



Probleme durch Schleppströmung in Kolbenführungen und -dichtungen.

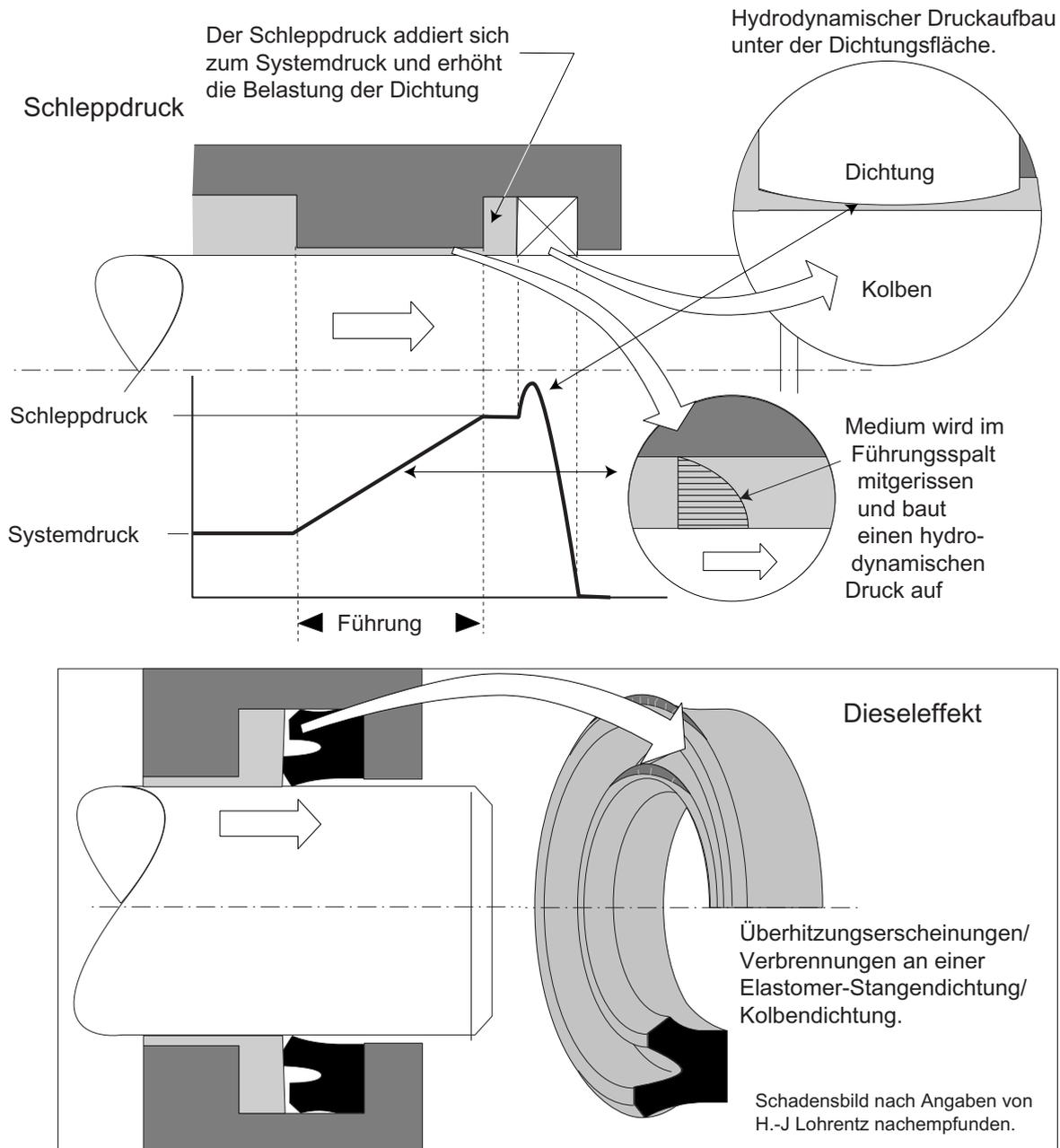


Bild 6.10.2.4-1

**Bild 6.10.2.4-1** (Lit. 6.10.2.4-1 und Lit. 6.10.2.4-7): Um eine gleichmäßige Anlage der Dichtung am gesamten Umfang zu gewährleisten, wird gewöhnlich eine zusätzliche **Führung der Axialbewegung** benötigt. Das erfordert einen **engen**

**Schmierspalt**. Darin unterliegt der Schmierfilm trotz Axialbewegung (**Schleppströmung**) einem **Gleitlager vergleichbaren Bedingungen** (Bild 6.3.2-1). Diese beruhen auf einem **hydrodynamischen Druck** (Schleppdruck) durch Reibungs- und Scherkräfte unter den Relativ-

## Maschinenelemente: Gleitende Dichtungen: Kolben-Stangendichtungen

bewegungen im Schmierspalt (Detail Mitte). **Ähnlich einem Gleitlager** baut hier jedoch die Axialbewegung den Druck auf ('**Axialschiebgleitlager**'). Man spricht auch von einer '**Viskositätspumpe**'. Weil die Axialbewegung gewöhnlich oszillierend ist, wird ein Teil des Öls bei der Rückbewegung wieder abgeführt. So kommt es zu einem eher verzögerten Druckaufbau vor der Dichtung. Er kann ein **Mehrfaches des Systemdrucks/Nennendrucks** im relativ großen Raum vor der Dichtung erreichen. **Unter der Dichtlippe** ist auf Grund der Ausbildung des **Profils** (keilförmig, Detail oben rechts) ein weiterer Druckanstieg zu erkennen.

Werden diese Drücke an der Dichtung (Diagramm) vom Konstrukteur bei der **Auslegung** nicht in allen Konsequenzen berücksichtigt, besteht die Gefahr für mehrere **Schadensmechanismen**.

