Bäderbau

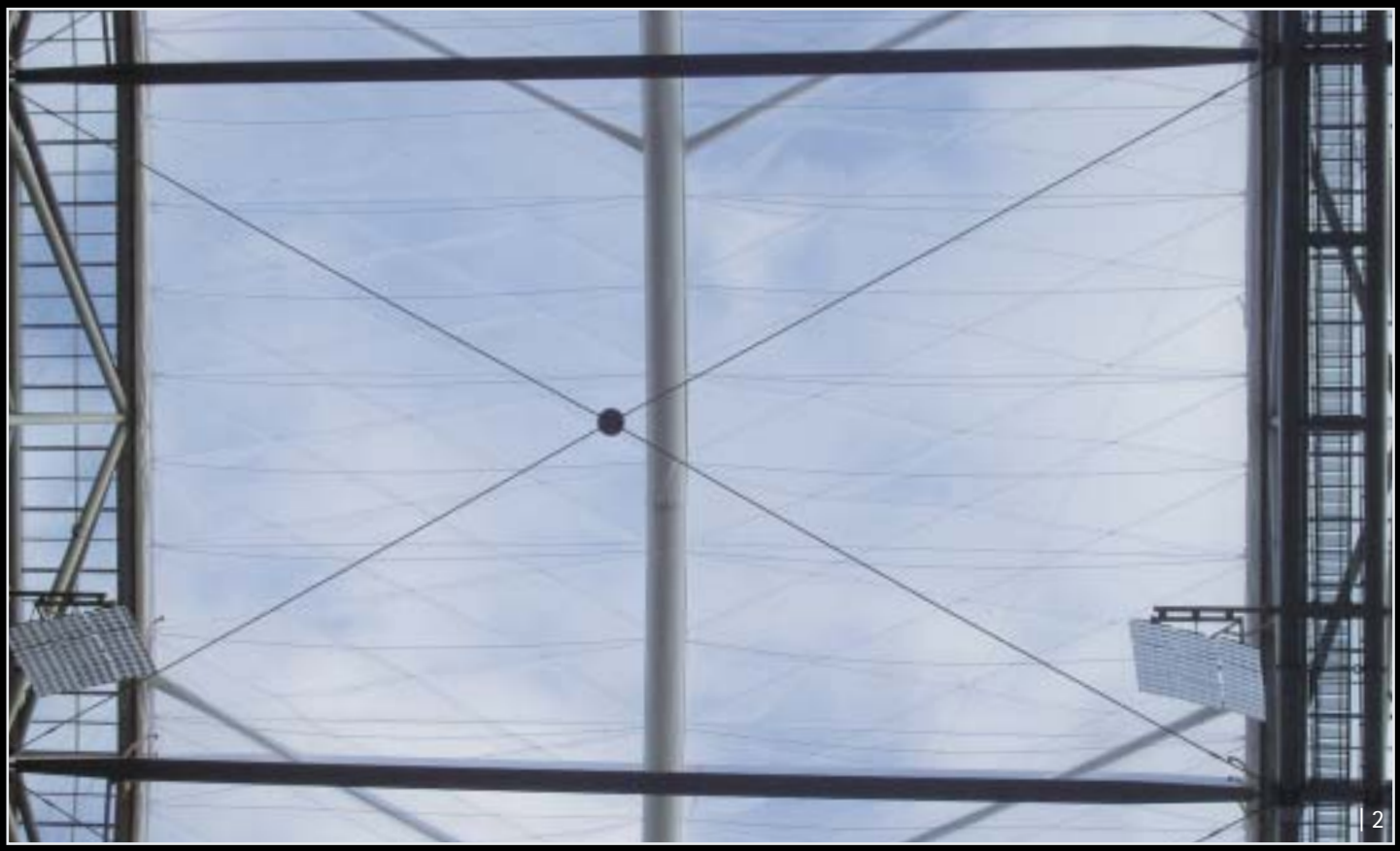
| 1

Neues Bauen mit ETFE-Folien

Entwerfen und Konstruieren mit dem Hightech-Werkstoff (Teil 1)

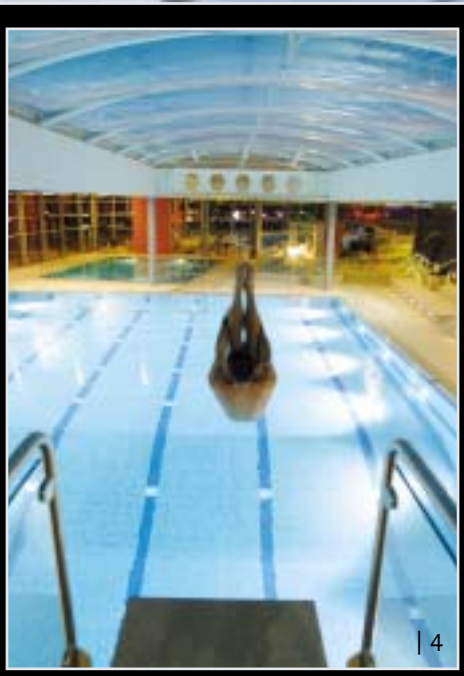
Dipl.-Ing. Architekt Gerd Schmid, Mitgründer und Geschäftsführender Gesellschafter der formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh, Radolfzell

PTFE-Glasgewebe (PTFE: **P**oly**t**etra**f**luor**e**thylen) sind seit 40 Jahren etabliert, und kaum ein modernes Stadiondach in Europa verzichtet auf dessen Vorteile. Neu ist flexibleres, silikonbeschichtetes Glasgewebe. Ist wenig Budget vorhanden, dann wird auf PVC-beschichtetes Polyestergewebe zurückgegriffen. Für faltbare Hüllen wird besonders knickbeständiges PTFE-Gewebe verwendet. Alle Membranen lassen mehr oder weniger Licht durch und erzeugen eine angenehme Taghelle. Höher transluzente Membranen sind sogar rückprojektionsfähig. Durchsichtig ist allerdings nur ETFE-Folie und damit in der Geschichte der Membranen und Folien der erste tatsächliche Wettbewerber zu Glas.



| 2

| 3



| 4

| 5

1 | Allianz Arena, München
2 | Blick durch das Dach von Tropical Islands
3 | Tropical Islands, Brand bei Berlin
4 | „rheinwelle“, Bingen-Ingelheim
5 | Friesentherme, Emden

Fotos:
1: Stefan Fessel/formTL, Radolfzell
2, 3: Ceno Tec, Greven
4, 5: Dr. Krieger Architekten + Ingenieure, Velbert

Die vermutlich größte Badehalle der Welt erhält natürliches Licht durch das ETFE-Foliendach: Tropical Islands in Brand bei Berlin von außen (oben) und von innen; Fotos: Ceno Tec, Greven

Eden Garden in St. Austell, Cornwall (Großbritannien), Tropical Islands in Brand bei Berlin und die Allianz Arena in München sind erfolgreiche Bauvorhaben, die einzigartige Hüllen aus ETFE-Kissen haben, welche die Vermarktung unterstützen. Ihre weich geformten Kissenhüllen sind geometrisch anspruchsvoll und mit (Farb-)Licht in Szene gesetzt.

Die mediale Präsenz von Bauten mit ETFE-Hüllen verzerrt allerdings unsere Wahrnehmung, denn bis heute dürfte es kaum mehr als 300 Bauten meist namhafter Bauherrn und Architekten geben, deren Hüllen aus ETFE bestehen. Zugleich gibt es Millionen andere Gebäudehüllen, die weniger auffallen, weniger die Selbstvermarktung des Gebäudes fördern, die schneller verschmutzen und in den seltensten Fällen tatsächlich recycelt werden können.

ETFE hat die Schwelle vom Experimentalwerkstoff zum innovativen Werkstoff überschritten: Den Hochleistungskunststoff ETFE gibt es seit 1970, die Mangrovenhalle im Burgers Zoo in Arnheim wurde 1982 mit ETFE-Kissen eingedeckt, und die Folie zeigte sich bei einem Besuch 2008 noch immer von ihrer sauberen Seite. Ursprünglich von der Nukleartechnik zum Schutz von Elektrokabeln entwickelt, hat sich ETFE dort wegen seiner besonderen Strahlungsunempfindlichkeit bewährt. Wegen seiner Chemikalienbeständigkeit wird es als Gefäßauskleidung in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Wegen seiner Strahlungsdurchlässigkeit und Robustheit hat es sich als Gewächshausfolie bewährt.

ETFE

Der Werkstoff ETFE

ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen) ist ein teilkristallines, durchsichtiges und thermoplastisches Fluorcopolymer. Der Schmelzpunkt von ETFE liegt bei 270 °C. Damit zeigt sich auch die Nähe zu PTFE (Bratpfannenauskleidung), das bei 327 °C schmilzt. Die Dauergebrauchstemperatur von ETFE liegt bei etwa +/-150 °C. ETFE wurde erst 1970 vom Chemieunternehmen DuPont, Wilmington/USA, entwickelt, und steht in einer Reihe mit den thermoplastischen Hochleistungskunststoffen, die früher entdeckt wurden, etwa 1938 PTFE und 1960 FEP

(Perfluorethylenpropylen-Copolymer), die ähnliche Eigenschaften aufweisen: Sie sind strahlungsfest, witterungsfest, kaum benetzbar, elektrisch isolierend, chemisch beständig, haben einen niedrigen Reibungskoeffizienten, und sie sind transparent oder zumindest transluzent. Darüber hinaus ist ETFE schmelz- und schweißbar, was für die weitere Verarbeitung wichtig ist.

Folienherstellung, Foliendicke

Die beiden Industriegase Ethylen und Tetrafluorethylen werden polymerisiert, granuliert und mit Farbstoffen sowie herstellerspezifischen Modifizierungszusätzen gemischt und dann zur Folie extrudiert. Für Gewächshäuser wird die Folie mit einer Ringspaltdüse zu einem Folienschlauch aufgeblasen und dann zu 3 m breiten Bahnen aufgeschnitten. Für Folienkissen mit besserer Durchsicht wird das flüssige ETFE mit einem Breitschlitzextruder zu einer 1,5 - 1,6 m breiten Flachfolie gegossen.

Die so hergestellten Folien sind in Dicken von 12 bis 300 µm (= 0,012 - 0,3 mm) als Rollenware erhältlich.

Im Bauwesen sind folgende Folienstärken gebräuchlich: 100 µm für nichttragende (Mittel-)Folien und 200 - 250 µm für tragende Folien. 300 µm ist derzeit ungebräuchlich, da die Durchsicht deutlich geringer als bei 250 µm-Folie ist.

Strukturformel von ETFE aus C_2H_4 (= Ethylen) und C_2F_4 (=Tetrafluorethylen)

Das ETFE-Granulat der von uns verwendeten ETFE-Folien stammt entweder von Dyneon oder von Asahi Glass. Die ETFE-Folie Nowoflon ET 6235 von Nowofol, aus der die Kissenhülle von Tropical Islands gefertigt wurde, referenziert sich auf das verwendete Granulat Dyneon 6235. Von Asahi Glass stammt die Folie Fluon ET NJ, aus der die Kissenhülle der Allianz Arena gefertigt wurde.

Aufbau	Hersteller, Produkt	Materialdicke in mm	Transluzenz bei 550 nm
ETFE-Folie klar	*Nowofol, Nowoflon ET 6235*	*0,2*	*90 %*
ETFE-Folie weiß	*Nowofol, Nowoflon ET 6235*	*0,2*	*50 %*
Glasgittergewebe mit PTFE-Schälfolie Typ II	Verseidag, B18901	1,2	43 %
Glasgewebe mit Silikonbeschichtung Typ I	Interglas, Atex 3000	0,45	41 %
PTFE-Gewebe Typ II	Gore, Tenara 4T40	0,43	38 %
PTFE-Gewebe Typ II	Gore, Tenara 4T20	0,43	19 %
PTFE-Glasgewebe Typ II	Verseidag, B18039	0,5	15 %
Glasgewebe mit Silikonbeschichtung Typ V	Interglas, Atex 8000	1,25	14 %
PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ III	Verseidag, Farbe 285	0,9	13 %
PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ I	Verseidag, Farbe 286	0,6	6 %
PTFE-beschichtetes Glasgewebe Typ V	Verseidag, B18059	1,0	8 %
PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ V	Ferrari, 1502	1,4	2 %

Gegenüberstellung von Materialdicke und Lichtdurchlässigkeit gebräuchlicher Membranen und Folien

Die Eigenschaften der ETFE-Folien variieren bedingt durch die Herstellparameter des Granulats, der Zusätze, der Parameter der Folienherstellung wie Schmelztemperatur und der Abkühlgeschwindigkeit. Bisher wurden keine tragrelevanten Unterschiede festgestellt.

Durchsicht und Strahlungseigenschaften

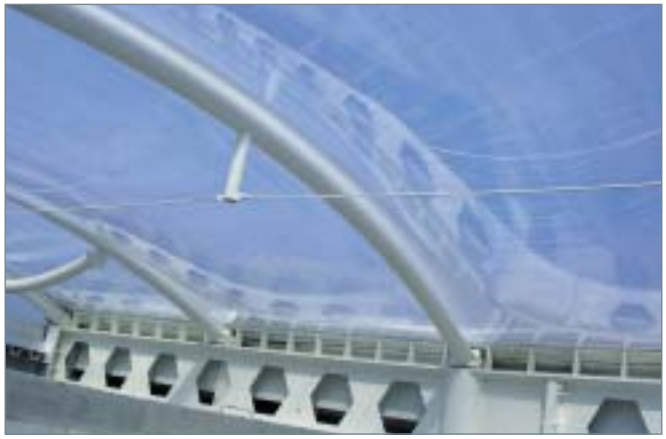
ETFE hat bis zu 30 % kristalline Zonen, die nicht klar durchsichtig sind, weshalb ETFE-Folien milchig transparent erscheinen und den Lichtstrahl stärker brechen als z. B. Glas.

Klare ETFE-Folien lassen sichtbares Licht (380 - 780 nm), infrarotes Licht IR-A (780 - 3000 nm) sowie ultraviolettes Licht UV-A (380 - 315 nm) und UV-B (315 - 280 nm) passieren. Glas dagegen absorbiert die UV-Anteile.

Klare ETFE-Folie wird eingesetzt, wo der Durchtritt der hautbräunenden UV-B-Strahlung und deren keimreduzierende Wirkung erwünscht ist, etwa in Bädern und Tierhäusern. Im Bereich von Stadien und Gewächshäusern fördert die hochenergetische UV-A- und UV-B-Strahlung das Rasen- und Pflanzenwachstum. Neueste Forschungen zeigen,

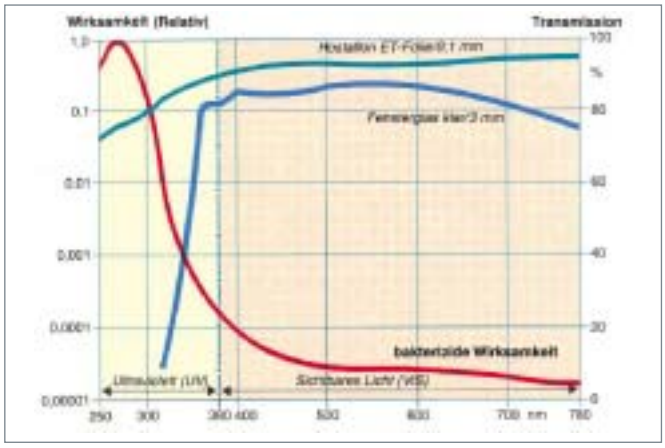
ETFE klar, ETFE klar mit Punkten bedruckt, ETFE weiß, ETFE-Granulat (von links)

■ *ETFE-Folien prägen das Dach der „rheinwelle“ in Bingen-Ingelheim: von außen ...* *Foto: formTL, Radolfzell*



■ *... von innen ...* *Foto: formTL, Radolfzell*

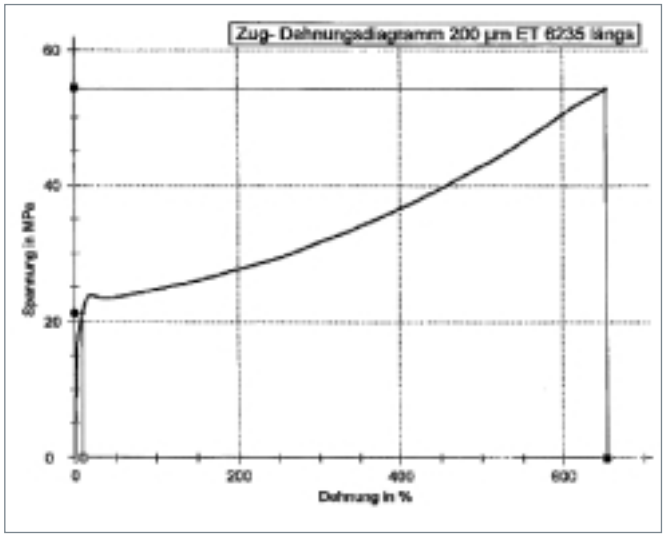
■ *... und die gesamte Badehalle*
Foto: Dr. Krieger Architekten+Ingenieure, Velbert



■ *Spektrale Durchlässigkeit von ETFE-Folie im Vergleich zu Fensterglas*
Quelle: Hoechst Hostaflon Information 25, Frankfurt am Main

dass sich lebenswichtiges Vitamin D nur dann bildet, wenn unsere Haut UV-B-Strahlung ausgesetzt ist. Da wir in unseren Breiten im Winter stets Vitamin D-Mangel haben, würde dies bedeuten, dass winterliches Sonnenbaden im Tropical Islands besonders gesund ist.

Weiße ETFE-Folie wird eingesetzt, wenn rückprojiziert werden soll, mit (Farb-)Lichteffekten gearbeitet wird oder UV-Strahlung stört.



■ *Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei 23 °C bis zum Bruch*
Quelle: Nowofol, Siegsdorf

Anzeige

Vertrauen Sie dem Fachmann!
PP-Bäderroste in funktionellem Design
... mit weniger sollten Sie sich nicht zufrieden geben
Hardenbergplatz 2 · 10623 Berlin
TÜV
ZELLER bäderroste
Tel.: 030-26551306
Fax: 030-26551308

Statik

ETFE-Folien verformen sich sehr stark unter Last, denn sie haben keine lastabtragende Gewebeeinlage, wie etwa die Membranen.

ETFE-Folie verhält sich im Rahmen tolerierbarer Abweichungen isotrop (in alle Richtungen gleich) und innerhalb der Einsatzgrenzen in etwa linear. Das Materialverhalten kann so rechnerisch nachgebildet werden. Oberhalb der Proportionalitätsgrenze setzt eine starke, irreversible Plastifizierung bis zur 3-fachen Spannungszunahme und mehrfacher Dehnung ein. Die Folie hat also ein gutmütiges Versagensverhalten und hohe Tragreserven oberhalb der Gebrauchslasten.

Da ETFE ein Thermoplast ist, neigt die Folie bei ständiger Belastung und insbesondere bei höheren Temperaturen zum Fließen. Auf Grund der früh einsetzenden plastischen Dehnung setzen wir ETFE-Folie temperaturabhängig nur bis zu der so genannten 10-%-Dehngrenze mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 ein. Innerhalb derer dehnt sich die Folie weitestgehend elastisch; ihr Dehnverhalten ist also vorhersagbar.

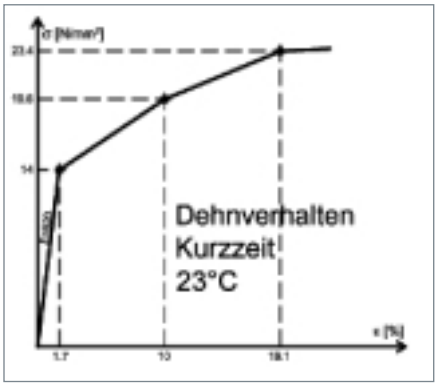
ETFE-Folien werden wie Membranen mit Hilfe von FE-Programmen (FE: Finite Elemente), deren Rechenkerne z. B. auf der Kraftdichte-Methode oder der dynamischen Relaxation basieren, berechnet. Es ist so näherungsweise möglich, das Verhalten der Folien unter Last zu bestimmen. Somit können die Lagerkräfte auf die Unterkonstruktion ermittelt und Vorgaben für Biaxial-Materialversuche bestimmt werden. Anhand deren Ergebnisse werden später die Kompensationsfaktoren für die Zuschnitte ermittelt. Mit diesem Trick erreicht man, dass die elastische Folie bei einer vorbestimmten Vorspannkraft ihre Sollgeometrie erreicht.

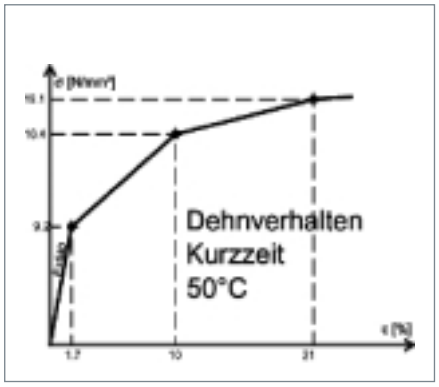
Konfektionierung

In den von übrigen Konfektionsbereichen getrennten und staubgeschützten Produktionsstätten der ETFE-Konfektionäre werden die Folien meist per Schneideplotter nach CAD-Zuschnittsplänen zugeschnitten und mittels Wärmeimpuls linear verschweißt.

Es dauert seine Zeit, bis für die jeweiligen Folien und Folienstärken die Einstellungen für eine optimale und reproduzierbare Verarbeitungsmethode gefunden sind. Dabei geht es u. a. um Einstellungen fürs Heizen und Kühlen, um Spaltmaße und den Anpressdruck der Elektroden. Die Modifizierungen an den Industrie-Schweißmaschinen und deren Schweißparameter sind internes Firmenwissen.

Für lange, gerade Nähte hat sich der elektrisch beheizte Heizbalken bewährt, für enge Radien kontinuierliche Heizrollen und teilkontinuierliche Kettenbalken.





■ *Kurzzeit-Dehnverhalten bei 23 °C und 50 °C*
Quelle: formTL, Radolfzell

Transparente Architektur mit ETFE-Folien

Allwetterbad „Friesentherme" Emden
Integriert in das verfahrbare Dach, sorgt ein 184 m² großes ETFE-Folienkissen für eine hohe Lichtdurchflutung – auch bei geschlossenem Dach.

Regionalbad „Rheinwelle" Bingen
Eine 1.728 m² große ETFE-Überdachung prägt die Badelandschaft durch hohe Transparenz und Leichtigkeit.

Freizeitbad „Tropical Islands", Brandenburg
Eine 20.000 m² große Dach-/Fassadenkonstruktion aus ETFE-Folienkissen lässt Sonne und UV-Licht ins Tropen- und Badeparadies.

Transparente Konstruktionen aus ETFE-Folien nehmen in der Freizeit- und Bäderarchitektur einen immer größeren Stellenwert ein. Die Vorteile:

- hohe Lichtdurchlässigkeit bis über 90 %
- hohe UV-Durchlässigkeit der nicht gesundheitsschädlichen UV-A und -B Anteile für ein optimales Pflanzenwachstum und eine natürliche Bräunung der Gäste
- geringes Gewicht der Folienkissen für leichte und filigrane Tragwerkskonstruktionen
- gute U-Werte, je nach Aufbau bis 1,30 W/m²K
- selbstreinigende Eigenschaften aufgrund der antiadhäsiven Oberfläche.

Wir haben die Erfahrung und das Know-how. Rufen Sie uns an, wir informieren Sie gern.

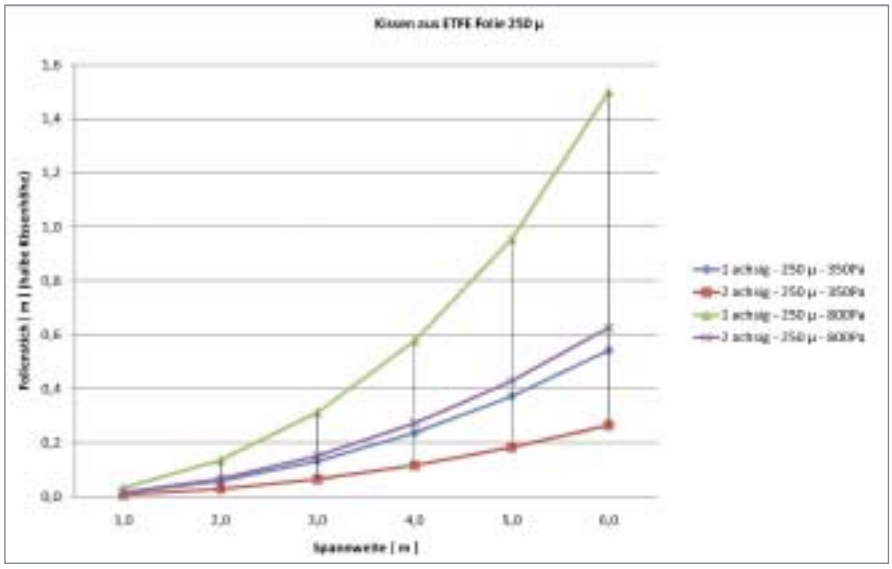
CENO TEC
creating membrane solutions

CENO TEC GmbH
Am Eggenkamp 14 · D-48268 Greven
Telefon 02571 969-0 · Fax 02571 3300
E-Mail info@ceno-tec.de

www.ceno-tec.de

Die 6 - 10 mm breiten Schweißnähte sind in der Regel wegen des Steifigkeitssprungs an der Nahtkante nicht so tragfähig wie die Folie selbst.

Wegen der in der Durchsicht unerwünschten weißen Striche, die bei starkem Knicken entstehen, hat sich bisher die Herstellung auf eher kleine Kissen von 4 bis 20 m² konzentriert, vereinzelt wurden aber schon bis zu 600 m² große Folien und Folienkissen produziert (Tropical Islands, Cycle Bowl in Hannover, Rheintorhallen in Köln).



Überschlägige Angabe von Spannweite und Stich der Einzelfolie bei luftgestützten Kissen aus 250 µm-Folie bei 23° und in Abhängigkeit vom benötigten Stützluftdruck und der Kissenform (quadratische, sechseckige oder runde Kissen spannen zweiachsig, längliche Kissen mit einem Verhältnis l/b > 3/1 spannen einachsig)
Quelle: Bernd Stimpfle/formTL, Radolfzell

Montage

Wie bei allen Membran- und Folienkonstruktionen ist die Montage der letzte und meist heikelste Schritt, da sich weder Wind noch Temperatur auf Wunsch einstellen. Wenig Wind ist Voraussetzung, da die leichte Folie sonst wie ein Segel aufgebläht wird. Diesen Moment fürchten die Monteure, denn die Gefahr ist groß, dass die Folie unkontrolliert an der Unterkonstruktion scheuert oder sich verhakt und aufreißt. Warme Temperaturen begünstigen die Montage der thermoplastischen Folien. Da die Folien und Folienkissen etwas kleiner hergestellt werden, muss die Folie händisch oder mit Montagehilfsmittel gedehnt werden, bis sie verankert werden kann. Deshalb sind Kissen mit ebener und kompensierter Mittelfolie am aufwändigsten zu montieren.

Sobald das Folienkissen umlaufend in den Randprofilen verankert ist, genügt ein geringer Stützluftdruck für eine stabile Geometrie. Deshalb muss bereits zu Montagebeginn die Stützluftversorgung installiert sein. Temporäre Stützluftversorger sind wenig geeignet, da in die Kissen nur saubere und trockene Luft mit definierten Druckgrenzen eingeblasen werden darf.

Pneumatisch gespannt

Die ideale Anwendung von ETFE-Folie ist als luftgestütztes Kissen mit einem geringen inneren Überdruck gegen die Umgebungsluft. Üblich sind 300 - 1000 Pascal (= 30 - 100 kg/m² = 3 - 10 cm Wasserhöhe). Zum Vergleich: Die uns umgebende Luft hat einen Druck von etwa 100 000 Pascal.

Der innere Überdruck hat drei Aufgaben: Er spannt die elastische Folie faltenfrei auf, damit die Folie gleichmäßig trägt. Er krümmt die Folie gleichmäßig ein- oder zweiachsig, damit sie Lasten abtragen kann. Er baut eine Vorspannung in der Folie auf, die von den äußeren Lasten zu großen Teilen aufgezehrt werden darf, ohne dass das formweiche Kissen flattert oder kollabiert.

Die 2001 fertiggestellten Kuppeln der Gewächshäuser von Eden Garden mit der deutlich erkennbaren sechseckigen Kissenkonstruktion; Fotos: Gerd Schmid, Radolfzell

Pneumatische Formen

Übliche Randformen sind Geometrien mit drei oder mehr Kanten, die gerade oder gebogen sein können: etwa die Sechsecke von Eden Garden, die Rauten der Allianz Arena, die Rechtecke und Rauten des Dresdener Schlosses. Die Kissenlänge kann fast beliebig sein, sofern die Kissenbreite in Haupttragrichtung zwischen 2 und 4 m bleibt, was wesentlich von den abzutragenden Schnee- und Windlasten abhängt. Bei zweiachsiger Lagerung sind noch größere Spannweiten möglich, ebenso wenn mit Seilen, Seilscharen oder Seilnetzen die Folie entlastet wird. Unsere größten Kissen aus ETFE sind bis zu 30 x 30 m groß, etwa beim Tropical Islands oder bei den vom Fernsehsender RTL genutzten Rheintorhallen in Köln.

Mechanisch gespannt

Da ETFE bei Lastsingularitäten, unter Dauerlast und insbesondere bei höherer Temperatur zur plastischen Verformung neigt, werden bei mechanisch gespannten Folien größere Nachspannwege benötigt. Unser bisher einzig realisiertes ETFE-Projekt mit nur einer mechanisch gespannten Folie, die Bundestagsarena, war für Sommernutzung und wenige Wochen Standzeit konzipiert. Hier waren diese Effekte weniger wichtig als beim großen Windschutz des Unilever-Gebäudes in Hamburg. Die Spannweiten mechanisch gespannter Folien liegen im Meterbereich, sodass der Mehraufwand für eine kleinteiligere Unterkonstruktion schnell die Einsparung für die entfallene zweite Folie und die Stützluft erreicht.

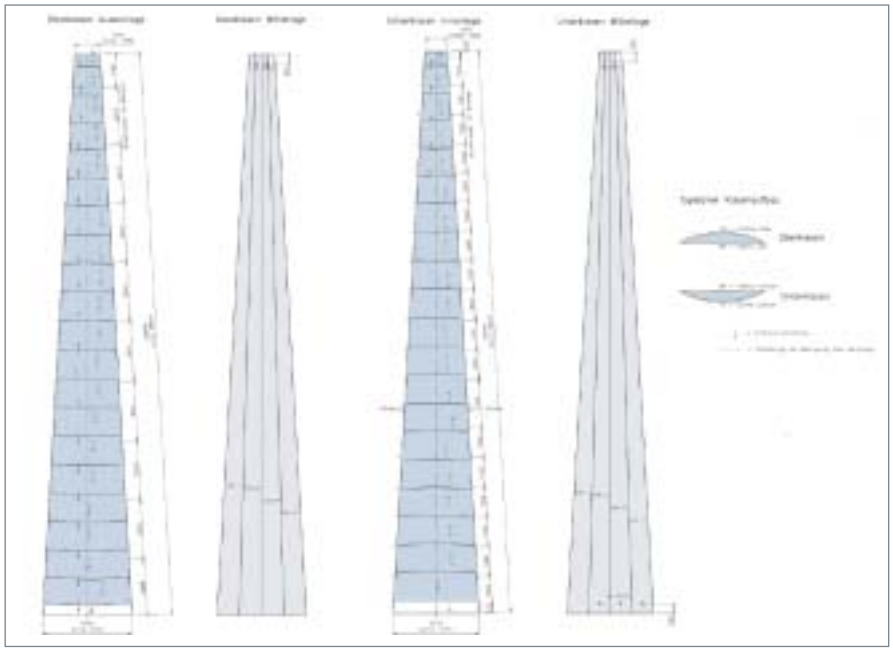
Zuschnitt

Im Gegensatz zu Membranen ist ETFE-Folie relativ schubsteif. ETFE darf deshalb bei der Verebnung nur geringe Winkeländerungen erfahren, da sich sonst Falten bilden. In der Regel sind deshalb die kleinen verfügbaren Breiten von nur 1,55 bis 1,6 m der Rollenware ein gutes Maß für eine wirtschaftliche Konfektionierung.

