



**HETEROGEN AUFGEBAUTE
DICHTSYSTEME NACH
DEM REDURA® PRINZIP**

Dr. Norbert Feistel



Dr. Norbert Feistel studierte Allgemeinen Maschinenbau an der Universität Karlsruhe. 1987 Abschluss als Dipl.-Ing. (TH). 1988 Eintritt in die Abteilung Forschung und Entwicklung der Firma Burckhardt Compression, Winterthur, Schweiz. Hier ist er tätig als Fachspezialist für die Entwicklung trocken laufender Dichtsysteme für Prozessgas-Kompressoren. 2002 Promotion an der Universität Erlangen-Nürnberg mit einer Arbeit zum Betriebsverhalten trocken laufender Dichtsysteme von Kreuzkopfkompressoren.

Dichtsysteme werden häufig mit einer statischen und einer dynamischen Druckkomponente belastet. Umfangreiche Prüfstandversuche mit verschiedenen Dichtelementbauformen ergaben, dass die beiden Druckkomponenten deutlich unterschiedliche Wirkungen auf die Dichtelemente und das Betriebsverhalten des gesamten Dichtsystems haben. Folgerichtig sollte man hierfür auch heterogene Dichtsysteme verwenden, die aus mindestens zwei verschiedenen, für die Belastung mit der jeweiligen Druckkomponente optimierten Bauformen bestehen. Redura® Dichtsysteme erfüllen diese Forderung und bieten mit ihrem optimierten Aufbau im Vergleich zu konventionellen Dichtsystemen ein deutliches Plus an Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit.

KAPITEL 1

EINLEITUNG

Für die Realisierung einer einzelnen oder von mehreren Verdichtungsstufen an einer Kurbel bieten Kreuzkopfkpressoren eine Vielzahl an konstruktiven Alternativen. Damit einher geht aber auch ein breites Spektrum an Druckbelastungen für die zugehörigen Dichtsysteme. So können sich – abhängig von der Anordnung der Verdichtungsräume und vom jeweiligen Verdichtungsverhältnis – völlig unterschiedlich zusammengesetzte Druckdifferenzen ergeben. Diese reichen von einer rein dynamischen Druckbelastung über beliebige Kombinationen aus einer dynamischen und einer statischen Komponente bis zu einer ausschliesslich statischen Druckdifferenz. Entsprechend unterschiedlich ist auch das Betriebsverhalten dieser Dichtsysteme. Für die Konstrukteure stellt sich somit die Herausforderung, für die verschieden zusammengesetzten Beanspruchungskollektive jeweils ein

optimales Dichtsystem zu gestalten. Zur Bewältigung dieser Aufgabe gibt es heute eine grosse Auswahl an Dichtelementbauformen und eine nochmals grössere Anzahl an Dichtelementmaterialien aus den unterschiedlichsten Kunststoffcompounds. Nötig sind jedoch genaue Kenntnisse über das Verhalten der einzelnen Dichtelemente unter den unterschiedlich zusammengesetzten Beanspruchungskollektiven. Nur so ist die Auslegung eines leistungsfähigen und zuverlässigen Dichtsystems möglich.

KAPITEL 2

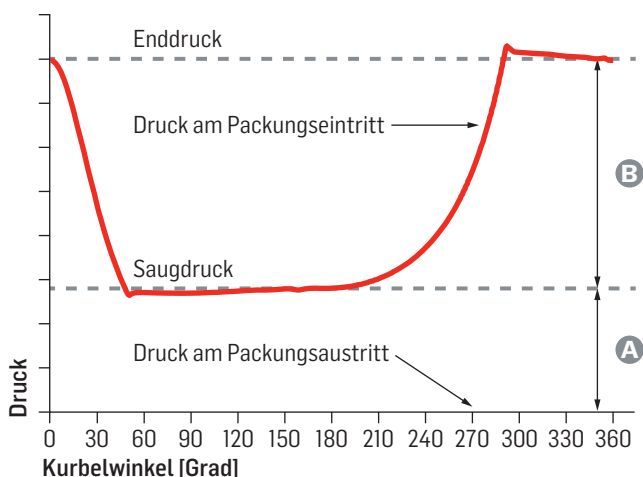
BEWERTUNG DER DRUCKBELASTUNG VON DICHTSYSTEMEN

Für die Bewertung der auf ein Dichtsystem wirkenden Druckbelastung ist es üblich, die gesamte über dem Dichtsystem anliegende Druckdifferenz zu bilden. Häufig wird dabei ihre Zusammensetzung aus dynamischer und statischer Druckkomponente kaum beachtet. Dies kann bei der Auslegung eines Dichtsystems fatale Konsequenzen haben, denn die beiden Druckkomponenten haben deutlich unterschiedliche Wirkungen auf die Dichtelemente und das Betriebsverhalten des gesamten Dichtsystems.

Charakteristisches Merkmal des Verdichtungsprozesses eines Hubkolbenkompressors ist die dynamische Druckkomponente. Sie ist der sich während einer Kurbelwellenumdrehung zwischen Null und einem Maximalwert ändernde Unterschied zwischen Verdichtungsdruck und Saugdruck. Wichtig ist hier der Maximalwert, definiert als die Differenz zwischen dem Verdichtungsdruck und dem Saugdruck der jeweiligen Verdichtungsstufe.

