



**STEIGERUNG DER  
EINSATZGRENZEN VON  
PTFE-BASIERTEN  
DICHELEMENTEN**

Dr. Inga Olliges-Stadler / Dr. Norbert Feistel

PTFE hat mittlerweile in der Dichtungstechnologie einen festen Platz im unteren Druckbereich. Dieser Druckbereich ist durch die mangelnde mechanische Stabilität begrenzt, weswegen bei mittleren bis hohen Drücken auf teurere Hochtemperaturpolymere zurückgegriffen werden muss. Problematisch ist allerdings ihre niedrigere Chemikalienbeständigkeit, und es sind härtere Gegenlaufmaterialien nötig.

Das neu entwickelte Persisto® 870 steigert die Einsatzgrenzen von PTFE-basierten Dichtelementen zu höheren Drücken, was sich aus mehreren Gründen lohnt. Die Chemikalienbeständigkeit PTFE-basierter Materialien ist hervorragend und der Grundpreis deutlich geringer als der von Hochtemperaturpolymeren wie beispielweise PEEK. Ausserdem lassen sich PTFE-basierte Dichtelemente mit kostengünstigeren Gegenlaufmaterialien wie Grauguss anstelle von Nitrierstahl oder Wolframcarbidge-schichteten Stählen betreiben.



**Dr. Inga Olliges-Stadler** studierte Chemie an der Universität Tübingen und schloss 2007 als Diplomchemikerin ab. 2007-2011 promovierte sie an der ETH Zürich im Departement für Materialwissenschaft über die Bildungsmechanismen metalloxidischer Nanopartikel. Bis 2015 arbeitete sie an der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Winterthur auf dem Gebiet der Polymeren Beschichtungen. Seit 2015 ist sie bei Burckhardt Compression AG für die Entwicklung von Kunststoffmaterialien tätig.



**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.

---

## EINLEITUNG

Im Kolbenkompressor ermöglichen Dicht- und Führungsringe aus trocken laufenden Kunststoff-Compounds innerhalb zulässiger Grenzen die Gasverdichtung ohne zusätzliche Schmiermittel wie Öl oder Fett. In dieser Funktion haben die hierfür geeigneten Kunststoffe die Trockenlaufmaterialien auf der Basis Kohle/Graphit nahezu vollständig abgelöst.

Auch in ölgeschmierten Kompressoren kommen heute mehrheitlich Dichtelemente aus Kunststoff zum Einsatz. Lediglich bei sehr hohen Drücken werden noch Metalle wie Grauguss oder Bronze verwendet. Die Dominanz der Kunststoffe gegenüber den Metallen basiert nicht nur auf den tribologischen Eigenschaften für solche Anwendungen. Dass bei fehlerhafter Schmierung primär die Dichtelemente verschleissen, die Gegenauflfläche hingegen schadenfrei bleibt, ist ein weiterer wichtiger Vorteil bei der Verwendung von Kunststoffen als Dichtelementmaterial. Dies erlaubt den risikominimierten Betrieb mit einer gegenüber Metallringen deutlich reduzierten Schmierrate.

Der bekannteste Kunststoff für die Verwendung als Dichtelementmaterial ist das Polytetrafluorethylen (PTFE), das umgangssprachlich meist als Teflon bezeichnet wird. PTFE bietet für die Anwendung als Dichtelement viele positive Eigenschaften.