**Überlastung** bis zur Zerstörung der Dichtung durch Axialkräfte aus Flächen- und Druckdifferenz. Typisch ist eine **Spaltextrusion** bei der Teile der Dichtlippe (Bild 6.10.2.4-6) bzw. des Dichtbereichs (O-Ringe, Bild 6.10.1.2-6) in den Dichtspalt treten. Der Anstieg des Anpressdrucks auf die Dichtlippe führt hier zu entsprechend hohen Reibkräften. Sie stehen gegebenenfalls im Zusammenhang mit einer **Unterbrechung des Schmierfilms**. Die Folge ist erhöhter **Verschleiß** und **Energieaufwand** für die Betätigung. Die Folge bei **Pumpen** ist eine höhere **Antriebsleistung** und kleinere **nutzbare Kräfte** von Hydraulikkolben. Der hohe Flüssigkeitsdruck auf den Dichtring unterstützt die **Diffusion gelöster Luft mit Blasenbildung im Polymer** (Bild 6.10.2.4-3 „H“).

Um einen gefährlich hohen Druck vor der Dichtung zu vermeiden, wird ein Druckabbau über **Entlastungskanäle** in der Zylinderwand erreicht. Dazu eignet sich eine Spiralnut mit deutlich (ca. 3 x) größerem Querschnitt als die Ringfläche des Führungsspalts.

Ein weiteres Problem ist das erhöhte Risiko eines zerstörend starken **Dieseleffekts** (Bild 6.10.2.4-3). Es kommt zu **Überhitzungen mit**

**Versprödung und Rissbildung** (Rahmen unten).

Die Wahrscheinlichkeit von Schäden durch **Strömungserosion** (Bild 6.10.2.4-4) steigt mit dem Druck ebenfalls. Beim **Druckabbau in der Strömung nach der Dichtung** kann es durch **Luftbläschen** die sich aus der gelösten Luft bilden zu **Erosion** sowohl am **Polymerwerkstoff** der Dichtung selbst als auch an **metallischen Oberflächen** (Gleitflächen, Bild 6.10.2.4-2 „F“) kommen.

**Bild 6.10.2.4-2, Bild 6.10.2.4-3, Bild 6.10.2.4-4, Bild 6.10.2.4-5 und Bild 6.10.2.4-6** (Lit. 6.10.2.4-1 und Lit. 6.10.2.4-7): Verschleiß wird in Hydraulikdichtungen auf unterschiedliche Mechanismen zurückgeführt. Sie **an makroskopischen Schadensbildern zu identifizieren** erfordert Fachwissen und Erfahrung. Die abstrahierten Darstellungen beschränken sich auf charakteristische Besonderheiten ohne den Anspruch auf Detailtreue.

Ein gewisser **Verschleiß** ist an den Lippen von Dichtungen **unvermeidlich**. Er muss über die **Auslegungslebensdauer** akzeptabel bleiben. Hier ist anwendungsspezifische Erfahrung notwendig. Man denke nur an den Einfluss der **Wartungshäufigkeit**. Eine befriedigende **Verschleiß/Lebensdauerberechnung** ist bei dem **komplexen Tribosystem** (Band 1 Bild 5.9.1-1) das im **Mischreibungsbereich** arbeitet kaum zu erwarten. Neben normalem reibungsbedingtem Verschleiß sind weitere Mechanismen einzubeziehen:

- **Fressen** (Band 1 Kapitel 5.9.2).
- **Ermüdung** (Bild 6.3.1.1-6).
- **Korrosion** (Band 1 Bild 5.6.1-2 und Bild 5.6.1-3).
- **Abrasion durch Schädigungsprodukte und Fremdpartikel**.

Erschwerend ist, wenn diese **Einflüsse interagieren** womit zu rechnen ist. Ohne produkt-spezifische **Erfahrung**, gepaart mit betriebs-

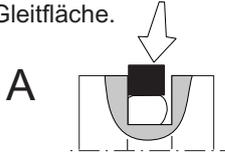
Fortsetzung Seite 6.10.2.4-5

## Schäden an hydraulischen Kolben- und Stangendichtungen.

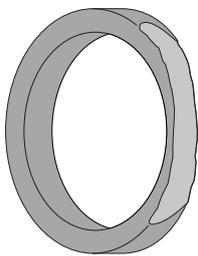
Bildern Lit. Lit. 6.10.2.3.2-7 nachempfunden.

### Abrasionsverschleiß

An einem Gleitring aus gefülltem PTFE durch eine zu raue Gleitfläche.



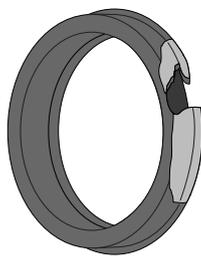
A



An einem Polymer-Dichtring durch örtlich konzentrierte Axialriefen.

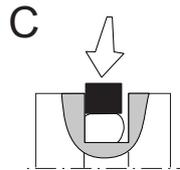


B

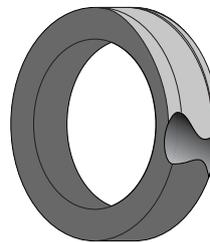


### Erosionsverschleiß

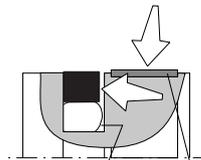
Strömungverschleiß an einem Kolbenring



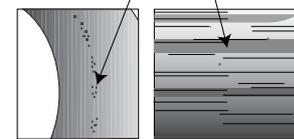
C



Eingebettete Fremdkörper

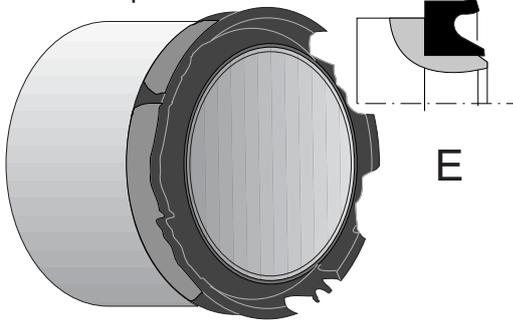


D



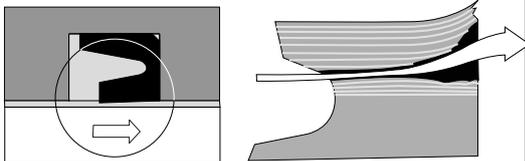
Ringförmig angeordnete Partikel.  
Axial orientierte Riefen enden zum Teil an ursächlichen Partikeln.

