

## Nyt byggeri med ETFE-folie

### **Design og konstruktion med high-tech-byggematerialer (2. del)**

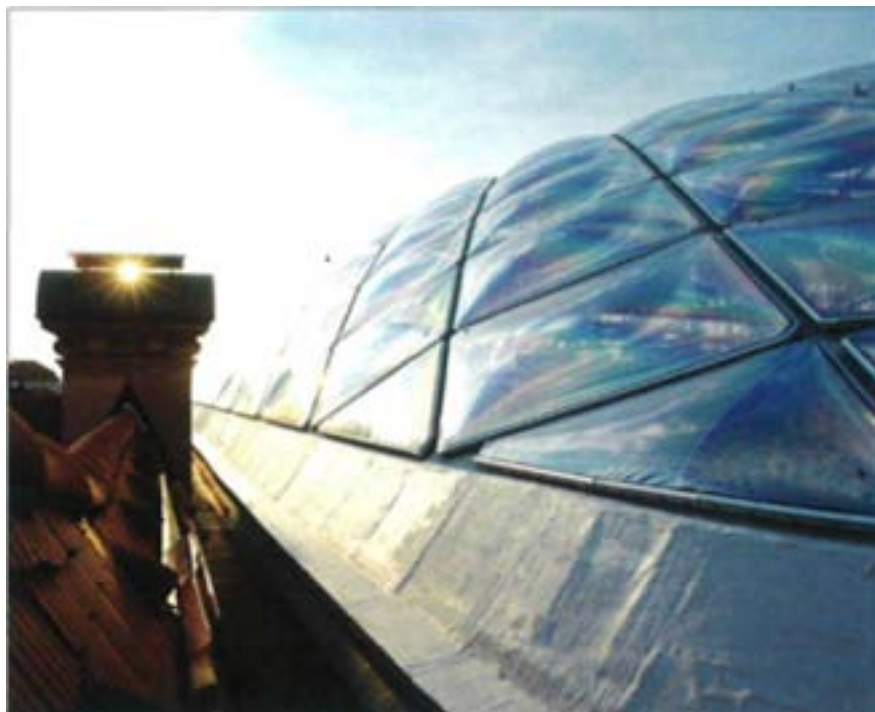
*Dipl.-Ing. Architekt [civ.ing. og arkitekt] Gerd Schmid, medstifter, direktør og anpartshaver i formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh i Radolfzell*

PTFE-glasvæv (PTFE: **P**olytetra-**f**luorethylen) har eksisteret i 40 år. Næsten ingen af de moderne stadionanlæg i Europa ville undvære fordelene ved dette materiale. Et nyt, mere fleksibelt materiale er glasvæv med silikonebelægning. Hvis der ikke er så mange penge i budgettet, kan man ty til polyestervæv med PVC-belægning. Skal inddækningen kunne foldes, bruges der især knækholdbart PTFE-væv. Alle membraner tillader et større eller mindre lysindfald, der giver rummet et behageligt dagslys. Membraner med høj lysgennemtrængelighed er endog i stand til at reflektere lyset. Det er dog kun ETFE-folien, der er gennemsigtig. Dermed er den som det første materiale blandt membraner og folier en reel konkurrent til glas. Medens den første del af artiklen (AB 04/09 s. 190 ff.) indeholdt en præsentation af materialet ETFE og dets egenskaber og anvendelsesmuligheder – også i sammenligning med andre membraner og folier - drejer den anden og sidste del sig om de termiske og klimatiske forhold i forbindelse med ETFE-puder med flere lag, byggefysikken, ETFE's egenskaber under brug og i ekstreme situationer samt en sammenligning mellem ETFE-puder og termoglas.

### **Termiske og klimatiske forhold i forbindelse med flerlags ETFE-puder**

#### **Støtteluftforsyning og hindring af kondens i puderne**

Støtteluften i puderne er et statisk aktivt medium, der til stadighed skal være til stede i tilstrækkelig mængde og kvalitet (tør, ren, reguleret tryk, redundant). Da man begyndte at anvende ETFE-puder, glemte man i først omgang egenskaben „tør“.



*Inddækning af den lille slotsgård i Dresdner Residenzschloss; foto: formTL, Radolfzell*

Derfor forekom der ofte kondensvand i puderne. Til tider kunne der stå flere centimeter vand i hjørnerne af puderne. Undersøgelser gennemført af ingeniørerne Andreas Buchner (Ingenieurbüro [IB] Buchner, Bochum) og Dr.-Ing. Manfred Mahler (dyAna KG, Remscheid) påviser årsagen hertil, og hvorfor puderne i dag er fri for kondens.

