

**fluorseals<sup>spa</sup>**

HALBZEUGE UND FERTIGTEILE AUS PTFE

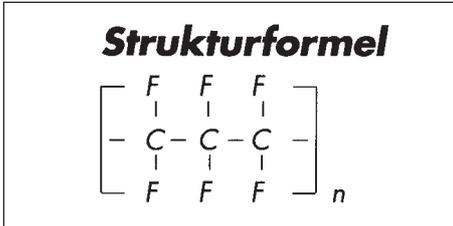
**TEKU**

# **PTFE - Fluorkunststoff**

**Eigenschaften und Kenndaten**

## POLYTERAFLUORETHYLEN (PTFE)

PTFE ist ein unverzweigtes, linear aufgebautes, teilkristallines Polymer aus Fluor und Kohlenstoff. In der Polymerisation wird unter Zusatz bestimmter Katalysatoren und Emulgatoren das gasförmige Tetrafluorethylen zum polymeren Polytetrafluorethylen umgesetzt.



Diese Kohlenstoff-Fluorverbindung ist eine der stärksten Bindungen in der anorganischen Chemie und nur unter extremen Bedingungen zu lösen. Der Aufbau der Makromoleküle wird als linear angenommen. Die Molekulargewichtsbestimmung ist mit den üblichen Methoden nicht möglich; speziell entwickelte Verfahren ergeben Werte, die bei mind.  $10^5$  liegen. PTFE ist ein teilkristallines Polymer. Bei  $19^\circ\text{C}$  erfolgt eine Kristallitumwandlung. Die unterschiedlichen Kristallitformen ober- und unterhalb dieses Umwandlungspunktes zeigen folgendes Bild.

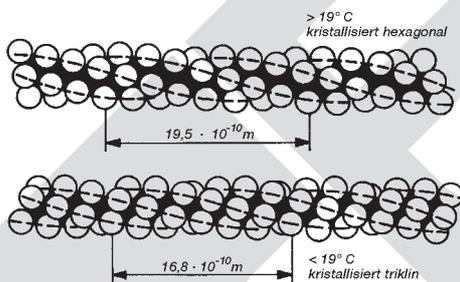


Bild 1: Modell der Molekülkette

Die ca. 1%-ige Volumenvergrößerung und die nicht linear verlaufende, relative Längenänderung ist auf diese Umwandlung des Kristallgitters zurückzuführen.

## Eigenschaften

Die außergewöhnlichen Eigenschaften von PTFE erklären sich aus seinem chemischen Aufbau.

- \* Temperaturbeständigkeit von  $-270^\circ\text{C}$  bis  $260^\circ\text{C}$ ,
- \* universelle chemische Beständigkeit,
- \* ausgezeichnete Antihafteigenschaften,
- \* niedriger Reibungskoeffizient, gute Gleiteigenschaften,
- \* physiologische Unbedenklichkeit,
- \* gute elektrische Isolierwerte.

## Thermische Eigenschaften

PTFE weist eine hohe thermische Stabilität auf. Chemische und elektrische Eigenschaften, Flexibilität und Dehnfähigkeit bleiben auch im Tieftemperaturbereich erhalten. Selbst in flüssigem Helium ( $-269^\circ\text{C}$ ) versprödet PTFE nicht. Die maximal zulässige Dauergebrauchstemperatur richtet sich nach der jeweiligen mechanischen Beanspruchung. Bei geringer Belastung liegt die obere Temperaturgrenze für eine Dauerbeanspruchung bei  $260^\circ\text{C}$ . Das thermische Isoliervermögen ist groß, die Wärmeleitfähigkeit mit  $0,25$  bis  $0,5 \text{ W/K} \cdot \text{m}$  sehr gering. Leitfähige Zusatzwerkstoffe bei den Compounds erhöhen die Wärmeleitfähigkeit. Bei der Prüfung der Glutbeständigkeit nach DIN 53459 bzw. ISO/R 181 erreicht PTFE die Stufe 1 und ist unter Normalbedingungen nicht entflammbar und unbrennbar. Als Folge der bei  $19^\circ\text{C}$  stattfindenden Kristallitumwandlung ergibt sich eine 1%-ige Volumenänderung. Die relative Längenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Verlauf des linearen Ausdehnungskoeffizienten zeigen die Abb. 2 und 3.

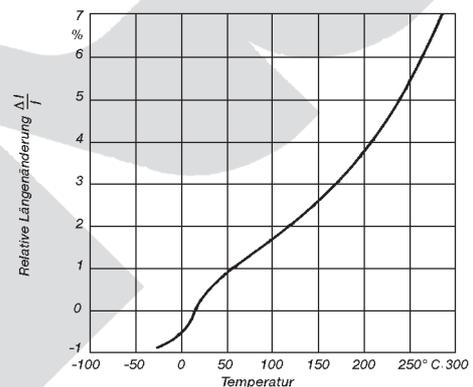


Bild 2: Relative Längenänderung von PTFE in Abhängigkeit von der Temperatur

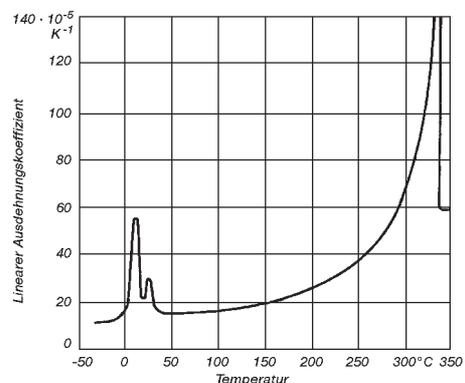


Bild 3: Linearer Ausdehnungskoeffizient von PTFE in Abhängigkeit von der Temperatur

## Mechanische Eigenschaften

Die meisten mechanischen Eigenschaften hängen stark von den Verarbeitungsbedingungen ab, die sich auf Dichte, Festigkeit, Elastizität, Härte und dielektrische Werte auswirken.