Zerstörung durch metallische Fremdkörper



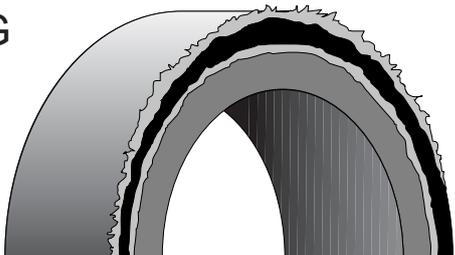
E

Aufsprengen durch expandierende Luft

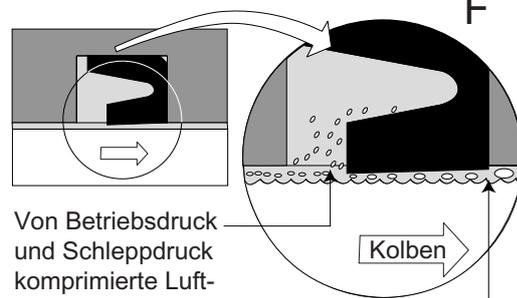


Schaden am Rücken einer Dichtung

G



Selbstverstärkende Luftblasenerosion



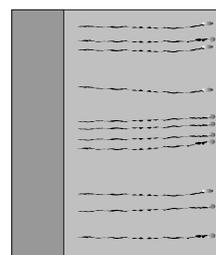
F

Von Betriebsdruck und Schleppdruck komprimierte Luftbläschen.

Kolben

Explosionsartige Expansion der Luftbläschen im druckentlasteten Bereich erzeugt Erosionsriefen.

Schadensbild auf der Dichtungsgleitfläche



Schadensbild auf der Kolbenführung.



Bild 6.10.2.4-2

## Maschinenelemente: Gleitende Dichtungen: Kolben-Stangendichtungen

Fortsetzung von Seite 6.10.2.4-3

relevanter **Erprobung/Nachweisen** wird es also kaum gehen.

**Abrasionsverschleiß** (Abriebverschleiß, „A“ und „B“): Ist die **Gleitfläche** (Begriffsbestimmung Seite 6.10.2.4-1) nicht ausreichend glatt (poliert), lässt sich diese Verschleißform in erster Linie auf die **Rauigkeit** (Topografie) zurückführen. Damit ist im Falle eines Schadens das **gesamte Tribosystem** (Band 1 Bild 5.9.1-1) zu betrachten und nicht nur die offensichtlich geschädigte Komponente.

Gewöhnlich ist die Dichtfläche bei **fertigungs-erzeugten** Rauigkeiten der Gleitfläche auf dem gesamten Umfang gleichmäßig von Verschleiß betroffen. Befindet sich jedoch die schädigende Rauigkeit wie Riefen durch **Montage/Handlung** nur in einem begrenzten Umfangsbereich, kommt es zur örtlichen **Dichtungsschädigung**. Sie **beschleunigt** sich deutlich, wenn verschleißbedingt ein **Leck** entsteht, in dem das durchschießende Fluid **Strömungserosion** (Bild 6.10.2.4-4 „L“ und „N“) hervorruft. Einen ähnlichen Effekt haben vom Fluid transportierte **harte Partikel** wie Rost, Abrieb im System, Ermüdungsausbrüche oder eingedrungener **Schmutz**. Hiervon ist besonders die Mobilhydraulik (z.B. an Baumaschinen) bei **ungenügenden Abstreifern** betroffen. Beschädigte Abstreifer lassen sogar Sand in das Fluid treten. Eine Abhilfe ist neben der **Beseitigung der Partikelquellen** ein ausreichend **feiner Filter**.

**Größere Fremdkörper** („E“ und „D“) sind meist metallischer Natur. Am häufigsten sind **Bearbeitungsspäne**. Ein Zeichen unzureichender Reinigung im Herstellungsprozess. Bei **Montage** oder **Ölwechsel** können ebenfalls größere Partikel in das System gelangen. Typisches **Schadensbild** sind dann größere axial verlaufende **Abrasions- und Fressriefen** auf der Gleitfläche der Stange. Ein solcher Schaden kann im vergleichbar harten metallischen **Stangenmaterial sehr viel gravierender** als an der Polymer-Dichtungsfläche sein. Dies ist dann der Fall, wenn **harte Fremdpartikel in den weichen Kunststoff eingebettet** wurden

ohne hier Verschleiß anzurichten. Sie wirken dann bei der oszillierenden Gleitbewegung wie ein Zerspanungswerkzeug an der metallischen Gegenfläche/Gleitfläche.

**Schäden durch Luft im Öl** („G“ und „F“): Zu unterscheiden ist zwischen **gelöster** und **ungelöster Luft** in Form von **Luftbläschen** (Bild 6.11.1.2-7 und Kapitel 7.1.2.1). Im gelösten Zustand werden die Eigenschaften des Fluids wie Viskosität und Kompressibilität nicht beeinflusst. Schädigend sind Luftbläschen die sich meist unter begünstigenden Betriebsbedingungen (überschreiten der Luftsättigung des Fluids) aus gelöster Luft bilden. Dieser Vorgang wird bei **Abfall des Flüssigkeitsdrucks** ausgelöst und erhöht die Kompressibilität des Fluids signifikant.

In den Dichtspalt von der Leckströmung mitgerissene **Luftbläschen expandieren**. Das geschieht insbesondere bei erhöhter **Rauigkeit der Spaltoberflächen** im Druckabfall auf der 'Austrittsseite' („F“, Detail) explosionsartig. Die **dabei aus dem Spalt 'geschossene' Flüssigkeit** wirkt äußerst erosiv auf die Dichtung (Dichtfläche) und die metallische Gleitfläche bzw. integrierte Führungsringe. Es kommt zu **axial orientierten riefenähnlichen Erosionsspuren** die mit einer mikroskopischen Untersuchung (REM, Band 1 Bild 2.2.2.4-3) von mechanisch abrasiven Spuren unterscheidbar sein müssten. Der Vorgang wirkt auf Grund der **Düsenwirkung der Erosionsspuren als Strömungserosion selbstbeschleunigend** (Bild 6.10.2.4-4). Dabei werden auch **Dichtungsaustrittsseite und -rücken** in Mitleidenschaft gezogen. Besonders gefährlich ist ein **Fluidstrahl aus einer Öffnung** wie eine Bohrung oder Spalt der auf eine Dichtung trifft. Kann die Luft von der Druckseite zwischen etwas weniger dichten **Faser-Verstärkungslagen** zur Niederdruckseite dringen, besteht die Gefahr für Ablösen ('Schusskanal') und Aufreißen ('Expansionstrichter') in Umfangsrichtung („G“). In diesem Fall ist nur eine **Herabsetzung des Luftanteils** für eine Abhilfe geeignet.