Die statische Druckkomponente ist die Differenz zwischen dem Saugdruck der betrachteten Verdichtungsstufe und dem konstanten Druck nach dem letzten Dichtelement. Dies kann der Umgebungsdruck oder der Saugdruck der gleichen oder einer niedrigeren Verdichtungsstufe sein. Die statische Druckkomponente hat eine konstante Wirkung während einer Kurbelwellenumdrehung. Abb. 1 zeigt die so definierten Druckkomponenten am Beispiel der Druckbelastung eines Kolbenstangendichtsystems (Packung). **Abb. 1**

Abb. 1
Aufteilung der Druckdifferenz in eine dynamische und eine statische Druckkomponente



- A** Statische Druckkomponente
- B** Dynamische Druckkomponente

Die theoretisch anmutende Trennung der Druckbelastung in eine dynamische und statische Druckkomponente hat einen realen Hintergrund. Denn dieser ist begründet in der Frage nach der Verteilung der Druckdifferenz über eine gegebene Anzahl an gasdichten Dichtelementen. Als "gasdicht" werden hierbei Bauformen mit einer vollständigen Abdichtung sämtlicher Stöße bezeichnet (d.h. in axialer und radialer Richtung). Solche Bauformen gelangen üblicherweise in den Packungen zum Einsatz.

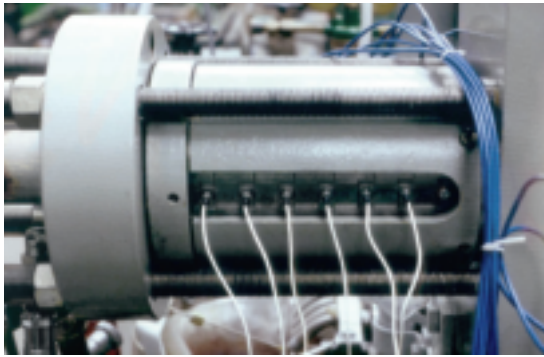
Für die Beantwortung dieser Frage werden bei Burckhardt Compression seit Anfang der neunziger Jahre ausführliche Versuche mit einem speziell ausgerüsteten Versuchskompressor durchgeführt¹. Dessen Tailrod-Packung erlaubt die Messung der Drücke und Temperaturen in den einzelnen Kammern sowie eine verlustfreie Messung der Packungsleckage. **Abb. 2**

In den mehr als zwanzig Jahren Versuchsbetrieb sind zahllose Packungskonfigurationen aus den unterschiedlichsten Bauformen und Materialien untersucht worden. Dabei hat sich für den Neuzustand der Dichtsysteme gezeigt, dass die gängigen, berührungsfrei arbeitenden Drosselringe nur sehr wenig beitragen zur Abdichtung der dynamischen Druckkomponente, so dass ihr wesentlicher Anteil nahezu vollständig vom ersten, unmittelbar zum Verdichtungsraum angeordneten gasdichten Dichtelement übernommen wird. Hingegen hängt die Position der statischen Druckkomponente bei der Inbetriebnahme eines neuen Dichtsystems von vielen Einflussgrößen ab, wie beispielsweise Bauform, Unterschiede in der Fertigungsqualität oder Abweichungen von der optimalen Einbaulage. So kann bei Dichtelementen mit einer besonders aufwendigen Stossabdichtung sowohl der dynamische als auch der statische Druckanteil nur das erste reibende Dichtelement belasten und dieses dadurch überbeanspruchen. Diese ungünstige Belastung eines einzelnen Dichtelements muss durch eine geeignete Auslegung des Dichtsystems sicher vermieden werden. Vorzugsweise wird jedoch das letzte Dichtelement am Packungsausstritt mit der statischen Druckkomponente belastet. **Abb. 2**

Mit fortschreitendem Verschleiss wandert die dynamische Druckkomponente dann weiter in die Packung hinein. Dabei kommt es durch Drosselung zu ihrer ungleichmässigen Verteilung über mehrere Dichtelemente hinweg. Die statische Druckkomponente wechselt vollständig oder teilweise zwischen den übrigen Dichtelementen hin und her, wobei die Aufteilung auf mehrere Dichtelemente nicht stabil bleibt. Die bevorzugte Position für die statische Druckkomponente ist jedoch das letzte Dichtelement. Als typisches Merkmal wurde somit die Aufteilung der beiden Druckkomponenten auf die beiden Enden des Dichtsystems festgestellt. Diese Eigenschaft erlaubt eine getrennte Betrachtung der unterschiedlichen Wirkungen der beiden Druckkomponenten auf die jeweils belasteten Dichtelemente.

Abb. 2

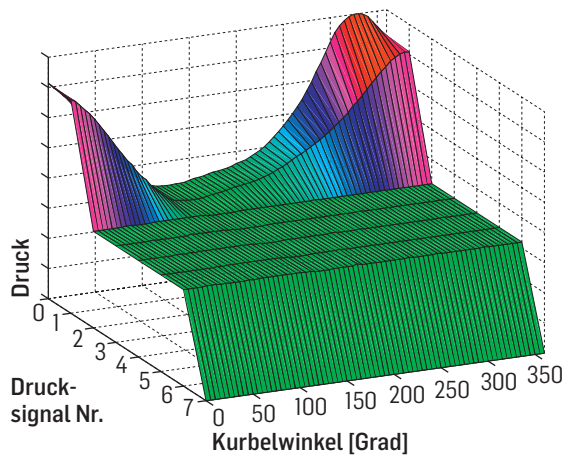
Messung der Drücke in den Kammern einer Versuchspackung zur Bestimmung der Belastung der einzelnen Dichtelemente