### KAPITEL 1

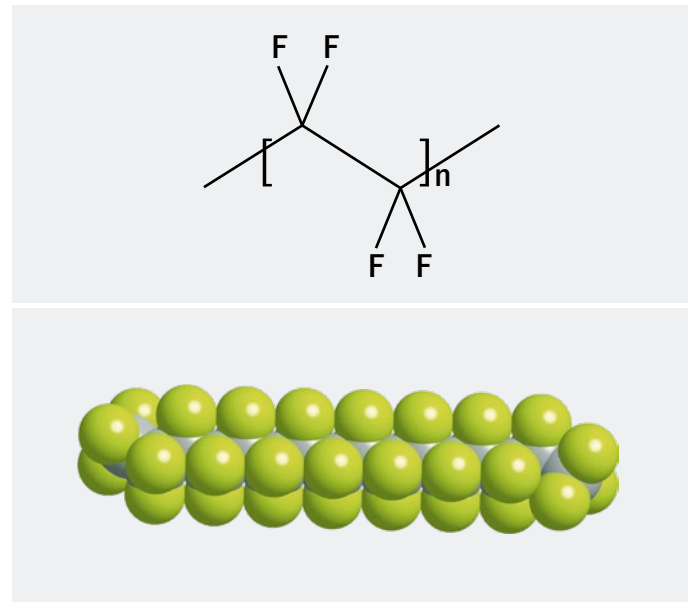
## EIGENSCHAFTEN VON PTFE UND IHRE BEEINFLUSSUNG<sup>1</sup>

PTFE ist ein teilkristalliner Kunststoff, bestehend aus Kohlenstoff (C) und Fluor (F) mit extrem langen linearen Molekülketten ( $n$  bis  $10^6$ ). Der molekulare Aufbau von PTFE mit seinen Kohlenstoffketten, die komplett von einer Fluorschicht umgeben sind, bedingt die charakteristischen Eigenschaften wie z.B. den hohen Schmelzpunkt, die extrem hohe Chemikalienbeständigkeit und die niedrige Oberflächenspannung, und er ermöglicht im Reibkontakt sehr niedrige Reibkoeffizienten. Die niedrige Oberflächenspannung bewirkt eine sehr geringe Adhäsion von PTFE zu anderen Materialien, weshalb PTFE häufig als Antihaft-Material eingesetzt wird. Das führt aber gleichzeitig zu Problemen mit dem Benetzen, Verkleben oder Verschweissen von PTFE. Die langen Molekülketten von PTFE zeigen nur sehr geringe intermolekulare Wechselwirkungen und können dadurch in den kristallinen Bereichen sehr leicht voneinander abgleiten. Dies führt zu unerwünschtem Kaltflussverhalten (Kriechen). **Abb. 1**

Zur Verringerung des Kaltflusses und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften wird PTFE in mechanisch belasteten Teilen gewöhnlich nicht in reiner Form, sondern verstärkt mit Füllstoffen eingesetzt. Vielfach werden hierfür die kostengünstigen Glasfasern verwendet, ebenso aber auch Kohlenstoff- oder Aramidfasern und andere Füllstoffe wie Kohle, Graphit, Molyb-

**Abb. 1**

Strukturformel und Molekülmodell von PTFE.



dändisulfid, Bronzepartikel etc. Für die Anwendung in Dichtmaterialien müssen die Füllstoffe sorgfältig hinsichtlich der äusseren Bedingungen wie Gas, Druck, Trockenlauf oder Ölschmierung sowie Gegenlaufpartner etc. ausgesucht werden. Beispielsweise verursachen Glasfasern bei weichen Gegenlaufpartnern im Trockenlauf erhebliche Schäden durch Abrasivverschleiss, oder Graphit kann seine schmierende Wirkung in sehr trockenen Gasen nicht entfalten. Im Idealfall lassen sich durch die Kombination der verschiedenen Füllstoffe für den jeweiligen Anwendungsfall mechanisch und tribologisch optimierte Dichtungsmaterialien erzeugen.

Eine grosse Herausforderung bei der Verbesserung der Kriechfestigkeit von PTFE ist die Anbindung der Füllstoffe an die Matrix, die aufgrund der niedrigen Oberflächenspannung von PTFE im Wesentlichen auf einer mechanischen Verankerung beruht. Die Verbindung von Füllstoffen zu einer PTFE-Matrix kann entweder über physikalische Verankerung oder durch chemische Haftvermittler verbessert werden. So zeigen z.B. Fasern oder polymere Füllstoffe mit einer rauen Oberfläche eine bessere Haftung zur PTFE-Matrix. Chemische Haftvermittler verwendet man unter anderem bei Glasfasern, die üblicherweise für unterschiedliche polymere Grundstoffe mit einem entsprechenden Haftvermittler funktionalisiert werden. Eingesetzt als Dichtungsmaterial in Kolbenkompressoren, können allerdings chemische Haftvermittler zu unerwünschten Reaktionen führen. Die entsprechenden Ringe sind dann nicht mehr universell, z.B. für den Betrieb in Sauerstoff, verwendbar. Auch das Aufrauen der Füllstoffoberflächen zur besseren Haftung in der Matrix ist für tribologisch hochbeanspruchte Teile wie Dichtungselemente nicht immer ausreichend.

