

Leicht zu bauen ist nicht leicht

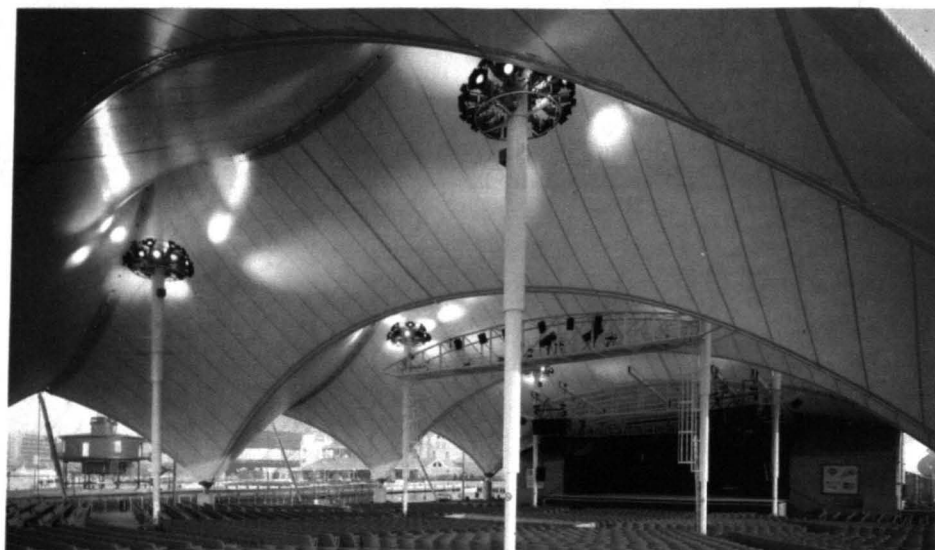
Ursula Baus, Werner Sobek: Zur Charakteristik von Membran- und Seilnetzkonstruktionen



Zelte, Pneus und Seilnetzkonstruktionen sind »Tragwerk pur«, denn die raumbildenden Flächen tragen nur sich selbst und die üblichen Verkehrslasten. Sie werden von nichttragenden Bauteilen nicht »verfremdet«, verschwinden weder unter Dichtungsbahnen und Dämmschichten, und im allgemeinen werden sie vom technischen Ausbau nicht in den Hintergrund gedrängt. Sie bleiben in der Regel, was sie von Anfang an sind: Bauten ohne »Fassaden« im klassischen Sinne, der sich aus dem lateinischen »facies« ableitet und »Aufmachung« bedeutet. Den Luxus der Schauseite, die eine räumliche oder konstruktive Unzulänglichkeit verdecken mag, erlauben die reinen Tragwerksbauten kaum: Denn es geht im Ansatz nur um das Ableiten von Kräften, das eigenen Gesetzen folgt.

Alle auftretenden Kräfte werden bei diesen Konstruktionen aus den Flächen allein über Zugbeanspruchung in das nächste tragende Bauteil bzw. Fundament weitergeleitet. Tragwerk und Erscheinungsbild sind nahezu eins, wobei die Grenzen zu Bauten, die Komplexeres leisten, fließend sind: Wenn zum Beispiel zwei Membranen zu einem Kissen gefügt werden oder auf eine Membran ein isolierendes Material aufgeschäumt wird, sind auch gewisse Wärme- und Schallschutzwerte zu erreichen.

Was textile Werkstoffe von herkömmlichen Baustoffen unterscheidet, ist ihre Flexibilität, ihre weiche Beschaffenheit, ihre Faltbarkeit mit allen Vor- und Nachteilen. Wer mit solchen textilen Werkstoffen bauen möchte, sollte mit ihren bautechnisch relevanten Eigenschaften bestens vertraut sein, um eine in ihrer Tragwirkung, Gestalt und Funktionalität überzeugende Konstruktion entwerfen zu können.



1, 2 Konzertpavillon in Baltimore, USA (FTL Architects, New York, mit Ted Happold, London);

Grate und Hochpunkte erzeugen eine scharfe Gebäudekontur. Die mit starren »Hütchen« überdeckten Hochpunkte fügen sich nur schwer in das schwungvolle Erscheinungsbild der Konstruktion

Membran- und Seilkonstruktionen sind durch das Bemühen gekennzeichnet, die ausschließliche Zugbeanspruchbarkeit von Seilen und Membranen optimal auszunutzen. Welche Folgen sich daraus für das Konstruieren ergeben, wird im folgenden Überblick angesprochen.

Funktionen

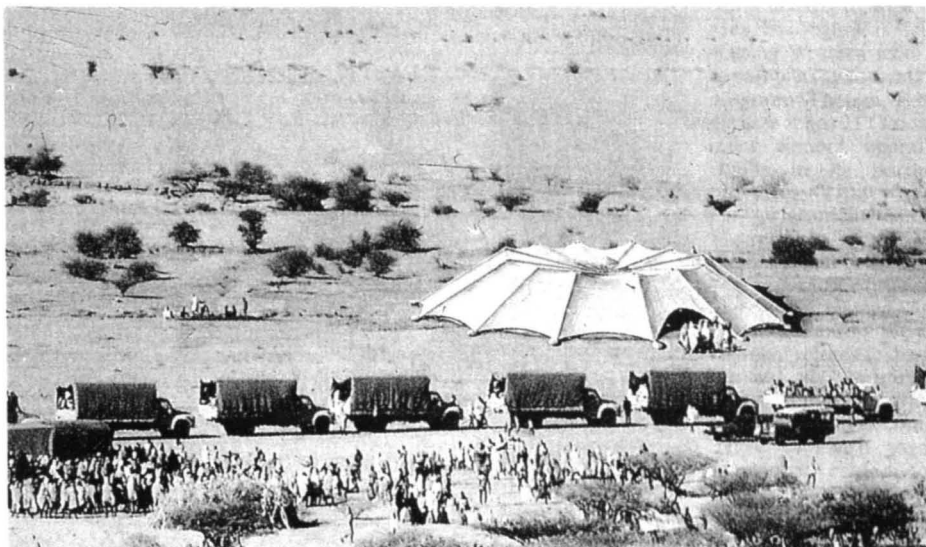
Als Membrantypen sind zur Zeit Baumwollmischgewebe, Polyestergewebe, Glasfasergewebe, Aramidgewebe und PTFE (Polytetrafluoräthylen, Teflon)-Gewebe, teilweise mit Beschichtungen erhältlich.

Die aus diesen Werkstoffen hergestellten Flächentragwerke erfüllen zwar vergleichsweise wenige Ansprüche, diese aber sehr effektiv. Sie eignen sich vor allem als Flächen oder Hüllen, die vor Regen und Schnee sowie unerwünschtem Lichteinfall schützen. Dennoch können sie lichtdurchlässig sein, und gerade die Transluzenz – nicht Transparenz – ist eine bestechende Eigenschaft der textilen Baustoffe.

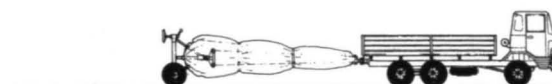
Der oben bereits angesprochene Werkstoffcharakter von Membranen erlaubt darüber hinaus die *Wandelbarkeit* der Fläche: Ein Membrandach kann in einem umkehrbaren Prozeß zirkulär, peripher, parallel oder zentral gerafft bzw. gerollt und damit – wie der bewährte Regenschirm – bedarfsgerecht gebraucht werden (Bilder 3–6). Auch das Gesamtsystem kann beweglich sein. Dazu kommt eine ganze Reihe pneumatisch wandelbarer Typen. Bei diesen wandelbaren Dachkonstruktionen muß von vornherein ein Experte in die Planung einbezogen werden, der die Antriebstechnik und die Bewegungsabläufe beim Ein- und Ausfahren der Membrane – zum Beispiel mit Seiltraktoren oder Seilzugmechanismen – zu gewährleisten weiß. Die Membrane muß bei diesem Vorgang gleichmäßig geparkt, bewegt und vorgespannt werden, sonst kann sie an Stellen, wo außerplanmäßig große Zugkräfte auftreten, reißen.

