Bauen mit Folienkissen

Zusammenfassung Folienkissen bestehen aus pneumatisch vorgespannten, hauchdünnen Membranen aus ETFE, die als bauphysikalische Hülle in Dächern und Wänden eingesetzt werden. Durch das Luftpolster zwischen den Lagen lassen sich gute Wärmedämmeigenschaften erzielen. Aufgrund des äußerst geringen Eigengewichtes und der hohen Festigkeit des Werkstoffs lassen sich große Spannweiten erzielen und größere lichtdurchflutete Flächen in vielfältigster Kontur planen. Dazu werden entsprechend optimierte Tragwerksstrukturen vorgestellt.

Foil cushions: shell of buildings!

Abstract
Foil cushions - pneumatically prestressed thin membrane structures made of ETFE – are used in buildings as claddings with thermal properties. Due to the air buffer between various layers, foil cushions achieve very satisfying insulation properties and are used as wall or roof cover. In comparison to structural glazing, foil cushions allow larger spans in almost any shape and large transparent areas. To take advantage of the unique properties of ETFE foil claddings, examples of special and highly optimized structures are presented.

1 Einleitung

Mit den Arbeiten von Frei Otto und dem Bau des Münchener Olympiastadions wurden in Deutschland die Grundlagen des Bauens mit Membranen begonnen und setzten eine Entwicklung in Gang, deren Ende heute noch nicht abzusehen ist. Es setzte sich das Prinzip der gegensinnigen Krümmung (antiklastische Bauweise) durch, um den Membranen eine eindeutige Form und Vorspannung geben zu können. Einlagige, textile Hüllen dienen als Wind- und Wetterschutz und werden i. d. R. mechanisch vorgespannt.

Bereits Anfang der 80er Jahre wurde begonnen, Membranen in Form von Kissen aus Kunststofffolien einzusetzen und pneumatisch zu stabilisieren (Markenname Texlon®-System).

Dr.-Ing. Stefan Lehnert
Geschäftsführer Vector Foiltec GmbH
Steinacker 3, 28717 Bremen
de@vector-foiltec.com

Dr.-Ing. Tobias Schween
Ingenieurgemeinschaft Thor – Schipper – Schween
Neuer Markt 4, 49393 Lohne
info@tss-ingenieure.de

Hierbei handelt es sich nicht um einlagige Membranen, sondern um zwei- bis fünflagige Kissen, die neben der Funktion als Witterungsschutz jetzt auch gute wärmeisolierende Eigenschaften aufweisen und als bauphysikalische Hülle eingesetzt werden. Der aus Flussspat gewonnene Werkstoff ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen) eignet sich dazu in idealer Weise.

In den vergangenen 30 Jahren sind weltweit vielfältige, markante und architektonisch anspruchsvolle Gebäudehüllen mit ETFE-Kissen realisiert worden.

2 Der Werkstoff ETFE

ETFE zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:
- Zugfestigkeit >50 N/mm²
- Bruchdehnung >350% nach DIN EN ISO 527-1
- hoher Weiterreißwiderstand (>400 N/mm nach DIN 53363)
- kältefest bis –160°C
- hohe Lichtdurchlässigkeit incl. UV-Strahlung
- UV-Stabil und alterungsbeständig
- antiadhäsive, glatte Oberfläche (selbstreinigend)
- hagelbeständig nach SIA V280 und EN 13583
- Elastizitätsmodul rund 700 N/mm²
- Brandklasse B1, nichtbrennend abtropfend ab 250°C
- schweißgeeignet

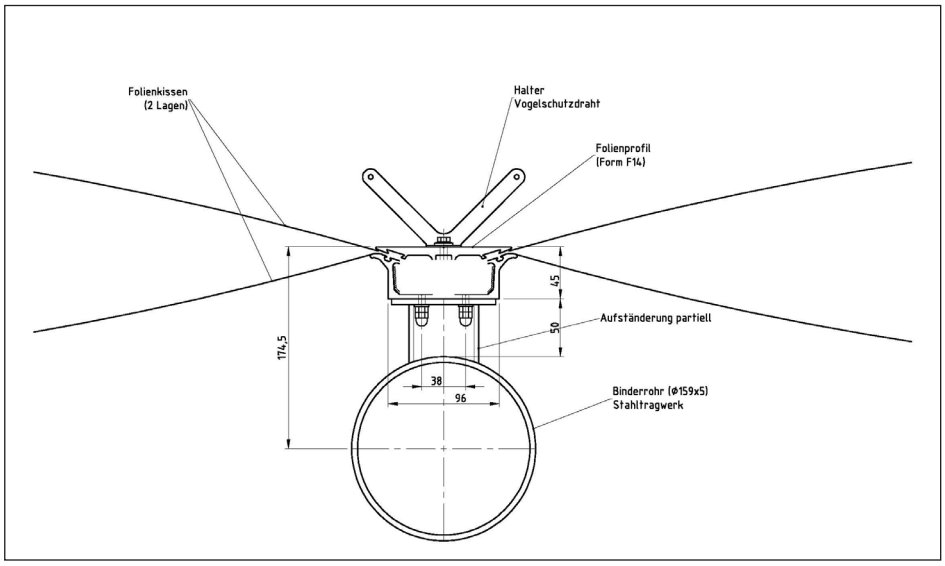

Bild 1. Prinzipskizze der Folienverankerung

Fluorkunststofffolien werden seit mehr als 30 Jahren natürlichen und künstlichen Bewitterungstests ausgesetzt und haben dabei bis zum heutigen Zeitpunkt keine wesentlichen Veränderungen erfahren. Bei den Tests werden insbesondere auch hohe UV-Strahlung und außerordentlich hohe Luftverschmutzungen berücksichtigt. Eine Zersetzung des Folienmaterials durch Umweltbelastungen ist demzufolge nicht zu erwarten. Das Material selbst ist UV-transparent und UV-beständig ohne weitere chemische Additive. Produkte aus ETFE sind wieder verwertbar und sollten am Ende der Nutzung wieder in den Produktionsprozess aufgenommen werden. Texlon®-Foliensysteme haben sich aufgrund der antiadhäsiven Oberfläche als selbstreinigend erwiesen, auch hartnäckige Verunreinigungen wie Vogelkot werden vom Regen abgespült.

Bild 2. DomAquareé - Berlin, DE

Bild 3. Kensington Academy - Liverpool, GB

3 Technologie

Die pneumatische Vorspannung mit einem Niederdruckluftsystem verhindert ein Schlagen oder Flattern der Folien und verleiht dem Kissen eine stabile Form.

Die Kissen werden über Keder in einem Leichtmetallprofil umlaufend verankert (Bild 1). Dieses Profil - verschraubt auf einer Primärkonstruktion - bildet einen Rahmen, in dem das Kissen aufgespannt wird.

Die Formgebung dieser Kissen ist nahezu beliebig, wie z. B. die dreieckigen und rautenförmigen Grundformen im gekrümmten Dach des DomAquarées (Bild 2) oder die über die Traufe gekrümmten Kissen der Kensington Academy (Bild 3) zeigen. Die Kissen werden aus Bahnen thermisch zusammengeschweißt. Folien werden in einer Dicke zwischen 100 µm bis 250 µm eingesetzt.

Die Berechnung dieser Kissen erfolgt auf Basis der Membrantheorie. Langgestreckte, ebene Kissen ab einem Seitenverhältnis etwa l/b > 2 tragen überwiegend über die kurze Spannweite ab und können als Sonderfall durch eine zweidimensionale Berechnung bemessen werden. In der Regel sind dreidimensionale Betrachtungen nach der FE-Methode erforderlich, um das Tragverhalten der Kissen ausreichend genau zu erfassen.

Konfektioniert mit einem geringen Anfangsstich dehnt sich die Folie unter dem Innendruck von z.B. 200 Pa (Niederdrucksystem) auf seine Grundform. Der Angriff von kurzzeitigen Lasten bewirkt, dass eine Folie weiter belastet wird, während die gegenüberliegende Folie entlastet wird – analog zu einem Kreuzverband aus vorgespannten Seilen. Überschreitet die äußere Einwirkung den Betrag der pneumatischen Vorspannung um etwa das Zweifache, trägt nur noch eine Folie, die dafür zu bemessen ist.

Bei langsam auftretenden Einwirkungen, z. B. Schnee, muß davon ausgegangen werden, dass die Luft langsam aus dem Kissen herausgedrückt wird, wenn die Last den Innendruck überschreitet (kein geschlossenes System). Es liegen beide Folien direkt aufeinander und beteiligen sich am Lastabtrag. Je nach Geometrie und Neigung der Kissen, ist ggf. noch die Ansammlung von Schmelz- oder Regenwasser zu berücksichtigen. Wasser-, Schneeansammlung oder große Windlasten (z. B. Randsogspitzen) können bei großer Spannweite eine Stützung der ETFE-Folien durch dünne Stahlseile erforderlich machen.

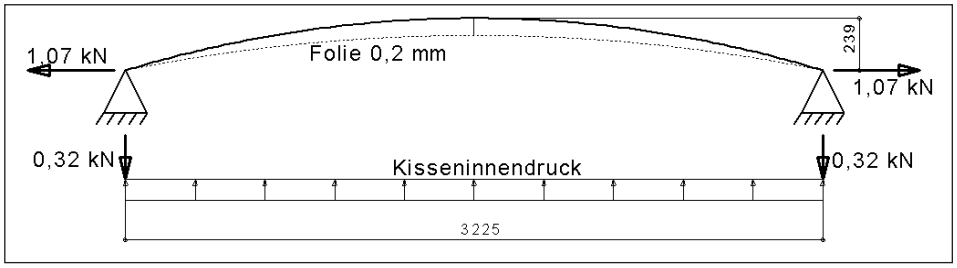

Bild 4. Horizontales Kissen: obere Folie unter Innendruck

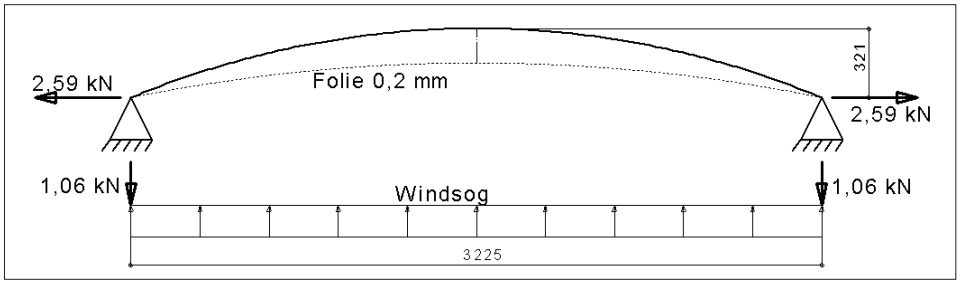

Bild 5. Horizontales Kissen: obere Foilie unter Windsog

Wasseransammlung kann entstehen, wenn Schnee schmilzt und durch Regen noch weiteres Wasser hinzukommt. Bei einem Störfall „Ausfall des Kisseninnendrucks“ besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass sich in drucklosen Kissen Regenwasser sammelt. Wasseransammlung ist bei entsprechender Berücksichtigung in der Bemessung nur ein kurzzeitiger, vorübergehender Zustand. Bei aktiver Druckversorgung wird die Kissenform wieder hergestellt und das Wasser entweicht. Es ist jedoch zu empfehlen, die Folienkissen um wenige Grad zu neigen. Dadurch können Wasseransammlungen vermieden oder ausreichend reduziert werden.

Zwangsentwässerungen in den Kissen werden teilweise auch eingesetzt. Sie sind jedoch über geschlossenen Räumen nicht wünschenswert und die Zuverlässigkeit wird u.U. durch Laub, Eis oder andere Feststoffe beeinträchtigt.

Die Zusammenhänge des nichtlinearen Verhaltens der Kissen wird am Beispiel der Mallüberdachung des DomAquarées gezeigt (Bild 2). Bei zunehmendem Stich nimmt die Tragfähigkeit überproportional zu.

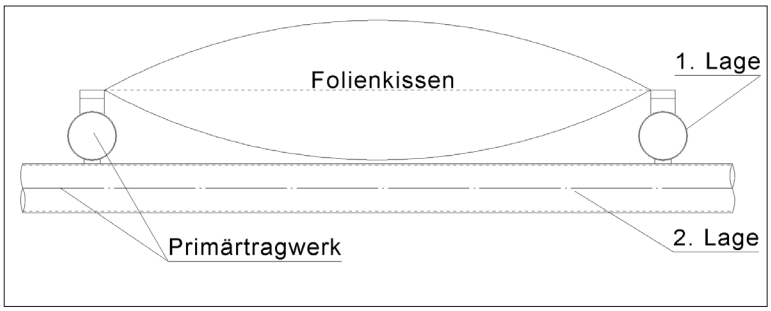

Bild 6. Konstruktion in zwei Lagen

Die Randzugkräfte nehmen unterproportional zu. Die Befestigungsprofile und das darunterliegende Primärtragwerk müssen für die senkrecht zur Kissenachse angreifenden Einwirkungen und die parallel zur Kissenachse wirkenden Verankerungskräfte aus der Folie und aus den Seilen (je nach Geometrie mit resultierenden Umlenkkräften) bemessen werden. Dabei treten bereits durch den Innendruck Randzugkräfte auf; äußere Lasten vergrößern diese noch. Häufig stehen die Kräfte aus benachbarten Kissen im Gleichgewicht, so dass nur die Rahmen der Randfelder die Zugkräfte zusätzlich zu den äußeren Lasten im Regelfall vollständig aufnehmen müssen.

Bei Betrachtung der Standsicherheit muß auch der Störfall, bei dem ein oder mehrere Kissen drucklos sind (z. B. bei Schädigung der Folie durch Hurrikan), untersucht werden. Dieses Szenario muss auch in die Bemessung des Primärtragwerks eingehen. Aufgrund der hohen Zähigkeit und der Festigkeit des Materials sowie der Reserven aus dem membranartigen Tragsystem (vergrößerter Stich bewirkt eine größere Tragfähigkeit), wird in der Regel der Widerstand des Primärtragwerks entscheidend für die Standsicherheit des Gebäudes sein.

Bei bestimmten Anforderungen an die Hülle kann auch die Wahl eines Hochdrucksystems sinnvoll sein, bei dem das Kollabieren der Kissen unter Gebrauchslasten durch deutlich höhere pneumatische Vorspannung unterbunden wird. Dieses System erfordert jedoch i. d. R. höheren Materialeinsatz, höhere Betriebskosten und höhere Anforderungen an Steuerung und Dichtigkeit. Der oben beschriebene Störfall muss dabei trotzdem beherrscht werden.

4 Optimierte Konstruktionen

Für die derzeit verarbeitbaren Foliendicken sind – abhängig von der Situation und den Einwirkungen – Folienbreiten bis etwa 4,0 m ohne zusätzliche Seilverstärkung möglich.

Der Länge der Kissen sind fast keine Grenzen gesetzt. Dabei sind Krümmungen, Verwindungen und Verwölbungen der Kissen (im Gegensatz zu Glas) problemlos herzustellen. Krümmungen sind aus geometrischen Gründen nur bis zu einem bestimmten Maß sinnvoll herzustellen, was aber ohne baupraktische Bedeutung ist. Quadratische, vieleckige oder runde Kissen mit zweiachsigem Lastabtrag lassen natürlich auch größere Spannweiten zu. Auch hier ist eine wenigstens leicht geneigte Anordnung der Kissen sinnvoll.

Die Konzeption des Primärtragwerks muss auf Kissen abgestimmt sein. Da die Kissen in Dickenrichtung auch eine gewisse Ausdehnung besitzen, bietet sich häufig das Konzept sich kreuzender Träger in zwei Lagen an (Bild 6). Dadurch, dass sich die Profile nicht gegenseitig durchdringen, sind die Verbindungen einfacher auszuführen. Die ausmittigen Zugkräfte aus der Folie sind oft nicht bemessungsentscheidend für die Verbindung.

Durch die Weichheit der Kissen und die flexible Schweißnahtführung sind die Kissen für die vielfältigsten Formen konfektionierbar und lassen damit einer kreativen Gestaltung viel Spielraum. Selbst bei Montage auf weichen, unterspannten Tragwerken oder direkt auf Seilen befestigten Kissen lassen sich dauerhafte und dichte Gebäudehüllen ausbilden.

Bild 7. NRGI Domicil in Aarhus, DK

Bild 8. NRGI Domicil in Aarhus, DK

Bild 9. Asienhalle in ZOOM Erlebniswelt Gelsenkirchen, DE

5 Beispiele

NRGI Domicil in Aarhus, DK (Bild 7 + 8)

Überbaute Fläche: 144 m²
Baujahr 2006
Primärtragwerk: Stahl

Asienhalle in der ZOOM Erlebniswelt Gelsenkirchen, DE (Bild 9)

Fassade: 4.600 m²
Baujahr: 2009
Primärtragwerk: Stahl

Ausstellungspavillon in Rotterdam, NL (Bild 10)

Überbaute Fläche: 1.330 m²
Baujahr 2010
Primärtragwerk: Stahl

Weitere Beispiele sind auch in [1] und [2] zu finden.

6 Einsatzgebiete

Texlon®-Foliensysteme werden zumeist für transparente Dächer und Fassaden von architektonisch anspruchsvollen Immobilien verwendet. Wegen der Durchlässigkeit ultravioletten Lichtes ist ihr Einsatz auch als Bekleidungen von Schwimm- und Freizeitbädern sowie bei zoologisch-botanischen Gärten verbreitet.

Durch Bedruckung oder Einfärbung der Folien läßt sich der Lichteintrag steuern. Bei mehreren Folien pro Kissen und versetzter Bedruckung lässt sich durch pneumatische Steuerung die Verschattung gezielt beeinflussen und kurzzeitig verändern.

Vorteile gegenüber Glasbautechnologie

- geringeres Systemgewicht (besonders vorteilhaft beim Bauen im Bestand)
- größere Spannweiten = größere transparente/ transluzente Fläche
- freie 3D-Formgebung
- verformungsunempfindlich, daher ideal geeignet für Seiltragwerke
- freie Farbgebung und detailreiche Graphikbedruckung möglich
- geringerer Reinigungsaufwand
- hohe UV-Durchlässigkeit
- sehr gute Raumakustik mit kurzen Nachhallzeiten
- leichtere und variantenreichere Primärtragwerke

Nachteile

- sehr geringe Schalldämmung
- Wartung der Luftdruckversorgung

Es werden U-Werte zwischen 2,94 W/m²K beim 2-lagigen Kissen bis zu 1,18 W/m²K beim 5-lagigen Kissen erreicht. Transluzent eingefärbte Folien (Milchglaseffekt) eignen sich auch besonders gut für moderne Lichtarchitektur bis hin zu videofähigen LED-Medienfassaden (Texlon®-flexipix). Die wärmedämmenden Eigenschaften der Befestigungsprofile sind inzwischen deutlich verbessert worden.

7 Zusammenfassung

Folienkissen aus ETFE werden als thermisch trennende Gebäudehüllen seit fast 30 Jahren erfolgreich eingesetzt. Sie ermöglichen große transparente oder transluzente Flächen mit äußerst geringem Abschattungsgrad durch Rahmen und Tragstruktur.

Aufgrund der Biegsamkeit der Kissen und der variablen Führung der Schweißnähte sind der Formgebung der Kissen kaum Grenzen gesetzt. Optimal sind lange, wenigstens leicht längs- oder quergeneigte Kissen mit einer Breite bis etwa 4 m und einer dafür optimierten Unterkonstruktion. Unter diesem Konzept lassen sich sehr wirtschaftliche und lichtdurchflutete Gebäudehüllen mit hoher architektonischer Ausdruckskraft in langjährig erprobter Bauweise erstellen.

8 Literatur

[1] Lehnert, S., Schween, T.: Bauen mit Folienkissen, Der Bauingenieur 81 (2006) S. 285 - 288
[2] Schween, T., Lehnert, S.: Dach- und Wandgestaltung mit pneumatisch vorgespannten Kissen aus ETFE, VDI-Berichte Nr. 1970 (2007) S. 129 - 1

Bild 10. Floating Pavilion - Rotterdam, NL