Wenn im Folgenden mechanische Daten genannt werden, sind diese darum nur als Durchschnittswerte anzusehen. Es wurde darum auch auf die Angabe verzichtet, ob die Werte quer oder längs zur Verarbeitungsrichtung ermittelt wurden. Genaue Werte finden sich in den lieferbezogenen Prüfzeugnissen nach DIN/ISO/EN. Die mechanischen Eigenschaften sind stark zeit- und temperaturabhängig. Abhängig von der Höhe der Belastung, der Temperatur und der Zeitdauer der Belastung verformt sich PTFE ebenso wie andere thermoplastische Werkstoffe. Der Grad der Verformung wird neben den angewandten Verarbeitungsmethoden entscheidend von diesen Faktoren beeinflusst.

Beginnt die Deformation bereits bei Raumtemperatur, wird dieses Verhalten als „kalter Fluß“ oder „Kriechverhalten“ bezeichnet, d.h. die Gesetzmäßigkeit der linearen Proportionalität zwischen Spannung und Verformung gilt hier nicht. Durch Zusatz geeigneter Füllstoffe ist das Verhalten von PTFE bei langzeitiger Beanspruchung zu verbessern.

## Zugfestigkeit

### Verhalten bei kurzzeitiger Beanspruchung

Zugfestigkeitswerte sind von der Probenstärke abhängig und differieren auch wegen der unterschiedlichen Formen der Probekörper entspr. DIN- und ASTM-Meßverfahren.

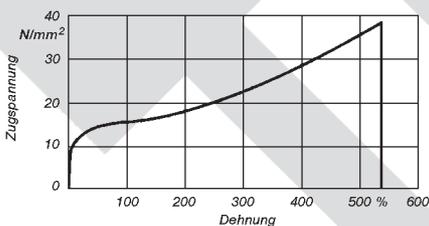


Bild 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PTFE

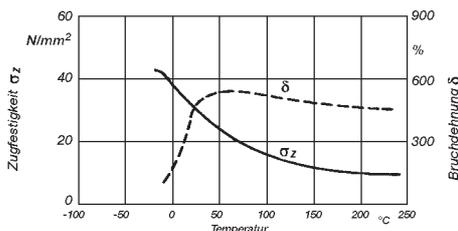


Bild 5: Zugfestigkeit und Bruchdehnung von PTFE in Abhängigkeit von der Temperatur

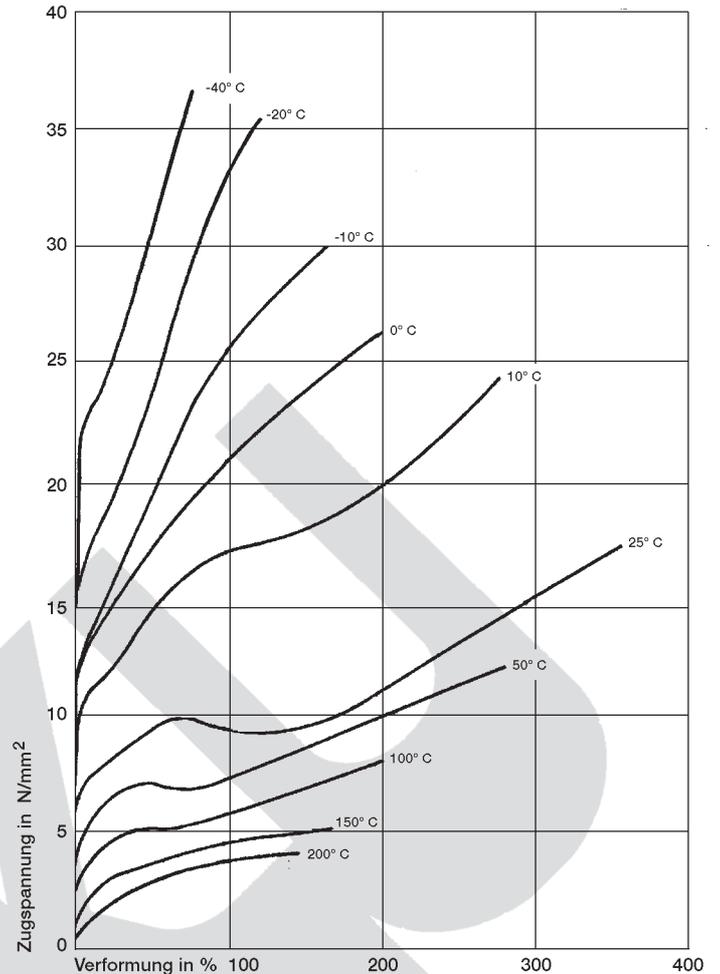


Bild 6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei unterschiedlichen Temperaturen

### Verhalten bei langzeitiger Beanspruchung

Die Zeit-Dehnungsspannungen von PTFE in Abhängigkeit von der Belastungsdauer sind in den Abbildungen 7a - 7c zu sehen.