Wenn man auf die schnelle Wandelbarkeit eines Daches und die vergleichsweise teuren Antriebstechniken verzichten kann, aber eine Raumhülle doch nicht immer aufgebaut sein soll, genügt eine leicht *demontierbare Konstruktion*, die beispielsweise auch an anderen Orten wiederaufgebaut werden kann. Bekannte Beispiele dafür sind Nomaden-, Camping- oder Zirkuszelte.

Beim Entwurf ist hier besonders darauf zu achten, daß die Bauteile in einfachen, praktikablen Abläufen zu montieren und platzsparend zu lagern oder zu transportieren sind.

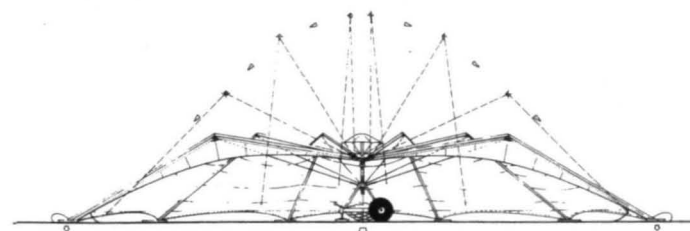


3

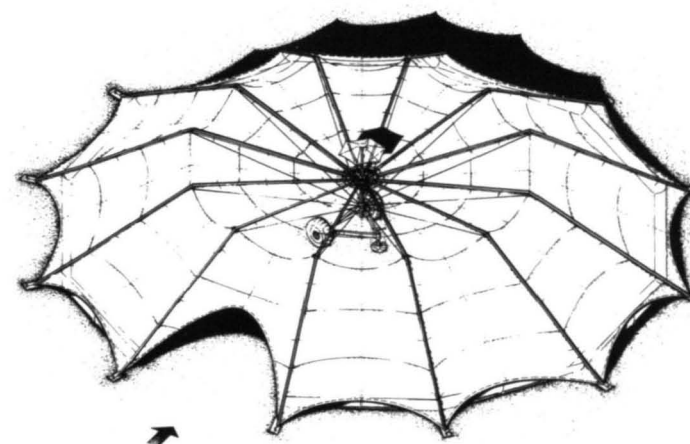


4

3–6 Ein wandelbares Dach als Zelt, das besonders schnell zu transportieren und aufzubauen ist – zum Beispiel in Katastrophengebieten (Future Systems, London)



5



6



7 Dach über dem Schulhof des Collège Jean Baptiste Clément, Paris; die Überlegung, ein transluzentes Dach für einen Pausenaufenthalt im Trockenen, aber Freien vorzusehen, überzeugt.

Die Aneinanderreihung kleiner Module ist hier allerdings mit Details verbunden, die stark in Erscheinung treten und den leichten Eindruck der Membranflächen beeinträchtigen (Architekt: Jean Luc Chassais, Paris)

7

Bei *dauerhaften Bauten* muß, wie bei allen anderen Bauten auch, daran gedacht werden, daß sie einfach zu warten sind.

Membranbauten haften noch immer die Vorstellung eines schnell verschmutzenden, vernachlässigten Erscheinungsbildes an. Die Membranhersteller begegnen diesem »Anschmutzen« mit unterschiedlichen Beschichtungen und Lackierungen; PTFE-beschichtete Glasfasergewebe schmutzen zum Beispiel nicht an.

Daneben gibt es auch andere Gründe, Membranen als Verbundwerkstoffe herzustellen, welche kaum rezyklierbar sind und deswegen ökologisch keineswegs befriedigen – zum Beispiel Faserschutz und Wasserdurchlässigkeit. Hier müssen Membranhersteller noch einige Entwicklungsarbeit investieren – im eigenen Interesse, denn ihre Produkte werden sonst zukünftig kaum akzeptiert werden.

Zugbeanspruchte Flächentragwerke können daneben natürlich auch vielfältige andere Aufgaben übernehmen – das Spektrum reicht vom Sicht-, Wind- oder Fußballschutz bis zum reflektierenden Lichtsegel. Dem Erfindungsreichtum sind keine Grenzen gesetzt.