	Sd-værdi [m]	Vanddampdiffusion ifølge DIN 53 122 ved 85 % luftfugtighedsdifference og 23 °C i g pr døgn/pr. m <sup>2</sup>
Alufolie fra 0,05 mm	>1500	= stort set damptæt
Beton 25 cm	37	1 g
PTFE-glasgittervæv 18901	34	1 g
<b>ETFE-folie 200 µm</b>	<b>20</b>	<b>2 g</b>
PES/PVC-væv type I-V	8-12	4-6 g
PTFE-glasvæv B18089	4	9 g
PTFE-glasvæv B18039	2	19 g
Træspånplade 20 mm	2	19 g = dampbremse ifølge DIN 4108
Gipsplade 20 mm	0,2	= stort set diffusionsåben = 190 g/m <sup>2</sup> /døgn
PP-folie 100 µm	0,1	380 g
Diffusionsåben tagfolie	0,02	2000 g

#### Sammenligning af Sd-værdi og vanddampdiffusion

Ligesom mange membraner og folier har ETFE-folie en meget høj Sd-værdi \* (se tabellen ovenfor). Der foregår derfor kun en tidsforskudt og ubetydelig fugtighedskommunikation gennem inddækningen. Så meget desto vigtigere er det at kunne kontrollere tilførslen af fugt gennem forsyningen med støtteluft, således at luften i puderne ikke kommer under dugpunktet.

\*) Luftlagstykkelsen Sd, der er ækvivalent med vanddampdiffusionen, er et mål for den modstand, som et materiale af defineret tykkelse har over for vanddamp.

## Scenarier, hvor der ikke tages hensyn til dampdiffusionen gennem ETFE-folien

Scenario 1: Hvis man kun fyldte fugtig støtteluft i puden en gang, så ville der være synlige kondensdråber i puden fra december til marts.

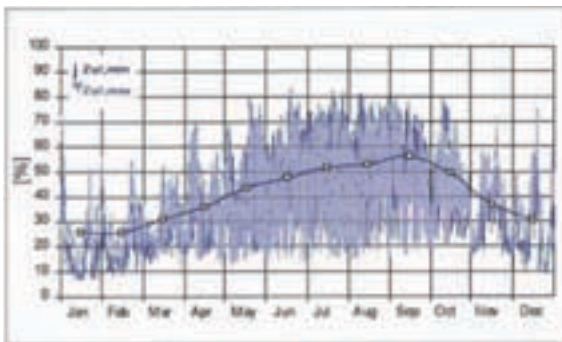
Scenario 2: Hvis man forsynede puden med et minimalt luftskifte på 4 % (4 % af pudevolumen pr. time) med fortrøret tilgangsluft, ville puden være fri for kondens hele året.

Ifølge en tommelfingerregel holder en enkelt luftudskiftning pr. døgn med fortrøret luft luftpuderne kondensfrie. Som passivt styringsinstrument har drossellyddæmpere med volumenbegrænsning hidtil vist sig at være en god løsning. Disse er som regel blevet monteret i kanten eller på pudens laveste punkt.

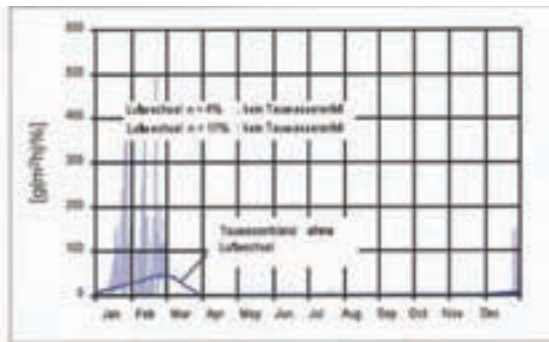
I forbindelse med større pudeflader anbefaler vi dog en energibesparende luftgenindvinding. Så cirkulerer pudeluften hele tiden og skal blot eftertørres. Afskrivningsberegninger viser, at den energimæssigt dyreste del af støtteluftforsyningen herved kan optimeres effektivt, og at merudgiften til cirkulationssystemet ifølge firmaet Elnic i Rosenheim allerede vil have tjent sig ind efter to år.

For at undgå at der dannes fugtflommer i forbindelse med puder med flere kamre, anbefaler vi, at der konsulteres en byggefysiker, der er fortrolig med disse materialer. Han kan ud over dokumentation for varmeisolering også beregne den korrekte luftstyring i puden, f.eks. placeringen af lufttilgange og luftafgange, strømningshastigheden og systemfugten samt størrelse og placering af kommunikerende åbninger i mellemlagene.

Udviklingen af de specifikke kantprofiler fra de enkelte producenter retter sig mod at opnå en så nem montage af puderne som muligt. De fremstilles efter princippet om tæt pasning, hvor en forstærket foliekant med indsvejsede keder omslutes tæt af formede aluminiumdele eller af formede dele af EPDM og aluminium og forankres til den underliggende konstruktion.