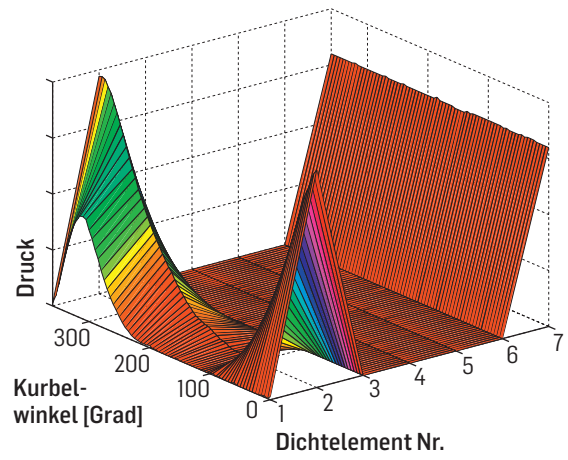
Messung an der Versuchspackung



Querschnitt einer typischen Packung



Gemessene Druckverläufe



Berechnete Druckdifferenzen

KAPITEL 3

UNTERSCHIEDLICHE WIRKUNGEN DER DYNAMISCHEN UND DER STATISCHEN DRUCKKOMPONENTE

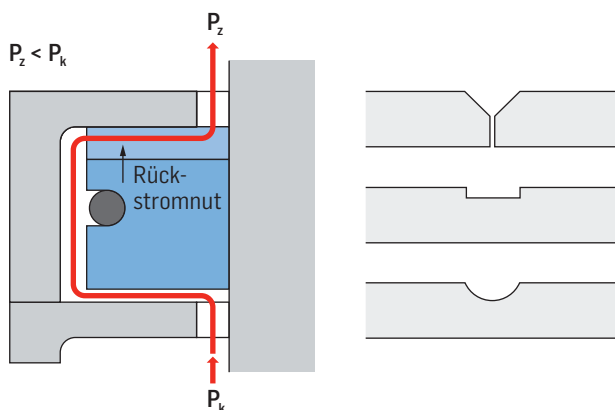
Viele in der Praxis als widersprüchlich erscheinende Beobachtungen zum Betriebsverhalten von Dichtsystemen sowie bei der Zustandsanalyse von eingesetzten Dichtelementen werden verständlicher, wenn man sich die Zusammensetzung der jeweils wirkenden Druckbelastung etwas genauer ansieht. Die unterschiedliche Wirkung der dynamischen und der statischen Druckkomponente auf das Betriebsverhalten eines Dichtsystems lässt sich sehr anschaulich anhand der Leckage sowie dem Verschleissverhalten der einzelnen Dichtelemente aufzeigen.

3.1 EINFLUSS AUF DIE LECKAGE

Durch die Leckagen zwischen den einzelnen Dichtelementen eines Dichtsystems entstehen bei der Belastung mit einem sich zeitlich ändernden Druckverlauf auch Druckdifferenzen in Richtung des Verdichtungsraums. So steigt während der Verdichtungsphase der Druck in den unmittelbar auf den Verdichtungsraum folgenden Dichtelementkammern auf Werte oberhalb des Saugdruckniveaus an und kann – abhängig von Verschleisszustand der Dichtelemente – nahezu den Verdichtungsdruck erreichen. Sinkt der Druck im Zylinder dann wieder in Richtung des Saugdrucks, kommt es zu einer Druckentlastung zurück in den Verdichtungsraum. Die Rückströmung des in den Dichtelementkammern zwischengespeicherten Gases lässt sich durch sogenannte Druckausgleichs- oder Rückströmnuten noch erheblich verbessern, so dass die Dichtelemente in dieser Phase nahezu keine Dichtwirkung besitzen und daher auch keinen Verschleiss zeigen. Rückströmnuten werden üblicherweise direkt an den Dichtelementen angebracht, und zwar auf der dem

Abb. 3

Rückströmung des in den Dichtelementkammern zwischengespeicherten Gases durch Druckausgleichs- oder Rückströmnuten



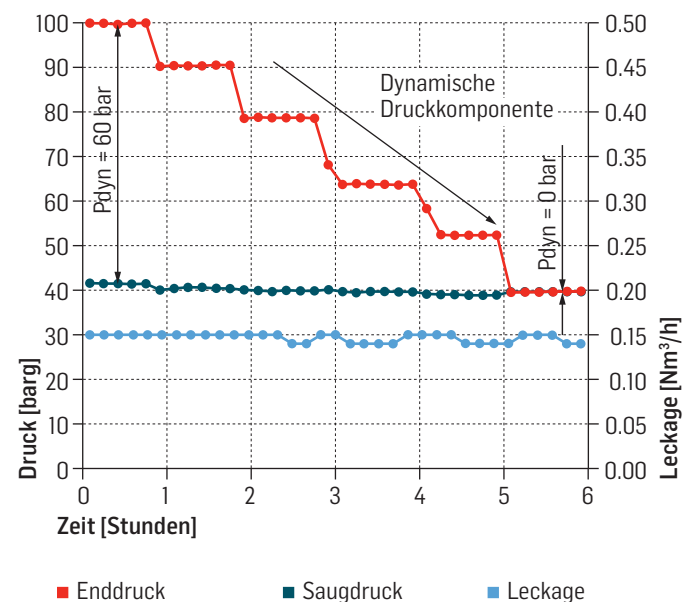
P_z = Druck im Zylinder
 P_k = Druck in den Dichtelementkammern

Verdichtungsraum zugewandten Seite in Form von runden oder rechteckförmigen radialen Kanälen oder im Bereich der Segmentenden in Form von dreieckförmigen Fasen. Können die Rückströmnuten bauart- oder bauraum-bedingt nicht in das Dichtelement integrieren werden, ist alternativ auch eine Einarbeitung direkt in die Dichtelementkammern möglich. **Abb. 3**

