

# PTFE-Fluorkunststoffe

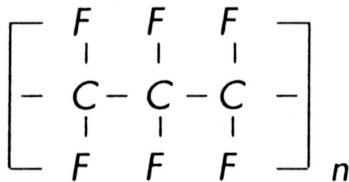
## Eigenschaften und Kenndaten

Alle Angaben beziehen sich auf Erfahrungswerte und dienen zur Beratung.  
Verbindlichkeiten können nicht abgeleitet werden.

## Polytetrafluorethylen (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 Tetrafluoräthylen zum polymeren Polytetrafluorethylen umgesetzt.

### Strukturformel



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 zeigt folgendes Bild.

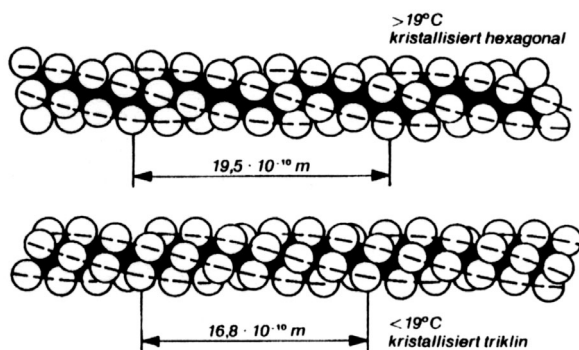


Abb. 1 Modell der Molekülkette

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 Kristall-Umwandlung ergibt sich eine 1%-ige Volumenänderung. Die relative Längenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Verlauf des linearen Ausdehnungskoeffizienten zeigen die Abbildungen 2 und 3.

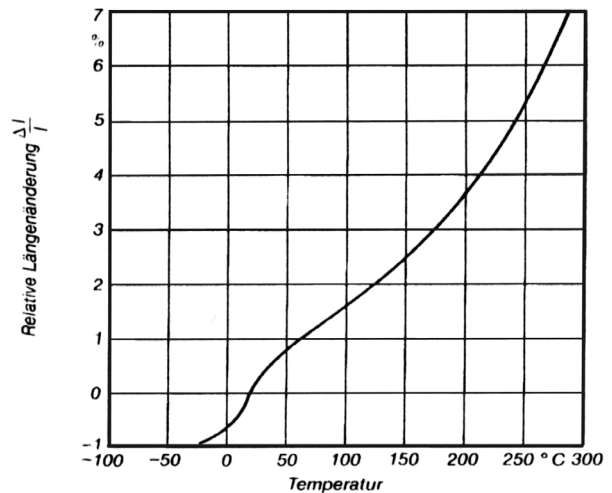


Abb. 2 Relative Längenänderung von PTFE in Abhängigkeit von der Temperatur

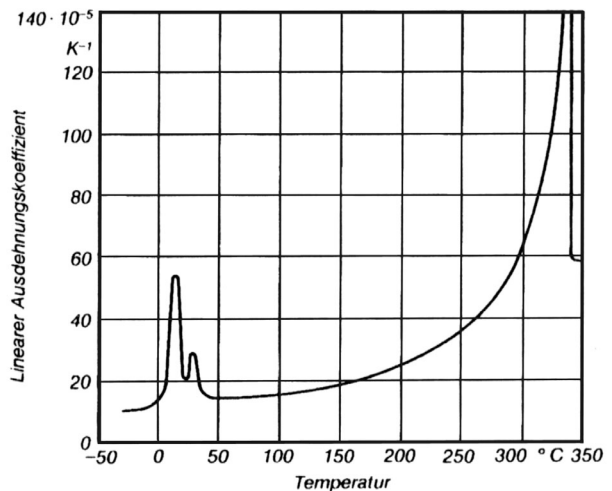


Abb. 3 Linearer Ausdehnungskoeffizient von PTFE in Abhängigkeit von der Temperatur

## 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 Probendicke abhängig und differieren auch wegen der unterschiedlichen Formen der Probekörper entsprechender DIN und ASTM-Meßverfahren.

