

Extreme Anwendungsfälle in der Dichtungstechnik

Dr.-Ing. J. Nosowicz und Dr.-Ing. D. Zeus, Wolfkratshausen

Zusammenfassung

Gleitringdichtungen mit einem den O-Ring ersetzenden Metallfaltenbalg als sekundärem Dichtelement sind aufgrund der verwendeten Werkstoffe zum Einsatz unter extremen Temperaturen geeignet. In Abhängigkeit von der Konstruktion, den Gleit- und Bauwerkstoffen kann ein Temperaturbereich von -200°C bis $+400^{\circ}\text{C}$ abgedeckt werden. An Beispielen aus dem Tief- und Hochtemperaturbereich wird die Einsatzbreite aufgezeigt.

Aufgrund der kompakten Bauweise, der gleichförmigen Federkraftverteilung sowie der nahezu hysteresefreien Federkennlinie sind Metallfaltenbalgdichtungen für hohe Gleitgeschwindigkeiten bei niederen Drücken geeignet.

Die für Metallfaltenbalgdichtungen typische Ausfallursache "Balgriß vorwiegend im Bereich des Mitnehmers" wird analysiert. Durch die Reduzierung des Spaltes zwischen Gleitringträger und Welle wird diese Ausfallursache ohne Eingrenzung des Einsatzbereiches beseitigt. Trockenlaufversuche und praktischer Einsatz bestätigen den Erfolg dieser Maßnahme.

Abstract

Mechanical seals equipped with metal bellows instead of an O-ring as a secondary seal are suitable for extreme temperatures. Depending on design, face and construction materials a temperature range from -200°C to 400°C is possible. Several cryogenic and high temperature examples are discussed.

Furtheron metal bellow seals are especially suitable for high speed and low pressure application due to compact structural shape, uniform spring loading and small hysteresis of the spring characteristic.

The failure typical of metal bellows seals, i.e. a ruptured metal bellow in most cases next to the bellows carrier, is analysed. By reducing the gap between seal face housing and shaft this failure can be excluded without limiting the operating range. Dry running tests and practical use confirmed the success of this solution.

Einleitung

Gleitringdichtungen mit einem Metallfaltensbalg als sekundärem Dichtelement werden seit vielen Jahren mit Erfolg als Wellendichtung eingesetzt. Durch die Verwendung des Metallfaltensbalges anstatt der üblichen O-Ringe können Mediumstemperaturen beherrscht werden, die weit außerhalb der Grenztemperaturen der Elastomere (Tabelle 1) liegen. Ferner sichert er die Funktion der Gleitringdichtung d.h. die Freigängigkeit des Gleitringes in Medien, die atmosphärenseitig zu Aufbackungen bzw. Ablagerungen neigen.

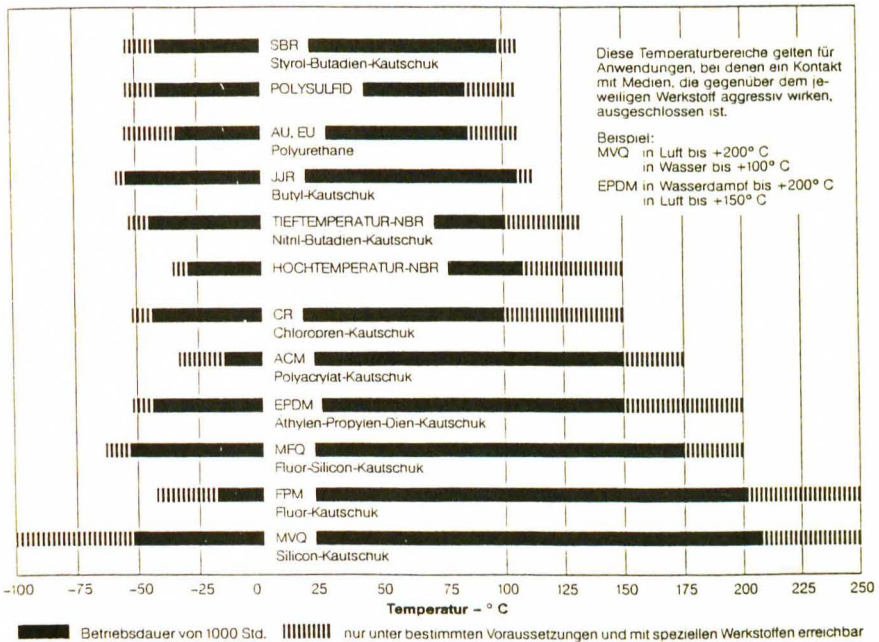


Tabelle 1 Temperaturbereich verschiedener Elastomer-Werkstoffe (Parker Druckschrift 5703G)

Table 1 Temperature limits of several elastomers (Parker-Report 5703G)

Trotz der Vorteile

- Ausdehnung des Temperatureinsatzbereiches
- Verringerung der Teilezahl
- Universeller Einsatz im Rahmen der chemischen Beständigkeit der verfügbaren Werkstoffe
- Eingebaute Entlastung

müssen bei Einsatz von Metallfaltenbalgdichtungen einige spezielle Nachteile, wie

- Begrenzter Druckeinsatzbereich
- Variabler hydraulischer Durchmesser
- Balgschwingungen

beachtet werden.

Im folgenden werden einige Anwendungsfälle beschrieben, die nur durch den Einsatz von Metallfaltenbalgdichtungen funktionssicher und wirtschaftlich gelöst werden können. Es werden aber auch einige für den Metallfaltenbalg typische Schäden aufgezeigt, die in Unkenntnis der Vorgänge im Dichtungsraum bei der Auslegung bzw. bei der Inbetriebnahme verursacht werden.

Anwendungsbeispiele

Tieftemperatureinsatz

Gleitringdichtungen mit einem O-Ring als dynamischer Sekundärdichtung können werkstoffabhängig bis zu den in Tabelle 1 angegebenen Minustemperaturen eingesetzt werden, für Silikonkautschuk z.B. bis - 50°C. Werden diese Grenztemperaturen unterschritten, so verspröden die Elastomere und blockieren den Gleitring.

Bei tieferen Temperaturen, z.B. Abdichten von flüssigem Sauerstoff, müssen deshalb Metallfaltenbalgdichtungen eingesetzt werden. Es sind in der Regel maßgeschneiderte Dichtungen.

Bei der in Bild 1 gezeigten einfachwirkenden Balgdichtung für LOX-Pumpen ist der Metallfaltenbalg stationär angeordnet. Das bei vereisten Gleitflächen über den Gleitring eingeleitete Losbrechmoment wird durch eine Verdrehsicherung am Dichtungsgehäuse abgestützt. Der Balg ist somit gegen unzulässige Torsionsbeanspruchung geschützt. Ein im Spannflansch integrierter Anschlag verhindert bei verschlissenen Gleitwerkstoffen metallischen Kontakt zwischen Gleitringträger und rotierendem Gegenring.

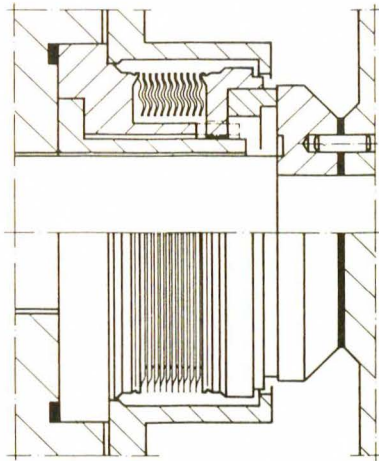


Bild 1 Metallfaltenbalgdichtung für LOX-Pumpen
 $t = -183^{\circ}\text{C}$; $p = 10 \text{ bar}$; $vg = 20 \text{ m/s}$

Fig. 1 Metal bellows seal for LOX-pumps

Hochtemperatureinsatz

Die Funktion von Gleitringdichtungen mit einem O-Ring als dynamischer Sekundärdichtung wird in heißen Medien durch

- und/oder Ablagerungen im O-Ring-Bereich (Bild 2)
- Versprödung der thermisch überlasteten Elastomere (Bild 3)

gefährdet. Diese Ausfallursachen werden durch den Einsatz von Metallfaltenbalgdichtungen vermieden.

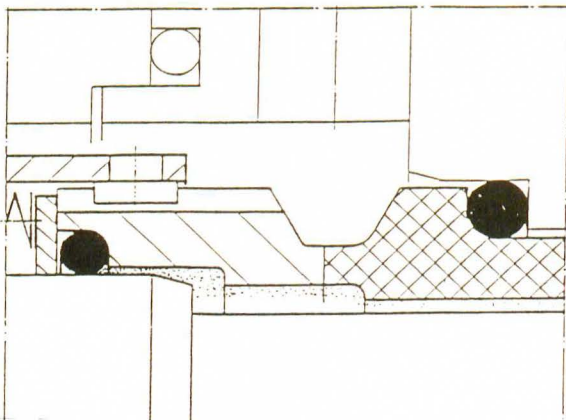


Bild 2 Ablagerungen im O-Ring-Bereich
 Fig. 2 Deposits in area of O-ring

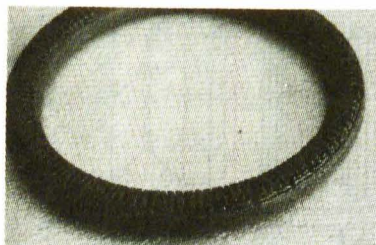


Bild 3 Thermisch überlasteter O-Ring
 Fig. 3 Thermally overstressed O-ring

Ein extremer Hochtemperatureinsatz ist z.B. die Abdichtung von Wärmeträgerölen. Die Gleitringdichtung wird bis zu 400°C belastet. Elastomere können bei diesen Bedingungen nicht eingesetzt werden, da sie in den meisten Wärmeträgerölen bereits ab ca. 100°C stark quellen. Mit PTFE und PTFE-ummantelten O-Ringen kann die Einsatzgrenze lediglich auf ca. 220°C angehoben werden.

Bei der Abdichtung von Diphyl ($t = 345^{\circ}\text{C}$) hat sich die in Bild 4 gezeigte Tandemanordnung bewährt.

Die Metallfaltenbalgdichtung ist produktseitig angeordnet. Sie wird von außen mit Produkt beaufschlagt. Der Balg ist rotierend angeordnet, mögliche Ablagerungen im Lamellenbereich werden deshalb abgeschleudert. Als Vorlageflüssigkeit wird kaltes Diphyl über eine Umlenk-
hülse unter die Metallfaltenbalgdichtung geleitet. Sie kühlt den Dichtflächenbereich und verhindert Ablagerungen zwischen den Lamellen. Die notwendige Zirkulation bewirkt ein Fördergewinde, das Bestandteil der atmosphärenseitigen Gleitringdichtung ist.

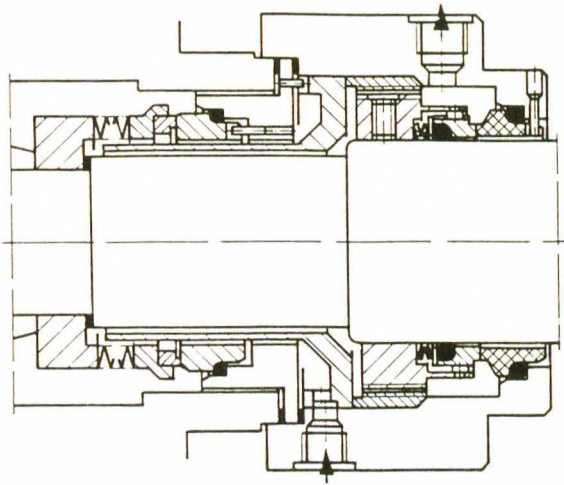


Bild 4 Dichtungssystem zur Abdichtung von Diphyl
 $t = 345^{\circ}\text{C}$; $p = 8 \text{ bar}$; $vg = 6 \text{ m/s}$
Fig. 4 Arrangement for sealing of diphyl

Hochgeschwindigkeitseinsatz

Die bei hohen Gleitgeschwindigkeiten im Dichtspalt von Gleitringdichtungen erzeugte Reibungswärme kann zum thermischen Zerfall des abzudichtenden Produktes bzw. des Sperrmediums führen. Bei konventionellen Gleitringdichtungen können sich diese Zerfallsprodukte im Bereich des dynamischen O-Ringes ablagern und die Nachsetzbewegung beeinträchtigen.

Metallfaltenbalgdichtungen werden dadurch in ihrer Funktion nicht gefährdet. Die Abdichtung von Mischgas mit einer doppelwirkenden Metallfaltenbalgdichtung zeigt Bild 5.