Relativ fugtighed på den konditionerede tilførte luft, som den, der blæses ind i puderne ved Tropical Islands  
Kilde: IB Buchner, Bochum



Eksempel på mængde og fordeling af optøningsvand pr. m<sup>2</sup> i det pudekammer, der vender ind mod det indvendige rum og som ikke spules  
Kilde: IB Buchner, Bochum



Med denne 1/8" drossellyddæmper kan afgangsluften indstilles trinløst mellem 0 og 60 m<sup>3</sup>/h; fotos: formTL, Radolfzell

Kantprofil i flere dele (øverst) og i en del nederst

Ganske vist er kantudformningen lavet af modstandsdygtigt materiale og tilpasset efter foliematerialet, det vil sige af rustfrie materialer med afrundede kanter. Men for det meste mangler der et virkeligt funktionsdygtigt andet afvandingsniveau og en termisk adskillelse, således at det bliver nødvendigt med ekstra termiske separeringer og såkaldte kondensrender for at gøre systemet komplet.

I princippet skelner man mellem to typer kantprofiler:

- profiler i flere dele, hvor to puder kan monteres efter hinanden, og som består af et bæreprøfil og to kedernotprofiler med tætning mod overdel, og
- kantprofiler i en del, hvor der kun kan fastgøres en pude.

### **Forebyggelse af kondens på den indvendige pudeoverflade**

I svømmehaller ofres der mange penge på at holde transparente inddækninger af glas eller ETFE-puder fri for kondens. For det meste anvendes der dyser med langt afkast, som med mere eller mindre varm luft blæser fugt bort fra de transparente flader.

\* *Referencer: Kurklinik Masserberg, Musical Buddy Holly Hamburg, Musical-Dom Köln, Parkbad Velbert, Tropical Islands, Regionalbad Bingen-Ingelheim, Piscinas Municipales de Torres Novas, sceneoverdækning „Wolke“ / Weltjugendtag Köln, Meilenwerk Forum für Fahrkultur Düsseldorf, helårsbad Emden, Südparkbad Neuss og helårsbad Senden*

Vi bliver ofte spurgt, om der forekommer specielt megen kondens på inddækninger af ETFE. I princippet forekommer der ikke mere kondens på pudeinddækninger af ETFE end på termoglas. Men det er nødvendigt at ofre større opmærksomhed på dette aspekt under projekteringen på grund af, at kantprofilerne er "underudviklede" i byggefysisk henseende. Kondens, der i enkelte tilfælde forekommer ved pudekanterne og på kantprofilerne, samles og ledes bort ved hjælp af kondensrender for senere at blive tørret bort i kondenskar. Her er en hygrottermisk simulering også til hjælp (htS, se næste side), ved hjælp af hvilken man kan beregne mængderne og tidspunkterne for forekomst af kondens.

## Byggefysik

Foruden beregningerne, konstruktionen og detaljeringen er byggefysikken et væsentligt aspekt for byggeri med ETFE. De klassiske stationære byggefysiske modeller egner sig dog ikke til dette område. Civ.ing. Andreas Buchner\* og dr. ing. Manfred Mahler\* har siden 1994 beskæftiget sig med membraners og foliers termiske egenskaber og anvender til dette formål ikke-stationære metoder med ægte vejrdata (mere herom i de næste afsnit under  $U_{\text{eff}}$ , htS og EnEV).

### U-værdi

Forenklet fremstillet er U-værdien som følger:

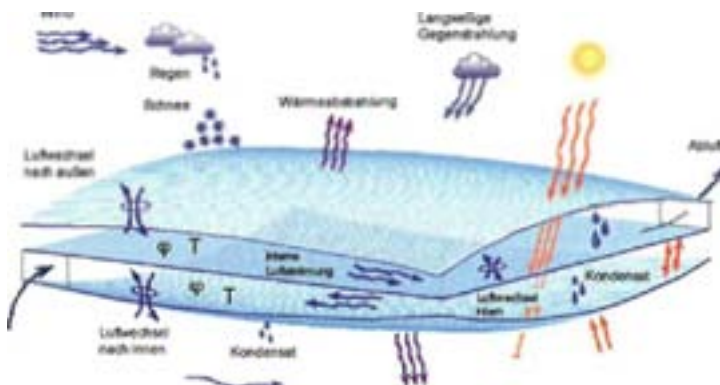
- 1-kammerpuder (2 lag folie): 3,0 W/m<sup>2</sup>K
- 2-kammerpuder (3 lag folie): 2,0 W/m<sup>2</sup>K
- 3-kammerpuder (4 lag folie): 1,5 W/m<sup>2</sup>K

Under hensyntagen til strålingsgevinsten fra solen, der er afhængig af placeringen, er værdierne for  $U_{\text{eff}}$  væsentligt bedre (se  $U_{\text{eff}}$ ).