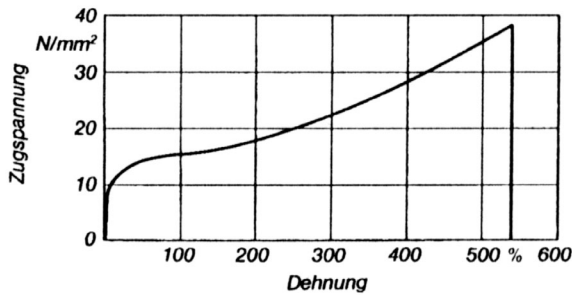


Abb. 4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PTFE

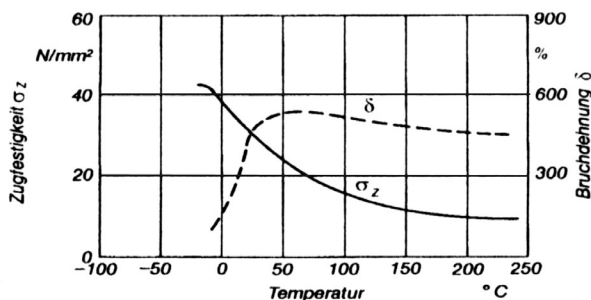


Abb. 5 Zugfestigkeit und Bruchdehnung von PTFE in Abhängigkeit von der Temperatur

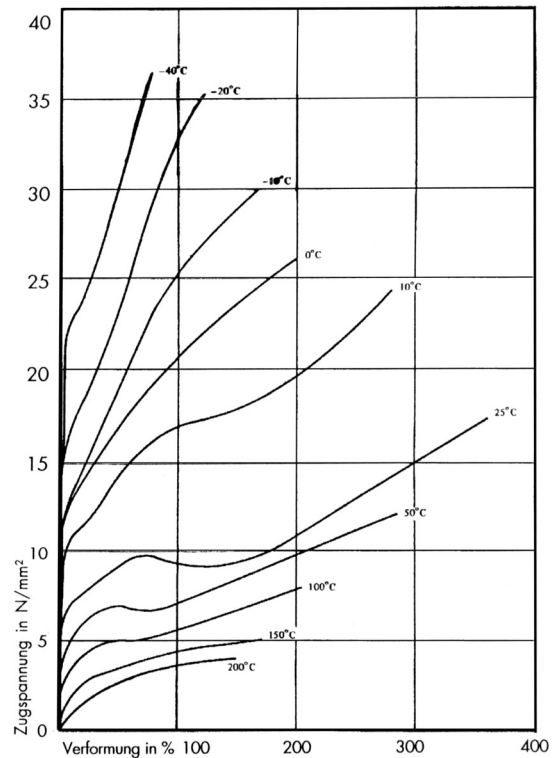


Abb. 6 Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei unterschiedlichen Temperaturen

## Verhalten bei langzeitiger Beanspruchung

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

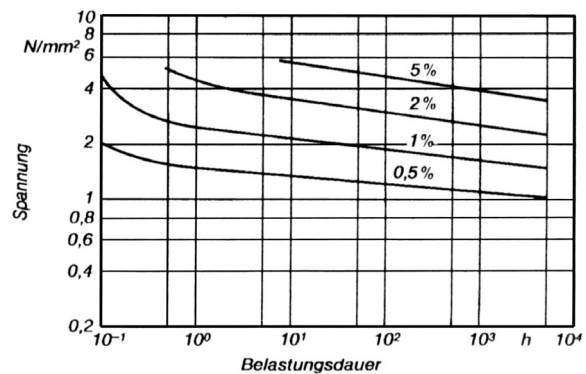


Abb. 7a Zeitdehnspannungen von PTFE in Abhängigkeit von der Belastungsdauer für vier verschiedene Dehnungen bei 20 °C.

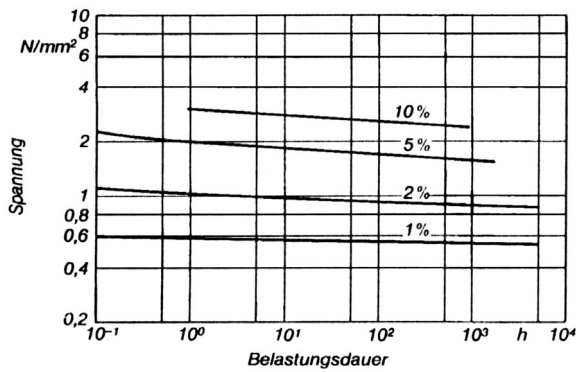


Abb. 7b Zeitdehnspannungen von PTFE in Abhängigkeit von der Belastungsdauer für vier verschiedene Dehnungen bei 100 °C.

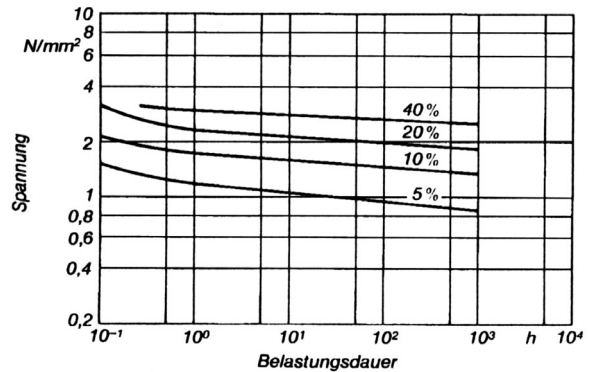


Abb. 7b Zeitdehnspannungen von PTFE in Abhängigkeit von der Belastungsdauer für vier verschiedene Dehnungen bei 200 °C

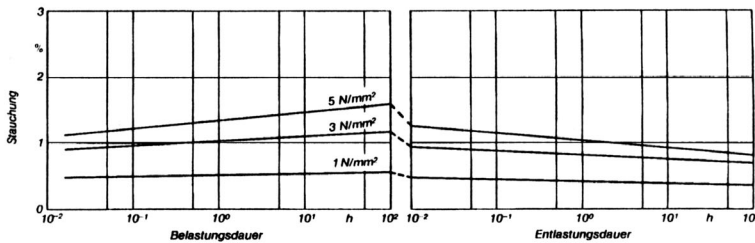


Abb. 8a Stauchung und Rückstellung in Abhängigkeit von der Zeit bei 20 °C

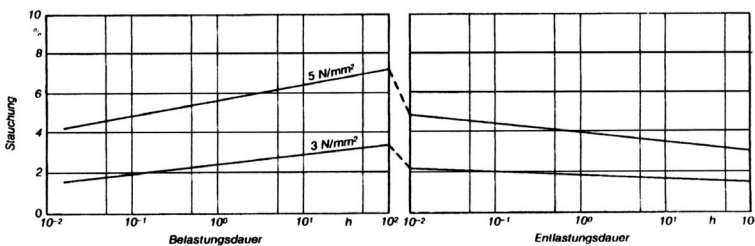


Abb. 8a Stauchung und Rückstellung in Abhängigkeit von der Zeit bei 100 °C

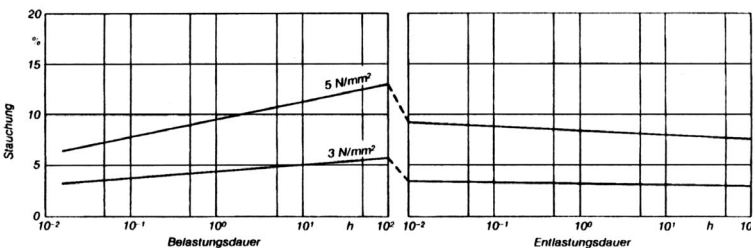


Abb. 8a Stauchung und Rückstellung in Abhängigkeit von der Zeit bei 150 °C

## Biegebeanspruchung

Im Biegeversuch nach DIN 53 452 erhält man bei 3,5%-Biegespannung - 14 N/mm<sup>2</sup>. (s. Tab. 3). Die Biegefestigkeitsprüfung nach ASTM D 790 wird ohne Bruch überstanden. Die Biege-wechselfestigkeit, 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>.

## 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 53 454 ergeben sich Werte für Fließgrenzen, die in Tabelle 1 aufgenommen wurden:  
 1% Fließgrenze 10N/mm<sup>2</sup>  
 10% Fließgrenze 18N/mm<sup>2</sup>

## Verhalten bei langzeitiger Beanspruchung

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

## Schlag- und Kerbschlagzähigkeit

PTFE weist - wie die Werte in Tab. 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.