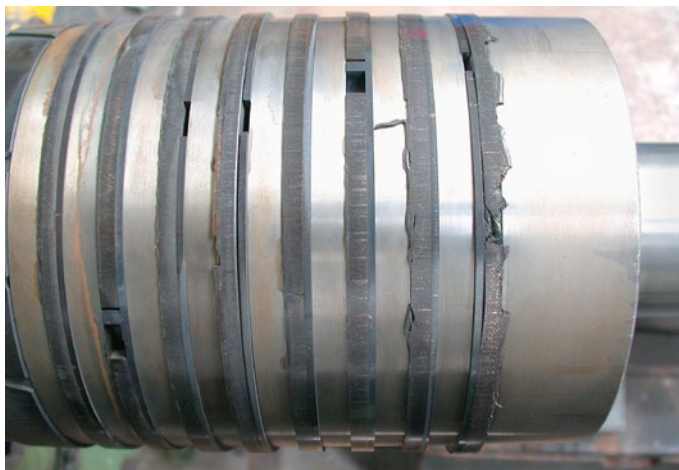
## KAPITEL 2

## EINSATZGRENZEN VON GEFÜLLTEM PTFE IM KOLBENKOMPRESSOR

Im Trockenlauf wird der Einsatz von gefüllten PTFE-Materialien vor allem durch eine hohe Verschleissrate und/oder durch hohe Temperaturen infolge einer hohen Reibleistung begrenzt. In ölgeschmierten Anwendungen hingegen sind – eine korrekte Schmierung vorausgesetzt – Verschleiss und Reibung auf niedrige Werte reduziert. Hier begrenzt jedoch vor allem das oben beschriebene Kriechverhalten unter Druck- und Temperaturbelastung den Einsatz. Im Kolbenkompressor werden Dichtelemente aus gefüllten PTFE-Materialien daher meist nur im Druckbereich deutlich unter 200 bar verwendet. Zulässige Einsatzgrenzen sind auch deshalb schwer zu definieren, weil die Temperatur die Kriechfestigkeit erheblich beeinflusst. Aussagen zur mittleren Temperatur der einzelnen Dichtelemente im Betrieb sind nur unzureichend genau möglich. Werden Grenzen überschritten, kann es zum Fließen von Ringmaterial in den Spalt zwischen Kolben und Zylinder oder zwischen Kammerscheibe und Kolbenstange kommen. Im Extremfall führt dies zum vollständigen Versagen des Dichtsystems. Konstruktiv wird versucht, dem Fließen von gefüllten PTFE-Dichtelementen durch möglichst grosse Querschnitte und gegebenenfalls durch Stützringe aus Metall oder einem Hochtemperaturpolymer zu begegnen. Dennoch lassen sich mit Dichtelementen aus gefülltem PTFE bei Weitem nicht die im Kolbenkompressor vorhandenen Druckbereiche abdecken. **Abb. 2**

**Abb. 2**

Fließen von Kolbenringen aus gefülltem PTFE in den Spalt zwischen Kolben und Zylinder.