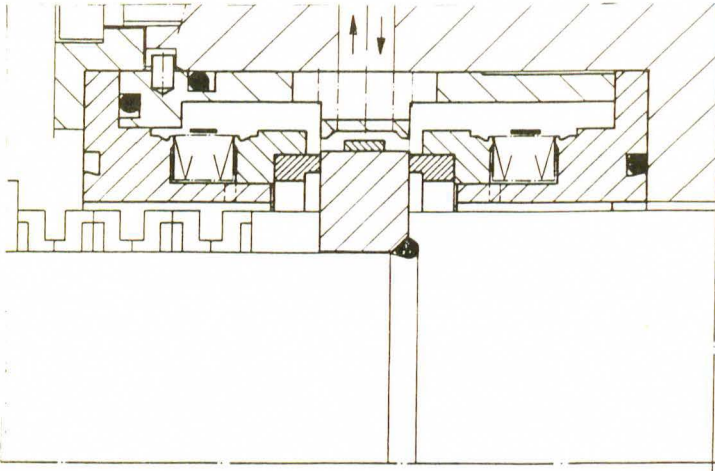


Bild 5 Metallfaltenbalgdichtung, doppelwirkend mit rotierendem Gegenring
 Medium: Mischgas
 Sperrmedium: Turbinenöl
 $p_1 = 16 \text{ bar}$; $p_3 = 20 \text{ bar}$
 $v_g = 84,6 \text{ m/s}$

Metal bellows seal, double acting with rotating counter face
 Medium: Mixed gas
 Bufferfluid: Turbine oil

Der Gegenring ist rotierend, die Gleitringe sind stationär angeordnet. Um den Balg beim Hochfahren des Verdichters mechanisch nicht zu überlasten, wird das auf den Gleitring wirkende Drehmoment über innenliegende Mitnehmer am Gehäuseflansch abgestützt. Ein Dämpfungsband umschlingt die Lamellen im Mittelbereich der Bälge.

Typische Schäden an thermisch extrem belasteten Metallfaltensbalgdichtungen

Trotz funktionsgerechter Auslegung und Anordnung können thermisch extrem belastete Metallfaltensbalgdichtungen bereits bei der Inbetriebnahme oder nach kurzen Laufzeiten mit hoher Leckage ausfallen. Nach erfolgter Demontage werden in der Regel Balgrisse im Bereich der Mitnehmer festgestellt (Bild 6). Diesem Schaden sind speziell bei Hart/Hart Paarungen häufig Kantenabplatzungen am Außendurchmesser der Gleitringe und am Innendurchmesser der Gegenringe überlagert (Bild 7 und 8).

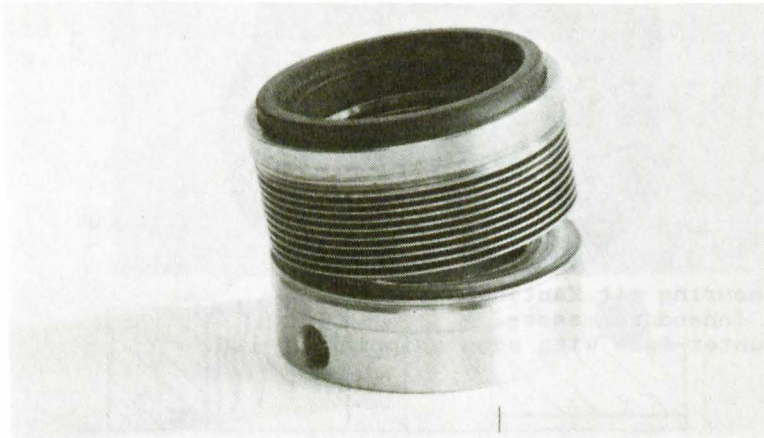


Bild 6 Metallfaltensbalg mit Balgriß
Fig. 6 Metal bellows with ruptured bellow



Bild 7 Gleitring mit Kantenabplatzungen
am Außendurchmesser

Fig. 7 Seal face with edge chipping at o.d.

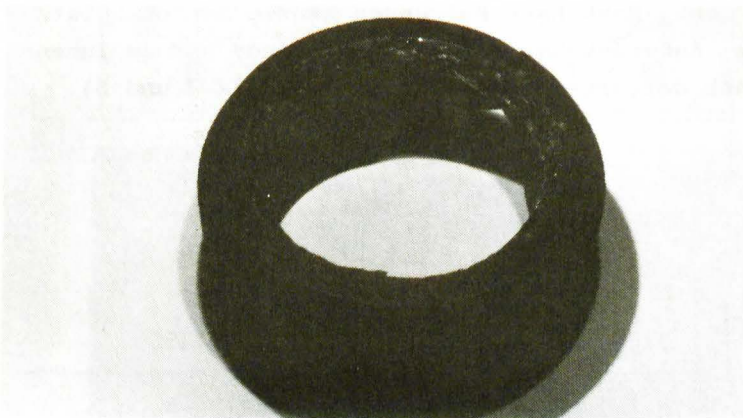


Bild 8 Gegenring mit Kantenabplatzungen
am Innendurchmesser

Fig. 8 Counter face with edge chipping at i.d.