Festlegung des Raumes

Prinzipiell richtet sich im Entwurfsprozeß die Festlegung von Rändern, Hoch- und Tiefpunkten oder Graten beziehungsweise Kehlen danach, wo und wie die Kräfte aus einer Fläche in ein tragendes Bauteil oder in ein Fundament eingeleitet werden sollen. Zunächst einmal muß natürlich berücksichtigt werden, welche Raumhöhen und Volumina die Bauaufgabe an welchen Stellen verlangt. Denn sind die oben genannten Punkte und Raumkanten einer Membran- oder Netzkonstruktion einmal festgelegt, ist gleichzeitig auch die Form der dazwischen – beziehungsweise darübergespannten Flächen und damit die Form des entstehenden Raumes weitestgehend vorbestimmt.

Als statisches Kriterium für diese Formen gilt, daß eine Gleichgewichtsfläche mit reiner Zugbeanspruchung entstehen muß – siehe unten.

Für die *Randform* ergeben sich folgende Konsequenzen: Wird die Membran- oder Netzfläche punktförmig befestigt, so verläuft der zugbeanspruchte Membranrand zwischen diesen Zugverankerungen entlang einer gekrümmten Linie:

Der Randgurt oder das Randseil ist allein zugbeansprucht, was höchste Effektivität bedeutet. Ein einfaches Beispiel dafür ist das Vierpunktsegel in Bild 8. Muß aus irgendwelchen Gründen – zum Beispiel, um an ein Haus anzuschließen – der Membranrand einer anderen Form folgen, so wird das Bauteil, an dem die Membrane befestigt ist, üblicherweise auf Biegung beansprucht (Bild 7).

Hochpunkte im Binnenbereich von Membranen oder Netzen können entweder von unten mit Stützen fixiert oder von oben an einem Seil oder einem anderen festen Bauteil aufgehängt sein. In jedem Fall verlangen Hochpunkte eine sorgfältige bautechnische Durcharbeitung, weil die Kraftkonzentration am Übergang aus der Fläche zum Punkt konstruktiv bewältigt werden muß (Bild 9).

Das gleiche gilt für *Tiefpunkte*, die entweder nach unten zugverankert oder eventuell von oben mit einer druckbeanspruchten Luftstütze fixiert werden können.

Eine Möglichkeit, Raumkanten festzulegen, bieten *Grate*: Die Membrane oder das Netz wird über ein beliebig beanspruchtes Bauteil, zum Beispiel einen Bogen, einen Rahmen oder ein Seil gespannt. Umgekehrt ergeben sich *Kehlen*, wenn die Membrane unterhalb eines Bauteils gespannt wird.

Die Flächenformfindung

Durch die Vorgabe von Hoch- und Tiefpunkten sowie durch die geometrische und statische Festlegung des Randes sind die Anzahl und die Art der möglichen Flächenformen weitestgehend festgelegt. Zusätzlich muß, wie bereits angesprochen, diese Fläche eine ausschließlich zugbeanspruchte Gleichgewichtsfigur darstellen – hier zeigt sich der grundlegende Unterschied zum Entwerfen herkömmlicher Tragwerke: Der Entwurf einer im allgemeinen räumlich gekrümmten Gleichgewichtsfigur kann nicht mehr wie gewohnt auf zeichnerischem Wege erfolgen, sondern bedarf anderer Vorgehensweisen, die unter dem Oberbegriff »Formfindung« zusammengefaßt werden.

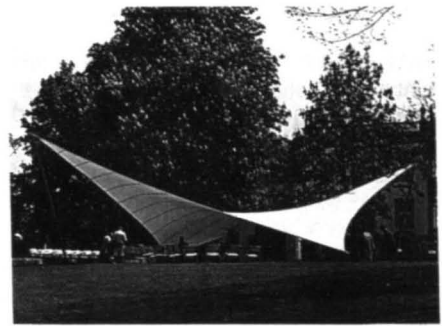
Die unterschiedlichen, häufig kombinierten Formfindungsmethoden können in *experimentelle* und *theoretische Verfahren* unterteilt werden.

