

**pro-K Fluoropolymergroup**

Technisches Merkblatt 09  
*PTFE-Kompensatoren*



## Vorwort

Kompensatoren aus dem Balgwerkstoff Polytetrafluorethylen (PTFE) werden aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften vor allem bei kritischen Medien und erhöhten Temperaturen eingesetzt.

Die konstruktiven Ausführungen als auch die Betriebsparameter unterliegen jedoch sehr großen Unterschieden. Insbesondere betrifft dies Angaben wie Baulänge, Flanschausführung, Stützringdurchmesser, Hubbereiche, Führungselemente, Mindestwanddicken des PTFE Balges sowie Betriebskenngrößen, wie Mindestanforderungen an die Druck- und Vakuumbelastbarkeit.

Dieses Technische Merkblatt informiert über die Vereinheitlichung von Konstruktions- und Belastungsanforderungen und liefert damit qualitative Maßstäbe zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Korrektur von Bemessungsfehlern. Das Merkblatt beschränkt sich auf Kompensatoren deren Balg aus pastenextrudiertem, gesintertem PTFE bestehen und beinhaltet die Empfehlungen der Interessengemeinschaft Regelwerke (IGR) aus der Guideline Technik 12-0040.

Das Technische Merkblatt wird von der pro-K Fluoropolymergroup herausgegeben und wurde von Fa. SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH fachlich ausgearbeitet. Die Überarbeitung erfolgt in der Zusammenarbeit von Fa. SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH und Fa. Baum Lined Piping GMBH.

Das vorliegende Merkblatt ersetzt das gleichlautende Merkblatt von August 2022.

### Wichtiger Hinweis:

Diese Ausarbeitung dient lediglich Informationszwecken. Die in dieser Ausarbeitung enthaltenen Informationen wurden nach derzeitigem Kenntnisstand und nach bestem Gewissen zusammengestellt. Der Autor und pro-K übernehmen jedoch keine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Informationen. Jeder Leser muss sich daher selbst vergewissern, ob die Informationen für seine Zwecke zutreffend und geeignet sind.

Stand: Mai 2024

### Fluoropolymergroup

Die Fluoropolymergroup ist eine Fachgruppe von pro-K Industrieverband Halbzeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e.V.; Mainzer Landstraße 55 10, D-60329 Frankfurt am Main; Tel.: 069 - 40 89 555 40

E-Mail: [info@pro-kunststoff.de](mailto:info@pro-kunststoff.de); [www.pro-kunststoff.de](http://www.pro-kunststoff.de)

pro-K ist Trägerverband des Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.



## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Aufgaben von Kompensatoren
3. Konstruktionsmerkmale
  - 3.1 Allgemeines
  - 3.2 PTFE Balg – Herstellungsverfahren und geometriebedingte Eigenschaften
    - 3.2.1 Balgherstellung
    - 3.2.2 Baumaße und Balgeometrie
    - 3.2.3 Einfluß der Balgeometrie
  - 3.2 Werkstoffe
    - 3.3.1 PTFE-Balg
    - 3.3.2 Flansche
    - 3.3.3 Stützringe
4. Betriebsverhalten
  - 4.1 Bewegungsaufnahme
  - 4.2 Druck-/ Temperatur Einsatzgrenzen
  - 4.3 Lastwechsel
5. Maße und Ausführungen
  - 5.1 Maße
    - 5.1.1 Balg und Stützringe
    - 5.1.2 Losflansche
  - 5.2 Sonderbauformen
6. Prüfung
  - 6.1 Allgemeines (Prüfumfang)
  - 6.2 Prüfstelle
  - 6.3 Prüfung der Stützringe
  - 6.4 Prüfung des PTFE-Halbzeugs (Rohr)
    - 6.4.1 Dichte
    - 6.4.2 Reißfestigkeit und Reißdehnung

## 6.5 Prüfung am Fertigteil

### 6.5.1 Prüfung der Beschaffenheit

### 6.5.2 Maßprüfung

### 6.5.3 Prüfung der elektrostatischen Aufladbarkeit

### 6.5.4 Baumusterprüfung von PTFE-Kompensatoren

### 6.5.5 Wechselbelastung

## 7. Verpackung, Lagerung, Transport

## 8. Kennzeichnung

## 9. Betrieb

### 9.1 Bestimmungsgemäße Verwendung

### 9.2 Verbotene Handlungen

### 9.3 Restgefahren

### 9.4 Störungen

### 9.5 Spritzschutz

## 10. Abbildungsverzeichnis

Mitglieder der pro-K Fluoropolymergroup

## 1. Einleitung

PTFE-Kompensatoren sind Bauelemente, die wegen ihrer chemischen Beständigkeit verbreitet in Chemieanlagen angewendet werden. Neben dem bekannten Einsatz in Stahl- und PTFE-ausgekleideten Stahlrohrleitungen werden diese Kompensatoren wegen ihrer großen Verstellwege insbesondere in Kunststoff- bzw. GfK-Rohrleitungen und wegen ihrer Flexibilität und geringen Federraten insbesondere auch an sensiblen Anlagenteilen mit emaillierten Ausrüstungen, Graphitapparaten, Wärmetauschern und an Pumpen eingesetzt.

## 2. Aufgaben von Kompensatoren

Die Wärmeausdehnung ist eine in der Regel ungewollte Begleiterscheinung beim Betrieb von Rohrleitungen. Sie erfordert Ausgleichsmaßnahmen, die schon im Planungsstadium zu berücksichtigen und längst Stand der Technik sind. Eine Möglichkeit der Kompensation der Wärmeausdehnung besteht in der Verwendung von sog. Lyrabögen, die aber sehr ausladend und materialintensiv gestaltet sind. Eine Alternative dazu sind die Balgkompensatoren. Sie benötigen nur einen Bruchteil an Material und Raum. Hierbei wird die Feder- bzw. Deformationseigenschaft von ein- oder mehrwelligen Bälgen ausgenutzt. Die Größe einer Bewegungsaufnahme, also Dehnung oder Stauchung eines Balges, hängt dabei sehr stark vom Balgmaterial und der Balgeometrie ab. Die Steifigkeit des Balgmaterials drückt sich in der Federrate aus, die für Zug- und Druckbelastungen angegeben werden kann. PTFE-Bälge gelten hierbei als leichtflexibel. Aus der Multiplikation der Federrate mit dem Verstellweg ergibt sich die Verstellkraft des Bauelementes. Während die prozessbedingten Wärmedehnungsvorgänge vergleichsweise niederfrequent ablaufen, treten insbesondere bei der Koppelung von Rohrleitungen über Kompensatoren an Pumpen höherfrequente Schwingungen und Vibrationen auf, die zu dämpfen sind. Hier kommt eine besondere Eigenschaft des PTFE-Balgmaterials zum Tragen, nämlich die geringe Neigung zur Materialermüdung und das völlige Fehlen einer Spröbruchneigung im Vergleich zu bestimmten Metallen oder anderen Kunststoffen bzw. Elastomeren. Ein weiteres Anwendungskriterium für diesen Kompensatortyp ist die nahezu universelle Chemikalienbeständigkeit des PTFE Materials, die den Einsatz bei fast allen Medien erlaubt. Es gibt heute eine Vielzahl von Kompensatortypen, die sich in der Wellenzahl, dem konstruktiven Aufbau, der Herstellungstechnologie und dem Verwendungszweck unterscheiden. Die am häufigsten eingesetzten Typen sind in diesem Technischen Merkblatt beschrieben.

## 3. Konstruktionsmerkmale

### 3.1. Allgemeines

TFE-Kompensatoren bestehen hauptsächlich aus dem PTFE-Balg und den Losflanschen für den Einbau in die Rohrleitungen. Die Anschlussflansche entsprechen internationalen Regelwerken und Normen. Die Ränder des PTFE-Balges werden an den Losflanschen umgebördelt und dienen gleichzeitig als Dichtfläche.

Die Wellenzahl kann variieren, wobei die niedrigen Wellenzahlen besser die Druckbelastungsanforderungen und höheren Wellenzahlen stärker die Beweglichkeitsanforderungen erfüllen.

Die Balgbewegung kommt dabei stets aus den Umlenkungen und den Flanken der Welle. Als zusätzliche druckaufnehmende Teile sind metallische Stützringe in den Wellentälern des Balges angeordnet.

Übliche Nennweiten dieser PTFE-Kompensatoren sind DN 25 bis zu DN 1500.