Das ETFE-Kissen erhält dazu einen verkleinerten Formzuschnitt, der sich unter Soll-Innendruck zu einer exakten und ausgerundeten Kissengeometrie aufspannt. Da sich die ETFE-Folie unter Zeit, Lastspitzen und Temperatur nicht nur elastisch, also rückstellend, verhält, sondern auch etwas plastifiziert, ist pneumatisches Vorspannen ideal für ETFE-Folien. Wegen der nur geringen möglichen Spannweiten bieten sich Kis-

Überdachung des kleinen Schlosshofs im Dresdener Residenzschloss: Das Rautentragwerk bietet Lichtblicke; Foto oben: formTL, Radolfzell, Foto unten: Ceno Tec, Greven

Anzeige



Zuschnitt der vier Folien vom Kissendach des Meilenwerk Forum für Fahrkultur in Düsseldorf; die Mittellagen sind hier eben zugeschnitten
Quelle: formTL, Radolfzell

Die Ausstellungs- und Verkaufshalle des Meilenwerks in Düsseldorf: Die innovative Dachkonstruktion optimiert funktional und ästhetisch die historische Bausubstanz; Foto oben: Ceno Tec, Greven, Foto unten: formTL, Radolfzell

sen besonders an. Durch die plastische Dehnung der Folie entstehen mehr Oberfläche und mehr Kissenvolumen. Die Folie wird minimal dünner. Das Kissen wird etwas bauchiger, die nachströmende Stützluft sorgt für den Solldruck, und das Kissen trägt sogar besser, da der Kissenradius zugleich kleiner wird.

Zustimmung im Einzelfall

Wie alle Folien und Membranen zählt ETFE zu den nicht geregelten Baustoffen und Bauarten, für die nach Bauordnungsrecht objektbezogen eine Zustimmung im Einzelfall (Z. i. E.) bei der oberen Bauaufsicht beantragt werden muss. Dies ist zwar etwas umständlich, provoziert aber durch die dabei geforderten Qualitätsnachweise für Material, Detail, Statik und Konfektion eine hohe Ausführungsqualität.

Strukturelle Sicherheit

Wir bevorzugen bogengestützte Kissen, die auch im luftleeren Zustand Regenwasser nach außen ableiten.

Gering geneigte oder gar ebene Dächer aus ETFE-Folie können bei Ausfall der Stützluftversorgung in Kombination mit Schnee oder Regen strukturelle Risiken bewirken. Es besteht dann die Gefahr, dass sich Schnee oder Wasser in einer nicht selbstentwässernden Vertiefung ansammelt und zum plastischen Verformen der Kissenfolien führt. Wird der Gebläseausfall nicht rechtzeitig bemerkt, können die anwachsenden Wassersäcke die Tragfähigkeit der Unterkonstruktion überschreiten.

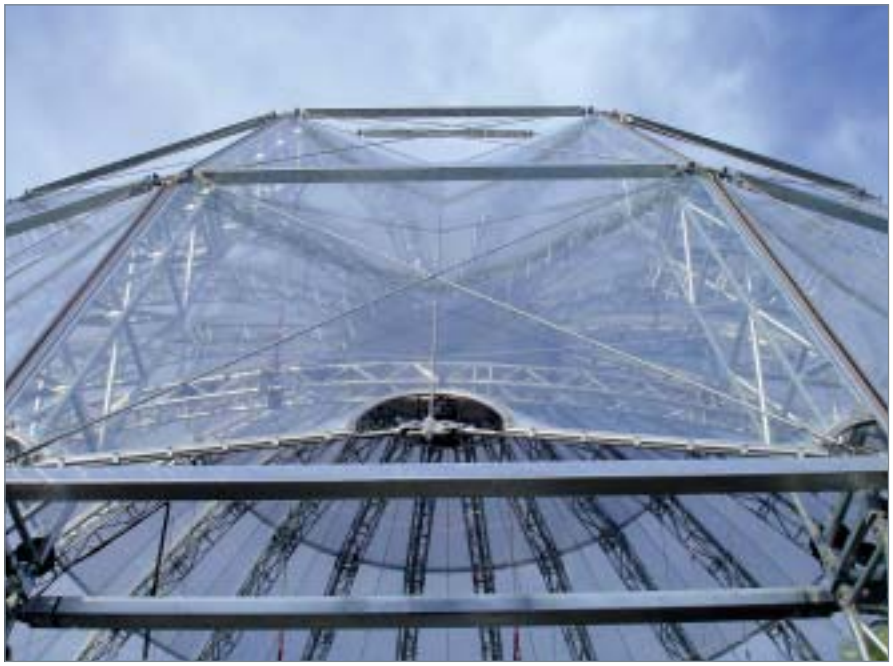
Verschmutzung und Selbstreinigung

Unsere Erfahrung zeigt, dass die Außenseite von ETFE-Folien auf Dauer nicht verschmutzt und sich die Durchsicht nicht verschlechtert. Selbst langjährig bewitterte Folien können kaum von neuen Folien unterschieden werden. Dies liegt an der antiadhäsiven Oberfläche mit sehr niedriger Oberflächenspannung, die ein Anhaften von Schmutz verhindert. Lose aufliegender Schmutz wird von den kugelig ausformenden

Material	Oberflächen-spannung in mN/m	Kontaktwinkel eines Wasser-tropfens als Maß der Nicht-Benetzbarkeit
PTFE	22	126° (hydrophob)
ETFE	*25*	↑ zunehmend*
PE	36	
PC	41	
Glas	70	0 - 30°

Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung des Trägermaterials und Form der Wassertropfen (0° = Wasserfilm, 90° = halbkugelförmiger Tropfen)

** Der Kontaktwinkel liegt bei Glas im Bereich 0 - 30° und wird immer größer, je weiter der Baustoff in einer der oberen Zeilen steht.*



Die Kuppel der Bundestagsarena vor der Montage des Foliendaches und danach. Für die temporäre Nutzung in den Sommermonaten erhielt sie nur eine einzige, mechanisch gespannte Folie; Foto oben: Nuessli GmbH, Ludwigsfelde, Foto unten: formTL, Radolfzell

Wassertropfen* aufgenommen, die über die üblicherweise stark gekrümmten ETFE-Flächen abfließen. Auf flach geneigten Gläsern mit hoher Oberflächenspannung haftet Schmutz wesentlich leichter und muss deshalb regelmäßig händisch entfernt werden.

Die gleichermaßen niedrige Haftreibung führt dazu, dass sich zwischen Schnee und Folie ein Gleitfilm einstellt, auf dem Schnee leicht abrutscht. Foliendächer sind deshalb nur selten von Schnee bedeckt zu sehen.

Bedrucken und Durchfärben der Folie

So wie sich die unpolare ETFE-Oberfläche günstig auf das Anschmutzverhalten auswirkt, so hinderlich ist sie für die Bedruckung. Für gewöhnlich haftet nichts auf ETFE, es sei denn, die Folienoberfläche wird polarisiert, etwa durch eine Hochspannungsbehandlung. Die Folie ist dann für wenige Tage benetzbar und kann metallisiert, verspiegelt oder mit beliebigen Motiven per Siebdruckfarben bedruckt werden.

Da Farbe die Schweißnahtqualität stört, wird diese händisch vor dem Verschweißen entfernt. Um die Farbe vor der Witterung zu schützen, wird stets die raumseitige bzw. die der Kissenkammer zugewandte Seite bedruckt. Das Bedrucken ist eine gängige Methode, um die visuellen Eigenschaften und die Strahlungseigenschaften der Folie bedarfsgerecht zu modifizieren. Bei 1000 m^2 verteilen sich die Kosten für die Druckwalze, Einrichtung und Vorlauffolie, sodass sich eine Bedruckung dann auf 10 €/m^2 einpendelt.

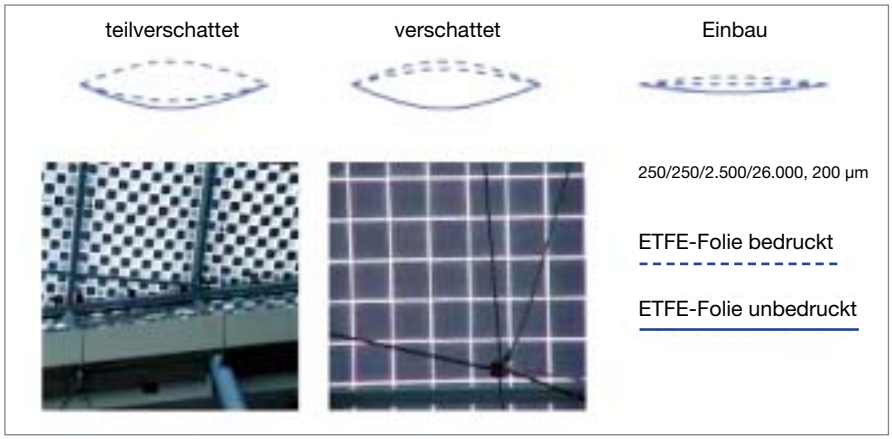
** Die Oberflächenspannung, z. B. von Wasser, liegt bei etwa 70 mN/m. Je größer der Unterschied zur Oberflächenspannung des Hüllmaterials ist, desto weniger wird Wasser die Oberfläche benetzen und sich stattdessen zu kugelförmigen Tropfen zusammenziehen.*

Durchgefärbtes ETFE: Werden vor dem Extrudieren ETFE-Farbpigmente beigemischt, können Folien mit Transparenzgrad und Farbe in etwa nach Vorgabe hergestellt werden. Uns sind keine abweichenden Eigenschaften durchgefärbter ETFE-Folie bekannt.

Integrierte Verschattung

ETFE-Kissen zeigen sich sehr anpassungsfähig, wie die integrierte pneumatische Verschattung der Atrienüberdachung des Technologiezentrums von Festo in Esslingen zeigt. Hier kann ohne außen liegende Verschattung sommerliches Überhitzen der Atrien vermieden und zugleich an sonnenarmen Tagen ein hoher Lichteintrag sichergestellt werden.

Bei eher kleiner Spannweite von 2,34 m und 15-26 m Länge werden die Doppelkammerkissen durch zwei Stützluftdrücke gesteuert. Die Mittellage und die obere Lage sind gegenläufig mit Quadraten von 10 x 10 cm bedruckt. Wird die untere Kissenkammer mit Luft befüllt und die obere Kissenkammer entlüftet, nähern sich die beiden bedruckten Folien und verdunkeln. Soll möglichst viel Tageslicht in die Halle gelangen, wird die mittlere Lage entsprechend pneumatisch nach unten ge-



■ *Kissendach des Technologiezentrums Festo*
Quelle: formTL, Radolfzell

■ *Material und Konstruktion – Ästhetik pur: die Rauten der Allianz Arena in München; Foto: Stefan Fessel/formTL, Radolfzell*

Anzeige

Koch Membranen

Allein in den letzten 6 - 8 Jahren wurden insbesondere in Deutschland und Österreich bei Hallenbädern und Freizeitanlagen Artex® Licht- und Akustikmembranen eingesetzt, um wirtschaftliche Lösungen zu erreichen, die für die richtige „Stimmung" sorgen.

Koch Membranen ist seit Jahren ein Spezialist für technische Textilien im Innenausbau, mit Stammsitz in Rimsting am Chiemsee und bietet wirtschaftliche, standardisierte und individuelle Lösungen für fast alle Bereiche der Innenarchitektur an.

Koch Membranen GmbH Kunststofftechnologie
Nordstrasse 1, DE-83253 Rimsting/Chiemsee · Tel.: +49(0)8051/6909-80 · Fax: +49(0)8051/6909-83 · E-Mail: info@kochmembranen.de

Fordern Sie bitte weitere Informationen an.

www.kochmembranen.com

drückt, sodass die bedruckten Folien auf Abstand sind. Nachteilig ist, dass einer vollständigen Verschattung an Sonnentagen ein halbierter Lichteintrag an trüben Tagen gegenübersteht.

Der Vorteil: Diese Verschattung funktioniert bei den drei je 800 m² großen Atrien in Esslingen seit dem Jahr 2000 störungs- und wartungsfrei – und es gibt keine staubigen Lamellen. Die Mehrkosten liegen bei größeren Objekten bei bemerkenswert niedrigen 35 €/m².

Teil 2 des Artikels erscheint in der nächsten Ausgabe. *Zi/jh*

Die integrierte pneumatische Verschattung kann sommerliches Überhitzen des darunter liegenden Raumes vermeiden und zugleich hohen Lichteintrag sicherstellen (hier im Atrium des Technologiezentrums von Festo, Esslingen); Fotos: Festo/Andreas Braun, Hameln

Projektdaten

Projektbeteiligte

IB Buchner
Ingenieurbüro für Bautechnik,
Thermodynamik, Bauphysik
Dipl.-Ing. Andreas Buchner
Dahlhauser Straße 13
44869 Bochum

formTL
ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh
Dipl.-Ing. Architekt Gerd Schmid
Kapellenweg 2 b
78315 Radolfzell

Anzeige

Neues Bauen mit ETFE-Folien

Entwerfen und Konstruieren mit dem Hightech-Werkstoff (Teil 2)

Dipl.-Ing. Architekt Gerd Schmid, Mitgründer und Geschäftsführender Gesellschafter der formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh, Radolfzell

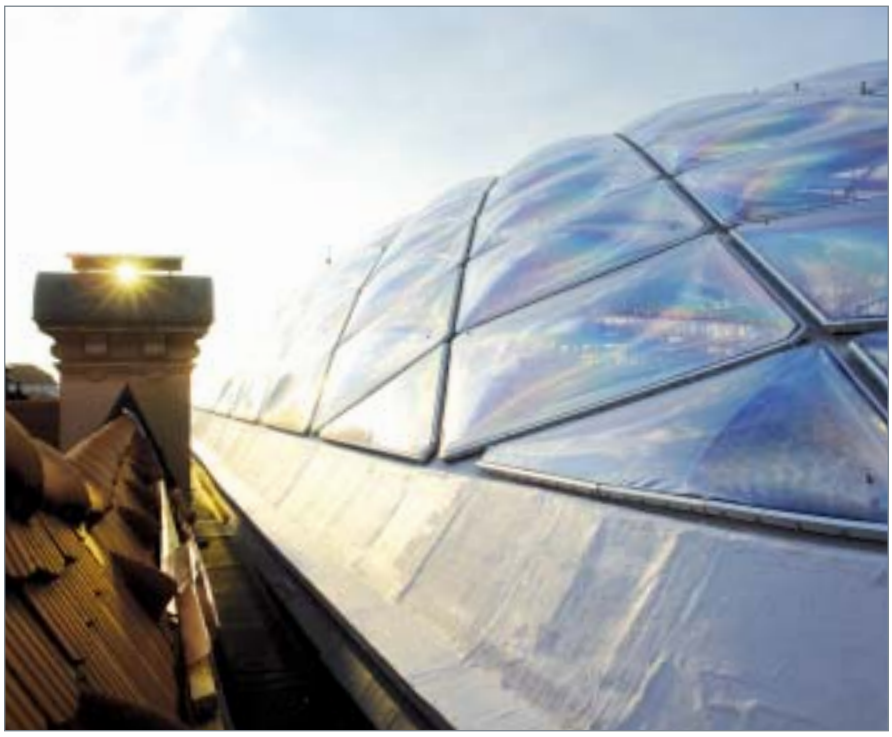
PTFE-Glasgewebe (PTFE: **P**olyt**e**tra-**f**luor**e**thylen) sind seit 40 Jahren etabliert, und kaum ein modernes Stadiondach in Europa verzichtet auf dessen Vorteile. Neu ist flexibleres, silikonbeschichtetes Glasgewebe. Ist wenig Budget vorhanden, dann wird auf PVC-beschichtetes Polyestergewebe zurückgegriffen. Für faltbare Hüllen wird besonders knickbeständiges PTFE-Gewebe verwendet. Alle Membranen lassen mehr oder weniger Licht durch und erzeugen eine angenehme Taghelle. Höher transluzente Membranen sind sogar rückprojektionsfähig. Durchsichtig ist allerdings nur ETFE-Folie und damit in der Geschichte der Membranen und Folien der erste tatsächliche Wettbewerber zu Glas.

Während im ersten Teil des Artikels (AB 04/09 S. 190 ff.) der Werkstoff ETFE mit seinen Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten – auch im Vergleich zu anderen Membranen und Folien – vorgestellt wurde, geht es im zweiten und letzten Teil um das thermische und klimatische Verhalten von mehrlagigen ETFE-Kissen, die Bauphysik, das Verhalten von ETFE im Gebrauch und in Extremsituationen sowie den Vergleich zwischen ETFE-Kissen und Isolierverglasung.

Thermisches und klimatisches Verhalten von mehrlagigen ETFE-Kissen

Stützluftversorgung und Kondensatvermeidung im Kissen

Die Stützluft in einem Kissen ist ein statisch wirksamer Baustoff, der stets in ausreichender Menge und Güte (trocken, sauber, bestimmter Druck, redundant) vorhanden sein muss. In der Pionierzeit der ETFE-Kissen wurde „trocken“ vergessen, und so sammelte sich öfter Kondensat in den Kissen. Manchmal standen auch mehrere Zentimeter Wasser in den Kissenecken. Untersuchungen der Ingenieure Andreas Buchner (IB Buchner, Bochum) und Dr.-Ing. Manfred Mahler (dyAna KG, Remscheid) zeigen, warum das so ist und warum heutige Kissen kondensatfrei sind.



Überdachung des kleinen Schlosshofes im Dresdener Residenzschloss; Foto: formTL, Radolfzell

	Sd-Wert [m]	Durchtritt von Wasserdampf nach DIN 53 122 bei 85 % Luftfeuchtedifferenz und 23 °C in g pro m² und Tag
Alu-Folie ab 0,05 mm	> 1500	= praktisch dampfdicht
Beton 25 cm	37	1 g
PTFE-Glasgittergewebe 18901	34	1 g
ETFE-Folie 200 µm	*20*	*2 g*
PES/PVC-Gewebe Typ I - V	8 -12	4 - 6 g
PTFE-Glasgewebe B18089	4	9 g
PTFE-Glasgewebe B18039	2	19 g
Holzspanplatte 20 mm	2	19 g = Dampfbremse nach DIN 4108
Gipskartonplatte 20 mm	0,2	= praktisch diffusionsoffen = 190 g/m² pro Tag
PP-Folie 100 µm	0,1	380 g
Diffusionsoffene Unterspannbahn	0,02	2000 g

Vergleich von Sd-Wert und Wasserdampfdurchtritt

Wie viele Membranen und Folien haben ETFE-Folien einen sehr hohen Sd-Wert* (siehe oben stehende Tabelle). Durch die Hülle findet deshalb nur eine zeitverzögerte und vernachlässigbare Feuchtekommunikation statt. Umso wichtiger ist es, den Feuchteeintrag durch die Stützluftversorgung zu kontrollieren, damit der Taupunkt im Kissen nicht unterschritten wird.

** Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke Sd ist ein Maß für den Widerstand, den ein Material in definierter Stärke gegen Wasserdampf besitzt.*

Szenarien ohne Betrachtung von Dampfdiffusion durch die ETFE-Folie

Szenario 1: Würde man ein Kissen nur einmal mit feuchter Stützluft füllen, dann wären von Dezember bis März im Kissen Kondensattropfen sichtbar.

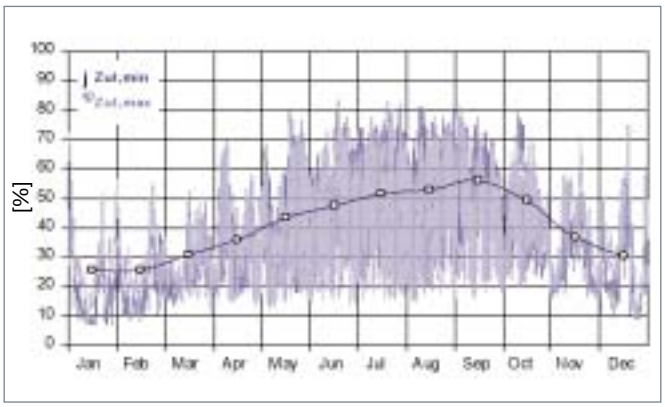
Szenario 2: Würde man ein Kissen mit einem minimaler Luftwechsel von 4 % (4 % des Kissenvolumens pro Stunde) mit vorgetrockneter Zuluft versorgen, wäre das Kissen ganzjährig kondensatfrei.

Eine Faustformel besagt, dass ein einfacher Luftaustausch pro Tag mit vorgetrockneter Luft die Luftkissen kondensatfrei hält. Als passives Steuerungsinstrument haben sich bislang volumenbegrenzende Drosselschalldämpfer bewährt, die meist am Rand oder am tiefsten Punkt des Kissens eingebaut wurden.

Bei größeren Kissenflächen empfehlen wir allerdings eine energiesparende Luftrückführung. Dann zirkuliert die Kissenluft ständig und muss lediglich nachgetrocknet werden. Amortisationsberechnungen zeigen, dass dadurch der energetisch aufwändigste Teil der Stützluftversorgung wirkungsvoll optimiert werden kann und sich der Mehraufwand für das Zirkulationssystem gemäß der Firma Elnic, Rosenheim, schon nach zwei Jahren bezahlt macht.

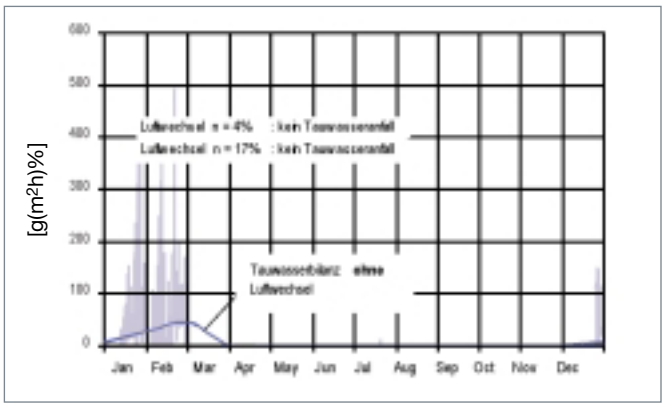
Damit sich bei Mehrkammer-Kissen keine Feuchtenester bilden, empfehlen wir, einen mit diesen Werkstoffen vertrauten Bauphysiker einzuschalten. Er bestimmt ergänzend zu den Wärmeschutznachweisen auch die richtige Luftführung im Kissen, etwa die Lage der Luftein- und -auslässe, die Strömungsgeschwindigkeit und Systemfeuchte sowie Größe und Ort von kommunizierenden Öffnungen in den Mittellagen.

Die herstellerspezifischen Randprofile werden vorrangig so entwickelt, dass die Kissen einfach montiert werden können. Sie basieren auf dem Prinzip des Formschlusses: Ein kederverstärkter Folienrand wird formschlüssig mit Aluminium-Formteilen oder EPDM-Formteil und Aluminium-Formteilen umfasst und auf der Unterkonstruktion verankert.



Relative Feuchte der konditionierten Zuluft, wie sie in die Kissen von Tropical Islands eingeblasen wird

Quelle: IB Buchner, Bochum



Beispiel für die Menge und Verteilung der Tauwassermenge je m² in der raumseitigen Kammer eines Kissen, das nicht gespült wird

Quelle: IB Buchner, Bochum

■ *Mit diesem 1/8" Drosselschalldämpfer kann der Abluftstrom zwischen 0 und 60 m³/h stufenlos eingestellt werden; Fotos: formTL, Radolfzell*

■ *Mehrteiliges (oben) und einteiliges Randprofil*

Die Randausbildung ist zwar beständig und foliengerecht, also aus nicht rostenden Werkstoffen und mit gerundeten Kanten. Meist fehlen jedoch eine tatsächlich funktionstüchtige zweite Entwässerungsebene und eine thermische Trennung, sodass additive thermische Trennungen und so genannte Kondensatrinnen die Systeme vervollständigen müssen.

Prinzipiell lassen sich zwei Arten von Randprofilen unterscheiden:

- mehrteilige, mit denen zwei Kissen zeitversetzt montiert werden können, und die aus einem Tragprofil und zwei Kedernutprofilen mit Dichtung mit Deckel bestehen, und
- einteilige Randprofile, mit denen nur ein Kissen befestigt werden kann.

Kondensatvermeidung an der raumseitigen Kissenoberfläche

In Bädern wird ein großer Aufwand getrieben, transparente Hüllflächen aus Glas oder ETFE-Kissen kondensatfrei zu halten. Meist bedient man sich Weitwurfdüsen, die mit mehr oder weniger warmer Luft Feuchte von den transparenten Flächen ablüften.

Wir werden immer wieder gefragt, ob ETFE-Hüllen besonders kondensatgefährdet sind. Prinzipiell sind ETFE-Kissen nicht kondensatgefährdeter als Isoliervergelasungen, benötigen aber wegen der bauphysikalisch „unterentwickelten" Randprofile eine größere planerische Aufmerksamkeit. Singulär an den Kissenrändern und im Randprofil anfallendes Kondensat wird mit Kondensatrinnen zum späteren Abtrocknen in Kondensatwannen gesammelt oder abgeleitet. Unterstützung bietet auch hier eine hydrothermische Simulation (htS, siehe nächste Seite), die Angaben zu Menge und Zeitpunkt des Kondensatanfalls liefert.

Bauphysik

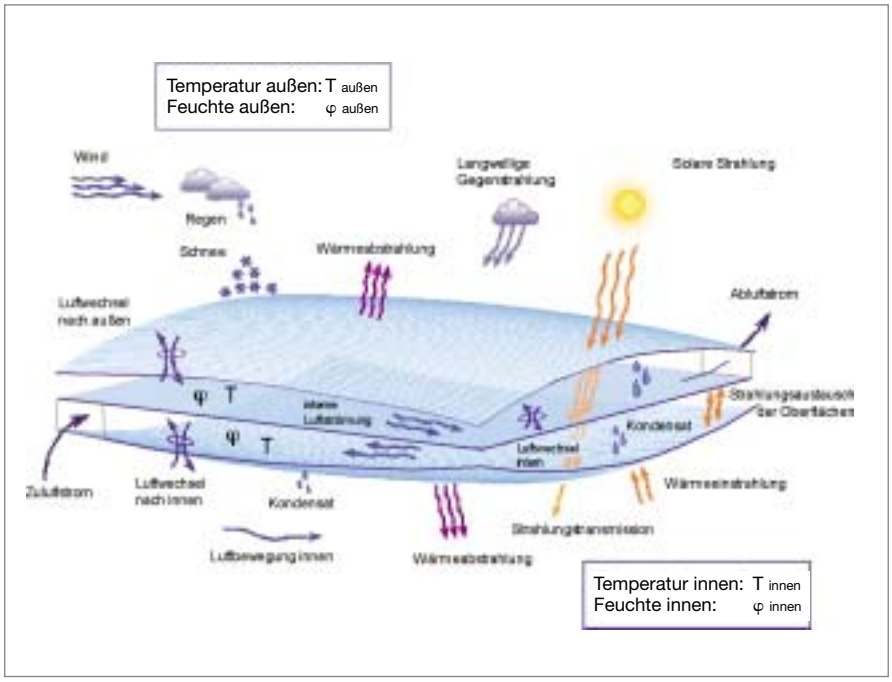
Neben der Berechnung, Formfindung und Detaillierung ist die Bauphysik der wesentliche Aspekt beim Bauen mit ETFE. Klassische stationäre bauphysikalische Modelle sind allerdings für die Betrachtungen ungeeignet. Dipl.-Ing. Andreas Buchner* und Dr.-Ing. Manfred Mahler* beschäftigen sich seit 1994 mit dem thermischen Verhalten von Membranen und Folien und verwenden hierzu instationäre Verfahren mit Echtwetterdaten (mehr dazu in den nächsten Kapiteln unter U_{eff}, htS und EnEV).

U-Wert

Vereinfacht dargestellt beträgt der U-Wert:

- 1-Kammerkissen (2 Folien): 3,0 W/m²K
- 2-Kammerkissen (3 Folien): 2,0 W/m²K
- 3-Kammerkissen (4 Folien): 1,5 W/m²K

Unter Berücksichtigung der standortspezifischen solaren Strahlungsgewinne sind die U_{eff}-Werte erheblich besser (siehe U_{eff}).



■ *Bauphysikalische Interaktion eines Folienkissens mit Umgebungseinflüssen*
Quelle: IB Buchner, Bochum

** Referenzen: Kurklinik Masserberg, Musical Buddy Holly Hamburg, Musical-Dom Köln, Parkbad Velbert, Tropical Islands, Regionalbad Bingen-Ingelheim, Piscinas Municipais de Torres Novas, Bühnenüberdachung „Wolke" / Weltjugendtag Köln, Meilenwerk Forum für Fahrkultur Düsseldorf, Allwetterbad Emden, Südparkbad Neuss und Allwetterbad Senden*

■ *Das Allwetterbad Emden mit zwei Innovationen unter einem Dach: dem verschiebbaren Raumabschluss über der Badehalle, ausgeführt mit ETFE-Folien; Foto oben: Dr. Krieger Architekten + Ingenieure, Velbert; Foto rechts: formTL, Radolfzell*

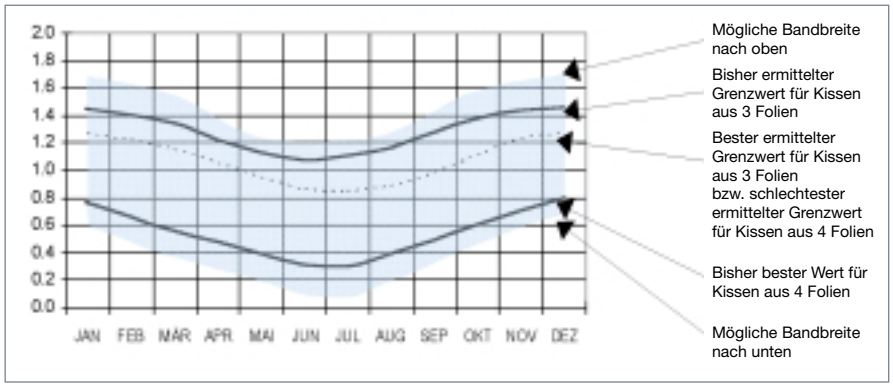
Bauphysikalische Schwachstelle Kissenrand

Da die Randprofile selbst bei kleinen Folienkissen einen weit geringeren Anteil als bei verglasten Flächen haben, machen sich deren thermische Schwächen im U-Wert kaum bemerkbar. Für die Bestimmung des U-Wertes der gesamten Kissenzone (U_{ges}) werden sie oftmals vernachlässigt.

Dennoch: An den Randbereichen der Folienkissen sowie in den Bereichen der Kissenrandprofile und der Unterkonstruktion bilden sich geometrische und materialbedingte Wärmebrücken aus. In diesen Bereichen treten auf Grund niedrigerer Oberflächentemperaturen vermehrt Wärmeverluste und Kondensat auf. Große seilumspannte Kissen mit wenig Randanteil sind deshalb bauphysikalisch günstiger als kleine Kissen.

U_{eff}, hygrothermische Simulation von ETFE-Kissenhüllen

Der U-Wert ist nur bedingt für ETFE-Kissen anwendbar, denn er berücksichtigt keine Strahlungsgewinne. Hygrothermische Simulationen (htS) von Buchner und Dr. Mahler zeigen, dass die tatsächlichen Werte wesentlich besser sind.



■ *Simulationsergebnisse und Prognosen zu U_{eff}-Werten von Folienkissen in Abhängigkeit von der Anzahl der Folien*

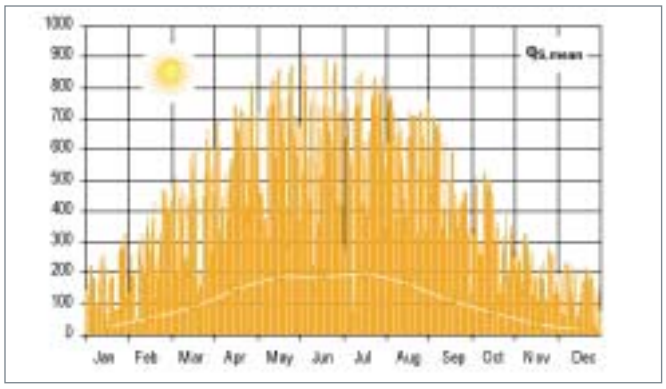
Quelle: IB Buchner, Bochum

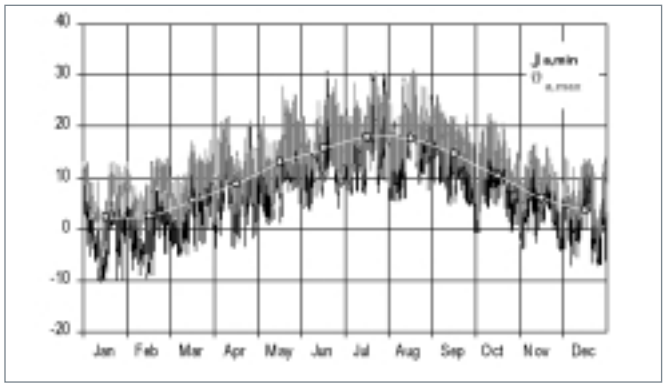
Die Spannweite der U_{eff}-Werte ist standortspezifisch. Sie hängt aber auch von der Folienbedruckung, der Konditionierung der Zuluft und der Gebäudenutzung ab.

