

FACHWISSEN SCHADENSANALYSE VON ELASTOMERBAUTEILEN

Ein Angebot des

Ö RING
PRÜFLABOR
RICHTER

PRÜFEN BERATEN ENTWICKELN

Quelle: www.o-ring-prueflabor.de

Stand der Information: 04/2020

Dynamisch bedingtes Überströmen – Kommt die Gummielastizität an Grenzen, droht Leckage

Autoren:

Dipl.-Ing. Bernhard Richter,
Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Blobner

1. Einordnung und Häufigkeit des Schadensbildes

Von den vier Hauptschadensmechanismen werden Schäden durch „Dynamisch bedingtes Überströmen / Blowby“ der 3. Hauptgruppe zugerechnet:

1. Medien
2. Temperatur / Alterung
- ▶ **3. Mechanisch / physikalische Einwirkungen**
4. Herstellungsfehler

Die 3. Hauptgruppe lässt sich in drei Untergruppen aufteilen: Montagefehler, falscher Einbau-raum und physikalische Überbeanspruchung durch die Betriebsbedingungen. Das dynamisch bedingte Überströmen gehört zur letzten Untergruppe.

Dieser Schadensmechanismus kommt in der Schadensanalyse eher sporadisch vor; in der Praxis aber gar nicht so selten, weil sich viele Anwender mit Mikroleckagen arrangiert haben.

2. Fachliches Hintergrundwissen zum Schadensbild

Um den Schadensmechanismus und die möglichen Einflussfaktoren zu verstehen, muss man sich zuerst mit den Eigenheiten der Gummielastizität und der Druckaktivierung von Dichtungen befassen. Gerade die geschickte Kombination von Gummielastizität und Druckaktivierung ermöglicht es dem weichen Gummiwerkstoff extrem hohe Drücke zuverlässig abzudichten.

2.1 Grenzen der Gummielastizität

In unserer praktischen Anwendung ist die Gummielastizität für eine besondere Fähigkeit von elastomeren Werkstoffen verantwortlich. Durch sie kann die aus den druckbeaufschlagten Bereichen einer Dichtung resultierende Kraft bzw. Spannung in eine Erhöhung der Dichtflächenpressung umgewandelt werden (=Druckaktivierung). Je höher also der anstehende Druck ist, desto höher ist auch die daraus entstehende Dichtflächenpressung. Durch dieses Funktionsprinzip können Elastomerdichtungen in extremen Anwendungen Drücke von weit über 1000 bar abdichten, sofern spaltseitig eine Zerstörung durch Spaltextrusion verhindert werden kann. Notwendig ist aber dafür eine Verformung der Elastomerdichtungen durch den Systemdruck. Wichtig ist auch, dass der Druck so schnell wie möglich an der Dichtung ankommt, weil „durch Luftblasen im Nutraum vor dem O-Ring, die den Druckanstieg in der Nut zusätzlich verzögern“¹, das Überströmen einer Dichtung begünstigt wird.

Da Gummiwerkstoffe keine ideal elastischen Werkstoffe sind, findet der über eine Verformung erforderliche Übergang in einen anderen Spannungszustand (**Abb. 1**) nicht unvermittelt statt. Es kommt zu einer zeitlichen Verzögerung zwischen dem Auftreten eines erhöhten Druckes und der daraus resultierenden Erhöhung der Dichtflächenpressung. Übersteigt die Druckanstiegsgeschwindigkeit die maximal mögliche Verformungsgeschwindigkeit der Dichtung, liegt in diesem Zeitfenster ein labiler Zustand der Dichtung vor, das heißt der anstehende Druck ist – meist nur für einen kurzen Moment – höher als die erzeugte Dichtflächenpressung. Und damit kann es zu vorübergehenden Leckagen an der Dichtung kommen. Darüber hinaus können Elastomerdichtungen einer Spaltänderung nur in begrenztem Maße folgen. Entsteht durch den Druckstoß zusätzlich noch eine zu schnelle elastische Aufweitung der Bauteile bzw. Spaltvergrößerung, wird die zeitlich begrenzte Leckage noch stärker.

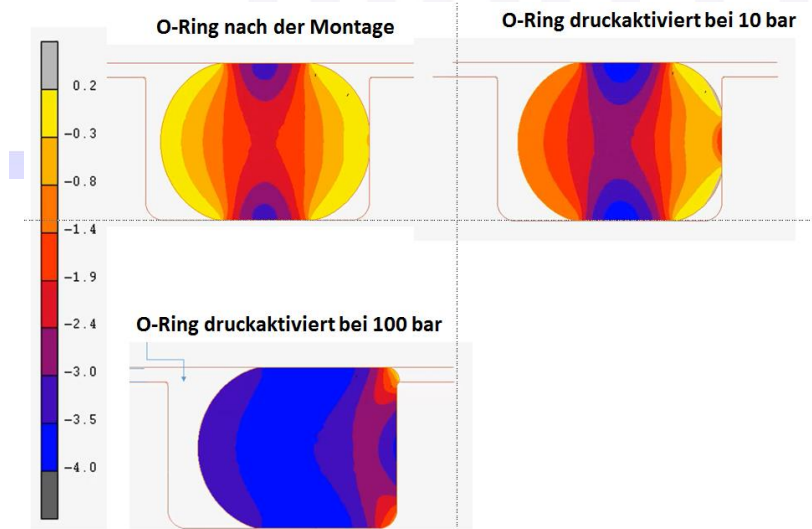


Abb. 1: Zur Erhöhung der Dichtflächenpressung einer Elastomerdichtung sind Verformungen der Dichtung erforderlich, was insbesondere bei einer Druckaktivierung bei 100 bar deutlich zu erkennen ist. Der Druck gelangt durch den linken oberen Spalt in die Dichtungsnut. (Bild: Dr. Manfred Achenbach, www.gutachten.de)