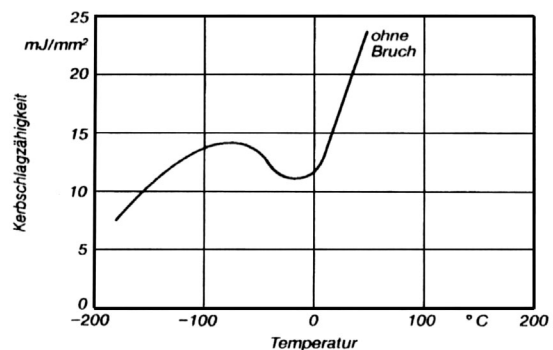


Abb. 9 Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur (DIN 53 453)

## Dauerschwingverhalten

Durch seine Flexibilität hält PTFE einer großen Zahl von Lastwechseln stand. Der im Biegeschwingungsversuch ermittelte

dynamische E-Modul und der Verlustfaktor  $\delta$  zeigen, wie alle mechanischen Festigkeitswerte, eine starke Abhängigkeit von der Temperatur.

Tabelle 1 **Mechanische Eigenschaften von PTFE**

Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfmethode
Dichte	2,15 ... 2,18	g/cm <sup>3</sup>	DIN 53 479 / ASTM 1457-69 T
Zugfestigkeit	20 ... 40	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53 455 / ASTM D 1457-69 T / ASTM D 1710-63 T
Bruchdehnung	250 ... 500	%	(wie Zugfestigkeit)
Zug-E-Modul	750	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53 457
1% Fließgrenze	10	N/mm <sup>2</sup>	
10% Fließgrenze	18	N/mm <sup>2</sup>	
Biegefestigkeit	ohne Bruch	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53 452
3,5% Biegespannung	14	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53 452
Torsionsteifheit	160	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53 447
Schlagzähigkeit	ohne Bruch	kJ/m <sup>2</sup>	DIN 53 453
Kerbschlagzähigkeit	16	kJ/m <sup>2</sup>	DIN 53 453
Wechselbiegezahl	> 10 6	Lastwechsel	DIN 53 374
Kugeldruckhärte (135 N Prüflast)	27 ... 32	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53 456 (30 sec-Wert)
Shore-Härte	D 55 ... 59 / C 85 ... 87		DIN 53 505

Tabelle 2 **Physikalische und thermische Werte von PTFE**

Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfmethode
Schmelzbereich	320 ... 340	°C	DTA
Volumenänderung im Schmelzintervall (10-K-Bereich)	5 ... 8	%	-
Volumenänderung zwischen Raumtemp. und Schmelzbereich	27 ... 28	%	-
Linearer Ausdehnungskoeffizient			%
zwischen 20°C und 100°C	16.10 -5	K-1	DIN 52 328 (Dilatometer)
zwischen 20°C und 200°C	19,5.10 -5	K-1	
zwischen 20°C und 300°C	25.10 -5	K-1	
Spezifische Wärme	bei 0°C	0,96	kJ/kg.K
	bei 50°C	1,03	kJ/kg.K
Wärmeleitfähigkeit		0,25 ... 0,50	W/m.K (Zweiplattenmethode) DIN 52 612
Temperaturanwendungsbereich		-200 ... +260*	°C - (* kurzfristig bis + 300°C)
Formbeständigkeit in der Wärme			
ISO/R 75, Verfahren A	50 ... 60	°C	DIN 53 451
ISO/R 75, Verfahren B	130 ... 140	°C	
Vicat-Erweichungspunkt VST/B/50	110	°C	DIN 53 460, in Luft
Martens	72	°C	DIN 53 458, 53 462
Glutbeständigkeit		Stufe 1	DIN 53 459
Verbrennungswärme		4600	kJ/kg

## 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.

## 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°.

## 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. Abbildung 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 Abbildung 11;
- bei Temperaturerhöhungen bis 20 °C nehmen die Reibungszahlen zu und bleiben dann weitgehend konstant. Bei tieferen Temperaturen ab -45 °C steigt der Koeffizient geringfügig an, um dann ebenfalls nahezu unverändert zu bleiben.

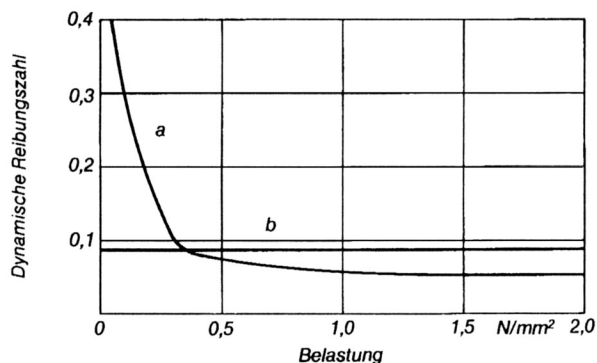


Abb. 10 Dynamische Reibungszahl von PTFE in Abhängigkeit von der Belastung

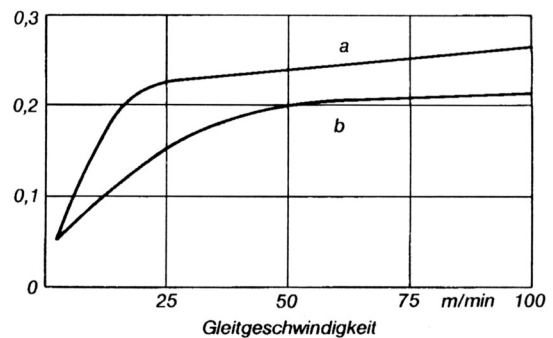


Abb. 11 Dynamische Reibungszahl von PTFE in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit

## 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 °C ist PTFE in nicht compundierter Form physiologisch neutral. Bei der oberhalb von 300 °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 Fluoratome 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 (327 °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.

Tabelle 3 **PTFE ist u. a. beständig gegen folgende Chemikalien**

Abietinsäure	Cetan	Fluornaphthalin	Naphthalin	Quecksilber
Aceton	Chlor	Fluornitrobenzol	Naphthole	Salpetersäure
Acetonphenon	Zinkchlorid	Fluorwasserstoff	Natriumhydroxid	Salzsäure
Acrylanhydrid	Chloroform	Formaldehyd	Natriumhypochlorit	Schwefel
Allylacetat	Chlorsulfonsäure	Furan	Natriumperoxid	Schwefelkohlenstoff
Aluminiumchlorid	Chromsäure		Nitrobenzol	Schwefelsäure
Ameisensäure	Cyclohexan	Gasolin	2-Nitro-Butanol	Seife und Detergenzien
Ammoniak, flüssig	Cyclohexanon		Nitromethan	Stannochlorid
Ammoniumchlorid		Hexachlorethan	2-Nitro-2-Methylpropanol	Stickstofftetroxid
Anilin	Dibutylphthalat	Hexan	n-Octadecylalkohol	
	Dibutylsebacat	Hydrazin		Tetrabrommethan
Benzonitril	Diethylcarbonat		Oele, tierische	Tetrachlorethylen
Benzoylchlorid	Diisobutyladipat	Kaliumacetat	Oele, pflanzliche	Trichloressigsäure
Benzylalkohol	Dimethyläther	Kaliumhydroxid	Ozon	Trichlorethylen
Blei	Dimethylformamid	Kaliumpermanganat	Perchlorethylen	Tricresylphosphat
Borax	Dimethylhydrazin, asymmetrisch	Kalziumchlorid	Pentachlorbenzamid	Triethanolamin
Borsäure	Dioxan		Perfluoroxylon	
Brom		Lösemittel, aliphatische	Phenol	Vinylmethacrylat
n-Butylamin	Eisen-III-Chlorid	Lösemittel, aromatische	Phosphorsäure	
Butylacetat	Eisen-III-Phosphat		Phosphorpentachlorid	Wasser
Butylmethacrylat	Essigsäure	Magnesiumchlorid	Phthalsäure	Wasserstoffperoxid
	Essigsäureanhydrid	Methacrylsäure	Pinen	
	Ethylacetat	Methanol	Piperidin	Xylol
	Ethylalkohol	Methylethylketon	Polyacrylnitril	
	Ethyläther	Methylmethacrylat	Pyridin	
	Ethylhexoat			
	Ethylenbromid			
	Ethylenglykol			

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  $10^{18} \Omega\text{cm}$ ; er 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 (siehe Seite 8).