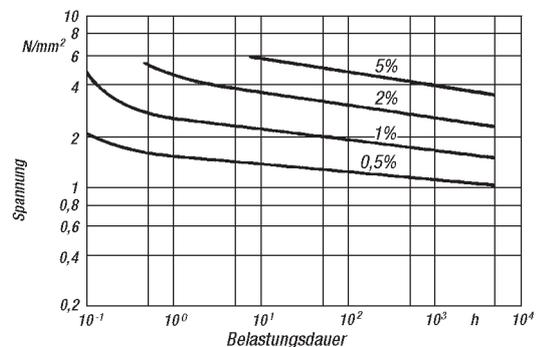


Bild 7a: Zeit-Dehnungsspannungen von PTFE in Abhängigkeit von der Belastungsdauer für vier verschiedene Dehnungen bei 20°C

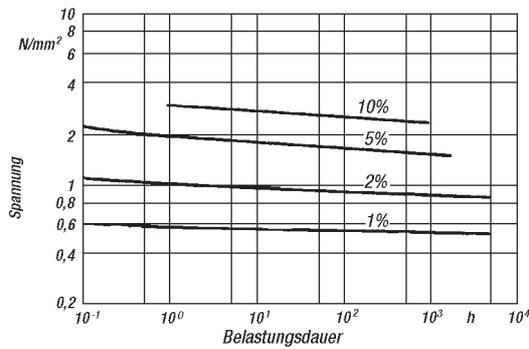


Bild 7b: Zeit-Dehnspannungen von PTFE in Abhängigkeit von der Belastungsdauer für vier verschiedene Dehnungen bei 100°C

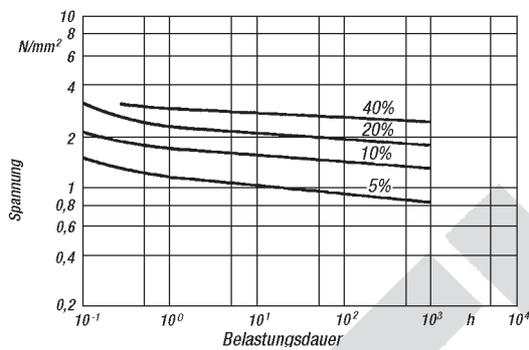


Bild 7c: Zeit-Dehnspannungen von PTFE in Abhängigkeit von der Belastungsdauer für vier verschiedene Dehnungen bei 200°C

### Druckbeanspruchung

Reißfestigkeit und Reißdehnung aus dem Zugversuch werden meist für Qualitätskontrollzwecke verwendet. Da PTFE aber nur selten unter Zugbeanspruchung eingesetzt wird, kommt den Messungen an Proben unter Druckbeanspruchung wesentlich größere praktische Bedeutung zu.

### Verhalten bei kurzzeitiger Beanspruchung

Beim Druckversuch nach DIN 53454 ergeben sich Werte für Fließgrenzen, die in Tabelle 1 aufgenommen wurden:

1%	Fließgrenze	10 N/mm <sup>2</sup>
10%	Fließgrenze	18 N/mm <sup>2</sup>

### Verhalten bei langzeitiger Beanspruchung

In den Abb. 8a - 8c wird das Verhalten von PTFE bei länger anhaltender Druckbelastung und nachfolgender Entlastung dargestellt