# Maschinenelemente: Gleitende Dichtungen: Kolben-Stangendichtungen

Luft unter ausreichend hohem Druck ist in der Lage, auch **in homogene Elastomere zu diffundieren**. Unter der Oberfläche kommt es zu Ansammlungen, die sich bei äußerer Druckentlastung (z.B. Ausbau) als **Blasen an der Dichtungsoberfläche** zeigen („H“). Parallel dazu wird eine deutliche **Volumenvergrößerung** und ein **Härteabfall** des Polymers beobachtet. Im dargestellten Fall wirkte ein Druck von ca. 400 bar über längere Zeit auf die kaum bewegte Kolbendichtung (Lit. 6.10.2.4-7).

Luftblasen machen das **Fluid merklich elastisch kompressibel**. Diese Federwirkung begünstigt von einer Komponente des Systems angeregte **Druckschwingungen**. Dazu zählen auch die Dichtungen selbst. Unter den Druckschwingungen kann sich die **Lebensdauer der Dichtung deutlich verkürzen**.

Sowohl Druckschwingungen als auch Druckstöße im Fluid übertragen durch **Kompression** auf Luftbläschen **Energie in Form von Wärme** („I“ mit Diagramm). Je nach Blasengröße, Kompressionsdruck und Verdichtungsgeschwindigkeit entstehen **sehr hohe Temperaturen**.

Im Extremfall kommt es zum besonders schädigenden **‘Dieseleffekt’** („K“ und Kapitel 7.1.2.1). Druckspitzen mit einem Mehrfachen des Betriebsdrucks erzeugen Kompressionstemperaturen (Diagramm in „K“) die **in der Lage sind das Fluidampf-Luftgemisch zu zünden**. **Polymerdichtungen** in der Nähe werden davon **thermisch zerstört** (Brandstellen, Zersetzung, Mikrorissbildung). Eine Identifikation im Rahmen einer Schadenuntersuchung dürfte somit **mikroskopisch (REM) nachweisbar** sein. Die Druckspitzen sind sogar in der Lage **metallische Systemkomponenten plastisch zu verformen**. Dafür sind unter Betriebsdruck bewegte Zylinder besonders anfällig.

*Für einen schadensfreien Betrieb ist also ein möglichst geringer Luftanteil im Fluid von größter Bedeutung*

Das erreicht man mit folgenden **Maßnahmen**:

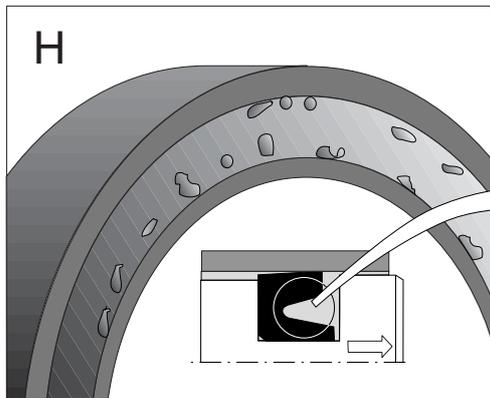
- Besondere Aufmerksamkeit gilt geeigneter **Anordnung und konstruktiver Gestaltung der Systemkomponenten**, um möglichst wenig Luft in das System zu bringen.
- **Entlüftung** vor der Inbetriebnahme nach jeder **Reparatur und Montage**. Luft, die sich vor Dichtungen ansammelt, darf bei Druckabfall keinen **Flüssigkeitsstrahl** mit **Strömungserosion** („L“) erzeugen.

**Merksatz:** Das Auswechseln einer beschädigten Dichtung ist keine nachhaltige Abhilfe! Für eine Schadensklärung als Voraussetzung gezielter, erfolgversprechender Abhilfen müssen die Schadensteile, insbesondere die betroffene **Dichtung sichergestellt** werden. In die Ursachenklärung sollte der **fachkundige Hersteller einbezogen** werden.

Auch im Fluid **gelöste Luft** kann schadenswirksam werden, wenn daraus **Luftblasen** entstehen. Dies ist bei örtlichen **Druckabsenkungen** („L“) der Fall. Sie ermöglichen die sog. **Kavitation** (Bild 6.11.1.2-7, Bild 6.11.1.2-8 und Band 1 Kapitel 5.5.1.3). Solche Bedingungen bestehen beispielsweise hinter der Drossel eines Ventilkolbens („L“). Die hohe **Strömungsgeschwindigkeit** im Spalt ist in der Lage (Bernoulli, Venturieffekt) den Druck bis zum Unterdruck abzusenken (Diagramm in „L“). Die gelöste Luft kann dann nicht mehr gehalten werden und sammelt sich in Bläschen. Sie implodieren in Systemzonen mit erhöhtem Druck. Es entstehen einer **Strömungserosion** („C“, „D“ und „F“) **vergleichbare Schäden (Luftblasenkavitation)** an Polymer- und Metallwerkstoffen. Auch **Wasser im Fluid** kann in einer Art ‘Kochen’ schädigende Dampfbläschen bilden (**Dampfkavitation**, Bild 6.11.1.1-4 und Band 1 Bild 5.5.1.3-1). Hat ein Fluid einen ausreichend niedrigen Dampfdruck ist eine Kavitation durch Dampfbildung des Fluids selbst nicht möglich. Das gilt gewöhn-

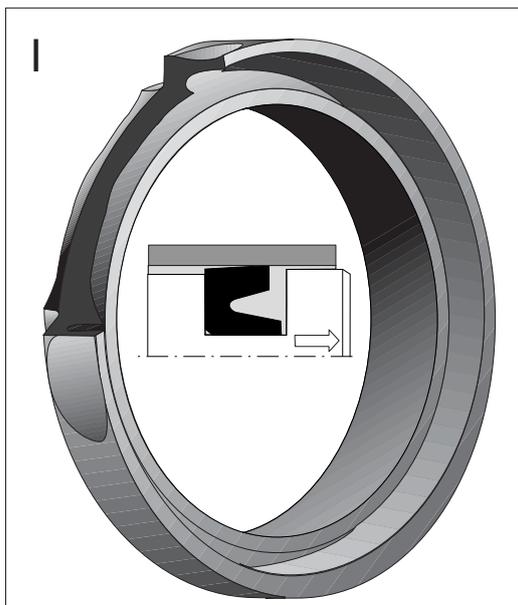
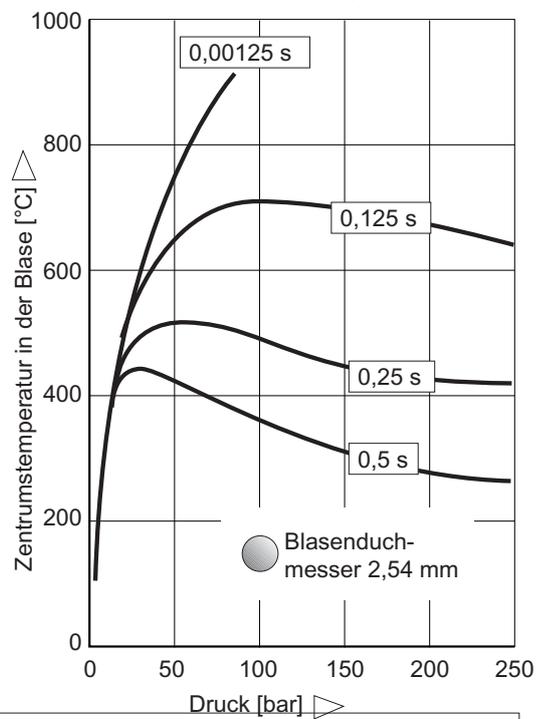
# Maschinenelemente: Gleitende Dichtungen: Kolben-Stangendichtungen

## Schädigungen von Kolben- und Stangendichtungen durch Luft /-bläschen im Fluid.



Blasenbildung aus eindiffundierter Luft im homogenen Elastomer einer Kolbendichtung.

Temperatur in Luftblasen in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit ▽



### K Schäden an einer Kolbendichtung und Führung als Folge des 'Diseleffekts'.

Beobachteter Druckverlauf bei Diseleffekt (nach Lohrenz).

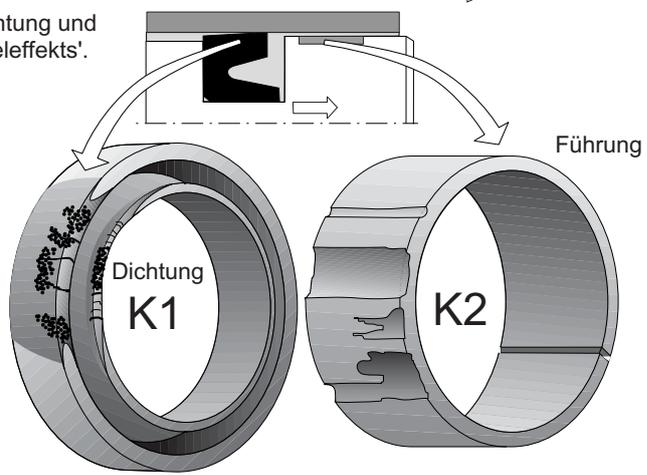
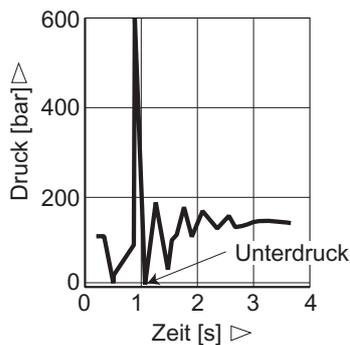


Bild 6.10.2.4-3

Fortsetzung von Seite 6.10.2.4-6

lich für Hydrauliköle. Ist jedoch **Wasser** das Fluid (**Druckwasserhydraulik**) besteht die Gefahr der Verdampfung ('Kochen') mit hohem Schadenspotenzial.

Die Führung einer Stange oder eines Kolbens lässt sich als **Gleitlager für die Axialbewegung** betrachten. Vergleichbar dem Schmieröl in einem Radialgleitlager (Kapitel 6.3.2) wird das Fluid auf Grund von Viskosität und Reibung in den Schmierpalt gerissen. Hier baut sich ein hoher tragender Druck auf. Der Effekt ist umso größer je enger der Spalt. Dies ist ein Dilemma. Ein größerer Spalt senkt die Kräfte auf Kosten der Führungsgenauigkeit ab. Hinter der Spaltverengung tritt das Öl wieder aus. Man spricht von der Funktion einer '**Viskositätspumpe**'. Die Axialströmung im Schiebgleitlager wird als '**Schleppströmung**' bezeichnet (Bild 6.10.2.4-1). Sie fördert Öl in Bewegungsrichtung, wobei sich vergleichbar einem Gleitlager im Spalt ein hoher Druck aufbaut. Die Rückbewegung ist nicht in der Lage, das gesamte geförderte Öl zurückzutransportieren. Das Öl wird so hinter der Führung von einer Dichtung angesammelt. Es kommt hier bei der oszillierenden Axialbewegung zu einem **Pumpeffekt**. Der Druck steigt auf diese Weise relativ langsam („M“) bis zum **mehrfachen Auslegungsdruck** (Systemdruck, Nenndruck). Das hat erhebliche Folgen:

- **Lebensdauerverkürzender Verschleiß** durch erhöhte Anpressdrücke der Dichtlippen.
- **Spaltextrusion** (Bild 6.10.2.4-6, „R“ und „S“).
- Erhöhte **Reibungskräfte** mindern den **Bewegungswirkungsgrad**.