Der dynamische Druckanteil lässt sich daher über Rückströmnuten während des Saughubs wieder in den Verdichtungsraum abbauen und übt so keinen Einfluss auf die Leckage aus. Dies zeigen anschaulich die in einer Versuchsreihe gemessenen Leckagewerte. Bei der Versuchsreihe wurde, ausgehend von einem Saugdruck von 40 barg und einem Enddruck von 100 barg, der Enddruck stufenweise reduziert, bis schliesslich nur noch eine rein statische Druckbelastung in Höhe des Saugdrucks bestand. Während der gesamten Versuchsdauer war keine nennenswerte Reaktion der Leckage auf die Änderungen des dynamischen Druckanteils zu beobachten. Somit ist die statische Druckdifferenz die leckagebestimmende Grösse des Beanspruchungskollektivs. **Abb. 4**

Abb. 4

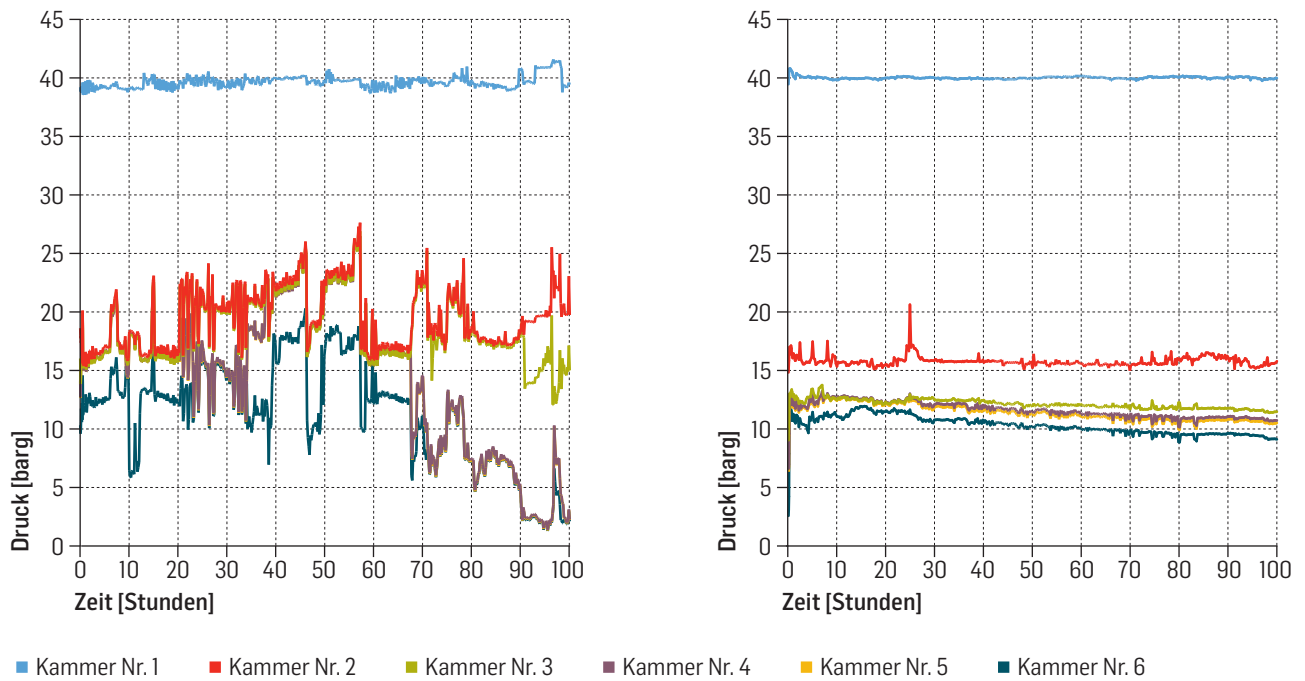
Einfluss einer stufenweisen Reduktion der dynamischen Druckkomponente auf die Leckage einer Packung



Der Abbau der dynamischen Druckkomponente zurück in den Verdichtungsraum wirkt sich auch positiv auf die Stabilität der Druckverteilung innerhalb des Dichtsystems aus. Deutlich zeigen dies Versuche mit zwei Packungen aus je sechs Packungsringen mit und ohne Rückströmnuten. Werden Dichtelemente ohne Rückströmnuten verwendet, so wandert der dynamische Druckanteil ebenfalls in Richtung des Packungsaustritts und verursacht dabei eine instabile Belastung der einzelnen

Abb. 5

In den Kammern gemessene Drücke für zwei Packungen mit je sechs Dichtelementen mit Rückströmnuten (rechts) und ohne Rückströmnuten (links)



Packungselemente (Abb. 5, links). Diese instabile Druckverteilung führt zu Rotations- und Translationsbewegungen der Dichtelemente und in der Folge zu Schäden an den Dichtelementen sowie den Kammern. In der Packung mit Rückströmnuten sind hingegen die Bedingungen wesentlich stabiler (Abb. 5, rechts). **Abb. 5**

3.2 EINFLUSS AUF DEN VERSCHLEISS

Umfangreiche Tests mit verschiedenen Ausführungen von Packungsdichtelementen ergaben, dass die dynamische und statische Druckkomponente in Abhängigkeit von der Bauform zu unterschiedlichem Verschleissverhalten führt, obwohl die untersuchten Dichtelemente jeweils aus dem gleichen Material gefertigt waren¹. Bezieht man den mittleren Verschleiss der Dichtelemente auf die während der Versuchsdauer wirksame mittlere Druckdifferenz sowie auf den gesamten zurückgelegten Reibweg, erhält man eine Kenngröße, die dem in der Tribologie gebräuchlichen Verschleisskoeffizienten ähnlich ist.