Udendørstemperatur:

Udendørsfugtighed:  $\phi_{\text{ude}}$

$T_{\text{ude}}$



Indendørstemperatur:

Indendørsfugtighed:  $\phi_{\text{inde}}$

$T_{\text{inde}}$

*Byggefysisk interaktion for en foliepude med påvirkninger fra omgivelserne*  
Kilde: IB Buchner, Bochum

# ETFE-folie



Helårsbadet Emden med to nyskabelser i samme projekt: Den forskydelige overdækning over svømmehallen udført med ETFE-folie: foto øverst: Dr. Krieger Architekten + Ingenieure, Velbert; foto til højre: formTL, Radolfzell



## **Pudekanten er det kritiske punkt set fra en byggefysisk synsvinkel**

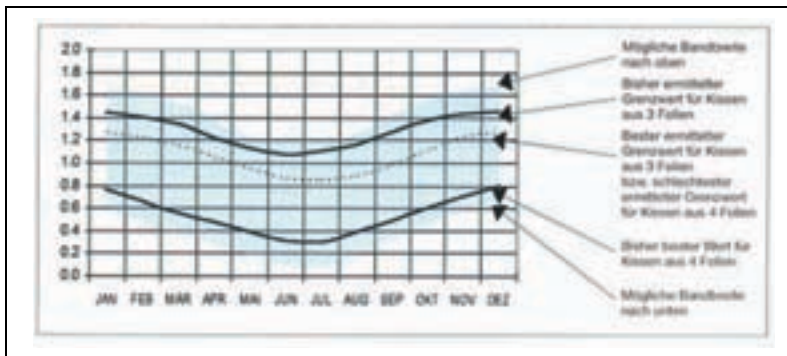
Da selve kantprofilerne i forbindelse med små foliepuder udgør et langt mindre areal end ved glasflader, har deres termiske svagheder næppe nogen betydning ved beregningen af U-værdien. Ved bestemmelsen af U-værdien på hele pudeinddækningen ( $U_{total}$ ) tages der ofte ikke hensyn til dem.

Alligevel: Ved foliepudernes kantområder samt ved pudekantprofil- og underkonstruktionsområderne dannes der geometriske og materialebetingede kuldebroer. I disse områder forekommer der ofte varmetab og kondens på grund af de lave overfladetemperaturer. Store puder opspændt med wire med lille kantandel er derfor mere fordelagtige i byggefysisk henseende end små puder.

## **$U_{eff}$ , hygrotermisk simulering af ETFE-pudeinddækninger**

U-værdien er kun i betinget grad anvendelig for ETFE-puder, for den tager ikke hensyn til strålegevinster.

Hygrotermiske simuleringer (htS) ved Buchner og dr. Mahler viser, at de faktiske værdier er væsentligt bedre.



*Simuleringsresultater og prognoser for  $U_{eff}$ -værdier på foliepuder afhængigt af antallet af folielag*

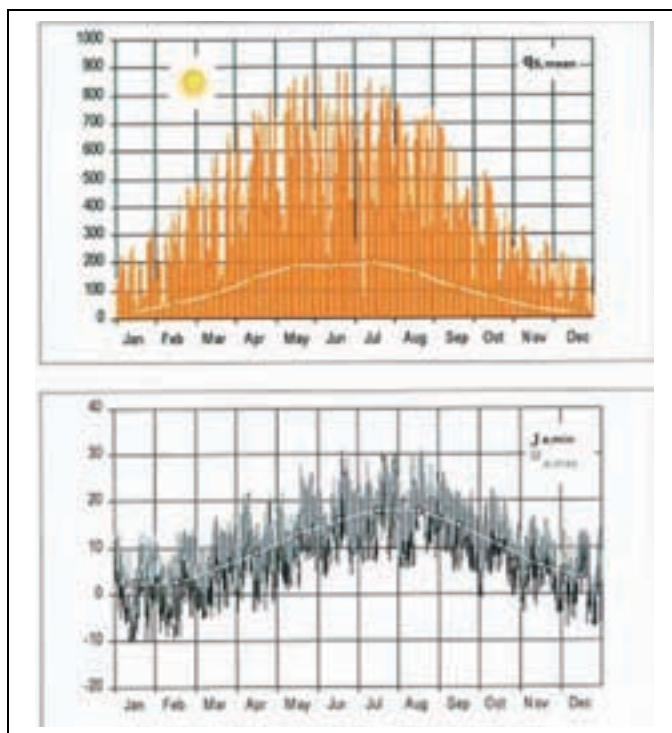
*Kilde: IB Buchner, Bochum*

$U_{eff}$ -værdierne spændvidde afhænger af placeringen. Men den er også afhængig af foliepåtrykket, konditioneringen af den tilførte luft og formålet med byggeriet.

Klimatiske vekselvirkninger kan gøres gennemskuelige og styrbare ved hjælp af en htS. Man opnår pålidelige resultater, når en inddækning undersøges ved hjælp af de specifikke vejrdata på placeringen i et referenceår, her f.eks. vejrdata for Brand ved Berlin. De danner grundlag for htS på den wireopspændte pudeinddækning med store 3-lags ETFE-puder i Tropical Islands. Ud fra de anførte grafiske visninger nedenfor er det nemt at se sammenhængen mellem den globale stråling og den udendørs temperatur, der begge indvirker på inddækningen.