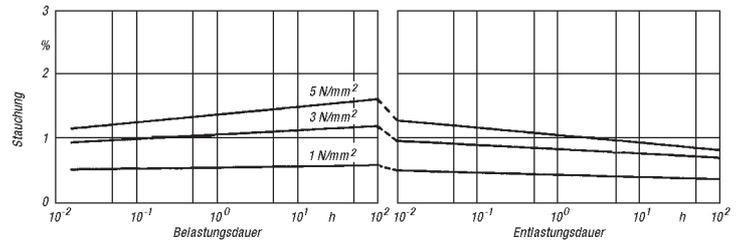


Bild 8a: Stauchung und Rückstellung in Abhängigkeit von der Zeit bei 20°C

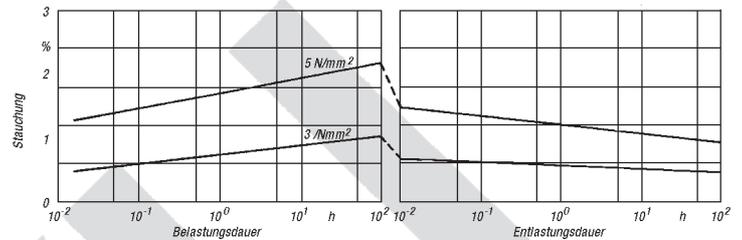


Bild 8b: Stauchung und Rückstellung in Abhängigkeit von der Zeit bei 100°C

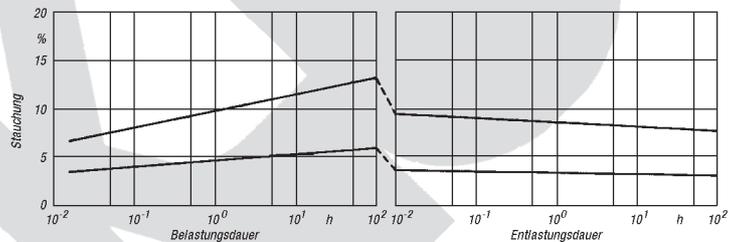


Bild 8c: Stauchung und Rückstellung in Abhängigkeit von der Zeit bei 150°C

### Biegebeanspruchung

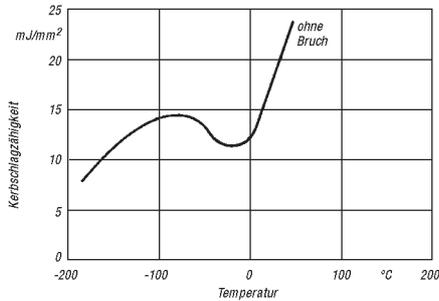
Im Biegeversuch nach DIN 53452 erhält man bei 3,5% - Biegespannung - 14 N/mm<sup>2</sup> (siehe Tabelle 1).

Die Biegefestigkeitsprüfung nach ASTM-D-790 wird ohne Bruch überstanden. Die Biegegewchselfestigkeit, die stark von der Kristallinität abhängig ist, weist hohe Werte auf. Der Biege-E-Modul beträgt bei 23°C - 620 N/mm<sup>2</sup> und selbst bei 100°C - 3200 N/mm<sup>2</sup>.

### Schlag- und Kerbschlagzähigkeit

PTFE weist - wie die Werte in Tabelle 1 zeigen - eine hohe Zähigkeit auf. Sowohl im Zugversuch, als auch im Schlagbiegeversuch, zeigen die Proben einen ausgeprägten Zähbruch. Dies gilt noch bis zu Temperaturen von etwa -150°C. Die Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abb. 9.

Bild 9:  
Kerbschlag-  
zähigkeit in  
Abhängigkeit  
von der  
Temperatur  
(DIN EN ISO  
197 397)



## Dauerschwingverhalten

Durch seine Flexibilität hält PTFE einer großen Zahl von Lastwechseln stand. Der im Biegeschwingsversuch ermittelte dynamische E-Modul und der Verlustfaktor  $\tan \delta$  zeigen - wie alle mechanischen Festigkeitswerte - eine starke Abhängigkeit von der Temperatur.

Tabelle 1

**Mechanische Eigenschaften von PTFE**

Eigenschaft	Wert	Einheit	Prüfmethode
Dichte	2,15...2,18	g/cm <sup>3</sup>	DIN 53479
Zugfestigkeit	20...40	N/mm <sup>2</sup>	ASTM 1457-69 T DIN EN ISO 527
Bruchdehnung	250...500	%	ASTM D 1457-69 T ASTM D 1710-63 T
Zug-E-Modul	750	N/mm <sup>2</sup>	(wie Zugfestigkeit)
Druckfestigkeit			DIN 53457
1% Fließgrenze	10	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53454
10% Fließgrenze	18	N/mm <sup>2</sup>	
Biegefestigkeit	ohne Bruch	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53452
3,5% Biegespannung	14	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53452
Torsionssteifheit	160	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53447
Schlagzähigkeit	ohne Bruch	kJ/m <sup>2</sup>	DIN EN ISO 197 397
Kerbschlagzähigkeit	16	kJ/m <sup>2</sup>	DIN EN ISO 197 397
Wechselbiegezahl	>10 <sup>6</sup>	Lastwechsel	DIN 53374
Kugeldruckhärte (135 N Prüflast)	27...32	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53456
Shore-Härte	D 55...59 C 85...87		30-sec-Wert DIN 53505

Tabelle 2

**Physikalische und thermische Werte**

Eigenschaft	Wert	Einheit	Prüfmethode
Schmelzbereich	320...340	°C	DTA
Volumenänderung im Schmelzintervall (10-K-Bereich)	5...8	%	-
Volumenänderung zwischen Raum- temperatur und Schmelzbereich	27...28	%	-
Linearer Ausdehnungskoeffizient zwischen 20°C und 100° C	16·10 <sup>-5</sup>	K <sup>-1</sup>	DIN 52328
20°C und 200° C	19,5·10 <sup>-5</sup>	K <sup>-1</sup>	(Dilatometer)
20°C und 300° C	25·10 <sup>-5</sup>	K <sup>-1</sup>	
Spezifische Wärme			adiabatisches
bei 0° C	0,96	kJ/kg·K	Kalorimeter
bei 50° C	1,03	kJ/kg·K	
Wärmeleitfähigkeit	0,25...0,50	W/m·K	DIN 52612
		Zweitplatten- Methode	
Temperaturanwendungsbereich	-200...+260*	°C	
Formbeständigkeit in der Wärme			
ISO/R 75, Verfahren A	50...60	°C	DIN 53451
ISO/R 75, Verfahren B	130...140	°C	
Vicat-Erweichungspunkt VST/B/50	110	°C	DIN 53460, in Luft
Martens	72	°C	DIN 53458, 53462
Glutbeständigkeit	Stufe 1		DIN 53459
Verbrennungswärme	4600	kJ/kg	

\* kurzfristig bis +300°C

## Härte von PTFE

PTFE weist nur eine geringe Härte auf; es ist relativ weich. Eine Erhöhung der Härte kann nur durch die Zugabe von Füllstoffen erreicht werden.

## Adhäsionsverhalten

Aufgrund seines molekularen Aufbaues besitzt PTFE ein stark antiadhäsives Verhalten. Selbst zähe und klebrige Stoffe haften nicht. PTFE ist schwierig zu benetzen. Der Kontaktwinkel mit Wasser beträgt  $126^\circ$ .

## Gleitverhalten

Die niedrigen zwischenmolekularen Bindungskräfte führen u.a. dazu, daß PTFE von allen festen Werkstoffen die niedrigsten Reibungskennwerte besitzt. Die jeweils gemessene Reibungszahl hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, u.a. von Belastung, Gleitgeschwindigkeit, Gegenlaufwerkstoff, Zusatzschmierung.

Allgemein gilt:

- \* statische und dynamische Reibungszahl sind einander gleich
- \* bei geringer Belastung steigt der Reibungskoeffizient steil an; mit steigender Last nimmt er erst schnell, dann langsam ab. Bild 10 zeigt diesen Zusammenhang.
- \* bei Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit steigt bis zu etwa 50 m/min die Reibungszahl an und ist darüber hinaus nur noch geringfügig geschwindigkeitsabhängig. Den Verlauf zeigt Abb. 11.
- \* Bei Temperaturerhöhung bis  $20^\circ\text{C}$  nehmen die Reibungszahlen zu und bleiben dann weitgehend konstant. Bei tieferen Temperaturen ab  $-45^\circ\text{C}$  steigt der Koeffizient geringfügig an, um dann ebenfalls nahezu unverändert zu bleiben.

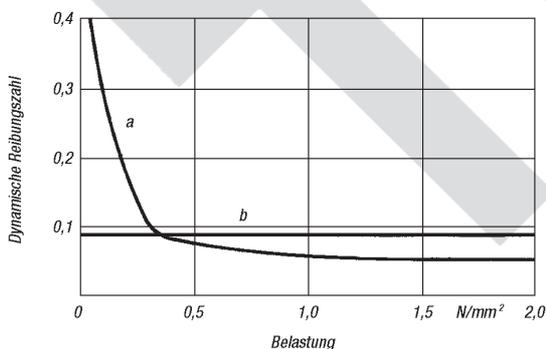


Bild 10: Dynamische Reibungszahl von PTFE in Abhängigkeit von der Belastung

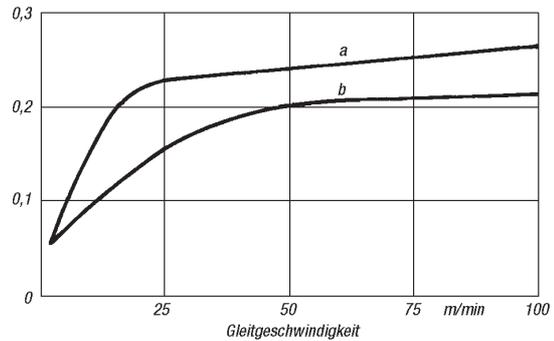


Bild 11: Dynamische Reibungszahl von PTFE in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit

## Verschleißverhalten

Die Abriebfestigkeit von PTFE ist - bedingt durch Molekularaufbau und Besonderheit der Verarbeitungsprozesse - nur gering. Abriebversuche zeigen aufgrund der unterschiedlichen Versuchsanordnungen stark voneinander abweichende Werte.

PTFE-Compounds zeigen auch bei relativ hohen Belastungen eine gute Abriebfestigkeit.

## Witterungsbeständigkeit

Auch bei extremen klimatischen Bedingungen verändern sich die Eigenschaften von PTFE nicht. Die Alterungsbeständigkeit ist extrem hoch.

Eine Wasseraufnahme - auch nach längerer Lagerzeit - ist nicht feststellbar.

## Physiologische Unbedenklichkeit

Im Temperaturbereich bis  $200^\circ\text{C}$  ist PTFE in nicht-compoundierter Form physiologisch neutral. Bei der oberhalb von  $300^\circ\text{C}$  langsam beginnenden thermischen Zersetzung muß mit Spaltprodukten gerechnet werden.

## Chemische Beständigkeit

Die Stärke der Kohlenstoff-Fluor-Bindung und die fast völlige spiralförmige Abschirmung der Kohlenstoffketten durch Fluor-Atome führen zu einer universellen Chemikalienresistenz von PTFE. Selbst aggressive Stoffe wie Salz- und Flußsäure, rauchende Schwefel- und Salpetersäure, heiße Natriumhydroxidlösung, Chlorgas, Chlorsulfonsäure, Wasserstoffperoxyd, Ester, Ketone, Alkohole und Säurechloride ... greifen PTFE nicht an.

