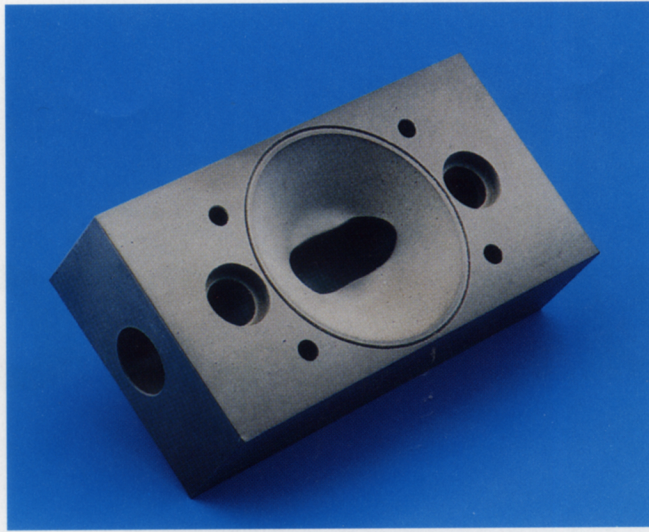


Eine niedrige Reibung und eine hohe Verschleißfestigkeit lassen sich in Kunststoffbauteilen unter anderem durch geeignete reibungs- und verschleißmindernde Füllstoffe erreichen. Polyphenylsulfon (PPSO<sub>2</sub>) erscheint hier als Füllstoff besonders geeignet, die Reibungs- und Verschleiß-eigenschaften von Polytetrafluorethylen (PTFE) zu beeinflussen.



Pumpengehäuse aus Perfluoro-Alkoxy-alkan-Copolymer (PFA), verstärkt mit PPSO<sub>2</sub>  
Werkbild: Venus, Heidenheim

M. Szameitat und  
G.W. Ehrenstein, Erlangen,  
und H. Scheckenbach,  
Frankfurt/Main

## Verschleißfeste PTFE-Compounds

Reibung und Verschleiß  
von Polyphenylsulfon-gefülltem PTFE

**Wear-resistant PTFE compounds.** *Low friction and high wear-resistance can be achieved in plastics components by the use of suitable friction- and wear-reducing fillers. Polyphenylene sulphone (PPSO<sub>2</sub>) appears to be a particularly effective filler for improving the friction and wear properties of polytetrafluoroethylene (PTFE).*

Tribologisch beanspruchte Bauteile werden nicht nur aus wirtschaftlichen, sondern auch aus technischen Gründen zunehmend aus Kunststoffen gefertigt. Eine niedrige Reibung und eine hohe Verschleißbeständigkeit läßt sich in

Kunststoffbauteilen unter anderem durch geeignete reibungs- und verschleißminimierende Füllstoffe erreichen. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn Kosten für Werkstoffe, Herstellungsverfahren oder Konstruktionen

### Polyphenylsulfon (PPSO<sub>2</sub>)

PPSO<sub>2</sub> (Bild 1) ist ein teilkristalliner Kunststoff (Typ: Ceramer, Hersteller: Hoechst) und hat eine Glasübergangstemperatur (T<sub>g</sub>) von ca. 360 °C. Der Schmelzbereich des Werkstoffs liegt oberhalb der Zersetzungstemperatur, deshalb kann PPSO<sub>2</sub> nicht thermoplastisch, sondern nur durch Heißpressen verarbeitet werden. Der Einsatz konzentriert sich zunächst auf Anwendungen als Füllstoff für Kunststoffe, z. B. zur Verbesserung der Reibungs- und Verschleiß-eigenschaften oder deren Metallisierbarkeit.

Die mittlere Korngröße (d<sub>50</sub>-Wert) von PPSO<sub>2</sub> beträgt ca. 20 µm. Die maximale Korngröße (d<sub>100</sub>-Wert) ist kleiner als 50 µm. Die spezifische

Oberfläche beträgt nach BET [1, 2] ca. 10 m<sup>2</sup>/g. Die PPSO<sub>2</sub>-Partikel sind kugelförmig und haben eine sehr raue, zerklüftete Oberfläche (Bild 2). Dies ermöglicht eine formschlüssige Verbindung mit Matrixwerkstoffen.