Varme-, fugt- og strålingsegenskaber på lette konstruktionselementer kan undersøges og evalueres energiteknisk med en htS. Med denne viden kan hele bygningen optimeres med hensyn til byggefysikken, hvilket får indvirkning også på produktions- og driftsudgifterne.

Desuden giver en htS grundlag for at fastlægge de isolerende egenskaber, kravene til dimensionering og styring af forsyningen med støtteluft, dimensioneringen og placeringen af de indvendige luftdyser og dimensioneringen og placeringen af pudegennemstrømningen.

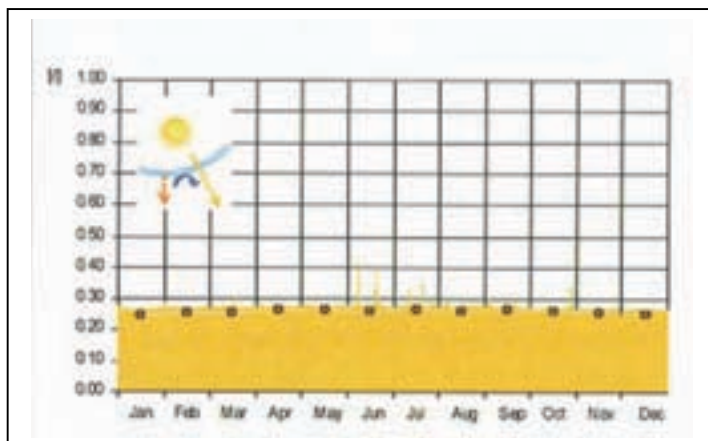


Øverst: global solstråling (gennemsnitsværdier); nederst udendørs lufttemperatur  
Kilde: IB Buchner, Bochum

## **g-værdi**

g-værdien (den totale solenergitransmittans) giver oplysning om, hvor stor en del af den globale stråling, der overføres til det indvendige rum gennem flere folielag i puderne. Den er således et mål for, hvor meget solindfaldet bidrager til opvarmningen af det indvendige rum gennem foliekonstruktionen.

Først beregnes *strålingstransmissionsgraden* for hvert lag folie i puden. Det er den procentdel af den globale stråling, som trænger igennem en folie (95 % ved klar 200 µm folie). Så undersøges det, hvordan strålingen bevæger sig gennem folielagene, dvs. i hvilket omfang strålingen reflekteres, absorberes eller går igennem hvert lag folie.



Total solenergitransmittans (g-værdi)

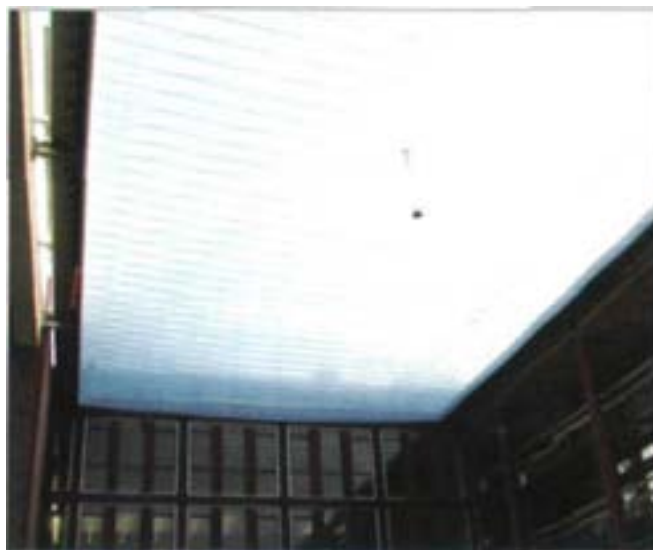
Kilde: IB Buchner, Bochum



Den procentuelle andel af strålingen, der trænger igennem hele foliekonstruktionen, kaldes den totale strålingstransmissionsgrad. Denne adskiller sig fra produktet af transmissionsgraderne på de enkelte folier i det omfang, at den derudover også indeholder påvirkningerne af refleksionerne af den totale stråling indvendigt i puderne. Den totale strålingstransmissionsgrad bør trods høj transparens og høj translucens i en pudekonstruktion snarere være lav (undtagen i svømmehaller). Dette skyldes, at den stråling, der trænger ind i puden, også opvarmer folielagene. Disse afgiver ekstra varmestråling til det indvendige rum, hvilket kan give anledning til opstemmet varme. Denne andel af energien er den *sekundære varmeafgivelse*.

Ved g-værdien på en ETFE-pude (86 % ved en pude med 3 lag klar ETFE-folie) forstås summen af den totale strålingstransmissionsgrad og den sekundære varmeafgivelse.

På konstruktionen Meilenwerk i Düsseldorf har Buchner og dr. Mahler beregnet den totale solenergitransmittans på ETFE pudeinddækningen. Denne blev helt bevidst reduceret ved påtryk på tre af de fire folier (se fig. ovenfor).