Welche Eigenschaft der Metallfaltenbalgdichtungen führt zu diesen Schäden? Das Erscheinungsbild deutet auf eine dynamische und mechanische Überlastung der Metallfaltenbalgdichtung.

Im Vergleich zur Gleitringdichtung mit dem über einen O-Ring elastisch gelagerten Gleitring sind die Freiheitsgrade des Gleitringes einer Balgdichtung nahezu ungedämpft. Neben der axialen Bewegungsfreiheit kann er im Rahmen der Spaltabmessungen - Gleitringträger/Welle - radial ausgelenkt sowie um eine beliebige Querachse verkippt werden (Bilder 9,10 und 11). Aus dieser Bildfolge ergeben sich ferner die kritischen Beanspruchungspunkte.

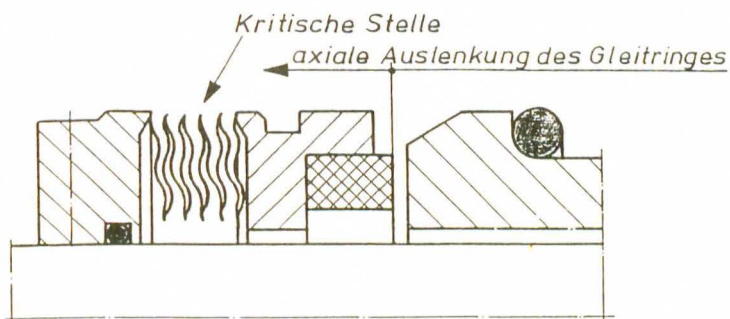


Bild 9 Balg mit axial bewegtem Gleitring
Fig. 9 Metal bellows with axially moved seal face

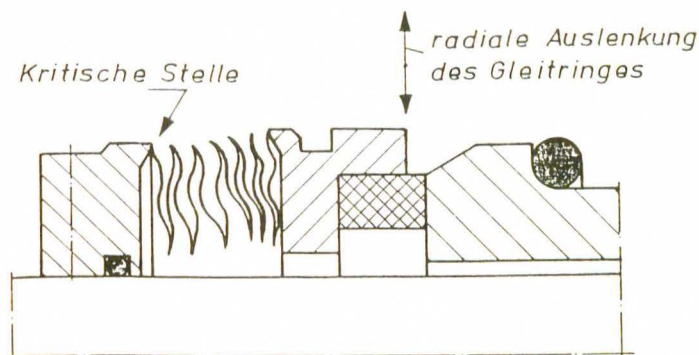


Bild 10 Balg mit radial ausgelenktem Gleitring
Fig. 10 Metal bellows with radially moved seal face

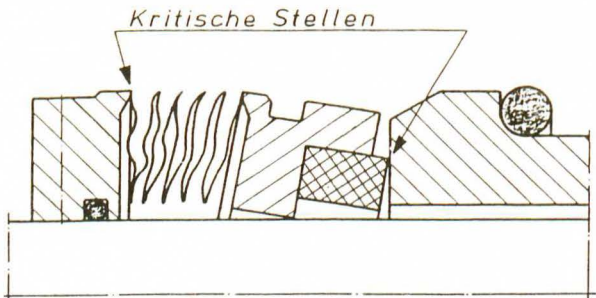
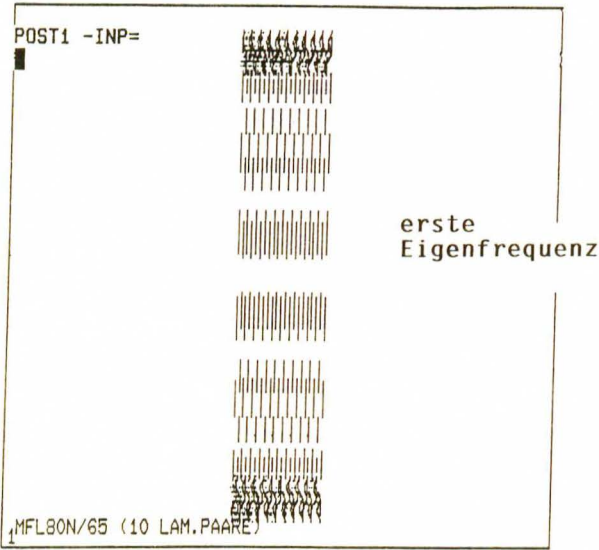


Bild 11 Balg mit um die Querachse verkipptem Gleitring
Fig. 11 Metal bellows with tilted seal face

Die Axialbewegung des Gleitringes kann abhängig von der Erregerfrequenz im Balg verschiedene Schwingungsformen hervorrufen. Das Ergebnis einer FE-Schwingungsanalyse zeigt Bild 12. Bei der 1. Eigenfrequenz schwingen die Lamellen parallel d.h. innerhalb einer Lamelle ist die Zug- oder die Druckbeanspruchung gleichförmig verteilt. Bei der 3. Eigenfrequenz hingegen wird die eine Hälfte des Lamellenpaares auf Zug, die andere auf Druck beansprucht.