## KAPITEL 3

## HOCHTEMPERATURPOLYMERE ALS ALTERNATIVE

Bieten gefüllte PTFE-Materialien keine ausreichende Betriebssicherheit mehr, verwendet man heute meist Hochtemperaturpolymere. Solche Werkstoffe wie beispielsweise die Polyimide, die Polyaryletherketone oder die Polyphenylensulfide zeichnen sich im Vergleich zu PTFE durch höhere Werte für die Warmfestigkeit aus. Ein für die Dichtelemente im Kolbenkompressor weitverbreitetes Kunststoff-Compound ist Polyetheretherketon (PEEK) in der Ausführung als so genanntes „Bearing Grade“. Gängige Füllstoffe eines solchen Bearing Grade-PEEK sind PTFE, Graphit und Kohlenstofffasern, häufig mit einem Anteil von je 10 Gew.-%. Die mechanischen Eigenschaften eines so modifizierten PEEK-Materials im Vergleich zu einem mit Kohle/Graphit gefüllten PTFE-Materials sind beachtlich. So liegt beispielsweise seine Zugfestigkeit bei einer Temperatur von 250 °C mit 18 MPa immer noch höher als die des mit Kohle/Graphit gefüllten PTFE-Materials bei Raumtemperatur mit nur 10 MPa<sup>2</sup>. In der Praxis kommen daher Dichtelemente aus solchen Materialien in ölgeschmierten Kompressoren bis zu Drücken von über 500 bar zum Einsatz.

Das hohe Elastizitätsmodul sowie die geringe Zähigkeit von Bearing Grade-PEEK wirken sich jedoch nachteilig aus bei der Montage der Dichtelemente, bei der Belastung mit dynamischem Druck und bei der Verschleisskompensation. Die meist hohe Steifigkeit von Ringen aus diesem Material behindert ein möglichst gleichmässiges und vollständiges Anliegen an die Dichtflächen, was die Leckage erhöhen kann. Zudem kann dieser Werkstoff trotz seiner prinzipiellen Trockenlauffähigkeit bei weichen Gegenlaufkörpern, wie beispielsweise Grauguss, Schäden durch Abrasivverschleiss hervorrufen. Einige Dichtelementhersteller empfehlen daher eine Mindesthärte von 40 bis 50 HRC für den Gegenlaufkörper.

Die Fluorpolymere sind in Bezug auf die Chemikalienbeständigkeit den Hochtemperaturpolymeren weit überlegen. PTFE weist eine nahezu universelle Chemikalienbeständigkeit auf und kann daher in fast allen Prozessgasen eingesetzt werden. Eine Ausnahme bilden fluorkohlenwasserstoffhaltige Kühlmittel. Die Hochtemperaturpolymere PEEK, PI oder PPS müssen hingegen sehr genau auf ihre Chemikalienbeständigkeit im jeweiligen Prozessgas hin überprüft werden.

Schliesslich ist zu bedenken, dass Hochtemperaturpolymere im Vergleich zu den gängigen gefüllten PTFE-Materialien etwa drei- bis fünfmal teurer sind. Das liegt nicht nur an den deutlich höheren Compoundkosten, sondern auch an den aufwendigeren Verfahren zur Halbzeugherstellung wie Drucksintern oder heissisostatischem Pressen (HIP). Hingegen sind bei kostengünstigeren Herstellverfahren wie Spritzguss oder Extrusion die Halbzeuge auf niedrige Durchmesser beschränkt.

KAPITEL 4

**FLUORPOLYMERE MIT VERBESSERTEN KALTFLUSSEIGENSCHAFTEN**

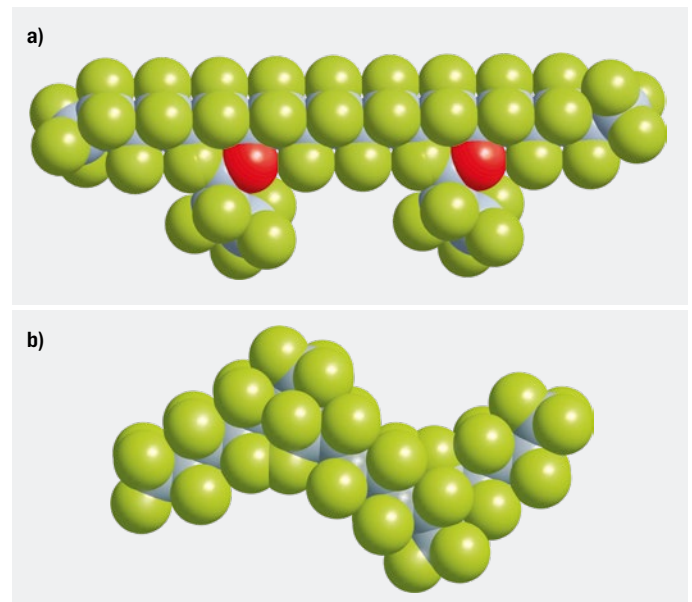
Neben der Verwendung von Füllstoffen zur Reduktion des Kaltflusses, kann auch das PTFE selbst chemisch so modifiziert werden, dass es weniger kriecht. Die Einführung von Seitenketten reduziert zum einen die Kettenlänge deutlich und stört zum anderen wirkungsvoll die Kristallisation. Dadurch verkleinern sich die kristallinen Bereiche, und der Kaltfluss verringert sich.