¹ NAU, Bernard und MÜLLER, Heinz: www.fachwissen-dichtungstechnik.de (Onlinepublikation, Webseite abgerufen am 22.03.2020), Kapitel 5: Hydraulikdichtungen, S. 39

2.2 Schadensmechanismus

Durch die Grenzen der Gummielastizität können Elastomerdichtungen bei sehr schnellen Änderungen von Betriebszuständen, das heißt bei sehr harten Druckstößen (= hohe Druckanstiegsgeschwindigkeit) und/oder den daraus resultierenden Spaltänderungen nicht schnell genug die Dichtflächenpressung erhöhen und der Spaltänderung folgen. Dadurch kann es zu einem Überblasen bzw. Überströmen der Dichtung kommen, ohne dass die Dichtung geschädigt wird. Das hört sich spektakulär an, was aber dem Phänomen in den meisten Fällen in der Praxis nicht gerecht wird, da es sich in vielen Fällen um sehr geringe und kurzzeitige Leckagen handelt.

2.2.1 Überblasen

Mit dem Überblasen meint man das ungewollte Entweichen von Gasen über die Dichtung hinweg. Da Gase kompressibel sind, lassen sie nur begrenzte Druckgradienten bzw. Druckänderungsgeschwindigkeiten zu. Daher kommt dieser Schadensmechanismus sehr selten vor. Zu erwähnen ist aber der wohl bekannteste Schaden durch eine überblasene Dichtung, nämlich das Unglück der Challenger-Raumfähre von 1986. Hier kamen untypisch hohe Spaltänderungen an der Dichtstelle während des Startvorgangs mit der Auswirkung von niedrigen Temperaturen zusammen. Dies führte zu einer signifikanten Verlangsamung der Rückstellgeschwindigkeit des O-Rings. Die folgende **Abb. 2** zeigt den großen Einfluss der Temperatur auf die Rückstellgeschwindigkeit eines FKM O-Rings.

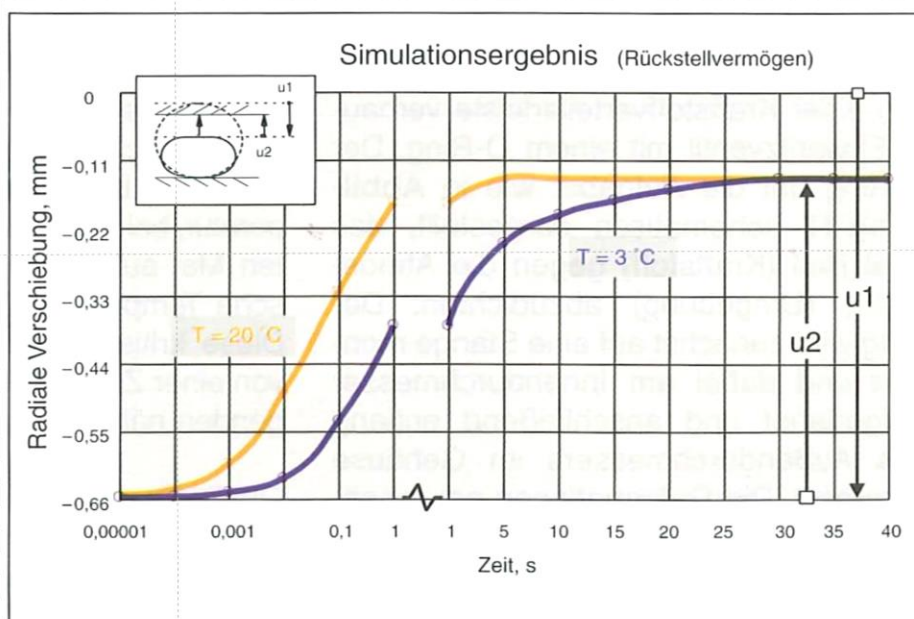


Abb. 2: Mittels FEM-Analyse berechnete Sprungantwort auf eine schlagartige Entspannung eines FKM O-Rings bei 3°C und bei 20°C ²

² Die Abb. wurde entnommen von: ACHENBACH, M. und STREIT, G.: Thermodynamische Beschreibung der Gummielastizität in: GAK Gummi Fasern Kunststoffe, Jg. 54, Heft 3, 2001, S. 175, Abb. 15 (Wiedergabe des Diagramms mit freundlicher Genehmigung des Autors Dr. Manfred Achenbach vom 06.04.2020)

Das Hauptproblem bei der Challengerkatastrophe war nicht die Leckage an sich – es stand ja trotzdem noch genügend Gas für den Raketenantrieb zur Verfügung – sondern der daraus folgende Systemschaden, nämlich die Explosion der Raumfähre.

