

Bauten aus textilen Werkstoffen begleiten den Menschen seit den Anfängen seiner Entwicklungsgeschichte, früher in Form von Zelten aus Naturfasergeweben, heute neben Camping-, Lager-, Fest- und Militärzelten immer mehr in Form der sogenannten „Membrankonstruktionen“, die teilweise auch als „Ingenieurzeltbauten“ bezeichnet werden. Die Membrane ist dabei raumbildendes Element und tragendes Bauteil zugleich. Aufgrund der hohen Festigkeiten der verwendeten Fasern und der durch die ausschließliche Zugbeanspruchung des Bauteils bedingten hohen Effektivität des lastabtragenden Systems können enorme Spannweiten bei einer gleichzeitig nur ca. 1 mm betragenden Bauteildicke erreicht werden.

BAUEN MIT TEXTILEN WERKSTOFFEN

PROF. DR.-ING. WERNER SOBEK UND DIPL.-ING. GERD FRERICHS, HANNOVER

1 Werkstoffe

Für Membranen im textilen Bauen werden hauptsächlich Polyester- und Glasfasern verwendet. Aramidfasern, PTFE-Fasern sowie Baumwollmischqualitäten sind von untergeordneter Bedeutung (Tabelle 1).

Es kommen Gewebe zum Einsatz, die aus sich rechtwinklig kreuzenden Fadensystemen, den Kett- und Schußfäden, bestehen. Charakteristisch ist die gegenseitige Einbindung der Kett- und Schußfäden, so daß ein Gewebe per se ein dimensionsstabiles Gebilde darstellt. Durch die Art der verwendeten Fäden, die Fadendichte, d. h. die Anzahl der Fäden pro cm in Kett- bzw. Schußrichtung, und die Bindung kann das mechanische Verhalten eines Gewebes deutlich beeinflusst werden.

Die aus der Weberei kommenden Rohgewebe können üblicherweise noch nicht direkt als Baustoff benutzt werden, da sie in den meisten Fällen nicht hinreichend wasser- und luftdicht sind und die Anforderungen an das Brandverhalten nicht erfüllen. Zudem müssen viele der verwendeten Fasern gegen Witterung, Mikrobeneinwirkung oder abrasive Beanspruchungen geschützt werden. Die Rohware wird deshalb, mit Ausnahme der PTFE-Gewebe, beschichtet;

Baumwollmischgewebe werden imprägniert. Den größten Marktanteil haben Beschichtungen auf der Basis von Weich-PVC, die für Polyester- und Aramidgewebe verwendet werden. Glasfasergewebe werden nahezu ausschließlich mit PTFE-Beschichtungen versehen (Tabelle 2):

○ Die in der Herstellung sehr kostengünstigen PVC-Beschichtungen waren lange durch eine ausgeprägte Anschmutzneigung gekennzeichnet. Dies führte häufig schon nach kurzer Zeit zu einem unschönen Aussehen. Um das Anschmutzverhalten zu ändern, wurden in den vergangenen Jahren sowohl Modifikationen in der Beschichtungsmasse selbst durchgeführt, als auch, wesentlich erfolgreicher, Lackierungen oder kalandrierte Folien aufgebracht. Insbesondere die beiden letztgenannten Methoden führten zu einer deutlichen Verbesserung der Beschichtungseigenschaften. Sie haben allerdings den Nachteil, daß sowohl die Lacke als auch die Folien im Bereich der Überlappungen von Hochfrequenzschweißnähten abgearbeitet werden müssen. Dieser Vorgang ist arbeitsintensiv und erfordert sehr sorgfältiges Arbeiten.