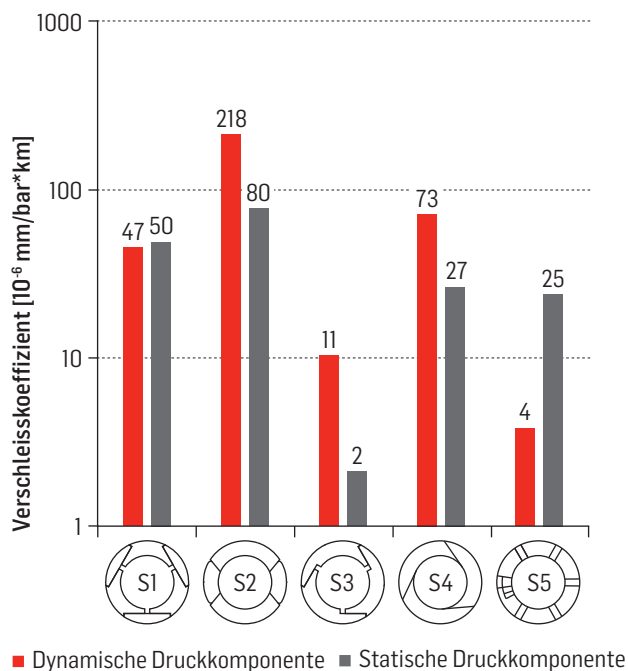
Abb. 6 zeigt für einige untersuchte Bauformen die so ermittelten Verschleisskoeffizienten für dynamische und statische Druckbelastung. Auffällig ist hier vor allem die ausgeprägte Empfindlichkeit der untersuchten segmentierten Bauformen (S1 bis S4) auf die dynamische Druckkomponente, während die einteilige Bauform (S5) diese Belastung deutlich besser erträgt. **Abb. 6**

Wie zuvor gezeigt, hat die dynamische Druckkomponente bei einem Dichtsystem aus intakten, gasdichten Dichtelementen keinen Einfluss auf die Leckage. Sie führt aber dennoch – insbesondere an segmentierten Packungsringen – zu hohem Verschleiss, Bruchversagen und/oder Fließen der Dichtelemente. Die eigentlichen Dichtelemente müssen daher durch eine Barriere aus sogenannten Druckbrecherringen über die gesamte Betriebsdauer hinweg sicher vor der zerstörenden Wirkung der pulsierenden Druckbelastung geschützt werden. Wie bereits erwähnt, wird diese Anforderung bei den Packungen von einem einzelnen, berührungsfrei arbeitenden Drosselring bei weitem nicht erfüllt, so dass der Grossteil der dynamischen Druckkomponente die eigentlichen Dichtelemente belastet. Abhängig von Dichtelementbauform und -material kann dies bereits bei einer niedrigen bis mittleren Belastung die Standzeit des Dichtsystems erheblich reduzieren. Ab einem kritischen Wert ruft die dynamische Druckkomponente dann jedoch schwere Schäden an den Dichtelementen hervor, die gar den Frühausfall des Dichtsystems zur Folge haben können.

Versuche mit unterschiedlich aufgebauten Packungen aus je sechs Dichtelementen aus einem PTFE/PPS-Polymerblend unter zwei verschieden hohen Druckbelastungen in einem trocken laufenden Wasserstoffverdichter zeigen dies eindrücklich. So führt bei einer Packung aus sechs Dichtelementen mit tangentialem Stufenschnitt (Pinguinring, Redura® RS310) bereits eine Belastung durch einen Saugdruck von $P_s = 14$ barg und einem Enddruck von $P_d = 40$ barg nach einer Betriebsdauer von 500 Stunden zu einem erhöhten Verschleiss an dem unmittelbar am Verdichtungsraum angeordneten ersten Pinguinring (Abb. 7, links). Wird die dynamische Druckkomponente von 26 bar auf 60 bar gesteigert ($P_s = 40$ barg, $P_d = 100$ barg), kommt zu einer erheblich ansteigenden Verschleissrate noch Bruchversagen im Stossbereich der ersten drei Dichtelemente hinzu, so dass der Versuch nach 264 Stunden aufgrund hoher Leckage vorzeitig abgebrochen werden musste (Abb. 7, rechts). **Abb. 7**