Die experimentellen Methoden zeichnen sich durch einfaches Arbeiten mit dem Modell und große Anschaulichkeit aus. Theoretische Verfahren erweitern indes das Formenspektrum und liefern exakte Daten, die der weiteren Bearbeitung dienen können.

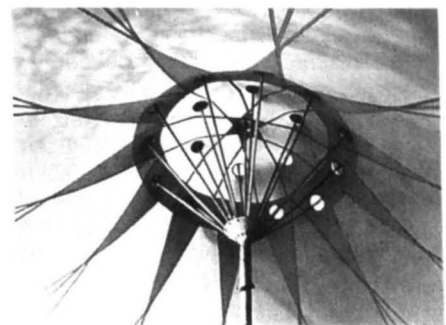
Beide Methoden führen stets zu Flächentragwerksformen, die ausschließlich zugbeansprucht sind und sich im inneren Gleichgewicht befinden. Je nach angewandter Methode ergeben sich aber unterschiedliche Flächenformen mit unterschiedlichem Spannungszustand, über den bei Modellmethoden häufig so schnell nichts ausgesagt werden kann; eine Kritik an der »gefundenen« Flächenform bleibt also zunächst auf deren Geometrie beschränkt.

Das verdeutlicht das berühmte Strumpfmodell: Ein Nylonstrumpf, der über eine bestimmte Randsituation gespannt ist, ergibt eine vorgespante, nur zugbeanspruchte und im Gleichgewicht befindliche Fläche. Über den Spannungszustand in dieser Fläche läßt sich zunächst nichts aussagen; erst wenn die Fläche ausgemessen ist und anschließend die Flächenkrümmungen an jedem einzelnen Flächenpunkt berechnet sind, läßt sich die Spannungsverteilung in der Fläche ermitteln. Aber wie aufwendig wird diese Vorgehensweise, wenn der Spannungszustand in der »gefundenen« Fläche nicht akzeptabel ist! Seifenhautmodelle sind die einzigen Modelle, die auch etwas über den inneren Spannungszustand der Gleichgewichtsfläche aussagen: Die Spannungen sind in jedem Punkt der Fläche in jeder Richtung gleich groß. Seifenhautmodelle sind aber innerhalb der gegebenen Randbedingungen geometrisch nicht manipulierbar: Ist eine (Seifenhaut-)Form architektonisch nicht befriedigend, kann eine andere Form nur über eine Veränderung der Randbedingungen erreicht werden.

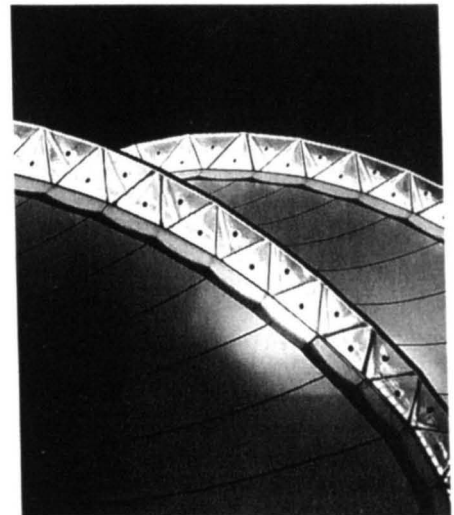
Theoretische Methoden kompensieren die genannten Schwierigkeiten zumindest teilweise: Bei einigen Methoden kann man den gewünschten Spannungszustand vorgeben und ihn danach innerhalb des Entwurfsprozesses in einem bestimmten Rahmen verändern. Mit diesen direkten Methoden zu arbeiten, erfordert jedoch ein hohes Maß an Erfahrung und Ingenieurkönnen. Die enge Zusammenarbeit von Architekt und Ingenieur ist deshalb beim Entwerfen dieser Tragwerke unerlässlich.



8



9



10

8 Vierpunktsegel; Konzertpavillon in Kassel, 1955 (Frei Otto)
9 Hochpunkt eines Buckelzeltes auf der Bundesgartenschau in Köln, 1957 (Frei Otto)

10 Innen beleuchtete Grate des Forschungslabors in Venafro, Italien (Architekten: Samyn & Partner mit IPL Leichtbau, Radolfzell)

Stabilisierung

Netz und Membrane sind von sich aus instabil und ohne eine materialgerechte Stabilisierung als Flächentragwerk oder im besonderen als Raumhülle ungeeignet. Eine schlaff befestigte Hülle flattert im Wind, es bilden sich Falten, Wassersäcke usw. — Erscheinungen, die vermieden werden wollen.

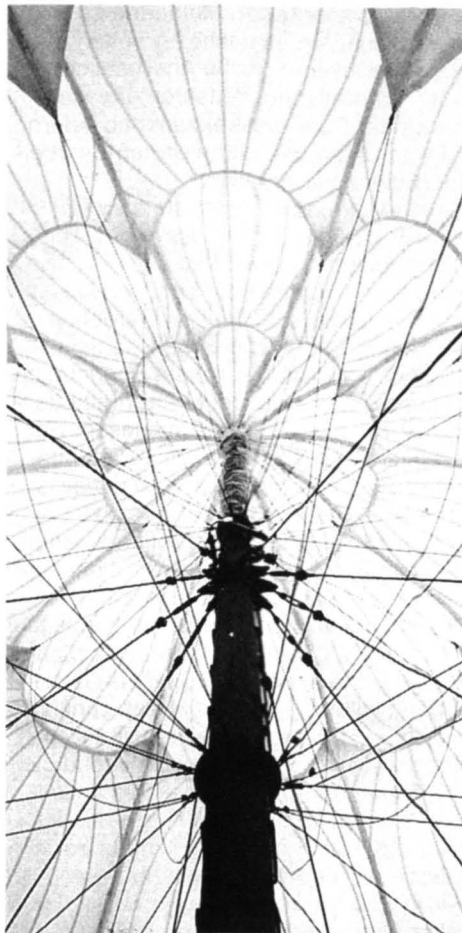
Die ausschließliche Zugbeanspruchbarkeit des flächenüberspannenden Materials legt ein einfaches Stabilisierungsprinzip nahe: die *Vorspannung*. Man unterscheidet die mechanische und die pneumatische Vorspannung. Bei der mechanischen Vorspannung werden die Membran beziehungsweise das Netz im Zuschnitt kleiner als in ihrer endgültigen Position hergestellt, und zwar so, daß nach dem »Einbau« die Haut in einer bestimmten Größenordnung vorgespannt wird.

Für Membran- und Seilkonstruktionen wurden auch Nachspanntechniken entwickelt, die aber bautechnisch häufig zu aufwendigen Details führen. Beim Bauen von Seilnetzen kann man heute durch eine sorgfältige Netzerfassung und einen präzisen Zuschnitt oft auf Nachspannvorrichtungen verzichten. Im textilen Bauen sind sie wegen des zeitabhängigen Verhaltens vieler Membranen meistens noch unerlässlich.

Pneumatische Konstruktionen werden durch eine *Druckdifferenz* diesseits und jenseits der Membran stabilisiert, was recht einfach am Aufblasen eines Luftballons nachzuvollziehen ist. Die Größe der Druckdifferenz bestimmt die Spannung in der Membranfläche.

Um eine Membrane oder ein Netz in einem ganz bestimmten Maß vorspannen zu können, muß einmal die aus den Randbedingungen »gefundene« und dann erfaßte Fläche »abgewickelt« werden. Das heißt, die in der Regel räumlich gekrümmte Flächenform wird in eine ebene Fläche, die aus einzelnen Streifen zusammengesetzt ist, gebracht. Diese Abwicklung ist eine Grundlage des Zuschnitts und zunächst lediglich eine Frage der Geometrie.

Die Streifen, die auf der vorgespannten Fläche »gedacht« und danach in die Ebene abgewickelt werden, stehen zunächst natürlich auch unter Vorspannung. Um sie herstellen zu können, müssen sie jedoch entspannt werden.