Rheintorhallerne i Köln under ombygningen: fotos Ceno Tec, Greven

De monterede foliepuder med fleksibelt nødafløb set nedefra

## **Brandsikring**

ETFE-folie er ifølge DIN 4102 klassificeret som BI, dvs. svær antændelig og drypper ikke ved brand.

Ved en direkte sammenligning med konventionelle byggematerialer er brændværdien på de ekstremt tynde folie- og membranmaterialer meget lav. Sammenlignet med en træinddækning har puder med et kammer af 2 x 250  $\mu\text{m}$  en brandbelastning der er en potens lavere, og dermed ligger den mellem puder af PTFE-glasvæv og puder af PES/PVC, hvor forskellen i brændværdi mellem de forskellige membran- og foliematerialer er i den lave ende:

- |  |                        |                              |
|--|------------------------|------------------------------|
| • 2 x PTFE-glasvæv 18039 i A2:                             |                        | 1,4 kWh/m <sup>2</sup>       |
| • 2 x glasgittervæv med skivet PTFE-folie 18901 i B1:      | 1,8 kWh/m <sup>2</sup> |                              |
| • <b>2 x ETFE-folie 250 <math>\mu\text{m}</math> i B1:</b> |                        | <b>3,6 kWh/m<sup>2</sup></b> |
| • 2 x PES/PVC type II B 1607 i B1:                         | 8 kWh/m <sup>2</sup>   |                              |
| • 20 mm tør træinddækning: min.                            |                        | 32 kWh/m <sup>2</sup>        |

Forsøg viser meget fordelagtige egenskaber: Ved brand og varme røggasser afkortes folien og sømmene går op. I samme takt som folien trækker sig bort fra brandens arnested, fremkommer der en åbning, som de livsfarlige røggasser kan slippe ud igennem.

## ETFEs egenskaber i brug og under ekstreme forhold

### Hærværk

ETFE-folie er som termoplastisk materiale følsom over for meget høj varme. Egne forsøg viser dog, at hverken gløden fra en cigaret eller eksploderende fyrværkeri kan medføre gennemsmeltning af en ETFE-folie med en tykkelse på 200  $\mu\text{m}$ . Rester af fyrværkeri kan gnides af med hånden.

Et indsnit i folien kan på grund af den store duktilitet (sejhed) ikke forstørres med hænderne uden brug af værktøj.

### Beskyttelse mod indbrud

ETFE-folie kan skæres op under stor kraftudfoldelse og med anvendelse af en meget skarp kniv. Derfor egner ETFE-folie sig ikke som tyverisikret inddækning, men giver ikke mindre beskyttelse end en konventionel glasinddækning, som man kan trænge igennem enten med en glasskærer eller en sten.

### Hagl

Ifølge udsagn fra en producent er folien blevet testet for modstandsdygtighed over for haglnedslag ved simulering hos EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) i Schweiz, hvor den opfyldte SIA 280. I området omkring Zürich forekom der dog for flere år siden nedslag af større hagl, i hvilken forbindelse der så også var tale om en bygningsforsikrings-skade på et ETFE-pudetag.

### Værst tænkeligt scenario, bæreserver

Da ETFE-folie monteres med en forspænding tilpasset dens bæreevne har den ved vilkårlige skader en mindre risiko for at blive revet op end andre membraner (se tabel nedenfor).

	Brudstyrke (ifølge DIN 53 343)	Rivekraft (ifølge DIN 53 363)	Kvotient (jo lavere kvotient, jo højere er sikkerheds- niveauet)
<b>ETFE-folie 200 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>10 kN/m</b>	<b>0,1 kN</b>	<b>100</b>
PES-PVC-væv type II Verseidag	79 kN/m	0,5 kN	158
PTFE-glasvæv type II Verseidag B18039	80 kN/m	0,3 kN	266

*Sammenligning af risiko for rivning i forbindelse med folie og membraner*



Ved "foden" af ETFE-foliepuderne på Tropical Islands; foto: formTL, Radolfzell

## **Tilgængelighed, sikring mod gennemstyrtning**

ETFE-folie er som følge af den glatte og for det meste krumme overflade ifølge testprincipperne hos Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, GS Bau 18 ikke tilgængelig for mennesker, men anses for at være betinget tilgængelig. Hvis den er blevet godkendt i forbindelse med gennemstyrtningstesten, må montagepersonale med behørig sikring gå ud på folien.



Montage på taget af Tropical Islands; foto: Ceno Tec, Greven

## **Holdbarhed, miljøvenlighed, genbrug**

Da ETFE-folie ikke indeholder blødgøringsmidler kan man se bort fra den "selvopløsning", som er blevet implementeret i forbindelse med mange syntetiske materialer. Under afprøvninger i klimakamre og ved langtidsforsøg hos Hoechst i Arizona/USA blev der ikke påvist nogen nævneværdig ældning (f.eks. ringere brudbelastning), således at det ser ud til, at den giver mulighed for en - for syntetiske materialer - usædvanlig lang holdbarhed på 25 til 50 år. Der blev desuden også konstateret meget ringe ændringer i den spektrale transmissionsfaktor.

En særlig vigtig faktor for brugeren er, at ETFE-folien har en naturlig "lotus-effekt", således at det ser ud til, at den bevarer transparensen og renheden i hele dens levetid, uden at det er nødvendigt med ekstra udvendig rengøring. Afmonteret ETFE-folie kan granuleres fuldstændigt og derefter videreforarbejdes til sprøjttestøbe emner af ETFE. Her er der ikke tale om 1:1 recycling som ved aluminium, men der er tale om genbrug på et meget højt niveau, der ikke opnås for andre folie- eller membranmaterialer.

## **Udgifter**

Fra overkanten af den underliggende konstruktion koster en inddækning med 2-kammer-ETFE-puder afhængig af geometrien fra en størrelse på 500 m<sup>2</sup> monteret og klar til brug 250 – 350 €/m<sup>2</sup>. Heri inkluderet er puder, kantprofiler til puderne, støtteluffforsyning, styring og luftledninger.

## **Sammenligning af ETFE-puder med termoglas**

### **Referenceprojekter for inddækninger med ETFE-puder**

Inddækninger af glas er kendt i stor stil, og de mest markante er ofte blevet offentliggjort.

Her kan vi nævnte nogle særligt seværdige eksempler på byggeri med inddækninger af ETFE: Mangrovehallen i Burgers Zoo i Arnheim/Holland (1982), Raubtierhaus [rovdyrhuset] Hellabrunn i München (1994), Technologiezentrum Festo i Esslingen (2001), Eden Garden i St. Austell, Cornwall/Storbritannien (2001), Kapuziner Karree Aachen (2002), Allianz Arena i München (2005), Tropical Islands i Brand ved Berlin (2005), Meilenwerk Forum für Fahrkultur Düsseldorf (2006), Rheintorhallen i Köln (2008) og slottet i Dresden (2008).

## **Sammenligning af byggefysiske egenskaber**

Hvis man vil sammenligne inddækninger af termoglas og ETFE-puder med henblik på energiforbruget, skal man sammenligne varmestrømmene på rumsiden af overfladen med hinanden, det vil sige de  $U_{\text{eff}}$ -værdier, der tager højde for strålingspåvirkningen. Her er der ikke nogen signifikante forskelle mellem foliepuder og glaskonstruktioner.

Her svarer en 3-lags glasinddækning effektivt til en konstruktion med 3-kammerpuder og en 2-lags glasinddækning svarer til en konstruktion med 2-kammer-puder.

Der er forskelle, hvis egenskaberne på inddækningen senere skal ændres, fordi kravene til anvendelsen har ændret sig. Glasinddækninger med flere lag glas, der fra producentens side er fyldt med gas, kan ikke ændres med hensyn til deres egenskaber. I forbindelse med ETFE-puder kan de byggefysiske egenskaber derimod i vidt omfang justeres ved at ændre på tilgangsluften.

## **Forskelle i forbindelse med dokumentation i henhold til EnEV**

For at kunne beregne den nødvendige årlige energi til opvarmning af en bygning med inddækning af ETFE-puder skal man bruge en *varmestrømsbalance*. Det vil sige varmetab og varmegevinst gennem inddækningen. Beregningen kan i denne forbindelse ske via en ikke-stationær bygningssimulering eller stationær ifølge den tyske energispareforordning [Energieeinsparverordnung (EnEV)]. Til en stationær beregning ifølge EnEV skal man bruge varmetransmissionskoefficienten for bygningsdelene ( $U$ -værdierne) og disses totale solenergitransmittans ( $g$ -værdierne).

Ved konventionelle udvendige byggekomponenter (mure, varmeisolerede trapezplader osv.) er disse værdier størrelser, der er afhængige af materialet, og kan angives uafhængigt af de klimatiske betingelser på placeringsstedet (på nær den ret ringe påvirkning fra varmeovergangskoefficienten).

I modsætning til termoglasruder kan luften i pudekamrene ikke betragtes som et fast, homogent materialelag med faste egenskaber. I luftkamrene i en foliepude opstår det et *selvstændigt klima*. Hvert pudekammer i foliekonstruktionen udgør et ekstra særskilt "rum" i inddækningen, hvis foranderlige klima kan beregnes ved hjælp af en ikke-stationær simulering.

Varmestrømmene gennem en pudeinddækning afhænger derfor i høj grad af de lokale strålings- og temperaturforhold samt af den konditionerede lufttilførsel til puderne.

For på trods heraf alligevel at kunne udføre en beregning under antagelse af stationære betingelser i henhold til EnEV/DIN 18 599, beregnes der på grundlag af  $htS$  gennemsnitlige månedsværdier, der så også kan bruges til beregning af energibehovet ifølge "månedsbalancemetoden".