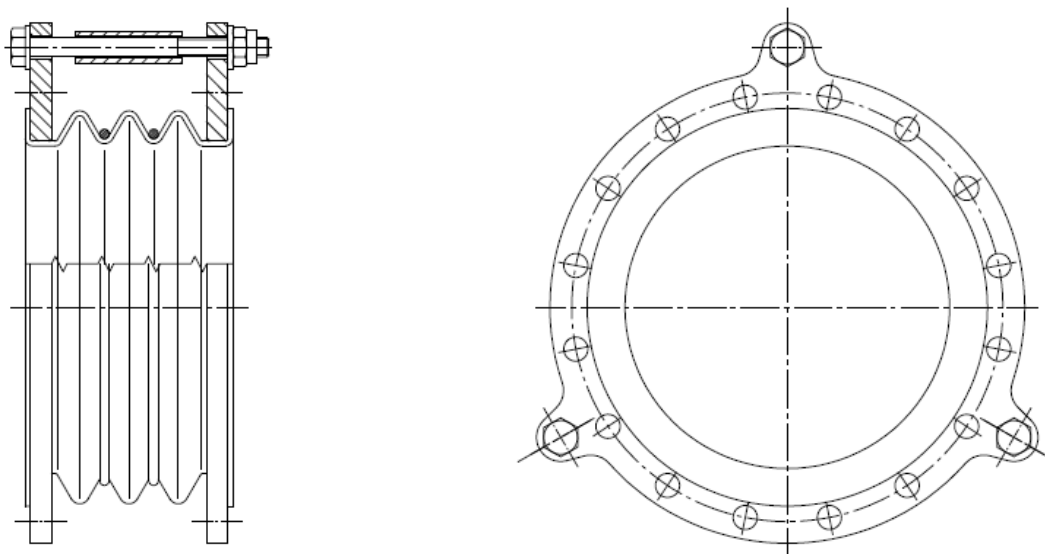


Abb. 1: Beispiel eines dreiwelligen Kompensators mit Begrenzungsstangen

Zur Begrenzung der hauptsächlich axialen Bewegungsaufnahmen besitzen die Kompensatoren üblicherweise Distanzstangen und Distanzhülsen, die für den normalen Betriebsfall den Hubbereich (Dehnung und Stauchung) begrenzen. Sie können auch im Havariefall begrenzt als Schutz vor Fehlbelastungen dienen, z.B. als Kompressionsschutz zur Verhinderung der Balgbeschädigung, sind dafür aber nicht gezielt ausgelegt. Die Begrenzungen müssen in mindestens zweifacher Ausführung vorhanden sein. Bei Verwendung von Gewindestangen ist mindestens die Festigkeitsklasse 5.6 einzusetzen. Auch rein als Lateral- oder Angularkompensator fungierende Bauteile besitzen Führungsstangen und -elemente.

### 3.2. PTFE Balg - Herstellungsverfahren und geometriebedingte Eigenschaften

#### 3.2.1. Balgherstellung

Die Formgebung des Balges erfolgt am vollständig gesinterten, virginalen pastenextrudierten PTFE-Liner. Als Werkstoff kann sowohl nicht-modifiziertes und modifiziertes (weiß und ableitfähig) PTFE eingesetzt werden.

PTFE-Faltenbälge, die spanend aus gepresstem Material oder isostatisch gepresst hergestellt werden, weisen wesentlich niedrigere Belastungskenngrößen auf und sind nicht Gegenstand dieses Technischen Merkblattes. Wenig verbreitet ist die Technologie des Wickelns von dünnen PTFE-Folien auf eine Form bis

zum Erreichen einer bestimmten Balgwanddicke. Hier besteht die Gefahr einer Delamination der Lagen während des Betriebes. Auch diese Kompensatoren werden hier nicht näher behandelt.

Es gibt hinsichtlich der Formung der Bälge, je nach Hersteller technologische Unterschiede.

Häufig werden thermisch/pneumatische, thermisch/hydraulische und thermisch/mechanische Formgebungsverfahren, bei denen das Linermaterial nach einer Erwärmung in eine Balgform gepresst wird, angewandt. Die Hersteller sichern durch die Wahl geeigneter Produktionsparameter die volle Funktionsweise des Kompensators und damit die erforderliche Betriebssicherheit auch unter extremen Kundenanforderungen zu.

Besondere Bedeutung hat eine gleichmäßige Wandstärkenverteilung (siehe Abb. 4), da dadurch die Spannungsspitzen in hoch belasteten Bereichen des Balges während des Betriebs minimiert werden. Ein Beispiel für eine ungleiche Wandstärkenverteilung aufgrund ungenügender Formgebung zeigt Abb. 2.



Abb. 2: Schlechte Ausformung des PTFE-Balgs mit extremer Wanddickenschwankung

Zur Vermeidung von Kerbwirkungen muss die Oberfläche des PTFE-Balgs glatt sein. Es dürfen keine funktionsbeeinflussenden Fehler mit folgender Ausprägung vorhanden sein:

- Poren oder Lunker
- Fremdkörpereinschlüsse
- Kratzer oder Risse
- Mikrorisse / Crazes im Querschnitt
- kerbähnliche Faltungen oder scharfkantige Übergänge
- Weißbruchcharakteristik in umgeformten Bereichen
- unsachgemäße Einförmigkeit der Stützringe mit kerbbildenden Aufwulstungen
- Strukturinhomogenitäten

Geometrien wie in Abbildung 2 und 3 sind nicht zulässig, da sie zu vorzeitigem Versagen des Kompensators schon bei geringen Belastungen führen können.



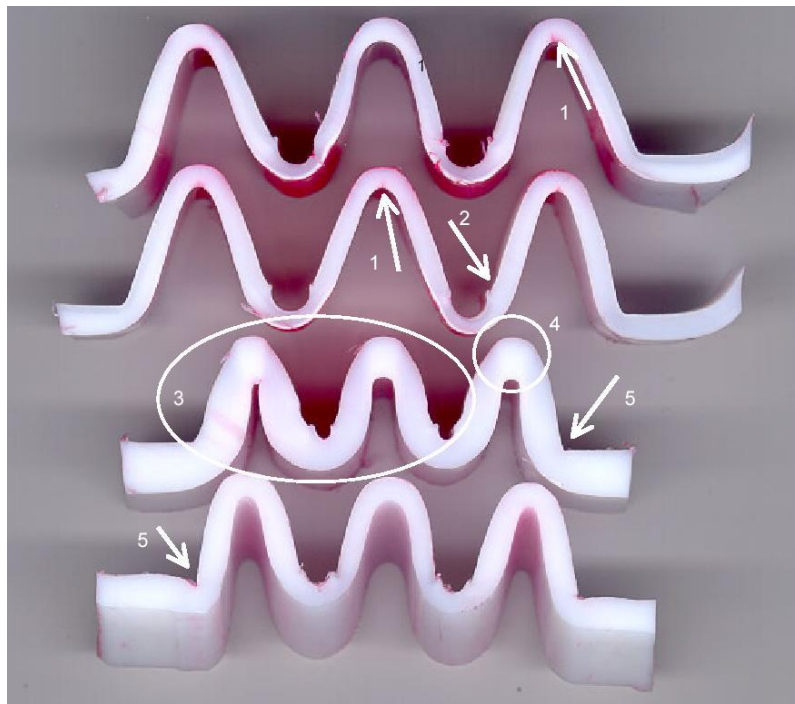


Abb. 3: Unzulässige funktionsbeeinflussende Fehler am PTFE-Balg

1. Anrisse auf der Innenseite des Wellenbergs
2. Einförmung durch Stützringe und Aufwulstungen mit Kerbbildung
3. ungleichmäßige Wellenkontur, z. T. mit Faltungen am Wellenberg (spitzer Zulauf verstärkt signifikant die Kerbwirkung)
4. plastische Verformungen mit Weißbruchzonen
5. scharfkantige Übergänge mit Kerben

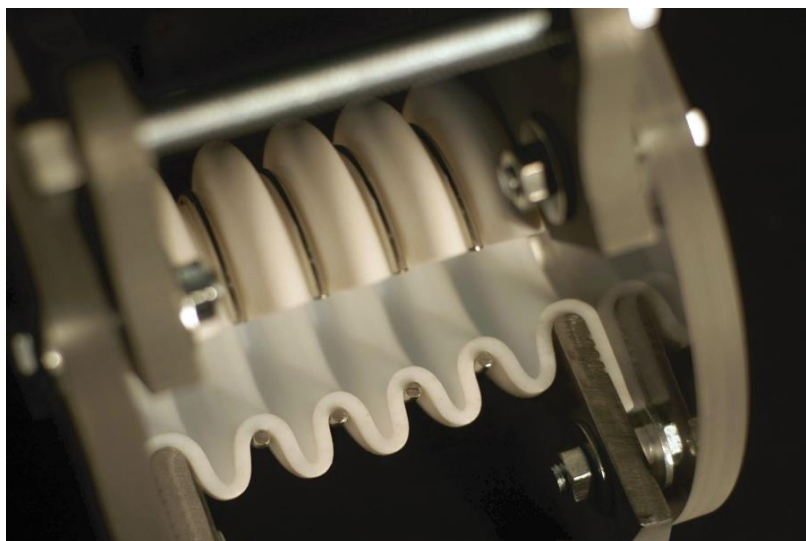


Abb. 4: Gleichmäßige Wanddickenverteilung des PTFE-Balgs FLUROFLEX®



### 3.2.2. Baumaße und Balggeometrie

Die Balggeometrie von PTFE Kompensatoren wird durch das in der IGR12-0040 festgelegte Baumaß, die Wellenzahl, Flanschblattdicke und Dicke des Stützrings vorgegeben. Je nach Formgebungsverfahren und Umformparametern kann es zu erheblichen Abweichungen (siehe Abb. 2 und 3.) in der Wandstärkenverteilung kommen. Ein gesundes Bewegungsspiel des Balgs kann nur erfolgen (siehe unten), wenn sich der Balg in dem vorgegebenen Rastermaß (siehe Abb. 5.a) bewegen kann.

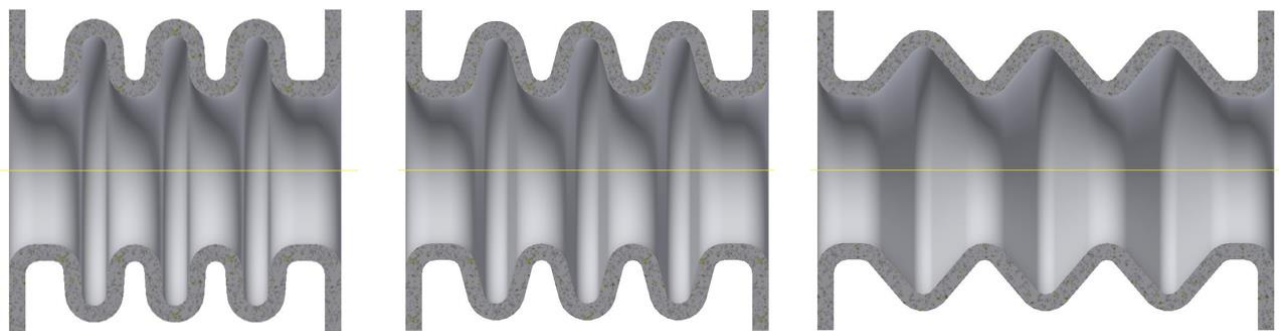


Abb. 5a: Ausgewogenes Axial – Bewegungsspiel durch optimierte Abstimmung der Liner- Stärke und Wellengeometrie

Bei wenig abgestimmten Herstellverfahren (ungleichmäßige Wandstärke) und ungünstiger Wellenkontur kann versucht werden, die Mindestwandstärke der IGR durch Erhöhung der Wandstärke innerhalb der IGR- Vorgabe zu erhöhen. Dadurch kann es zu überhöhten Verstell- Kräften, sowie und auf Block gefahrenen Bälgen (siehe Abb. 5.b) kommen.

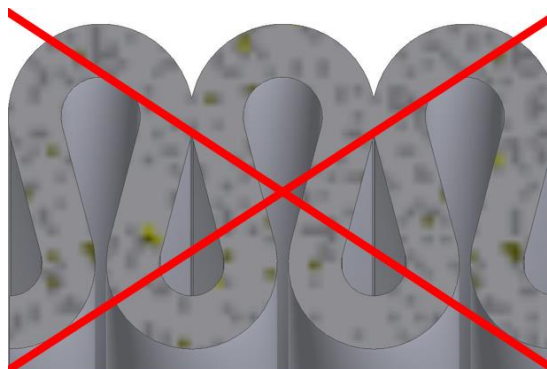


Abb. 5b: Überschreiten der Min.-Baulänge (Axialbewegung) durch zu dicken Liner und ungünstige Wellenkontur

### 3.2.3. Einfluß der Balggeometrie

Für die Funktion als Kompensator ist eine sorgfältige Balance von Wandstärke und Geometrie der Wellen entscheidend. Eine geringe Wandstärke führt zu hoher Flexibilität aber auch einem geringen maximalen Betriebsdruck. Eine reine Erhöhung der Wandstärke des Kompensators ohne Änderung der

Wellengeometrie führt bei gleicher Kompensatorbewegung nicht notwendigerweise zu einer höheren Druck-/Temperaturfestigkeit, da die höheren Verstellkräfte zusätzliche Spannungen erzeugen.

FEM-Berechnungen sind hilfreich, um die Kompensatorgeometrie und die Wandstärke zu optimieren. Diese Analyse zeigt deutlich, dass die maximalen Spannungen im PTFE bei axialer Belastung auf der Innenseite des „Wellenberges“ und bei tangentialer Belastung im Bereich der Stützringe im „Wellental“ auftreten (gelb/roter Bereich der Abbildungen 6a und b).

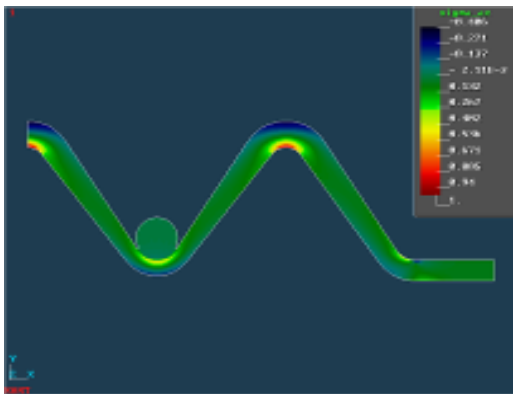


Abb. 6a: FEM Berechnung axiale Spannung

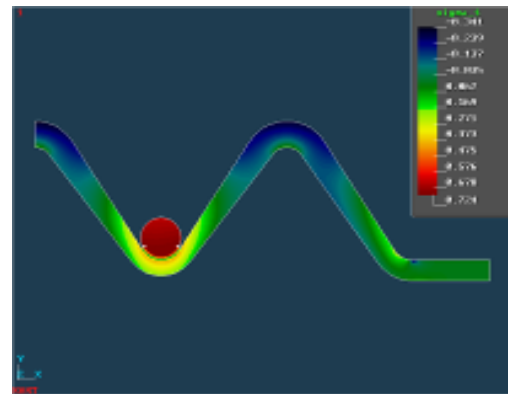


Abb. 6b: FEM Berechnung tangentialer Spannung

Der Spannungsgradient im Wellenberg kann durch die Balggestaltung beeinflusst bzw. vermindert werden. Die Simulation bestätigt zudem das Ergebnis praktischer Untersuchungen, wonach überwiegend die Balgrisse vom Wellenberg ausgehen (siehe Abbildung 7).

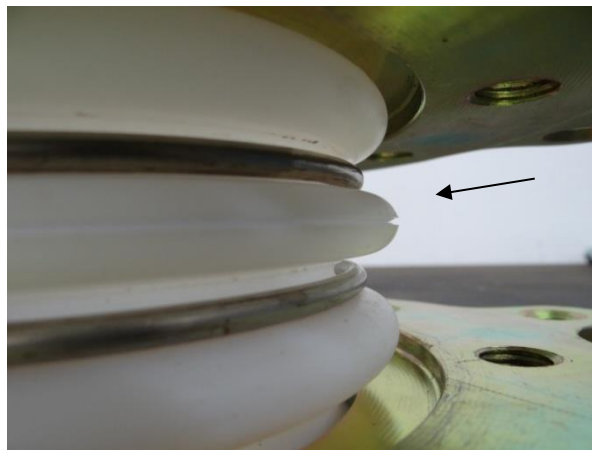


Abb. 7: Rissbildung nach <math><5000</math> axialen Bewegungszyklen aufgrund ungleichmäßiger Wandstärkenverteilung

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass im Falle einer Überbelastung des Balges (Bereich zwischen zul. Druck und Berstdruck) das Material einer Welle zu fließen beginnt und sich ausbeult, bevor es je nach Größe der Überbelastung nach Stunden bis Tagen zum Bersten kommt. Ein bevorstehendes Schadensereignis durch Fehlbelastung ist dadurch in gewisser Weise am Kompensator erkennbar. Zu geringe Radien in den Wellen bzw. steilere Flankenwinkel führen zwar zu einer Erhöhung der

Druckbelastbarkeit, lassen aber auf der anderen Seite auch den Spannungsgradient in den Wellenbergen weiter ansteigen. Dadurch steigt die Gefahr einer Rissbildung bzw. des Berstens.

Die Simulation der tangentialen Spannung (Abb. 6b) zeigt deutlich die Bedeutung der Stützringe. Sie sind das drucktragende Teil des Kompensatorbalges. Dagegen spielt die Wanddickenverteilung am Stützring für die Festigkeit des Kompensators eine untergeordnete Rolle. Allerdings hat diese Wanddicke Einfluss auf die Permeation bestimmter Medien und eine damit verbundene Gefahr der Schädigung der Stützringe, weshalb auch hier die Mindestwanddicken zu berücksichtigen sind.

### 3.3. Werkstoffe

#### 3.3.1. PTFE Balg

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte für elektrostatisch aufladbares bzw. antistatisches PTFE (in Anlehnung an DIN 2874)

Werkstoff	Fertigung der Auskleidung	Werkstoffkennwerte		
		Reißfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] min.	Reißdehnung [%] min.	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
PTFE virginal, ungefüllt	pastenextrudiert	24	275	2,14 bis 2,17
PTFE virginal, antistatisch	pastenextrudiert	24	275	2,13 bis 2,16

Ein weiterer wichtiger Kennwert ist der Porengehalt, der z.B. über den Stretch Void Index (SVI) nach ASTM D4895 bzw. DIN EN ISO 12086-2 oder optisch über Mikrotomschnitte bestimmt werden kann. Ein geringer Porengehalt ist für eine hohe Wechselbiegefestigkeit entscheidend, da sich Poren durch die Wechselbelastung zu Mikrorissen bis hin zum Bruch ausdehnen können. Der SVI sollte den Wert 200 nicht übersteigen.

#### Antistatische / leitfähige Ausführungen

Bei Medien mit geringer Leitfähigkeit und dementsprechend hoher Neigung zur elektrostatischen Aufladung wird der Einsatz antistatisch / leitfähig ausgerüsteter PTFE-Pastenextrudate empfohlen. Gemäß DIN 2874 gelten Werkstoffe, z.B. PTFE, als nicht aufladbar, deren Oberflächenwiderstand  $10^9$  Ohm und deren Ableitwiderstand, mindestens an einer Stelle,  $10^8$  Ohm nicht überschreiten.

Die angewandten Prüfnormen sollten bei der Angabe des Ableitwiderstand benannt werden.

Oxidierende Medien wie z.B. Salpetersäure können die antistatische Wirkung über die Zeit reduzieren, was häufig in einer Aufhellung der schwarzen Färbung auf der Innenseite sichtbar wird.

Bei antistatischen PTFE-Kompensatoren muss der Füllstoff gleichmäßig verteilt sein und es dürfen keine Füllstoffnester oder Trennungen vorhanden sein (Bilder 8 und 9).

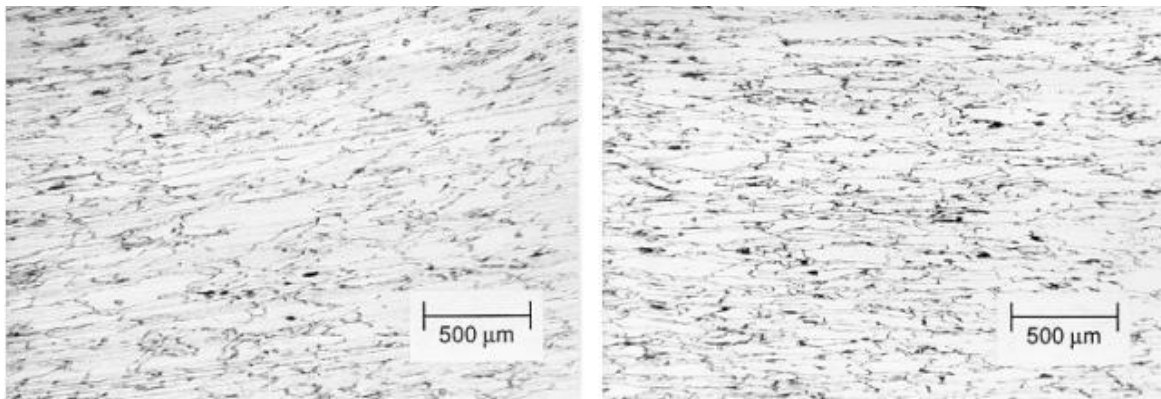


Abb. 8a und 8b: Gleichmäßige Rußverteilung

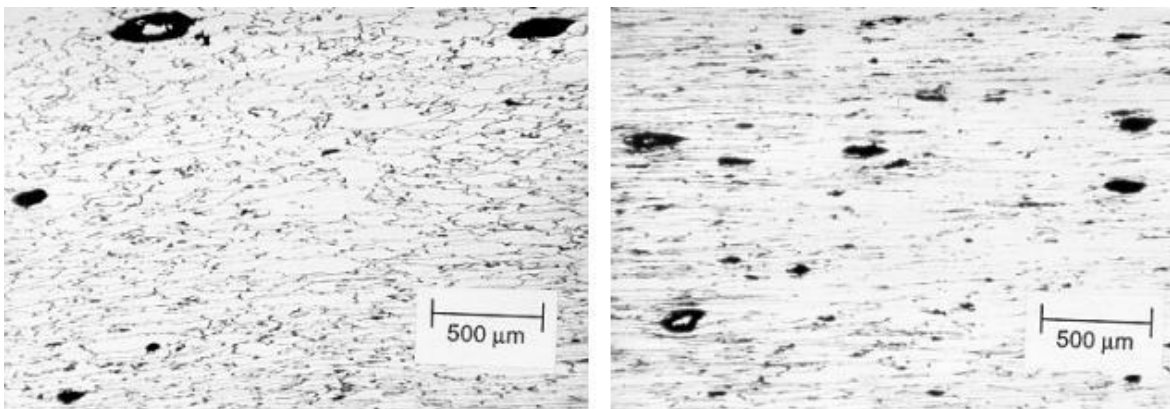


Abb. 9a und 9b: Ungleichmäßige Rußverteilung, entspricht nicht den Anforderungen

### 3.3.2. Flansche

Flansche sind in den Werkstoffen nach Tabelle 2 auszuführen. Für eine korrekte Auslegung der Flanschblattdicke ist eine Berechnung erforderlich. Basierend auf diesen Berechnungen können die Flanschblattstärken von DIN 1092-1 abweichen.

Tabelle 2: Beispiele für Werkstoffe für Losflansche (vergleichbare ANSI-Werkstoffe siehe Doppelbelegungstabelle entsprechend einschlägiger Literatur)

Werkstoff	Werkstoff Nr.	Technische Lieferbedingungen
S235JRG2	1.0038	DIN EN 10025-2
P250GH	1.0460	DIN EN 1092-1
P235GH/P265GH/ P355GH	1.0345/ 1.0425/ 1.0473	DIN EN 13480-2
Edelstähle	1.4571, 1.4541	DIN EN 10028-7

Die Flansche sind mit gestrahlter Oberfläche (Vorbereitungsgrad mindestens Sa 2 1/2) nach DIN EN ISO 12944-3 bzw. 12944-4 und mit Korrosionsschutz auszuführen. Als Korrosionsschutz ist eine Zink-Epoxidharz-Grundbeschichtung nach DIN EN ISO 12944-5 (Schichtdicke min. 40 µm) oder ein galvanischer Überzug mit irisierender Chromatierung Fe/Zn12/C (Schichtdicke min. 12 µm) nach DIN 50961 bzw. DIN EN ISO 2081 aufzubringen.

### 3.3.3. Stützringe

Die Stützringe bestehen aus Werkstoff 1.4571 (oder äquivalent 1.4404 bzw. 316L) nach DIN EN 10088-3. Die Schweißnaht ist so auszuführen, dass ein Schweißnahtfaktor von 0,85 sichergestellt ist. Sind aus Diffusions- bzw. Korrosionsgründen andere Werkstoffe erforderlich, sind diese zu vereinbaren und es ist sicherzustellen, dass die Druck-/Temperatur-Einsatzgrenzen nach Abschnitt 4.2 eingehalten werden. Dies gilt insbesondere bei Verwendung chlorhaltiger Medien, die zu Spannungsrisskorrosion bei rostfreien Stählen führen können (siehe Abschnitt 9.1).

## 4. Betriebsverhalten

### 4.1. Bewegungsaufnahmen

Grundsätzlich können die PTFE-Kompensatoren für axiale, laterale und angulare Bewegungsaufnahmen eingesetzt werden. Dem Einsatzfall entsprechend sind die Führungselemente zu gestalten.

Im Betriebsfall können verschiedene Bewegungsformen gleichzeitig auftreten. In erster Näherung können die verschiedenen Bewegungsspiele in linearer Korrelation anteilig auf 100% des zulässigen Bewegungsspiels aufsummiert werden. In der Rohrplanung ist das zu berücksichtigen und der Hersteller sollte dann in der Lage sein, die Verminderung der Bewegungsaufnahmen bei gleichzeitigem Auftreten verschiedener Bewegungsformen ausweisen zu können.

Weiterhin drückt sich die Flexibilität der PTFE Bälge in den Federraten aus. Diese werden für axiale, laterale und angulare Bewegungen angegeben und sind temperaturabhängig vom Hersteller auszuweisen. Neben dem Temperatureinfluss bei Standardkompensatoren hat die Wanddicke des Balgmaterials ebenfalls Einfluss auf die Flexibilität. Letzteres spielt bei dem Ausgleich der Wärmedehnung auf einer Rohrbrücke eine untergeordnete Rolle, aber bei der Verbindung der Rohrleitungen/Kompensatoren mit Apparaten, z.B. Graphitapparate, oder mit Pumpen, sind die Federraten der Kompensatoren für die Stutzenbelastung oder für die Schwingungsdämpfung entscheidende Auslegungsgrößen.

### 4.2. Druck-/ Temperatur Einsatzgrenzen

Kompensatoren mit weniger Wellen bieten höhere Temperatur-/Druckfestigkeit, nehmen aber im Vergleich zu Kompensatoren mit mehr Wellen kleinere Bewegungen auf. Das bedeutet: je mehr Wellen, desto größer ist die Bewegungsaufnahme, aber umso geringer die Temperatur-/Druckfestigkeit.

Die Druck-/Temperaturbelastungsgrenzen werden üblicherweise über Berstdruckversuche bestimmt. Der Berstdruck ist in erster Linie von der Temperatur und in zweiter Linie von der Einsatzdauer des Bauteils abhängig. Der Berstdruck ist ein technischer Fachbegriff und stellt ein wichtiges Qualitätsmerkmal für Rohre, Schläuche, Kompensatoren und weiterer Bauteile dar. Er ist um ein Vielfaches größer als der zulässige Betriebsdruck.

Die in Berstdruckversuchen ermittelten Grenzwerte sind dabei stark von der Temperatur und der Drucksteigerungsrate abhängig. Daher sind diese insbesondere im Hinblick auf die Langzeitstabilität im Einsatz vom Hersteller zu bewerten und mit einem Sicherheitsfaktor zu versehen. Mit diesem Faktor müssen



dynamische Lastfälle (axiales, laterales und angulares Bewegungsspiel), Bauteiltoleranzen, die Werkstoffcharakteristika sowie die Langzeitbelastbarkeit mit abgedeckt sein.

Die Druck-/Temperatur-Einsatzgrenzen in Abb. 10 für Überdruck- und in Abb. 12 für Unterdruckbeanspruchungen sind schematisch dargestellt und müssen vom jeweiligen Hersteller individuell erstellt werden.

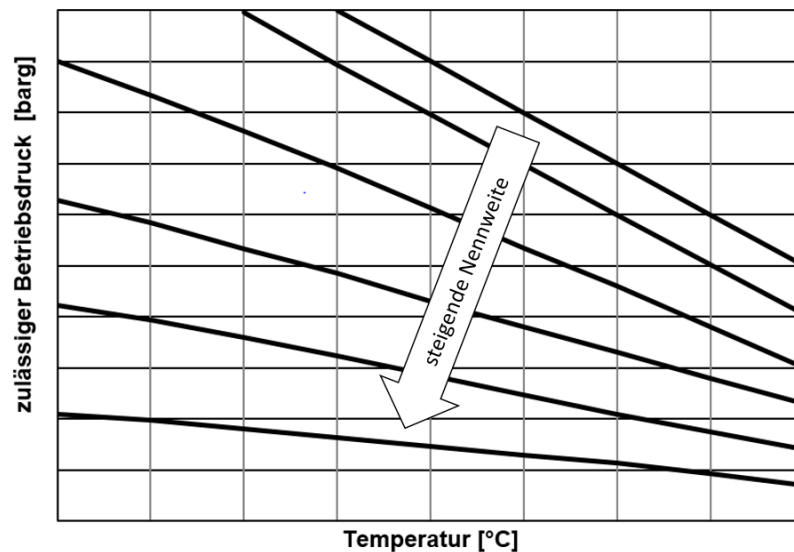


Abb. 10: Schematische Darstellung des maximal zulässigen Betriebsdrucks im Verhältnis zur Temperatur für verschiedene Nennweiten bei konstanter Wellenzahl

Neueste FEM Drucksimulationen, die das wahre Spannungs-/Dehnungsverhalten von PTFE in Abhängigkeit der Temperatur berücksichtigen, führen ebenfalls zu Ergebnissen, die mit Praxistests sehr gut übereinstimmen. (Das wahre Spannungs-/Dehnungsverhalten zeigt, dass bei Dehnung die Spannung in der Probe ansteigt, wenn dabei die Querschnittänderung berücksichtigt wird.)

Dadurch lassen sich heute auch die Grenzbelastungen von Kompensatoren großer Nennweiten bestimmen, die bisher lediglich auf Basis von Daten kleinerer Kompensatoren abgeschätzt werden konnten.

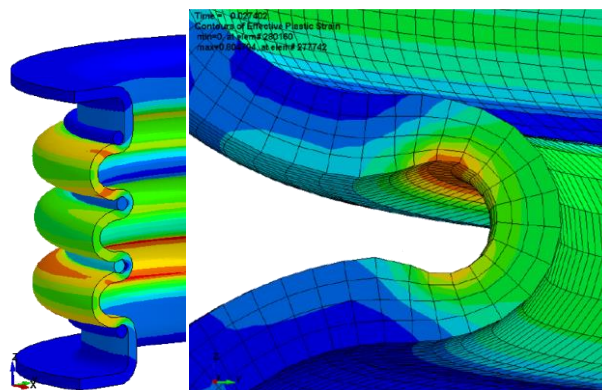


Abb. 11a und b: Simulation des maximalen Betriebsdrucks ohne plastische Verformung

## Vakuumbeständigkeit

Rohrleitungen, insbesondere innerhalb von Chemieanlagen, sind ständig wechselnden Belastungen ausgesetzt. Wenn schon nicht prozessbedingt, so können oftmals z.B. auch Entleerungsvorgänge in den Anlagen zu Unterdruckbelastungen führen. Kompensatoren in Rohrleitungssystemen, müssen diese teilweise erheblichen Druckschwankungen aushalten. Die Vakuumbelastbarkeit ist in dem Bild 12 schematisch dargestellt.

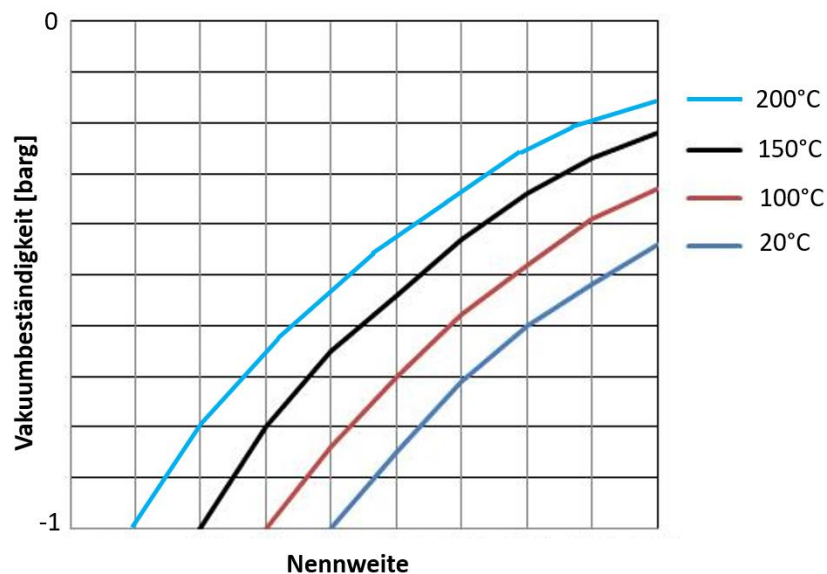


Abb. 12: Schematische Vakuumbeständigkeit von PTFE-Kompensatoren bei konstanter Wellenzahl

### 4.3. Lastwechsel

Grenzbelastungen werfen auch die Frage nach Grenzwerten für die Lastwechselanzahl auf. Hierbei unterscheidet sich PTFE grundsätzlich von metallischen Werkstoffen durch seine herausragende Wechselbiegefestigkeit aufgrund der hohen Molekularmasse.

Praxisrelevante Lastwechseltests zeigen den großen Einfluss der Balggeometrie auf die Langzeitfestigkeit (siehe Abschnitt 3.2.2).

Unter Ausnutzung des vollen Hubes und einer Frequenz zwischen 0,1 bis etwa 0,3 Hz wurden z.B. mit FLUROFLEX® Kompensatoren drucklos Lastwechselzahlen von > 2 Millionen gemessen. Das Testende wurde dabei durch Abbruch, nicht durch Ausfall des Balges, bestimmt. Die gleichzeitig bei diesen Versuchen gemessene Verstellkraft wies kaum eine Veränderung (< 3%) auf, was die Langzeitfestigkeit belegt.

## 5. Maße und Ausführungen

### 5.1. Maße

Die Mindestwanddicken  $s_{\min}$  der Kompensatoren und die Drahtdurchmesser der Stützringe  $d_b$  nach Tabelle 3 sind an allen Stellen einzuhalten.



### 5.1.1. Balg und Stützringe

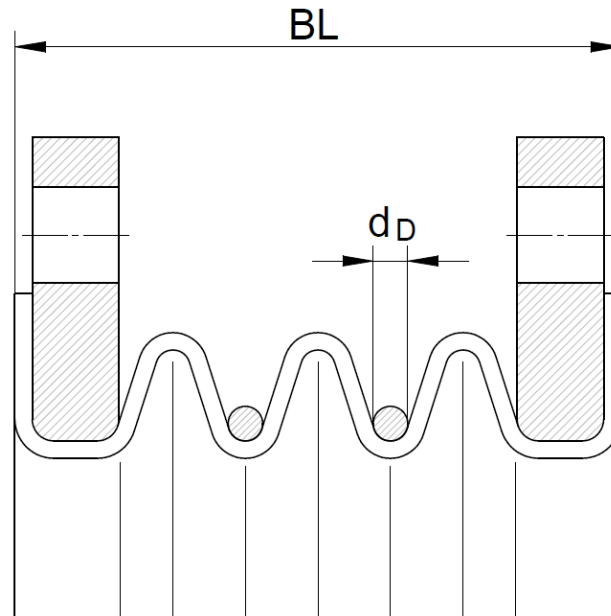


Abb. 13: Skizze eines PTFE-Axialkompensators; Beispiel für 3-wellige Ausführung

Tabelle 3: Maße für PTFE-Axialkompensatoren in 2-, 3- und 5-welliger Ausführung (die Grenzwerte der Wandstärke bewegen sich innerhalb der IGR 12-040) ( $s_{min}$ : Mindestwandstärke)

DN		2-wellig		3-wellig		5-wellig		$d_D$ [mm]	$s_{min}$ [mm]
DIN	ANSI	BL [mm]	h +/- [mm]	BL [mm]	h +/- [mm]	BL [mm]	h +/- [mm]		
25	1"	54	6	70	10	100	15	3	2
32	1-1/4"	56	6	75	10	105	15	3	2
40	1-1/2"	56	6	80	15	115	20	3	2
50	2"	68	10	85	15	125	25	4	2
65	2-1/2"	78	12	100	20	145	30	4	2
80	3"	88	15	110	20	160	35	5	2,3
100	4"	88	15	110	25	165	40	5	2,3
125	5"	95	15	120	25	170	40	5	2,3
150	6"	105	15	130	25	180	40	6	2,3
200	8"	110	15	140	30	210	40	6	3,5
250	10"	128	20	165	30	240	50	8	4
300	12"	140	20	175	30	250	50	8	4
350	14"	145	20	190	35	265	50	8	4
400	16"	145	20	190	35	265	50	8	4

Die in Tabelle 3 angegebenen Werte für den Hub  $h$  sind nur bei Einsatz des Kompensators als reiner Axialkompensator zulässig. Werden PTFE-Kompensatoren als "Universalkompensatoren" verwendet, so können verschiedene, d. h. axiale, angular und/oder laterale Bewegungsaufnahmen gleichzeitig auftreten. Die für die alleinige axiale, angular oder laterale Bewegungsaufnahme ausgewiesenen Herstellerangaben entsprechen dem jeweiligen maximalen Belastungsfall "100 %". Bei kombiniertem Auftreten verschiedener Bewegungsaufnahmen sind Abschläge an den ausgewiesenen Grenzwerten der Bewegungsaufnahmen vorzunehmen, die gewährleisten, dass die Summe der Bewegungsaufnahmen die Maximalbelastung nicht übersteigt. Diese Abschläge bzw. Einschränkungen werden von den Herstellern benannt.

### 5.1.2. Losflansche

Tabelle 4: Maße für Losflansche nach DIN EN 1092-1

DN	Außen Ø*	Lochkreis Ø	Loch Ø**	Schrauben	
	D	K	L	Anzahl	Größe
25	115	85	M12	4	M12
32	140	100	M16	4	M16
40	150	110	M16	4	M16
50	165	125	M16	4	M16
65	185	145	M16	4	M16
80	200	160	18	8	M16
100	220	180	18	8	M16
125	250	210	18	8	M16
150	285	240	22	8	M20
200	340	295	22	8	M20
250	395	350	22	12	M20
300	445	400	22	12	M20
350	505	460	22	16	M20
400	565	515	26	16	M24

### 5.2. Sonderbauformen

Sonderbauformen von PTFE-Kompensatoren werden durch bestimmte Belastungskombinationen erforderlich.

#### **Hohe Druckbelastungen:**

Werden erhöhte Druckbelastungen als für reine PTFE Kompensatoren ausgewiesen notwendig, so kann man auf mehrlagige Metallbälge ausweichen, die aus Gründen des Korrosionsschutzes PTFE-ausgekleidet werden (siehe Abbildung 14). Dieser Kompensatortyp kann für die Druckstufen PN10, PN16 und PN25 ausgelegt bzw. eingesetzt werden. Er kombiniert die Chemikalienbeständigkeit von PTFE und die hohe Festigkeit eines Metallkompensators. Durch eine Ausführung mit mehreren übereinanderliegenden Blechlagen wird die Federrate minimiert.

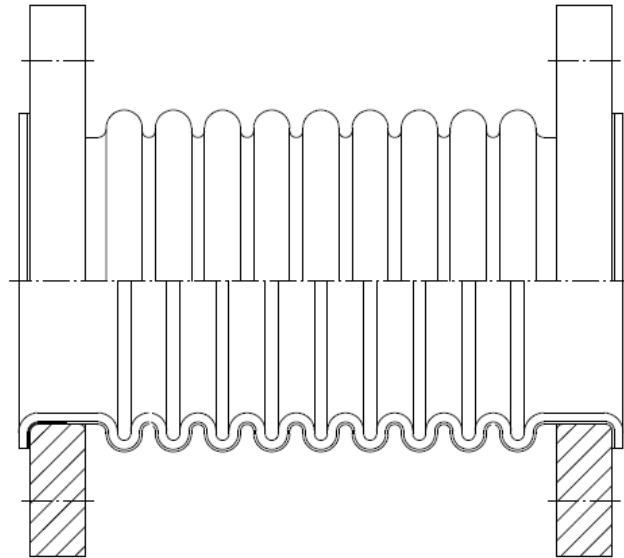


Abb. 14: Hochdruckkompensator mit PTFE Auskleidung

**Unterdruckbelastungen:**

Für Unterdruckbelastungen können zusätzliche innenliegende Stützringe verwendet werden, um Vakuumfestigkeiten zu ermöglichen. Entsprechende Daten hinsichtlich Unterdruckbeständigkeit und Bewegungsspiel sind vom Hersteller zu erfragen.

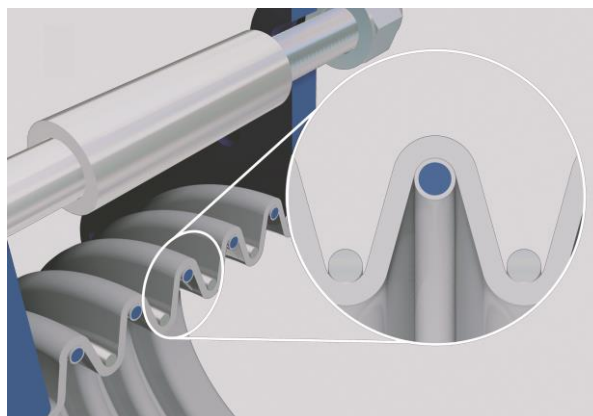


Abb. 15: Innenliegende Stützringe zur Erhöhung der Vakuumfestigkeit

Für dauerhafte Vakuumbelastungen werden spezielle Vakuumkompensatoren ab Nennweite DN 200 angeboten (siehe Abbildung 16). Sie sind gekennzeichnet durch einen PTFE-Liner, der an Stelle des Balges durch einen Klemmring gehalten ist. Damit wird ein Kollabieren des PTFE-Liners verhindert. Diese Vakuumkompensatoren sind für axiale Bewegungsaufnahmen konstruiert.

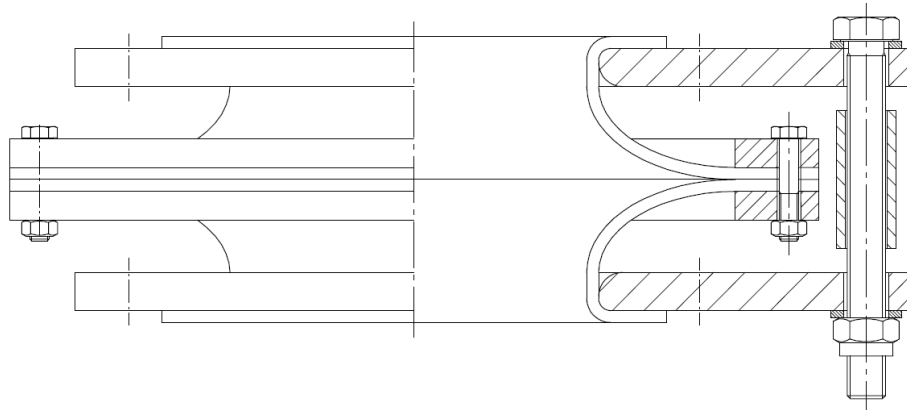


Abb. 16: PTFE-Vakuumkompensator FLUROFLEX® FX-0

### **Abrasive Belastungen:**

Beim Einsatz von Kompensatoren ist wegen der Wellenstruktur der Bälge mit besonderer Abrasionsgefahr zu rechnen. Gerade bei Anwendungen im chemischen Bereich handelt es sich häufig um feststoffbeladene Medien. Zum Schutz vor Abrasion können die Kompensatoren mit metallischen oder PTFE-Schutzrohren versehen werden. Diese beeinträchtigen die axiale Bewegungsaufnahme nicht.

Im Zuge eines Tests kann dieses Schutzrohr als Abrasionsdetektor fungieren, womit eventuelle Linerschädigungen rechtzeitig erkannt und daraus resultierenden Schadensereignissen vorgebeugt werden kann.

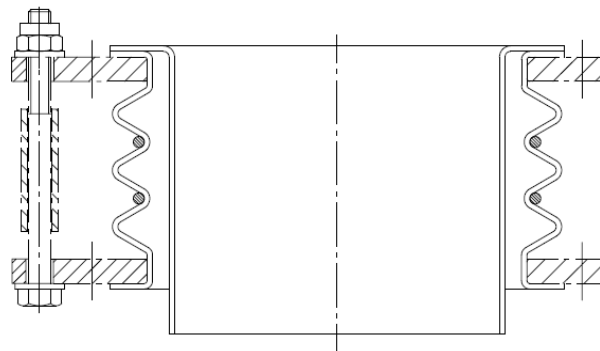


Abb 17: Kompensator mit innenliegendem Schutzrohr

## **6. Prüfung**

### **6.1 Allgemeines (Prüfumfang)**

Kompensatoren sind als Bauteile von Rohrleitungen im Sinne der Druckgeräterichtlinie (DGRL) prüfpflichtig. Sie werden vom Hersteller mit CE-Kennzeichen, Konformitätserklärung und Betriebsanleitung geliefert. Unabhängig von der Einstufung nach DGRL sind die Schluss- und Druckprüfung nach DGRL zu bescheinigen.

Die Anzahl der Prüfungen am Halbzeug und am Fertigteil nach Abschnitten 6.3 und 6.4 ist zwischen den Vertragspartnern zu vereinbaren. Die Anforderungen der DGRL sind einzuhalten.

## 6.2 Prüfstelle

Die nachfolgend aufgeführten Prüfungen werden fertigungsbegleitend durch eine von der Produktion unabhängigen Prüfstelle des Herstellers, soweit in der Bestellung nichts anderes vereinbart wurde, durchgeführt.

## 6.3 Prüfung der Stützringe

An einer relevanten Anzahl von Stützringen sind Zugversuche durchzuführen. Die Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung müssen in den Grenzen des verwendeten Werkstoffes/Norm liegen. Die Bewertung der Schweißnaht für die Stützringe kann beispielsweise in Anlehnung an DIN EN ISO 5817.

## 6.4 Prüfung des PTFE-Halbzeugs (Rohr)

Die Prüfung der Halbzeuge ist mindestens an einem extrudierten Rohr je Sintervorgang, Rohstoffcharge und Fertigungslos durchzuführen. Die Prüfungen sind nach DIN 2874 durchzuführen.

### 6.4.1 *Dichte*

Die Anforderungen sind nach DIN EN ISO 1183 zu prüfen.

### 6.4.2 *Reißfestigkeit und Reißdehnung*

Die Anforderungen nach Tabelle 1 sind durch einen Zugversuch nach DIN EN ISO 527-1 nachzuweisen. Die Probenform (Normkleinstab Typ A) und die Prüfgeschwindigkeit (50 mm/min) sind nach DIN EN ISO 13000-2 festgelegt.

## 6.5 Prüfung am Fertigteil

### 6.5.1 *Prüfung der Beschaffenheit*

Der Kompensator und insbesondere der PTFE-Balg werden auf erkennbare Mängel geprüft. Die Prüfung wird visuell, ggf. unter Zuhilfenahme optischer Hilfsmittel, durchgeführt. Die Füllstoffverteilung wird anhand von Mikrotomschnitten beurteilt. Die Anforderungen nach Abschnitt 3.3.1 sind einzuhalten.

### 6.5.2 *Maßprüfung*

Die Prüfung der Wanddicken erfolgt z. B. durch eine Ultraschallmessung oder durch Aufschneiden des Kompensators und Messen mit einem Messschieber.

Die Anforderungen nach Tabelle 3 müssen eingehalten werden.

### 6.5.3 *Prüfung der elektrostatischen Aufladbarkeit*

Die Beurteilung der elektrostatischen Aufladbarkeit erfolgt anhand der Messung des Oberflächenwiderstandes des einbaufertigen Bauteils. Die Messung des Oberflächenwiderstandes und des Ableitwiderstandes ist nach DIN IEC 60093 und DIN IEC 60167 durchzuführen. Als Messspannung muss 100 V oder 1.000 V Gleichspannung verwendet werden. Der Prüfbericht ist nach DIN IEC 60093 und DIN IEC 60167 zu erstellen. Die Messung des Ableitwiderstandes ist nach DIN EN 1081 mit 100 V Gleichspannung durchzuführen.

#### 6.5.4 Baumusterprüfung von PTFE-Kompensatoren

Zum Nachweis der Langzeitfestigkeit sind Zeitstandinnendruckprüfungen durchzuführen. Dabei ist folgendermaßen vorzugehen: Es wird eine Zeitstandinnendruckprüfung an Kompensatoren der Nennweite DN 80 bei 150 °C über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Prüfung wird eine Zeitstandkurve erstellt und auf 20 Jahre extrapoliert. Für die anderen Nennweiten muss punktuell (3 Prüfpunkte) geprüft werden, ob die Werte auf oder oberhalb dieser Kurve liegen. Ist dies nicht der Fall, muss für die betreffende Nennweite die Kurve des DN 80-Kompensators parallel so verschoben werden, dass die 3 Prüfpunkte auf bzw. oberhalb dieser Kurve liegen. Dieser Analogieschluss darf nur für Nennweiten gezogen werden, die nach dem gleichen Verfahren wie die geprüften Kompensatoren DN 80 gefertigt werden. Bei anderen Fertigungs- oder Konstruktionsvarianten muss eine neue Zeitstandkurve mittels Innendruckprüfung ermittelt werden.

#### 6.5.5 Wechselbelastung

Allgemeingültige Bedingungen für eine Lastwechselprüfung festzulegen ist sehr aufwändig, da hinreichende Erfahrungen fehlen. Daher ist ein geeigneter Nachweis im Bedarfsfall zwischen Hersteller und Bedarfsträger zu vereinbaren.

## 7. Verpackung, Lagerung, Transport

Die Kompensatoren sind an den Dichtflächen mit steifen Deckeln vom Hersteller zu verschließen. Die Deckel sollen erst unmittelbar vor der Montage entfernt werden.

Die Kompensatoren sollen bis zur Verwendung in der Originalverpackung gelagert werden.

Folgende Vorgaben sind einzuhalten:

- Lagerung auf ebener Fläche.
- Kompensatoren nicht aufeinander stapeln.
- Kompensatoren nur vollständig entleert, getrocknet und vor Frost geschützt lagern, da Eisbildung im Kompensator diesen zerstören kann.
- Kompensatoren vor Eindringen von Wasser, Schmutz und Beschädigungen schützen.
- Kompensatoren vor direkter Sonneneinstrahlung und erhöhten Temperaturen schützen.

## 8. Kennzeichnung

Die Kompensatoren werden vom Hersteller mit CE-Kennzeichnung, EG-Konformitätserklärung und Betriebsanleitung geliefert. Jeder Kompensator ist dauerhaft und deutlich wie folgt zu kennzeichnen:

- CE-Kennzeichnung gemäß DGRL erforderlich
- Zeichen des Herstellers der Auskleidung
- Nennweite
- Baulänge
- Nenndruck (Flansch)
- Maximal zulässiger Druck bei 20 °C
- Kurzzeichen des Auskleidungswerkstoffes
- Herstelldatum

Bei Lieferung mit Abnahmeprüfzeugnis nach DIN EN 10204 gilt zusätzlich für die Flansche:

- Schmelznummer oder Kurzzeichen
- Zeichen des Prüfers (Abnahmebeauftragter Werksachverständiger)

Die Kennzeichnung muss im eingebauten Zustand deutlich lesbar sein. Die Druck-/Temperaturkenndaten der Hersteller sind zu berücksichtigen.

## 9. Betrieb

### 9.1 Bestimmungsgemäße Verwendung

Der Kompensator darf nur innerhalb der auf der Zeichnung, dem Fabriketikett, der technischen Dokumentation und der Betriebsanleitung genannten Einsatzgrenzen und im einwandfreien Zustand eingesetzt und betrieben werden.

Die Temperatur-/Druckdiagramme zur Bestimmung der minimal/maximal zulässigen Betriebsdrücke und Betriebstemperaturen, sowie die zulässigen Ausgleichsbewegungen sind dem Produktkatalog zu entnehmen und zu beachten.

Kompensatoren können bestimmungsgemäß in begrenztem Umfang Kräfte aus der Leitung bzw. Anlage absorbieren oder diese übertragen. Sie sind jedoch nicht dafür ausgelegt, Torsionskräfte zu übertragen.

Bei chlor- und chloridhaltigen Medien (z.B. Salzsäure) sind die Stützringe aus nichtrostendem Stahl 1.4571 ungeeignet. In diesem Fall ist die Auswahl des geeigneten Kompensators mit dem Hersteller abzustimmen. PTFE ist nicht beständig gegen Chlortrifluorid, Monomere wie Buten oder Styren können aufgrund von Permeation und Autopolymerisation kritisch sein. Die Eignung des Kompensators für den spezifischen Einsatz sowie die Beständigkeit gegenüber den eingesetzten Betriebsmedien sind im Zweifelsfall vom Betreiber mit dem Hersteller abzuklären.



Jegliche Abweichung hiervon, insbesondere Überschreitung des min./max. zulässigen Drucks, der min./max. Temperatur oder der Verwendung von nicht genehmigten Betriebsmedien kann zum Versagen des Bauteils und somit zu schwerwiegenden Personen- oder Sachschäden führen und bedarf deshalb der schriftlichen Zustimmung durch den Hersteller.

## 9.2 Verbotene Handlungen

Folgende Handlungen können zu schweren Unfällen führen und sind deshalb verboten:

- Arbeiten an unter Druck bzw. im Betrieb sich befindenden Kompensatoren:  
Der Kompensator ist vorher außer Betrieb zu nehmen, drucklos zu machen, abzukühlen und zu dekontaminieren.
- Veränderung der spezifizierten Betriebsbedingungen:  
Modifizieren des Kompensators inklusive Entfernen oder Hinzufügen von Komponenten sowie mechanischer oder schweißtechnischer Bearbeitung.

## 9.3 Restgefahren

Um Gefahren für den Benutzer oder Beschädigungen an den Kompensatoren zu vermeiden, dürfen die Kompensatoren nur für ihre bestimmungsgemäße Verwendung und in sicherheitstechnisch einwandfreiem Zustand eingesetzt werden. Sicherheitsvorkehrungen gegen die Auswirkungen eines möglichen externen Feuers sind nicht Teil der Konstruktion und müssen im Notfall vom Betreiber festgesetzt werden.

### Sicherheitsvorkehrungen in ATEX-Anlagen

Der Betreiber muss prüfen, ob Betriebszustände im Kompensator auftreten können, die eine elektrostatische Aufladung hervorrufen könnten und ob in einem solchen Fall die Funkenentladung ein Sicherheitsproblem darstellt. Ggf. ist dann ein Kompensator aus antistatischem (elektrostatisch ableitendem) PTFE im Sinne der DIN 2874 und mit geeigneten Erdungselementen zu verwenden.

## 9.4 Störungen

Betriebsstörungen können unzulässige Betriebszustände hervorrufen, die den Kompensator zerstören können, z. B.:

- Druckstöße
- Thermoschocks
- Unzulässige Zusammensetzung der Stoffströme
- Ablagerung von Feststoffen
- Einfrieren des Kompensators
- Druck- oder Temperaturüberschreitung
- Unzulässige Spannungsübertragung aus der Rohrleitung auf den Kompensator

Deshalb:

- Einrichtungen vorsehen, die sicherstellen, dass auch bei Betriebsstörungen unzulässige Betriebszustände am Kompensator vermieden werden.
- Sind im Anlagenbetrieb unzulässige Betriebszustände aufgetreten, sind die Kompensatoren sofort auszutauschen.
- Die folgenden Maßnahmen zur Vermeidung unzulässiger Betriebszustände bei gegebenen Betriebsstörungen beachten.

Hinweis:

Die nachfolgend aufgeführten Störungen stellen eine Auswahl möglicher bekannter Störungen dar. Darüberhinausgehende Störungen können sich aus dem Zusammenhang mit der Anlagenkonzeption bzw. mit dem gelieferten PTFE-Bauteil inklusive aller Einbauten ergeben. Es obliegt der Verantwortung des Betreibers die aufgeführten Störungen samt Ursachen und Hinweisen zur Abhilfe im Zusammenhang mit der Anlagenkonzeption zu überprüfen, ggf. zu korrigieren, zu ergänzen und geeignete Gegenmaßnahmen inklusive einer sofortigen Außerbetriebnahme festzulegen.

Achtung:

Bei nachfolgenden Abhilfemaßnahmen bzw. Arbeiten am Bauteil selbst, ist das Bauteil außer Betrieb zu nehmen, drucklos zu machen, abzukühlen und zu dekontaminieren.

Störung	Ursache	Abhilfe
Medium tritt an Flanschverbindung aus	Drehmoment nicht angepasst	Drehmoment zu gering: Schrauben mit definiertem Drehmoment nachziehen. Drehmoment zu hoch: zusätzliche Dichtung verwenden und mit angepasstem Drehmoment anziehen.
	Flansche nicht exakt gesetzt oder Flanschanschluss nicht spannungsfrei	Flanschverbindungen korrekt montieren.
	Dichtungsflächen oder Dichtungen beschädigt oder verschmutzt	Dichtungsflächen säubern und auf Schäden überprüfen. Bei beschädigter Auskleidung oder Korrosion an Stahlteilen Kompensator austauschen. Bei beschädigten Dichtungen, Dichtungen erneuern.
Beschädigter PTFE Balg		Service Partner hinzuziehen
Korrosion an Stahlteilen	Leckage	Leckageursache ermitteln, geeignete Maßnahmen zur Leckagebehebung treffen. Kompensator ggf. austauschen.

## 9.5 Spritzschutz

Kompensatoren stellen in einem Rohrleitungssystem die schwächste Komponente dar. Aus diesem Grund wird die Verwendung von Spritzschutzsystemen, z.B. Spritzschutzmanschetten aus medienbeständigem Material empfohlen.

Bei Verwendung reizender bzw. ätzender Stoffe wird die Verwendung von Spritzschutzvorkehrungen an Flanschverbindungen im Merkblatt M004 der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) vorgeschrieben.

Spritzschutzmanschetten sind in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich. Transparente Materialien oder integrierte Indikatorstreifen ermöglichen dabei eine sehr gute visuelle Inspektion und frühzeitige Erkennung möglicher Gefahren.

## 10. Abbildungsverzeichnis

	Beschreibung	Quelle
Abb. 1	Dreiwelliger Kompensator mit Begrenzungsstangen	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 2	Schlechte Ausformung des PTFE-Balgs mit extremer Wanddickenschwankung	Baum Lined Piping GmbH
Abb. 3	Unzulässige funktionsbeeinflussende Fehler am PTFE-Balg	
Abb. 4	Gleichmäßige Wanddickenverteilung des PTFE-Balgs FLUROFLEX®	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 5	a. Ausgewogenes Axial – Bewegungsspiel durch optimierte Abstimmung der Liner- Stärke und Wellengeometrie b. Überschreiten der min. Baulänge (Axialbewegung) durch zu dicken Liner und ungünstige Wellenkontur	Baum Lined Piping GmbH
Abb. 6	a. FEM Berechnung axiale Spannung b. FEM Berechnung tangentielle Spannung	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 7	Rissbildung nach <5000 axialen Bewegungszyklen aufgrund ungleichmäßiger Wandstärkenverteilung	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 8	Gleichmäßige Rußverteilung	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 9	Ungleichmäßige Rußverteilung	
Abb. 10	Maximal zulässiger Betriebsdruck	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 11	Simulation des maximalen Betriebsdruckes ohne plastische Verformung	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 12	Schematische Vakuumbeständigkeit von PTFE-Kompensatoren bei konstanter Wellenzahl	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 13	Skizze eines PTFE-Axialkompensators; Beispiel für 3-wellige Ausführung	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 14	Hochdruckkompensator mit PTFE Auskleidung	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 15	Innenliegende Stützringe zur Erhöhung der Vakuumfestigkeit	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH

Abb. 16	PTFE-Vakuumkompensator FLUROFLEX® FX-0	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH
Abb. 17	Kompensator mit innenliegendem Schutzrohr	SGL Carbon GmbH / Dr. Schnabel GmbH

## Mitglieder der Fluoropolymergroup:

