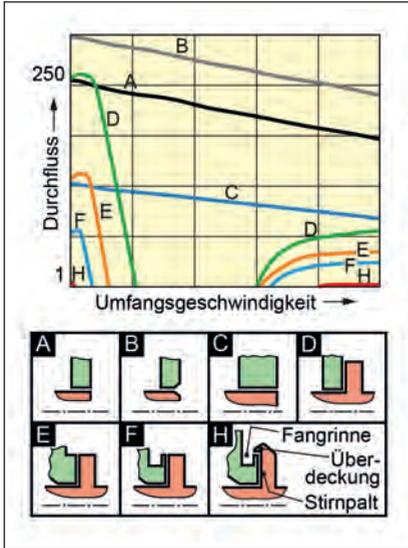
und -rinnen auf und führt sie abfließen zu. Günstigstenfalls reicht eine einzige Fangkammer – mit dreien ist praktisch jede Situation beherrschbar. Fangkammerdichtungen brauchen keine engen Spalte – einige 10tel mm sind ausreichend. Dafür sind sie auf nach unten weisende Abläufe angewiesen.

Sperrluft-Dichtungen

Bei Sperrluft-Dichtung sind Fangkammern und Abläufe durch einen Spalt mit Luft (Gas) unter Druck ersetzt, >>30 unten. Wie funktionieren sie nun? In einen engen Spalt wird über eine Ringnut Luft unter Druck p_0 eingeleitet, >>30. Die Luft strömt durch den Spalt ab und der Druck sinkt auf Umgebungsdruck p_1 bzw. p_2 . Wird nun das Spaltende mit Flüssigkeit beaufschlagt, dringt die Flüssigkeit so weit in den Spalt vor, bis der Flüssigkeitsdruck p_f dem örtlichen Luftdruck im Spalt entspricht. So lange bei laminarer Spaltströmung p_0 um einen Sicherheits-

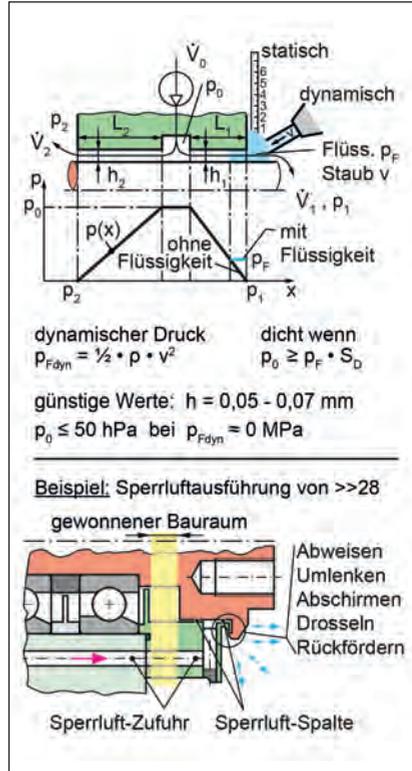


>>28: Fangkammerdichtung – Beispiel
Werkzeugmaschinen spindle



>>29: Wirkung verschiedener Eingangsbereiche

>>30: Prinzip der Sperrluftdichtung, Daten und Beispiel (Bilder: Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart)



faktor S_D größer ist als p_F ist das System dicht. Ausgezeichnete Dichtheit bei kleinem Bauraum L und geringen Sperrluftströmen V wird erreicht durch: niedrige Spalte ($h < 0,1 \text{ mm}$) und geringem Sperrluftdruck ($p_0 \leq 50 \text{ hPa}$) bei niedrigem Flüssigkeitsdruck p_F . Durch einen günstigen Eingangsbereich, H in >>29, wird $p_{Fdyn} \approx 0 \text{ MPa}$ und bei Staub $v_{Staub} = 0 \text{ m/s}$ erreicht. Stäube können berührungsfrei nur durch Sperrluft-Dichtungen vollständig zurückgehalten werden. Mit mindestens einer 90° -Spaltumlenkung nimmt man durch den Aufprall dem Staubpartikel seine Geschwindigkeit v in Spaltlängsrichtung vollständig. Über einen rückfördernden Stirrspalt und durch den Sperrluftstrom wird es dann wieder aus dem Spalt transportiert.

Fazit

Mit den verlustleistungsärmsten und zuverlässigsten Dichtsystemen, den berührungsfreien Dichtungen, ist der Zweiteiler „Basics der Dichtungstechnik“ (Teil 1 im DICHTUNGSTECHNIK JAHRBUCH 2013) nun abgeschlossen. Er hilft Allen – Entwickler, Konstrukteure, Fertiger, Monteure, Betreiber, Instandhalter, Einkäufer oder Qualitätssicherer – die empfindlichen Belange der Dichtungen rechtzeitig in ihre Überlegungen und in ihr Tun besser mit einzubeziehen. Viele Schadensfälle und teure Nachbesserungen zeigen, dass dies zwingend notwendig ist. Dichtungen „bestrafen“ – im Gegensatz zu allen anderen Maschinenelementen – jede kleinste Nachlässigkeit gnadenlos. Ohne fundiertes dichtungstechnisches Grundwissen geht es eben nicht.

Weiterführende Literatur

Professor Dr. Ing. habil. Werner Haas: Vorlesungsmanuskript „Dichtungstechnik“, 162 Seiten, erhältlich am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart, www.ima.uni-stuttgart.de

Müller, H. K.; Nau, B. S.: Fluid Sealing Technology – principles and applications. Marcel Dekker Inc., N.Y. 1998, ISBN 0-8247-9969-0

Müller, H. K.; Nau, B. S.: www.fachwissen-dichtungstechnik.de