Resultat: Glasinddækninger kan undersøges stationært. Inddækninger af ETFE-puder kræver en ikke-stationær hygrotermisk simulering.

## **Sammenligning af akustik**

Glas har en hård overflade og forlænger efterklangen. Glas er tungt og kan sammensættes til perfekt lyddæmpende funktionsglasruder. Med ETFE er det lige modsat. En inddækning af 1-lags ETFE-folie vejer uden ramme kun 500 g/m<sup>2</sup>. Den er uden masse i teknisk henseende med hensyn til luftlyd og har med en dæmpning på kun få dB ikke nogen virkning af betydning. Puder dæmper derimod overraskende godt, hvilket IBP Fraunhofer-Institut für Bauphysik i Stuttgart forklarer med effekten af den formløde dobbeltskal. Større dæmpning kan opnås ved at kombinere med varmeisolerende stoffer af polyesterfiber, hvor man dog så ikke har de transparente fordele.

ETFE kan bruges som bygningsinddækning, når der kun er brug for lidt lyddæmpning, f.eks. som tag- eller facadeinddækning som klimaskærm med efterkølet glas.

For god ordens skyld: Mikroperforeret ETFE-folie bruges med succes som absorberfolie for at dæmpe de højere frekvenser.

I hvilket omfang regndråber virker forstyrrende er forskelligt i de enkelte tilfælde. Men ETFE-folie og 2-lags PC-ribbeplader vil dog have betydeligt dårligere egenskaber end tykt glas. Til et ovenlys i en koncertsal ville vi i hvert fald ikke anbefale puder.



Kuplen over den midlertidige Forbundsdagsarena set nedefra. Den har en andel af påtryk på 30 % på folien i et lag ved zenit og en andel af påtryk på 50 % på den her synlige ydre foliering. Foto: formTL, Radolfzell.

Markedspotentiale	Fremtidigt anvendelsesområde	Fordele, vurdering
-	Mekanisk opspændte 1-lags ETFE-facader og -tage	Er ikke og vil ikke blive meget anvendt på grund af den lille spændvidde og de dyre efteropspændingsdetaljer. Puder har derimod en indbygget efterspænding og tillader langt større spændvidder.
0	Roadshows	Hyppig opsætning og nedtagning vil give anledning til knækspor, der skader det visuelle indtryk.
0	Ovenlys af ETFE-puder i flere lag i stedet for dybtrukne plastplader	Til disse skal der fremover bruges priseffektive anlæg til produktion af støtteluft. Disse skal være kompakte, vedligeholdelsesfrie og støjsvage.
+	Tribunetage til fodboldstadioner	ETFE-inddækninger langs banekanterne fremmer græssets vækst. Det kostbare rullegræs skal derfor ikke skiftes så hyppigt.
+	Transparente inddækninger i områder med stor acceleration på jordskælv, til tagsanering og skibe	Her vil ETFE være fordelagtigt på grund af sin lave vægt.
++	Glasoverdækning af atrier og biosfærer	ETFE-inddækninger er allerede i dag konkurrenter til glaskonstruktioner. Årsag: bærende konstruktioner med ETFE-pudeinddækninger er lettere, billigere og er byggefysisk lige så gode.
++	Bærende wirekonstruktioner med stort spænd og transparent inddækning	De lette ETFE-puder tåler deformation og er helt ideelle til dette formål.
++	Svømmehaller/badelande	Vil være et hovedanvendelsesområde for ETFE-inddækninger på grund af det bioniske formsprog: meditativt frit udsyn til himmel og skyer, lave udgifter til opførelse og drift, solbruning inden døre, naturlig dannelse af D-vitamin.

Markedsforskydninger som følge af ETFE

### Sammenligning af konstruktioner

I konstruktiv og statisk henseende kan man næppe sammenligne ETFE-inddækninger med glaskonstruktioner. Glas er et plant materiale, der ikke tåler bøjning, med små rudeformater og høj egenvægt. ETFE-folie er et formblødt, trækpåvirkeligt materiale med meget lav vægt og en meget stor spændvidde, hvor konstruktionen opnår sin stabilitet gennem en krumning i to akser og via støtteluffen.

### Værst tænkeligt scenarier, personbeskyttelse

I modsætning til glasoverdækninger/-tage er ETFE-inddækninger forankret tæt sluttende i hele deres omkreds til den underliggende konstruktion. Desuden er de "vægtløse" og kan således ikke komme til at udgøre en risiko for mennesker.

### Zi/jh

#### Projektdata

Projektdeltagere

IB Buchner [rådgivende bygningsingeniører]

Ingenieurbüro für Bautechnik

termodynamik, byggefysik

Civ. ing. Andreas Buchner

Dahlhauser Straße 13

D-44869 Bochum

formTL

ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh

[ingeniører inden for bærende og lette konstruktioner]

Civ. ing. arkitekt Gerd Schmid

Kapellenweg 2 b

D-78315 Radolfzell