PPSO<sub>2</sub> bietet sich als Füllstoff zur Verbesserung der Verschleiß-eigenschaften von Kunststoffen an, da es eine sehr hohe Drucksteifigkeit und -festigkeit sowie eine hohe Härte besitzt (Tabelle 1). Seine chemische Beständigkeit ist vergleichbar mit der von PTFE [3]. Auch für höhere Temperaturen ist für PPSO<sub>2</sub> kein Lösungsmittel bekannt.



eingespart werden können. Die Einsatzgrenzen von tribologisch beanspruchten Bauteilen werden oft durch die an der Gleitfläche oder im Bauteil entstehenden Temperaturen sowie der damit zusammenhängenden Verschleißerhöhung und Minderung der Tragfähigkeit bestimmt. Deshalb sollte die thermische und chemische Stabilität der Füllstoffe nicht geringer sein als die der Matrixwerkstoffe.

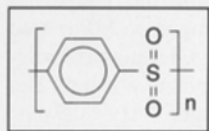


Bild 1. Strukturformel von Polyphenylsulfon (PPSO<sub>2</sub>)

Polyphenylsulfon (PPSO<sub>2</sub>) erscheint als Füllstoff für tribologisch beanspruchte Kunststoffbauteile besonders geeignet, da es eine hohe Steifigkeit und Härte besitzt, sehr verschleißfest und chemikalienbeständig ist sowie eine hohe Temperaturbeständigkeit aufweist. Untersuchungen zeigen, wie PPSO<sub>2</sub> als Füllstoff die Reibungs- und Verschleißigenschaften von Polytetrafluorethylen (PTFE) beeinflusst.

## Herstellung der PTFE-Compounds

PTFE-Pulver (Typ: Hostaflon TF 1750, Hersteller: Dyneon) wurden mit unterschiedlichen PPSO<sub>2</sub>-Anteilen gemischt, zu Zylindern mit einem Außendurchmesser von 45 mm kalt verpreßt und anschließend gesintert.

Um die tribologischen Eigenschaften der PTFE/PPSO<sub>2</sub>-Compounds besser bewerten zu können, stellte man für Vergleichsuntersuchungen PTFE-Compounds mit 10 % bereits etablierter organischer Füllstoffe her, wie z. B. Polyarylat (PAR; Typ: Ekonol, Hersteller: Kennecott, Sanborn/New York [4]) und Polyimid (PI; Typ: Sintimid P84, Hersteller: Sintimid Hochleistungskunststoffe, Lenzing/Österreich [5]). Die Verarbeitungsparameter entsprechen denen bei der Herstellung des PTFE/PPSO<sub>2</sub>-Compounds mit 10 Gew.-% PPSO<sub>2</sub>. Die Korngrößenverteilungen der organischen Füllstoffe gibt Bild 3 wieder. Hinsichtlich der chemischen Beständigkeit unterschieden sich PAR und PI von PPSO<sub>2</sub> vor allem durch ihre geringere Beständigkeit gegenüber Schwefelsäure [3, 4, 5].

## Reibungs- und Verschleißigenschaften

Für den Vergleich von Werkstoffen bei unterschiedlichen thermischen und tri-

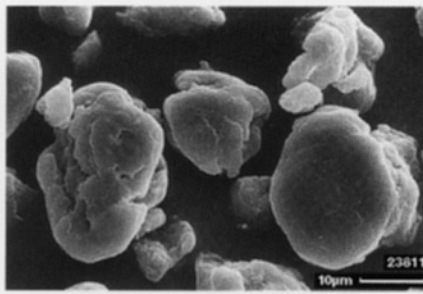


Bild 2. PPSO<sub>2</sub>-Partikel im Rasterelektronenmikroskop

bologischen Beanspruchungen sind ein Stift-Scheibe-Prüfstande (Bild 4) geeignet [6, 7]. Die tribologischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe lassen sich entsprechend der DIN ISO 7148 [8] durch die lineare Verschleißrate  $w_{1/16}$ , den Verschleißkoeffizient  $k$  und die Reibungszahl  $f$  beschreiben.

Unabhängig von der Art des Kunststoffes sollte bei Kunststoff-Metall-Paarungen die Rockwellhärte HRC der Oberfläche des Metallpartners immer größer als 50 sein. Bei niedriger Oberflächenhärte können Rauheitsspitzen abbrechen, sich teilweise in die Kunststoffgleitfläche einbetten und wie ein Schleifmittel wirken, so daß sich Metall- und Kunststoffverschleiß erhöhen [7, 9]. Außerdem hängt bei solchen Paarungen das Reibungs- und Verschleißverhalten des Kunststoffes maßgeblich von der Oberflächenrauigkeit des Metallpartners ab. Für jeden Kunststoff gibt es eine optimale Oberflächenrauigkeit des Metallpartners ( $R_z$ ), die ein gleichmäßiges Gleiten (stick-slipfreie Bewegung) bei kleinstmöglichem Verschleiß des Kunststoffes sicherstellt [10].

Bild 5 zeigt den Einfluß des PPSO<sub>2</sub>-Gehalts auf den Verschleißkoeffizient  $k$  und die Reibungszahl  $f$  bei unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten des Metallpartners bei einer Flächenpressung von 5 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,5 m/s. Bei diesen Belastungen verschleißt nichtgefülltes PTFE so stark, daß ein technisch sinnvoller Ein-

satz nicht möglich ist. Unabhängig von der Oberflächenrauigkeit des Metallpartners wird der Verschleißkoeffizient bereits durch die Zugabe von 5 % PPSO<sub>2</sub> zum PTFE deutlich verringert. Bei einer gemittelten Rauhtiefe von  $R_z \sim 2 \mu\text{m}$  ist der Verschleißkoeffizient bei 5 bis 10 % PPSO<sub>2</sub>-Gehalt etwa doppelt so hoch wie bei  $R_z \sim 1 \mu\text{m}$ , beim Compound mit 20 % PPSO<sub>2</sub> sogar fast dreimal so hoch. Die Trockenreibungszahl wird vom PPSO<sub>2</sub>-Zusatz und der Oberflächenrauigkeit nur gering beeinflusst und zeigt die für PTFE-Compounds typisch niedrigen Werte von ca. 0,2.

Zum Vergleich wurden jeweils 10 % PPSO<sub>2</sub>, PAR und PI dem PTFE zugemischt. Bei  $R_z \sim 1 \mu\text{m}$  ergab sich weder für den Verschleißkoeffizienten noch für die Reibungszahl ein Unterschied (Bild 6). Das gleiche gilt für die Reibungszahl bei  $R_z \sim 2 \mu\text{m}$ . Dagegen wird der Verschleißkoeffizient bei  $R_z \sim 2 \mu\text{m}$  durch die Zugabe von PI auf ein Drittel reduziert, während er bei PAR nahezu auf das Dreifache ansteigt.

Tabelle 1. Eigenschaften im Druckversuch (in Anlehnung an DIN ISO 604) und Härte nach Vickers (DIN 50133) bestimmt an gesinterten PPSO<sub>2</sub>-Prüfkörpern

Eigenschaften		Kennwerte
Druck-E-Modul	MPa	4000
Streckspannung im Druckversuch	MPa	170
Druckfestigkeit	MPa	275
Vickershärte		28 HV 1/60

Der Verschleißkoeffizient  $k$  ist eine auf den Gleitweg und die Normalkraft bezogene Größe. Der Verschleiß steigt jedoch nicht immer proportional mit der Normalkraft an. Es wird daher zur Beschreibung der Verschleißigenschaften die lineare Verschleißrate  $w_{1/16}$  verwendet (Bild 7). Durch die Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit von 0,5 m/s auf 4 m/s wird der Verschleiß stark erhöht und erreicht bei 5 Gew.-% PPSO<sub>2</sub> mehr als 200  $\mu\text{m}/\text{km}$ . Die hohen Ver-

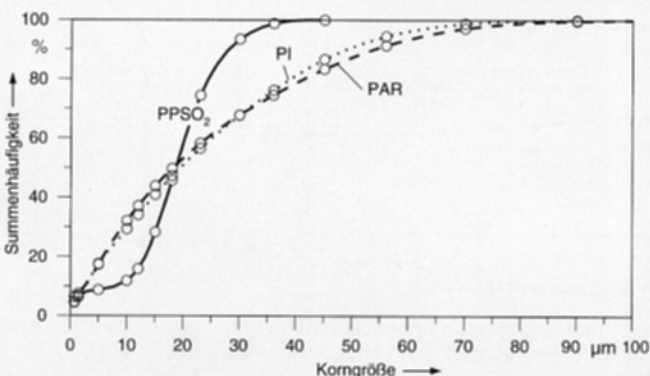


Bild 3. Korngrößenverteilung der untersuchten Füllstoffe PPSO<sub>2</sub>, PI (Polyimid) und PAR (Polyarylat)

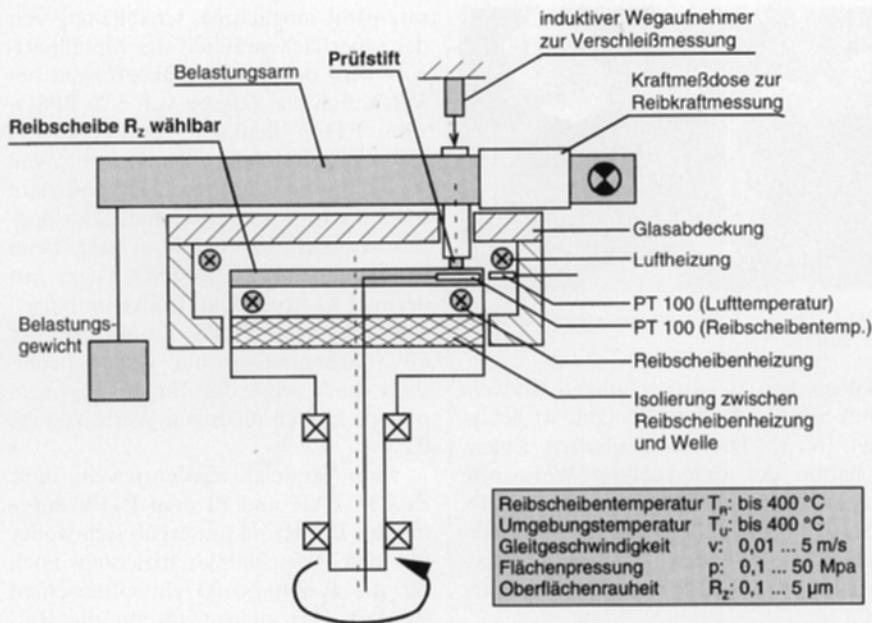


Bild 4. Schematische Darstellung des Stift-Scheibe-Prüfstands mit regelbarer Reibscheiben- und Umgebungstemperatur

schleißraten bei PTFE ohne Zusatz werden nicht weiter betrachtet, da sie technisch wenig sinnvoll sind. Durch den Zusatz von mindestens 5 Gew.-% PPSO<sub>2</sub> werden die Eigenschaften des PTFE so verbessert, daß bei Gleitgeschwindigkeiten bis 0,5 m/s günstige Verschleißigenschaften vorhanden sind. Für höhere Gleitgeschwindigkeiten ist der Zusatz von mindestens 10 Gew.-% PPSO<sub>2</sub> erforderlich. Bei 20 Gew.-% PPSO<sub>2</sub> kann das PTFE auch bei sehr hohen Belastungen von  $v = 4 \text{ m/s}$  und  $p = 5 \text{ MPa}$  eingesetzt werden.

Um die Temperaturbelastung der Compounds einschätzen zu können, wurden Versuche mit Gleitflächentemperaturen ab 200°C durchgeführt (Bild 8). Bei Temperaturen über 150°C und der Flächenpressung von 5 MPa fließt reines PTFE und kann nicht mehr untersucht werden. Durch den Zusatz von PPSO<sub>2</sub> zum PTFE kann die

Temperatureinsatzgrenze auf über 200°C angehoben werden. Im Bereich zwischen 220 und 250°C ist die PTFE-Matrix stark erweicht und der Verschleiß steigt deutlich an. Bei noch höheren Temperaturen wurden die Proben durch die Verringerung der Tragfähigkeit verformt, so daß keine Versuche mehr durchgeführt werden konnten.

### Einsatzmöglichkeiten und Anwendungen

Die Verschleißfestigkeit von PTFE kann durch den Zusatz von PPSO<sub>2</sub> deutlich erhöht werden. Außerdem wird so die Verschleißanfälligkeit des PTFE gegen raue Oberflächen deutlich gemindert. Dennoch sollte die mittlere Rauhtiefe  $R_z$  des metallischen Reibpartners die bei PTFE üblichen Werte von 1,5 µm nicht überschreiten.

Dann haben PTFE/PPSO<sub>2</sub>-Compounds im Vergleich mit PTFE/PI- und PTFE/PAR-Compounds vergleichbare, teilweise bessere Verschleißigenschaften, bei gleichzeitig höherer Chemikalienbeständigkeit des Füllstoffs. Außerdem besteht durch die kleinere Partikelgröße von PPSO<sub>2</sub> die Möglichkeit, bessere Oberflächenqualitäten zu erreichen.

Durch die Zugabe von mindestens 20 Gew.-% PPSO<sub>2</sub> kann das PTFE bei hohen Flächenpressungen (5 MPa) und gleichzeitig hohen Gleitgeschwindigkeiten (4 m/s) eingesetzt werden. Bei niedrigen Belastungen ( $v < 0,5 \text{ m/s}$ ;  $p < 5 \text{ MPa}$ ) ist die Zugabe von 10 Gew.-% PPSO<sub>2</sub> ausreichend. Die maximale Einsatztemperatur von PTFE/PPSO<sub>2</sub>-Compounds liegt in Abhängigkeit der Belastung zwischen 220 und 250°C. In diesem Bereich sollte der PPSO<sub>2</sub>-Gehalt mindestens 10 Gew.-% betragen. Die Reibungszahlen liegen bei technisch trockenen Bedingungen immer zwischen 0,2 und 0,3.

Entsprechend der spezifischen Eigenschaften der jeweiligen PTFE-PPSO<sub>2</sub>-Compounds bieten sich unterschiedliche Anwendungen an. Push-pull-Kabel werden für die Ummantelung von Stahlseilen zur Herstellung von Bowdenzügen eingesetzt. Wegen der hohen Temperatur- und Verschleißbeständigkeit von PPSO<sub>2</sub> werden diese Kabel jetzt aus PTFE/PPSO<sub>2</sub>-Compounds gefertigt (Bild 9). Im Vergleich zu den bisher eingesetzten Bowdenzügen mit Push-pull-Kabeln aus PTFE/PPS-Compounds, konnte die verschleißabhängige Lebensdauer auf das 30fache erhöht werden.

PPSO<sub>2</sub> bietet sich aufgrund der hohen Chemikalienbeständigkeit als verstärkender Füllstoff für PTFE-Dichtungen an, wenn gleichfalls eine hohe Verschleißbeständigkeit und eine niedrige Reibungszahl gefordert wird. Im Ge-

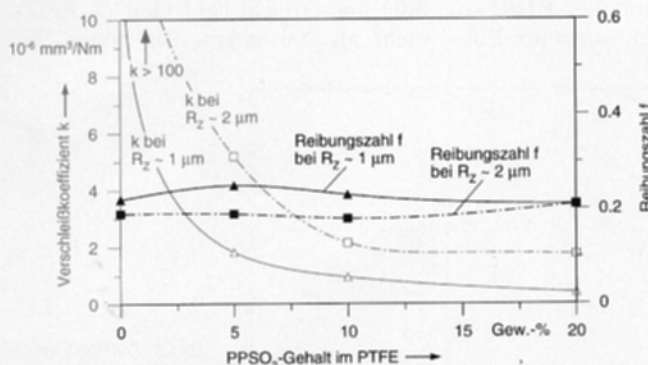


Bild 5. Verschleißkoeffizient  $k$  und Reibungszahl  $f$  der PTFE-PPSO<sub>2</sub>-Compounds im Stift-Scheibe-System (Bedingungen:  $p = 5 \text{ MPa}$ ,  $v = 0,5 \text{ m/s}$ ,  $T = 23^\circ\text{C}$ , technisch trocken)

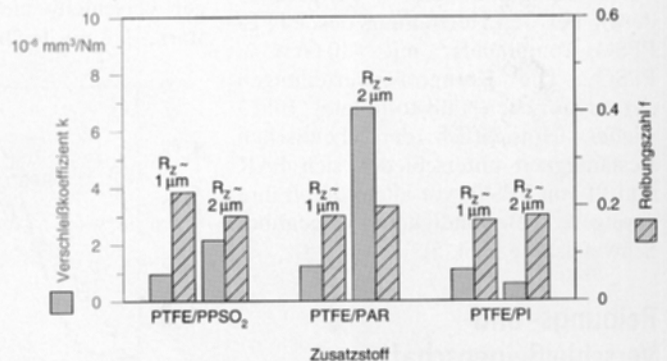


Bild 6. Verschleißkoeffizient  $k$  und Reibungszahl  $f$  von PTFE + 10% PPSO<sub>2</sub>, PTFE + 10% PAR und PTFE + 10% PI (Bedingungen:  $R_z \sim 1$  und  $\sim 2 \mu\text{m}$ ,  $p = 5 \text{ MPa}$ ,  $v = 0,5 \text{ m/s}$ ,  $T = 23^\circ\text{C}$ , technisch trocken)



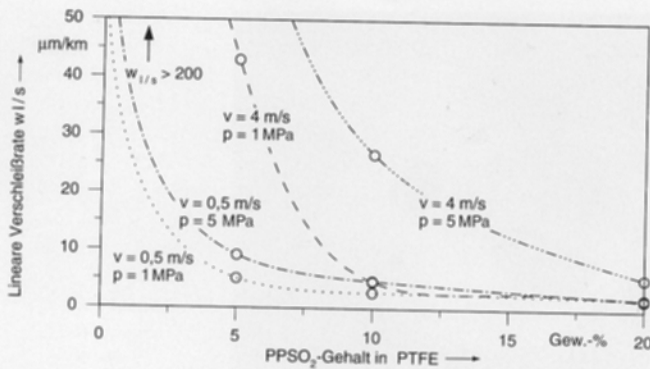


Bild 7. Lineare Verschleißrate  $w_{l/s}$  der PTFE-PPSO<sub>2</sub>-Compounds in Abhängigkeit der Flächenpressung  $p$  und der Gleitgeschwindigkeit  $v$  im Stift-Scheibe-System (Bedingungen:  $R_z \sim 1 \mu\text{m}$ ; technisch trocken)

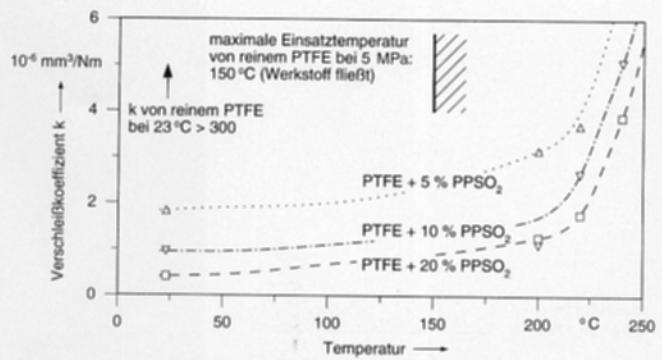


Bild 8. Verschleißkoeffizient  $k$  der PTFE-PPSO<sub>2</sub>-Compounds in Abhängigkeit der Gleitflächentemperatur im Stift-Scheibe-System (Bedingungen:  $R_z \sim 1 \mu\text{m}$ ,  $v = 0,5 \text{ m/s}$ ,  $p = 5 \text{ MPa}$ , technisch trocken)

gensatz zu bekannten Füllstoffen mit vergleichbarer Beeinflussung der tribologischen Eigenschaften, wie Glasfasern, Graphit, PPS, PAR oder PI, wird die Chemikalienbeständigkeit des PTFE-Compounds durch PPSO<sub>2</sub> nicht verschlechtert [3].

PPSO<sub>2</sub> zu Fluor-Kunststoffen oder hochtemperaturbeständigen Kunststoffen (z. B. LCP, PSU, PES, PEEK, PAI) deren *Metallisierbarkeit* wesentlich zu verbessern. Beispielsweise konnte durch den Zusatz von PPSO<sub>2</sub> die Haftfestigkeit von Kupfer auf Fluor-Kunst-

- 4 Ekonol PTFE Blends. Produktinformation der Kennecott Corporation, New York, 1981
- 5 Sintimid Hochleistungskunststoffe. Produktinformation der Sintimid Hochleistungskunststoffe, Lenzing/Österreich, 1995
- 6 Song, J.: Reibung und Verschleiß eigenverstärkter Polymerwerkstoffe. Dissertation, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 5, Nr. 220
- 7 Beringer, H.-P. u.a.: Lösung tribotechnischer Probleme mit Hilfe von Polymerwerkstoffen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 22, (1991), S. 168-173
- 8 DIN ISO 7148. Gleitlager; Prüfung des tribologischen Verhaltens von Lagerwerkstoffen. Teil 1 (1987), Teil 2 (1996)
- 9 Erhard, G; Strickle, E.: Maschinenelemente aus thermoelastischen Kunststoffen. 2. Aufl., VDI-Verlag, Düsseldorf, 1985
- 10 Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren. Hanser, München 1995

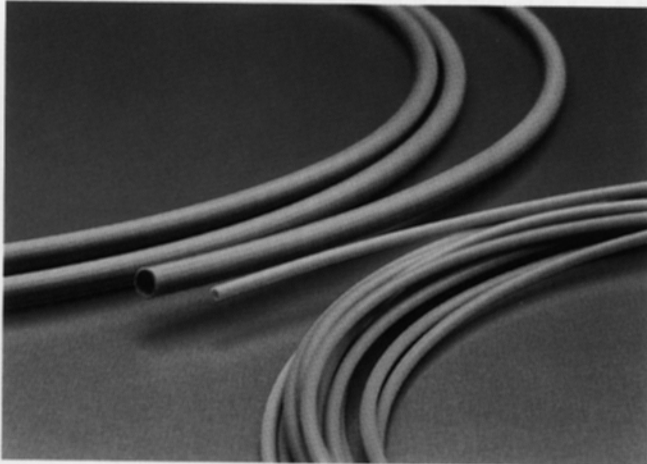


Bild 9. Push-pull-Kabel aus PTFE-Pastepulver (Typ: Norslide, Hersteller: Norton Pampus, Willich) verstärkt mit PPSO<sub>2</sub> (Typ: Ceramer, Hersteller: Hoechst) (Werkbild: Norslide, Norton Pampus, Willich)

PPSO<sub>2</sub> kann ebenfalls als Füllstoff für Fluor-Thermoplaste eingesetzt werden. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn mechanische Kennwerte, wie Härte oder Streckspannung erhöht werden sollen, die Chemikalienbeständigkeit des Compounds durch den Füllstoff aber nicht verringert werden darf. So wird ein *Pumpengehäuse für die Förderung aggressiver Medien* aus PFA/PPSO<sub>2</sub> gefertigt (Titelbild).

Bisher nicht erwähnt wurde die Möglichkeit, durch den Zusatz von

stoffen auf das 7fache erhöht werden [3].

#### Literatur

- 1 DIN 66131. Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmett und Teller (BET), 1973
- 2 Atkins, P. W.: Physikalische Chemie. VCH, Weinheim, 1988
- 3 Ceramer-Polyphenylsulfon-PPSO<sub>2</sub>. Produktinformation der Hoechst AG, Frankfurt a. Main, 1996

#### Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Ing. M. Szameitat, geb. 1965, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Dresden. Seit 1991 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Universität Erlangen-Nürnberg.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W. Ehrenstein, geb. 1937, ist Leiter des Lehrstuhls für Kunststofftechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg.

Dipl.-Ing.(FH) H. Scheckenbach, geb. 1964, studierte Kunststofftechnik an der FH Schweinfurt/Würzburg. Seit 1990 ist er bei der Hoechst AG im Bereich Technische Kunststoffe beschäftigt. Nach seiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur im Bereich polymere Blendsysteme leitet er seit 1995 die Produktgruppe Ceramer. (100786)