Lediglich in der Nähe des Kristallit-Schmelzbereiches von  $327^\circ\text{C}$  kann PTFE von hochfluorierten Ölen angegriffen werden. Bei Raumtemperatur quellen fluorhaltige Kohlenwasserstoffe PTFE in reversibler Form an. Alkalimetalle in geschmolzener oder gelöster Form greifen PTFE unter Braunfärbung an, indem sie das Fluor aus dem Molekül entfernen. Bei hohen Temperaturen sinkt die Widerstandsfähigkeit gegenüber geschmolzenen Alkalimetallen, Chlortrifluorid und elementarem Fluor.

**PTFE ist u.a. gegen folgende Chemikalien beständig**

Abietinsäure	Ethylacetat	Pinen
Aceton	Ethylalkohol	Piperidin
Acetophenon	Ethyläther	Polyacrylnitril
Acrylanhydrid	Ethylenbromid	Pyridin
Allylalkohol	Ethylenglykol	Quecksilber
Aluminiumchlorid	Fluornitrobenzol	Salpetersäure
Ameisensäure	Fluorwasserstoff	Salzsäure
Ammoniak, flüssig	Formaldehyd	Schwefel
Ammoniumchlorid	Furan	Schwefelkohlenstoff
Anilin	Gasolin	Schwefelsäure
Benzonitril	Hexachlorethan	Seife und Detergenzien
Benzoylchlorid	Hexan	Stickstofftetroxid
Bezylalkohol	Hydrazin	Styrol
Blei	Kaliumacetat	Tetrabrommethan
Borax	Kaliumpermanganat	Tetrachlorethylen
Borsäure	Kalziumchlorid	Trichloressigsäure
Brom	Magnesiumchlorid	Trichlorethylen
n-Butylamin	Methanol	Triethylphosphat
Butylacetat	Methylacetat	Triethanolamin
Butylmethacrylat	Methylethylketon	Vinylmethacrylat
Cetan	Methylmethacrylat	Wasser
Chlor	Naphthalin	Wasserstoffperoxid
Chloroform	Naphthole	Xylol
Chlorsulfonsäure	Natriumhydroxid	Zinkchlorid
Chromsäure	Natriumhypochlorit	
Cyclohexan	Natriumperoxid	
Cyclohexanon	Nitrobenzol	
Dibutylphthalat	Nitromethan	
Dibutylsebacat	Octan	
Diethylcarbonat	Öle	
Diisobutyladipat	Ozon	
Diäthyläther	Perchlorethylen	
Dimethylformamid	Pentachlorbenzamid	
Dioxan	Perfluoroxylon	
Eisen-III-Chlorid	Phenol	
Eisen-III-Phosphat	Phosphorsäure	
Essigsäure	Phosphorpentachlorid	
Essigsäureanhydrid	Phosphortrichlorid	

Wenn bestimmte Chemikalien nicht aufgeführt sind, so bedeutet dies nicht, daß sie mit PTFE unverträglich sind. Bei manchen PTFE kommt es unter Umständen zu umgebungsbedingten Spannungsrissen, wenn sie in Anwesenheit einiger dieser Flüssigkeiten unter Dauerbeanspruchung stehen.

## Elektrische Eigenschaften

PTFE weist infolge seiner nichtpolaren Struktur hervorragende dielektrische Eigenschaften auf. Der spezifische Durchgangswiderstand ist bis 150°C nahezu temperaturunabhängig und größer als  $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$  und sinkt auch nach längerer Wasserlagerung untersuchter Proben nicht merklich ab. Der Oberflächenwiderstand beträgt bei Feuchtigkeitsausschluß etwa  $10^{17} \Omega$ , bei Luft mit 100% relativer Feuchtigkeit noch über  $10^{12} \Omega$ .

Die Durchschlagfestigkeit sinkt bei etwa 50°C und bleibt bis 250°C weitgehend konstant.

Der dielektrische Verlustfaktor  $\tan \delta$ , der unter 0,0001 liegt, ist zwischen -60°C und 250°C temperatur- und frequenzunabhängig. Die relative Dielektrizitätskonstante ist im Bereich von 50 bis  $10^{10}$  Hz fast frequenzunabhängig und ändert sich im Temperaturbereich zwischen -50°C bis über 200°C nur geringfügig.

Die wesentlichen dielektrischen Eigenschaften sind in Tabelle 4 erfaßt.