**Kolbendichtungen vor den Schmierpalt** zu positionieren („M“) ist keine Alternative. Das führt zu neuen Problemen. Typisches Beispiel sind **doppelt wirkende Kolben** („M2“). Hier besteht die Gefahr, dass die Dichtung nicht die notwendige Leckölmenge für einen tragenden **Schmierfilm in der Führung** zulässt. Kostspie-

lige Schäden auch an der Zylinderwand sind die Folge. Zusätzlich erzeugt der Schleppeffekt im **Volumen zwischen den Dichtungen** eine Art Druckspeicher. Damit entstehen hohe **Axialkräfte von der Dichtungsrückwand zur -vorderseite**. Diese Kräfte sind in der Lage, selbst Dichtungen mit metallischen **Stützscheiben** bleibend zu **verformen** (stülpen, „M1“). Selbst massive **Verschraubungen** und **Kolben** können durch **Überlastung** versagen. Werden Kolbenringe von innen mit **O-Ringen** angespresst („N“), entsteht im engen Dichtungsspalt eine wirkungsvolle Schleppströmung. Dringt sie hinter den Kolbenring zum O-Ring und komprimiert diesen, weicht der Kolbenring aus. Das erhöht die Anpresskraft an der Gleitfläche. So verschlechterte Gleitverhältnisse im Spalt können sich in einer **Stick-Slip-Bewegung** (Stottern, Band 1 Bild 5.9.1-8) bemerkbar machen. Als Abhilfe bieten sich **axial schmale** (kleines 'Speichervolumen') **Führungsringe aus Kunststoff** an. Sie sind für die zur Montage notwendige Federung mit einem **Schlitz** versehen. Dieser dient im Betrieb als zusätzliche **Druckentlastung** (Detail in „K“).

Hydrauliksysteme haben Eigenschaften die **dynamische Probleme/Schwingungen** begünstigen. Dazu gehören:

- Ausgeprägte **Kompressibilität bei Luftblasen im Fluid**.
- Phänomene der **Entstehung und des Zusammenbruchs von Luftblasen** wie Kavitation und Dieseleffekt („I“ und „K“) als Anregungen.
- **Elastizität der Komponenten**. Das betrifft besonders die Aufweitung von Zylindern unter hohem Druck.
- **Oszillierende Arbeitsbewegung**, kurze schnelle Hübe.
- **Instabilitäten des Schmierfilms** in Führungen.

Fortsetzung Seite 6.10.2.4-10

Schädigungen von Kolben- und Stangendichtungen durch das Fluid infolge Strömungserosion und Schleppdruck.

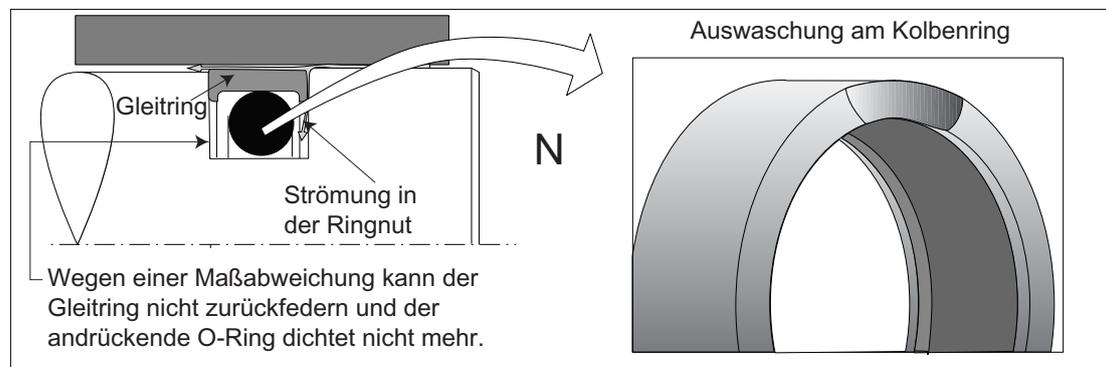
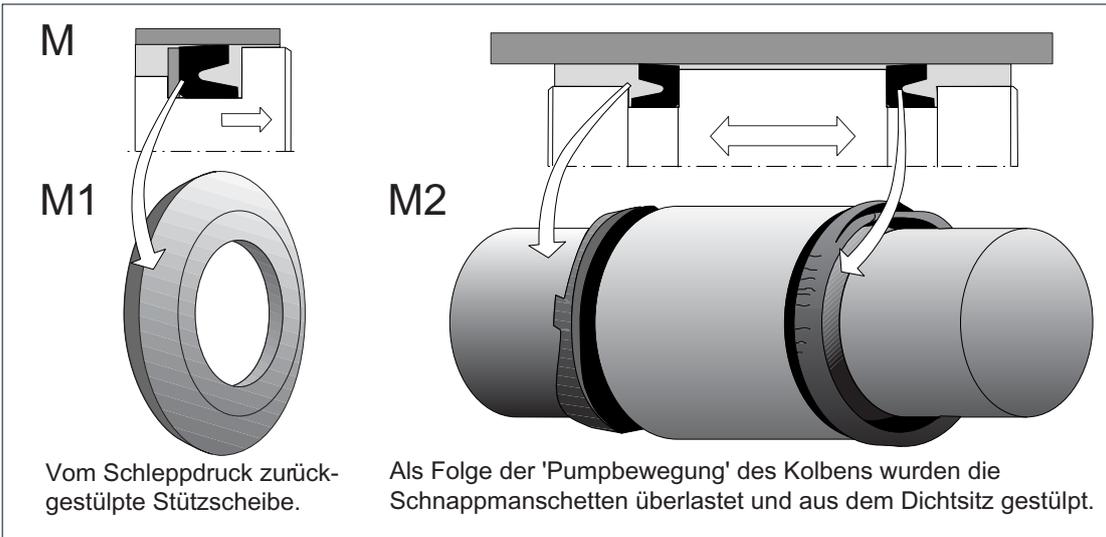
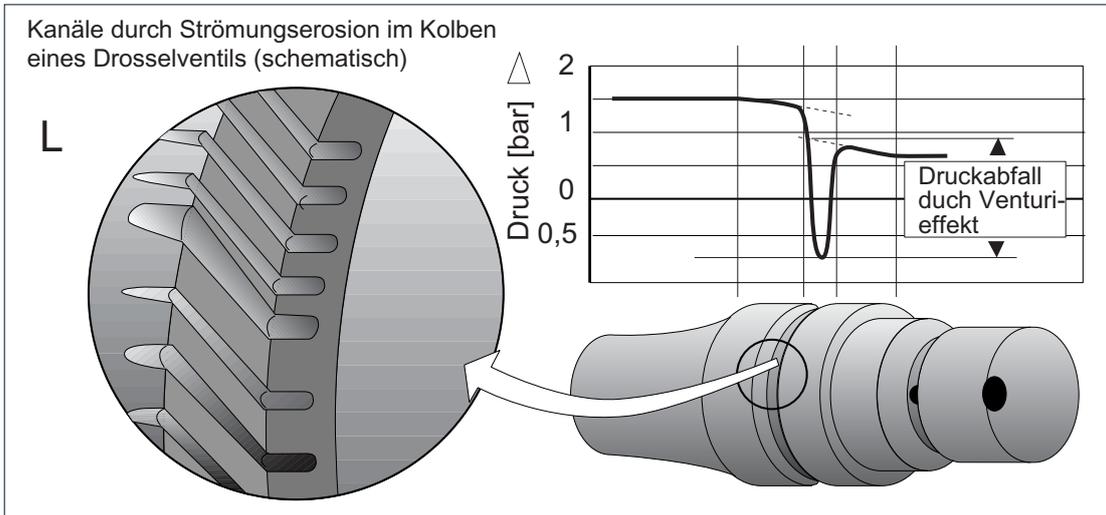
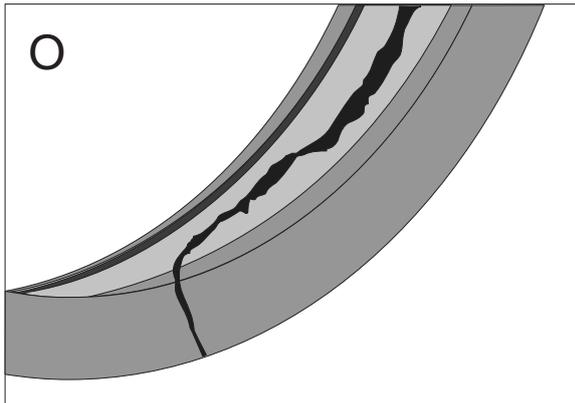


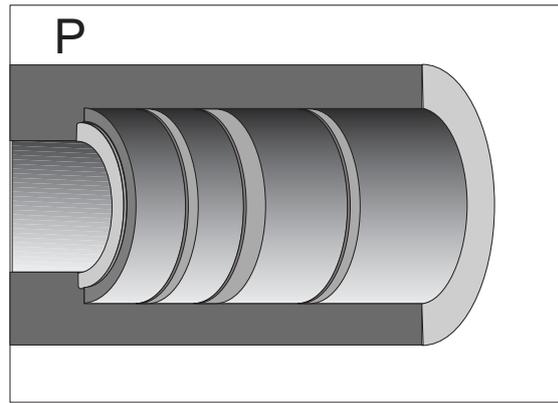
Bild 6.10.2.4-4

## Schädigung von Strömungsdichtungen durch Schwingungen im Fluid.

Schwingungserosion an einem Kunststoff-Kompaktdichting

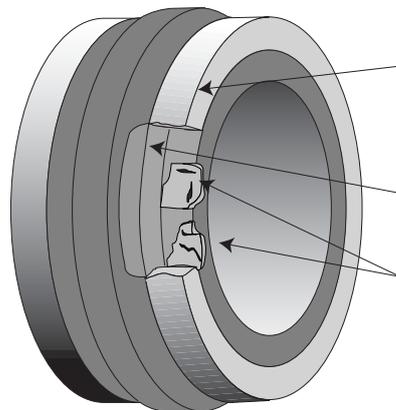
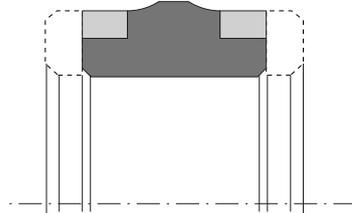


Schwingungserosion in einem metallischen Zylinder



Von Druckschwingungen zerstörte Kompaktdichtung

Q Kompaktdichtung



Verformungslos  
(typisch für einen  
Schwingbruch)  
gebrochener  
Verstärkungsring

erodiertes  
Dichtingmaterial

Zerrissene und  
aufgespleißte  
Gewebeeinlagen.

Bild 6.10.2.4-5

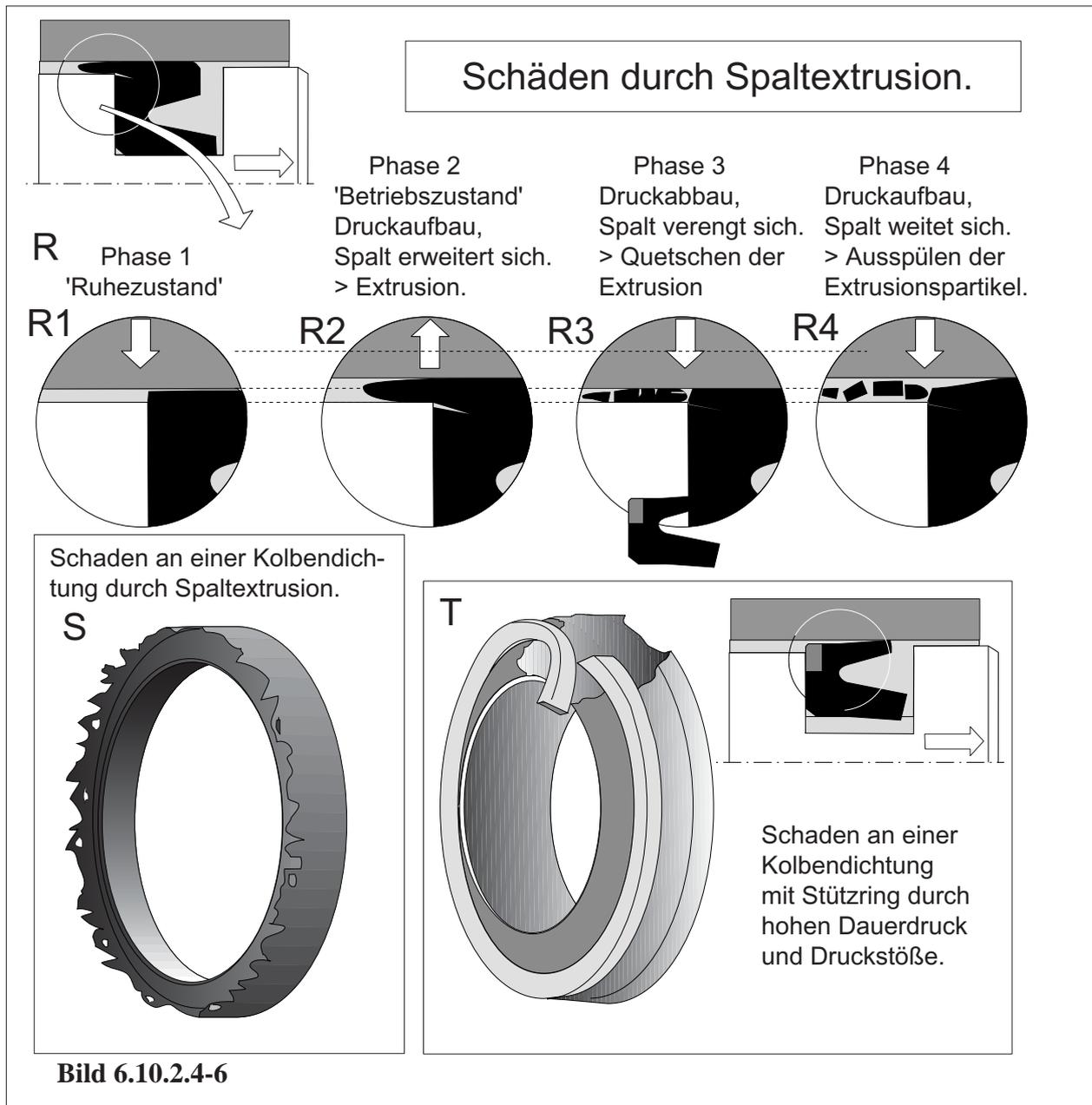
Fortsetzung von Seite 6.10.2.4-8

Man beobachtet unterschiedliche **Folgen von Schwingungen im System/Fluid**.

Die **Schwingfrequenz bestimmt** das von **Schwingungskavitation** (Band 1 Bild 5.5.1.3-10) im Schmierfilmbereich **gefährdete Bauteil**. Für niedrige Frequenzen sind (Polymer-) **Dichtungen („O“)** anfällig. **Metallische Oberflächen („P“)** dagegen für hohe Frequenzen. Wie bereits erwähnt, sind Instabilitäten im Schmierfilm des Führungsspalts Ursache gefährlicher **Radialschwingungen**. **Druckschwingungen** vor einer Dichtung können dort schnell große Schäden verursachen („Q“). Je

weiter der **Dichtspalt**, umso wahrscheinlicher wird eine **Spaltextrusion** („S“). Dies hängt von verschiedenen Einflüssen ab:

- **Konstruktion/Gestaltung der Dichtung**. Besonders gefährdet sind **zu dünne O-Ringe** mit typisch niedriger Rückstellkraft. Selbst eine **Abstützung** (Bild 6.10.1.2-7) muss kein sicherer Schutz sein.
- **Betriebstemperaturen**, insbesondere durch **Reibungswärme** an der Dichtlippe.
- **Elastische Verformungen an Systemkomponenten** wie **Flanschen, Verschraubungen** und **Zylindern**. Hier wirkt sich die **Aufweitung**



des Zylinders unter durchaus praxisrelevanten hohen Betriebsdrücken aus. Eine Extrusion, die sich polymertypisch relativ langsam zurückzieht, wird bei schnellem Druckabfall von der Zylinderwand 'geknackt'.

- **Relaxieren/Setzen**, z.B. in Gewinden.

Einen höheren **Widerstand gegen Spaltextrusion** bietet ein **Stützring** (engl. backing-ring, „**Q**“ und „**T**“) als integraler Bestandteil der Dichtung. Bei Extrembelastungen können selbst **metallische Stützringe plastisch verformt** werden und brechen („**T**“).

## Literatur zu Kapitel 6.10.2.4

- 6.10.2.4-1** W.Haas, „Grundlehrgang Dichtungstechnik“ Universität Stuttgart, <http://www.ima.uni-stuttgart.de>, Stand 2011, Seite 1 - 36.
- 6.10.2.4-2** G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente Band 1“, 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005, ISBN 3-540-25125-1, Seite 880-881.
- 6.10.2.4-3** H.-J.Lohrentz, „Mikro-Dieseleffekt als Folge der Kavitation in Hydrauliksystemen“, Zeitschrift „Ölhydraulik und Pneumatik“ 18 (1974) NR.3, [www.lohrentz-gmbh.de/unternehmen/.../kavitation.pdf](http://www.lohrentz-gmbh.de/unternehmen/.../kavitation.pdf), Seite 3-8.
- 6.10.2.4-4** W.D.Phillips, „The high-temperature degradation of hydraulic oils and fluids“, „Journal of Synthetic Lubrication“ Verlag John Wiley & Sons 2006, <https://www.hyprofiltration.com/.../>, 23, Seite 39-70.
- 6.10.2.4-5** H.-J.Lohrentz, „Dichtheitsmessmethoden und die Einflüsse des Schmutzes auf die Messung und Prüfstandstechnik“, Zeitschrift „Ölhydraulik und Pneumatik“ 43 (1999) NR.2, [www.lohrentz-gmbh.de/unternehmen/.../einfluesse-mess-pruef.pdf](http://www.lohrentz-gmbh.de/unternehmen/.../einfluesse-mess-pruef.pdf), Seite 120 - 122.
- 6.10.2.4-6** H.-J.Lohrentz, „Elektrische Entladungsvorgänge verursacht durch Flüssigkeitsstrom“, Zeitschrift „Ölhydraulik und Pneumatik“ 24 (1980) NR.3, [www.lohrentz-gmbh.de/.../elektrostatische\\_entladungen.pdf](http://www.lohrentz-gmbh.de/.../elektrostatische_entladungen.pdf), Seite 120 - 122.
- 6.10.2.4-7** „Dichtungshandbuch“, Katalog 3353 D/E, Angaben der Firma ‘Parker Hannifin GmbH, Prädifa-Packing Division’, Stand 2012, [movimec.tempsite.ws/site/admin/public/arquivos\\_upload/.../49.pdf](http://movimec.tempsite.ws/site/admin/public/arquivos_upload/.../49.pdf), Seite 1 - 126.