Die Seitenketten werden über Comonomere bei der Synthese eingefügt, wobei industriell hauptsächlich Perfluorpropylvinylether in PFA oder modifiziertem PTFE und Hexafluorpropylen in FEP Anwendung finden. Bei einem Comonomeranteil von  $\leq 1\%$  wird das Produkt als modifiziertes PTFE bzw. PTFE-Homopolymer bezeichnet, mit einem Anteil von  $> 1\%$  als PTFE-Copolymer (z.B. PFA und FEP)<sup>3</sup>. Die kleineren Molekülmassen im Vergleich zu PTFE führen zu niedrigeren Schmelzviskositäten; deshalb sind PFA und FEP, im Gegensatz zu PTFE, wie klassische Thermoplaste in der Schmelze verarbeitbar. **Abb. 3**

Je nach verfügbarer Verarbeitungsmethode lässt sich der Kaltfluss nicht nur durch Füllstoffe, sondern auch durch die Verwendung eines anderen Fluorpolymers oder einer Mischung reduzieren. Zu beachten ist aber, dass je nach Art und Konzentration der Comonomere sowohl die Temperaturstabilität als auch die Chemikalienbeständigkeit herabgesetzt werden können. So liegen die Temperatureinsatzgrenzen für PTFE bei 260 °C, die von PFA bei 240 °C und die von FEP nur noch bei 205 °C.

Die Beurteilung von Compounds für die Eignung als Dichtelementmaterial fällt mitunter schwer, da in der Literatur gewöhnlich Daten zu mechanischen Eigenschaften aus Zugversuchen angegeben werden. In Kolbenkompressoren sind die Materialien aber hauptsächlich Druckbelastungen ausgesetzt. Deswegen sind

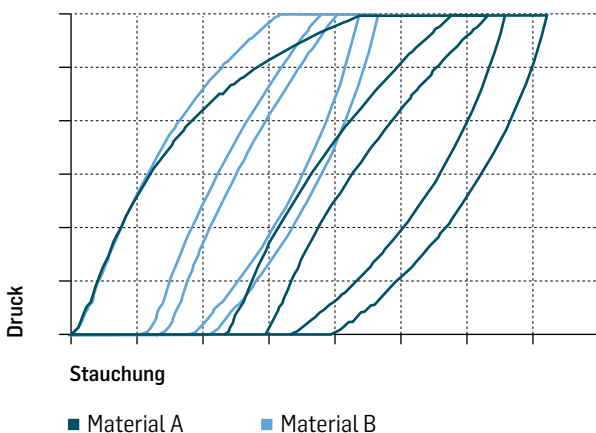
**Abb. 3**  
Molekülmodell von a) PFA und b) FEP.



