



pro-K Fluoropolymergroup

Technisches Merkblatt 15
Tribologie und Deformation unter Last

Vorwort

Polytetrafluorethylen (PTFE) hat sich aufgrund seines einzigartigen Eigenschaftsprofils als unersetzlicher Werkstoff in vielerlei, zumeist sehr anspruchsvollen, Anwendungen etabliert. Die universelle Chemikalienbeständigkeit, der sehr breite Temperatureinsatzbereich, die hohe Reinheit, die Biokompatibilität und das Erfüllen aller dreizehn Kriterien der OECD für einen „Werkstoff niederen Risikos“ (Polymers of low concern - PLC) wird von keinem anderen Polymerwerkstoff in Summe erreicht.

Jedoch besteht Verbesserungspotenzial für PTFE hinsichtlich seiner Widerstandsfähigkeit bei Druckbelastung und seines Abriebverhaltens in Anwendungen mit tribologischen Anforderungen. Während die Kaltflusseigenschaften signifikant durch die Entwicklung von modifiziertem PTFE verbessert wurden, sollten die Abriebeigenschaften ausschließlich durch die Verwendung von Füllstoffen optimiert werden.

Das vorliegende Merkblatt gibt einen Überblick über den Einfluss von ausgewählten Füllstoffen bei PTFE-Compounds hinsichtlich Deformation unter Last und tribologischen Eigenschaften.

Bildnachweis (Vorderseite): Messanordnung Deformation unter Last © Fietz Automotive GmbH

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: Juli 2025

Fluoropolymergroup

Die Fluoropolymergroup ist eine Fachgruppe von pro-K Industrieverband langlebige Kunststoffprodukte und Mehrwegsysteme e.V.; Mainzer Landstraße 55, D-60239 Frankfurt am Main; Tel.: 069 – 40 89 555 40

E-Mail: info@pro-kunststoff.de; www.pro-kunststoff.de

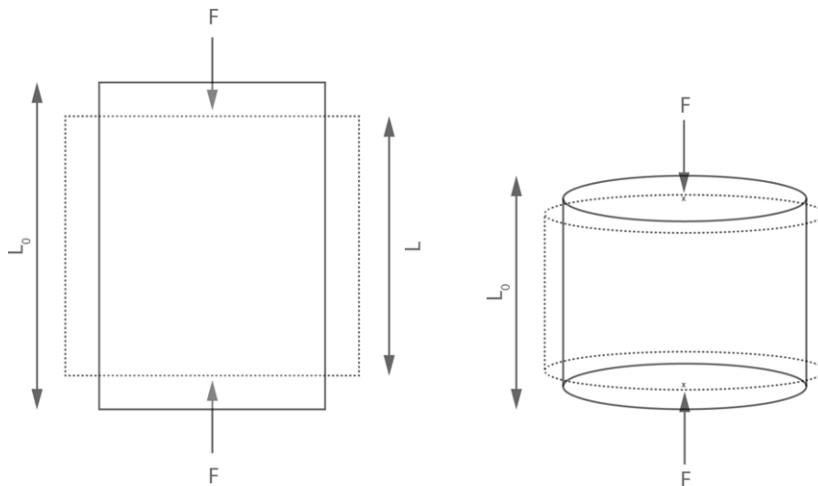
pro-K ist Trägerverband des Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.

Inhaltsverzeichnis

1. Die Phänomene
2. Die Messung
3. Messergebnisse: Deformation unter Last
4. Messergebnisse: Tribologische Charakterisierung von PTFE-Compounds

Einführung in die Deformation unter Last

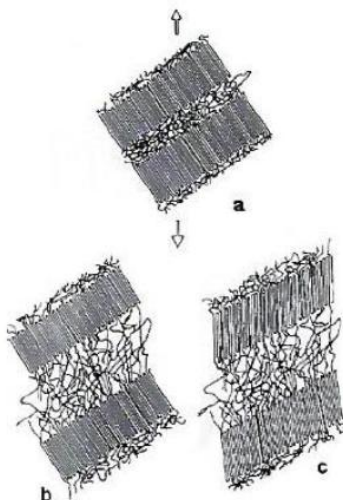
Das Verhalten der Deformation unter Last von PTFE und seinen Compounds bezieht sich darauf, wie die Kunststoffe auf einwirkende Kräfte und Spannungen reagieren, was zu Änderungen ihrer Form oder Größe führt. Die aufgebrachte Kraft bei der Deformation unter Last belastet den Prüfling unter Stauchbedingungen und nicht unter Zugbedingungen. Exemplarisch vereinfacht wie unten dargestellt:



Schematische Darstellung der Formänderung

PTFE und dessen Compounds weisen aufgrund ihrer molekularen Struktur einzigartige Verformungseigenschaften auf. Die langen Polymerketten werden durch schwache intermolekulare Kräfte und intermolekulare Verwicklungen (engl. Entanglements) zusammengehalten. Unter einer Druckbelastung zeigen diese Polymere unterschiedliche Verformungsphänomene.

Molekularer Aufbau und Deformationsmechanismus



Die drei Beiträge zur Gesamtdeformation

Spontane elastische, reversible Deformation

Zeitabhängige viskoelastische Deformation = reversibel über die Zeit

Zeitabhängige plastische Deformation = irreversibel

Die Deformation unter Last

1. Die Phänomene

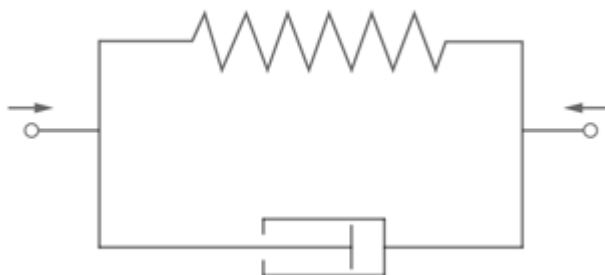
Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte der Deformation unter Last beschrieben:

1. **Elastische Verformung:** Wenn eine Kraft auf ein PTFE-Polymer ausgeübt wird, verformt es sich zunächst elastisch, d. h. es ändert vorübergehend seine Form, kehrt aber in seine ursprüngliche Form zurück, wenn die Kraft entfernt wird. Dieses Verhalten tritt auf, weil sich die Polymerketten dehnen und ausrichten können, ohne die Bindungen zwischen ihnen zu brechen. Das Ausmaß der elastischen Verformung hängt vom Elastizitätsmodul des Materials ab. Die Elastizität ist in Diagramm 1 als γ_1 zu erkennen. Dieses Verhalten kann in einem viskoelastischen Verformungsmodell am besten mit einer Feder (Hooksche Feder) beschrieben und dargestellt werden.



Federelement

2. **Viskoelastizität:** PTFE und dessen Compounds weisen ein viskoelastisches Verhalten auf, d.h. sie zeigen je nach Belastung und Zeit sowohl viskose (fließartige) als auch elastische (feststoffartige) Eigenschaften. Dieses Verhalten ist auf die Relaxation der Polymerketten im Laufe der Zeit unter Belastung zurückzuführen, was zu einer allmählichen Verformung auch bei konstanter Belastung führt. In Diagramm 1 ist das viskoelastische Rückstellverhalten im Bereich von γ_2 dargestellt. Das viskoelastische Verformungsmodell von PTFE kann in bester Näherung mit einem Feder- und Dämpferelement parallelgeschaltet dargestellt werden (Kelvin-Voigt-Modell)



Kelvin-Voigt-Modell

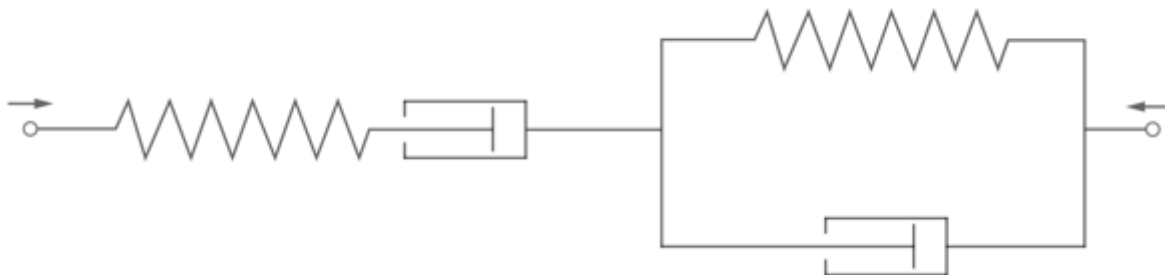
3. **Plastische Verformung:** Überschreitet die aufgebrachte Kraft einen bestimmten Schwellenwert, erfährt das PTFE-Polymer eine plastische Verformung. In diesem Stadium beginnen die Polymerketten aneinander vorbeizugleiten, was zu dauerhaften Form- oder Größenveränderungen führt. Die plastische Verformung erfolgt durch das Brechen und die Neubildung intermolekularer Bindungen, wodurch das Material eine erhebliche Verformung ohne Bruch erfährt. Die plastische Verformung ist in der Deformation unter Last Messung auch als permanente Deformation bekannt. Im viskoelastischen Verformungsmodell kann dieser Bereich in bester Näherung mit einem Dämpferelement dargestellt werden. In Diagramm 1 ist der plastische Verformungsteil als γ_3 dargestellt.



Dämpferelement

4. **Streckgrenze:** Der Punkt, an dem ein Polymer von der elastischen in die plastische Verformung übergeht, wird als Streckgrenze bezeichnet. Unterhalb dieses Punktes verformt sich das Material elastisch; Darüber hinaus kommt es zu plastischen Verformungen. Die Streckgrenze wird durch Faktoren wie die Molekularstruktur des Materials, die Kristallinität, die Füllstoffbeladung und die Art des Füllstoffes, die Temperatur sowie die Art und Geschwindigkeit der Belastung beeinflusst.
5. **Temperaturabhängigkeit:** Das Verformungsverhalten von PTFE ist stark temperaturabhängig. Höhere Temperaturen erleichtern in der Regel die molekulare Bewegung, wodurch das Material anfälliger für Verformungen wird.

Schaut man sich den Verlauf der Deformation unter Last bei PTFE an so kann man die Kurve am besten mit einer Serienschaltung von Kelvin-Voigt-Modell und einem Maxwell Modell beschreiben.



2. Die Messung

Die Messung der Deformation unter Last wird in Anlehnung an ASTM D 621 durchgeführt. Diese Norm ist Anfang der 1990 Jahre ausgelaufen, hat sich jedoch in der Industrie als Standard etabliert.

Für PTFE und dessen Compounds werden jedoch andere Testbedingungen angewendet als in der Norm beschrieben. Der Prüfdruck wird mit 15 MPa angewandt. Der Prüfling hat eine Zylindrische Form, mit einem Aussen Durchmesser von 10 mm und einer Höhe von 10 mm. Die Prüfdauer unter der permanenten Belastung beträgt 100 Stunden (PTFE-Nünchritz: 24 Stunden). Nach dieser Zeit wird die Deformation unter Druck ermittelt (in Diagramm 1 wird sie als Blau gestrichelte Linie dargestellt). Die ursprüngliche Höhe verglichen mit der gestauchten Höhe und dieser Wert wird in Prozent ausgedrückt. Danach wird der Druck entlastet. Nach Druckentlastung springt der Prüfkörper um einige Prozentpunkte zurück, das ist der elastische Teil (hier dargestellt als γ_1). Während den nächsten 24 Stunden tritt eine weitere Rückstellung der Verformung ein, dies ist der viskoelastische Teil (hier dargestellt als γ_2). Nach 24 Stunden Relaxion wird die permanente Deformation (hier dargestellt als γ_3) ermittelt.

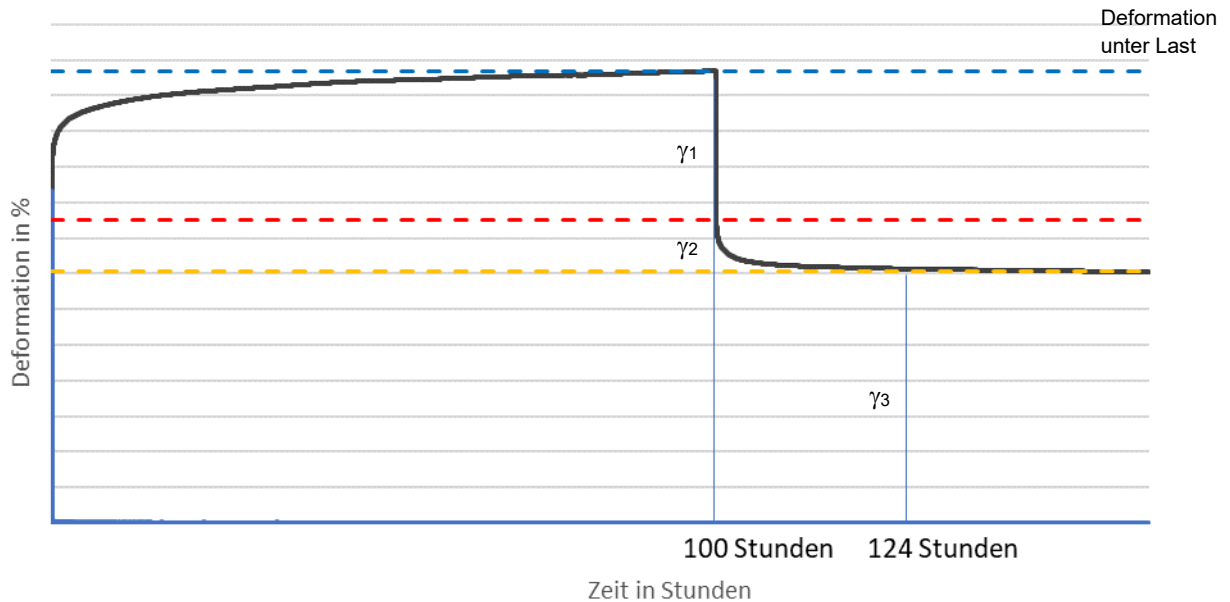


Diagramm 1: PTFE-Compound: Darstellung der Deformation unter Last einschließlich Rückstellung bis zur bleibenden Deformation

3. Messergebnisse: Deformation unter Last

Vorgehen:

Bei Dyneon/3M Kerkrade wurden 10 PTFE-Compounds gemischt (die Kompositionen sind auf Seite 11 in Tabelle 1 gelistet). Als Basismaterial wurde ein virginales PTFE (TF1750) verwendet.

Aus diesen Compounds wurden Presslinge bei der Fa. Fietz Automotive GmbH hergestellt. Hieraus wurden die Prüfkörper für die Deformation unter Last gefertigt.

Die Prüfkörper wurden in drei verschiedenen Laboren getestet: PTFE Nünchritz, Dyneon Werk Gendorf, Fietz Automotive GmbH.

Da die Labore unterschiedliche Geräte der Deformation unter Last benutzen, waren auch die Prüfergebnisse etwas verschieden. So prüft Dyneon: 100h Belastung @ 15 MPa, 24 h Entlastung bei 25°C. Messung der Deformation nach 100h und Entlastung (γ_2), sowie nach 24h Rückstellung (γ_3).

Fa. Fietz hingegen prüft 100h Belastung @ 15 MPa, 24 h Entlastung bei 23°C. Live-Messung der Deformation mittels integriertem Weglängenaufnehmer (sog. online Erfassung). PTFE Nünchritz misst 24 h Belastung, @ 15 MPa, unter Last. Danach 24 h Entlastung und erneute Messung bei 23°C.

Onlinemessung (blau) gemessen oberhalb γ_1

Messung zeitlich verzögert (orange; grau)

Messdauerunterschied (orange; grau)

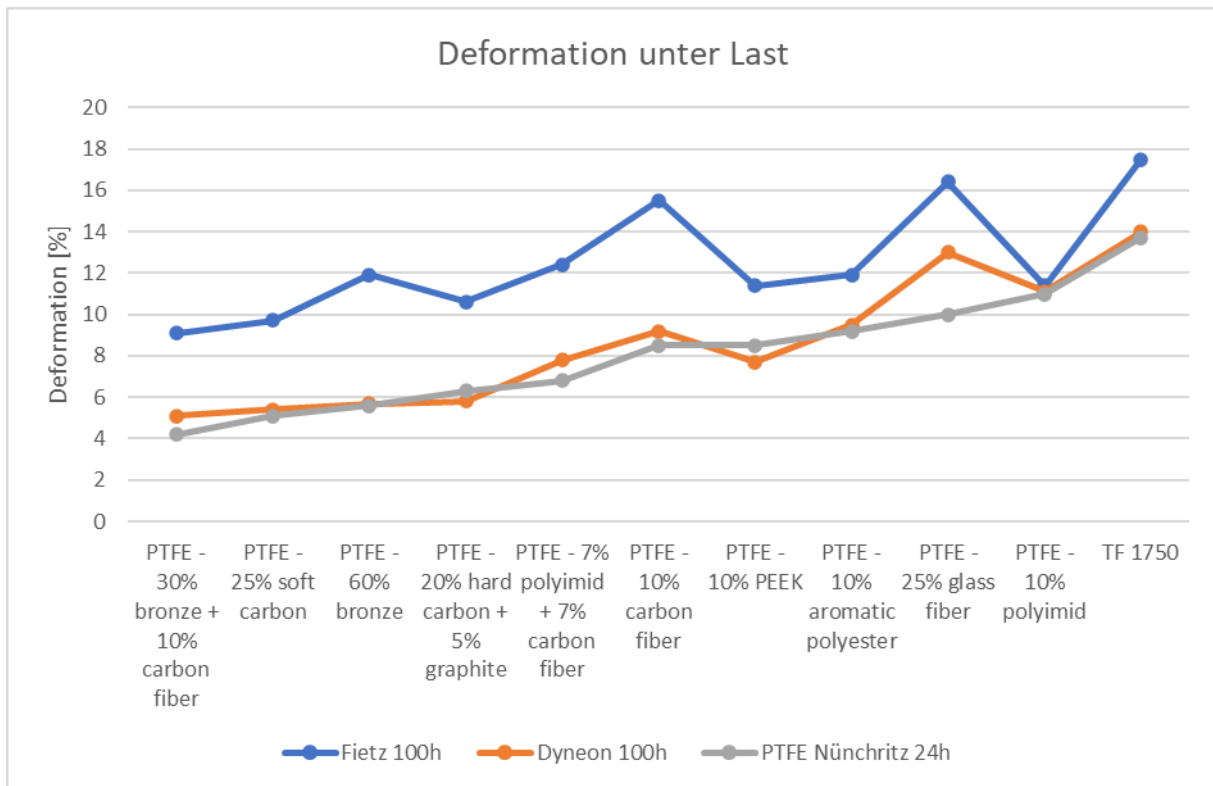


Diagramm 2: Deformation unter Last

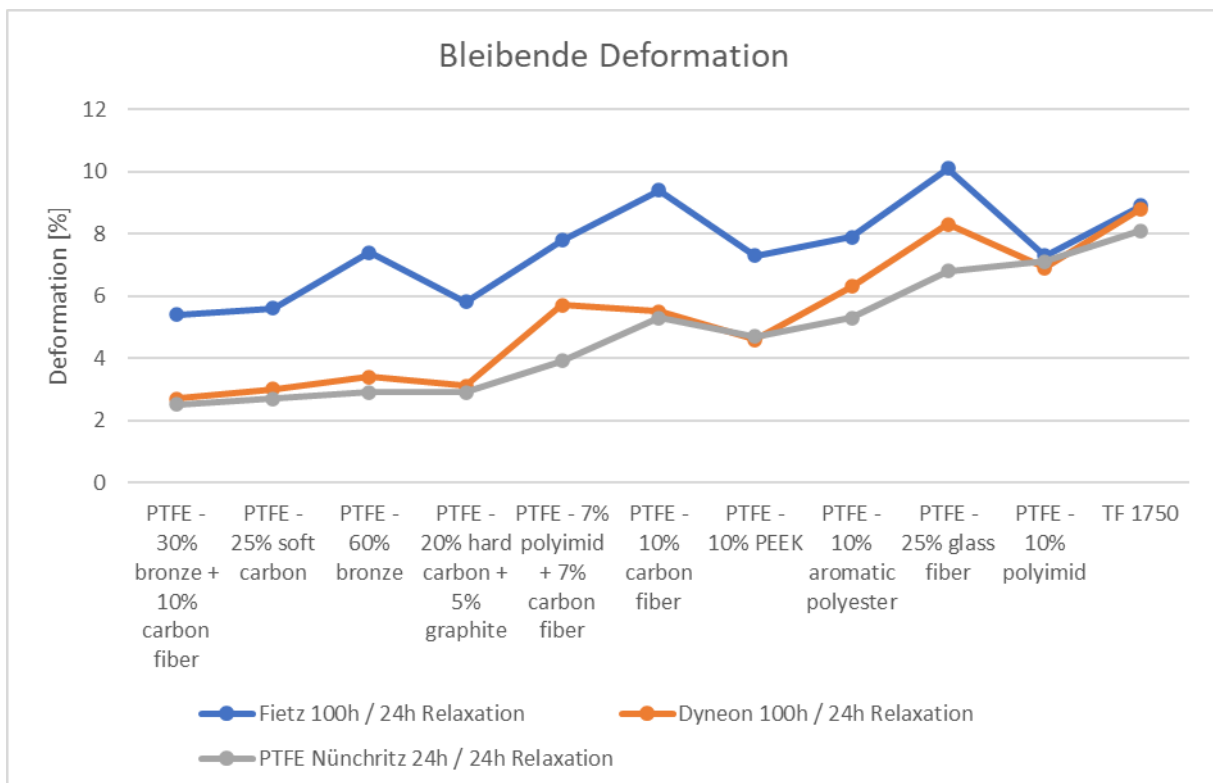


Diagramm 3: Bleibende Deformation

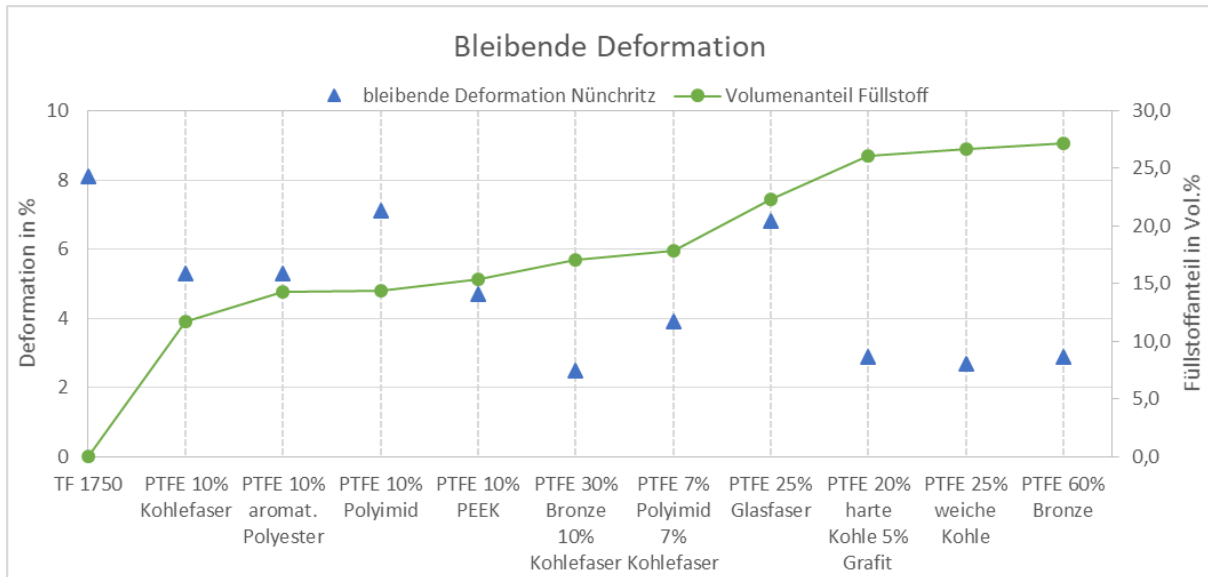


Diagramm 4: Bleibende Deformation mit Volumenanteil der Füllstoffe

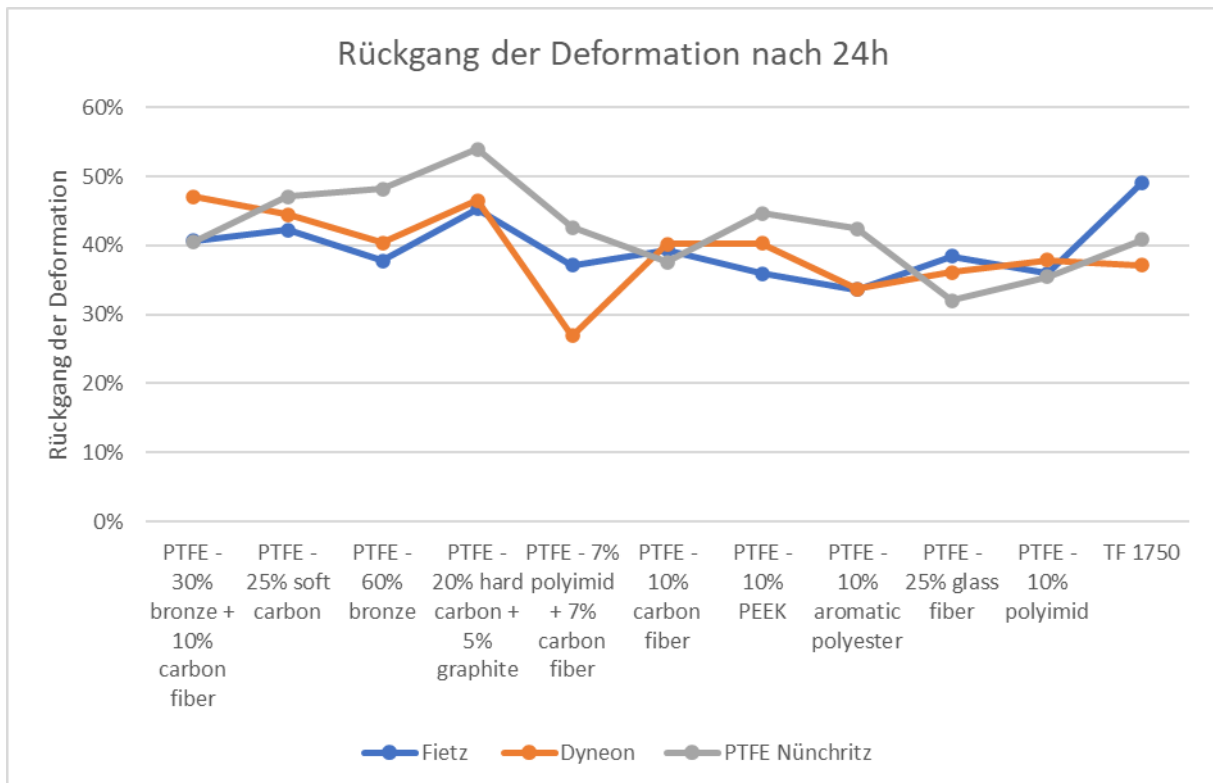


Diagramm 5: Vergleich der Ergebnisse von Diagramm 2 und 3

Für die Deformation unter Last gilt:

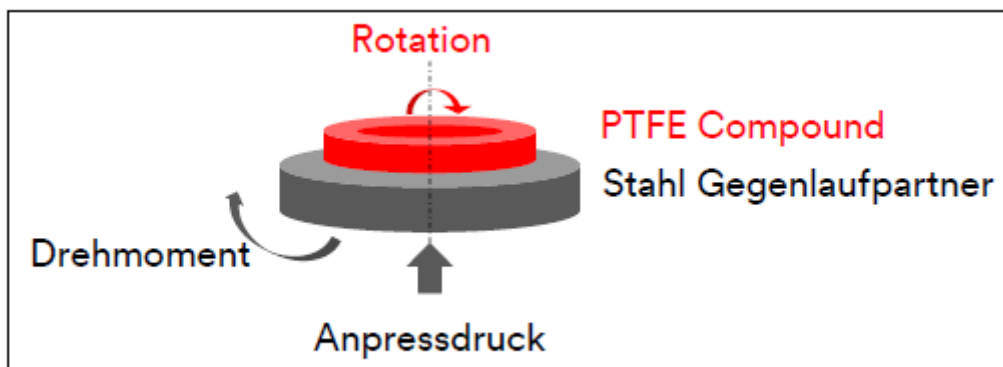
Je höher der Füllstoffanteil, desto geringer die bleibende Deformation. Bei Verwendung von organischen Füllstoffen reicht schon die halbe Gewichtsmenge, bezogen auf Füllstoffe wie Glasfasern oder Kohle aus, um eine deutliche Reduzierung der bleibenden Deformation zu erreichen.

Interpretation der Ergebnisse:

Die Ermittlung der Volumenanteile der Füllstoffe, grün dargestellt, zeigt, dass es sich bei den teureren organischen Füllstoffen mit geringerer Dichte lohnen kann, zunächst mit einem deutlich geringeren gewichtsmäßigen Füllstoffanteil zu arbeiten: Schon bei der Hälfte des für Glasfasern oder Kohle typischen Gewichtsanteils werden gute bis sehr gute Ergebnisse erzielt.

4. Messergebnisse: Tribologische Charakterisierung von PTFE Compounds

Prüfaufbau und -bedingungen:



Prüfgerät:

2 Stück Lewis Inc. Tribometer mit integriertem Wegaufnehmer zur Erfassung des Verschleißes

Prüfprinzip:

Rotatorisch, Ring auf Scheibe (siehe Skizze)

Prüfnorm:

ASTM D3702

Prüfbedingungen:

Doppelbestimmung

Umgebungstemperatur = 23°C

Relativgeschwindigkeit = 0,51 m/s

Konstanter Anpressdruck = 0,689 MPa

Gegenlauffläche = C 1018 Stahl, Ra = 0,4

Gesamt-Prüfdauer = 100h^{1 2}

¹ Bei starkem Verschleiß wird die Prüfung vor Erreichung der 100h abgebrochen.

² Die Bestimmung des Verschleißkoeffizienten erfolgt im Gleichgewichtszustand nach einer Einlaufzeit von 24h, d.h. gemittelt über eine Laufzeit von 76h.

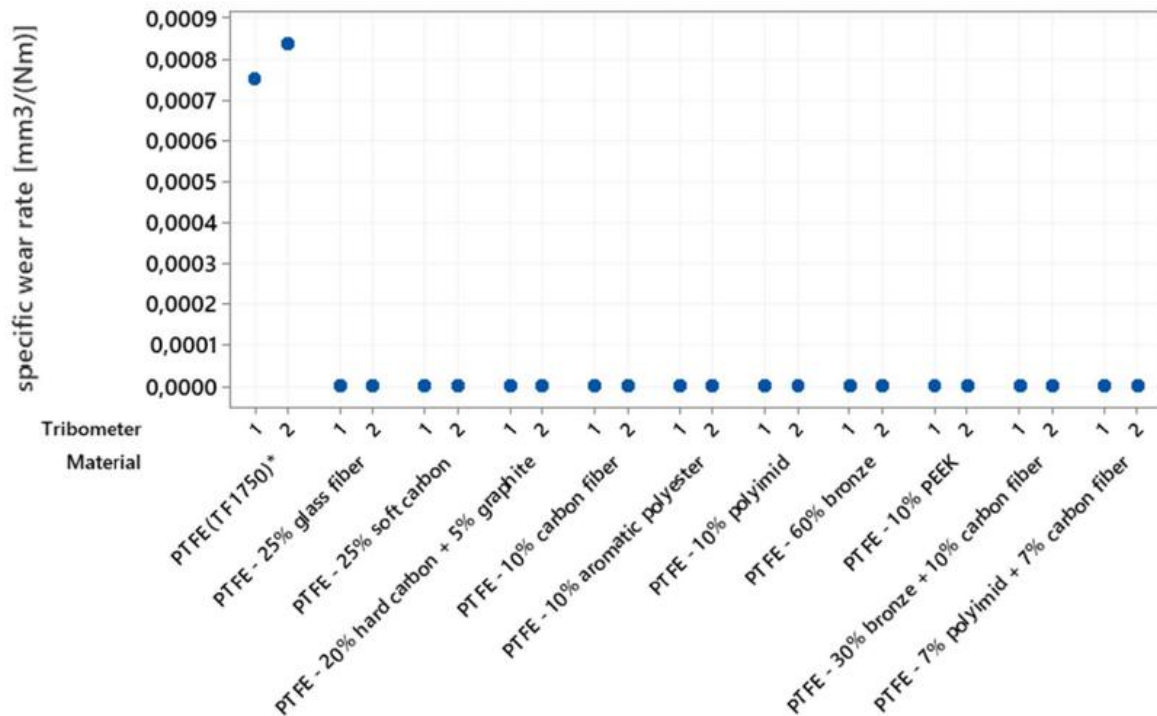
Messergebnisse in tabellarischer Form:

Material ID	Material	Tribometer	Steady State Specific Wearrate [mm ³ /(Nm)]	Steady State Coefficient of Friction	Steady State Temperature [°C]
1	PTFE (TF 1750)*	1	7E-04	0,20	62
1	PTFE (TF 1750)*	2	8E-04	0,23	71
2	PTFE - 25% glass fiber	1	2E-07	0,32	92
2	PTFE - 25% glass fiber	2	2E-07	0,35	99
3	PTFE - 25% soft carbon	1	4E-07	0,21	72
3	PTFE - 25% soft carbon	2	3E-07	0,26	81
4	PTFE - 20% hard carbon + 5% graphite	1	2E-07	0,23	75
4	PTFE - 20% hard carbon + 5% graphite	2	2E-07	0,25	78
5	PTFE - 10% carbon fiber	1	3E-07	0,14	62
5	PTFE - 10% carbon fiber	2	2E-07	0,17	62
6	PTFE - 10% aromatic polyester	1	6E-07	0,17	67
6	PTFE - 10% aromatic polyester	2	3E-07	0,18	66
7	PTFE - 10% polyimid	1	1E-06	0,12	57
7	PTFE - 10% polyimid	2	7E-07	0,15	61
8	PTFE - 60% bronze	1	1E-06	0,15	59
8	PTFE - 60% bronze	2	2E-06	0,17	65
9	PTFE - 10% PEEK	1	3E-07	0,16	67
9	PTFE - 10% PEEK	2	3E-07	0,19	69
10	PTFE - 30% bronze + 10% carbon fiber	1	2E-07	0,18	61
10	PTFE - 30% bronze + 10% carbon fiber	2	2E-08	0,20	72
11	PTFE - 7% polyimid + 7% carbon fiber	1	3E-07	0,23	78
11	PTFE - 7% polyimid + 7% carbon fiber	2	4E-07	0,25	85

* Prüfkörper bereits nach ca. 1 Stunde verschlissen. Verschleißrate und Reibungskoeffizient sind während der gesamten Prüfdauer konstant. Die angegebenen Werte wurden aus den Daten der gesamten Prüfzeit berechnet.

Tabelle 1: Messergebnisse des Verschleißes, des Reibungskoeffizienten und der generierten Reibungstemperatur der verschiedenen Compounds

Ergebnisse - spez. Verschleißkoeffizient inkl. PTFE ungefüllt:



* PTFE (TF 1750): Prüfkörper bereits nach ca. 1 Stunde verschlissen. Verschleißrate und Reibungskoeffizient sind während der gesamten Prüfdauer konstant. Die angegebenen Werte wurden aus den Daten der gesamten Prüfzeit berechnet

Diagramm 6: Verschleißrate von PTFE vs. PTFE-Compounds

Interpretation der Ergebnisse:

Eine signifikante Reduzierung des Verschleißes bei PTFE-Compounds ist ausschließlich durch den Einsatz von Füllstoffen erreichbar. Der Ersatz von beispielsweise Standard PTFE durch modifiziertes PTFE ist bei dieser Aufgabenstellung nicht zielführend.

Ergebnisse - spez. Verschleißkoeffizient exkl. PTFE ungefüllt:

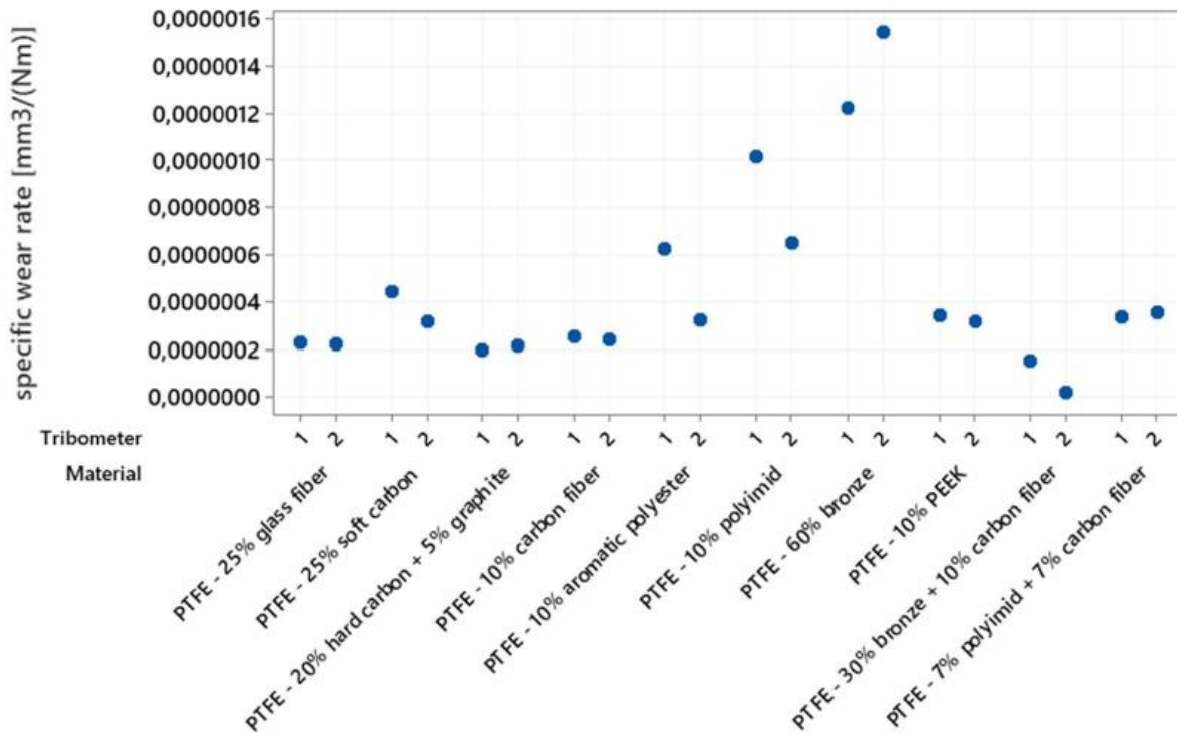


Diagramm 7: Verschleißrate der unterschiedlichen PTFE-Compounds

Interpretation der Ergebnisse:

Füllstoffe führen zu einer signifikanten Reduzierung der spezifischen Verschleißrate. Polyimid ohne weitere Füllstoffkomponenten zeigt nur mäßige Ergebnisse, während hochgefüllte Bronzecomounds dort ihre Vorteile ausspielen können, wo erhöhte Beständigkeit gegenüber Druck gefordert ist, also beispielsweise in Hydraulikanwendungen, nicht aber bei dynamisch, hochbeanspruchten Teilen.

Die Mischung aus Bronze und Kohlefasern ist bei dynamisch beanspruchten Teilen ‚Spitze‘; ein Grund hierfür ist die exzellente Wärmeleitfähigkeit beider Füllstoffe, die Reibwärme wird wirkungsvoll aus der Kontaktfläche abgeleitet und diese somit gekühlt.

Ergebnisse - Reibungskoeffizient:

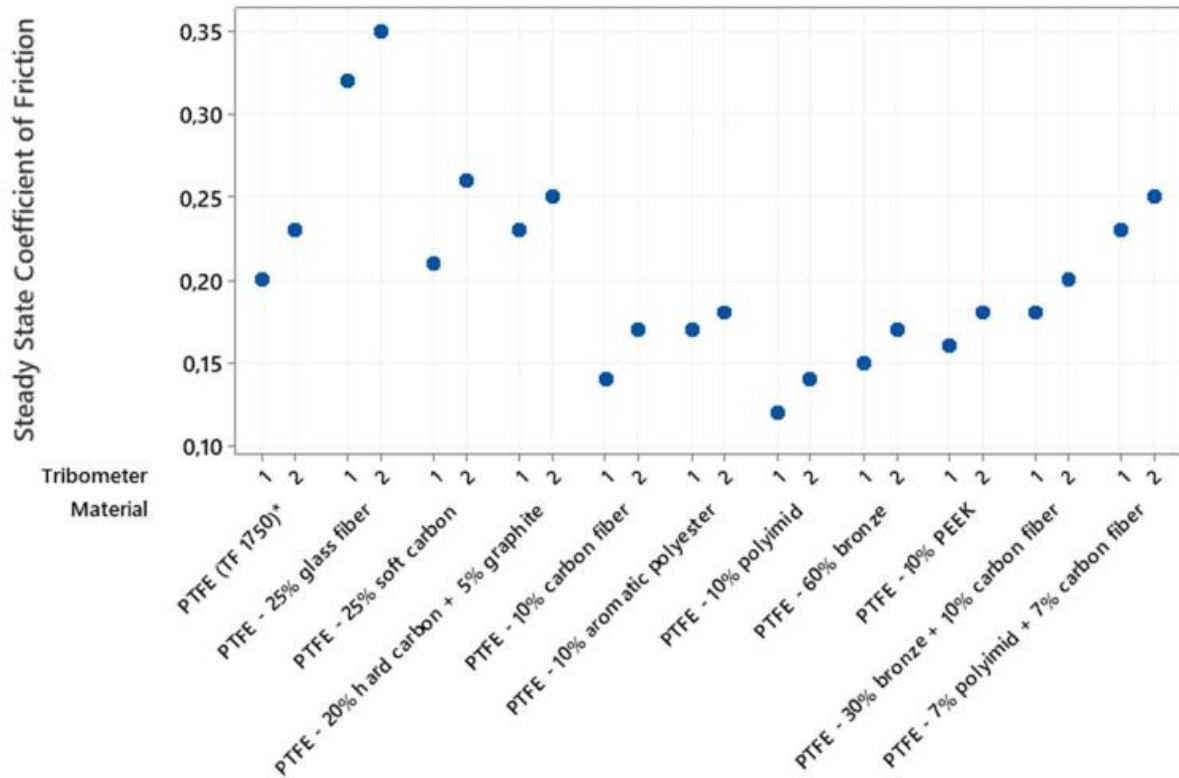


Diagramm 8: Übersicht des Reibungskoeffizienten bei unterschiedlichen Compounds

Ergebnisse und Interpretation:

Füllstoffe mit hohem Reibungskoeffizienten generieren eine hohe Reibwärme. In diese Gruppe fallen vor allem die Glasfasern. Füllstoffe mit guten Trockenschmiereigenschaften, z.B. Polyimid, erhitzen die Reibfläche nur in geringem Umfang.

Ergebnisse - Temperatur:

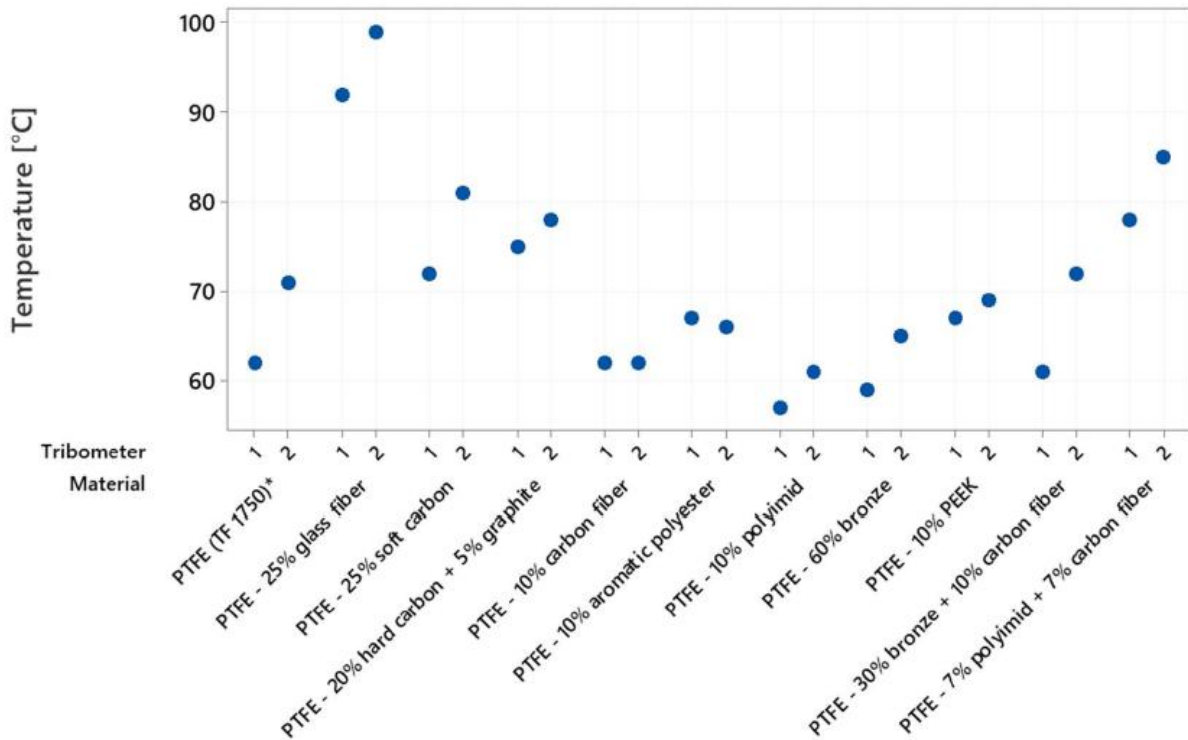


Diagramm 9: Übersicht über die Reibungstemperatur bei unterschiedlichen Compounds

Ergebnisse und Interpretation:

Bei Glasfasern handelt es sich um einen sehr abrasiven Füllstoff mit geringster Wärmeleitfähigkeit, der bei dynamischer Beanspruchung einen hohen Reibungskoeffizienten und damit auch eine hohe Reibwärme erzeugt.

Bei dynamisch beanspruchten Teilen sollten Glasfasern also entweder in Kombination mit einem Trockenschmierstoff, z.B. Graphit oder Molybdändisulfid, eingesetzt werden.

In ölgeschmierten Dichtungsanwendungen, also z.B. als Radialwellendichtung in Kurbelwellen- oder Nockenwellen eignen sich Dichtungen mit Glasfaserfüllstoff hervorragend, da der Ölfilm einen direkten Kontakt zwischen Compoundabdichtung und Gegenlaufpartner auf ein Minimum reduziert.



Mitglieder der Fluoropolymergroup:



