

Fluorthermoplaste in Filmanwendungen

S. Zehentmaier

Über 70 Jahre nach der Entdeckung des Polytetrafluorethylens (PTFE) haben sich Fluorpolymere als außerordentlich nützliche Materialfamilie fest in verschiedensten technischen Anwendungen etabliert. Neben dem PTFE selbst, das mit vielen der in der Kunststofftechnik üblichen Methoden nicht verarbeitet werden kann, hat sich eine ganze Reihe flexibel handhabbarer Fluorthermoplaste einen Platz im Alltag erobert. In Folienanwendungen können sie unter anderem durch außerordentliche Weiterreißfestigkeit und chemische Beständigkeit punkten. Am sichtbarsten werden Fluorthermoplast-Folien für viele Verbraucher in Außenanwendungen: Vom PTFE abgeleitete fluorierte Kunststoffe wie Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) finden unter anderem Einsatz in Solaranlagen und in der Architektur. Hier überzeugen sie zum Beispiel durch ihre hohe Robustheit sowie selbstreinigende Eigenschaften. Ein weiterer Vorteil ist ihr im Vergleich zu Glas erheblich geringeres Gewicht, das es erlaubt, tragende Konstruktionen filigraner zu gestalten oder überhaupt erst zuzulassen. Nicht zuletzt ermöglichen diese witterungsbeständigen Folien die Realisierung besonders couragierter und ästhetisch ansprechender architektonischer Vorstellungen. Auch das Problem des Wärmestaus unter transparenten Fluorthermoplast-Dächern kann dank neuer, mehrschichtiger optischer Filme mittlerweile gelöst werden.

More than 70 years after the discovery of polytetrafluoroethylene (PTFE), fluoropolymers have become well-established as an extremely useful material family in a variety of technical applications. In addition to PTFE itself, which cannot be processed with many of the conventional methods, utilised in plastics technology, a whole series of fluorothermoplastics that are flexible to handle has gained a place in everyday life. In film applications they stand out among other things by exceptional resistance to tear propagation and chemical resistance. Most visible for many consumers are fluorothermoplastic films in outdoor applications: PTFE-derived fluorinated plastics such as ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) are used among other things in photovoltaic systems and architecture. Here they convince for example due to their high robustness and self-cleaning properties. Another advantage is the considerably lower weight compared to glass, which enables the design of more filigree load-bearing structures or permits them in the first place. Not least, these weather-resistant films allow the realisation of very courageous and aesthetically pleasing architectural ideas. Also, the problem of heat build-up under transparent fluorothermoplastic roofs can now be solved, thanks to the new, multi-layer optical films.

1 Einleitung

Fluorpolymere lassen sich in drei Gruppen einteilen: Fluorthermoplaste (FTP),

Fluorelastomere (FE) und Polytetrafluorethylen (PTFE). Die Sonderstellung des PTFEs resultiert aus seinem ausgespro-

chen niedrigen Schmelzflussindex (MFI). Das Polymer schmilzt nicht, sondern wandelt sich oberhalb von etwa 330 °C lediglich in ein transparentes, nicht fließendes Gel um. Dadurch müssen zur Verarbeitung dieses Werkstoffs besondere Techniken eingesetzt werden, z. B. Formpressen, isostatisches Pressen, Ram- bzw. Pastenextrusion.

Fluorthermoplaste zeigen hingegen – trotz zum Teil ausgesprochen hoher Schmelzpunkte – Schmelzflussindizes von 1 bis 40 g/10 min, wodurch ihnen eine ganze Reihe von Verarbeitungstechniken, die auch bei anderen thermoplastischen Werkstoffen Anwendung finden, offen steht [1]. Letztlich sind diese Polymere gerade auch mit dem Ziel entwickelt worden, die herausragenden Eigenschaften des Polytetrafluorethylens mit den Anforderungen u. a. der Extrusions- und Spritzgießtechnik in Einklang zu bringen. Somit sind diese Fluorkunststoffe grundsätzlich auch zur Herstellung von Folien geeignet. Aber auch aus PTFE lassen sich mit Hilfe bestimmter Verarbeitungstechnologien durchaus Filme und Gewebe produzieren (Abb. 1).

2 Physikalische Kenndaten

2.1 Typische Werkstoffe

In Filmapplikationen kommen vor allem folgende Fluorthermoplaste zum Einsatz: ETFE, FEP, PFA, PVF, PVDF und THV. Einige physikalische Basisdaten von Fluorthermoplasten sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Dieser Überblick erlaubt auch eine erste Einordnung der Material-Performance durch den Vergleich mit Polyolefinen und PVC.

Tab. 1: Physikalische Daten ausgewählter thermoplastischer Kunststoffe Quelle: Dyneon GmbH

	PVDF	PVDF flex	ETFE	PTFE	PP	HDPE	PVC
Dichte (DIN 53497, g/cm³)	1,78	1,78	1,7–1,76	2,12	0,90–0,92	0,95	1,42
Zugfestigkeit (DIN 53455, N/mm²)	30–50	28–41	40–46	20–40	33	24–29	45–55
Reißdehnung (DIN 53455, %)	20–60	300–400	200	140–500	20–800	100–1 000	20–30
Obere Dauergebrauchstemperatur (°C)	150	120	155	260	100	85	60
Untere Dauergebrauchstemperatur (°C)	–40	–30	–190	–200	–15	–50	–15
Schmelzpunkt (DIN 53736, °C)	172–178	155–160	270	– / (330)	165	130	160
Brandklasse (UL 94)	V-0	V-0	V-0	V-0	HB/V-2	V-2	V-0

Sebastian Zehentmaier
sfzehentmaier@mmm.com
Application and Product Development,
Dyneon GmbH
3M Advanced Materials Division, Burgkirchen

Im Folgenden seien einige Fluorthermoplaste auf ihre besondere Eignung für den Einsatz in der Architektur bzw. in Außenanwendungen untersucht.

ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen) ist ein teilfluoriertes Copolymer, das zur Erzielung bestimmter Eigenschaften zuweilen durch ein drittes Monomer modifiziert wird, wodurch der Schmelzpunkt von 220 bis 280 °C variieren kann. ETFE ist ausgesprochen lichtdurchlässig (Transmission > 90 %), kann bei Bedarf jedoch auch durch Pigmente eingefärbt werden. Durch seine hohe chemische Beständigkeit ist ETFE robust gegenüber vielen aggressiven Medien. Hierzu zählen nicht nur (Reinigungs-)Chemikalien, sondern auch Vogelkot und saurer Regen.

FEP (Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen) ist vergleichsweise weich, chemisch inert und wie PTFE durch gute Gleiteigenschaften charakterisiert. Haupteinsatzgebiet von FEP ist die Draht- und Kabelisolation. Es wird jedoch auch zu Folien und Klebebändern verarbeitet. Es zeichnet sich durch eine herausragende Transparenz für UV-Strahlung und sichtbares Licht aus. Der Brechungsindex von FEP ist der niedrigste aller Fluorthermoplaste – er entspricht in etwa dem von Wasser.

PFA, Copolymer aus Tetrafluorethylen und Perfluoralkoxyvinylethern, ähnelt dem schwierig zu verarbeitenden PTFE im Hinblick auf dessen physikalische und chemische Eigenschaften sehr stark, ist aber für den Spritzguss und die Schneckenextrusion geeignet. PFA kann dauerhaft bei Temperaturen um 260 °C

eingesetzt werden – das ist die höchste Dauergebrauchstemperatur in der Gruppe der hier vorgestellten Polymere. Auf Grund seiner höheren Dauergebrauchstemperatur eignet sich PFA daher als Alternative zu FEP, wenn besonders hohe Einsatztemperaturen gefragt sind.

PVDF (Polyvinylidenfluorid), entweder als Homopolymer oder als Copolymer mit Hexafluorpropylen oder Chlortrifluorethylen, lässt sich auf Grund seines niedrigeren Schmelzpunkts (je nach Zusammensetzung zwischen 135 und 175 °C) bei geringeren Temperaturen verarbeiten als andere Fluorpolymere. Gleichwohl zeichnet es sich durch hohe mechanische Festigkeit und Dimensionsstabilität, gute chemische Beständigkeit und niedrige Permeationsraten aus. PVDF kommt daher unter anderem in der Oberflächenvergütung bzw. im Oberflächenschutz zum Einsatz, etwa zur Veredelung von PVC-Oberflächen. Auch in Anti-Graffiti-Filmen findet es Verwendung.

THV (Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid) kann ebenso bei niedrigen Temperaturen verarbeitet werden. THV glänzt durch herausragende Flexibilität und Transparenz, kann aber auch an Elastomere und Polyolefine angebunden werden. Daher wird es gerne zur Herstellung mehrlagiger Folien aus o. g. Werkstoffkombinationen herangezogen. UV-beständige Filme aus Dyneon THV eignen sich auch zur Versiegelung von Gewebelaminaten.

2.2 Allgemeine Eigenschaften

Wie **Tabelle 1** zeigt, fallen die Mitglieder der Fluorthermoplast-Polymerfamilie im Ver-

gleich zu „klassischen“ thermoplastischen Folienwerkstoffen vor allem durch höhere Dauergebrauchstemperaturen und bessere Brandklassen-Einstufungen auf. Dabei wird insbesondere der Temperaturbereich, dem Kunststoffe in Außenanwendungen standhalten müssen, vollständig abgedeckt – gerade auch in Gebieten, in denen mit einer starken Sonneneinstrahlung und erheblichem Hitzeaufbau zu rechnen ist. Am unteren Ende der Temperaturskala reagieren einige Fluorthermoplaste auch dann noch elastisch, wenn andere Kunststoffe bereits zu Versprödung neigen.

Im Vergleich zu Polyolefinen und PVC zeichnen sich PTFE, PFA und FEP darüber hinaus durch eine weitgehend umfassende Beständigkeit gegenüber Säuren, Basen und organischen Lösungsmitteln aus. ETFE zeigt sich hier lediglich bedingt empfindlich gegenüber Ketonen, Amininen und Furanen, bei PVDF und THV ist hingegen stärker auf die Natur der damit in Kontakt kommenden Medien zu achten. Aber auch diese Materialien sind weitestgehend robust gegenüber anorganischen und organischen Säuren, Alkoholen sowie aliphatischen und organischen Kohlenwasserstoffen.

2.3 Wichtige Eigenschaften für Filmanwendungen

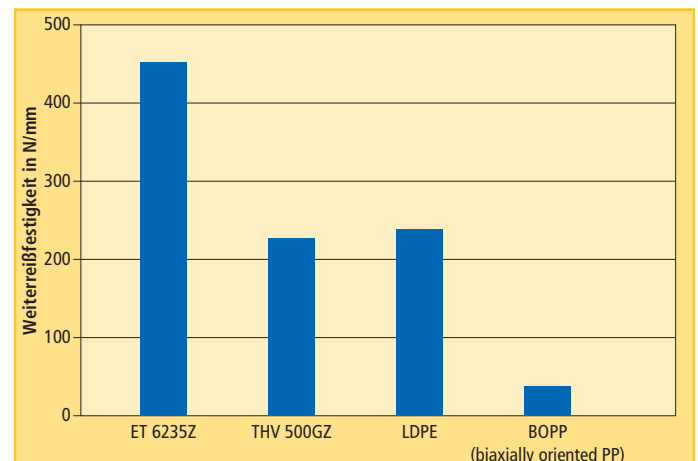
2.3.1 Mechanische Eigenschaften

Von besonderer Bedeutung für Folien-Anwendungen ist die hohe Weiterreißfestigkeit von Fluorthermoplasten (**Abb. 2**). Besonders

Abb. 1: Die Sonnenschutz-Segel des Cafés Mozart in Wien, Österreich, bestehen aus einem vergilbungsbeständigen, transluzenten PTFE-Gewebe



Abb. 2: Weiterreißfestigkeit von ETFE (Dyneon ET 6235Z) im Vergleich zu anderen Folien (Messung nach DIN 53363)



ETFE erzielt hier hervorragende Werte. Dies prädestiniert ETFE-Folien für alle Anwendungen, in denen eine besondere mechanische Robustheit gefordert ist. THV erreicht etwa das Niveau von BOPET (biaxially oriented PET), die entsprechenden Kennwerte anderer Fluorthermoplasten liegen in einer ähnlichen Größenordnung.

Das besondere Eigenschaftsprofil der Ausgangspolymere findet sich auch in daraus gefertigten Filmen wieder. **Tabelle 2** fasst einige Kennwerte marktüblicher Fluorthermoplast-Folien zusammen. Die Kennwerte sind selbstverständlich nicht 1:1 übertragbar. Aus **Tabelle 3** lässt sich am Beispiel PTFE entnehmen, welchen Einfluss die Technologie der Filmherstellung auf die Materialeigenschaften der Folien hat. Es liegt auf der Hand, dass die verfügbaren Filmbreiten und Filmdicken massiv variieren, während Dauergebrauchstemperaturen und chemische Beständigkeit als dem Polymer inhärente Eigenschaften erhalten bleiben. Auch Zugfestigkeit und Reißdehnung unterliegen abhängig von der Wahl des Herstellungsverfahrens gewissen Schwankungen. Dies ist beim Einsatz zu beachten.

Viele Fluorthermoplaste und daraus gefertigte Filme können das ausgesprochen hohe mechanische Eigenschaftsprofil in Zugversuchen über ein breites Temperaturspektrum aufrechterhalten. Die Zugfestigkeit von ETFE, FEP und PFA nimmt zwischen 20 und 200 °C zwar ab, die Reißdehnung von rund 200 µm starken PFA- und FEP-Filmen etwa bleibt zwischen 20 und 200 °C weitestgehend konstant. Bei ETFE nimmt sie zwischen -20 und +140 °C sogar deutlich zu.

2.3.2 Selbstreinigende Eigenschaften

Ähnlich gut schneiden Filme aus Fluor-kunststoffen in einer Eigenschaft ab, die selbst außerhalb der Fachwelt fest mit diesen Werkstoffen assoziiert ist: Ihre Fähigkeit zur Selbstreinigung bzw. Schmutzabweisung. Die Oberflächenspannungen der Polymerwerkstoffe nehmen in der Reihenfolge PA>PET>PEEK>PE>PVDF>ETFE>PTFE ab. Das bedeutet, dass (Regen-)Wasser von der Oberfläche der Fluorpolymere abperlt

und lose aufliegende Verunreinigungen mit sich reißt (**Abb. 3**). Dieser Effekt lässt sich auch mit dem Kontaktwinkel korrelieren, den polare Flüssigkeiten wie Wasser mit der Oberfläche eines Fluorthermoplastes ausbilden; ab Kontaktwinkeln von etwa 90° gelten sie als hydrophob. Wasser bildet zu PTFE einen Kontaktwinkel von deutlich über 100° aus, mit zunehmendem Anteil von C-H-Bindungen im Polymer nehmen die Kontaktwinkel (durch die steigende Polarität des Polymers) allerdings wieder etwas ab [2].

2.3.3 Hitze- und Witterungsbeständigkeit

Das Bundesamt für Energie der Schweizerischen Eidgenossenschaft stellte im Rahmen einer Langzeituntersuchung fest, dass Folien aus FEP und PVF nach 20-jähriger Freiluft-Exposition und Reinigung mit Ethanol dieselben bzw. sogar bessere Licht- und UV-Transmissionswerte verglichen mit dem Neuzustand erreichten. Eine Verschlechterung der Transparenz durch Materialdegradation sei mithin auszuschließen. Bei Proben aus PC, PET, PVC und ungesättigtem Polyester wurden in demselben Versuch dagegen deutliche Degradationseffekte festgestellt (Verfärbung/Vergilbung, Schimmelbefall, Versprödung etc.) [3].

Auch die hohe Beständigkeit gegenüber mechanischen Einflüssen machte sich im Langzeitversuch bemerkbar: Keine der untersuchten, lediglich 25 bis 120 µm dicken Fluorpolymerfolien war nach 20 Jahren Freiluftbewitterung an zwei unterschiedlichen Standorten in der Schweiz maßgeblich beschädigt.

Selbst unter noch anspruchsvolleren Bedingungen machen Fluorkunststoffe langfristig eine gute Figur. In bei Dyneon durchgeführten Alterungstests zeigte ETFE nach 10 000 Stunden UV-Bestrahlung (Xenontest 150) keine feststellbare optische Beeinträchtigung; im Blick auf ihre mechanische Eigenschaften büßten die Probanden weniger als 10 % ihrer Performance ein. Sehr ähnliche Resultate waren nach siebenjähriger, zehnjähriger und zwanzigjähriger Freiluft-Bewitterung in Bombay, Arizona und Süddeutschland zu verzeichnen. Experten schreiben zum Beispiel ETFE-Dachkonstruktionen daher eine rund doppelt so hohe Lebensdauer zu wie solchen aus PVC.

Eine ausführliche Diskussion der Witterungs- bzw. Alterungseigenschaften sowie der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Fluorthermoplasten von der Temperatur findet sich in [4].

Tab. 2: Eigenschaften von Fluorthermoplast-Filmen (Quelle: Dyneon GmbH)

	ETFE	FEP	PFA	PVF	PVDF	THV
Filmdicke (µm)	12–300	12–500	12–750	12–50	12–500	12–250
Folienbreite (m)	<2	<2	<1,5	–	<2	<2
Zugfestigkeit (MPa)	40–55	25–30	15–25	30–40	35–50	25–30
Reißdehnung (%)	300–500	300–350	300–400	100–200	20–200	300–500
E-Modul (MPa)	900–1 100	500–600	500–600	–	2 200–2 500	200–300
Dauergebrauchstemperatur (°C)	150	205	250	105	130	130
Chemische Beständigkeit	++	+++	+++	+	+	+

Tab. 3: Eigenschaften von PTFE-Filmen (Quelle: Dyneon GmbH)

	S-PTFE (Schälverfahren)	E-PTFE extrudiert, gesintert	E-PTFE extrudiert, ungesintert	E-PTFE (Dispersions-Gießverfahren)
Filmdicke (µm)	12–300	50–250	50–250	12–125
Folienbreite (m)	<1,5	<0,2	<0,2	<0,2
Zugfestigkeit (MPa)	20–30	40–50	5–12	25–30
Reißdehnung (%)	200–300	150–300	50–100	400–500
E-Modul (MPa)	600–650	600–650	600–650	600–650
Dauergebrauchstemperatur (°C)	260	260	260	260
Chemische Beständigkeit	+++	+++	+++	+++

3 Folienherstellungsverfahren

Filme aus Fluorthermoplasten werden heute in der Regel per Extrusion hergestellt, entweder im Blasfolienverfahren oder im Flachfolienverfahren mittels Breitschlitzdüse. Zur Erzielung der gewünschten Eigenschaften ist hier die korrekte Kühlung essenziell. Den Kühlwalzen kommt eine besondere Bedeutung zu [5]. Im Flachfolienverfahren sind Filmdicken von 10 bis 300 μm , in Sonderfällen bis 500 μm , möglich.

Im Blasfolienverfahren entstehen dagegen typischerweise Filme mit bis zu zwei Meter Breite und Dicken bis 150 μm . Diese Technologie hat im Vergleich zum Breitschlitzdüsen-Verfahren jedoch einige Nachteile. Zum einen stehen die vergleichsweise hohen Rohstoffpreise der Fluorpolymere dem typischerweise hohen Durchsatz einer Blasfilm-Extrusionsanlage entgegen, zum anderen spiegeln die hierbei erzielten, tendenziell niedrigeren Folienqualitäten die hochwertigen Materialeigenschaften der Fluorpolymere kaum angemessen wider. Hinzu kommt, dass Fluorthermoplaste durch ihre hohen Dichten – anders als etwa das leichte Polyethylen – keine idealen Werkstoffe für die Blasfilmextrusion sind. Es besteht

Abb. 3: Der Innenhof des William Rappard Centres der World Trade Organisation in Genf ist mit Nowoflon ET 6235Z-Folien aus ETFE überspannt. Unter der selbstreinigenden, transparenten Konstruktion können sogar Pflanzen gedeihen. (Copyright: WTO)



die Gefahr, dass der Schlauch unter seinem Gewicht zusammensackt. Bereits lediglich 100 μm dicke THV- bzw. ETFE-Folien weisen Flächengewichte um 200 bzw. 175 g/m^2 auf. Daher ist die Flachfolienextrusion in der Produktion von Fluorthermoplast-Filmen die bevorzugte Methode.

Zur Herstellung von PTFE-Filmen muss dagegen auf andere Technologien zurückgegriffen werden. Bei der Verarbeitung von granularem PTFE (S-PTFE, Suspensions-PTFE) wird das Material unter einem Druck von 150 bis 350 bar in eine Form gepresst und bei Temperaturen um 370 $^{\circ}\text{C}$ gesintert [6]. Die so gefertigten Halbzeuge zeichnen sich durch eine homogene Struktur aus. Von derartigen Blöcken lassen sich Filme unterschiedlichster Dicke im Schälverfahren gewinnen. Die hierzu eingesetzten Anlagen erinnern an Drehbänke.

E-PTFE, also im Emulsionsprozess gewonnenes Polytetrafluorethylen, das in Form eines feinen Pulvers anfällt, kann per Pasten-Extrusion und mittels Kalanders zu Folien verarbeitet werden. Dazu wird das Pulver mit einem Hilfsstoff vermischt und unter einem Druck von zehn bis 50 bar zunächst zu einer zylindrischen Vorform (sog. Grünling) verpresst. Dieser E-PTFE-Grünling wird im nächsten Verarbeitungsschritt durch eine annähernd formgebende Düse gepresst. Zwischen zwei Rollen wird das Extrudat anschließend zu Folien kalandriert. Je nach Filmdicke können hierzu mehrere Durchläufe erforderlich sein. Anschließend erfolgt Trocknung bei 160 bis 200 $^{\circ}\text{C}$, bis die Hilfsstoffe verdampft sind; eine zusätzliche Sinterung kann erforderlich sein. So erzeugte Filme lassen sich zur Erzielung besonderer Eigenschaften auch verstrecken.

Seltener werden zur Herstellung von PTFE-Filmen auch wässrige Dispersionen dieses Polymers verwendet. Zu beschichtende Oberflächen werden entweder in diese Dispersionen eingetaucht oder mit diesen besprüht und getrocknet. Auch hier kann eine Sinterungs-Stufe nachgeschaltet sein. Dieses Verfahren eignet sich auch zur Herstellung mehrlagiger Folien, hat aber Nachteile in Sachen Wirtschaftlichkeit [7, 8].

4 Anwendungen von Fluorpolymerfolien und Entscheidungskriterien für deren Verwendung

Filme aus Fluorthermoplasten werden in der Industrie in einem ausgesprochen breiten Anwendungsspektrum eingesetzt. Die Einsatzfelder reichen von Trennfolien (u. a. in Elektro- und Elektronik-Anwendungen) über Klebestreifen und pharmazeutische Verpackungen bis hin zu Architektur und Solartechnik. Der Schwerpunkt dieses Beitrags soll auf Außenanwendungen liegen.

4.1 Solar-Industrie

Fluorpolymer-Filme können dazu beitragen, die Effizienz, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Anlagen zu steigern. Dünne Folien aus fluorierten Polymeren können einen solaren Transmissionskoeffizienten von über 0,9 aufweisen, der sogar über dem von eisenfreiem Glas liegt [3]. Die hohe Lichtdurchlässigkeit ist gepaart mit hervorragender UV-, Feuchtigkeits- und Witterungs-Beständigkeit, den Faktoren, die die Lebensdauer herkömmlicher Solarmodulkomponenten stark begrenzen.

Dadurch können bereits dünne ETFE-Filme die Schutzverglasung von Solarzellen sinnvoll ersetzen (z. B. Ultra Barrier Solarfilm 9L von 3M). Oft kommen Fluorthermoplast-Filme in der Solartechnik aber auch in mehrlagigen Folienkonstruktionen zum Einsatz. Ein Beispiel sind sogenannte Backsheet-Folien, in denen eine THV-Deckschicht mit einer durchstichfesten PET-Zwischenlage und einer EVA-Adhäsionsschicht zur schlüssigen Verbindung mit den Solarmodulen kombiniert wird. Dieser Aufbau zeichnet sich zudem durch hervorragende elektrische Isolationseigenschaften aus (Teilentladungsspannung $>1\ 100\ \text{V DC}$). Die große technische Herausforderung in der Fertigung dieser Folien liegt naturgemäß in der Sicherstellung einer guten Haftung zwischen der Fluorpolymer-Komponente und den anderen Schichten. 3M hat auf diesem Gebiet in den vergangenen Jahrzehnten eine hohe Kompetenz aufgebaut. Das Unternehmen vermarktet bereits seit dem Jahr 2006 entsprechend konstruierte Filme mit THV-Schichtdicken zwischen 61 und 74 μm unter dem Namen Scotchshield. Sie entsprechen den Normen UL 1703,

IEC 61215 ed.2 sowie IEC 61730 und sind mittlerweile bei vielen Modulherstellern weltweit im Einsatz.

Im Vergleich zum Einsatz von Glas überzeugen Fluorpolymer-Filme vor allem durch ein geringeres Gewicht, das die Montage erleichtert (u. a. durch den möglichen Verzicht auf massive Trägerelemente) und die Logistikkosten senkt. Durch ihre hohe Flexibilität sind sie zudem toleranter gegenüber Montagefehlern. Insgesamt können sie dazu beitragen, die Kosten für Solarmodule zu senken und die Investitionen in derartige Anlagen langfristig zu sichern.

4.2 Bau und Architektur

In den 1940er-Jahren erstmals eingesetzt, sind Kunststoffe im Bausektor relativ junge Materialien. Folien aus Fluorthermoplasten haben den Architekten jedoch ganz besondere Ausdrucksmöglichkeiten eröffnet. Nach wie vor finden sie hier ein ausgesprochen facettenreiches Anwendungsfeld. In der Regel kommen Folien mit Stärken von 50 bis 300 µm zum Einsatz, die sich durch ein vergleichsweise geringes Flächengewicht auszeichnen. Die hohe Dichte der Fluorpolymere wird hier durch die hohen Festigkeiten selbst dünner Folien ausgeglichen. FTP-Filme lassen sich bequem im Schweißverfahren verbinden und gelten zudem als ökologisch unbedenklich und recyclingfähig.

Fluorthermoplaste sind nicht die einzigen Polymerwerkstoffe, die im Bausektor zum Einsatz kommen. Auch Polycarbonat (PC), PMMA, stabilisierte Polyolefine (mit Einschränkungen) und Polyester sind hier oft vertreten. Gleichwohl treten Fluorthermoplaste mit diesen Polymerwerkstoffen kaum in direkte Konkurrenz.

Das liegt zum einen an ihrer überlegenen Witterungsbeständigkeit, aber auch an grundlegenden, eher ästhetischen Fragestellungen im Vorfeld eines Bauprojekts. Fluorkunststoffe werden im Wesentlichen in zwei speziellen Anwendungsfeldern eingesetzt: zum einen als Beschichtungsmaterial in der sogenannten „textilen Architektur“, die ihren Ursprung letztlich im Zeltbau hat (**Abb. 4 und 5**), und in transparenten bzw. transluzenten, ästhetisch anspruchs-

vollen Folienkonstruktionen aus ETFE, z. B. in Form von Dach- und Wandelementen aus segmentierten Luftkissen. In beiden Fällen müssen die Bahnen durch andere Bauteile, zum Beispiel Seile (Zeltbau) oder metallische Rahmen gespannt bzw. stabilisiert werden. ETFE weist im Vergleich zu Glas mehrere Vorteile auf, beispielsweise im Hinblick auf Hagel- und Bruchbeständigkeit sowie Gewicht. In der Architektur verwendete Gläser sind zwar sehr fest, benötigen aber aufgrund ihres Gewichts im Vergleich zu leichten Folien bedeutend massivere Unterkonstruktionen.

Die Entscheidung, ob fluorthermoplastische Folie oder mit Fluorpolymeren beschichtetes Gewebe eingesetzt wird, orientiert sich somit hauptsächlich an der Frage, ob der Bauherr transparente, glasähnliche Architektur oder klassische Zeltbauweise wünscht. Sagt ihm keine der beiden Lösungen zu, so wird er auf eine andere Bauweise zurückgreifen.

Was das für konkrete Projekte bedeutet, mag an einem Beispiel beleuchtet werden. Soll eine neue Schwimmhalle möglichst kostengünstig errichtet werden, wird die Wahl vermutlich zugunsten eines preiswerten Blechdachs ausfallen. Soll sie hingegen zah-

rende Besucher anziehen, etwa in einem Freizeitpark, kann eine besonders ambitionierte Architektur mit transparenten Elementen oder einem opaken Zeltdach wirtschaftlich sinnvoll sein (**Abb. 6**). Fällt die Entscheidung für transparent, dann erst stellt sich die Frage: Soll es in Glas oder glasähnlichem Plattenmaterialien (z. B. PMMA) ausgeführt werden oder ist eher eine futuristische, ästhetisch ansprechende Gestaltung gefragt? In diesem Fall kommt fluorthermoplastische Folie ins Spiel.

Ob es überhaupt zu einer transparenten Lösung kommt, ist dann oft auch noch eine Frage der Mechanik. Sollen große Distanzen überspannt werden, wie z. B. bei einem Sportstadion mit weiten Zuschauerrängen, kann die Wahl auch auf ein opakes, fluorpolymer-beschichtetes Gewebe fallen, etwa auf Glasfasergewebe mit PTFE-Beschichtung, da sich damit große Flächen bequem überspannen lassen. Diese Lösung, zu der beispielsweise beim Berliner Olympiastadion gegriffen wurde, sei aber hier nur am Rande erwähnt.

Dies soll zeigen, dass Gewebe- und Folienlösungen in derartigen Großprojekten nicht zwingend in Konkurrenz stehen, sondern sich eher ergänzen.

Abb. 4: Der Eingangsbereich des Bundeskanzleramts in Berlin, Deutschland, dürfte eine der am meisten fotografierten Fluorkunststoff-Anwendungen sein. Die Konstruktion besteht aus einem PTFE-beschichteten Glasfasergewebe.