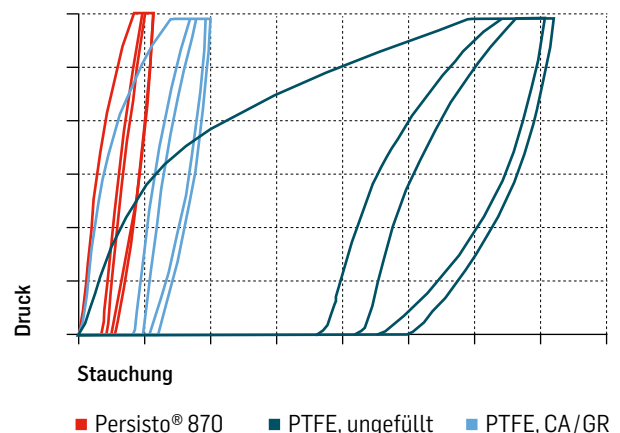
Kennzahlen aus Druckversuchen deutlich aussagekräftiger für ihre Eignung als Dichtelemente. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel von zwei Materialien, die sich im Zugversuch kaum, im Druckversuch hingegen deutlich unterschiedlich verhalten. Im Kompressortestlauf schneidet das Material mit den besseren Druckeigenschaften signifikant besser ab. **Abb. 4**

Das neu entwickelte Persisto® 870, das sowohl hinsichtlich der Polymermatrix als auch der Füllstoffe auf geringen Kaltfluss und höherer Steifigkeit bei gleichbleibend niedrigem Abrasivverhalten hin optimiert wurde, schneidet im Druck-Kriechversuch deutlich besser ab als das für diese Anwendungen bisher benutzte Kohle / Graphit gefüllte PTFE. **Abb. 5**

**Abb. 4**  
Druck- / Kriecheigenschaften zweier Materialien mit annähernd gleichen Zugeigenschaften. Zugfestigkeit Material A / B = 9.5 MPa, Bruchdehnung Material A = 6.2% und Material B = 7.1%.



**Abb. 5**  
Druck- / Kriecheigenschaften von Persisto® 870 im Vergleich zu ungefülltem PTFE und Kohle / Graphit-gefülltem PTFE.



## KAPITEL 5

## ERWEITERUNG DES EINSATZBEREICHS VON FLUORPOLYMEREN IM KOLBENKOMPRESSOR

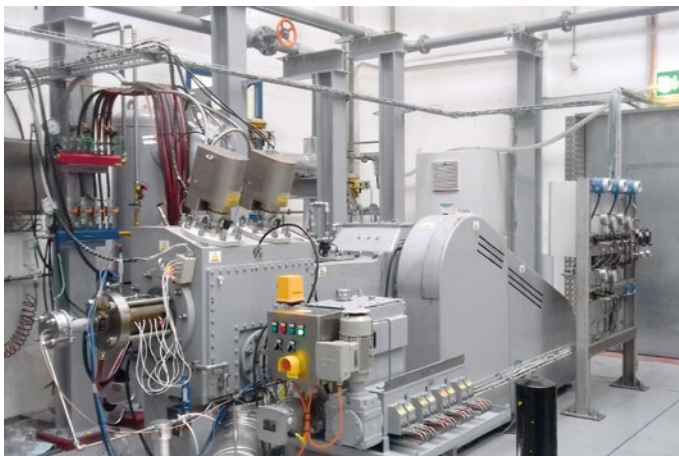
Dichtelemente auf Basis von Fluorpolymeren mit verbesserten Druckeigenschaften ermöglichen ihre Verwendung im Kolbenkompressor oberhalb der bisher zulässigen Grenzen der klassischen gefüllten PTFE-Materialien. Dies verschiebt den Einsatzbereich der wesentlich teureren Hochtemperaturpolymere zu höheren Drücken und Temperaturen und eliminiert zugleich ihre oben beschriebenen Nachteile wie mangelnde Verschleisskompensation, die Notwendigkeit von harten Gegenlaufpartnern und die geringere Chemikalienbeständigkeit.

Solch ein „Mid-range“-Material ist Persisto® 870. Die einzigartige Mischung aus verschiedenen Fluorpolymeren und einer speziellen Kohlenstofffaser gibt Persisto® 870 die verbesserte Kriechfestigkeit, ohne abrasive Stoffe einsetzen zu müssen. Dies erlaubt den Einsatz auf weichen Gegenlaufkörpern. Trotz der deutlich verbesserten Kriechfestigkeit sind Kolben- und Führungsringe aus Persisto® 870 flexibel und zeichnen sich durch ein gutes Formanpassungsvermögen aus. Die generelle Handhabung der Dichtelemente bei der Montage und Demontage ist daher unproblematisch.

Neben guten mechanischen Eigenschaften müssen die Ringmaterialien auch günstige tribologische Eigenschaften aufweisen. Wie eingangs erwähnt, sind die Verschleisswerte von ölgeschmierten Reibpaarungen im Vergleich zu den trockenlaufenden typischerweise deutlich tiefer. Dementsprechend werden an die Dichtsysteme geschmierter Kompressoren auch wesentlich höhere Anforderungen gestellt. So liegen heute die Erwartungen der Betreiber an eine ununterbrochene Betriebsdauer bei drei bis fünf Jahren.

Abb. 6

Prozessgaskompressor zur Untersuchung des Betriebs- und Verschleissverhaltens ölgeschmierter Dichtsysteme.



Um das Verschleissverhalten von Persisto® 870 nachzuweisen, wurden Versuche mit Packungs-Dichtelementen in einem ölgeschmierten Prozessgas-Kompressor durchgeführt. Schwierig bei der Planung war vor allem die Wahl geeigneter Versuchsparameter, denn mit den gängigen Ölschmierraten ist eine sehr hohe Betriebsdauer erforderlich, um verlässlich auswertbare Verschleissraten zu ermitteln. **Abb. 6**

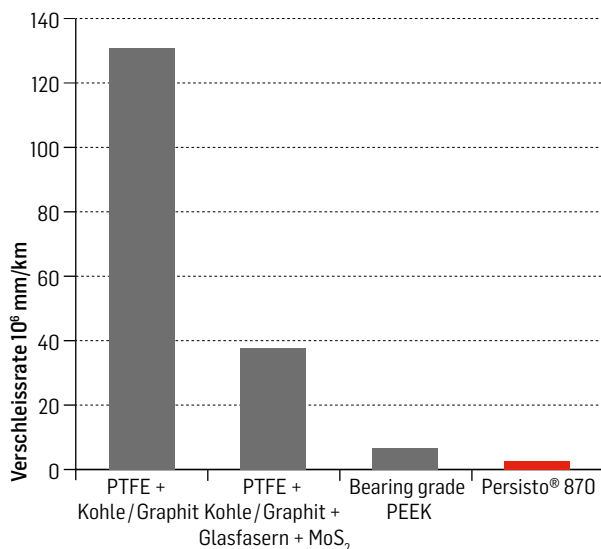
Daher wurde die Schmierrate für alle Versuche jeweils auf einen Wert von einem Tropfen Öl pro Minute eingestellt. Diese niedrige Schmierrate führte bei den gängigen Kunststoffmaterialien bereits nach einer Versuchsdauer von 100 Stunden zu messbarem Verschleiss. Neben Persisto® 870 wurden Packungsringe aus Kohle/Graphit-gefülltem PTFE, Kohle/Graphit/Glasfaser/MoS<sub>2</sub>-gefülltem PTFE und Bearing Grade-PEEK getestet. Die Versuche erfolgten auf einer mit Hartmetall beschichteten Kolbenstange mit einem Durchmesser von 50 mm. Versuchsmedium war Luft, die von einem Saugdruck von 4 bar auf einen Enddruck von 14 bar mit einer maximalen Temperatur von 177 °C sowie einer mittleren Kolbengeschwindigkeit von 4.8 m/s verdichtet wurde. Abbildung 7 zeigt die unter diesen Bedingungen ermittelten Verschleissraten für die untersuchten Kandidatenmaterialien. Auffällig sind die schlechten Werte für die beiden konventionellen PTFE-Werkstoffe. Im Vergleich hierzu zeigt das neue Persisto® 870 ein hervorragendes Verschleissverhalten im Betrieb mit einer sehr niedrigen Schmierrate. Dieses günstige Verhalten im sogenannten „Mini-Lube-Betrieb“ kommt dem Wunsch vieler Betreiber nach einem möglichst geringen Einsatz von Schmieröl entgegen.

