

Grundlehrgang Dichtungstechnik

von

Professor Dr.-Ing. habil. W. Haas

Institut für Maschinenelemente

Bereich Dichtungstechnik

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 - 66170

Fax: 0711 / 685 – 66319

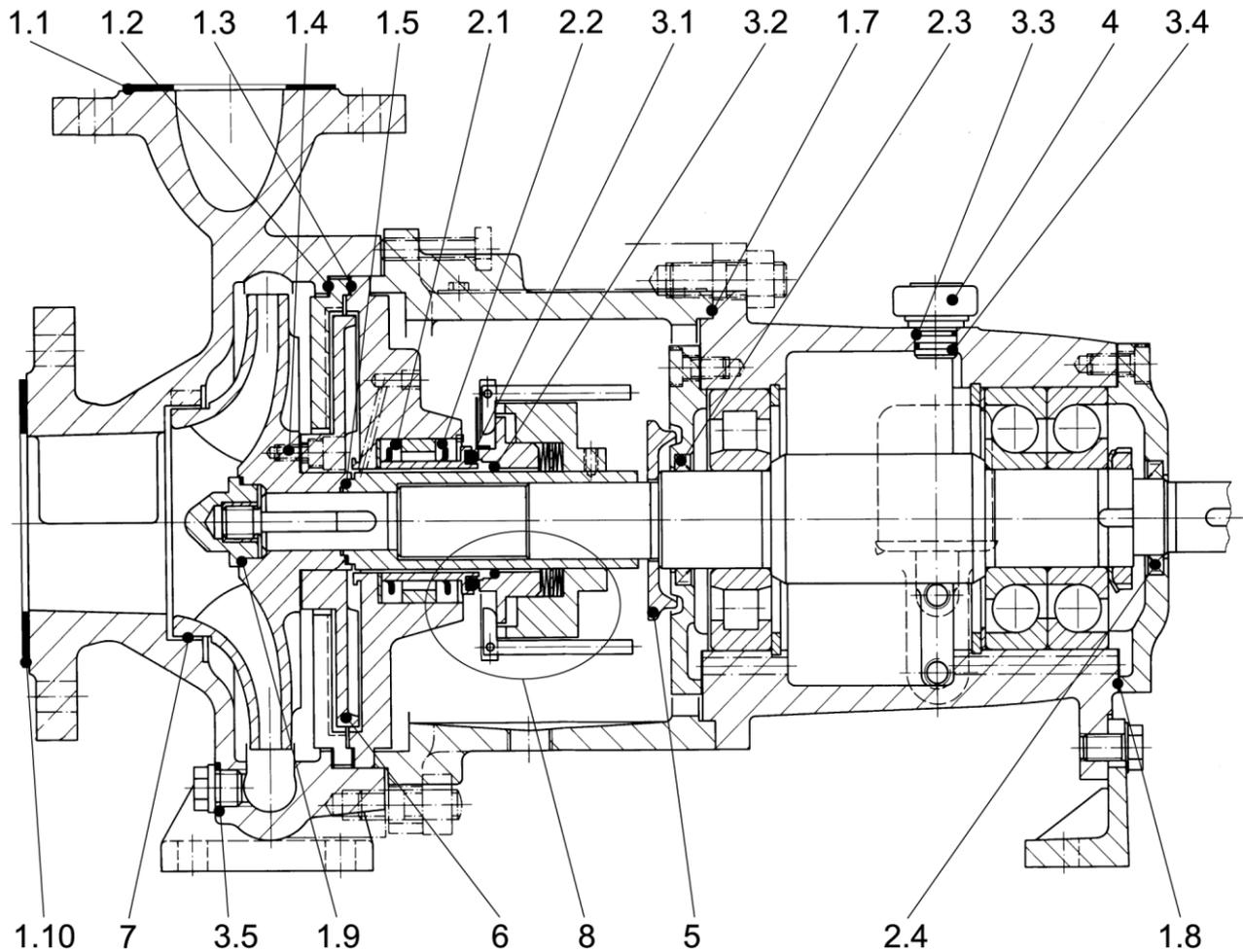
E-Mail: haas@ima.uni-stuttgart.de

<http://www.ima.uni-stuttgart.de>

Der Inhalt entspricht der Vorlesung, die an der Uni Stuttgart im Rahmen des Grundstudiums alle Studenten der Fachrichtungen Maschinenbau, Fahrzeug- und Motorentechnik, Energie- und Anlagentechnik und Technologiemanagement hören.

1	Aufgabe, Einteilung, Prinzip, Funktion	1
2	Statische Dichtstellen und Dichtelemente	4
2.1	Nicht lösbare Dichtungen.....	4
2.2	Lösbare Dichtungen	5
2.2.1	Prinzipielle Auslegung	5
2.2.2	Flachdichtungen.....	7
2.2.3	Metallprofildichtung	8
2.2.4	Druckaktivierte Metaldichtungen.....	9
2.2.5	Dichtung im Kraftfluss der druckabhängigen Belastung.....	9
2.2.6	Weichstoff-Profildichtungen.....	10
2.2.7	Dichtmassen	13
2.2.8	Membrandichtung	13
2.2.9	Balgdichtung	13
3	Dynamische Dichtstellen und berührende Dichtelemente	14
3.1	Rotatorische Abdichtung.....	14
3.1.1	Berührende Schutzdichtungen	14
3.1.2	Radial-Wellendichtringe	15
3.1.3	Gleitringdichtungen	19
3.1.4	Stopfbuchsichtung.....	22
3.2	Translatorische Abdichtungen	23
3.2.1	Stangendichtung	24
3.2.2	Kolbendichtungen	26
3.2.3	Abstreifer.....	26
3.2.4	Führungen und Schleppdruck	27
3.2.5	Oberflächen.....	27
3.2.6	Pneumatikdichtungen.....	28
4	Berührungsfreie Dichtungen.....	29
4.1	Eigenschaften und Einteilung	29
4.2	Berührungsfreie Schutzdichtungen.....	30
4.2.1	Fanglabyrinth-Dichtung	31
4.2.2	Sperrluftdichtung	31
4.3	Drossel- und Sperrdichtungen	33
4.3.1	Drosseldichtungen.....	33
4.3.2	Sperrdichtungen.....	35
5	Literaturverzeichnis	36

Dichtungen sind eine weit differenzierte Klasse wichtiger Konstruktionselemente, für praktisch alle technischen Gebilde – von Autos genauso wie von Küchenmaschinen, Flugzeugen, verfahrenstechnischen Anlagen oder Kraftwerken. Es gibt praktisch kein technisches Produkt, das ohne das Element „Dichtung“ auskommt. Allein in der in Bild 1 dargestellten, einfachen Pumpe gibt es über 20 Dichtstellen.



- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 1.1-1.10: Flachdichtungen | 5: Schutzdichtung |
| 2.1-2.4: Radial-Wellendichtungen | 6: Zentrifugal-Wellendichtung |
| 3.1-3.5: Formdichtungen | 7: Spaltdichtung |
| 4: Entlüfter | 8: Gleitringdichtung (abhebend) |

Bild 1: Querschnitt durch eine Chemie-Normpumpe. Die eingebauten Dichtungen sind gekennzeichnet

1 Aufgabe, Einteilung, Prinzip, Funktion

Eine Dichtung hat primär die Aufgabe, zwei funktionsmäßig verschiedene Räume so zu trennen, dass kein – oder nur ein zulässiger – Stoffaustausch zwischen ihnen stattfinden kann. Insbesondere dynamischen Dichtungen dürfen Zusatzaufgaben wie „führen“ oder „Kraft leiten“ nicht übertragen werden.

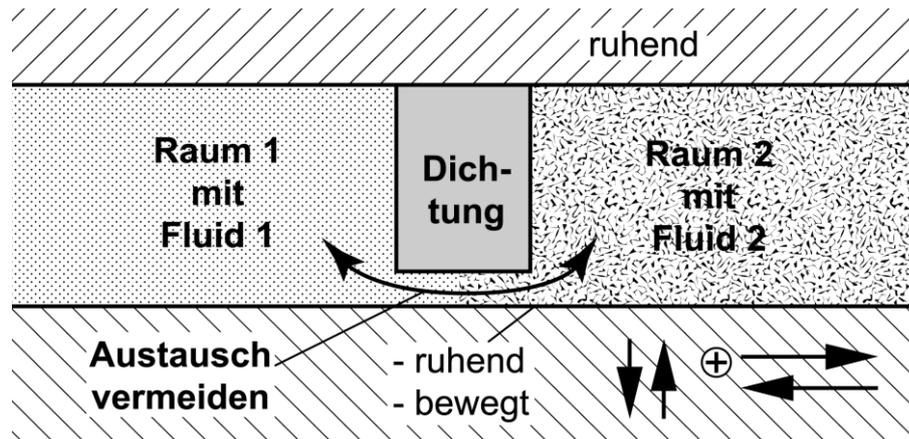


Bild 1.1: Prinzipdarstellung „Aufgabe einer Dichtung“

Dichtungen sind die wohl am meisten differenzierte Klasse von Maschinen- bzw. Konstruktionselementen. Sie werden auf vielerlei Arten eingeteilt. Bild 1.2 zeigt eine einfache Einteilung, die ausgehend vom Aspekt der Bewegung auf das Funktionsprinzip und beispielhafte Ausführungsformen hinführt.

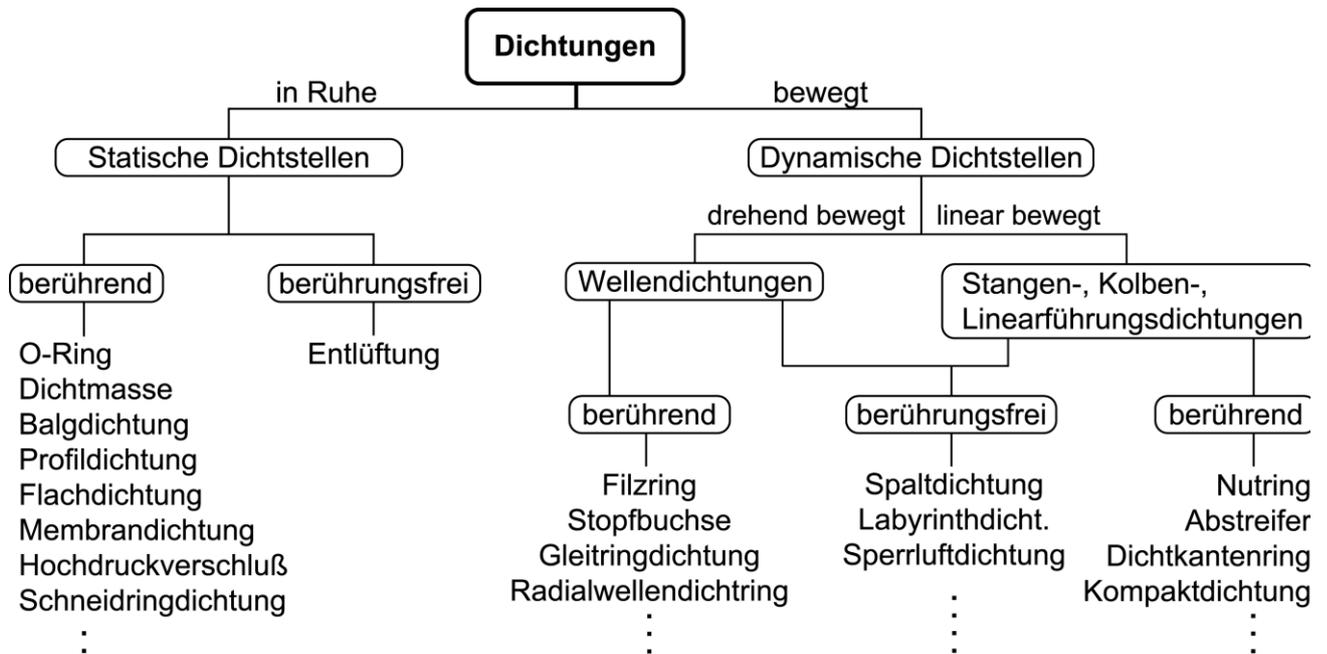
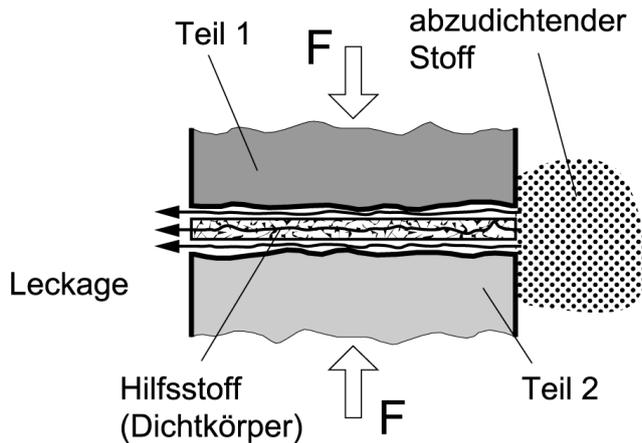
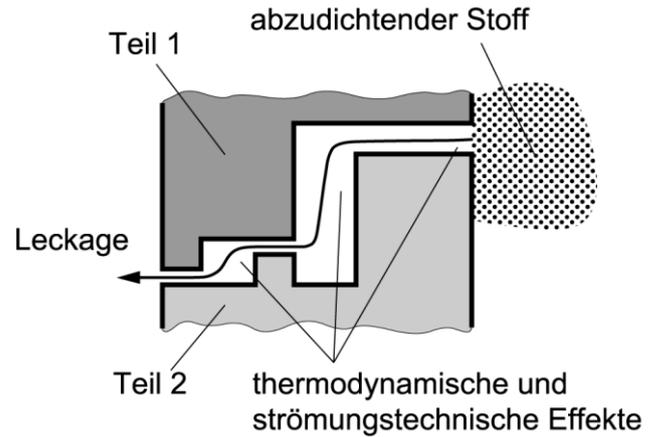


Bild 1.2: Einteilung von Dichtungen

Absolute Dichtheit im physikalischen Sinne gibt es nicht. Man muss sich verständigen, was man im konkreten Fall unter „dicht“ verstehen will (Moleküle, Feuchtigkeit, Tropfen, ...). Diese „Dichtheit“ bezeichnet man als technische Dichtheit.

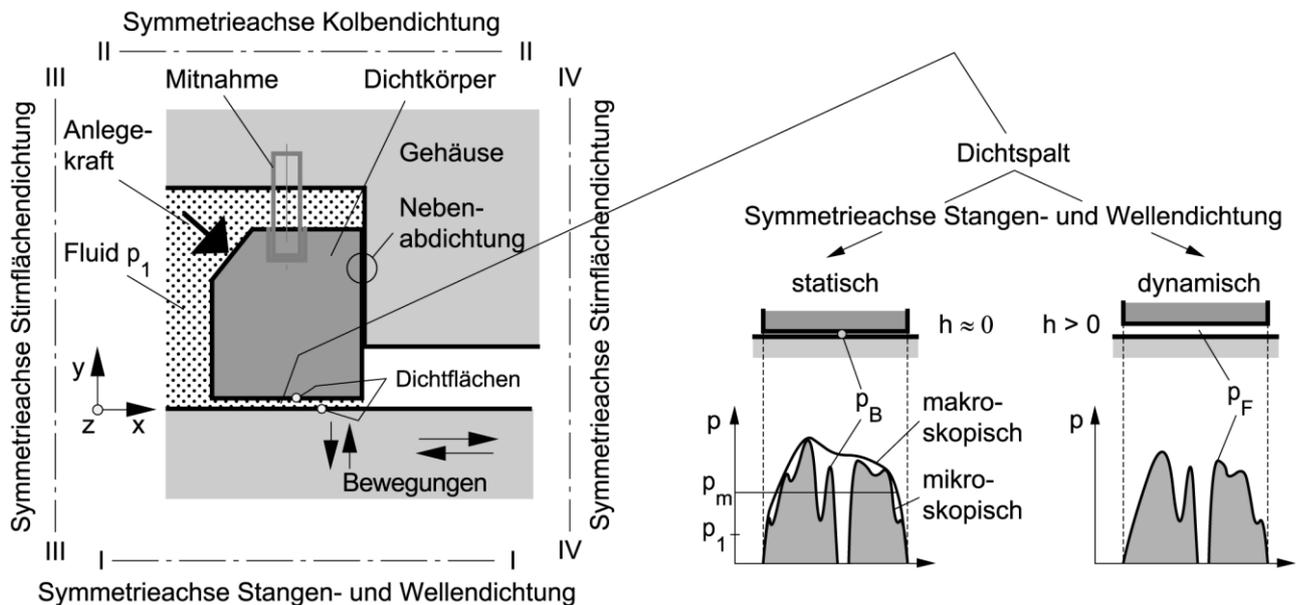
Wird die Fuge zwischen zwei abzudichtenden Teilen mit einem geeigneten Hilfsstoff (Dichtung) gefüllt, Bild 1.3, und wird dieser Hilfsstoff so stark verpresst, dass sowohl seine internen „Poren“ als auch die Mikropalte zwischen Hilfsstoff und abzudichtenden Teilen so klein werden, dass der zurückzuhaltende Stoff nicht mehr durchdringen kann, ist eine berührende Dichtung realisiert.

Dichtungen, welche ohne mechanische Berührung der beiden Teile und ohne einen festen „Zwischenstoff“ auskommen, werden „Berührungsfreie Dichtungen“ genannt, Bild 1.4. Hier wird mit speziellen Effekten der abzudichtende Stoff so gut wie irgend möglich zurückgehalten.


Bild 1.3: Realisierung einer berührenden Dichtung

Bild 1.4: Prinzip einer berührungsfreien Dichtung

Bei der berührenden Abdichtung eines bewegten Maschinenteils, wird ein beweglicher, in sich dichter Dichtkörper durch eine Anlegekraft so an seine Gegendichtflächen angepresst, dass obige Forderung statisch erfüllt ist, Bild 1.5. Die Anlegekraft muss mindestens so groß sein, dass die mittlere Flächenpressung p_m gleich dem Druck des abzdichtenden Fluids ist und es muss eine geschlossene Linie am Umfang innerhalb der Dichtfläche geben in der die Pressung $p_B \geq p_1$ ist. Dies sind die notwendigen Bedingungen für statische Dichtheit.

Bewegt sich nun eine der Dichtflächen genügend schnell, so bildet sich zwischen den Dichtflächen ein dynamischer, fluidgefüllter Dichtspalt $h < 1 \mu\text{m}$. Der Druck p_F des Fluids im Dichtspalt entspricht der vorherigen Pressung p_B . Dynamisch ist eine Dichtung nur dann dicht, wenn die Flüssigkeit im Spalt aktiv zurückgehalten (zurückgefördert) wird. Solche Dichtungen werden als **aktive** Dichtungen bezeichnet. Dichtungen die dies nicht tun als **passive** Dichtungen.


Bild 1.5: Prinzip dynamischer, berührender Dichtungen

2 Statische Dichtstellen und Dichtelemente

Statische Dichtstellen sind solche, bei welchen die Dichtflächen – die Flächen zwischen welchen die Dichtfunktion erfüllt wird – keine für die Funktion des technischen Systems notwendige Relativbewegung zueinander ausführen. Bild 2.1 zeigt eine systematische Einteilung

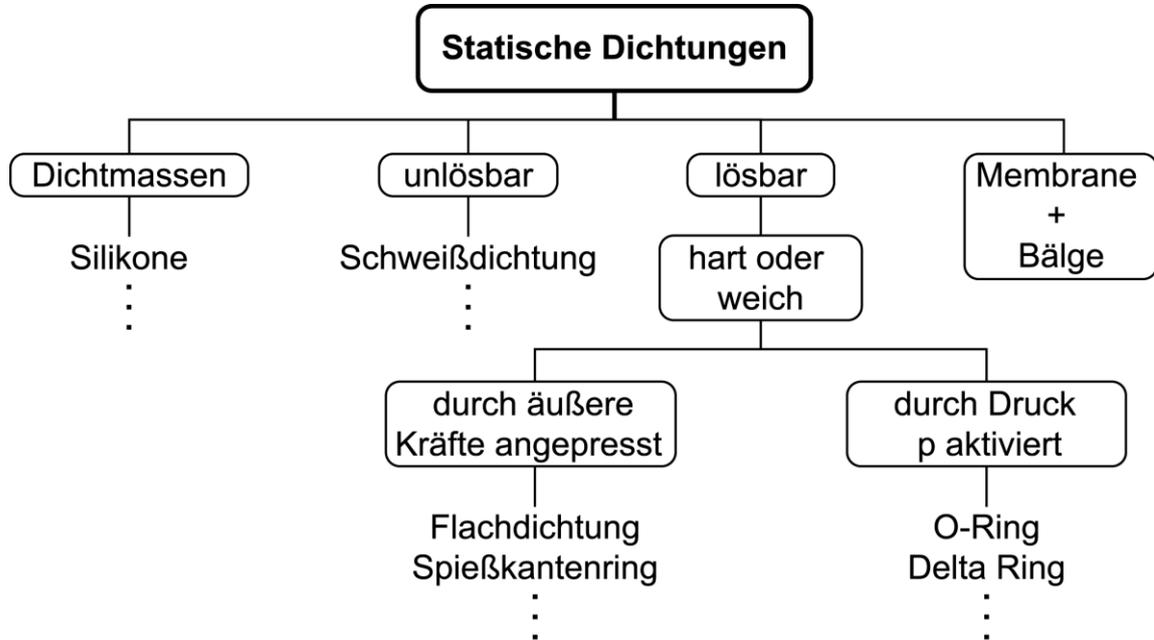


Bild 2.1: Systematische Einteilung statischer Dichtungen

2.1 Nicht lösbare Dichtungen

Schweiß-, Löt-, Klebe- und Pressverbindungen, bei denen auch Kräfte durchgeleitet werden, sind gleichzeitig Dichtverbindungen, obwohl dies meist gar nicht so aufgefasst wird. (Beispiele: Lötstufe, Behälterschweißnaht).

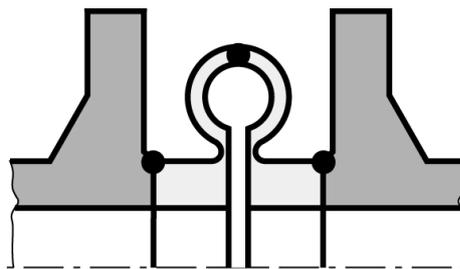


Bild 2.2: Schweißdichtung

Sitzt die Schweißnaht ohne Durchleitung von Bauteilkräften im Kraftnebenschluss und werden spezielle Dichtelemente ein- und verschweißt, so spricht man von Schweißdichtungen, Bild 2.2. Typische Anwendungen sind heißgehende Leitungen mit hohem Innendruck in der Kraftwerkstechnik.

2.2 Lösbare Dichtungen

Die lösbaren Dichtungen sind das, was man gemeinhin unter „Dichtung“ versteht.

2.2.1 Prinzipielle Auslegung

Nach einer Vorauswahl der Dichtungsart und des Werkstoffs die auf Grund der Anforderungen wie chemische und thermische Beständigkeit, Druck, Sicherheit, Einbauraum, Dichtheit (Leckageklasse), Lebensdauer usw. getroffen wird, sind zwei Vorgänge zu unterscheiden:

Bei der **Montage** ist die Dichtung mit einer bauartbedingten Mindest-Pressung p_V bzw. Mindest-Kraft F_V vorzupressen. Dadurch wird eine ausreichende elastische und plastische Anpassung der Dichtflächen aneinander erreicht. Ebenso werden, z. B. bei faserverstärkten Flachdichtungen, interne Porositäten des Materials verschlossen.

Im **Betrieb** muss eine vom abzudichtenden Druck p abhängige Mindest-Pressung p_B bzw. Mindest-Kraft F_B unter allen Betriebsbedingungen wie Temperatur, Verformung, äußere und innere Kräfte, Schwingungen usw. erhalten bleiben.

$$F_V = A_D \cdot p_V \quad (2.1)$$

$$F_B = A_D \cdot p_B \cdot (S_D) \quad (2.2)$$

Mit: A_D = charakteristische Berührfläche der Dichtung
 S_D = Sicherheitsfaktor (häufig wird hier bei der Auslegung $S_D = 1,3$ gewählt)

Dabei darf jeweils eine maximal zulässige Pressung nicht überschritten werden, da sonst die Dichtung zerstört wird. Die Kennwerte p_V und p_B sind für unterschiedliche Dichtungsarten, Materialien und Hersteller unterschiedlich und demzufolge den jeweiligen Herstellerpublikationen – ältere eventuell auch Normen – zu entnehmen. Gleichzeitig variieren Bezeichnung, Inhalt und Größe der Kennwerte je nach verwendeter Norm. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick.

Tabelle 2.1: Vergleich der Kennwerte nach DIN 28090 (DIN 2505) und prEN 13555 (prEN 1591)

Bedeutung	AD-Merkblatt B7 1984	DIN V 2505 1964	DIN E 2505 1986/1990	DIN 28090 1995	PrEN 13555 1999	PrEN 1591 1998	ASME/ASTM	Relations
Minimale Dichtflächenpressung im Einbauzustand	$k_0 K_D$	$k_0 K_D$	σ_{VU}	$\sigma_{VU/L}$	$Q_{MIN(L)}$	Q_{min}	G_B, G_S, a	$Q_{MIN(L)} = Q_{min} = \sigma_{VU/L} = G_B (t_{pmin})^3$ $\sigma_{VU} = k_0 K_D / b_D$
Minimale Dichtflächenpressung im Betriebszustand	k_1	k_1	σ_{BU} m	$\sigma_{BU/L}$ m_L	$Q_{SMIN(L)}$	Q_l		$m_L = (G_S / p) / (T_{pmin})^{(a \log(Q_0 G_S)) / (\log(Q_0 G_B))}$
Maximale Dichtflächenpressung im Einbauzustand		V	σ_{V0}	σ_{V0}	Q_{CRIT}, Q_{TOP}	$Q_{max,ref}$		$Q_{max} = \sigma_{V0} = 0,8 * Q_{KRIT} = 0,8 * Q_{TOP}$
Maximale Dichtflächenpressung im Betriebszustand		$K_2 K_{DS}$	σ_{B0}	σ_{B0}	Q_{MASS}	Q_{max}		$Q_{max} = \sigma_{B0}$
Rückfederung der Dichtung		E_D	E_D	E_{DGV}	E_0, K_1	E_0, K_1		$E_{D/\sigma V} = K_1 * Q + E_0$
Kriechfaktor					g_C	G_C		
Ausdehnungskoeffizient					σ_G	σ_G		

In den modernen Regelwerken beziehen sich die Kennwerte immer auf eine bestimmte Leckageklasse L . Es werden die Klassen $L1$, $L0,1$ und $L0,01$ unterschieden mit einer jeweiligen maximal zulässigen spezifischen Leckagerate λ von 1; 0,1; 0,01 mg/s·m (Leckage in Milligramm pro Sekunde und Meter Dichtungslänge (Umfang)). Da diese Kennwerte teilweise auch noch vom Druck p , der Temperatur θ und dem Fluid abhängig sind, ist ihre Ermittlung mit einem immensen Prüfaufwand verbunden. Die Darstellung erfolgt meist in Diagrammform; Beispiel siehe Bild 2.3.

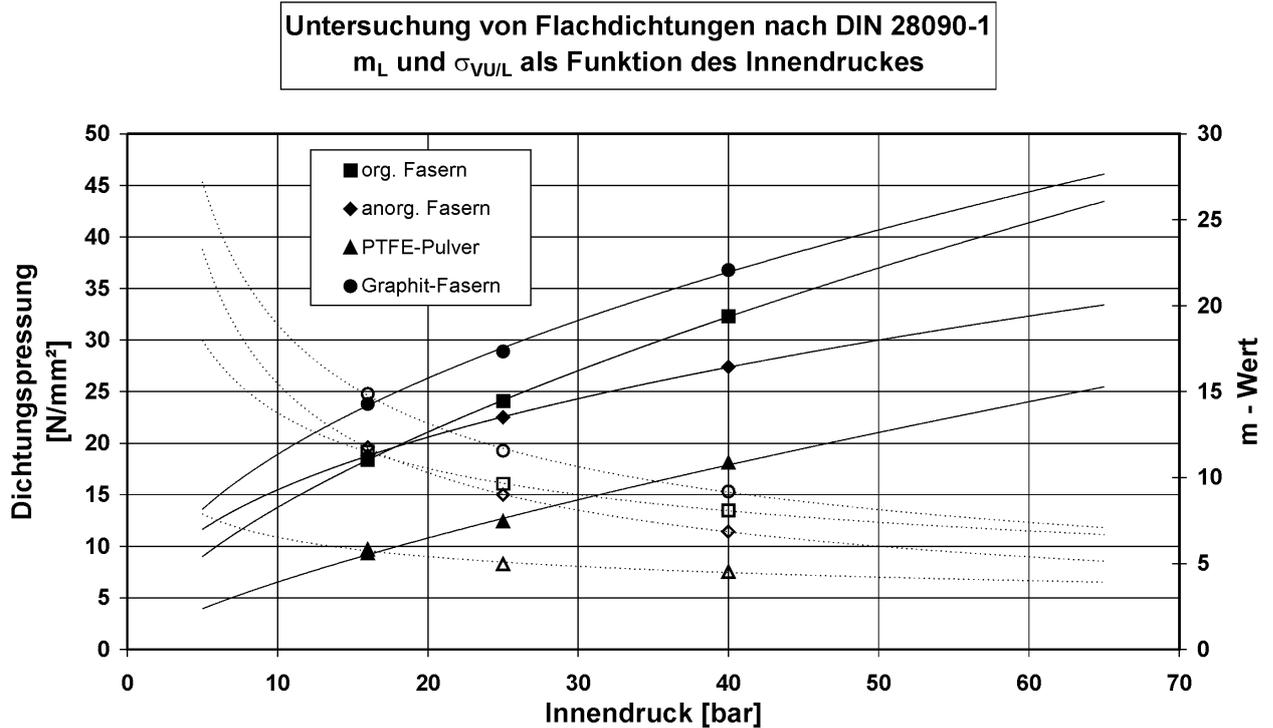


Bild 2.3: Beispielhafte Darstellung von Dichtungskennwerten

Da die Dichtkräfte F_V und F_B meist von Schrauben aufgebracht werden, ist, z. B. mittels Verspannungsschaubild, Bild 2.4, nachzuprüfen, ob unter Einwirkung der Betriebskräfte F_A die Restklemmkraft F_{KR} ausreichend ist ($F_{KR} \geq F_B$).

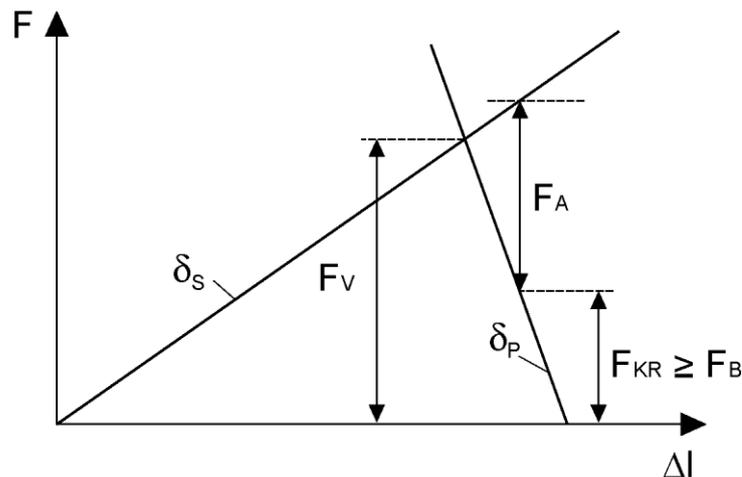


Bild 2.4: Verspannungsschaubild einer verschraubten Dichtverbindung

Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass durch Abstand, Kräfteinleitung und Lage der Schrauben, Bild 2.5, eine möglichst gleichmäßige Pressung auf der gesamten Dichtlänge oder dem gesamten Dichtumfang erreicht wird. Ein Millimeter Berührlänge auf der die notwendige Pressung p_B nicht erreicht wird lässt die Dichtverbindung versagen (Leckage), auch wenn die restlichen 10 Meter absolut intakt sind!

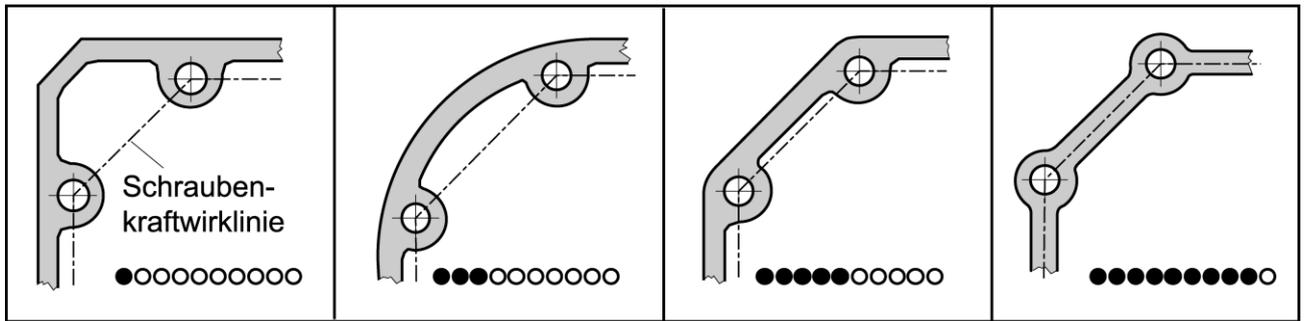


Bild 2.5: Einfluss der Lage der Schraubenkraftwirklinie zur Dichtungsmittellinie – je mehr dunkle Punkte umso günstiger

2.2.2 Flachdichtungen

Flachdichtungen sind dünne Dichtungen für ebene Flächen, die durch äußere Kräfte angepresst werden, Bild 2.6. Sie sind nicht druckaktiviert und passen sich somit nicht automatisch dem abzudichtenden Druck an. Sie finden verbreitet Anwendung in allen Bereichen der Technik für Flüssigkeit und Gas, bei hoher und tiefer Temperatur sowie stationärem und pulsierendem Druck. Entsprechend vielgestaltig sind die Ausführungsformen, eingesetzte Werkstoffe und Werkstoffkombinationen. Bild 2.7 zeigt einige Ausführungsformen. Es werden Hart-, Weich- und Mehrstoffdichtungen unterschieden. Hartstoffe sind meist weiche Metalle wie Kupfer, Blei, Aluminium usw. Zu den Weichstoffen zählen Papier, Pappe, Gummi, Kunststoffe, expandierter Graphit und expandiertes PTFE. Mehrstoffdichtungen sind Kombinationen von Weichstoffen und Metall oder Fasergewebe. In Bild 2.7 sind: A eine Hart- oder Weichstoffdichtung, B-E ummantelte Dichtungen, F eine Kammprofildichtung, G-I Dichtungen mit Metalleinlage und J eine Spiraldichtung.

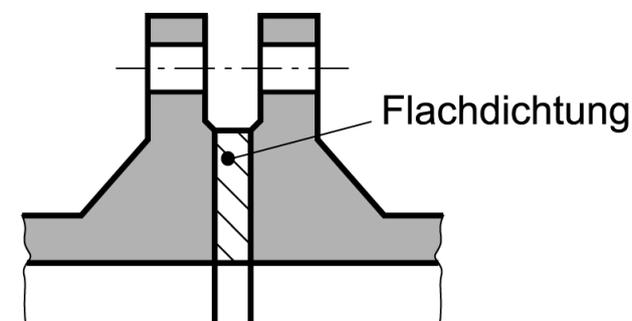


Bild 2.6: Dichtstelle mit Flachdichtung

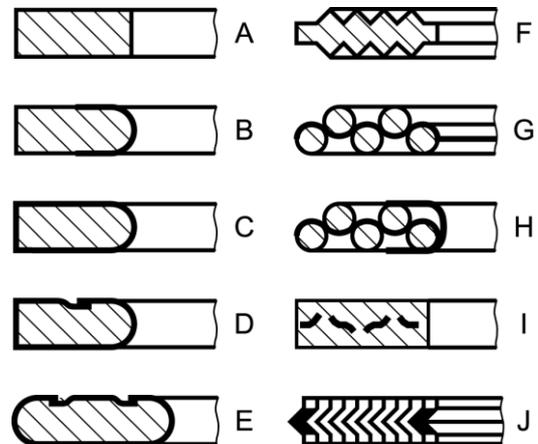


Bild 2.7: Ausführungsformen von Flachdichtungen

Flachdichtungen können im Krafthauptschluss oder -nebenschluss eingebaut werden, Bild 2.8. Bei a gehen alle Kräfte über die Dichtung und diese kann zudem vom Druck p ausgepresst (ausgeblasen) werden. Gegebenenfalls muss die Ausblassicherheit nachgewiesen werden. Dünne Dichtungen sind hier günstiger als dicke.

Bei b besteht diese Gefahr nicht mehr. Die Dichtung ist „gekammert“ eingebaut. Bei c erfährt die Dichtung bei richtiger Auslegung nichts von den Betriebskräften. Die Aufgaben „Kraft leiten“ und abdichten sind sauber getrennt. Dichtungs- und Nutvolumen müssen aber sehr exakt aufeinander abgestimmt sein und die Dichtkraft F_B oder F_V ist nicht überprüfbar.

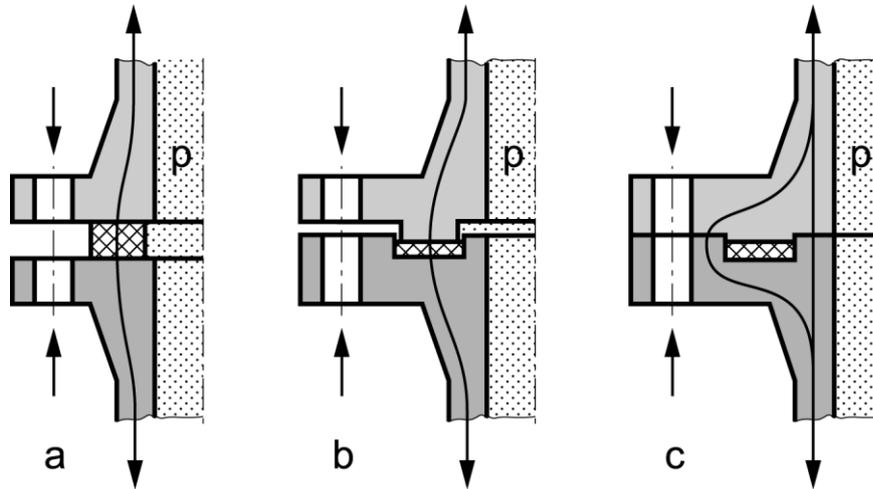


Bild 2.8: Einbauarten von Flanschdichtungen
 a: Flansch mit ebener Dichtfläche, Dichtung freiliegend im Hauptschluss
 b: Flansch mit Feder und Nut; Dichtung eingeschlossen im Hauptschluss
 c: Flansch mit Feder und Nut; Dichtung eingeschlossen im Nebenschluss

2.2.3 Metallprofildichtung

Metallprofildichtungen werden bei hohem Druck und/oder hoher Temperatur angewendet, Bild 2.9. Wegen des hohen E-Moduls bzw. der hohen Fließgrenzen müssen hier große Flächenpressungen erzeugt werden, um die Unebenheiten der Dichtflächen auszugleichen. Dies wird mit relativ kleinen Schraubenkräften erreicht, indem man die Dichtflächen konstruktiv verkleinert.

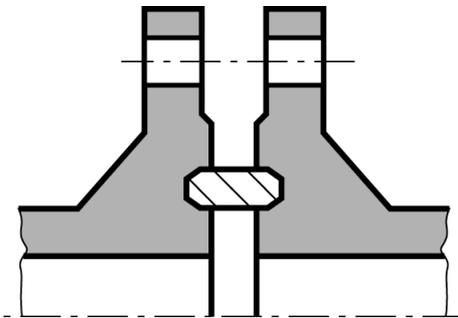


Bild 2.9: Metallprofildichtung

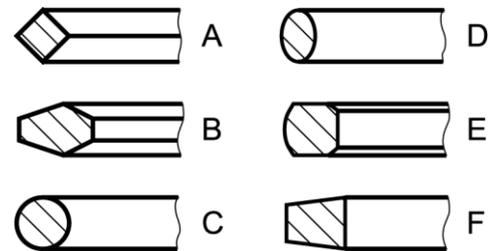


Bild 2.10: Ausführungsformen für Metallprofil-dichtungen

Die Berührung gekrümmter Dichtflächen oder scharfer Dichtkanten ergibt, nach anfänglicher Linienberührung, beim Einwirken der Anpresskraft hohe Flächenpressungen bei sehr schmalen Berührflächen. Bild 2.10 zeigt verschiedene Ausführungsformen. A und B sind Spießkantenringe, C eine Runddichtung, D eine Linsendichtung und E und F und das in Bild 2.9 dargestellte Dichtelement sind so genannte Ring-Joint-Dichtungen. Bei den in Bild 2.9 und Bild 2.10 dargestellten massiven Elementen wird die gesamte Dichtpressung extern aufgebracht. Ein weiteres Mittel zur Erhöhung der Dichtpressung bei moderater Schraubenkraft ist die Keilwirkung in konischen Dichtflächen, Bild 2.11.

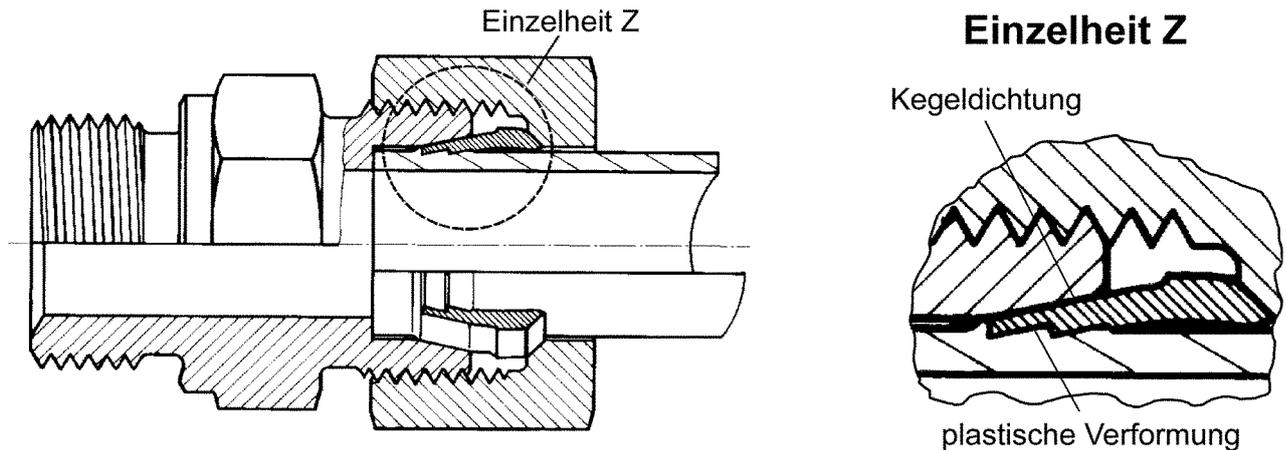


Bild 2.11: Schneidring-Rohrverschraubung (Keilwirkung + scharfe Dichtkante)

2.2.4 Druckaktivierte Metalldichtungen

Bei den druckaktivierten Metalldichtungen wird nur die Vorpressung p_v für die initiale Dichtheit extern aufgebracht. Die Dichtpressung p_B im Betrieb setzt sich dann aus der Vorpressung plus einem Anteil k , resultierend aus dem Systemdruck p , zusammen:

$$p_B = p_v + k \cdot p \quad (2.3)$$

k ist von der Konstruktion (Form) des Dichtrings abhängig. So ist bei Element B in Bild 2.12 $k = 1$ und bei Element E $k \gg 1$. Die Bedeutung von k ist auf Seite 20 näher erläutert. Die Elemente A-C sind röhrenförmige „O-Ringe“; A geschlossen ohne Druck im Rohr, C geschlossen und druckgasgefüllt, B mit Öffnungen, damit der Systemdruck eindringen kann. Element D wird als V-Ring, Element E als C-Ring und Element F als Delta-Ring bezeichnet.

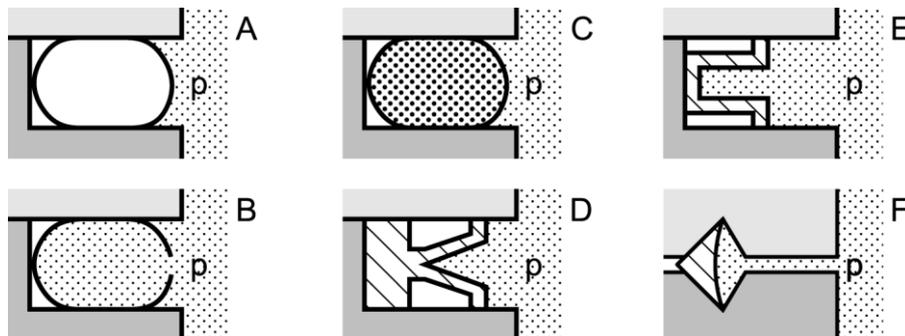


Bild 2.12: Druckaktivierte Metalldichtungen

2.2.5 Dichtung im Kraftfluss der druckabhängigen Belastung

Die Dichtpressung eines leicht ballig ausgeführten Dichtrings bzw. Behälterdeckels wird durch den Innendruck und durch Keilwirkung verstärkt. Der Axialschub wird über einen segmentierten (geteilten) Stützring am Behältermantel ohne Schrauben abgestützt. Auf diese Weise können auch extrem hohe Kräfte sicher aufgenommen werden. Die Hilfsschrauben für Halterung und Vorpressung sind nur wenig belastet.

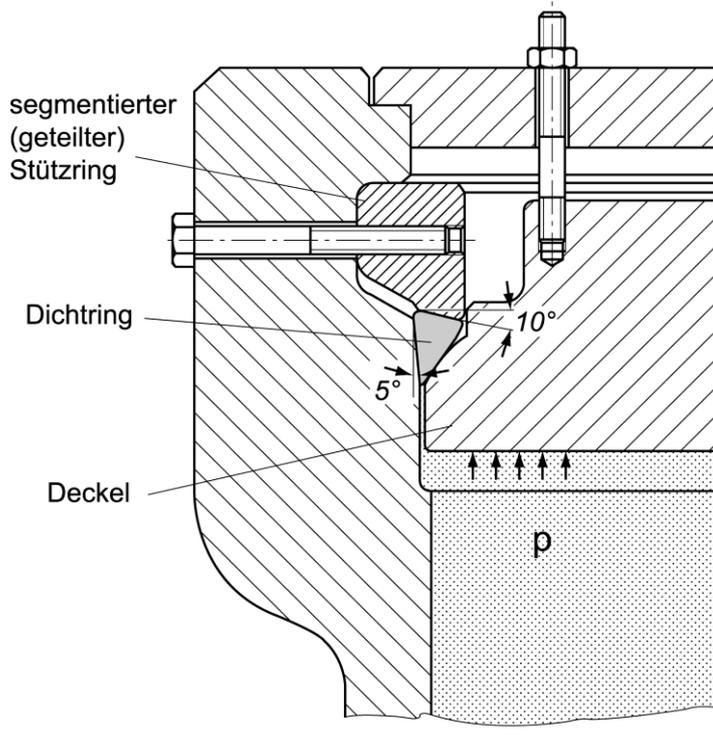


Bild 2.13: Konstruktionsbeispiel: Behälterverschluss nach Uhde-Bredtschneider

2.2.6 Weichstoff-Profildichtungen

Weichstoff-Profildichtungen werden extern nur vorgepresst und beziehen ihre Dichtpressung aus dem Systemdruck p . Bei gummiähnlichen Elastomeren ist infolge deren Elastizität und Inkompresibilität (Querkontraktionszahl 0,5) $k = 1$ und damit:

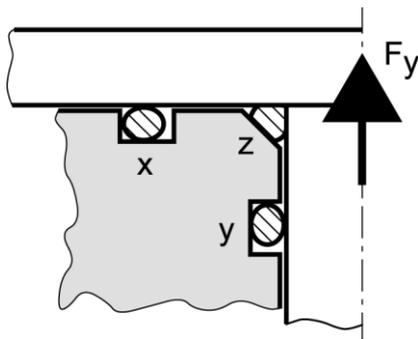
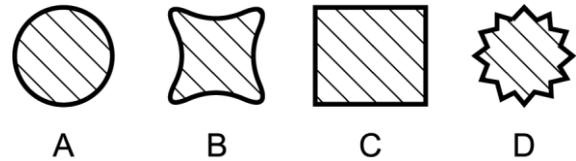
$$p_B = p_v + p \quad (2.4)$$

Die Pressung im Betrieb ist also immer um die Vorpressung höher als der Systemdruck. Dies bezeichnet man als „automatischen Dichtmechanismus“. Typischer Vertreter ist der Elastomer-O-Ring aus NBR, FPM oder PU. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über wichtige Dichtungswerkstoffe und deren Abkürzungen.

Der O-Ring wird axial (x), radial (y) oder notfalls auch im Eck (z) in Nuten eingebaut, Bild 2.14. Gängige Varianten zum O-Ring A in Bild 2.15 sind der X-Ring B (Handelsname auch Quadring), der Rechteckring C und der Starring D. Jede andere Form ist möglich. Es gibt diese Weichstoffdichtungen auch mit Antifrikations-Beschichtung oder Ummantelung z. B. mit PTFE.

Tabelle 2.2: Einige gebräuchliche Dichtungswerkstoffe

Werkstoff	Abkürzung
Nitril-Butadien-Kautschuk	NBR
Fluor-Karbon-Kautschuk	FPM
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	EPDM
Acrylat-Kautschuk	ACM
Methyl-Vinyl-Silikon-Kautschuk	MVQ
Polyurethan	PU
Poly-Tetra-Fluor-Ethylen (Teflon)	PTFE


Bild 2.14: Einbau von O-Ringen

Bild 2.15: Varianten von Weichstoffdichtungen

Weichstoff-Profildichtungen und hier insbesondere der O-Ring werden in der Technik wegen ihrer sehr guten Dichtwirkung äußerst häufig angewendet. Für deren problemlose Funktion sind einige wichtige Konstruktionsregeln zu beachten, Bild 2.16.

◆ **Ausreichend vorpressen**

Der O-Ring-Querschnitt ($\varnothing d$) wird um 10-20 % zusammengepresst, indem die Nuttiefe t entsprechend um Δd geringer gehalten wird.

◆ **Nutbreite**

Die Nutbreite b beträgt 130-140 % vom $\varnothing d$.

◆ **Oberflächenrauheit**

Die Oberflächenrauheit bei ruhender Abdichtung ist entsprechend Tabelle 2.3 auszuführen; bei bewegter Abdichtung für die Kontaktfläche A mit $\frac{1}{4}$ der angegebenen Werte und die Nutwände B wie bei pulsierendem Druck.

◆ **Extrusion vermeiden**

Bei hohem Druck p wird das O-Ring-Material in den niederdruckseitigen Gehäusespalt s gepresst und dort gegebenenfalls abgequetscht, Bild 2.18. Um dies zu vermeiden ist der Gehäusespalt genügend eng und die Konstruktion ausreichend steif zu gestalten, damit der Spalt s nicht durch den Druck aufgeweitet wird. Beispielsweise ist bei einem O-Ring der Härte 70 ShA bis 8 MPa bei Raumtemperatur noch ein Gehäusespalt von $s = 0,2$ mm zulässig. Kann der Spalt nicht genügend eng ausgeführt werden sind zusätzlich Stützringe aus einem härteren Kunststoff zu verwenden.

◆ **Montageschäden**

O-Ringe dürfen nicht unter Pressung über scharfe Kanten gezogen werden. Entsprechend sind bei radial (y in Bild 2.14) eingebauten O-Ringen Einfahrshrägen von ca. 15° vorzusehen und Bohrungen in eine Nut zurückzusetzen, Bild 2.17.

◆ **Dicke O-Ringe**

Wegen der Maßtoleranzen der Schnurdicke d und der Nuttiefe t und wegen der Vorspannungsänderung durch Relaxation des Elastomers sind die größeren Schnurdicken zu bevorzugen.

◆ **Haftreibung**

Bei radial vorgepressten O-Ringen (y in Bild 2.14) muss bei der Demontage die Haftreibungskraft F_y überwunden werden. Sie lässt sich nach der Beziehung (2.5) abschätzen. Wobei sich F_y in Newton ergibt wenn D und d in Millimeter eingesetzt werden.

$$F_y = (1,5 - 3) \cdot D \cdot d \quad (2.5)$$

◆ **Geeignetes Elastomer verwenden**

Das Elastomer muss seine Elastizität behalten und darf weder zuviel quellen noch schrumpfen. Deshalb muss für das abzudichtende Fluid bzw. für die auftretende Temperatur ein geeignetes

Elastomer verwendet werden. Dies ist extrem wichtig und wird trotzdem häufig missachtet. Beispielsweise ist NBR gegen Benzin beständig nicht aber gegen Bremsflüssigkeit. Dagegen ist EPDM gegen Bremsflüssigkeit nicht aber gegen Benzin beständig. Dichtungen für die Bremsanlage versagen also im Kraftstoffbereich und umgekehrt. Das Problem des beständigen Materials stellt sich nicht nur bei O-Ringen, sondern bei allen Dichtungen und anderen Bauteilen aus Elastomeren oder Kunststoffen. Die Hersteller führen Beständigkeitslisten (Datenbanken).

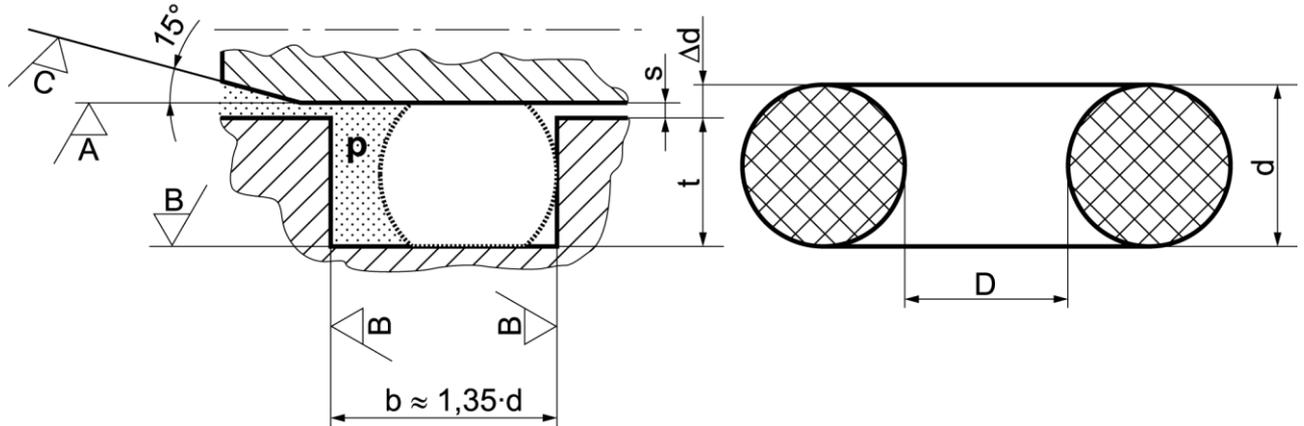
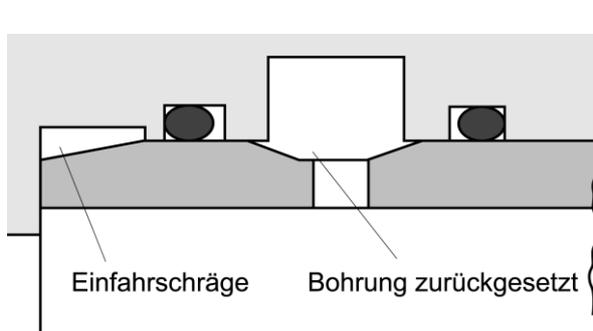
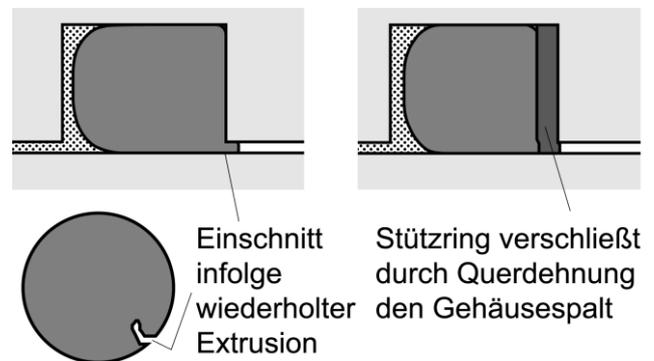

Bild 2.16: Konstruktionshinweise

Tabelle 2.3: Oberflächenrauheit – ruhende Abdichtung

Oberfläche	Druck	Oberflächenrauheit in μm , Traganteil $t_p > 50\%$	
		R_a	R_{max}
A Kontaktfläche	nicht pulsierend	1,6	6,3
	pulsierend	0,8	3,2
B Nutgrund und -Seiten	nicht pulsierend	3,2	12,5
	pulsierend	1,6	6,3
C Oberfläche der Einfahrschräge		3,2	12,5


Bild 2.17: Radial gepresste O-Ringe erfordern eine „Einfahrschräge“

Bild 2.18: Extrusion und Abhilfe durch Stützringe

2.2.7 Dichtmassen

Zu den Dichtmassen, Bild 2.19, zählen pastöse oder flüssige Dichtmittel, die sich der Mikro- und Makrostruktur der Dichtflächen wie Flansche oder Gewinde leicht anpassen und dann chemisch oder physikalisch zu harten oder elastischen Dichtungen aushärten. Dichtmassen werden, da flexibel und leicht handhabbar, vielfach in allen Bereichen der Technik angewandt. Entsprechend vielfältig sind ihre Ausführungsformen. Leider verführt die leichte Anwend- und Verfügbarkeit auch dazu, in Konstruktion und Fertigung „unsauber“ zu arbeiten.

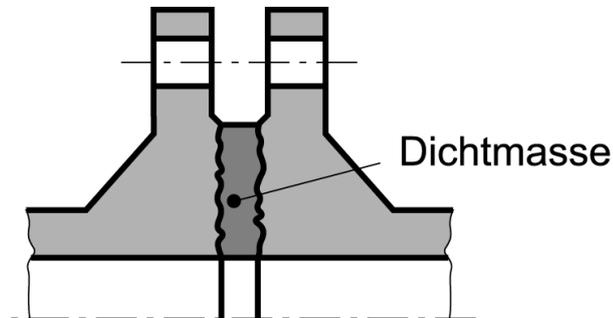


Bild 2.19: Dichtmasse als Flanschdichtung

2.2.8 Membrandichtung

Membrandichtungen, Bild 2.20, erlauben begrenzte, schmierungsfreie und reibungsarme Bewegungen ohne Stick-Slip (Ruckgleiten) bei maximal möglicher Dichtheit. Trotz relativ großer Bewegung der Bauteile zueinander wird, ähnlich wie in der Natur, eine gleitende Abdichtung vermieden. Flachmembrane A in Bild 2.21 können aus Metall, Gummi oder Kunststoff bestehen. Andere Formen wie die Sickenmembran D oder die Rollmembran C, die größere Bewegungen als eine Flachmembran erlauben, müssen aus gummielastischen Materialien gefertigt sein. Um höheren Drücken zu widerstehen und eine lange Lebensdauer zu erreichen, sind die Membranwerkstoffe meist gewebeverstärkt. Um die chemische Beständigkeit zu verbessern, wurden teflonbeschichtete Membrane entwickelt. Gummiblattendichtungen B erlauben wegen ihres kleinen Spalts bei geringem Hub einen relativ hohen Druck.

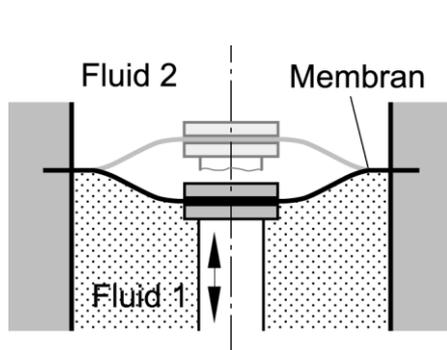


Bild 2.20: Membrandichtung

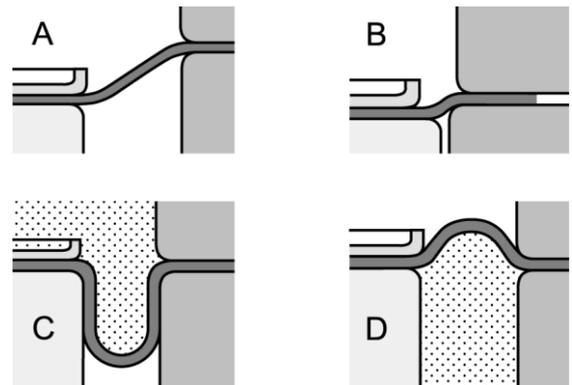


Bild 2.21: Membranvarianten

2.2.9 Balgdichtung

Werden mehrere Flachmembrane hintereinandergeschaltet, erhält man einen Balg. Er erlaubt damit größere Hub- und vor allem auch Lateral- und Angular- sowie Taumbewegungen. Neben dem Gummibal, Bild 2.22 A, gibt es Bälge aus Metall und Kunststoffen, vorzugsweise aus PTFE. Gewellte Metallfaltenbälge B in Bild 2.22 werden gewalzt und erlauben hohen Druck bei, im Verhältnis zu ihrer Baugröße, kleinen Bewegungen. Bei geschweißten Lamellenbälgen C werden die

Lamellen geprägt und dann verschweißt. Sie sind beweglich und kurzbauend. PTFE-Bälge D werden aus PTFE-Rohr gestochen. Sie sind sehr beweglich und vor allem chemisch inert.

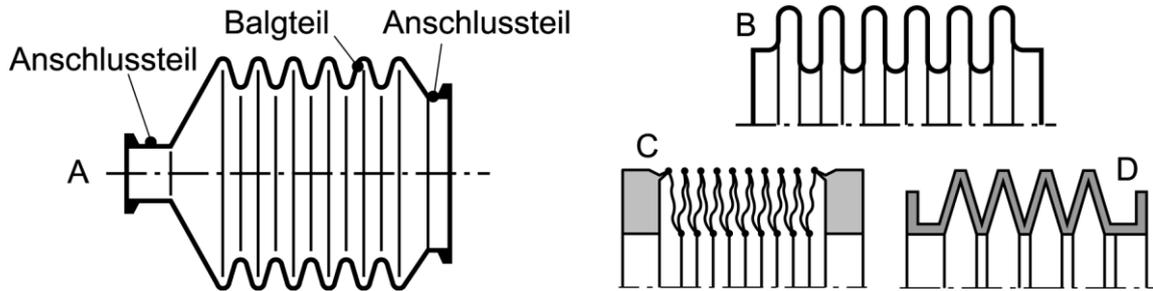


Bild 2.22: Balgdichtung mit Varianten

3 Dynamische Dichtstellen und berührende Dichtelemente

Sind die gegeneinander abzudichtenden Räume so durch ein bewegtes Teil miteinander verbunden, dass eine funktionsbedingte Relativbewegung der Dichtflächen zueinander vorliegt, so wird dies als dynamische Dichtstelle bezeichnet. Ist die Bewegung rotatorisch, so werden die Dichtungen Wellendichtungen genannt. Ist die Bewegung translatorisch, so spricht man entweder von Stangendichtungen – Dichtung sitzt innen im hohlen Außenteil – oder von Kolbendichtungen – Dichtung sitzt außen auf dem Innenteil.

3.1 Rotatorische Abdichtung

Die Vielfalt der Wellendichtungen lässt sich systematisch gliedern in Schutzdichtungen, Radialwellendichtungen, Gleitringdichtungen und Stopfbuchsen; wobei die Stopfbuchse schon ein Zwitter zu den Dichtungen für translatorische Dichtstellen ist.

3.1.1 Berührende Schutzdichtungen

Unter dem Begriff Schutzdichtungen wird alles zusammengefasst, was in aller Regel Rotationslager vor Schmierstoffaustrag und Schmutzeintrag schützt und keiner anderen größeren Gruppe zugeordnet wird. Bild 3.1 zeigt einen Filzring A als berührende Schutzdichtung.

In Bild 3.2 sind die wesentlichen Schutzdichtungen dargestellt. Als älteste und einfachste berührende Schutzdichtung gilt der Filzring A, als modernste und schmälmste die ins Lager integrierte Dichtscheibe M. Kolbenringe B, Lamellenringe C und federnde Deckscheiben D-F sind einfache metallische Dichtelemente, wobei B und C auch berührungsfrei laufen können. Sie sind wie alle anderen dargestellten Elemente geeignet, Fett im Lager und Schmutz draußen zu halten. Flüssigkeitsdicht sind sie nicht.

Die Dichtelemente aus Elastomer (vorzugsweise aus NBR oder FPM), wie der V-Ring G, der Gammaring H der Axial-Wellendichtring K und die Dichtscheibe M, können auch flüssigkeitsdicht gegen anspritzende und drucklos überflutende Fluide sein. In aller Regel sind sie es nur in eine Richtung – in den Darstellungen G, H und M gegen von außen (rechts) anstehende Flüssigkeit. Soll in zwei Richtungen Flüssigkeit abgedichtet werden, sind entsprechend zwei Elemente wie in I dargestellt anzuordnen.

Eine Sonderstellung nimmt die Laufwerksdichtung L ein. Sie ist geeignet, starker Schmutzbeaufschlagung zu widerstehen, z. B. in Kettenfahrwerken von Planiermaschinen, und kann Fluide unter Druck bis zu 0,2 MPa abdichten. Ihre Gleitringe sind aus einem speziellen Hartguss und werden durch zwei O-Ringe elastisch abgedichtet und angepresst. Laufwerksdichtungen gehören systematisch zu den später dargestellten Gleitringdichtungen, wohingegen der Axial-Wellendichtring prinzipiell den nachfolgend beschriebenen Radial-Wellendichtringen ähnelt. Berührungsfreie Schutzdichtungen sind in Kap. 4.2 dargestellt.

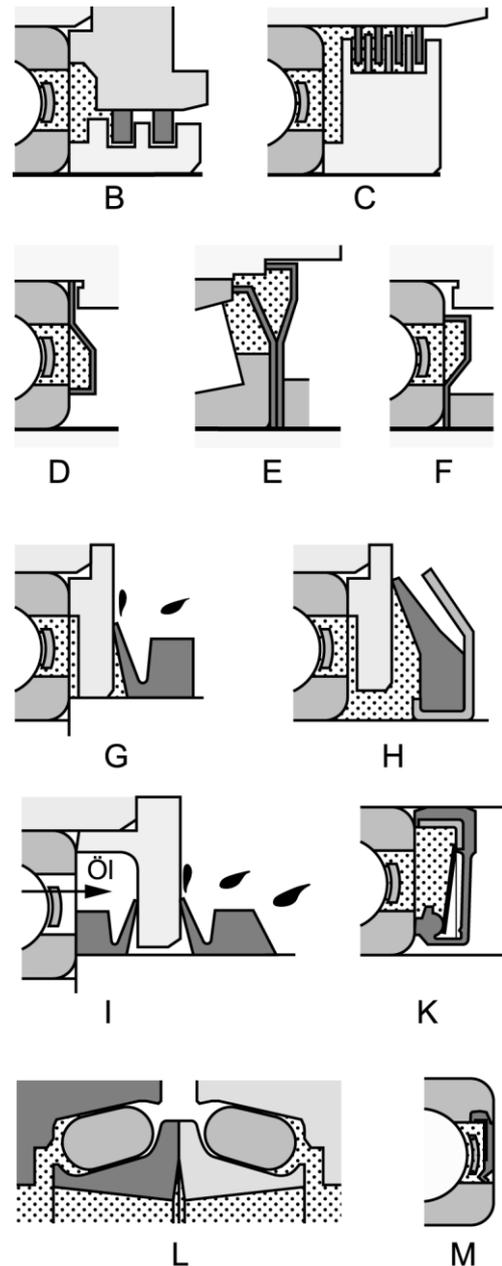
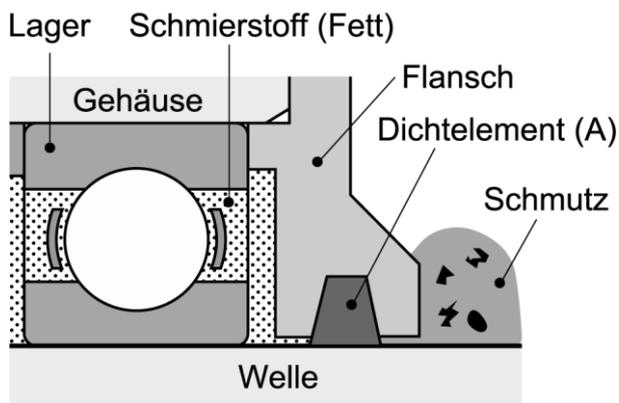

Bild 3.1: Filzring A als Schutzdichtung

Bild 3.2: Schutzdichtungen

Einsatzgrenzen:

Die Einsatzgrenzen der einzelnen Elemente hinsichtlich der zulässigen Gleitgeschwindigkeit sind sehr unterschiedlich und zudem stark von den Einsatzbedingungen abhängig. So können Filzringe A bis etwa 5 m/s eingesetzt werden, wohingegen Axialwellenringe K bei optimaler Ölschmierung 30 m/s ertragen. Die Dichtlippe des V-Rings G, I hebt bei ca. 15 m/s infolge Fliehkraft von ihrer Gegenauflfläche ab, während für die metallischen Elemente wie D und L wiederum bei 5 m/s Schluss ist. Fällt die Schmierung aus (weg) sinkt die ertragbare Gleitgeschwindigkeit bei allen (berührenden) Elementen drastisch.

3.1.2 Radial-Wellendichtringe

Radial-Wellendichtringe werden in der Technik äußerst häufig eingesetzt. Sie werden deshalb hier etwas ausführlicher behandelt.

Radial-Wellendichtringe sind Lippendichtungen, wobei die Primärdichtlippe radial an einem drehenden Teil anliegt. Das klassische, bekannteste und sehr häufig eingesetzte Element dieser

Gruppe ist der Elastomer-Radial-Wellendichtring RWDR, landläufig auch Simmerring genannt, Bild 3.3. Bei gut schmierender Flüssigkeit, optimaler Umspülung und geeignetem Werkstoff sind RWDR bis 35 m/s Gleitgeschwindigkeit einsetzbar. Die Dichtwirkung des RWDR basiert auf einem elasto-hydrodynamischen Rückfördereffekt. Dieser beruht auf den beiden unterschiedlichen Dichtkantenwinkeln α und β und einem charakteristischen Berührflächenverschleiß. Die abzudichtende Flüssigkeit muss immer auf der Seite mit dem größeren Dichtkantenwinkel α sein. Wird auf der Seite mit dem kleineren Dichtkantenwinkel β Flüssigkeit angeboten, so wird diese auf die Seite mit dem großen Dichtkantenwinkel gepumpt. Radial-Wellendichtringe sind also aktive Dichtelemente und können deshalb leckagefrei abdichten.

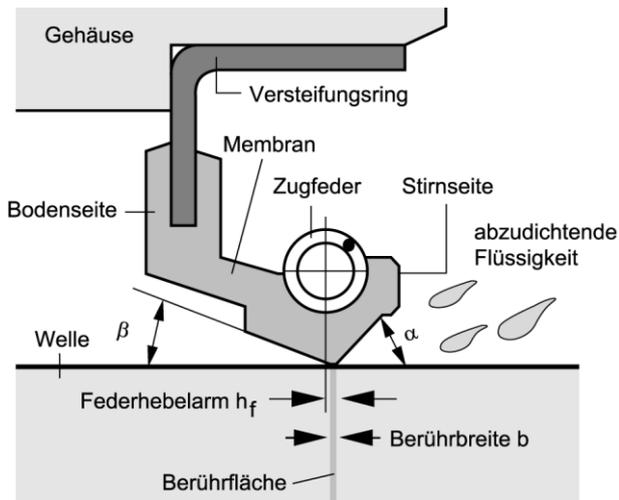


Bild 3.3: Elastomer-Radialwellendichtring (RWDR) und wichtige Bezeichnungen

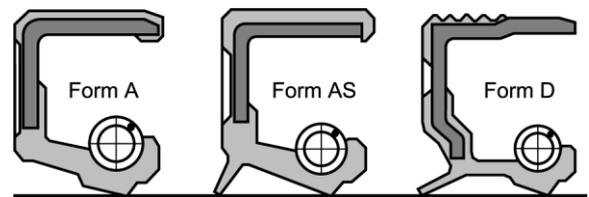


Bild 3.4: Bauformen nach DIN 3760/3761

Bild 3.4 zeigt einige Bauformen von RWDR nach DIN. In Bild 3.3 ist die Grundbauform B dargestellt. Form A mit gummiertem Versteifungsring bringt bessere Sekundärdichtheit und geringere Toleranzempfindlichkeit. Form AS und Form D haben so genannte Schutzlippen (AS berührungsfrei, D flachgestellt mit geringer Anpressung). Schutzlippen mindern den Flüssigkeits- und Schmutzanfall von der Bodenseite her.

Alle RWDR-Bauformen gibt es auch mit Drall. Drall sind makroskopische Rückförderstrukturen auf der Bodenseite der Dichtkante (Winkel β). Sie verbessern das Dichtvermögen von RWDR wesentlich.

RWDR nach DIN 3760/3761 und ähnliche Elemente sind nur zur Abdichtung nahezu druckloser Flüssigkeiten geeignet. Sind mehr als ca. 0,02 MPa abzudichten, kommen Radial-Wellendichtring-Bauformen wie in Bild 3.5 gezeigt zum Einsatz. Typ A ist ein RWDR mit verkürzter und verstärkter Membran, Typ B ein Sonderring aus Elastomer ohne Federanpressung und Typ C eine Manschettendichtung mit einer Manschette aus PTFE-Compound. Diese Ringe sind deshalb druckbelastbar, weil sie eine „kleine“ druckbelastete Wirkfläche (gegeben durch Abstand x zwischen Dichtkante und niederdruckseitiger Wand) und eine größere Stabilität haben. Mit diesen Dichtelementen sind Drücke bis 1 MPa bei relativ geringer Gleitgeschwindigkeit beherrschbar. Mit Dichtsystemen wie D und E mit Dichtringen aus PTFE sind auf Grund ihrer besonderen Gestaltung (kleiner Wert x) Drücke bis 3 MPa bei Gleitgeschwindigkeiten bis 12 m/s (gleichzeitig) abdichtbar.

PTFE-Manschettendichtungen kommen immer dann zum Einsatz, wenn die Temperaturstabilität oder die chemische Beständigkeit elastomerer Werkstoffe nicht mehr ausreichen oder wenn schlecht schmierende Fluide abzudichten sind. Neben den glatten Manschetten nach Bild 3.5 C – die keinen aktiven Rückfördermechanismus haben – kommen für drucklose Abdichtungen vorzugsweise PTFE-Manschettens mit Spiralrinne zum Einsatz, Bild 3.6 A. Die Spiralrinne wirkt als Rückförderpumpe und verbessert das Dichtvermögen wesentlich. Solche dynamischen Dichtringe können allerdings nur in eine Drehrichtung betrieben werden und ihre statische Dichtheit ist ungünstiger.

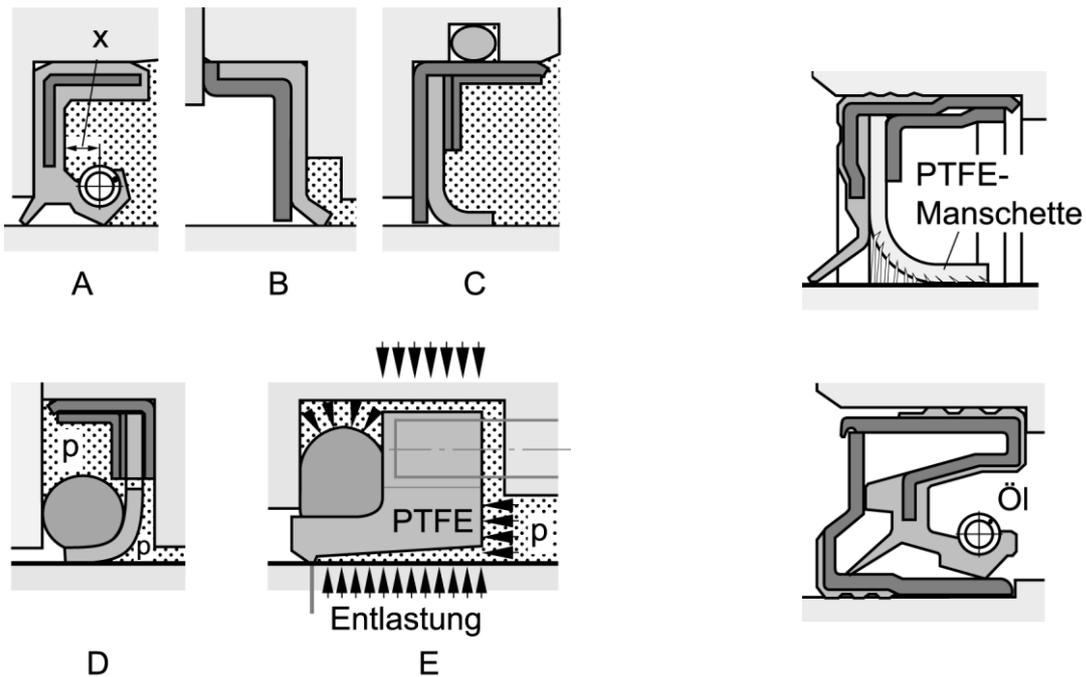


Bild 3.5: Druckbelastbare Radialwellendichtungen

Bild 3.6: PTFE-Manschettendichtung und Dichtungskassette

Bild 3.6 B zeigt eine Kassettendichtung. Hier wird das komplette dynamische Dichtsystem – Gegenläuffläche und Dichtring – von einem Hersteller einbaufertig geliefert.

Bild 3.7 gibt einen Eindruck von der Vielfalt der Ausführungsformen von Radialwellendichtungen.

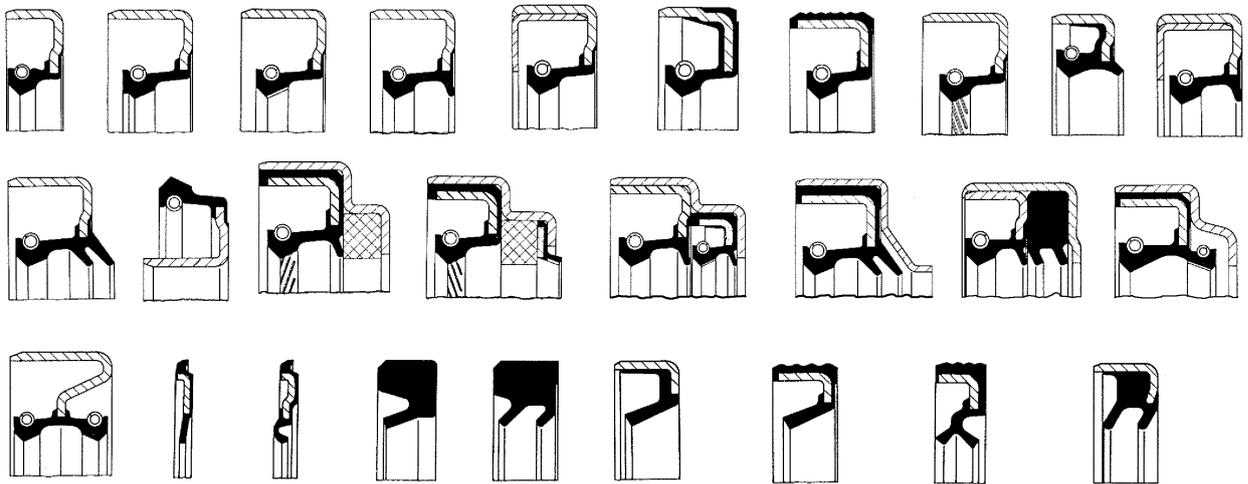


Bild 3.7: Radial-Wellendichtring-Varianten

Bild 3.8 zeigt die Einsatzgrenzen von RWDR in Abhängigkeit vom Werkstoff, dem Wellendurchmesser und der Umfangsgeschwindigkeit. Bei größerem Wellendurchmesser sind höhere Gleitgeschwindigkeiten zulässig weil die Wärmeableitung günstiger ist.

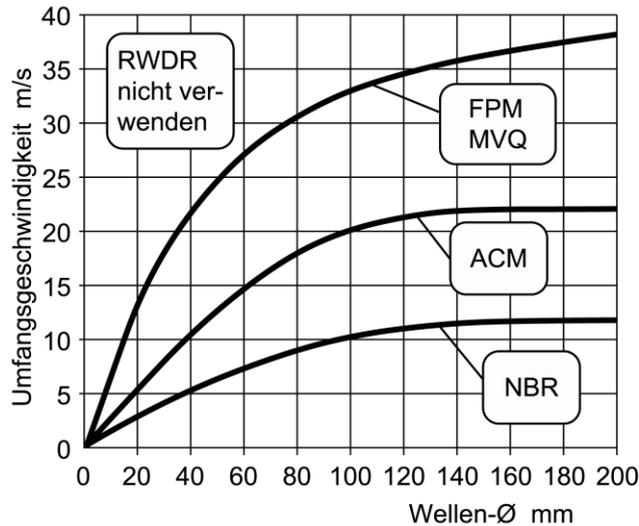


Bild 3.8: Einsatzgrenzen von RWDR nach DIN 3760

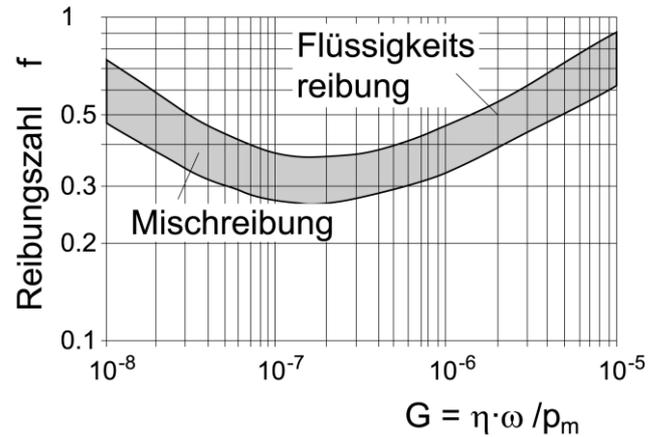


Bild 3.9: Reibungsbereich von RWDR

Reibleistung und Reibmoment

Bild 3.9 zeigt den Reibungsbereich von RWDR abhängig von der Gümpelzahl G . Mit Hilfe dieses Diagramms kann die Reibleistung P bzw. das Reibmoment M eines RWDR abgeschätzt werden.

$$P = f \cdot p_m \cdot \pi \cdot b \cdot d \cdot u \quad (3.1)$$

$$M = 0,5 \cdot f \cdot p_m \cdot \pi \cdot b \cdot d^2 \quad (3.2)$$

Mit: p_m = mittlere Flächenpressung
 b = Berührbreite
 d = Abdichtdurchmesser

u = Gleitgeschwindigkeit
 ω = Winkelgeschwindigkeit
 η = dynamische Viskosität im Dichtspalt

Für eine erste Abschätzung kann von einer mittleren Flächenpressung $p_m = 1 \text{ N/mm}^2$ bei einer Berührbreite von $b = 0,15 \text{ mm}$ ausgegangen werden.

Beispiel: $d = 100 \text{ mm}$, $n = 3000 \text{ min}^{-1}$, $f = 0,3-0,5$

$\Rightarrow M = 0,7-1,2 \text{ Nm}$ und $P = 220-380 \text{ W}$

Konstruktive Gesichtspunkte

Der Dichtring allein macht noch keine Dichtung aus. Er muss günstig in sein Umfeld integriert werden und vor allem seinem Dichtpartner, der Wellenoberfläche (Gegenauflfläche), ist besondere Beachtung zu schenken. Dafür ist in der Regel nicht der Dichtringhersteller sondern der Anwender (Konstrukteur) verantwortlich. In Bild 3.10 ist gezeigt auf was es im Wesentlichen ankommt.

D: Montagefase: $\sphericalangle 15-20^\circ$

F: Aufnahmebohrung: $\varnothing H8$; $R_a = 1,6-6,3 \mu\text{m}$

A: Gegenauflfläche: $\varnothing A$ gegen Lagerinnendurchmesser B absetzen (mindestens $0,2 \text{ mm}$), wegen Kratzern bei der Lagermontage; $\varnothing h11$, $R_a = 0,2-0,8 \mu\text{m}$, drallfrei bearbeitet

C: Einfahrshräge: $\sphericalangle 15-25^\circ$, Kanten gerundet

- E: Welle: \varnothing E kleiner als A – möglichst so, dass Dichtring bei Montage nicht streift. Sonst wenn E strukturiert (Gewinde, Verzahnung, Nut....) Montagehülse verwenden
- drei Abdrückbohrungen am Umfang zur Demontage des Dichtrings anbringen
 - Sekundärabdichtung nicht vergessen

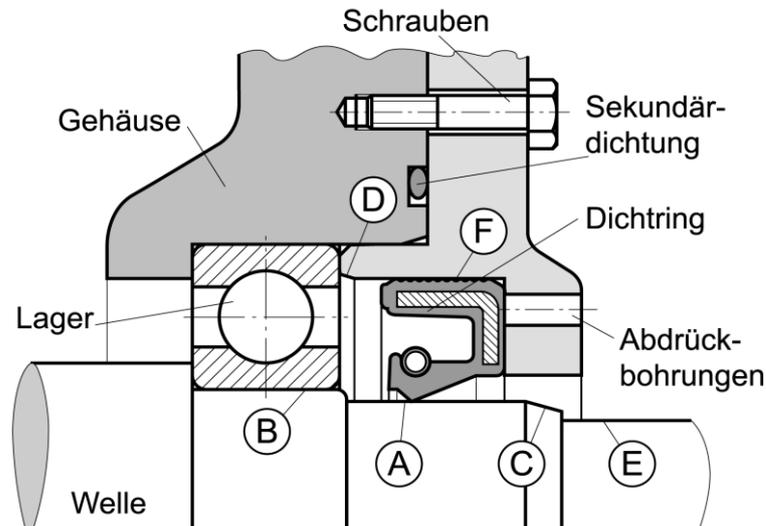


Bild 3.10: Konstruktive Randbedingungen

Die Gegenlauffläche

Der zweite wichtige Partner im Dichtsystem „Radial-Wellendichtung“ ist neben dem Dichtring die Wellenoberfläche (Gegenlauffläche) im Berührungsbereich, A in Bild 3.10. Sie darf weder zu glatt (gefährdet Schmierung und Dichtfunktion) noch zu rau (erzeugt großen Verschleiß) sein.

Optimaler Bereich: $R_a = 0,2-0,8 \mu\text{m}$, $R_z = 1-4 \mu\text{m}$ und $R_{\text{max}} = 6,3 \mu\text{m}$.

Außerdem soll die Härte $> 45 \text{ HRC}$, bei verschmutzten Fluiden $> 60 \text{ HRC}$ sein. Darüber hinaus – und das ist besonders wichtig – muss die Oberfläche „drallfrei“ sein. Drallfrei bedeutet, dass sich auf der Oberfläche keine mikroskopisch kleinen Strukturen befinden dürfen, die einen achsparallelen Fluidstrom unter der Dichtkante erzeugen. Diese Bedingung ist schwierig einzuhalten und messtechnisch praktisch nicht zu verifizieren, aber eine der Hauptausfallursachen (Frühausfälle) von RWDR. Geeignete Bearbeitungsverfahren sind:

- ◆ Schleifen im Einstich (gängig)
- ◆ Hartdrehen (im Kommen)
- ◆ Glattwalzen und Kugelstrahlen (eher selten).

3.1.3 Gleitringdichtungen

Gleitringdichtungen GLRD, Bild 3.11, konnten sich im Laufe der Zeit – vor allem wegen ihrer vergleichsweise geringen Leckage und Reibung – als druckbelastbare Wellendichtungen für Flüssigkeiten durchsetzen. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Gleit- und einem Gegenring, die axial durch eine Feder aneinander gepresst werden und zwischen denen sich durch hydrostatische und hydrodynamische Effekte ein Dichtspalt mit einer Höhe unter $1 \mu\text{m}$ bildet. Der Verschleiß der Gleitflächen wird durch Nachrücken automatisch ausgeglichen. GLRD sind somit wartungsfrei. Als Gleitwerkstoffe kommen in modernen Gleitringdichtungen Siliziumcarbid SiC gegen antimonimprägnierte Kunstkohle C(Sb) zum Einsatz. Günstig ist, wenn der höhere Druck außen ist. Schmale Gleitflächen (2-3 mm) sind anzustreben.

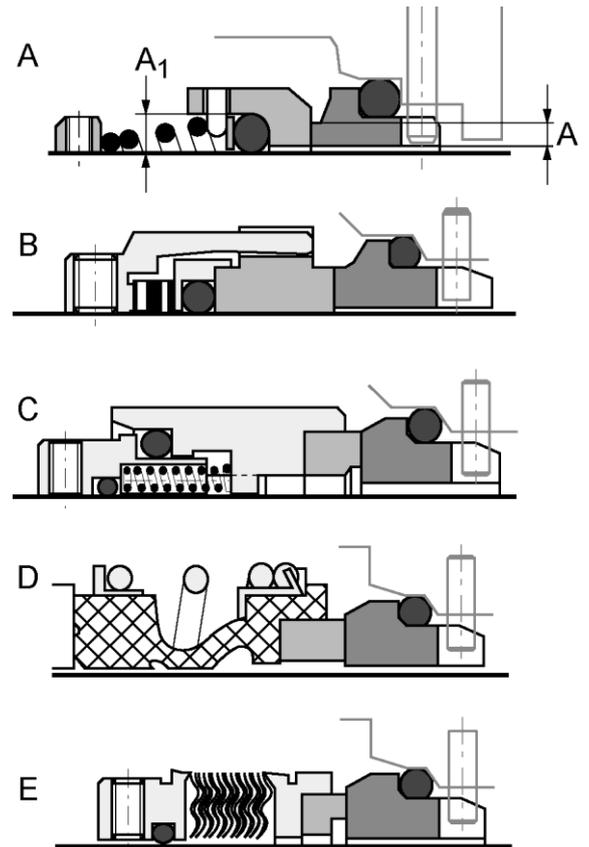
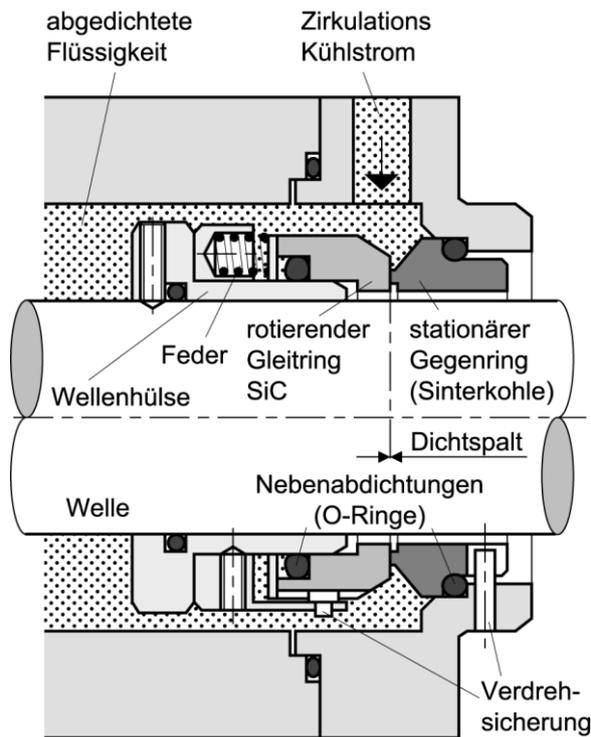


Bild 3.11: Gleitringdichtungen mit Bezeichnungen

Bild 3.12: Gleitringdichtungsvarianten mit rotierendem Gleitring

GLRD werden in allen Bereichen der Technik angewendet. In großen Stückzahlen in den Kühlwasserpumpen der Automobile und in Haushaltsgeräten. Die meisten Prozesspumpen der chemischen der petrochemischen und der Papier-Industrie sind mit GLRD ausgerüstet. Im Maschinenbau werden sie in Werkzeugmaschinen, Kompressoren, Mischern und Rührwerken verwendet. Für höchste Dichtheits- und Sicherheitsanforderungen in Prozess- und Kernkraftwerks-Pumpen wurden komplexe Gleitring-Dichtsysteme entwickelt, die in manchen Fällen teurer als die Pumpe sind.

Mit speziell ausgelegten Gleitringdichtungen sind Drücke bis zu etlichen zehn MPa oder Gleitgeschwindigkeiten bis zu mehreren 100 m/s beherrschbar – allerdings nicht gleichzeitig. Es werden $p \cdot v$ -Werte (Produkt aus abzudichtendem Druck und Gleitgeschwindigkeit) bis zu mehreren 100 MPa·m/s erreicht. Bild 3.12 zeigt Ausführungsformen von Standard-GLRD und konstruktive Details.

Man unterscheidet GLRD mit rotierendem Gleitring und solche mit rotierendem Gegenring. Außerdem wird zwischen unentlasteten und entlasteten GLRD unterschieden. Bei entlasteten GLRD ist das Flächenverhältnis $k = A_1 / A$ kleiner als 1 bei unentlasteten größer oder gleich 1.

$A = \text{Dichtfläche (Gleitfläche)} / A_1 = \text{nicht druckausgeglichene Fläche, siehe Bild 3.12 A.}$

Nur mit entlasteten GLRD, bei denen mit steigendem Druck die Anpressung der Gleitflächen nicht zu schnell ansteigt, sind höhere $p \cdot v$ -Werte erreichbar.

Variante A ist eine einfache unentlastete GLRD für Pumpenwellen. Reibmomentübertragung und Anpressung werden durch eine kegelige Schraubenfeder, die sich selbsthemmend auf der Welle festzieht, realisiert. Diese einfache Anordnung ist deshalb nur für stets gleich bleibende Drehrichtung geeignet.

Variante B, ebenfalls unentlastet, hat eine drehrichtungsunabhängige Reibmomentübertragung durch übergreifende Klauen, die in Längsschlitze auf der Außenseite des keramischen Gleitringes eingreifen. Dieser wird platz sparend durch eine Doppel-Wellfeder angepresst.

Variante C ist eine entlastete GLRD. Die zur Entlastung nötige Stufe wird durch eine wellenfeste Hülse realisiert. Die Dichtringe werden durch mehrere am Umfang verteilte kleine Schraubenfedern („Gruppenfeder“) angepresst. Die besonders gestaltete O-Ring-Nut zwischen Gleitring und Wellenhülse macht diese Variante für wechselnde Druckbeaufschlagung (innen/außen) geeignet.

Bei den Varianten D und E erfolgt die Anpressung, die Reibkraftübertragung und die Nebenabdichtung durch einen Balg. D ist eine Einfachstdichtung mit Gummibalg und zusätzlicher Feder.

Die Varianten F und G in Bild 3.13 stellen zwei besonders kurz bauende GLRD dar. Hier ist der Gleitring stationär und der Gegenring rotiert. Eine solche Anordnung hat Vorteile bei hoher Umfangsgeschwindigkeit.

Bild 3.14 zeigt eine vom Hersteller einbaufertig vormontierte Cartridgeeinheit. Damit werden Montagefehler vermieden. Durch die „Zirkulation“ wird aktiv frisches, sauberes und kühles abdichtendes Fluid in den Bereich der hoch belasteten Gleitflächen im abdichtenden Raum eingespeist. Mit „Quench“ (to quench = löschen) wird alles bezeichnet, was hinter der Primärdichtung und vor einer Sekundärdichtung (Quenchdichtung) zu- oder abgeführt wird. Quench kann zum kühlen, spülen, schmieren, abführen usw. dienen.

Zur leckagearmen und trockenen Abdichtung von Gasen werden gasgeschmierte GLRD eingesetzt. Durch aerodynamische wirksame Strukturen in den Gleitdichtflächen wird für eine stabile Trennung der beiden Gleitdichtflächen gesorgt.

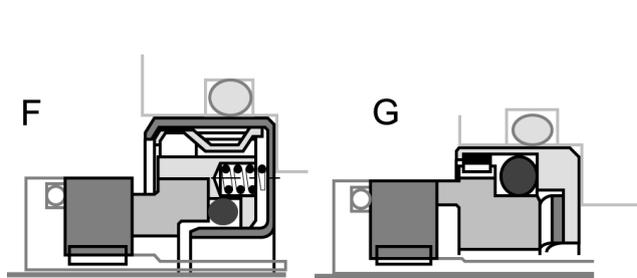


Bild 3.13: Kleinbauende GLRD mit stationärem Gleitring

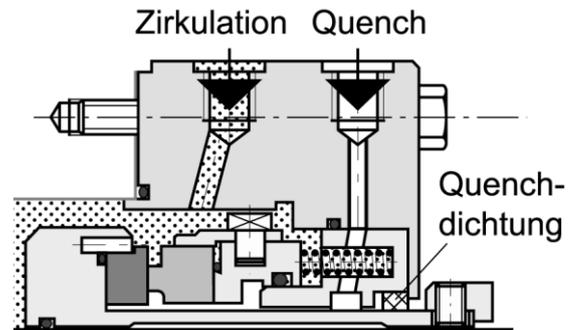


Bild 3.14: Cartridge-Gleitringdichtung mit Zirkulation zur Kühlung und Quench zur Leckageausspülung

Berechnung von Gleitringdichtungen

Während die zu erwartende Leckage aufgrund der vielfältigen Einflüsse nur schwer zu berechnen ist, lässt sich die Reibleistung P zwischen den Gleitflächen von Standard GLRD und damit das Moment mittels der Beziehung

$$P = f \cdot \kappa \cdot \Delta p \cdot v \cdot A \quad (3.3)$$

und

$$\kappa = k + \frac{p_f}{\Delta p} \quad (3.4)$$

sowie dem Diagramm in Bild 3.15 abschätzen.

f = Reibungszahl

κ = Belastungsfaktor

Δp = Druckdifferenz

v = Gleitgeschwindigkeit

A = Gleitfläche

p_f = Federpressung (Federkraft/Fläche A)

k = Flächenverhältnis

κ , p_f , A und k sind Kenngrößen der Gleitringdichtung.

Die Beziehungen (3.3) und (3.4) machen klar, dass schmale Gleitflächen (kleines A) und entlastete Gleitringdichtungen (Flächenverhältnis $k < 1$) zu höheren Leistungsgrenzen ($p \cdot v$ -Wert) führen. Deshalb kommen für Drücke über 1,5 MPa praktisch nur entlastete GLRD zum Einsatz.

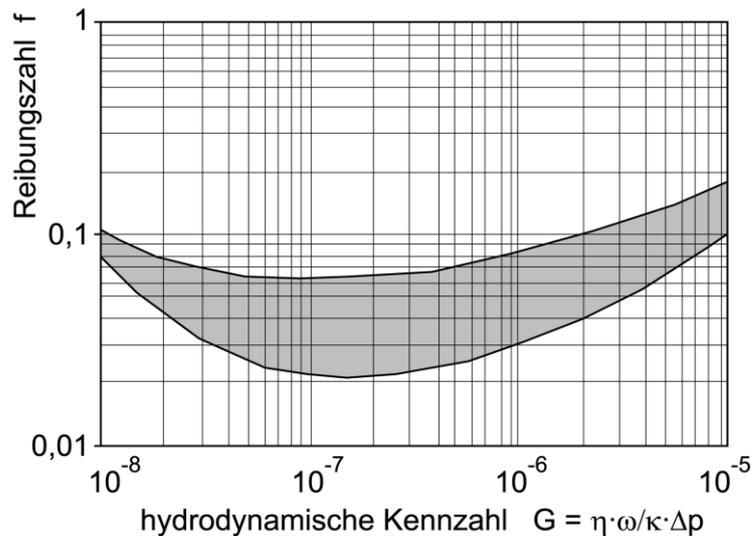


Bild 3.15: Bereich der Reibungszahlen von Standard-Gleitringdichtungen

3.1.4 Stopfbuchsdichtung

Die Stopfbuchsdichtung ist die klassische Wellen- und Stangendichtung schon des frühen Maschinenbaus. Sie ist sehr einfach aufgebaut. In einem Gehäuseringraum wird Packungsmaterial eingelegt und über die Stopfbuchsbrille axial gepresst. Durch Querdehnung legt sich das Packungsmaterial an die Ringraumwand und die Welle/Stange an. Die Stopfbuchsdichtung ist fertig, Bild 3.16. Das verfügbare Packungsmaterial ist äußerst vielfältig und deckt praktisch alle Einsatzbedingungen ab.

Durch einen Laternenring, Bild 3.17, kann Leckage abgeführt oder Schmier-, Sperr- und Kühlflüssigkeit zugeführt werden. Stopfbuchsdichtungen müssen, sofern sie nicht federvorgespannt sind, von Zeit zu Zeit nachgestellt werden. Dynamisch dichtende Stopfbuchsdichtungen müssen, um nicht zu verbrennen, auf tropfende Leckage eingestellt sein. Diese ist bei gleichen Bedingungen viel höher als die einer GLRD. Kurze Stopfbuchsen sind hier wesentlich günstiger als lange.

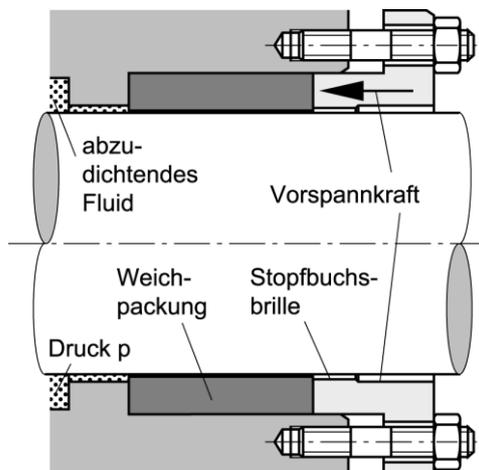


Bild 3.16: Elemente einer Stopfbuchspackung

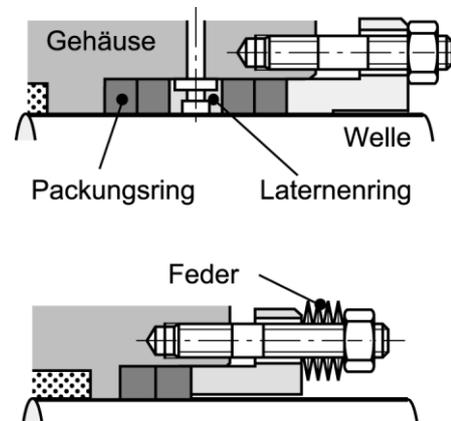


Bild 3.17: Stopfbuchsdichtungen

Stopfbuchsichtungen werden heute noch eingesetzt bei Abdichtaufgaben mit hoher Temperatur und hohem Druck, bei kleiner Gleitgeschwindigkeit und chemisch hochaggressiven Fluiden sowie wenn spontanes Versagen auf einfache Weise vermieden werden muss. Richtig eingestellte Stopfbuchsen fallen „kontrolliert“ aus.

Als Rotationsabdichtung von schnell drehenden Wellen wurde die Stopfbuchsichtung von der Gleitringdichtung verdrängt. Als Spindelabdichtung an Armaturen und als Translationsabdichtung von Hochdruck-Plungerpumpen ist sie heute noch Standard.

3.2 Translatorische Abdichtungen

Die Abdichtung translatorisch bewegter Bauteile ist eine häufige Aufgabe in der Pneumatik- und Hydrauliktechnik, aber auch das Abdichten von Führungen, beispielsweise an Werkzeugmaschinen, zählen hierzu.

Bild 3.18 zeigt bereits die wesentlichen Elemente zur Abdichtung des Kolbens und der Stange, sowie zu deren Sauberhaltung und Führung anhand eines Hydraulikzylinders. Eingetragen ist hier auch noch, ob es sich systemtechnisch betrachtet um einteilige Maschinen- oder mehrteilige Konstruktionselemente oder aber um Technische Teilsysteme TTS handelt. Entscheidend für deren Reibung, Verschleiß und damit Lebensdauer ist, dass sich bei Bewegung ein schmierender Flüssigkeitsfilm zwischen Dichtelement und Stange oder Zylinderwand bildet. Ist der Verlauf der Flächenpressung unter der Dichtung in axialer Richtung bekannt, so kann mittels der Reynolds-Gleichung für die eindimensionale Schlepp-Druck-Strömung der Spalthöhenverlauf und damit letztlich die durchgeschleppte Schmierfilmdicke h bestimmt werden, Bild 3.19.

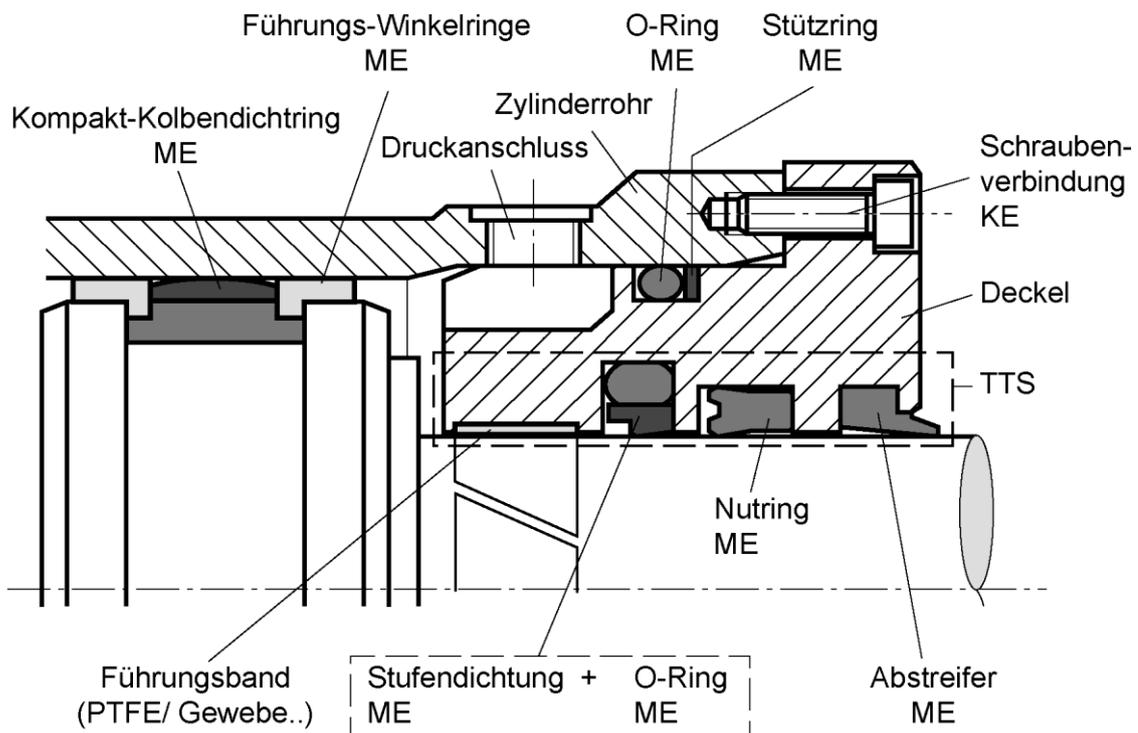


Bild 3.18: Ein Hydraulikzylinder als technisches System – Dichtungen und Führungen (TTS – Technisches Teilsystem [Baugruppe, Funktionseinheit], KE – Konstruktionselement, ME - Maschinenelement)

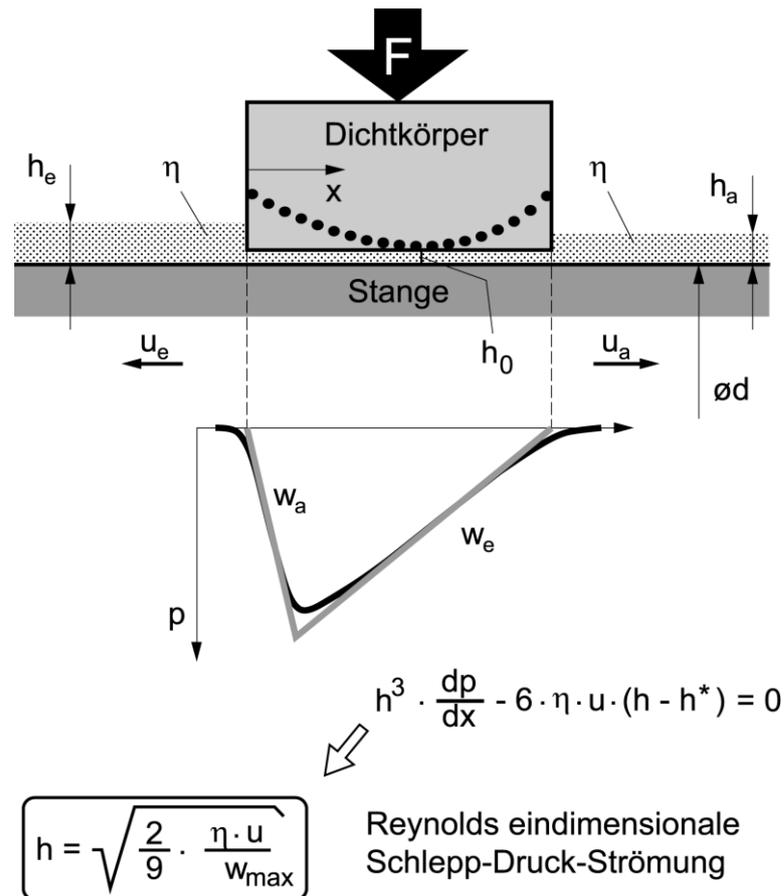


Bild 3.19: Spaltbildung und Schmierfilmdicke bei Hydraulikdichtungen

Die Dicke des Schmierfilms ist von der Viskosität η , der Gleitgeschwindigkeit u und von der Pressungsverteilung in der Dichtfläche in Bewegungsrichtung abhängig. Flacher Pressungsanstieg w_{\max} bedeutet dicker Schmierfilm h , steiler Pressungsanstieg bedeutet dünner Schmierfilm. Die Pressungsverteilung ist abhängig von der geometrischen Form der Dichtelemente und von deren Verformung infolge der wirkenden Kräfte, Bild 3.20. Verschleiß beeinflusst die geometrische Form wesentlich.

Hinweis: Die Schmierfilmdicke und damit eventuelle Leckage ist nicht primär vom abzudichtenden Druck abhängig. Der Druck beeinflusst die Schmierfilmdicke nur sekundär durch Verformung der Dichtelemente.

3.2.1 Stangendichtung

Ist der Schmierfilm h_a , den die Dichtung beim Ausfahren einer Stange aus dem Druckraum auf deren Oberfläche zurücklässt, dünner als der potentiell mögliche Schmierfilm h_e beim Einfahren, so ist die Dichtung dicht. Stangendichtungen werden deshalb mit asymmetrischer Pressungsverteilung ausgelegt, steil auf der Flüssigkeitsseite und flach auf der Luftseite, Bild 3.20 B, C, D.

In der modernen Dichtungstechnik werden noch drei prinzipiell unterschiedliche Bauformen von Stangendichtungen verwendet, Bild 3.21; Nutringe A, Kompaktringe B und vor allem Dichtkantenringe CK. Element D ist eine Variante von B mit einem O-Ring als Spannring, E und F sind Varianten von A mit verstärktem Rücken zur Vermeidung von Spaltextrusion. Die Elemente A-F bestehen aus Elastomeren (NBR, PU) unterschiedlicher Härte. Die Nutringvarianten G-I bestehen aus PTFE-Compounds mit einer Spannfeder aus Edelstahl.

Der heute für hochwertige Abdichtungen meist eingesetzte Dichtkantenring CK besteht vorzugsweise ebenfalls aus PTFE-Compound und hat einen Elastomer-Spannring C. Es gibt auch Dichtkantenringe aus hornartigem Polyurethan PU. Sie sind preisgünstiger, unempfindlicher, verschleiben weniger und lassen sich, weil sie elastisch sind, einfacher in geschlossene Nuten montieren.

Dafür haben sie eine wesentlich höhere Reibung und neigen zum Ruckgleiten (Stick-Slip). Dichtkantenringe widerstehen Drücken bis ca. 20 MPa. Sind höhere Drücke abzudichten, werden Mehrfachanordnungen (Tandem) eingesetzt, Bild 3.18. Der Druck wird dann kaskadenförmig abgebaut.

Bild 3.22 vermittelt einen Eindruck über die Profilvervielfalt von Hydraulikstangendichtungen, die auf den Grundformen A, B, CK und D in Bild 3.21 beruhen.

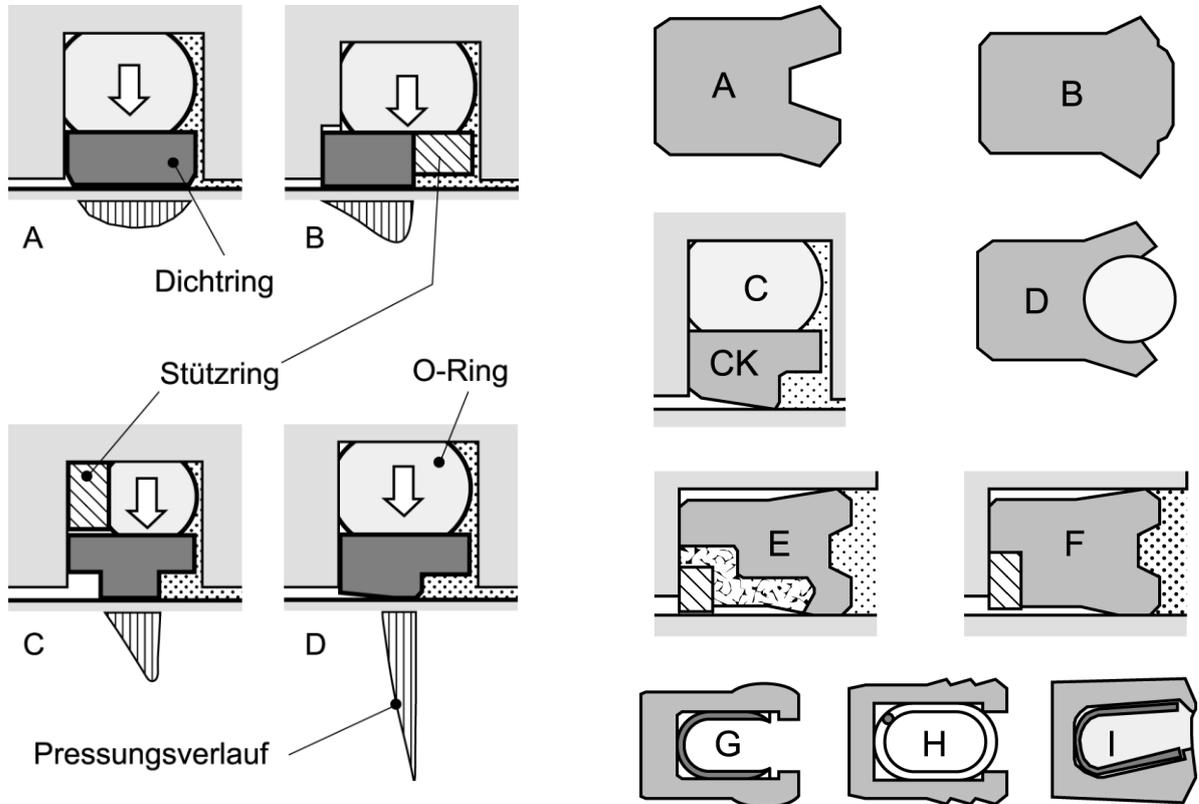


Bild 3.20: Pressungsverteilung abhängig von Geometrie und einwirkenden Kräften

Bild 3.21: Stangendichtung zur Abdichtung von Fluiden

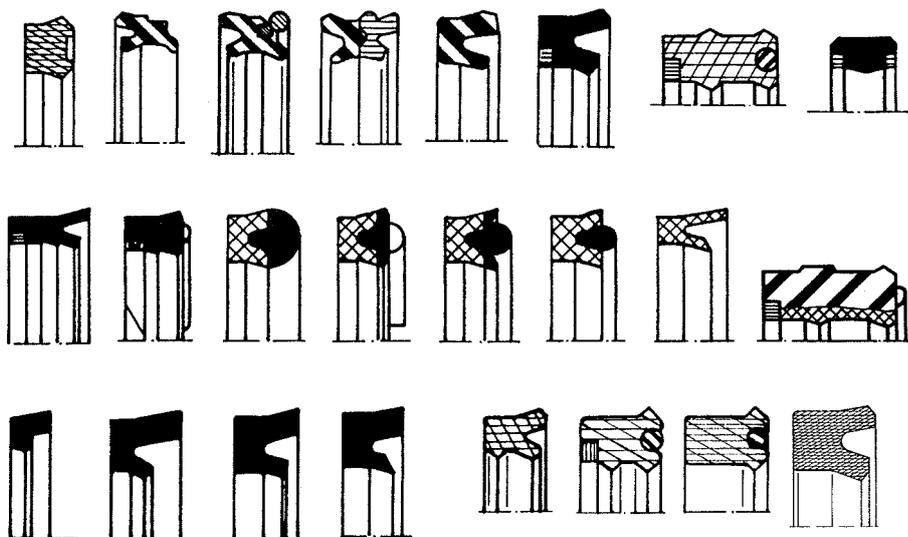


Bild 3.22: Profilvervielfalt von Stangendichtungen eines Herstellers

3.2.2 Kolbendichtungen

Nur einseitig druckbeaufschlagte Kolben werden wie Stangen abgedichtet. Kolbendichtungen für beidseitig druckbeaufschlagte Kolben werden mit symmetrischer Pressungsverteilung und flachem Pressungsgradient ausgelegt. Dies bewirkt einen dicken Schmierfilm und damit geringe Reibung. Eventuelle Leckage spielt keine Rolle, sie bleibt im System. Neben einer Vielzahl mehr oder minder günstiger Dichtsysteme werden in der modernen Dichtungstechnik nur noch zwei prinzipiell verschiedene Dichtsysteme verwendet, Bild 3.23; „Kompaktdichtungen“ ähnlich Variante A, und Systeme mit PTFE-Rechteckring B.

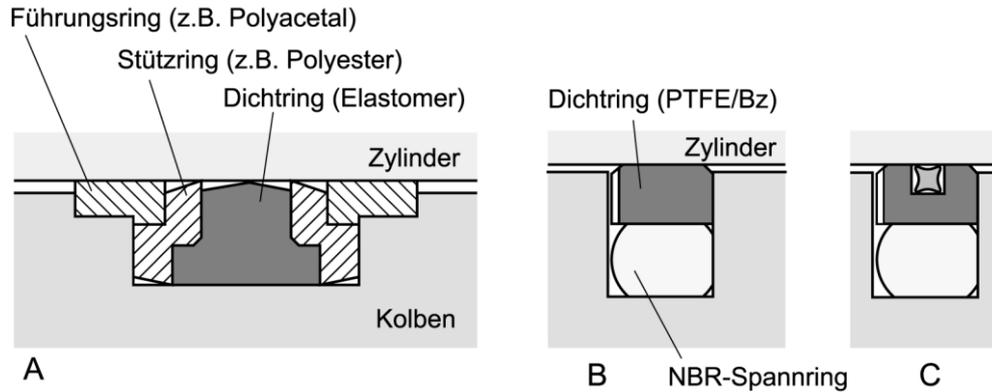


Bild 3.23: Moderne Kolbendichtungen

Kompaktdichtungen beinhalten maximal Führungs-, Stütz- und Dichtelemente. Für einfachere Anwendungen kann auf den Stützring verzichtet werden. Der Elastomerdichtring gewährleistet eine hohe Dichtqualität.

PTFE-Rechteckringe mit Elastomer-Spann- und Nebenabdichting sind einfache, kleine, preiswerte, reibungs- und verschleißarme Kolbendichtungen. Wird gute statische Dichttheit verlangt (Haltefunktion) werden Elastomer-Formdichtungen, z.B. ein X-Ring (Variante C in Bild 3.23) in den PTFE-Compound-Rechteckring eingelegt. Ein vielfach verwendetes PTFE-Compound in der Mineralöl-Hydraulik ist mit ca. 35% Bronzepulver gefülltes PTFE.

3.2.3 Abstreifer

Abstreifer, Bild 3.24, haben eine schwierige Aufgabe. Sie sollen Schmutz, Eis, Wasser usw. abstreifen, den Ölfilm aber durchlassen. Dazu darf der Pressungsanstieg nicht zu steil sein. Explizite Größen dafür sind nicht bekannt. Es gibt Elastomerabstreifer mit einer Lippe A und doppellippige B. Die nach innen gekehrte Lippe streift den von der Primärdichtung durchgelassenen Ölfilm zusätzlich ab. Variante C, ein Abstreifer aus PTFE-Compound, hat sogar zwei Ölabbstreifkanten.

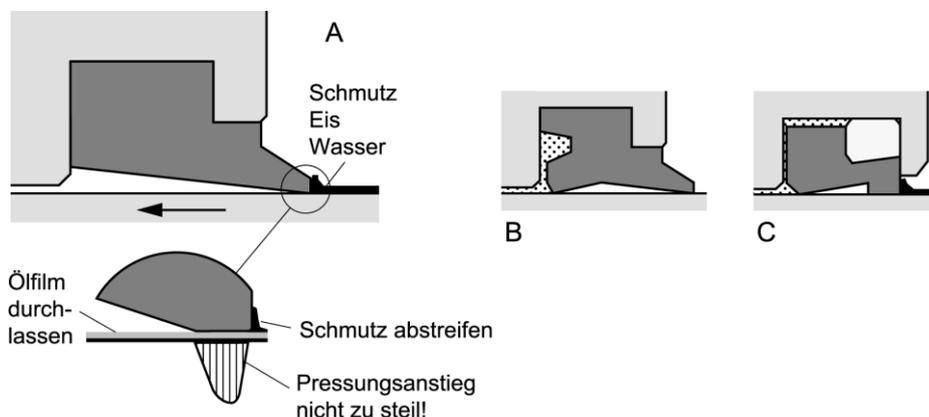


Bild 3.24: Abstreifer

3.2.4 Führungen und Schleppdruck

Kolben und Stangen müssen durch separate Elemente geführt werden, damit die Dichtelemente ihre Aufgabe „abdichten“ erfüllen können. Sie werden bezüglich Festigkeit ausgelegt wie Gleitlager (mittlere Flächenpressung, Gl. 18.38). Besondere Beachtung ist der Vermeidung von Schleppdruck zu widmen. Im Raum zwischen Führung und Dichtung baut sich durch die Bewegung ein hydrodynamischer Druck p_s auf, der ein Vielfaches des Systemdrucks p_1 betragen kann. Ursache ist die hydrodynamische Schleppströmung, Bild 3.25. Die Druckerhöhung berechnet sich zu

$$\Delta p = p_s - p_1 = \frac{6 \cdot \eta \cdot u \cdot l}{h^2} \quad (3.5)$$

Um dies zu vermeiden, müssen bei metallischen Führungen Rücklaufkanäle für Druckausgleich sorgen. Vorzugsweise werden die Rücklaufkanäle als Spiralnut mit einem drei mal größeren Querschnitt als die Spaltringfläche ausgeführt, Bild 3.25. Axiale Druckausgleichsbohrungen sollten vermieden werden. Beim Einsatz von Führungsbändern aus Kunststoff sind Rücklaufkanäle in Form der Stoßspalte bereits vorhanden, Bild 3.18. Sie müssen genügend groß gestaltet werden.

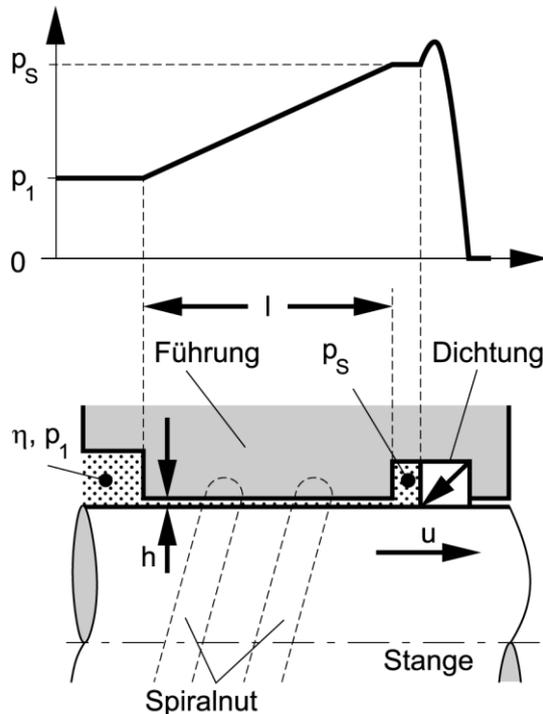


Bild 3.25: Schleppdruck

3.2.5 Oberflächen

Die Gleitflächen in hydraulischen Systemen sind meist hartverchromt und gehont. Die Rauheit kann Tabelle 3.1 entnommen werden.

Tabelle 3.1: Oberflächenrauheit in μm von Gegenaufläichen in der Hydraulik

Kennwert	Gegenaufläiche		Nutoberfläche
	PTFE-Compounds	Polyurethan Elastomere	
R_{max}	0,63 – 2,50	1,00 – 4,00	< 16,0
$R_z \text{ DIN}$	0,40 – 1,60	0,63 – 2,50	< 10,0
R_a	0,05 – 0,20	0,10 – 0,40	< 1,6

Wichtig: Der Materialanteil M_r sollte ca. 50 bis 70 % betragen, gemessen in einer Schnitttiefe $c = 0,25 \cdot R_z$, ausgehend von einer Bezugslinie von C_{ref} 5 %.

3.2.6 Pneumatikdichtungen

Abstreifer und Führungen in der Pneumatiktechnik haben die gleichen Aufgaben wie die in Hydraulikzylindern. Kolben- und vor allem Stangendichtungen haben eine besondere Aufgabe. Neben der Abdichtung von Luft müssen sie den meist nur initial aufgetragenen Schmierfilm möglichst lange erhalten. Deshalb sind die Dichtflächen mit flachen symmetrischen Pressungsverteilungen konstruiert, damit die Dichtung über den Schmierfilm hinweggleitet, ihn aber nicht abstreift. Zudem muss die Reibung gering gehalten werden. Dazu werden die Dichtungen nur wenig angepresst und spezielle Werkstoffe und Oberflächenbeschichtungen, z.B. Fließe, eingesetzt. Ist beispielsweise die Haftreibung zu groß fahren Pneumatikzylinder erst gar nicht los (so genannte Montagskrankheit). Durch das kompressible Druckfluid „Luft“ kommt es zu ungleichförmiger Bewegung und es steigt die Gefahr des Stick-Slip extrem an.

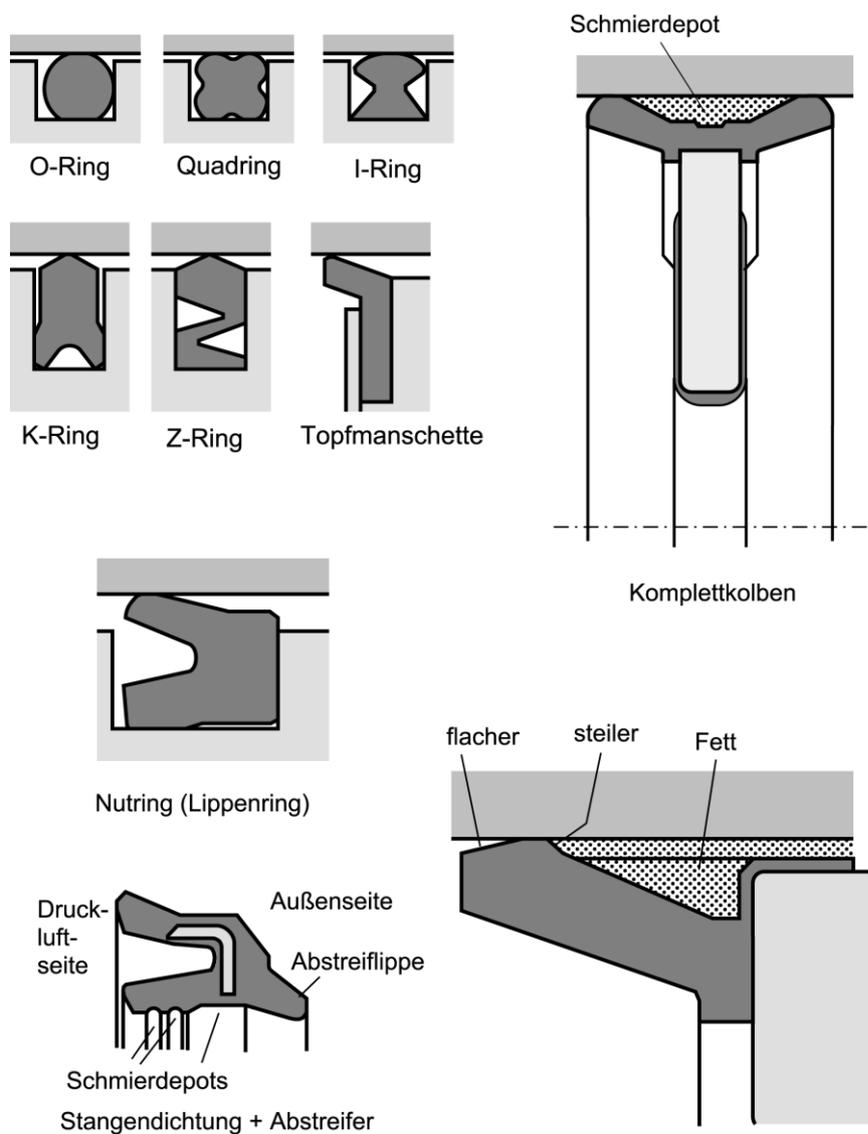


Bild 3.26: Elastomer-Pneumatikdichtungen

4 Berührungsfreie Dichtungen

Definition: Eine Dichtung wird dann als „Berührungsfreie Dichtung“ bezeichnet, wenn die beiden dichtspaltbildenden Teile mit und ohne Bewegung und ohne Hilfsenergie dauerhaft durch einen endlichen Spalt voneinander getrennt sind.

Dies unterscheidet die „Berührungsfreien Dichtungen“ von den Berührungsdichtungen, die entweder durch hydrodynamische Spaltbildung bei höherer Gleitgeschwindigkeit oder durch hydrostatischen Druck ebenfalls berührungsfrei laufen – z.B. Gleitringdichtungen oder Radialwellendichtringe – oder bei denen durch Fliehkraftwirkung die Berührung der Gleitdichtflächen bei höherer Umfangsgeschwindigkeit aufgehoben wird (Beispiel: V-Ring Bild 3.3).

4.1 Eigenschaften und Einteilung

Bei berührungsfreien Dichtungen gibt es keine Berührung und keine Reibung zwischen festen Körpern.

Vorteile:

- keine Reibung oder nur Flüssigkeitsreibung bei relativ großer Spalthöhe
- keine Schmierung notwendig, dadurch keine Einschränkung bezüglich Schmierstoff und zulässiger Schmierstofftemperatur, keine Schmierungskosten, keine Verunreinigung des Betriebsmittels und keine Wartung
- kein Heißlaufen
- kein Verschleiß
- keine Veränderung der Dichtwirkung
- kein Nachstellen notwendig
- kein Wärmeaustausch durch Wärmeleitung zwischen den Teilen
- keine Temperaturbeschränkung
- keine Beschränkung der Relativgeschwindigkeit
- keine Werkstoffeinschränkung

Nachteile:

- meist nicht vollständig dicht
- selten als handelsübliches Element erhältlich

In Bild 4.1 sind berührungsfreie Dichtungen systematisch eingeteilt. Sonderstellungen nehmen die Fanglabyrinthdichtung – die zu den Schutzdichtungen gezählt wird, aber eigentlich sind Schutzdichtungen Untermengen der Fanglabyrinthdichtung – und die Sperrluftdichtung – die ebenfalls zu den Schutzdichtungen gezählt wird, obwohl sie systematisch zu den Sperrdichtungen gehört – ein.

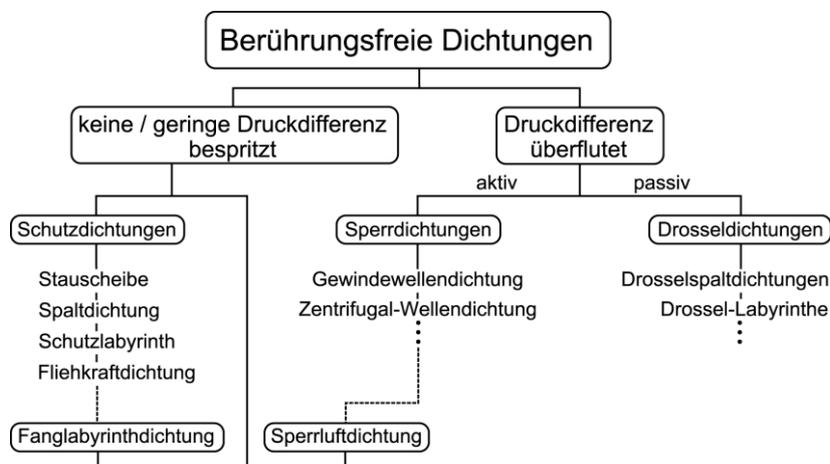


Bild 4.1: Systematische Einteilung berührungsfreier Dichtungen

4.2 Berührungsfreie Schutzdichtungen

Berührungsfreie Schutzdichtungen haben dieselben Aufgaben wie die in Kap. 3.1.1 beschriebenen berührenden Schutzdichtungen. Es sind definitionsgemäß Wellendichtungen und sollen Lagerstellen vor Umwelteinflüssen (Schmutz, Spritzwasser) schützen sowie den Schmierstoff (Fett, Öl) im Lager halten.

Bild 4.2 zeigt die vier klassischen Arten von Schutzdichtungen A-C. A und B eignen sich zur Rückhaltung von Fett und fettgefüllt zum Schutz des Lagers gegen Staub und leichten Schmutzanfall, D ausschließlich zur Fettrückhaltung und abweisen von grobem Schmutz. Mit Fliehkraftdichtungen C ist es auch möglich, wenig mit geringer Energie anspritzende Flüssigkeit abzudichten. Richtig gestaltete und vorteilhaft kombinierte Fliehkraftdichtungen ähneln Fanglabrynthdichtungen mit denen auch Lagerstellen mit sehr starker Flüssigkeitsbespritzung abdichtbar sind.

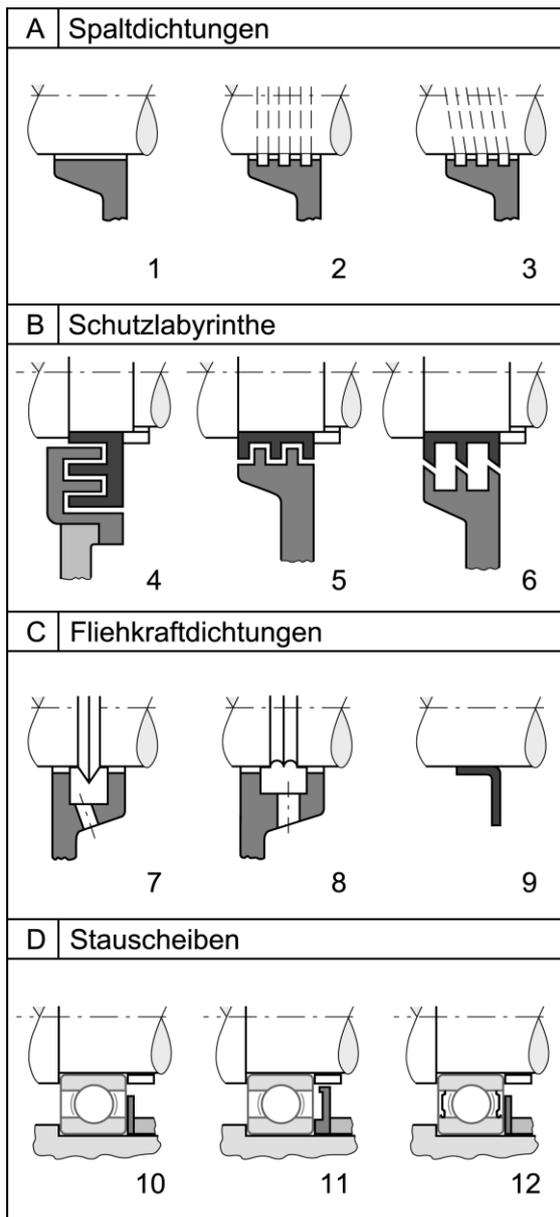


Bild 4.2: Prinzipielle Darstellung der Schutzdichtungen

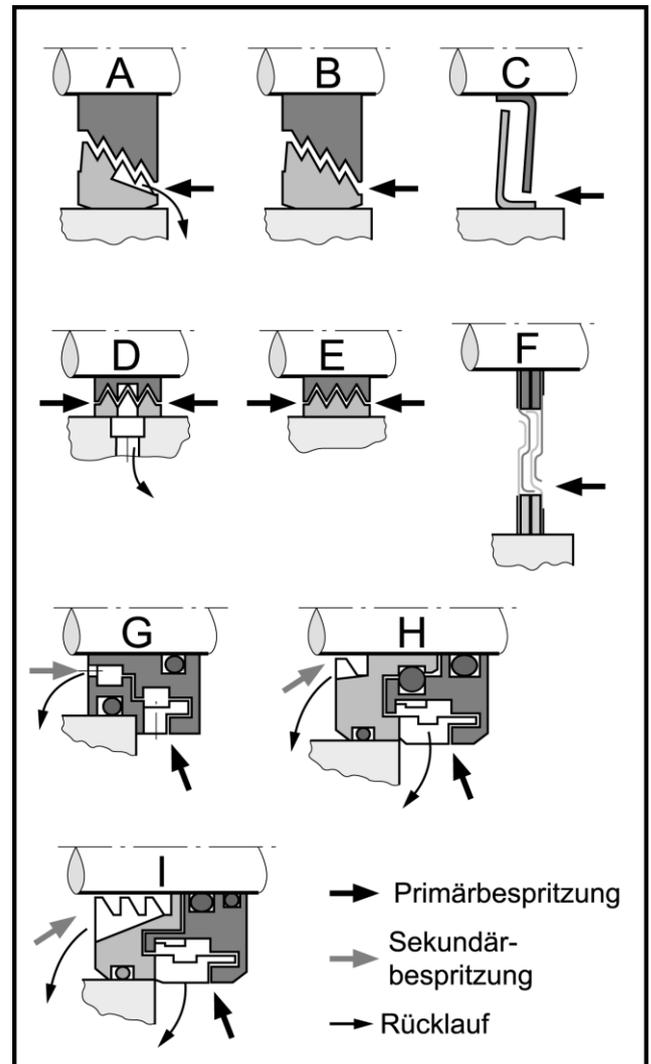


Bild 4.3: Einige handelsübliche berührungsfreie Wellendichtelemente

Die in Bild 4.3 dargestellten handelsüblichen Schutzdichtungen eignen sich wie Fliehkraftdichtungen je nach Ausprägung für mehr oder weniger mäßige Flüssigkeitsbespritzung. Dichtungen mit internem Flüssigkeitsrücklauf wie beispielsweise das Element D funktionieren generell viel besser als solche ohne.

4.2.1 Fanglabyrinth-Dichtung

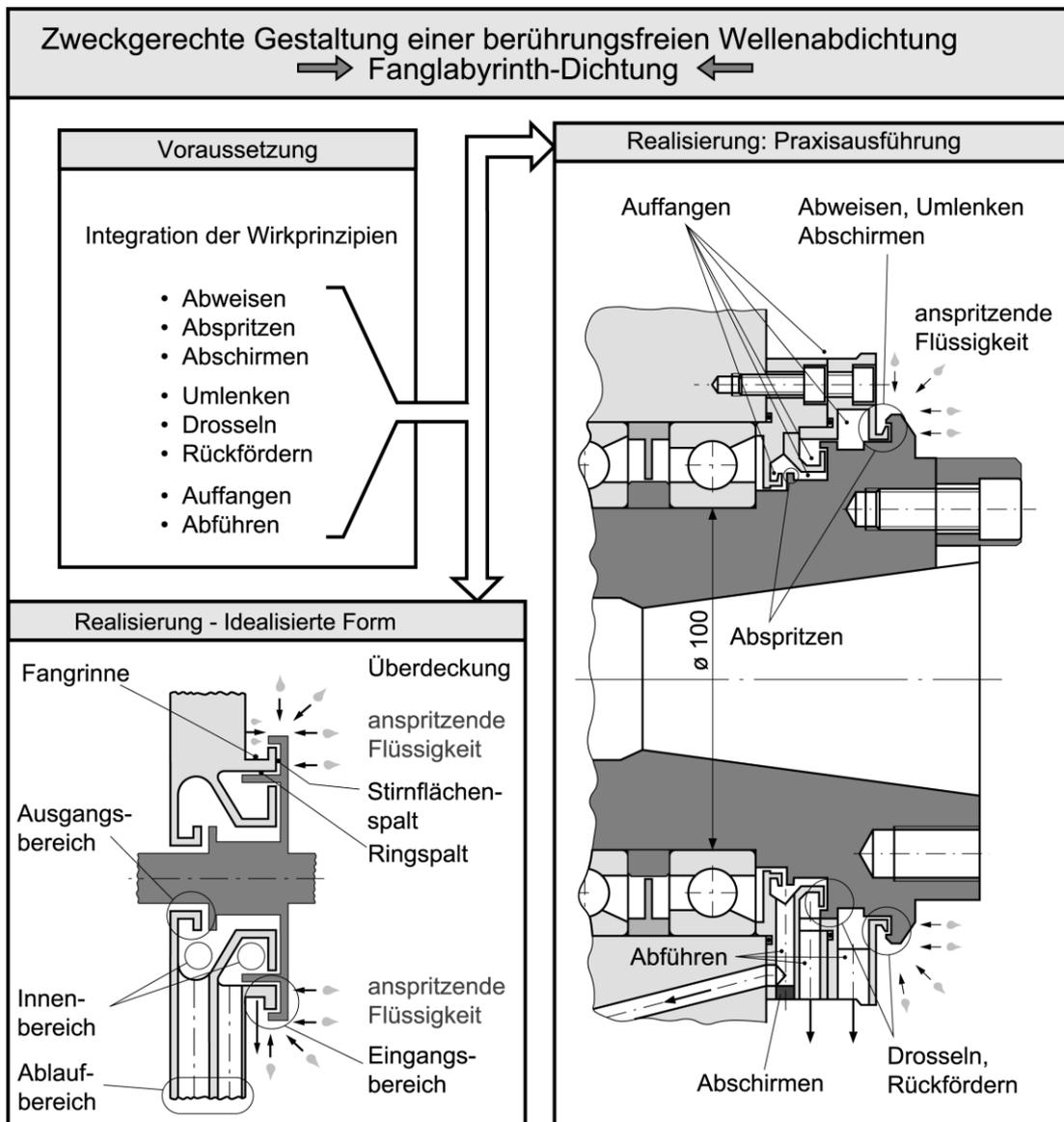


Bild 4.4: Gestaltung einer Fanglabyrinth-Dichtung. Realisierung der Gesamtfunktion – anspritzende Flüssigkeit berührungsfrei abdichten – durch Integrieren von acht Wirkprinzipien (Grundfunktionen)

Sind flüssigkeitsbespritzte oder schwallartig überflutete Dichtstellen sowohl statisch als auch dynamisch bis zu höchster Umfangsgeschwindigkeit optimal berührungsfrei abzudichten, so sind im wesentlichen acht Wirkprinzipien (Grundfunktionen) – Abweisen, Abspritzen, Abschirmen, Umlenken, Drosseln, Rückfördern, Auffangen, Abführen – in das Dichtsystem zu integrieren, Bild 4.4. Eine problemgerecht gestaltete Fanglabyrinth-Dichtung ist „technisch dicht“, solange sie nicht andauernd überflutet ist. Technische Dichtheit bedeutet hier, dass am Ausgangsspalt der Dichtung keine Flüssigkeit abtropft oder gar ausströmt. Bild 4.4 zeigt als Praxisausführung die Abdichtung einer fettgeschmierten Werkzeugmaschinenspindel gegen eindringenden Kühlschmierstoff. Zur Fettrückhaltung genügt eine günstig gestaltete Stauscheibe. Fanglabyrinth-Dichtungen sind selbst zu konstruieren und in das Gesamtsystem zu integrieren.

4.2.2 Sperrluftdichtung

Bei Sperrluftdichtungen ist Luft unter Druck das Dichtmittel. Zwischen zwei enge Spalte L_1 und L_2 wird über eine Ringnut Luft oder ein anderes Gas unter Druck eingeleitet, Bild 4.5. An der Einleitungsstelle baut sich ein Druck p_0 auf und die Luft strömt durch die Spalte ab. Dabei sinkt der stati-

sche Druck der Luft im Spalt auf den Umgebungsdruck am Spaltende. Wird nun ein Spaltende mit Flüssigkeit beaufschlagt und damit für die durchströmende Luft zumindest teilweise verschlossen, so dringt die Flüssigkeit nur so weit in den Spalt vor, bis der jeweilige örtliche Luftdruck im Spalt gleich dem dortigen Flüssigkeitsdruck ist.