○ PTFE-beschichtete Gewebe, wie Glasfaser- oder Aramidgewebe, weisen aufgrund des antiadhäsiven Verhaltens des Beschichtungswerkstoffes eine äußerst geringe Anschmutzneigung

Tabelle 1. Mechanische Eigenschaften einiger ausgewählter Fasern

Material (Handelsnamen)	Dichte [g/cm ³]	Bruchfestig- keit [N/mm ²]	Bruchdeh- nung [%]	E-Modul [N/mm ²]	Bemerkungen
Baumwolle	1,5 - 1,54	350 - 700	6 - 15	4500 - 9000	- für zeitlich begrenzte Anwendungen von Interesse
Polyamid 6.6 (Nylon)	1,14	bis 1000	15 - 20	5000 - 6000	- nur mittelmäßige Alterungsbeständigkeit bei Lichteinwirkung - Längsdehnung bei Feuchtaufnahme - geringe Bedeutung im textilen Bauen
Polyesterfasern (Trevira, Tarylene, Dacron, Dicoten)	1,38 - 1,41	1000 - 1300	10 - 18	10.000 - 15.000	- sehr hohe Verbreitung, zusammen mit Glasfasern als Standardprodukt im textilen Bauen zu bezeichnen
Glasfasern	2,55	bis 3500	2,0 - 3,5	70.000 - 90.000	- Reduktion der Bruchfestigkeit infolge Feuchtigkeitseinwirkung - Faser bricht leicht, wird deshalb in Einzelfilamenten mit 3% Durchmesser ausgesponnen - zusammen mit Polyesterfasern als Standardprodukt im textilen Bauen zu bezeichnen
Aramidfasern (Kevlar, Aranka, Twaron)	1,45	bis 2700	2 - 4	130.000 - 150.000	- Spezialfaser für Hochtechnologieprodukte
Polytetrafluorethylen (Teflon, Hostafon, Polyflon, Toyoflon etc.)	2,1 - 2,3	160 - 380	13 - 32	700 - 4000	- hervorragende Naßfestigkeit - außerordentlich antiadhäsv - in Luft unbrennbar - hohe Chemikalienbeständigkeit
Kohlenstofffasern (Celcon, Carbolon, Sigrafil, Thorne)	1,7 - 2,0	2000 - 3000	< 1	200.000 - 500.000	- Faser für Anwendungen im Hochtechnologiebereich - extrem niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient - quasi unbrennbar

auf. Die überwiegend weiße Beschichtung – eine beschränkte Palette anderer Farben ist möglich – bedarf keiner Reinigungsarbeiten.

○ PTFE-Gewebe weisen zwar das dem Werkstoff eigene antiadhäsive Verhalten auf, haben jedoch aufgrund der durch die Gewebestruktur bedingten hohen Oberflächenrauigkeit die Neigung anzuschmutzen.

○ Baumwollmischgewebe schließlich sind aufgrund ihrer relativ offenen Oberflächenstruktur deutlich anschmutzgefährdet. Sie weisen zudem eine bei längerer Sonneneinstrahlung auftretende Verfärbungsneigung auf, so daß sie üblicherweise für temporäre Bauwerke verwendet werden. Der große Vorteil der Baumwollmischgewebe ist ihre Atmungsaktivität, die bei den anderen Qualitäten aufgrund der aufgetragenen Beschichtungen vollständig verhindert wird.

2 Entwurf und Formfindung

Membrantragwerke sind Flächentragwerke, die äußere Kräfte ausschließlich über Zugbeanspruchung abtragen. Einer Druckbeanspruchung würde sich das Material durch Faltenbildung entziehen. Um die unter dem Einfluß äußerer Lasten auftretenden Verformungen gering zu halten und eine eindeutige und formal akzeptable Ausgangsform zu gewährleisten, werden Membranen vorgespannt. Man unterscheidet die mechanische Vorspannung, bei der das Gewebe in die Randkonstruktion „hineingezogen“ wird, und die pneumatische Vorspannung, bei der mit einer Druckdifferenz gearbeitet wird (z. B. Traglufthallen).

Der Entwurf einer räumlich gekrümmten, vorgespannten, ausschließlich durch Zugkräfte beanspruchten Gleichgewichtsfläche kann nicht mehr wie gewohnt auf zeichnerischem Wege erfolgen, sondern erfordert andere Vorgehensweisen, die unter dem Begriff 'Formfindung' zusammengefaßt werden. Die experimentellen Methoden, wie die Formfindungsmethoden mit Seifenhautmodellen oder auch mit Strumpfstoffen, die über einzelne Hoch- und Tiefpunkte gezogen werden, haben den Vorteil großer Anschaulichkeit. Da sie auf einfache Weise eine Veränderung des Modells erlauben, sind sie die idealen Werkzeuge für die erste Phase des Entwurfs. Die im bautechnischen Sinn präzisere Festlegung der Form und die Ermittlung des Vorspannzustandes erfolgt üblicherweise mit mathematisch-numerischen Methoden, die die zweite Phase des Entwurfs bilden. Die hier ermittelten Daten werden für Berechnung und Fertigung des Bauwerks weiterverwendet.

Tabelle 2. Technische Daten auf dem Markt erhältlicher Membranen

Material Gewebe/Beschichtung	Gesamtge- wicht ¹⁾ [g/m ²]	Feuerbestän- digkeit ²⁾	Transparenz 0,44 + 0,65µm [%]	Farben	Festigkeit Kette/Schuß [N/50mm]	Bruchdehnung Kette/Schuß [%]	Wetterrei- festigkeit [N]	Knickbestän- digkeit	Schweißnaht- festigkeit ¹⁰⁾ [N/50mm]
Polyester/PVC Typ I Typ II Typ III Typ IV Typ V	800 900 1050 1300 1450	B1	0,8 + 4,0	alle	3000/3000 ³⁾ 4400/3650 ³⁾ 5750/5100 ³⁾ 7450/6400 ³⁾ 9800/8300 ³⁾	15/20 ³⁾ 15/20 ³⁾ 15/25 ³⁾ 15/30 ³⁾ 20/30 ³⁾	350 ⁴⁾ 580 ⁴⁾ 950 ⁴⁾ 1400 ⁴⁾ 1800 ⁴⁾	sehr gut	2400 ⁵⁾ 2850 ⁵⁾ 3350 ⁵⁾ 4600 ⁵⁾ 4600 ⁵⁾
Glas/PTFE	800 1270	A2 A2	4,0 + 13,0	überwiegend weiß	3500/3000 ³⁾ 6600/6000 ³⁾	7/10 ³⁾ 7/10 ³⁾	300 ⁴⁾ 570 ⁴⁾	ausreichend	6000 ⁶⁾
Aramid/PVC (kein Standardprodukt)	900 2020	B1 B1	prinzipiell keine	alle	7000/9000 ³⁾ 24500/24500 ³⁾	5/6 ³⁾ 5/6 ³⁾	700 ⁴⁾ 4450 ⁴⁾	gut	4800 ⁷⁾
Aramid/PTFE (kein Standardprodukt)	Eigenschaften nach Kunden- vorgabe	A2	prinzipiell keine			2 bis 7 ³⁾			
PTFE/- (kein Standardprodukt)	520	unbrennbar	22,0 + 28,0	überwiegend weiß	2000/2000 ³⁾	40/30 ³⁾	500 ⁴⁾	sehr gut	
Baumwoll-Polyester/-	350 520	B2 B2		alle	1700/1000 ³⁾ 2500/2000 ³⁾	35/18 ³⁾ 38/20 ³⁾	60 ⁴⁾ 80 ⁴⁾	sehr gut	

1) DIN 95352
2) DIN 4102
3) DIN 53354
4) DIN 53857
5) DIN 53363
6) DIN 53859
7) HF-Standardnaht, 30mm, bei 70°C
8) HF-Standardnaht, 50mm, bei 70°C
9) Schweißnaht, 60mm, bei 70°C
10) höhere Nahtfestigkeiten lassen sich durch vergrößerte Nahtfläche erreichen



Bild 1. Das Hajj-Terminal auf dem Flughafen in Jeddah in Saudi-Arabien ist eine der größten überdachten Flächen der Welt; die Zeltkonstruktion besteht aus teflonbeschichtetem Glasfasergewebe.

3 Berechnung und Bemessung

Die Berechnung der Spannungs- und Verformungszustände eines Membrantragwerkes unter der Einwirkung äußerer Lasten ist vergleichsweise schwierig und „von Hand“ nur mit Einschränkungen möglich. Man behilft sich deshalb üblicherweise mit einer elektronischen Berechnung des Systems. Da die Flächenstöße und die Randanschlüsse meist eine leicht geringere Festigkeit als der Membranwerkstoff selbst haben, werden sie für die Bemessung maßgebend. Die von ihnen aufnehmbaren Kräfte sind neben den verwendeten Werkstoffen von der Art der konstruktiven Durchbildung, auch vom Charakter der Belastung, von deren Einwirkdauer und der zugehörigen Temperatur abhängig. Die in großem Umfang verwendeten PVC-beschichteten Polyestergerewebe weisen beispielsweise eine empfindliche Abhängigkeit der ausnutzbaren Festigkeiten von der Bauteiltemperatur auf. Sie zeigen des weiteren eine deutliche Verminderung der Tragfähigkeit bei – auch nur zeitweise – vorhandenen kriecherzeugenden Lasten. Daher sind die einzelnen Lastsituationen getrennt zu untersuchen. Die DIN 4134 „Tragluftbauten“ schreibt beispielsweise die Bemessung für die Situationen

- Wintersturm
- Sommergewitter
- langanhaltende Beanspruchung vor.

Dieser Ansatz hat sich in den vergangenen Jahren als sinnvoll erwiesen, weswegen er auch häufig für mechanisch gespannte Membrankonstruktionen in Ermangelung hierfür geltender Normen und Regelungen angewendet wird. Die in der Bemessung eingesetzten Werte für die „aufnehmbaren Kräfte“ können allerdings nur für die sehr häufig verwendeten PVC-beschichteten Polyestergerewebe Typ II und Typ III (s. Tabelle 2) einer bauaufsichtlichen Zulassung entnommen werden. In allen anderen Fällen



Bild 2. Saisonale Überdachung (Oktober bis März) der römischen Arena in Nîmes. Sie steht in dieser Zeit als vielbegehrter Veranstaltungsort zur Verfügung. Die Überdachung erfolgt stützenfrei mit einem Luftkissen über eine Spannweite von 60 x 90 m.

muß im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall entweder auf vergleichbare, bereits vorhandene Werkstoffuntersuchungen zurückgegriffen werden, oder es sind neue Versuchsreihen aufzustellen.

4 Konstruktive Durchbildung

Die Herstellung der textilen Flächen erfolgt in kompletter Vorfertigung beim Konfektionär. Für das Zusammenfügen der einzelnen Bahnen und das Montieren dieser Membranen an unterschiedlichste Randkonstruktionen stehen verschiedene Lösungen in Form konstruktiver Details zur Verfügung (Bild 3). Zunächst lassen sich Flächenstöße, also die Verbindung Membrane-Membrane (Streifen-Streifen) und Randanschlüsse, also die Verbindung Membrane-Randkonstruktion unterscheiden. Die Frage, welche Fügetechnik zur Anwendung kommt, hängt im wesentlichen vom verwendeten Membranwerkstoff ab. Die nichtlösbaren Flächenstöße werden mit Ausnahme der selten verwendeten Baumwollmischgewebe und der PTFE-Gewebe üblicherweise mit einer Schweißverbindung gefügt. Nur in Teilbereichen, insbesondere in mehrlagigen und hochbeanspruchten Zonen, werden bei PVC-beschichteten Polyestergereweben zusätzlich Nähnähte gesetzt.

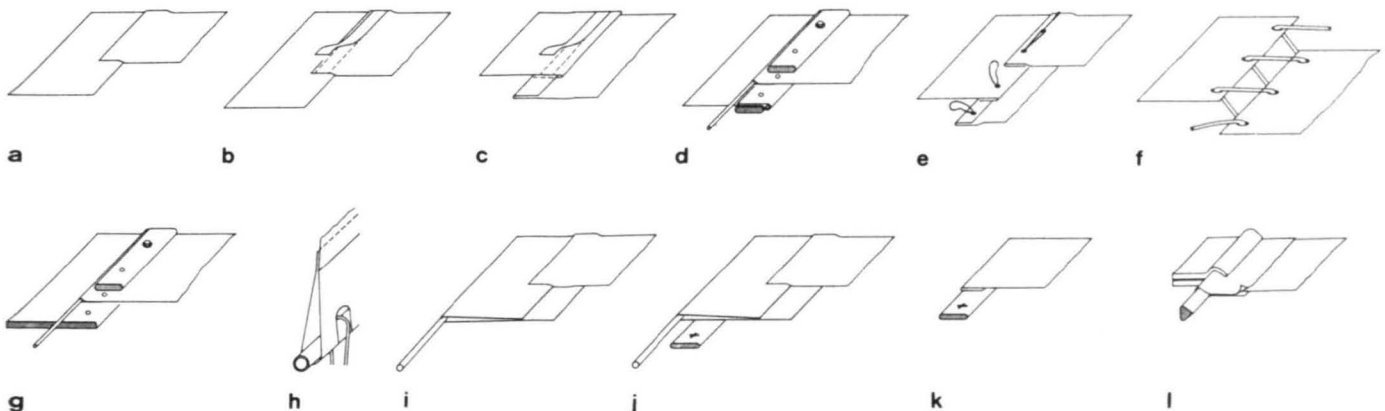


Bild 3. Flächenstöße und Randanschlüsse: a) HF-Schweißnaht, b) Nähnaht (Flachnaht) mit Abdeckstreifen, c) Kappnaht, d) Klemmplattenstoß, e) Schlaufenstoß, f) Schnürstoß (Zickzackstoß), g) Klemmrand, h) Rohr in Tasche, i) Randseil in einer Tasche, j) Randseil mit aufgenähtem Gurt, k) aufgenähter Gurt, l) Sonderform eines Klemmrandes für hohe Belastungen

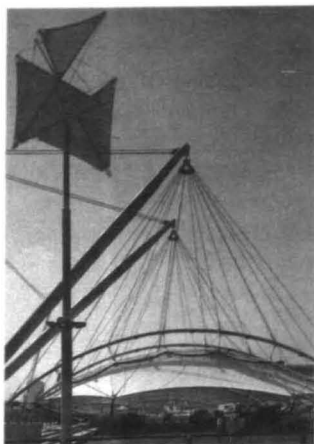


Bild 4. Eine für die Feierlichkeiten der 500-Jahr-Feier der Entdeckung Amerikas im Hafen von Genua errichtete Membrankonstruktion.

Lösbare Flächenstöße werden üblicherweise für Montagestöße, das heißt für die Verbindung einzelner Teilflächen, verwendet, da Schweißnähte und Nähnähte vor Ort nicht hergestellt werden können.

Bei den Randanschlüssen sind mehrere prinzipielle Detaillösungen unterscheidbar. Welche zur Anwendung kommen, hängt wiederum vom verwendeten Gewebe, von der Montagetechnik und vom Belastungsniveau ab. Hier ist vor allem das Problem zu lösen, ein flächiges Bauteil geringer Dicke, das aus einem hochbelasteten Werkstoff hoher Festigkeit besteht, an ein zweites, üblicherweise aus einem anderen Werkstoff bestehendes Bauteil großer Dicke anzuschließen. Der damit vorliegende Steifigkeitssprung beeinflusst natürlich den Spannungszustand der unter Last stehenden Membrane. Dies ist in der Berechnung zu berücksichtigen. Daneben verlangt er auch eine sorgfältige Herstellung und Montage, damit der Randanschluß die gleichen Festigkeitseigenschaften wie ein Flächenstoß aufweist.

5 Lebensdauer und Recycling

Synthetische Fasern werden erst seit 1945 in nennenswertem Umfang hergestellt. Ihre Verwendung in Form technischer Fasern sowie die Entwicklung der heute angebotenen Beschichtungssysteme erfolgte in der Zeit danach.

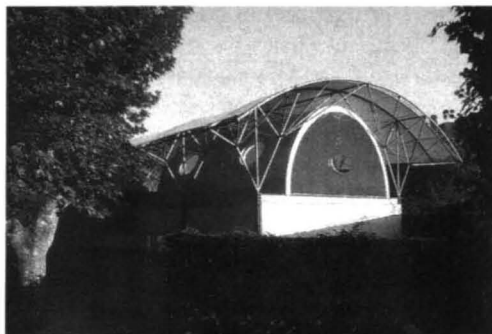


Bild 5. Das Wohnhaus der Architekten Jourda/Perraudin in Frankreich mit einer über das Gebäude gespannten Wetterschutzhaut aus einem beschichteten Gewebe.

Für PVC-beschichtete Polyestergewebe kann man heute eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren annehmen, bei PTFE-beschichteten Glasfasergeweben von mehr als 50 Jahren.

Für die Wiederverwertbarkeit von Baustoffen ist die Sortenreinheit entscheidend. Mit der Ausrüstung der Gewebe, d. h. durch Beschichtung und Veredelung, entsteht jedoch ein Verbundwerkstoff. Benutzte Membranen oder Membranteile lassen sich deshalb bislang nur in geringem Umfang weiterverwenden, eine Entsorgung der Teile erfolgt im wesentlichen durch

Deponierung oder Verbrennung. An den Möglichkeiten eines Recyclings textiler Baustoffe wird aber auf Herstellerseite verstärkt gearbeitet.

6 Künftige Anwendungsgebiete

Der Anwendungsbereich von Membrankonstruktionen aus textilen Werkstoffen wird sich in Zukunft verändern und erweitern, beispielsweise in den Sektoren Sport und Freizeit. Insbesondere der Wandelbarkeit der Tragwerke wird dabei eine gesteigerte Bedeutung zukommen. Die materialtechnischen und die steuerungstechnischen Grundlagen hierzu haben heute den Stand erreicht, der das vollautomatische Verfahren von Flächen mit mehr als 1000 m² in 2 bis 3 min ohne bemerkbare Geräuschentwicklung möglich macht. Neben der hohen visuellen Attraktivität des Verfahrensvorgangs selbst, können damit Veranstaltungen, z. B. im Freien stattfindende Sportereignisse, von der Wetterentwicklung weitgehend unabhängig werden.

Eine zweite Entwicklungsrichtung ist die lichttechnische und die wärmetechnische Nutzung der Transluzenz des Baustoffes. In Messe-, Veranstaltungs- und Sporthallen mit transluzenten Dachkonstruktionen könnten tagsüber Veranstaltungen ohne künstliche Beleuchtung stattfinden. Des Weiteren kann in transluzenten Luftkissenkonstruktionen der durch das Sonnenlicht erwärmte Luftraum zur Wärmeabgabe herangezogen werden. Die Möglichkeiten sind vielfältig und wurden schon von mehreren Autoren skizziert [3].

Ein weiterer interessanter Ansatz kommt aus Frankreich: Die Verwendung eines textilen Daches als Wetter- und Sonnenschutz für ein Wohnhaus (Bild 5). Es erfolgt eine Trennung der Bauteilfunktionen des Daches, die unter dem Gesichtspunkt des recyclinggerechten Konstruierens von hohem Interesse sind. Eine Membrane trägt Wind- und Schneelasten ab, sie schützt vor Regen, beides optimal. Die Einhausung erfolgt durch eine Sperrholzkonstruktion, die der Holzrahmenbauweise verwandt ist. Die Wärmedämmung wird von einem dritten Baustoff übernommen. Jeder Baustoff erfüllt nur wenige Funktionen, diese dann aber optimal. Alle Baustoffe sind leicht zu entfernen und zu identifizieren. Es erfolgt kein Verkleben, Vermengen oder Verschmelzen, alles Grundvoraussetzungen für eine Demontierbarkeit und Wiederverwertbarkeit unserer Bauten in der Zukunft.

Literatur

- [1] Sobek, W., Speth, M.: Textile Baustoffe, Deutsche Bauzeitung db 9/93
- [2] Sobek, W.: Wandelbare Überdachungen aus textilen Baustoffen, Berichte zum 5. Internationalen Techtex-Symposium 1993 der Messe Frankfurt, Frankfurt, 1993
- [3] Membrankonstruktionen 2. Hrsg. von Ewald Bubner u. a., Köln-Braunsfeld, R. Müller, 1981