Abb. 7

Diese Kombination aus günstigen mechanischen und tribologischen Eigenschaften eröffnet Persisto® 870 neue Anwendungen im Bereich ölgeschmierter Dichtsysteme. Auch wenn dieses Material die teureren Hochtemperaturpolymere nicht vollständig ersetzen kann, so ist doch eine deutliche Reduzierung ihres

Abb. 7

Im Betrieb mit einer niedrigen Schmierrate zeigt Persisto® 870 ein hervorragendes Verschleissverhalten.



**Tab. 1**

Eigenschaftsvergleich verschiedener Dichtelementmaterialien.

Ring Material	PTFE + Kohle / Graphit	PTFE + Kohle / Graphit + MoS <sub>2</sub> + Glasfasern	Bearing Grade-PEEK	Persisto® 870
<b>Flexibilität</b>	gut	gut	schlecht	<b>gut</b>
<b>Kriechfestigkeit</b>	schlecht	besser	sehr gut	<b>gut</b>
<b>Abrasivität</b>	niedrig	hoch	hoch	<b>niedrig</b>
<b>Kosten</b>	niedrig	niedrig	hoch	<b>niedrig</b>

heutigen Einsatzbereichs möglich. Ein typisches Beispiel für die Verwendung von Persisto® 870 im Kolbenkompressor ist die dritte Stufe eines ölgeschmierten Raffinerie-Kompressors zur Verdichtung von Wasserstoff von einem Saugdruck von 90 bar auf einen Enddruck von 190 bar. Der Zylinderdurchmesser in dieser Stufe beträgt 330 mm, das Gegenlaufmaterial ist Grauguss. Tabelle 1 zeigt einen Eigenschaftsvergleich von zwei gängigen gefüllten PTFE-Materialien mit einem Bearing Grade-PEEK. Es zeigt sich, dass in der Summe aller Eigenschaften Persisto® 870 für diese Anwendung am besten geeignet ist. **Tab. 1**

**Nomenklatur**

<b>PTFE</b>	Polytetrafluorethylen
<b>PEEK</b>	Polyetheretherketon
<b>PI</b>	Polyimid
<b>PPS</b>	Polyphenylensulfid
<b>PFA</b>	Perfluoralkoxy-Polymer
<b>FEP</b>	Perfluor(ethylen-propylen) Polymer

**Literatur**

- 1 S. Ebnesajjad  
**Fluoroplastics, Volume 1**  
Chapter 1 + 2, Plastics Design Library, 2000
- 2 N. Feistel  
**Trocken laufende Dichtsysteme in der Praxis – neue Herausforderungen durch neue Materialien**  
Industriepumpen + Kompressoren 3,  
September 2007, S. 141-148
- 3 DIN EN ISO 12086-1:2006-05

**PERSISTO® MATERIALIEN  
ZEICHNEN SICH AUS DURCH**



HERSTELLUNGSVERFAHREN  
NACH STRENGSTEN  
VORSCHRIFTEN



AUSGEZEICHNETE  
TRIBOLOGISCHE  
EIGENSCHAFTEN



NIEDRIGSTE  
LEBENSZYKLUSKOSTEN

**KOMPRESSORKOMPONENTEN**

MAXIMALE LEISTUNG UND  
LÄNGSTE LEBENSDAUER

Kompressorventile

Redura® Ringe und Packungen

Systeme zu  
Fördermengenregulierung

Hauptkomponenten

Komponenten für Labyrinth-  
kolben-Kompressoren

Komponenten für Hyper /  
Sekundär-Kompressoren

**SERVICE**

DAS GESAMTE SPEKTRUM

Burckhardt Ventilservice

Ersatzteillogistik

Montage und Service

Technischer Kundendienst

Umbauten und Aufrüstungen

Komponentenreparaturen

Zustandsüberwachung und  
Diagnose

Schulungen

**Burckhardt Compression AG**

CH-8404 Winterthur

Switzerland

Tel.: +41 52 262 55 00

Fax: +41 52 262 00 51

24-Stunden-Notfalltel.: +41 52 262 53 53

aftersales@burckhardtcompression.com

www.burckhardtcompression.com

Ihr lokaler Kontakt