Klimatische Wechselwirkungen können mit Hilfe einer htS transparent und steuerbar gemacht werden. Verlässliche Ergebnisse entstehen, wenn eine Hülle mit Hilfe standortspezifischer Wetterdaten eines Referenzjahres untersucht wird, hier z. B. die Wetterdaten für Brand bei Berlin. Sie sind die Grundlage für die htS der seilumspannten 3-lagigen ETFE-Großkissen von Tropical Islands. Gut zu erkennen auf den unten stehenden Grafiken ist der Zusammenhang zwischen Globalstrahlung und Temperatur der Außenluft, die auf die Gebäudehülle einwirken.

Leichtbauteile können mit einer htS auf ihre Wärme-, Feuchte- und Strahlungseigenschaften untersucht und energetisch bewertet werden. Mit diesem Wissen kann dann das gesamte Gebäude bauphysikalisch optimiert werden, was sich bis auf die Herstell- und Betriebskosten auswirkt.

Außerdem liefert eine htS die Grundlagen für die Festlegung der Dämmeigenschaften, die Anforderung an die Auslegung und Steuerung der Stützluftversorgung, die Auslegung und Platzierung der Luftdüsen im Innenraum und die Auslegung und Anordnung der Kissendurchströmung.





Oben: Solare Globalstrahlung (Mittelwerte); unten: Temperatur der Außenluft

Quelle: IB Buchner, Bochum

Anzeige

So macht Schwimmen Spaß: In STRUCKMEYER-Traglufthallen!

3-schalige Schwimmhalle

Einschließlich:
Verankerung, Luftverteilung, indirekte Beleuchtung, Personen- und Nottüren, Heizungsaggregat mit Reservegebläse, Fracht- Kran- und Montagekosten

Mögliche Heizmedien: Heizöl, Erdgas und PWW

Die dreischalige Ausführung mit einem U-Wert von 1,6 spart im Winterbetrieb Energiekosten bis zu 30% gegenüber einer zweischaligen Membrane ein. Wir arbeiten gern ein individuelles Angebot für Sie aus.

STRUCKMEYER-SYSTEMBAU GmbH & Co. KG

32457 Porta Westfalica
Alte Poststraße 90
Telefon: 05 71 / 5 15 53
Telefax: 05 71 / 5 80 01 07
www.struckmeyer-systembau.de
info@struckmeyer-systembau.de

g-Wert

Der g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad) gibt Auskunft darüber, wie groß der gesamte Anteil der globalen Strahlung ist, der durch mehrere Kissen-Folien hindurch dem Innenraum zur Verfügung gestellt wird. Er ist damit ein Maß für die Größe der Strahlungsgewinne über die Folienkonstruktion.

Zunächst wird der *Strahlungstransmissionsgrad* jeder einzelnen Folie eines Kissens ermittelt. Das ist der Prozentsatz der Globalstrahlung, den eine Folie durchlässt (95 % bei klarer 200-µm-Folie). Dann wird untersucht, wie sich die Strahlung durch die Folienschichten bewegen, also in welchem Maße die Strahlung von jeder Folie reflektiert, absorbiert oder durchgelassen wird.

Der prozentuale Anteil der Strahlung, der durch die gesamte Folienkonstruktion hindurchgeht, wird als Gesamt-Strahlungstransmissionsgrad bezeichnet. Dieser unterscheidet sich von dem Produkt der Transmissionsgrade der einzelnen Folien insofern, als er zusätzlich die Einflüsse aus Reflexionen der Globalstrahlung im Innern der Kissen beinhaltet. Der Gesamt-Strahlungstransmissionsgrad sollte trotz hoher Transparenz und hoher Transluzenz einer Kissenkonstruktion eher niedrig sein (ausgenommen Schwimmbäder). Denn in das Kissen eingedrungene Strahlung erwärmt auch die Folien. Diese geben zusätzliche Wärmestrahlung in den Innenraum ab und können Stauwärme erzeugen. Dieser Energieanteil ist der *sekundäre Wärmeabgabegrad*.

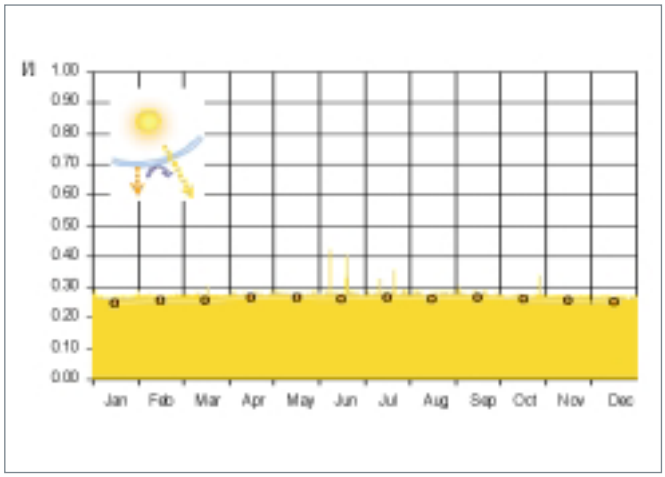
Als g-Wert eines ETFE-Kissens (86 % bei einem 3-lagigen Kissen aus klaren ETFE-Folien) bezeichnet man die Summe aus Gesamt-Strahlungstransmissionsgrad und sekundärem Wärmeabgabegrad.

Beim Meilenwerk in Düsseldorf haben Buchner und Dr. Mahler den Gesamtenergie-Durchlassgrad der ETFE-Kissenhülle ermittelt, der durch die Bedruckung von drei der vier Folien bewusst niedrig eingestellt wurde (siehe Abbildung rechts oben).

Brandschutz

ETFE-Folie ist nach DIN 4102 als B1 schwer entflammbar und nicht brennend abtropfend eingestuft.

Im direkten Vergleich mit konventionellen Werkstoffen sind die Brennwerte der extrem dünnen Folien- und Membranwerkstoffe sehr klein. Im Vergleich mit einer Holzverschalung hat ein Einkammerkissen aus 2 x 250 µm eine um eine Potenz niedrigere Brandlast und liegt damit zwischen Kissen aus PTFE-Glasgewebekissen und Kissen aus PES/PVC, wobei die Unterschiede im Brennwert zwischen den verschiedenen Membran- und Folienwerkstoffen eher gering sind:



Gesamtenergie-Durchlassgrad (g-Wert)
Quelle: IB Buchner, Bochum

Die Rheintorhallen in Köln während des Umbaus; Fotos: Ceno Tec, Greven

Untersicht des eingebauten Folienkissens mit flexiblem Notüberlauf

- 2 x PTFE-Glasgewebe 18039 in A2: 1,4 kWh/m²
- 2 x Glasgittergewebe mit PTFE-Schälfolie 18901 in B1: 1,8 kWh/m²
- *2 x ETFE-Folie 250 µm in B1: 3,6 kWh/m²*
- 2 x PES/PVC Typ II B1607 in B1: 8 kWh/m²
- 20 mm trockene Holzschalung: mind. 32 kWh/m²

Versuche zeigen ein sehr vorteilhaftes Verhalten: Bei Brand und heißen Rauchgasen verkürzt sich die Folie und die Nähte gehen auf. So wie sich die Folie vom Brandherd zurückzieht, öffnet sie den erstickenden Rauchgasen einen Weg nach außen.

Verhalten von ETFE im Gebrauch und in Extremsituationen

Vandalismus

ETFE-Folie ist als Thermoplast empfindlich gegenüber sehr großer Hitze. Eigene Versuche zeigen aber, dass weder die Glut einer Zigarette noch ein explodierender Feuerwerkskörper eine 200 µm dicke ETFE-Folie durchschmelzen. Feuerwerksreste können von Hand abgerieben werden.

Ein Einschnitt kann wegen der sehr großen Duktilität (Zähigkeit) händisch und ohne Werkzeug nicht vergrößert werden.

Einbruchschutz

ETFE-Folie kann unter großem Krafteinsatz mit einem sehr scharfen Messer aufgeschnitten werden. Es eignet sich deshalb nicht als diebstahlsicherer Raumabschluss, bietet aber nicht weniger Schutz als eine konventionelle Verglasung, die per Glasschneider oder Stein überwunden werden kann.

Hagel

Die Folie ist nach Aussage eines Herstellers auf simulierte Hagelschlag-Sicherheit bei der schweizerischen EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) getestet und erfüllt die SIA 280. Im Raum Zürich kam es vor Jahren allerdings zu größerem Hagel, der dann auch an einem ETFE-Kissendach zu einem Gebäude-Versicherungsschaden führte.

Worstcase-Szenarien, Tragreserven

Da ETFE-Folien mit einer ihrer Tragfähigkeit angepassten Vorspannung eingebaut werden, sind sie bei willkürlichen Verletzungen weniger aufreißgefährdet als übliche Membranen (siehe nebenstehende Tabelle).

	Bruchkraft (nach DIN 53 343)	Weiterreißkraft (nach DIN 53 363)	Quotient (je niedriger, desto höher das Sicherheitsniveau)
ETFE-Folie 200 µm	*10 kN/m*	*0,1 kN*	*100*
PES-PVC-Gewebe Typ II Verseidag	79 kN/m	0,5 kN	158
PTFE-Glasgewebe Typ II Verseidag B18039	80 kN/m	0,3 kN	266

Gegenüberstellung der Aufreißgefährdung von Folien und Membranen

„Fußpunkt" der ETFE-Folien am Tropical Islands; Foto: formTL, Radolfzell

Begehbarkeit, Durchsturzsicherheit

ETFE-Folien sind auf Grund der glatten und meist gekrümmten Oberfläche nach den Prüfgrundsätzen des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, GS Bau 18, nicht begehbar, gelten aber als bedingt begehbar. Sie dürfen, wenn sie die Durchsturzprüfung bestanden haben, von entsprechend gesichertem Montagepersonal begangen werden.

Haltbarkeit, Nachhaltigkeit, Recyclierbarkeit

Da die ETFE-Folie keine Weichmacher besitzt, entfällt die vielen Kunststoffen implementierte „Selbstauflösung". Klimakammerexperimente und Langzeitversuche von Hoechst in Arizona/USA zeigen keine nennenswerte Alterung (etwa geringere Bruchkraft), sodass eine für Kunststoffe ungewöhnlich lange Haltbarkeit von 25 bis 50 Jahren möglich scheint. Ebenso wurden nur geringe Veränderungen der spektralen Durchlässigkeit festgestellt.

War Michael Phelps Badekappe auch aus TEXLON® ...

... als er bei den Olympischen Spielen in Peking im National Aquatic Center acht Goldmedaillen erschwamm?