Abb. 5: Sportstadien – hier das WM-Stadion in Manaus, Brasilien – sind ein beliebtes Einsatzfeld für Membranen beschichtet mit PTFE. (Copyright: M. Bredt)



Entsprechend den Ausführungen in den Eingangskapiteln ist der wichtigste Fluorthermoplast für Anwendungen in der Architektur ETFE. FEP und PFA können zwar ebenfalls durch viele positive Eigenschaften überzeugen, aber die Summe seiner Eigenschaften macht ETFE zum Material der Wahl für diesen Einsatzbereich. Neben der Transparenz ist vor allem die Temperaturbeständigkeit bzw. die Konstanz der mechanischen Eigenschaften im praxisrelevanten Temperaturbereich ein maßgeblicher Entscheidungsfaktor. Die dabei wichtigsten Kenngrößen sind die Spannung bei 10 % Dehnung sowie die Weiterreißfestigkeit.

THV-Folien finden in der Architektur neu- erdings besonders in Form von gewebever-

Abb. 6: Leichte, ansprechende Dachkonstruktionen aus ETFE-Folien können mithelfen, Bauwerke besonders ansprechend zu gestalten und Gäste anzuziehen, hier z. B. ins Schwimmbad Prienavera in Prien am Chiemsee.



stärkten Laminaten Verwendung. PVDF kommt in der Architektur aufgrund der mangelnden Transparenz kaum als Folie zum Einsatz. Man findet es jedoch in Gewebeanwendungen in der Innenarchitektur.

4.3 Anwendungsbeispiele

Drei Beispiele mögen die Leistungsfähigkeit moderner Fluorthermoplast-Folien in der Architektur illustrieren.

4.3.1 Gipfelstation der Gletscherbahn auf dem Gaislachkogel – Österreich

In den österreichischen Alpen, auf dem Gaislachkogel, steht in rund 3000 m Höhe das derzeit höchstgelegene Polymerfilmbauwerk der Welt: Die Endstation der Bergbahn (**Abb. 7**). Das Bauwerk muss hier nicht nur starken Windlasten standhalten, sondern sich vor allem bei niedrigen Temperaturen von bis zu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ bewähren. Die Folie aus 3M Dyneon ETFE überzeugt hier durch ihre außerordentliche Zugfestigkeit sowie die für Fluorpolymere typische Tieftemperatur- und UV-Beständigkeit. Die niedrige Oberflächenenergie verringert hier nicht nur die allmähliche Verschmutzung, sondern vermeidet zudem, dass sich Schnee auf dem Bauwerk anhäuft.



Abb. 7: Die Fassade der Gipfelstation der Gletscherbahn auf dem Gaislachkogel, Österreich. ETFE-Folien (Nowoflon ET 6235Z) halten hier den extremen Windlasten sowie der hohen UV-Belastung und den tiefen Temperaturen stand. (Copyright: A. Niederstrasser)



Abb. 8: Die Biome des Eden-Projects in Cornwall, Großbritannien, bestehen aus einer Kissenkonstruktion aus ETFE-Elementen. Folien aus Dyneon ETFE lassen 90 % des sichtbaren Lichts und 80 % des auftreffenden UV-A-Lichts passieren.

4.3.2 Innenhof der Zentrale der Welthandelsorganisation in Genf – Schweiz

Das im Vergleich zu Glas deutlich geringere Gewicht war dagegen einer der Gründe, den Innenhof der Zentrale der Welthandelsorganisation in Genf mit einer Konstruktion aus ETFE-Kissen zu überspannen (**Abb. 3**). Die insgesamt 105 Elemente aus luftgefüllten ETFE-Folien (Nowoflon ET 6235Z hergestellt aus 3M Dyneon ETFE) sind rund 95 % leichter als eine vergleichbare Glaskonstruktion. Dadurch konnte auch die Tragkonstruktion einfacher ausgeführt werden, was den offenen, leichten Charakter der Überdachung betont. Dank der hohen UV-Durchlässigkeit des Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymers können unter dem Dach sogar Bäume gedeihen. Durch die geringe Verschmutzungsneigung des Werkstoffs sollten sich auch manuelle Reinigungsarbeiten weitgehend erübrigen. Der Folienhersteller Nowoflon setzt bereits seit 30 Jahren auf Fluorpolymere von Dyneon.

4.3.3 Eden-Project in Cornwall – Großbritannien

Eines der bekanntesten Bauwerke schließlich, das ohne Fluorthermoplast-Folien kaum realisierbar gewesen wäre, ist das Eden-Project in Cornwall im Südwesten Englands – eine Reihe sogenannter Biome, kugelförmige Strukturen aus transparenten ETFE-Folien, die sich mittlerweile zu einer echten Touristenattraktion entwickelt haben (**Abb. 8**). Die Biome bestehen aus hunderten hexa- und pentagonalen Kissen aus ETFE-Folien, die von einer leichten Stahlkonstruktion getragen werden. Das Design ist angelehnt an die geodätischen Kuppeln des US-amerikanischen Visionärs und Architekten Richard Buckminster Fuller. Neben dem geringen Gewicht der Konstruktion spricht hier ein weiterer Effekt für die Fluorpolymer-Lösung: ETFE-Kissen zeichnen sich auch durch gute thermische Isolationseigenschaften aus. Die U-Werte von mehrlagigen ETFE-Kissenkonstruktionen liegen im Bereich von $1,2 - 2\text{ W/m}^2\text{K}$. Dadurch herrscht unter den Kuppeln ein ideales Gewächshausklima.

5 Solares Wärme-Management

Der Wärmehaufbau unter sonnenbeschienenen Dachflächen aus Fluorthermoplast-Filmen kann für Architekten zur Herausforderung werden. ETFE-Folien sind weitgehend durchlässig für sichtbares Licht und Wellenlängen des Nah-Infrarot-Bereichs (NIR) (Abb. 9). Das führt dazu, dass Menschen unter dem transparenten Dach der Wärmestrahlung der Sonne voll ausgesetzt sind.

Um dies zu verhindern, kann man versuchen, den direkten Einfall von Sonnenlicht zu vermeiden oder zu reduzieren – etwa durch Aufdrucken von Mustern, durch Einfärben der Folie (meist in weiß) oder Anbringen mechanischer Verschattungen wie zum Beispiel Lamellen, wobei dadurch die Transparenz der ETFE-Folien natürlich abgeschwächt wird.