Tabelle 4 **Dielektrische Eigenschaften**

Eigenschaft	Wert	Einheit	Prüfmethode	
Rel. Dielektrizitätskonstante	bei 50 Hz	2,1	-	
	bei $10^3$ Hz	2,1		
	bei $10^4$ Hz	2,1		
	bei $10^5$ Hz	2,1		
	bei $10^6$ Hz	2,1		
	bei $10^7$ Hz	2,1		
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$	bei 50 Hz	$0,5 \cdot 10^{-4}$	-	
	bei $10^3$ Hz	$0,3 \cdot 10^{-4}$		
	bei $10^4$ Hz	$0,4 \cdot 10^{-4}$		
	bei $10^5$ Hz	$0,7 \cdot 10^{-4}$		
	bei $10^6$ Hz	$0,7 \cdot 10^{-4}$		
	bei $10^7$ Hz	$0,7 \cdot 10^{-4}$		
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$	(bei $10^3, 10^4$ u. $10^5$ Hz)		-	
	-50°C	$<1 \cdot 10^{-4}$		
	0°C	$<1 \cdot 10^{-4}$		
	+50°C	$<1 \cdot 10^{-4}$		
	+100°C	$<1 \cdot 10^{-4}$		
	+150°C	$<1 \cdot 10^{-4}$		
Durchschlagfestigkeit (Kugelelektrode)		50...80	kV/mm	
				VDE 0303 Teil 2 (Folie 0,2 mm dick)
Spez. Durchgangswiderstand		$10^{18}$	$\Omega \cdot \text{cm}$	DIN 53482
Oberflächenwiderstand		$10^{17}$	$\Omega$	DIN 53482
Kriechstromfestigkeit		KC>600	Stufe	VDE 0303 Teil 1/9.64
Lichtbogenfestigkeit		L4	Stufe	VDE 0303 Teil 5

## Verarbeitung

Wegen seiner hohen Schmelzviskosität oberhalb des Kristallitschmelzbereiches von 320°-340°C läßt sich PTFE nicht mit Hilfe der technischen Verfahren verarbeiten, die für die Mehrzahl der Thermoplaste üblich sind. Es mußten darum spezifische Verarbeitungsmethoden entwickelt werden, die denen der Pulvermetallurgie gleichen. Die Verarbeitung des pulverförmigen Polymerisates von unterschiedlicher Korngröße und -form erfolgt durch Verdichten bei Raumtemperatur und nachfolgendem Sintern bei Temperaturen oberhalb des Kristallit-Schmelzpunktes.

Die Verarbeitungsbedingungen bestimmen nachhaltig die Grundeigenschaften des Polymers, die wiederum einige wichtige Eigenschaften des Halbzeuges, vor allem Zugfestigkeit und Dehnung, Dichte und dielektrische Werte, beeinflussen. Die durch die Verarbeitungsbedingungen beeinflussten Grundeigenschaften sind im wesentlichen Molekulargewicht, Kristallinität und Porendichte. Abb. 12 zeigt als Beispiel die Abhängigkeit der Reißfestigkeit von der Extrusionsgeschwindigkeit und Sinter-temperatur.

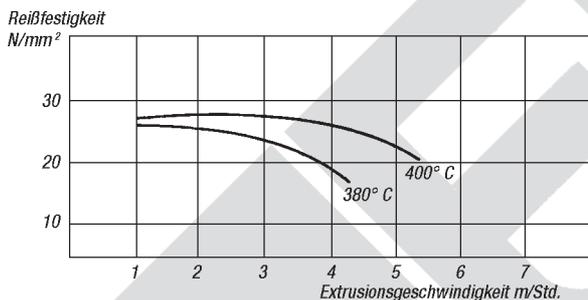


Bild 12: zeigt die Abhängigkeit der Reißfestigkeit von der Extrusionsgeschwindigkeit.

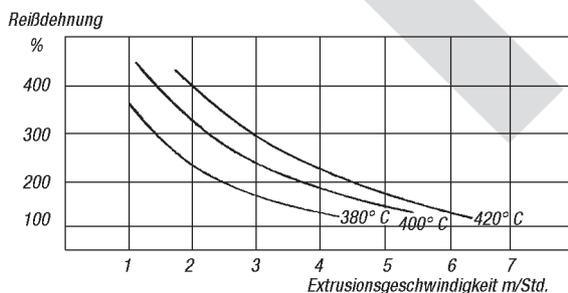


Bild 13: stellt die Abhängigkeit der Reißdehnung von der Extrusionsgeschwindigkeit und der Sinter-temperatur dar.

## Preßverarbeitung

PTFE-Pulver wird bei Raumtemperatur in Metallformen auf hydraulischen Pressen zu Vorformlingen einfacher geometrischer Form verdichtet und anschließend in Heißluftöfen - in Sonderfällen in N<sub>2</sub>-Atmosphäre - gesintert. Der Sinterzyklus ist abhängig von der Größe und Abmessungen der Formteile und erfolgt durch kontrolliertes Aufheizen, gesteuertes Halten der Temperatur und genau definiertem Abkühlen. Der Preßdruck im Werkzeug beim Verdichten des Pulvers liegt je nach Pulvertyp bei 200 bis 380 bar bei ungefülltem PTFE, bei Compounds bis zu 1000 bar. Das Verdichtungsverhältnis (Dichte des Preßlings zu Schüttdichte des Preßpulvers) kann zwischen 3 : 1 und 7 : 1 liegen. Die Verdichtungsgeschwindigkeit - abhängig von Abmessungen und Verdichtungsverhältnis - wird zwischen 10 mm/min und 100 mm/min gewählt. Die gebräuchliche Sinter-temperatur liegt bei 306° bis 380°C.

## Automatisches Pressen

Geometrisch einfache Teile können nach dem Vorbild der Metallpulververarbeitung bei entsprechend hoher Stückzahl mit kurzen Zykluszeiten automatisch gepreßt werden.