Nein, aber vielleicht keine schlechte Idee! Der berühmte „Watercube" steht nicht nur für sportliche Rekorde, sondern auch für neue architektonische Dimensionen und Superlativen. Die Klimahülle aus pneumatisch stabilisierten ETFE-Folienkonstruktionen ist mit ihren 100.000 m² aktuell die größte Folienkissenkonstruktion der Welt. Mit Vector Foiltec und TEXLON®, einem Produkt, das so simpel wie intelligent ist, landen Visionen nicht mehr in der Schublade, sondern werden gebaute Wirklichkeit. Als Weltmarktführer im Bereich des architektonischen Folienbaus für Dach- und Fassadensysteme setzt Vector Foiltec auch neue Maßstäbe in der Bäderarchitektur. Weltweit hat das Unternehmen bisher 92 renommierte Projekte dieser Art mit einer Gesamtfläche von 208.000 m² aus TEXLON® realisiert.
Wir sind die Ansprechpartner für Ihre Visionen! Neben kompetenten Anwendungsberatern, Designern, versierten Statiker und firmeneigenen Produktionsexperten verfügt Vector Foiltec über alle Kernkompetenzen für kreative Bauprojekte weltweit.

IR, Dublin, National Aquatic Centre

DE, Deggendorf, Ganzjahresbad

DE, Kreuzau, Rurwelle

US, Hamburg, Grand Cascades
© The RBA Group

GB, Alton, Alton Towers

US, McGaheysville, Massanutten

vectorfoiltec

National Aquatics Centre, „Watercube“, Beijing, China

Montage auf dem Dach von Tropical Islands; Foto: Ceno Tec, Greven

Für den Nutzer besonders wichtig: Die ETFE-Folien haben einen natürlichen „Lotuseffekt“, sodass die Durchsicht und Sauberkeit lebenslang ohne zusätzliche äußere Reinigung möglich scheint. Demontierte ETFE-Folie kann vollständig granuliert und danach zu ETFE-Spritzgussteilen weiterverarbeitet werden. Das ist keine 1:1-Rückführung wie bei Aluminium, aber eine Rückführung auf sehr hohem Niveau und führend im Bereich der Folien und Membranen.

Kosten

Ab Oberkante Unterkonstruktion kostet eine funktionstüchtig installierte und ab 500 m² große 2-Kammer-ETFE-Kissenhülle 250 - 350 €/m², je nach Geometrie. Darin enthalten sind Kissen, Kissenrandprofile, Stützluftversorgung, Steuerung und Luftleitungen.

Vergleich ETFE-Kissen – Isolierverglasung

Referenzprojekte für Hüllen aus ETFE-Kissen

Hüllen aus Glas sind hinlänglich bekannt, die Besonderen sind vielfach publiziert.

Hier eine Auswahl besonders sehenswerter Bauten mit Hüllen aus ETFE: Mangrovenhalle im Burgers Zoo Arnheim/Niederlande (1982), Raubtierhaus Hellabrunn in München (1994), Technologiezentrum Festo in Esslingen (2001), Eden Garden in St. Austell, Cornwall/Großbritannien (2001), Kapuziner Karree Aachen (2002), Allianz Arena in München (2005), Tropical Islands in Brand bei Berlin (2005), Meilenwerk Forum für Fahrkultur Düsseldorf (2006), Rheintorhallen in Köln (2008) und Dresdener Schloss (2008).

Bauphysikalischer Vergleich

Will man Gebäudehüllen aus Isolierglas und ETFE-Kissen energetisch vergleichen, so muss man die Wärmeströme auf der raumseitigen Oberfläche miteinander vergleichen, also die U_{eff}-Werte, welche die Strahlungseinflusse berücksichtigen. Hier zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Folienkissen und Glaskonstruktionen.

Eine 3-fach-Verglasung entspricht in der Wirkung etwa einem 3-Kammerkissen, eine 2-fach-Verglasung einem 2-Kammerkissen.

Unterschiede bestehen, wenn nachträglich die Hülleigenschaften verändert werden sollen, weil sich die Nutzungsanforderungen geändert haben: Mehrfachverglasungen, die werkseitig mit Gas gefüllt sind, können nicht mehr in ihrem Verhalten verändert werden. Bei ETFE-Kissen dagegen können durch die Veränderung der Zuluft die bauphysikalischen Eigenschaften in weiten Bereichen angepasst werden.

Unterschiede beim Nachweis nach EnEV

Für die Berechnung der erforderlichen Jahresheizenergie eines Gebäudes mit einer Hülle aus ETFE-Kissen benötigt man eine *Bilanz der Wärmeströme*. Das sind die Wärmegewinne und -verluste durch die Gebäudehülle. Die Berechnung kann dabei mit Hilfe einer instationären Gebäudesimulation oder stationär nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) erfolgen. Für eine stationäre Berechnung nach der EnEV werden die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile (U-Werte) und deren Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Werte) benötigt.

Bei herkömmlichen Außenbauteilen (Mauern, wärmegedämmte Trapezbleche usw.) sind diese Werte (bis auf den oft eher geringen Einfluss der Wärmeübergangskoeffizienten) materialabhängige Größen und können unabhängig von den klimatischen Standortbedingungen angegeben werden.

Im Gegensatz zu Isolierglasscheiben kann die Luft in den Kissenkammern nicht wie eine feste, homogene Materialschicht mit festen Eigenschaften betrachtet werden. In den Luftkammern eines Folienkissens stellt sich ein *eigenes Klima* ein. Jede Kissenkammer der Folienkonstruktion stellt einen zusätzlichen eigenen „Raum“ innerhalb der Gebäudehülle dar, dessen veränderliches Klima mit Hilfe einer instationären Simulation ermittelt werden kann.

Die Wärmeströme durch eine Kissenhülle hängen deshalb in hohem Maße von der lokalen Strahlungs- und Temperatursituation sowie der konditionierten Zuluft der Kissen ab. Um aber trotzdem eine Berechnung unter stationären Annahmen gemäß der EnEV/DIN 18 599 durchführen zu können, werden auf der Basis der htS Monatsmittelwerte ermittelt, die dann auch für eine Energiebedarfsberechnung nach dem „Monatsbilanzverfahren“ eingesetzt werden können.

Fazit: Verglaste Hüllen können stationär untersucht werden. Hüllen aus ETFE-Kissen benötigen eine instationäre htS.

Akustik-Vergleich

Glas ist schallhart und verlängert den Nachhall; Glas ist schwer und kann zu perfekt schalldämmenden Funktionsgläsern kombiniert werden. ETFE verhält sich entgegengesetzt. Eine Vorsatzschale aus einer einlagigen ETFE-Folie wiegt ohne Rahmen nur 500 g/m². Sie ist luftschalltechnisch masselos und mit wenigen dB Dämpfung kaum wirksam. Kissen dagegen dämpfen überraschend gut, was sich das IBP Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart mit dem Effekt der biegeweichen Doppelschale erklärt. Höhere Dämpfung kann in Kombination mit Polyesterflies-Wärmedämmstoffen erzielt werden, wobei aber die Transparenz verloren geht.

ETFE kann als Gebäudehülle eingesetzt werden, wenn wenig Schalldämmung benötigt wird, etwa im Dachbereich oder in Fassaden als Klimahülle mit nachgeschalteter Verglasung.

Der Vollständigkeit halber: Mikroperforierte ETFE-Folien werden erfolgreich als Absorberfolien eingesetzt, um höhere Frequenzen zu dämpfen.

In welchem Umfang Regentropfen störend wirken, ist individuell verschieden. ETFE-Folien und PC-Stegplatten dürften aber schweren Gläsern deutlich unterlegen sein. Für ein Oberlicht eines Konzertsaals würden wir jedenfalls keine Kissen vorschlagen.

Untersicht der Kuppel der temporär installierten Bundestagsarena mit einem 30%igen Bedruckungsgrad der einlagigen Folie am Zenit und einem 50%igen Bedruckungsgrad in dem hier sichtbaren weiteren Folienring; Foto: formTL, Radolfzell

Marktchancen	Künftiges Einsatzgebiet	Vorteile, Bewertung
-	Einlagig mechanisch gespannte ETFE-Fassaden und -Dächer	Sind und bleiben wegen der kleinen Spannweiten und aufwändigen Nachspanndetails Exoten. Kissen dagegen haben eine integrierte Nachspannung und erlauben viel größere Spannweiten.
0	Roadshow	Vielfache Montage und Demontage erzeugt visuell störende Knickspuren.
0	Oberlichter aus mehrlagigen ETFE-Kissen anstelle tiefgezogener Kunststoffplatten	Dazu werden künftig kostengünstige Stützlufterzeuger benötigt, die kompakt, wartungsfrei und leise sind.
+	Tribünendächer von Fußballstadien	ETFE-Hüllen entlang der Spielfeldkante fördern das Rasenwachstum. Der teure Rollrasen muss weniger häufig ausgetauscht werden.
+	Transparente Hüllen in Zonen mit großer Erdbebenbeschleunigung, bei Dachsanierungen und bei Schiffen	Hier hat ETFE wegen des geringen Gewichts Vorteile.
++	Überkopfverglasung von Atrien und Biosphären	ETFE-Hüllen sind bereits heute ein Wettbewerber zu verglasten Konstruktionen. Denn: Tragwerke mit ETFE-Kissen sind leichter, preiswerter und bauphysikalisch gleichwertig.
++	Weitspannende Seiltragwerke mit transparenter Hülle	Die leichten und verformungsunempfindlichen ETFE-Kissen sind hierfür ideal.
++	Bäderbau	Wird wegen der bionischen Formensprache ein Schwerpunkt für ETFE-Hüllen: meditative Sichtbeziehung zu den Wolken, niedrige Herstell- und Betriebskosten, Natur-Bräunung, natürliche Bildung von Vitamin D

Marktverschiebungen durch ETFE

Konstruktiver Vergleich

Aus konstruktiver und statischer Sicht sind ETFE-Kissen und Verglasung kaum vergleichbar. Glas ist ein auf Biegung beanspruchter Plattenwerkstoff mit kleinen Scheibenformaten und mit hohem Eigengewicht. ETFE-Folie ist ein auf Zug beanspruchter formweicher Werkstoff mit sehr geringem Gewicht und einer vielfachen Spannweite, der seine Stabilität aus einer zweiachsigen Krümmung und der Stützluft bezieht.

Worstcase-Szenarien, Personenschutz

Im Gegensatz zur Überkopfverglasung sind ETFE-Hüllen umlaufend formschlüssig auf der Unterkonstruktion verankert. Sie sind außerdem „gewichtslos" und so ohne Gefahrenpotenzial. *Zi/jh*

Projektdaten

Projektbeteiligte

IB Buchner
Ingenieurbüro für Bautechnik,
Thermodynamik, Bauphysik
Dipl.-Ing. Andreas Buchner
Dahlhauser Straße 13
44869 Bochum

formTL
ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh
Dipl.-Ing. Architekt Gerd Schmid
Kapellenweg 2 b
78315 Radolfzell

Anzeige