Abb. 6

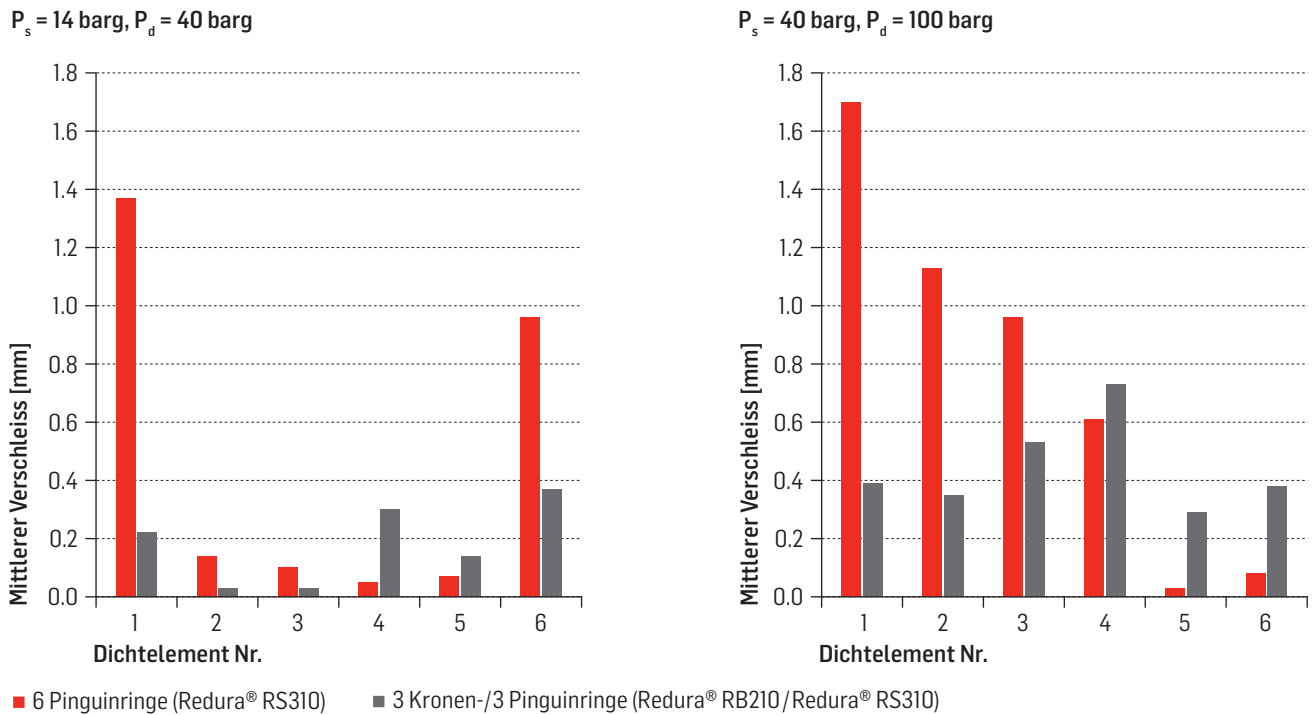
Verschleisskoeffizienten verschiedener Dichtelement-Bauformen unter dynamischer und statischer Druckbelastung



Werden die ersten drei Pinguinringe durch eine für die dynamische Druckkomponente geeignetere Bauform ersetzt, wie beispielsweise den Kronenring (Redura® RB210)², erhält man eine heterogen aufgebaute Packung. Der im Vergleich zum Pinguinring weniger dichte Kronenring ist für die Belastung mit der dynamische Druckkomponente robuster gestaltet und besitzt eine verschleissreduzierende Druckentlastungsnut. Mit dieser Packungskonfiguration lässt sich der auf 500 Stunden angelegte Versuch problemlos ohne Bruchversagen absolvieren.

Abb. 7

Verschleisswerte für eine homogene (6 Pinguinringe) und eine heterogene Packung (3 Kronen-/3 Pinguinringe) unter zwei verschiedenen Belastungen

**KAPITEL 4****DICHTSYSTEMOPTIMIERUNG DURCH HETEROGENEN AUFBAU**

Die unterschiedliche Wirkung der dynamischen und der statischen Druckkomponente auf das Betriebsverhalten des gesamten Dichtsystems sowie auf den Verschleiss der verschiedenen Dichtelementbauformen ermöglicht die Optimierung von Dichtsystemen. Hierzu werden Dichtelemente benötigt, die für die unterschiedlichen Wirkungen der beiden Druckkomponenten besonders geeignet sind. Für die Belastung mit der dynamischen Druckkomponente sind dies vor allem robuste, nicht notwendigerweise sehr dichte Bauformen, die eine Druckverteilung über mehrere Dichtelemente erlauben. So wird die Überlastung eines einzelnen Dichtelements durch die gleichzeitige Belastung mit beiden Druckkomponenten vermieden; dies ist ein wichtiger und positiver Nebeneffekt. **Abb. 8**

Abhängig vom Betrag und dem Anteil der beiden Druckkomponenten an der gesamten Druckdifferenz ist ein unterschiedlich grosser Bauaufwand erforderlich. Bei niedrigen bis mittleren Belastungen sind gängige Standarddichtelemente ausreichend, die bereits über die entsprechenden Eigenschaften verfügen und für den speziellen Einsatz in einem heterogenen Dichtsystem lediglich optimiert werden. So erhalten beispielsweise Kolbenringe mit einem überlappten Stoss besonders grosse Radien im Bereich des Stossübergangs, um dadurch das Risiko des Bruch-

versagens im Betrieb zu minimieren³. Bei anspruchsvollen Belastungen werden dann speziell hierfür entwickelte Dichtelemente eingesetzt, die sich in ihrer konstruktiven Ausführung deutlich von den gängigen, universell verwendeten Bauformen unterscheiden. Diese können in einzelnen Fällen zusätzlich noch konstruktive Massnahmen am Dichtelementgehäuse erfordern. So haben sich beispielsweise bei einfach wirkenden Kolben für den Schutz der eigentlichen Dichtringe vor der dynamischen Druckdifferenz sogenannte gefangene Kolbenringe ausserordentlich gut bewährt⁴.

Auch für doppelt wirkende Kolben ist der Einsatz heterogen aufgebauter Dichtsysteme sinnvoll. Zwar werden bei der doppelt wirkenden Verdichtung die Kolbendichtelemente lediglich durch die zwischen Saug- und Enddruck variierende dynamische Druckkomponente belastet, während die statische Druckdifferenz aufgrund des gleichen Saugdrucks auf beiden Seiten des Kolbens entfällt. Eine grosse Herausforderung ist hier jedoch, das Überströmen des Kolbens von einem Verdichtungsraum zum anderen zu verhindern, weil das zu einem Abfall der Fördermenge bei gleichzeitig ansteigenden Temperaturen führen würde. Auch hier haben sich Dichtelemente mit einer leistungsfähigen Stossabdichtung bewährt, die eine hohe Dichtwirkung über eine möglichst lange Betriebsdauer sicherstellen und in der Kolbenmitte positioniert sind. Vor der dynamischen Druckkomponente sind sie geschützt durch robust ausgeführte Kolbenringe, die in unmittelbarer Nähe zu den Verdichtungsräumen angeordnet werden.

Abb. 8
Verteilung der dynamischen Druckkomponente über mehrere Dichtelemente einer heterogen aufgebauten Packung (rechts) im Vergleich zu einem konventionellen Dichtsystem (links)

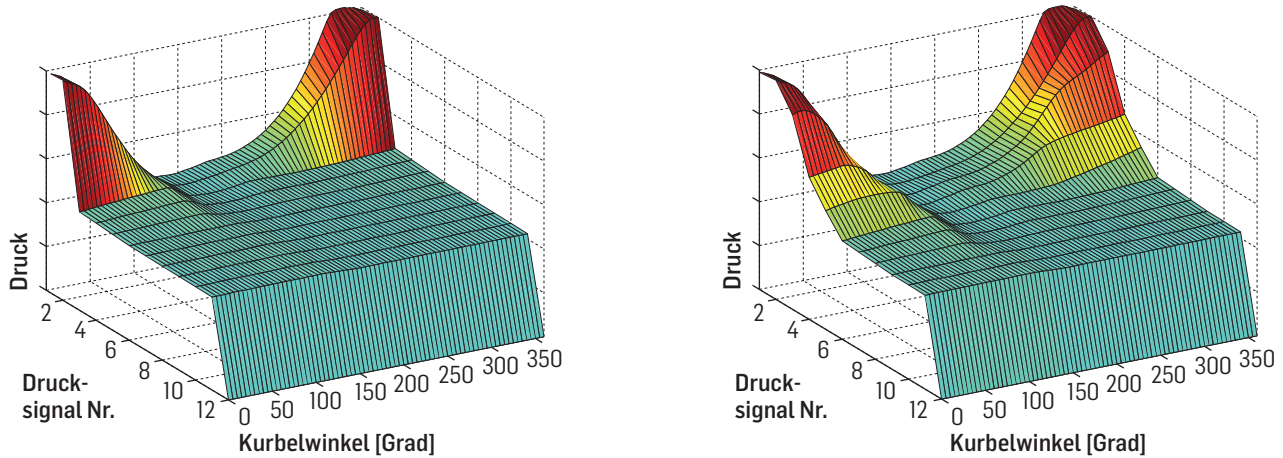
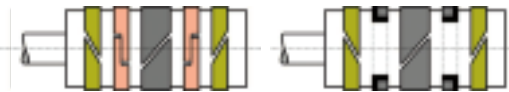
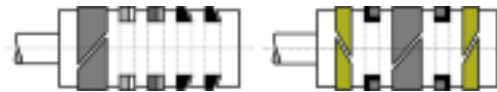


Abb. 9
Heterogen aufgebaute Redura® Dichtsysteme für einfach und doppelt wirkende Kolben sowie für Packungen

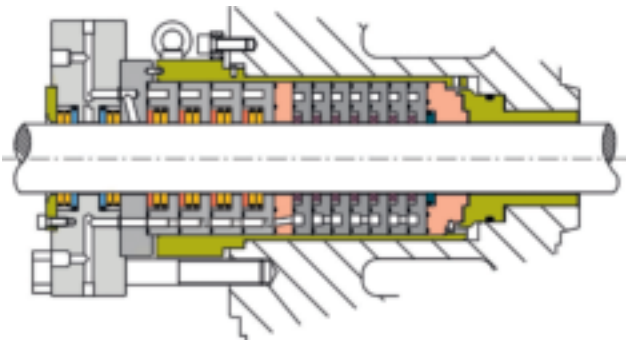
Doppelt wirkende Kolben



Einfach wirkende Kolben



Packungen



Gelingt es, den dynamischen Druckanteil möglichst lange und vollständig von den eigentlichen Dichtelementen fern zu halten, so lässt sich ihr vorzeitiger Ausfall durch Bruchversagen vermeiden. Die erreichbare Standzeit des gesamten Dichtsystems hängt nun neben vielen anderen Einflussgrößen vor allem auch von der Fähigkeit seiner Dichtelemente zur Verschleisskompensation ab. Diese dient dem Aufrechterhalten des Reibkontakts trotz fortschreitenden Materialabtrags. Die Konstruktionsvorgabe für die mit der statischen Druckkomponente belasteten Dichtelemente ist also, eine möglichst hohe Ausnutzung der radialen Ringabmessung als Verschleissweg bei gleichzeitig konstanter Dichtwirkung zu erzielen. Neue Konzepte für die Verschleisskompensation basieren auf dem Verschieben von Ringkomponenten

statt auf ihrer elastischen/plastischen Deformation⁵. Dies erlaubt auch die Verwendung von Materialien, die für eine hohe Biegebeanspruchung nicht geeignet sind, und erweitert so zudem die Auswahl an Dichtelementmaterialien. Die darauf fokussierte Weiterentwicklung erlaubt eine zukünftige Erweiterung des Produktportfolios: Dichtelemente mit verbesserten Verschleisseigenschaften bei höchster Dichtwirkung.

Die statische Druckkomponente ist aber auch für die Auslegung der Dichtsysteme eine wichtige Größe. Da es nicht gelingt, sie stabil auf mehrere gasdichte Dichtelemente aufzuteilen, muss ihr Wert mit der maximal zulässigen Belastung eines einzelnen Dichtelements verglichen werden. Neben der zulässigen

Tab. 1

Dynamische und statische Druckkomponenten für vier verschiedenen Dichtsysteme mit jeweils einem Enddruck von 100 barg

Dichtsystem	Saugdruck [barg]	Stat. Druck nach dem letzten Dichtelement [barg]	Dynamische Druckkomponente [bar]	Statische Druckkomponente [bar]
Doppelt wirkender Kolben	40	40	60	0
Einfach wirkender Kolben	40	16	60	24
Packung, normaler Betrieb	40	0	60	40
Packung, Recycle-Betrieb	90	0	10	90

mechanischen Belastung ist hier vor allem auch die durch das Dichtelement erzeugte Reibleistung wichtig. Wird hier ein von einer Vielzahl an Einflussgrößen abhängiger Grenzwert überschritten, gelingt es nicht mehr, die Reibwärme aus den Dichtflächen abzuführen; das Dichtsystem wird thermisch zerstört. Damit ist die maximal zulässige statische Druckkomponente vor allem für trocken laufende Dichtsysteme ein wichtiges Auslegungskriterium. Allerdings wird es in der Praxis häufig gegenüber der gesamten Druckdifferenz vernachlässigt. Tab. 1 zeigt hierzu beispielhaft die beiden Druckkomponenten von vier verschiedenen Dichtsystemen, die alle einen Verdichtungs- enddruck von 100 barg haben. Ausgehend von einem doppelt wirkenden Kolben, bei dem die statische Druckkomponente entfällt, steigt sie bis zu einem Wert von 90 bar für eine Packung im Recycle-Betrieb an. Solche Recycle-Stufen dienen nicht primär der Druckerhöhung, sondern fördern beispielsweise Gas, das noch nicht reagiert hat, zurück in einen Reaktor. Während die statischen Druckkomponenten der drei übrigen Dichtsysteme im Trockenlauf noch keine grosse Herausforderung darstellen, kann der hohe Wert von 90 bar für viele Dichtsysteme auf der Basis von gefülltem PTFE bereits eine Überlastung darstellen. Trotz des gleichen Enddrucks zeigen diese Dichtsysteme daher erhebliche Unterschiede in ihrem Betriebsverhalten, die bei ihrer Auslegung berücksichtigt werden müssen. Abb. 9 zeigt schematisch dargestellt verschiedene Konfigurationen heterogen aufgebauter Dichtsysteme für einfach und doppelt wirkenden Kolben sowie für unterschiedliche Packungsausführungen. **Tab. 1, Abb. 9**

Nomenklatur

P_{dyn}	Dynamische Druckkomponente
PTFE	Polytetrafluorethylen
PPS	Polyphenylensulfid
P_s	Saugdruck
P_d	Enddruck
P_z	Druck im Verdichtungsraum
P_k	Druck in der Dichtelementkammer

Literatur

- 1 Vetter, G.; Feistel, N.: **Betriebsverhalten trocken laufender Kolbenstangen-Dichtsysteme von Kreuzkopfkompressoren** Industriepumpen + Kompressoren 4, 2002, S. 198–205
- 2 Feistel, N.: **Standzeitverbesserung von Kolbenstangen-Dichtsystemen durch den Einsatz druckentlasteter Dichtelemente** Industriepumpen + Kompressoren 3, 2006, S. 144–149
- 3 Feistel, N.: **Einfluss der Kolbenringbauform auf die Fördermenge eines trocken laufenden Wasserstoffverdichters** Industriepumpen + Kompressoren 1, 2004, S. 18–23
- 4 Feistel, N.: **Zehn Jahre erfolgreicher Einsatz von TID-Kolbenringen bei hohen Druckdifferenzen** Industriepumpen + Kompressoren 2, 2010, S. 75–82
- 5 Feistel, N.: **Performance improvement of dry-running sealing systems by optimization of wear compensation** 9th EFRC Conference, 2014, S. 239–247

**REDURA® RINGE &
PACKUNGEN ZEICHNEN
SICH AUS DURCH**



MAXIMALE DAUER ZWISCHEN
SERVICEINTERVALLEN
BEI GERINGSTER LECKAGE



HÖCHSTE VERFÜGBARKEIT



NIEDRIGSTE
LEBENSZYKLUSKOSTEN

KOMPRESSORKOMPONENTEN

MAXIMALE LEISTUNG UND
LÄNGSTE LEBENSDAUER

Ventile

Redura® Ringe und Packungen

Regelungssysteme

Hauptkomponenten

Komponenten für Labyrinth-
kolben-Kompressoren

Komponenten für Hyper/
Sekundär-Kompressoren

SERVICE

DAS GESAMTE SPEKTRUM

Burckhardt Ventilservice

Ersatzteillogistik

Kundendienst

Technische Beratung

Umbauten und
Modernisierungen

Komponentenreparaturen

Zustandsüberwachung und
Diagnose

Schulungen

Burckhardt Compression AG

CH-8404 Winterthur

Switzerland

Tel.: +41 (0)52 262 55 00

Fax: +41 (0)52 262 00 51

24-Stunden-Notfalltel.: +41 (0)52 262 53 53

aftersales@burckhardtcompression.com

www.burckhardtcompression.com

Ihr lokaler Kontakt