**Tabelle 4 Dielektrische Eigenschaften von PTFE**

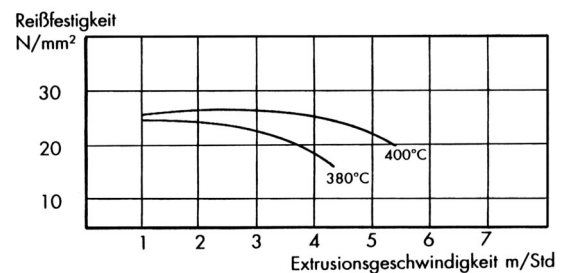
Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfmethode
Rel. Dielektrizitätskonstante	bei 50 Hz	2,1	-
	bei 10 <sup>3</sup> Hz	2,1	
	bei 10 <sup>4</sup> Hz	2,1	
	bei 10 <sup>5</sup> Hz	2,1	
	bei 10 <sup>6</sup> Hz	2,1	
	bei 10 <sup>7</sup> Hz	2,1	
Dielektrischer Verlustfaktor tan	bei 50 Hz	0,5·10 <sup>-4</sup>	-
	bei 10 <sup>3</sup> Hz	0,3·10 <sup>-4</sup>	
	bei 10 <sup>4</sup> Hz	0,4·10 <sup>-4</sup>	
	bei 10 <sup>5</sup> Hz	0,7·10 <sup>-4</sup>	
	bei 10 <sup>6</sup> Hz	0,7·10 <sup>-4</sup>	
	bei 10 <sup>7</sup> Hz	0,7·10 <sup>-4</sup>	
Dielektrischer Verlustfaktor tan (bei 10 <sup>3</sup> , 10 <sup>4</sup> und 10 <sup>5</sup> Hz)	-50°C	< 1.10 <sup>-4</sup>	-
	0°C	< 1.10 <sup>-4</sup>	
	+50°C	< 1.10 <sup>-4</sup>	
	+100°C	< 1.10 <sup>-4</sup>	
	+150°C	< 1.10 <sup>-4</sup>	
	+200°C	< 1.10 <sup>-4</sup>	
Durchschlagsfestigkeit (Kugelelektrode)	50 ... 80	kV/mm	VDE 0303, Teil 2 (Folie 0,2 mm dick)
Spez. Durchgangswiderstand	10 <sup>18</sup>	... cm	DIN 53 482
Oberflächenwiderstand	10 <sup>17</sup>	...	DIN 53 482
Kriechstromfestigkeit	KC > 600	Stufe	VDE 0303, Teil 1 / 9.64
Lichtbogenfestigkeit	L4	Stufe	VDE 0303, Teil 5

## Verarbeitung von PTFE

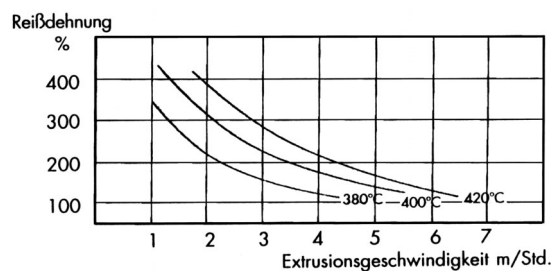
Wegen seiner hohen Schmelzviskosität oberhalb des Kristallit-schmelzbereiches von 320° - 340°C läßt sich PTFE nicht mit Hilfe der technischen Verfahren verarbeiten, die für die Mehrzahl der Thermoplaste üblich sind.

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 Abhängigkeit der Reißfestigkeit von der Extrusionsgeschwindigkeit**



**Abb. 13 Abhängigkeit der Reißdehnung von der Extrusionsgeschwindigkeit und der Sintertemperatur**



## 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 Sintertemperatur 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 Sintertemperatur 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° 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 Mäphtylatrium in Tetrahydrofuran bewährt haben. (Unter Einwirkung des Ätzmittels ändert sich die Farbe des PTFE von weiß in metallischbraun.) 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.