## Isostatisches Pressen

Im Gegensatz zur vorbeschriebenen Preßverarbeitung, die nur eine Verdichtung in einer Richtung erlaubt, ist beim isostatischen Pressen eine Verdichtung von allen Seiten möglich. Nach den bekannten Gesetzmäßigkeiten der Druckfortpflanzung in Gasen und Flüssigkeiten wird das PTFE-Pulver in elastischen Formen durch ein druckausübendes, flüssiges Medium zu geometrisch schwierigeren Formteilen verpreßt, um anschließend gesintert zu werden.

## Extrusionsverarbeitung

Die Ramextrusion ist ein kontinuierliches Preß-Sinterverfahren. PTFE-Pulver wird über eine Dosiervorrichtung in ein Extrusionsrohr eingebracht, mittels eines Stempels verdichtet und dabei im auf Sinter-temperatur erhitzten Rohr weiterbefördert. Die einzelnen Dosierchargen sintern zu einem endlosen Extrudat zusammen. Geeignet sind rieselfähige und thermisch vorbehandelte Pulvertypen, die bei Extrusionsdrücken zwischen 100 und 450 bar und Temperaturen in der Heizstrecke, die in mehrere Regelzonen aufgeteilt ist, von 340°C bis 380°C verarbeitet werden. Extrusionsgeschwindigkeit, d.h. Stempelgeschwindigkeit, Verweilzeit in der Sinterzone, Verwendung von Bremsvorrichtungen sind stark von Größe und Form des Extrudates abhängig.

Die Pastenextrusion ist ein ebenfalls kontinuierliches Preßverfahren von PTFE-Feinstpulver mit Gleitmittelzusatz, anschließendem Verdampfen des Gleitmittels und Sintern des Extrudates. Gefertigt werden dünnwandige Schläuche und Rohre.

### Spanende Verarbeitung

Die durch Pressen und Extrudieren hergestellten Halbzeuge lassen sich durch die üblichen Zerspanungstechniken - Sägen, Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen - auf den bekannten Werkzeugmaschinen mit Werkzeugen, die denen der Holzverarbeitung gleichen, zu Fertigteilen verarbeiten. Die geringe Wärmeleitfähigkeit und der hohe Wärmeausdehnungskoeffizient können bei ungünstigen Bearbeitungsbedingungen Fehlerursachen bilden. Bei hohen Schnittgeschwindigkeiten sollte darum – meist mit Luft – gekühlt werden. Zu beachten ist weiterhin, daß PTFE zwischen 19 und 23°C einen Umwandlungspunkt des kristallinen Gefüges aufweist, der eine Volumenänderung von ca. 1% bedingt.

### Kleben von PTFE

Bedingt durch die hohe Lösungsmittelbeständigkeit und die antiadhäsiven Eigenschaften ist eine Verklebung von PTFE nur nach einer Vorbehandlung der zu verklebenden Flächen möglich. Dazu ist es erforderlich, die Oberflächen chemisch zu aktivieren. Geeignet hierfür sind Ätzmittel, die sich als Lösungen von Alkalimetallen in flüssigem Ammoniak oder Natrium in Tetrahydrofuran bewährt haben. (Unter Einwirkung des Ätzmittels ändert sich die Farbe des PTFE von weiß in metallicbraun.) Die Ätzwirkung kann durch Altern und ultraviolette Strahlung des Tageslichtes abnehmen. Geätzte Teile, insbesondere handelsübliche geätzte Folien, sollen daher bis zum Klebevorgang dunkel gelagert werden. Geeignet ist die Verklebungsmethode, wenn relativ große Flächen mit PTFE-Folien verbunden werden sollen. Die Wahl des Klebstoffes hängt weitgehend von den Betriebsbedingungen, z.B. Temperaturbeständigkeit, ab.

### PTFE-Compounds

Sollen befriedigende Ergebnisse beim praktischen Einsatz von PTFE erzielt werden, ist auf folgende Kriterien zu achten:

- \* die Wärmeausdehnung ist um eine Zehnerpotenz höher, als bei metallischen Werkstoffen
- \* die Abriebfestigkeit ist gering
- \* ab einer bestimmten Belastungshöhe wird der Werkstoff bleibend durch Kaltfluß deformiert
- \* die Wärmeleitfähigkeit ist gering.

Durch Beimischung organischer Füllstoffe lassen sich die meisten dieser Eigenschaften modifizieren. Als Füllstoffe haben sich Glas, Kohle und Graphit, Molybdädisulfid, Bronze sowie Mischungen dieser Stoffe in Anteilen von 5% bis 40% bewährt. Durch das Einarbeiten dieser Füllstoffe können folgende Eigenschaftsverbesserungen erreicht werden:

- \* höhere Druckbeständigkeit
- \* geringere Deformation unter Last (Kaltfluß)
- \* bessere Wärmeleitfähigkeit
- \* höhere Verschleißfestigkeit
- \* verminderte thermische Ausdehnung
- \* veränderte elektrische Eigenschaften.

Eine ausführliche Darstellung findet sich in der TEKU-Druckschrift „PTFE-Compounds“.