2.2.2 Überströmen

Mit Überströmen bezeichnet man die Leckage von Flüssigkeiten, die in der Regel von Anwendern kritischer als das Überblasen bewertet werden, weil die Leckagespuren sichtbar sind. Mit dem Begriff „Überströmen“ verbindet man hohe Strömungsgeschwindigkeiten eines Fluids über eine Dichtung, was aber erhebliche Spalte voraussetzen würde. Diese hohen Strömungsgeschwindigkeiten sind eher selten und kommen nur vor, wenn man die Tieftemperaturgrenze der eingesetzten Dichtung deutlich unterschreitet und entsprechend hohe Drücke anwendet. Die Situation verschärft sich noch, wenn das abzudichtende Fluid eine eher geringe Viskosität hat, wie zum Beispiel bei der Abdichtung von Gasen in der Flüssigphase oder bei Otto-Kraftstoffen. Allerdings würde man bei einem so starken Überströmen zuallererst von einer falschen Auslegung bzw. von einem falschen Dichtungswerkstoff als Primärursache ausgehen und das Überströmen wäre als Sekundärschaden der falschen Werkstoffauslegung anzusehen. Erfolgt das Überströmen jedoch im typischen Temperatureinsatzbereich einer Dichtung, so wird dies als primäre Schadensursache eingestuft.

In der Fluidtechnik finden sich immer wieder geringfügige Leckagen als Folge von Unterwanderungen der Dichtungen durch sich zyklisch wiederholende instationäre labile Betriebszustände, die dann zu einer sogenannten Schwitzleckage führen. Diese eher leichten Leckagen von Hydraulikaggregaten oder z.B. Achsflanschen werden heute – v.a. aus Umweltschutzgründen – viel kritischer bewertet als in der Vergangenheit, auch wenn diese für die Funktionalität der abzudichtenden Bauteile häufig unkritisch sind. Allerdings gibt es auch hier Beispiele, wo die daraus entstehenden Sekundärschäden zu kompletten Systemausfällen führten. Das Phänomen in der Hochdruckhydraulik, bei welchem O-Ringe an Plattenventilen (mit nach innen offener Nut) komplett aus der Nut nach innen in den Hydraulikkreislauf „verschwinden“, konnte erst über das dynamisch bedingte Überströmen erklärt werden.³ Der Schadensmechanismus dieser Sekundärschädigung (= Folge der Leckage) besteht darin, dass sich durch die hohen Verspannkraften zwischen Plattenventil und Ventilblock eine „Sekundärdichtung“ (d.h. eine zusätzliche nicht gewollte Dichtwirkung) ergibt, was auf Dauer zu einem Druckaufbau hinter dem O-Ring führt. Dadurch kann der O-Ring partiell nach innen ausbeulen, und von der Strömung mitgerissen werden. Zwar hat man seitens der Dichtungshersteller⁴ und Anwender⁵ durchaus die richtigen Gegenmaßnahmen ergriffen, die damaligen physikalischen Erklärungen dafür, dass der O-Ring als Ringspaldichtung infolge Rutschbewegungen in der Nut wirkt, waren aber falsch.⁶

Probleme durch ungewollte Sekundärdichtungen können auch durch schlecht ausgelegte Stützringe entstehen, welche den O-Ring vor Spaltextrusion schützen sollen. Stützringe dürfen

³ Vgl. JONGEBLOED, H. und BACKÉ, W.: Die Dichtwirkung statischer Dichtsysteme bei dynamischer Beanspruchung in: Tagungsband zu 11. Internationale Dichtungstagung, Dresden, 1999, S. 111-125

⁴ HÄNßLER, R.: Ärger mit O-Ringen in Flansch- oder Anschlussplatten? In: O+P Ölhydraulik und Pneumatik, 17. Jg., Nr. 1, Jan. 1973, S. 16 (Der Autor war ehemaliger Mitarbeiter der Fa. Prädifa)

⁵ GEIS, Harald und STÜRMER, Josef (ehemals Mitarbeiter der Fa. Rexroth): Kein Loch für Leckagen – Statische Abdichtung hydraulischer Ventile und Anlagen in: Fluid, Mai 1991, S. 28-30

⁶ HAAS, Werner und HÖRL, Lothar: Und der O-Ring sitzt doch fest – Verhalten von O-Ringen bei pulsierendem Druck in: Fluid, Nov./Dez. 1995, S. 37-39

aber selbst nicht dichten, sondern müssen Mikroleckagen durchlassen. Weitere Probleme durch Sekundärschäden können an O-Ringen in der sterilen Verfahrenstechnik entstehen, wenn es durch Druckstöße in Abfüllanlagen zu einer Hinterwanderung des O-Rings kommt. Diese hinterwanderten Stellen können durch die üblichen Reinigungsverfahren nicht mehr gesäubert werden, ohne den O-Ring auszubauen. Die Höhe der dynamischen Druckstöße nimmt mit zunehmender Länge des Rohrleitungssystems und mit kürzer werdenden Taktungen bei der Befüllung zu. Erst nach längerem zyklischen Auftreten dieses Problems der Über- bzw. Unterwanderung von Dichtungen stellen sich Folgeschäden einer Strömungserosion ein. Das heißt, nicht immer finden sich ausreichend Spuren an der Dichtung, die auf den primären Schadensmechanismus der dynamisch bedingten Überströmung hinweisen. Dieser Rückschluss muss dann aus den vorliegenden Informationen zur Anwendung und zum Einbauraum geschlossen werden. Eine entscheidende Rolle hat hier bspw. die Oberflächenstruktur der Dichtflächen, also gar nicht in erster Linie die Rauheit allein. Herstellungsbedingte Querstrukturen in einer Dichtfläche stellen sozusagen die Steilvorlage für die dynamisch bedingte Überströmung dar. Dann können auch in Niederdruckanwendungen (< 10 bar) leichte Schwitzleckagen auftreten, wenn es durch Schwingungen zwischen den abzudichtenden Bauteilen, beispielsweise an Achsflanschen, zu Mikropalpbewegungen kommt.

2.2.3 Begriffliche Abgrenzung zu der alternativen Schadensbezeichnung „Blowby“

Der Schaden des „dynamisch bedingten Überströmens“ wird auch häufig mit dem englischen Begriff „Blowby“ beschrieben. Letztere Bezeichnung stammt ursprünglich aus dem Bereich der Motortechnik und bezeichnet dort das Vorbeiströmen von Gasen entlang der Kolbenwand aus dem Brennraum in das Kurbelgehäuse. Beim vorliegenden Schadensmechanismus bezeichnet „Blowby“ aber das Überströmen bzw. Unterwandern von Arbeitsflüssigkeiten (z.B. Hydrauliköl) oder -gasen aus einem Bereich mit höherem Druck in einen druckärmeren Bereich. Diese Verwendung des Begriffs in der Dichtungsschadensanalyse ist nicht zu verwechseln mit der „Blowby-Gas-Beständigkeit“ von Elastomerwerkstoffen. Dabei geht es um Einlagerungsversuche von Dichtungswerkstoffen in den aggressiven Blowby Kondensaten von Motorenprüfständen bzw. in sogenannten Blowby Rezepturen der Fahrzeughersteller.

2.3 Einflussfaktoren auf den Schadensmechanismus

Dynamisch bedingtes Überströmen wird immer durch eine Kombination und ein ungünstiges Zusammenspiel von Faktoren aus den folgenden drei Bereichen ausgelöst:

- Eigenschaften des Dichtungswerkstoffs („Gummielastizität“ und Rückstellverhalten (siehe 2.1 und 2.2), Kälteverhalten, Härte (Verformungswiderstand) und Alterungsbeständigkeit)
- Anwendungs- / Einsatzbedingungen (Druckanstiegsgeschwindigkeit, Temperatur/Medium)
- Einbausituation (Verformungsgrad, Spaltmaß/Steifigkeit, Oberflächenausführung)

2.3.1 Dichtungswerkstoff

Es gibt viele Punkte, die zu beachten sind, um aus einer Elastomerdichtung ein funktionssicheres Bauteil zu machen. Im vorliegenden Fall ist es wichtig zu wissen, warum der Werkstoff Gummi bei sich schnell öffnenden Spalten an seine Grenzen kommt.

Kälteverhalten

Das viskoelastische Verhalten von Gummiwerkstoffen bedeutet, dass die Verformungsgeschwindigkeit sehr stark temperaturabhängig ist und bei tiefen Temperaturen irgendwann ganz verloren geht. Der spektakulärste Dichtungsausfall aus diesem Grund war der bereits oben erwähnte Absturz der Challenger Raumfähre im Jahr 1986. Durch das Abkühlen verliert ein O-Ring das Vermögen zur Druckaktivierung, d.h. der anliegende Systemdruck kann nicht mehr so gut in eine erhöhte Dichtflächenpressung umgesetzt werden. Die klassischen Kälteprüfverfahren, z.B. Druckverformungsrestprüfung bei tiefen Temperaturen, ISO 815-2, oder der TR10-Wert, ISO 2921 oder die DSC-Prüfung können zwar das Einfrierverhalten nach unterschiedlichen physikalischen Methoden beschreiben, dies reicht allerdings nicht aus, um die Leistungsgrenzen unter dynamischen Bedingungen zu beschreiben. Hierzu ist der Stand der Technik, dies über eine DMA-Multifrequenzanalyse zu tun, um daraus die komplexen Zusammenhänge zwischen tiefen Temperaturen, schneller Verformung und dem dabei eintretenden Verlust der Rückstellgeschwindigkeit abzubilden.⁷

Härte (Verformungswiderstand)

Eine weitere wichtige Einflussgröße ist die Härte bzw. der Formänderungswiderstand des Dichtungswerkstoffes (Modul). Je höher die bereits bei der Montage erzeugte Dichtflächenpressung ist, desto geringer wird die Bedeutung der Druckaktivierung. Aus Gründen der Sicherheit gegen Spaltextrusion wählt man in der Hochdruckhydraulik gerne härtere Werkstoffe, z.B. mit 90 IRHD-M. Teilweise verzichten einige Anwender aber darauf, wenn sie es entweder nur mit geringen Spalten zu tun haben oder Stützringe einsetzen. Hinzu kommt, dass O-Ringe mit 70 IRHD-M besser am Markt verfügbar sind. Damit gibt man unnötig Sicherheiten gegen dynamisch bedingtes Überströmen auf. Sehr gute Erfahrungen hat man diesbezüglich mit thermoplastischen Polyurethanwerkstoffen mit einer Nennhärte von 92-95 Shore A gemacht.

Alterungsbeständigkeit

Auf Grund der Alterung durch Wärme und Sauerstoff verliert der Werkstoff Gummi an Elastizität und passt sich immer mehr dem verpressten Zustand seiner Einbausituation an, d.h. sein Rückstellvermögen wird verringert bzw. verlangsamt. Eine gealterte Dichtung kann also schnellen Druck- und Spaltänderungen nicht so gut folgen wie eine produktionsfrische. Je mehr die Dichtung dadurch von der initialen Dichtflächenpressung verliert, desto stärker ist sie auf die Druckaktivierung angewiesen. Damit verändern sich durch diesen Einfluss zwei Dinge zum Schlechteren: Die initiale Dichtflächenpressung nimmt ab und die Dynamik der Rückstellung wird schlechter.

⁷ ACHENBACH, M. und STREIT, G.: Thermodynamische Beschreibung der Gummielastizität in: GAK Gummi Fasern Kunststoffe, Gentner Verlag, Ausgabe 3, 54. Jg., 2001, S. 164-178

2.3.2 Anwendungs-/ Einsatzbedingungen

Druckanstiegsgeschwindigkeit

Der Vorteil von elastomeren Dichtungen ist ihr hohes Maß an Elastizität, welches für sehr viele Anwendungen ausreichend ist. Das liegt daran, dass es klare Vorgaben für Einbauräume und für Spaltmaße (z.B. die ISO 3601-2⁸) gibt, wodurch die Spalthöhe in der Anwendung begrenzt wird. Je kleiner der Spalt in der Anwendung ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem dynamisch bedingten Abheben der Dichtung bzw. Dichtfläche kommt, da die Rückstellgeschwindigkeit der Dichtung mit zunehmendem Spalt abnimmt. Es ist deshalb wichtig, Spaltmaße in Hochdruckanwendungen durch enge Fertigungstoleranzen und steife Bauteile zu begrenzen, siehe unten. Ein Druckgradient von 10 bar/ms stellt eine hohe Druckanstiegsgeschwindigkeit dar mit einem starken Gefährdungspotential für dynamisch bedingtes Überströmen. Druckanstiegsgeschwindigkeiten bis 0,1bar/ms bergen ein eher geringes Gefährdungspotential in sich. So hat JONGEBLOED⁹ mittels FEA für einen NBR-Dichtungswerkstoff dargestellt, dass bei einem schwellenden Druck von 100bar bei 1 Hz noch eine ausreichende Druckaktivierung des O-Rings vorhanden ist, wenn auch bereits deutlich eingeschränkt gegenüber dem statischen Zustand. Bei 100Hz aber ist die Druckaktivierung nicht mehr ausreichend, siehe **Abb. 3**.

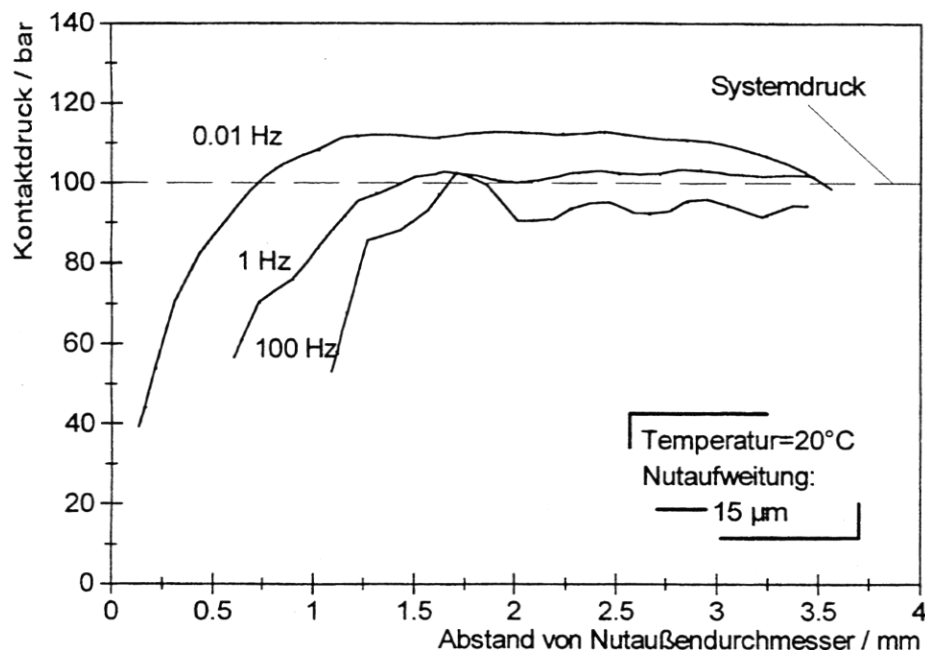


Abb. 3: Berechneter Dichtflächenpressungsverlauf an einem O-Ring bei 100bar Systemdruck und unterschiedlichen Druckfrequenzen bzw. Druckanstiegsgeschwindigkeiten¹⁰

⁸ Siehe ISO 3601-2: Fluid power systems- O-rings- Part 2: Housing dimensions for general applications, Ausgabe 2016-07

⁹ JONGEBLOED, H. und BACKÉ, W.: Die Dichtwirkung statischer Dichtsysteme bei dynamischer Beanspruchung in: Tagungsband zu 11. Internationale Dichtungstagung, Dresden, 1999, S. 111-125

¹⁰ Ebd., S. 119 (Wiedergabe des Diagramms mit freundlicher Genehmigung des VDMA vom 09.04.2020)

Temperatur/Medium

Mit abnehmender Temperatur verlieren Elastomerwerkstoffe an Dynamik, das heißt an Rückstellgeschwindigkeit. Der Phasenwinkel zwischen Kraft und Verformung wird größer, bis er schließlich sein Maximum annimmt und die Dichtung ihre Gummielastizität verliert und in den Glaszustand übergeht. Damit nimmt die Gefahr eines Abhebens der Dichtfläche von der Dichtung durch Spaltänderungen zu, ebenso verliert der Werkstoff an Schnelligkeit bei der Druckaktivierung. Damit nimmt das Risiko für ein dynamisch bedingtes Überströmen bei tiefen Temperaturen zu. In der Hydraulik verhindern aber oft die mit tiefen Temperaturen zunehmenden Viskositäten eine dadurch auftretende Leckage, sofern die eingesetzten Dichtungswerkstoffe prinzipiell für diese Temperaturen geeignet sind. Dagegen können bei hohen Temperaturen schon sehr kurze labile Dichtphasen ausreichen, damit es zu einer Schwitzleckage kommt, da Öle im heißen Zustand eine sehr geringe Oberflächenspannung besitzen.

2.3.3 Einbauraum

Für O-Ringe sollte zunächst auf die Einhaltung der ISO 3601-2¹¹ geachtet werden, da der Einbauraum entscheidenden Einfluss auf die Funktionalität der O-Ringe hat. Besondere Bedeutung haben hier der Verformungsgrad des O-Rings, das Spaltmaß im drucklosen und druckbeaufschlagten Zustand und die Oberflächenausführung.

Verformungsgrad

Ein hoher Verformungsgrad des O-Rings wirkt sich in zweifacher Hinsicht positiv aus: Zum einen gilt, dass die maximale Dichtflächenpressung progressiv mit dem Verformungsgrad zunimmt. Zum anderen gilt, je höher die Dichtflächenpressung ist, desto weniger ist der O-Ring auf die Druckaktivierung angewiesen. Das bedeutet, dass man die dafür in der ISO 3601-2 vorgegebenen Bereiche im Zweifelsfall über-, aber nie unterschreiten sollte. Außerdem erzeugt ein höherer Verformungsgrad auch eine breitere Anlagefläche, was im Falle eines Überströmens bzw. einer Überwanderung den hydraulischen Widerstand erhöht, das heißt die Menge an „Schwitzleckage“ reduziert. Wenn man schon diese dichtungstechnisch labilen Betriebszustände nicht ganz verhindern kann, so sollte man die Auswirkungen dennoch auf ein Minimum reduzieren.

Die Verpressungen können allerdings nicht beliebig vergrößert werden, da es sonst zu Spannungsrissen im Inneren der Dichtungen kommen kann. Außerdem muss auch eine Nutüberfüllung für alle Betriebszuständen (z.B. durch Quellung, Wärme) verhindert werden, da sonst die Dichtung zerstört wird und eine Druckaktivierung der Dichtung unmöglich wird.

Spaltmaß/Steifigkeit

Eine Nut-Auslegung nach ISO 3601-2 sieht für radiale Spaltmaße ein Durchmesserspiel von H8 / f7 vor. Das bedeutet für ein Nennmaß von 10 mm ein maximales Durchmesserspiel von 0,05 mm, dagegen für den Durchmesser von 100 mm schon 0,125 mm und den Durchmesser von 300 mm 0,189 mm. Das heißt, wenn ein Druckstoß auch gleichzeitig eine außermittige Kraft einleitet, kann jeweils das halbe Durchmesserspiel als zusätzlicher dynamischer Spalt

¹¹ ISO 3601-2: Fluid power systems- O-rings- Part 2: Housing dimensions for general applications, Ausgabe 2016-07

auftreten. Zudem sollte auch die elastische Aufweitung unter Druck bei der Auslegung berücksichtigt werden. Bei axialen Abdichtungen müssen die beiden abzudichtenden Bauteile ausreichend gut verspannt werden, um das Atmen unter Druck einzuschränken.

Oberflächenausführung

An statischen Flanschabdichtungen schreibt die ISO 3601-2 einen Rz-Wert von 4 µm vor, die Oberflächenstruktur wird dagegen nicht spezifiziert. Für statische radiale Dichtflächen wird ein Rz von 6,3 µm empfohlen, für dynamische ein Rz von 1,6 µm, auch ohne Vorgabe der Struktur der Oberflächen. JONGEBLOED empfiehlt die Anwendung der Vorgaben von dynamischen Dichtungen. Da die Oberflächenstruktur bzw. das hierzu eingesetzte Herstellungsverfahren aber mindestens den gleichen Einfluss wie die Rauheit hat, werden die Vorgaben für statische Dichtungen als ausreichend eingestuft, solange die Oberflächenstrukturen konzentrisch verlaufen.

3. Schadensbild

3.1 Beschreibung des Schadensbildes und problematischer Bereiche

Die Schadensbilder von Dichtungen aus Ausfällen durch dynamisch bedingte Überströmung, auch häufig als Blowby-Effekte bezeichnet, sind nicht immer eindeutig. Teils finden sich gar keine Beschädigungen an den Dichtungen durch den Spalt, eventuell nur leichte Querstrukturen in den Gegenflächen und dennoch kann es zu einer Leckage kommen. Beim Schadensbild der Spaltextrusion hingegen, wird die Dichtung am Spalt beschädigt, ohne, dass dadurch eine Leckage entstehen muss. Auf Grund des Ausbleibens sichtbarer Primärschädigungen beim dynamisch bedingten Überströmen, wird in der Praxis dieser Schadensmechanismus mit dem häufig auftretenden Folgeschaden der Strömungserosion illustriert. An Dichtungen, welche durch dynamisch bedingtes Überströmen ausfallen, finden sich nämlich oft Erosionsriefen quer zum Umfang der Dichtung (**Abb. 4**).

In Plattenventilen bei nach innen offenen Nuten kann es die Dichtung aus dem Einbauraum drücken, so dass diese komplett fehlt.

In Anwendungen mit Stützringen hinter dem O-Ring kann sich beim Verklemmen des Stützrings im Spalt (= ungewollte Sekundärdichtung) ein Druck zwischen Stützring und O-Ring aufbauen. Dadurch wird der O-Ring auf die druckzugewandte Seite der Nut gedrückt, auf welcher sich kein Stützring befindet, und kann dort durch Spaltextrusion zerstört werden.

Der Rückschluss auf die Schädigung durch dynamisch bedingtes Überströmen ergibt sich bei diesem Schadensmechanismus noch mehr als bei anderen, indem man aus den Einsatzbedingungen alternative Ursachen ausschließt. Dies können insbesondere Herstellungsfehler der O-Ringe in Form von Kerben/Vertiefungen, Beschädigungen der Dichtflächen, Luft in der Hydraulikflüssigkeit oder auch schlechte Einbauräume mit zu geringer Verpressung oder zu schlechter Oberflächengüte sein.

Abb. 4: Erosionsriefen aus einer dynamisch bedingten Überströmung, zusätzlich hat die Dichtungsbuchse infolge der Druckstöße durch Axialbewegungen einen leichten Abrieb erzeugt



Abb. 5: Erosionstrichter als Folge eines dynamisch bedingten Überströmens

Abb. 6: Strömungserosion an einer Dämpferdichtung infolge von Überströmen



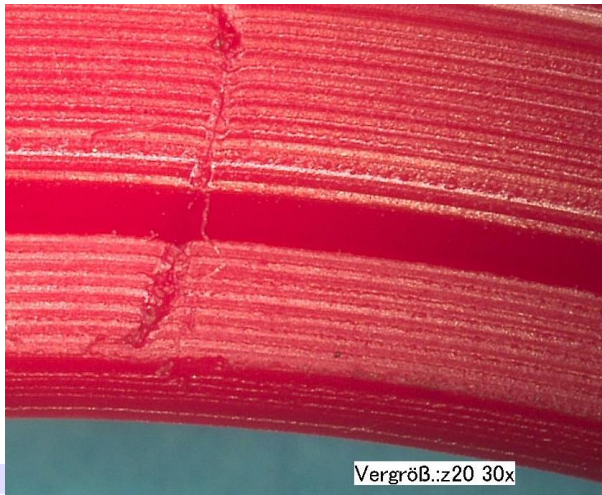


Abb. 7: Überströmte Polyurethan Dichtung aus einem Gabelstapler mit Erosionsspuren

3.2 Auswirkungen des Schadens

Wie in Kapitel 2 ausgeführt, kommt es durch die dynamisch bedingten Leckagen in der Regel nicht direkt zum Systemausfall. Allerdings ist heute nicht nur in der Mobilhydraulik die Toleranzschwelle für Ölleckagen gegen Null gegangen, sodass Leckagen allein bereits als erheblicher Produktmangel bewertet werden. Das Hauptthema bei diesem Schadensmechanismus sind jedoch die Sekundär- bzw. die Folgeschäden. Sei es, dass sich überströmende Gase entzünden können und damit zur Explosion führen, oder dass es durch einen ungewollten Druckaufbau hinter der Dichtung zu einer mechanischen Zerstörung der Dichtung kommen kann, oder dass es in der Getränkeabfüllung hinter der Dichtung zu Ablagerungen kommt, welche die Sterilität gefährden.

Der häufigste Folgeschaden bei diesem Schadensmechanismus ist die bereits oben erwähnte Strömungserosion.

Als *Begleitschaden* bezeichnet man einen Schaden, der häufig parallel in Gegenwart eines bestimmten Schadensmechanismus auftritt, aber durch eine andere Ursache ausgelöst wurde. Beim dynamisch bedingten Überströmen finden sich mitunter auch durch Abrieb geschädigte Dichtungen (**Abb. 5**). Der Abrieb kann nämlich durch Bewegungen infolge häufiger Druckstöße ausgelöst werden.

3.3 Abgrenzung zu ähnlichen Schadensbildern

Schadensbilder durch dynamisch bedingtes Überströmen, die den Folgeschaden einer Strömungserosion zeigen, können mit Strömungserosionsschäden, welche durch andere Ursachen, insbesondere durch Luft, ausgelöst wurden, verwechselt werden. Hier ist allerdings eine Abgrenzung nicht durch eine Bildanalyse, sondern nur durch ein Nachforschen in den tatsächlichen Einsatzbedingungen der Dichtung möglich.

4. Präventionsmaßnahmen

Vor allem konstruktiv gibt es viele Maßnahmen, um ein Überströmen einer Dichtung zu verhindern.

Eine der wichtigsten Stellschrauben ist die Verhinderung bzw. Einschränkung des Atmens von Spalten, allerdings ist dies meist mit einer Verstärkung der Bauteile verbunden, was wiederum Gewicht und Kosten erhöht. Hilfreich sind auch hochwertige Oberflächengüten, so wie bei dynamischen Dichtungen üblich. Dazu gehört die Wahl von Bearbeitungsverfahren für die Dichtflächen, die keine Querstrukturen bilden, also keine Kanäle für ein mögliches Überströmen schaffen. Außerdem sollte ein Druckaufbau hinter der Dichtung verhindert werden. An Plattenventilen kann man dies durch plane, aber raue ($R_t < 30 \mu\text{m}$) Oberflächen auf der Nutseite bewirken.¹² Ferner lässt sich die Dynamik des Druckaufbaus in manchen Einsatzfällen durch Drosselspalte vor der Dichtung reduzieren.

Dichtungstechnisch empfiehlt sich eine hohe Verpressung und in manchen Fällen sollten O-Ringe durch Sonderprofile ersetzt werden, die einige Dichtungshersteller anbieten, wie zum Beispiel Trapez-Dichtungen, einfache Rechteckringe bzw. Kantseals¹³, SAE-Flanschdichtungen oder als radial abdichtende Variante aus Polyurethan, sogenannte Dualseals. Durch zusätzliche, Noppen¹⁴, Kanäle oder Bohrungen in den Kunststoffdichtring (bei zweiteiligen Kolbendichtungen) wird eine konstante Druckaktivierung der Dichtung sichergestellt. Bei Ventilschaftdichtungen gibt es bspw. doppelwirkende Dichtungen¹⁵, die ein Überströmen verringern bzw. verhindern.

Werkstoffe mit einer guten Alterungsbeständigkeit ist der Vorzug zu geben, da diese über einen längeren Zeitraum ihre Elastizität und ihre initiale Dichtflächenpressung behalten. Wenn O-Ringe eingesetzt werden, sind möglichst dicke Schnurstärken zu empfehlen, welche längere Anlagenflächen besitzen, ohne die Nut zu überfüllen. Es sollten möglichst hohe Werkstoffhärten von 90 IRHD, M und höher gewählt werden, welche eine hohe initiale Dichtflächenpressung erzeugen. An Kolbendichtungen, welche aus einem Gleitelement und einem elastischen Vorspannelement bestehen, ist es wichtig, am Gleitelement radiale Nuten über den Umfang vorzusehen, um die Druckaktivierung des Vorspannelements, in der Regel ein O-Ring, sicherzustellen.

¹² HÄNBLER, R.: Ärger mit O-Ringen in Flansch- oder Anschlußplatten? In: O+P Ölhydraulik und Pneumatik, 17. Jg., Nr. 1, Jan. 1973, S. 16

¹³ Z.B. Kantseals von Trelleborg <https://www.tss.trelleborg.com/de-de/products-and-solutions/static-seals/kantseal> (Webseite abgerufen am 04.04.2020)

¹⁴ Z.B. „Pressure Pedestals on Dynamic Seal Profiles“ von Parker Hannifin (Webseite abgerufen am 25.03.2020): <https://www.parker.com/Literature/Engineered%20Polymer%20Systems/EP-Systems/EP-Systems-Tech-Tip-Pressure-Pedestals.pdf>

¹⁵ Z.B. Ventilschaftdichtungen mit Gegendruckklippe von Freudenberg Sealing Technologies: <https://www.fst.de/produkte/dynamische-dichtungen/ventilschaftdichtungen> und <https://www.automobilproduktion.de/produkte/ventilschaftdichtungen-gegen-blow-by-effekt-219.html> (Webseiten abgerufen am 25.03.2020)

5. Praxistipps (Prüfmöglichkeiten / Normempfehlungen)

Rechteckringe oder Trapezringe (mit zunehmender Profilhöhe zur Druckseite hin) sind O-Ringen als Flanschabdichtung gegenüber im Vorteil, wenn sie auch wie O-Ringe verpresst werden. Thermoplastischen Polyurethanwerkstoffen stehen hier in sehr harten Ausführungen zur Verfügung und können auch in kleinsten Stückzahlen wirtschaftlich hergestellt werden. HNBR-O-Ringe bzw. Dichtungen haben gegenüber NBR-Dichtungen eine erheblich bessere Alterungsbeständigkeit bei vergleichbar guten physikalischen Eigenschaften.

6. Sonstiges

Dieser Artikel erscheint in einer Kurzfassung in der Zeitschrift DICHT!, Ausgabe 02/2020.
Link zu den Digitalausgaben dieser Zeitschrift:

<https://dichtdigital.isgatec.com/de/profiles/1d1042c9c353/editions>

PRÜFLABOR

RICHTER