Eine weitaus innovativere Lösung besteht darin, die physikalischen Eigenschaften der Folie zu verändern. Und zwar dahingehend, dass lediglich sichtbares Licht durchgelassen wird, die energiereichen, infraroten Bestandteile des Sonnenspektrums, hingegen nicht.

Dies ließe sich z. B. durch Einbringen geeigneter (optisch transparenter) Pigmente realisieren, die Licht im NIR-Bereich reflektieren. Einen besseren, da flexibleren, Weg weisen sogenannte Multilayer Optical Films (MOFs), die bereits Ende der 1960er-Jahre beschrieben wurden und etwa seit dem Jahr 1990 eine rasante Entwicklung erleben: Derartige Filme nutzen den Effekt, dass Licht an Phasengrenzen optisch unterschiedlich dichter Materialien reflektiert wird. Durch intelligente Variation von Schichtdicken und Brechungsindices kann man Einfluss nehmen auf die Wellenlänge des reflektierten Lichts. Über spezielle Schichtaufbauten lassen sich daher MOFs erzeugen, die Licht eines ausgesprochen eng begrenzten Wellenlängen-Bereichs „blockieren“ können.

Polymere Werkstoffe bieten sich für die MOF-Herstellung geradezu an. Sie bieten hervorragende Möglichkeiten, die Reflexionseigenschaften dieser Folien gezielt zu steuern. Die Stellschrauben der Entwicklung sind hier Brechungsindices, Anzahl der Schichten, Schichtdicke und die Werkstoffe

selbst. Kommerziell erhältliche MOFs setzen sich aus bis zu vielen hundert einzelnen Polymerschichten zusammen. Das Resultat sind unter anderem Produkte mit ausgesprochen scharf definierten Reflexionsbanden. Ihre Herstellung lässt die Vorstellung klassischer Coextrusionsverfahren weit hinter sich.

So lassen sich zum Beispiel MOFs produzieren, die den Spektralbereich des Sonnenlichts zwischen etwa 870 und 1100 nm reflektieren (Abb. 10). Ein zweites Produkt blockiert sogar einen noch breiteren Wellenlängenbereich zwischen etwa 700 und 1300 nm und damit einen Spektralaus-

Abb. 9: Die Transmission von ETFE-Filmen im Vergleich zum Spektrum des Sonnenlichts

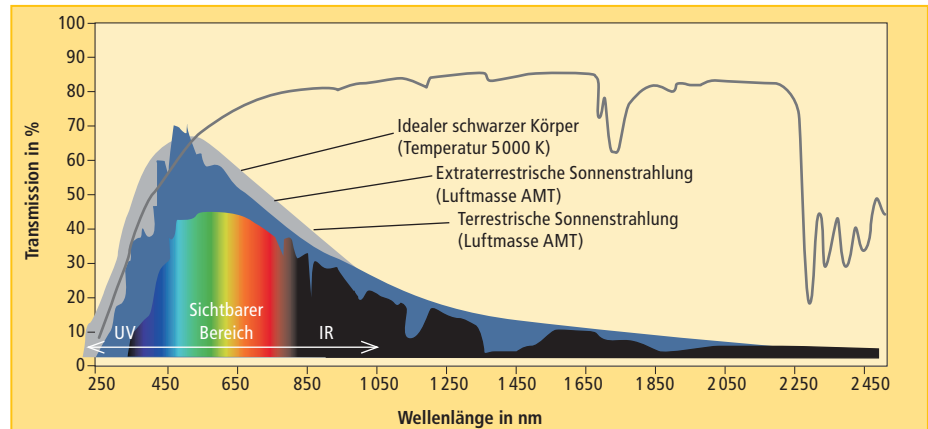


Abb. 10: Mit Hilfe von Brechungseffekten können mehrlagige optische Filme (MOFs) bestimmte Bereiche des elektromagnetischen Spektrums sehr scharfkantig ausfiltern.

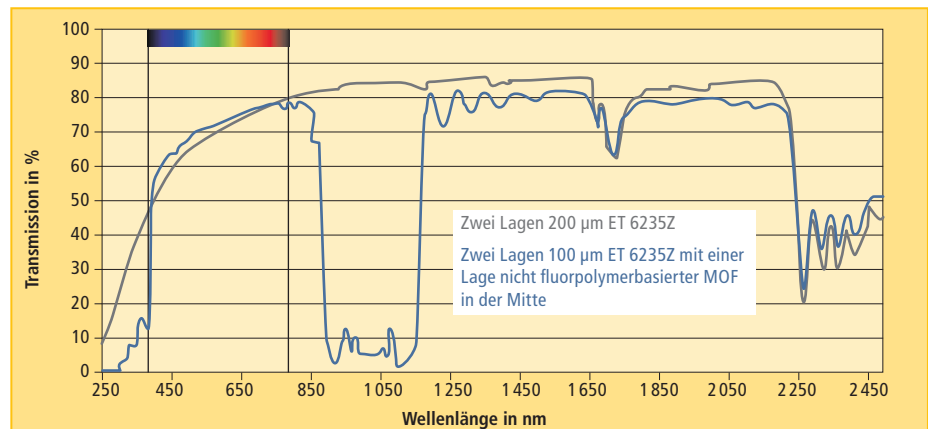
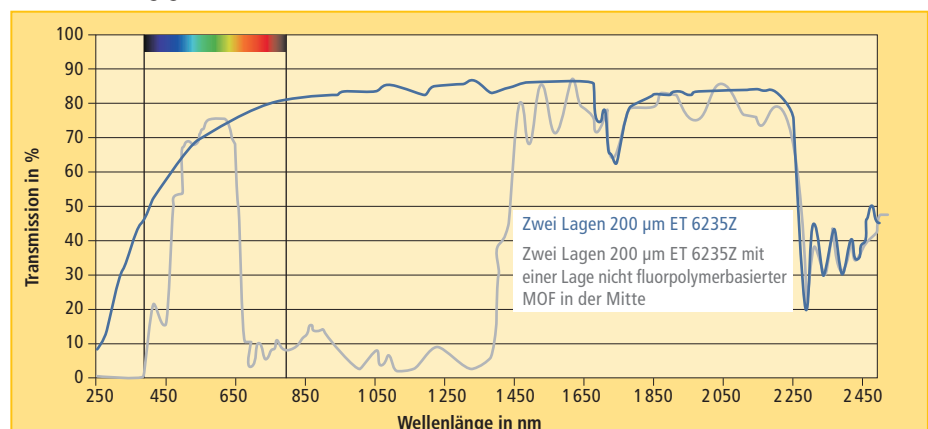


Abb. 11: Mehrlagige optische Filme können Infrarotstrahlung reflektieren, ohne dass die Durchlässigkeit für sichtbares Licht leidet. Dadurch unterbleibt ein übermäßiger Hitzehaufbau unter der Folie; dank zweier ETFE-Deckschichten ist auch die für Fluorthermoplaste typische Witterungs- und UV-Beständigkeit weiter gegeben.



schnitt, in dem die Sonne einen erheblichen Teil ihrer auf der Erdoberfläche wahrnehmbaren Infrarotstrahlung abgibt (Abb. 11). Diese Folien lassen sich dann z. B. in ETFE-Kissenkonstruktionen einbauen.

Neue MOF-Folienentwicklungen, kombinieren die Vorteile von Fluorthermoplasten mit denen der Multilayer-Technologie: Sie verhindern nicht nur Hitzeaufbau durch die Reflexion spezifischer Strahlungsanteile des Sonnenlichts, bei nahezu vollständiger Beibehaltung der Transparenz im sichtbaren Spektralbereich, sondern sie sind in der Kombination zugleich ähnlich robust wie klassische ETFE-Folien. Ihre Witterungseigenschaften sind vergleichbar mit denen gewöhnlicher Fluorthermoplast-Filme.

Da die Produkte zudem ausschließlich aus Polymerwerkstoffen aufgebaut

sind und keine Metalle enthalten, entfallen auch Probleme mit Funkwellen, die an metallbeschichteten Wärmeschutzverglasungen reflektiert werden – diese Multilayer-Folien stellen daher auch für Mobilfunksignale kein Hindernis dar. Selbstverständlich können die für Infrarot undurchlässigen MOFs auch mit anderen Fluorthermoplasten kombiniert werden, um das Anwendungsspektrum noch einmal zu erweitern.

6 Literatur

- [1] Zehentmaier, S., Fluoropolymers in Film Applications, 27th Annual World Symposium on Performance Films, Düsseldorf, April 2012
- [2] Lee, S., Lee, T. R., Park, J.-S., The Wettability of Fluoropolymer Surfaces: Influence of Surface Dipoles, Langmuir 24 (2008), 4817

- [3] Ruesch, F., Brunold, S., Langzeitalterungsuntersuchung an Abdeckungsmaterialien für Thermische Sonnenkollektoren, Bundesamt für Energie (BFE) der Schweizerischen Eidgenossenschaft, 2008
- [4] Ebnasajjad, S., Fluoroplastics, Vol. 2, Melt Processible Fluoropolymers, William Andrew Publishing, Norwich, NY, 2002, 376
- [5] Nentwig, J., Kunststoff-Folien, Herstellung – Eigenschaften – Anwendung, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006, 59
- [6] Neupauer, A., Technisches Merkblatt 02, Einführung in die Verarbeitung von PTFE-Kunststoffen, pro-K Fluoropolymergroup, 2010
- [7] Ebnasajjad, S., Fluoroplastics, Vol. 1, Non-Melt Processible Fluoroplastics, William Andrew Publishing; 1st Ed., Norwich, NY, 2001, 195
- [8] Drobny, J. G., Fluoroplastics, Rapra Technology Limited, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK, 2006, 16/4, 31

Altreifenaufkommen in Deutschland rückläufig

„2014 sind weniger neue und runderneuerte Reifen auf die Fahrzeuge montiert worden. Deshalb ist auch die Menge der Altreifen geringer ausgefallen, als noch im Jahr zuvor“, so **Helmut Hirsch**, Geschäftsführer der **Gesellschaft für Altgummi-Verwertungs-Systeme mbH (GAVS)**. Die beim **Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e. V. (wdk)** angesiedelte GAVS ermittelt jährlich das Altreifenaufkommen in Deutschland. Mit rd. 570 000 t lag die Gesamtmenge 2014 um 2 % unter dem niedrigen Vorjahresvolumen (s. Abbildung).

„Seit nunmehr vier Jahren in Folge ist die Anzahl der ersetzten Reifen rückläufig und

zudem sind die Importe gebrauchter Reifen im letzten Jahr knapp unter der Einfuhrmenge von 2013 geblieben“, erläuterte Hirsch den Mengenrückgang. „Bei der Weiterverwendung und der Verwertung demontierter Reifen setzt sich in Deutschland der Trend zur stofflichen Nutzung der Ressource Altreifen fort“, so Hirsch. „In den letzten Jahren ist eine merkliche Erweiterung von Anlagenkapazitäten zur stofflichen Verwertung zu registrieren und es gibt, wenn auch in übersichtlicher Größenordnung, Ansätze, marktfähige Pyrolysematerialien zu produzieren“, charakterisierte Hirsch die Entwicklung. Ergänzend wies er darauf hin: „Diese Entwicklung ist marktgetrieben, d. h. die hier engagierten Unternehmen sehen wachsende

Marktpotenziale für Altgummi-Rezyklate.“ Die Außenhandelsstatistik unterstreiche den hohen Stellenwert des Verwertungsstandortes Deutschland, so die GAVS. Wie schon im Jahr zuvor seien mehr Altreifen im Inland verblieben. Die Ausfuhr gebrauchter Fahrzeugreifen sei 2014 um rd. 15 % zurückgegangen. Die Importe hätten sich dagegen knapp auf Vorjahresniveau behauptet.

Abschließend verwies Hirsch auf die europäischen Normungsaktivitäten beim **Comité Européen de Normalisation (CEN)**: „Die Schaffung eines Standards für Altgummi-granulate verbessert für Hersteller und Abnehmer die Klarheit und Transparenz bei der qualitativen Beschreibung der Rezyklate. Das unterstreicht, Altgummigranulate sind ein qualitätsbestimmtes Material.“