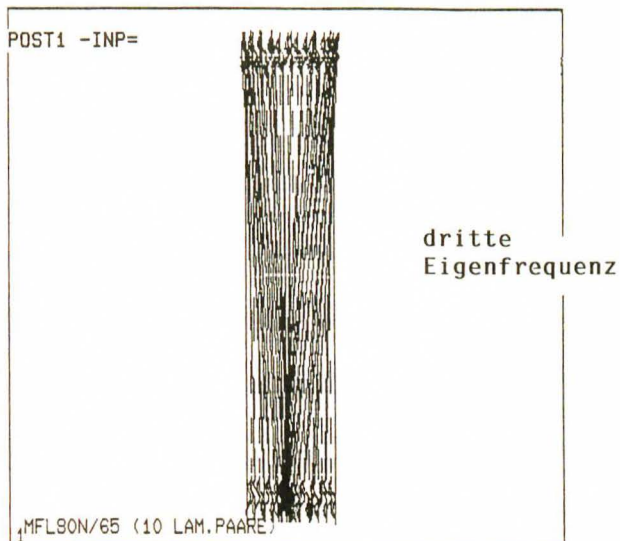
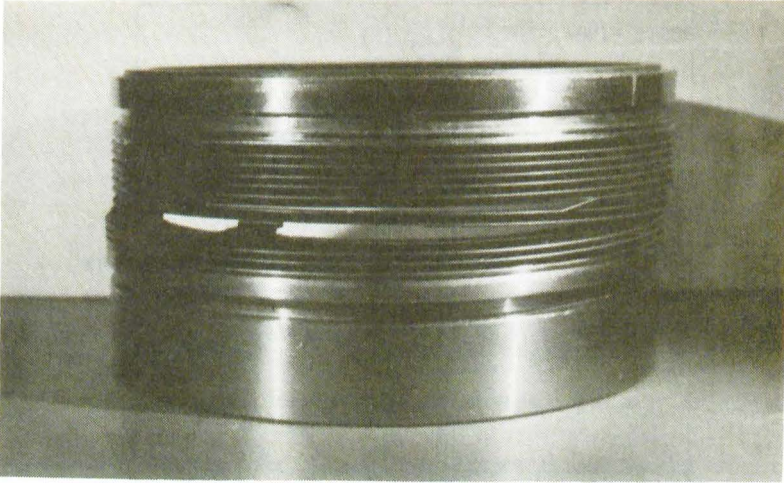


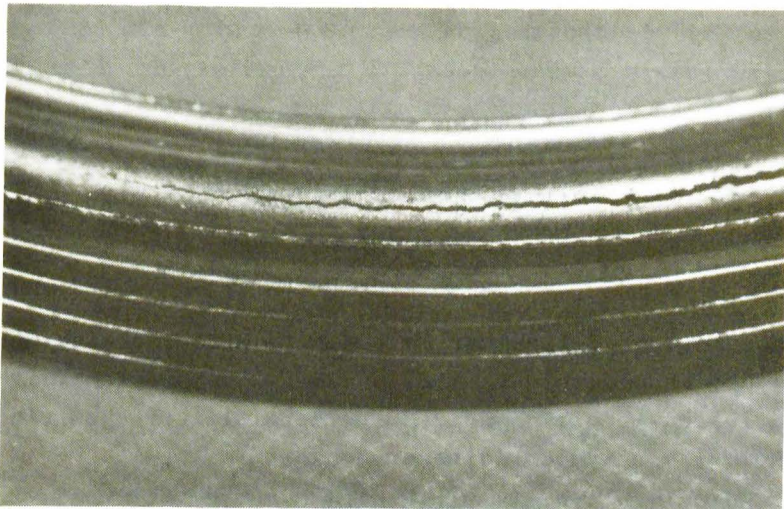
Bild 12 Eigenschwingungen eines Metallfaltenbalges
Fig. 12 Characteristic oscillations of metal bellows

Ermüdungsbrüche beliebiger Lamellen im Mittelbereich der Bälge und an beliebiger Stelle über die Lamellenbreite (Bild 13) sowie gleichmäßig zerrüttete Gleitflächen sind die Folge; ein jedoch seltener Schaden.

Eine wirksame Abhilfsmaßnahme bei stationärer Anordnung des Balges ist ein Dämpfungsband im Mittelbereich des Lamellenpaketes (Bild 5).



Riß im Mittelbereich des Balges



Riß im Mittelbereich der Lamellenbreite

Bild 13 Bruchstellen bei axialer Balgsschwingung

Fig. 13 Location of rupture due to axial oscillation

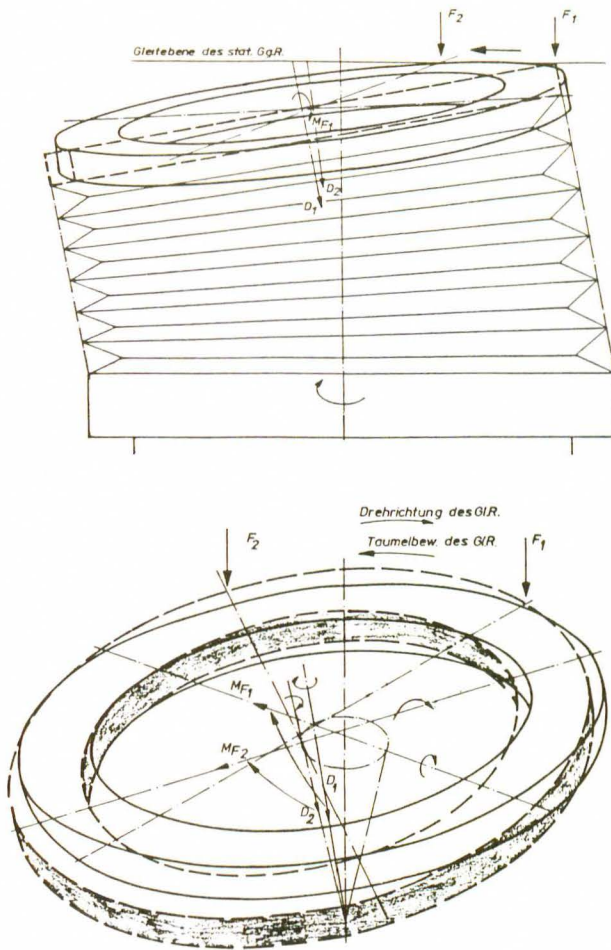


Bild 14 Durch Kreiseleffekt bewirkte Taumelbewegung
 Fig. 14 Wobble due to gyroscopic effect

Die radiale Auslenkung des Gleitringes ist aufgrund der hohen lateralen Balgsteifigkeit immer mit einem Verkippen des Ringes gekoppelt. Diese Störung belastet das am Mitnehmer angeschweißte Lamellenpaar mechanisch am stärksten und bewirkt dort den Balgriß (Bilder 6, 10 und 11). Durch den punktförmigen Gleitflächenkontakt wird der Gleitring am Außendurchmesser überlastet und bricht an der Kante aus. Im Extremfall wird dabei ein axial ungesicherter Gegenring aus seiner Einbaulage gedrückt und berührt am Innendurchmesser die Welle. Kantenabplatzungen bis zur Zerstörung sind die Folge.

Was verursacht die beschriebenen Auslenkungen und die dadurch hervorgerufenen Schäden? Eine Analyse der verbliebenen Gleitflächen, der Betriebsbedingungen sowie der InbetriebnahmeprozEDUREN deutet auf teilweisen bis vollkommenen Trockenlauf hin. Die Behinderung der Wärmeabfuhr z.B. durch mangelhafte Entlüftung des Dichtungsraumes und/oder die Betriebsweise nahe der Dampfdruckkurve führt im Dichtspalt zu einem Verdampfen der Flüssigkeit oder deren leichtsiedenden Komponenten. Der dadurch hervorgerufene Trockenreibungszustand, gekennzeichnet durch eine ungleichmäßige Kräfteverteilung im Dichtspalt, regt den Gleitring über den Stick-Slip-Effekt zu den geschilderten Auslenkungen an.

Bei der rotierenden Anordnung der Metallfaltenbalgdichtung wird durch die ungleichmäßige Kräfteverteilung zusätzlich ein Kreiseleffekt bewirkt (Bild 14). Dieser führt zu einem stabilen Taumeln des Gleitringes und zu einem konstanten Öffnen des Dichtspaltes.

Um den Verdacht "Trockenlauf als auslösende Größe" zu erhärten, wurden im Labor mehrere Metallfaltensalbdichtungen unter Trockenlaufbedingungen betrieben (Bild 15).

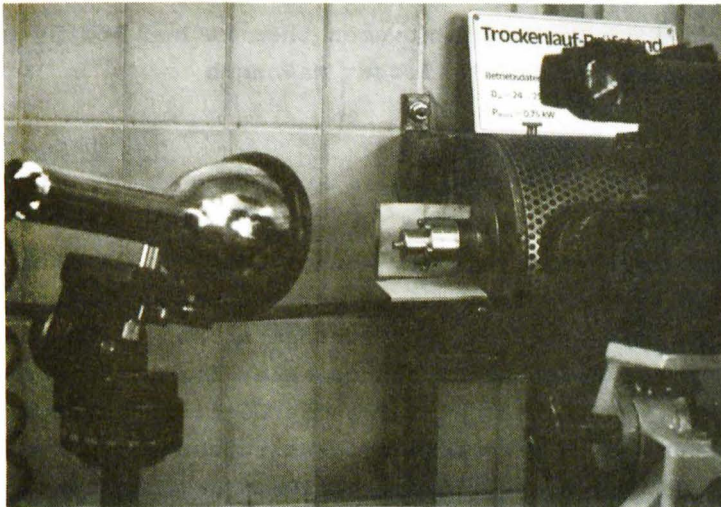


Bild 15 Prüfaufbau einer Metallfaltensalbdichtung,
Gleitwerkstoffpaarung: SiCSi/SiCSi
n = 3000 min⁻¹; Medium Luft

Fig. 15 Test set-up of metal bellows seal
SiCSi/SiCSi; n = 3000 rpm; medium: air

Nach jeweils relativ kurzen Laufzeiten hob der Gleitring mehrmals kurzzeitig vom Gegenring ab und im Balg traten Axialschwingungen auf. Aus diesem Zustand erfolgte der Übergang zur Taumelbewegung des Gleitringes. Im Extremfall wurde der Gegenring aus seiner Halterung gedrückt und rotierte zeitweise mit.

Dieser Ablauf war reproduzierbar. Der Schadensmechanismus war damit geklärt. Der trockenlaufbedingte Stick-Slip-Effekt im Dichtspalt regt den Gleitring zur Taumelbewegung an und führt zu Balgrissen im Bereich des Mitnehmers sowie zu beschädigten Gleit- und Gegenringen. Die Taumelbewegung muß deshalb gedämpft oder begrenzt werden.

Die einfachste und wirkungsvollste Lösung ist die Begrenzung des Schwingweges durch die Verringerung des Spaltes zwischen Gleitringträger und Welle. Der Temperatureinsatzbereich wird dadurch nicht eingeschränkt. Umfangreiche Trockenlaufversuche im Labor sowie der praktische Einsatz unter extremen thermischen Bedingungen bestätigten den Erfolg dieser Maßnahme.

Schlußfolgerung

Die Schwachstellenanalyse hat gezeigt, daß Metallfaltensalbdichtungen durch Trockenlauf zu Schwingungen angeregt werden, die Balgrisse und Schäden an den Gleit- und Gegenringen zur Folge haben können. Die Art und Größe der Auslenkung wird von dem durch die Gleitwerkstoffpaarung und das Medium gegebenen Trockenlaufzustand und der daraus resultierenden Kräfteverteilung im Dichtspalt, sowie von der axialen und lateralen Federkonstante beeinflußt.

Bei ungleichmäßiger Kräfteverteilung werden Balg und Gleitring seitlich ausgelenkt und zum Taumeln angeregt. Zusätzlich werden beim rotierenden Balg Kreiselkräfte wirksam, die das Taumeln und Öffnen des Dichtspaltes stabilisieren. Da trotz sorgfältiger Auslegung im Betrieb zeitweiser Trockenlauf auftreten kann, müssen die dadurch angeregten Auslenkungen gedämpft, bzw. begrenzt werden. Als einfache und wirkungsvolle Abhilfe hat sich dabei die Reduzierung des Spaltes zwischen Gleitringträger und Welle erwiesen. Diese Maßnahme hat sich im Versuch und praktischen Einsatz bewährt. Der Temperatureinsatzbereich der Metallfaltensalbdichtung von -200°C bis $+400^{\circ}\text{C}$ wird dadurch nicht eingeschränkt.