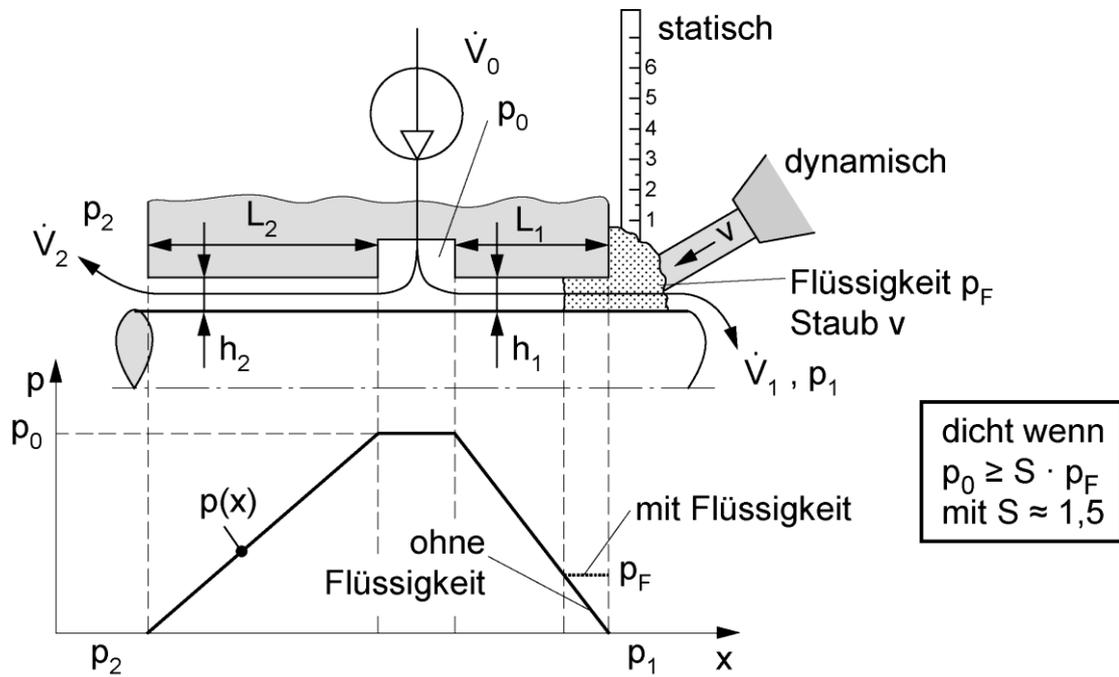


Bild 4.5: Sperrluftdichtung – Prinzip

Sperrluftdichtungen eignen sich auch ausgezeichnet um Stäube zurückzuhalten. Der durch einen Parallelspalt fließende Sperrluftstrom kann nach Gleichung (4.4) berechnet werden. Geringen notwendigen Sperrluftdruck und damit auch –verbrauch erreicht man durch niedrigen Flüssigkeitsdruck p_F , geringe Staub- oder Flüssigkeitsgeschwindigkeit v und niedrige Spalthöhen h , da diese mit h^3 den Durchfluss beeinflussen. Bild 4.6 zeigt einen dafür günstig gestalteten Eingangsbereich. Dieser verhindert zuverlässig, dass schnelle Flüssigkeitsstrahlen oder Staubteilchen die Sperrluftdichtung direkt treffen können. Die Spalthöhe h in Sperrluftdichtungen sollte im Bereich $0,03...0,06...0,1$ mm liegen, der Druck p_0 im Bereich $20...50$ hPa.

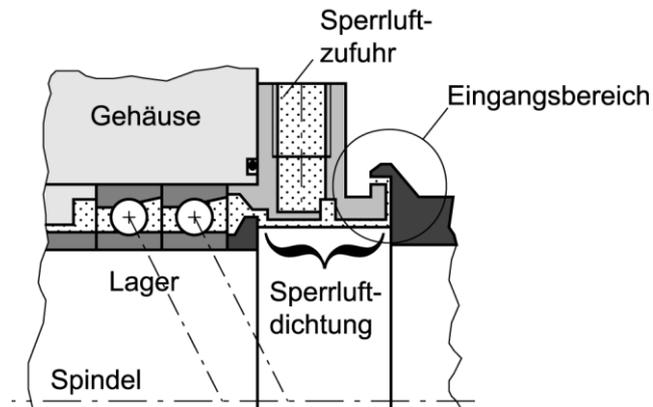


Bild 4.6: Sperrluftdichtsystem

4.3 Drossel- und Sperrdichtungen

Fluide, also Flüssigkeiten und Gase, die die Dichtstelle überfluten und unter Überdruck stehen, können durch spezielle berührungsfreie Dichtungen, nämlich den Drossel- und Sperrdichtungen, abgedichtet werden. Bei Drosseldichtungen wird in Strömungsrichtung (Spaltlängsrichtung) vorhandene gerichtete kinetische Energie mittels viskoser Reibung und/oder Verwirbelung in Wärmeenergie umgewandelt. Bei den Sperrdichtungen hingegen wird gegen den abzudichtenden Druck ein „Gegendruck“ aufgebaut.

4.3.1 Drosseldichtungen

Drosseldichtungen weisen vergleichsweise große Leckströme auf. Dies ist z.B. bei industriellen Gas-, Dampf- oder Wasserkraftmaschinen unproblematisch, solange nicht der Wirkungsgrad erheblich beeinflusst wird. Bild 4.7 zeigt die wesentlichsten Ausführungsformen und deren vorzugsweise Eignung für bestimmte Einsatzparameter.

Spaltdichtungen Bild 4.7 – 1 bis 6 sind berührungsfreie Dichtungen mit glattem Durchgangsspalt. Vorzugsweise werden Spaltdichtungen zur Abdichtung inkompressibler Fluide, also von Flüssigkeiten, bei laminarer Spaltströmung verwendet. Bei gegebener Länge des Strömungskanals (Spaltlänge) hat der enge, laminar durchströmte Spalt den größten Strömungswiderstand und damit bei gegebener Druckdifferenz den geringsten Leckstrom.

Labyrinthdichtungen Bild 4.7 – 9, 12 und **Labyrinthspaltdichtungen** 7, 8, 10, 11, 13 werden vorzugsweise angewendet, um Gasströme bei turbulenter Strömung zu drosseln. In den engen Drosselstellen wird das Fluid polytrop beschleunigt. Dadurch fällt der Druck ab. Anschließend wird in der weiten Kammer die gerichtete Strömungsenergie durch Verwirbelung bei konstantem Druck in ungerichtete Bewegung – also Wärme – umgewandelt. Je mehr Drosselstellen umso besser die Dichtwirkung. Der Massenstrom \dot{m} wird immer geringer, da der Druckabfall Δp an jeder Drosselstelle immer geringer wird. Konvergente Spalte (2, 3, 15 in Bild 4.7) oder Druckeinspeisung (6) führt bei beweglichen Dichtringen zu einer Selbsteinstellung der Spalte. Bei hohen Drücken wird der Druckabbau auf mehrere kurze schwimmende Drosseln (3) aufgeteilt.

Berechnung:

Bei der Berechnung des Leckagestroms einer Drosseldichtung ist zwischen laminarer und turbulenter Strömung sowie zwischen kompressiblem und inkompressiblem Fluid zu unterscheiden. So vielfältig die Formen der Spalte, Labyrinth, Labyrinthspalte und die Betriebsbedingungen sind, so vielfältig sind die in der Literatur beschriebenen speziellen Berechnungsgänge.

Es werden folgende allgemeine Berechnungsansätze verwendet:

$$\text{Für inkompressibles Fluid:} \quad \dot{m} = \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \quad (4.1)$$

$$\text{Für kompressibles Fluid:} \quad \dot{m} = \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} \quad (4.2)$$

Dabei ist, Bild 4.8, \dot{m} der Durchfluss bzw. Massenstrom durch die Drosseldichtung, $\Delta p = p_1 - p_2$ die Druckdifferenz, ρ die Dichte der Flüssigkeit, p_1 der Absolutdruck und ρ_1 die Dichte des Gases im abzudichtenden Raum, p_2 der Absolutdruck nach der Drosseldichtung, A der freie Durchströmquerschnitt und ε die meist empirisch zu ermittelnde Labyrinthkennzahl.

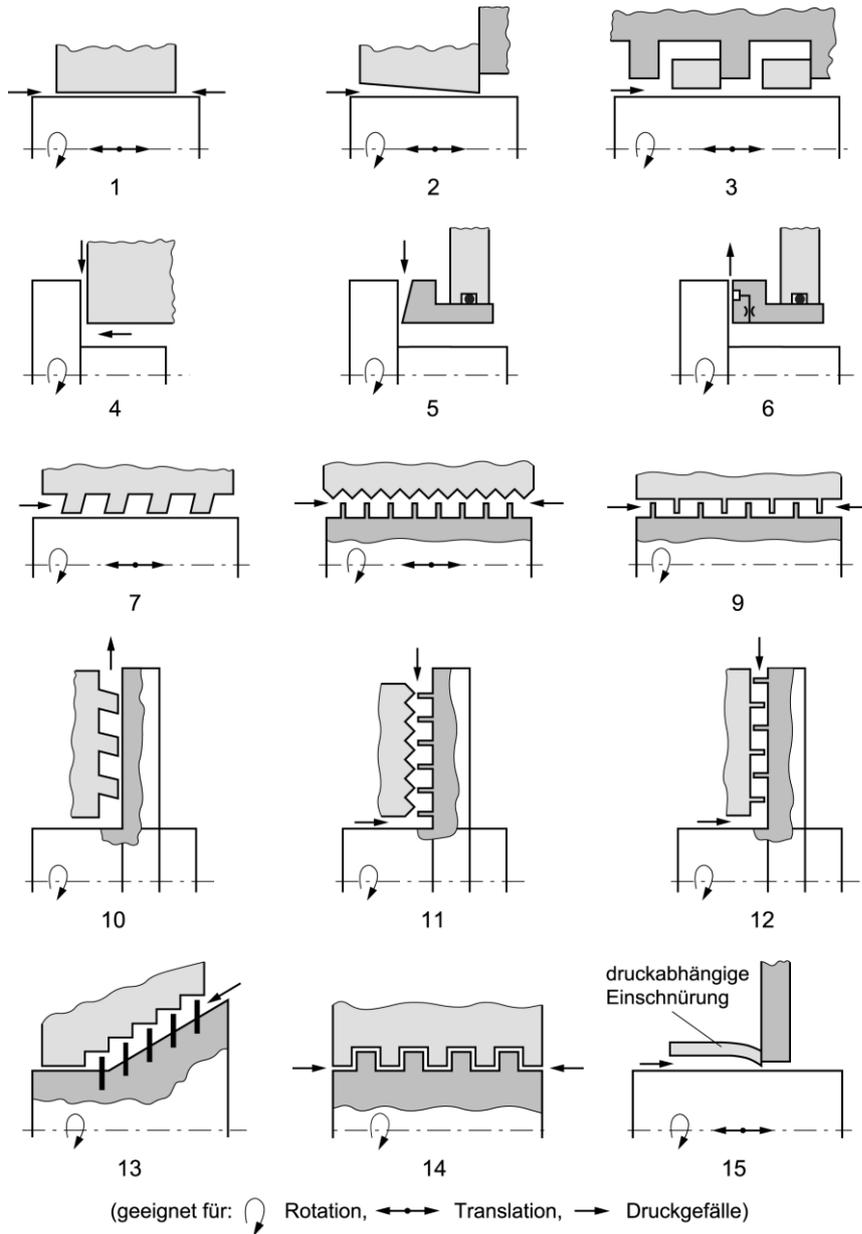


Bild 4.7: Schematische Darstellung berührungsfreier Drosseldichtungen

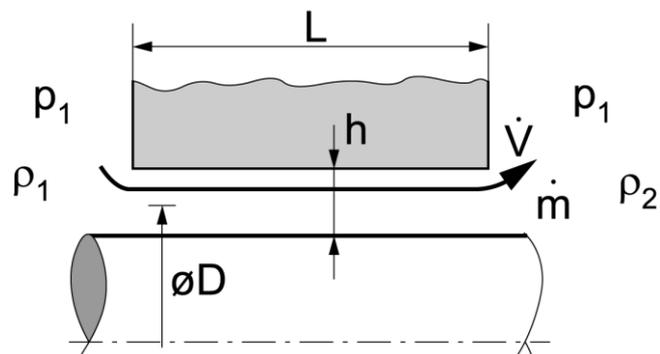


Bild 4.8: Bezeichnungen am Drosselspalt

In der Labyrinthkennzahl ε , auch Ausflusszahl genannt, sind alle den Massenstrom beeinflussenden Größen zusammengefasst. Das sind z.B. das Druckverhältnis p_1/p_2 , die Rohrreibungszahl λ , die Spalllänge L , die Spaltweite h , der Polytropen- oder Isentropenexponent κ , die Kammerzahl z , Formparameter bei der Labyrinth- und Labyrinthspaltdichtung, die Betriebsbewegungen (Rotation/Translation) und andere mehr. Für einfache Fälle lässt sich ε errechnen. Meist ist man jedoch auf empirisch gewonnene Werte angewiesen.

Bei engen, glatten, zentrischen Parallelspalten und laminarer Strömung kann der Durchfluss mittels der physikalisch begründeten Formeln nach Reynolds – Reynoldsgleichungen – relativ genau abgeschätzt werden, Bild 4.8.

Für inkompressibles Fluid:
$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot D \cdot \Delta p}{12 \cdot \eta \cdot L} \cdot h^3 \quad (4.3)$$

Für kompressibles Fluid:
$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot D \cdot \Delta p}{12 \cdot \eta \cdot L} \cdot h^3 \cdot \frac{p_1 + p_2}{2 \cdot p_2} \quad (4.4)$$

Beispiel:

Für einen luftabdichtenden Spalt mit $D = 100 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ mm}$, $h = 0,1 \text{ mm}$, $p_1 = 0,11 \text{ MPa}$, $p_2 = 0,1 \text{ MPa}$ und $\eta_{\text{Luft}} = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ beträgt nach Gleichung (4.4) der Durchfluss $\dot{V} = 90,1 \text{ l/min}$. Wäre der Spalt nur halb so hoch ($h = 0,05 \text{ mm}$) betrüge der Durchfluss $1/8$ also $\dot{V} = 11,27 \text{ l/min}$ und wäre bei $h = 0,1 \text{ mm}$ Wasser ($\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) anstatt Luft abzudichten betrüge der Durchfluss nach Gleichung (4.3) $\dot{V} = 1,57 \text{ l/min}$ und bei $h = 0,05 \text{ mm}$ gerade noch $\dot{V} = 0,20 \text{ l/min}$.

4.3.2 Sperrdichtungen

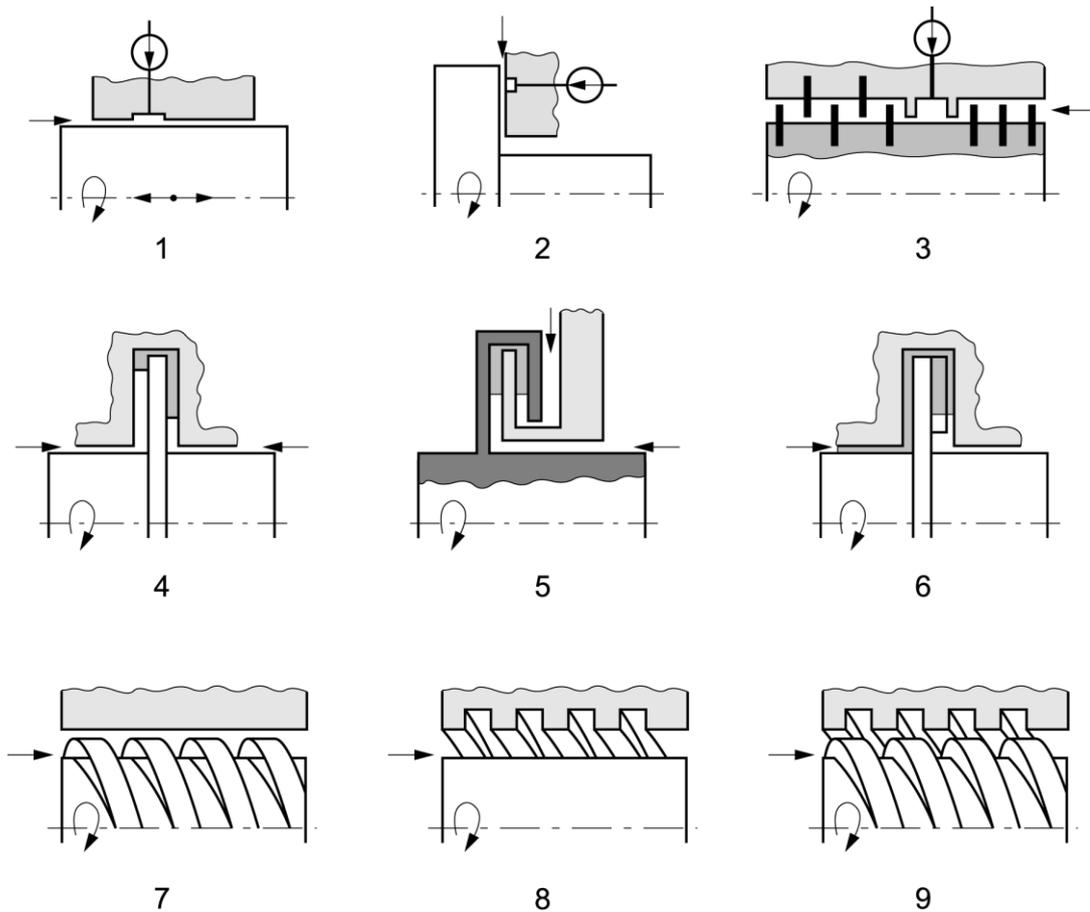
Charakteristisch für diese Gruppe, Bild 4.9, ist ein Sperrfluid. Das Sperrfluid kann das abzudichtende Fluid selbst oder ein Fremdfluid sein. Meist ist das Sperrfluid eine Flüssigkeit, seltener ein Gas. Da Sperrdichtungen in ihrem Auslegungsbereich meist vollkommen abdichten (abgesehen von Diffusionsverlusten), eignen sie sich besonders gut für den Einsatz in Maschinen, die mit giftigen Betriebsmitteln oder mit Vakuum arbeiten.

In flüssigkeitsgesperrten **Drosseldichtungen**, Bild 4.9 – 1 bis 3, wird die Sperrflüssigkeit aktiv von außen in den Dichtspalt gedrückt und verwehrt somit dem abzudichtenden Fluid den Durchtritt. Es gibt auch gasgesperrte Drosseldichtungen. Sie funktionieren genauso. Prinzipiell gehört die vorher ausführlich beschriebene Sperrluftdichtung auch zu den gasgesperrten Drosseldichtungen.

Bei **Zentrifugal-Wellendichtungen** wird der Sperrdruck durch die Fliehkraft in der Dichtung selbst erzeugt. Die Flüssigkeit wird durch Reibung mitgenommen. Im rotierenden Flüssigkeitsring entsteht durch Fliehkraft eine Druckbarriere gegen den Druck des abzudichtenden Fluids. Die Sperrflüssigkeit kann das abzudichtende Fluid selbst sein, Bild 4.9 – 6. Zur Abdichtung von Gasen, Bild 4.9 – 4 und 5, wird eine separate Sperrflüssigkeit eingefüllt. Ausgeführte Spalthöhen liegen zwischen einigen zehntel Millimetern und einigen Millimetern.

In der **Gewindewellendichtung** wird der Sperrdruck an der Dichtstelle durch den axialen Förder effekt eines Gewindes, also durch Rückfördern, erzeugt. Das Gewinde kann sich auf der Welle oder im Gehäuse befinden. Auch eine beidseitige Anordnung gegenläufiger Gewinde ist möglich, Bild 4.9 – 7 bis 9. Je zäher das Fluid und je enger der Spalt, umso besser die Dichtwirkung. Günstige Spalthöhen betragen $h = 0,02 \dots 0,05 \dots 0,15 \text{ mm}$. Die Gewindetiefe beträgt dabei $0,05 \dots 0,15 \text{ mm}$. Um günstig zu wirken muss die Tiefe von Förderstrukturen in Spalten in der Größenordnung der Spalthöhe liegen.

Sowohl Zentrifugal als auch Gewindewellendichtungen sind erst bei höherer Drehzahl dicht. Sie benötigen also eine zusätzliche „Stillstandsichtung“ die gegebenenfalls bei höherer Drehzahl abhebt. In der Pumpe in Bild 1 ist dies durch eine „abhebende Gleitringdichtung“ (8) realisiert. Danach übernimmt die sich hinter dem Laufrad befindliche Zentrifugal-Wellendichtung (6) die Abdichtung.



(geeignet für: ↻ Rotation, ↔ Translation, → Druckgefälle)

Bild 4.9: Schematische Darstellung berührungsfreier Sperrdichtungen

5 Literaturverzeichnis

- /1/ Haas, W.: Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fanglabyrinth, Habilitationsschrift, Stuttgart 1997.
- /2/ Müller, H.K.: Dichtungstechnik, Abdichtung bewegter Maschinenteile, Kurzfassung, Medienverlag U. Müller, Waiblingen 1995. – Vorlesungsmanuskript zur Vorlesung „Dichtungstechnik“ von Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas.
- /3/ Müller, H.K.: Abdichtung bewegter Maschinenteile, Medienverlag U. Müller, Waiblingen 1995 - vergriffen.
- /4/ Müller, H.K.; Nau, B.S.: Fluid sealing technology principles and applications, Marcel Dekker, Inc., New York 1998.
- /5/ Schmid, E.: Handbuch der Dichtungstechnik, Expert Verlag Grafenau 1981.
- /6/ Tietze, W.: Handbuch Dichtungspraxis, Vulkan-Verlag Essen 2003.
- /7/ Trutnovsky, K.; Komotori, K.: Berührungsfreie Dichtungen, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1981.
- /8/ Müller, H.K.; Nau, B.S.: <http://www.fachwissen-dichtungstechnik.de>.