11

Die dadurch entstehende Geometrieänderung des abgewickelten Streifens bezeichnet man als *Kompensation*. Die Art und die Größe der Kompensation ist vom Vorspannungszustand und vom mechanischen Verhalten des Werkstoffes abhängig. Welche Auswirkungen sich für den Zuschnitt der Membrane bzw. der einzelnen Membranfelder ergeben, gehört zum Know How der Membranbauspezialisten. Zu grundsätzlichen Eigenschaften textiler Werkstoffe sei an dieser Stelle auf den Aufsatz von Werner Sobek und Martin Speth verwiesen (Seite 74).

Mit Hilfe des Computers können neben der Geometrie auch die Materialkennwerte in Programmen berücksichtigt werden, mit denen sich auch die Zuschnittsprobleme lösen lassen.

Montageabläufe

Neben den Forderungen, die für jede Baumontage gelten, konzentrieren sich die Schwierigkeiten bei Seil-, Seilnetz- und Membrankonstruktionen auf die Art und Weise, wie die großen vorgefertigten Flächen montiert und wie die Vorspannung bautechnisch in die Bauteile einzubringen sind, um die Konstruktion damit zu stabilisieren. Eine Einführung in die Problematik bietet der Aufsatz von Friedemann Kugel (Seite 98).

Im Detail

Was für die Bauweise als Ganzes gilt, kennzeichnet auch die wesentlichen Kriterien für ihre Details: Ist das Bauwerk »Tragwerk pur«, so muß in den Details vor allem die Weiterleitung der Kräfte bewältigt werden, und wie bei herkömmlichen Bauweisen ist das Detail der Prüfstein souveränen Konstruierens.

Besondere Aufmerksamkeit verdienen jene Stellen, an denen Zugkräfte aus einem Netz oder einer Membran in ein anderes tragendes Bauteil oder ein Fundament geleitet werden (siehe oben). Welche Konsequenzen die Festlegung dieser Punkte für die Formfindung der Fläche mit sich bringt, wurde bereits angesprochen. Die Zugkraftkonzentrationen, die nun an den kritischen Rändern, Hoch- und Tiefpunkten sowie Graten und Kehlen auftreten, können eine Membrane oder ein Netz in der Regel nicht aufnehmen. Prinzipiell müssen Verstärkungen oder bautechnische Details vorgesehen werden, die konstruktiv jeweils den architektonischen Randbedingungen, den auftretenden Kraftgrößen und dem Montageablauf angepaßt sind.

Bei punktwiser Befestigung werden die hohen Zugkräfte an den gekrümmten Membranrändern in Randgurte oder Randseile geleitet. Gurte werden festgenäht, Seile werden entweder in Membrantaschen geführt oder über Klemmvorrichtungen mit der Membran verbunden. Probleme ergeben sich an den Zwickeln, an denen die Randseile bzw. -gurte die Zugkräfte weiterleiten, die Membran oder das Netz aber nicht kontinuierlich weitergeführt werden können. Diese Stellen werden üblicherweise an der Membrane ausgespart und dort durch eine Aufdoppelung, ein Seil oder einen Gurt verstärkt.



12

Seile eines Netzes werden mit Seilklemmen am Randseil befestigt. Bei einer freien Randform werden die Zugkräfte aus der Membran in ein normalerweise *biegebeanspruchtes Randteil*, z. B. einen Rahmen, eingeleitet; hier werden Schlaufen-, Taschen- oder Klemmanschlüsse verwendet. *Hochpunkte innerhalb der Membranfelder*, die (innen) mit Stützen oder (außen) mit Aufhängevorrichtungen räumlich fixiert werden, sind nur bei sehr geringer Flächenkrümmung einfach zu bewältigen – zum Beispiel, indem die Stützenköpfe mit Tellern oder radialen Bügeln sehr flach ausgebildet werden oder die Membranbahnen in geeigneter Weise zugeschnitten und an den Nähten verstärkt werden. Bei stärkeren Krümmungen sind Hochpunkte jedoch aufwendiger zu detaillieren.

Ringe, Seilschlaufen oder – als »geschlossene« Variante – rosettenförmige Verstärkungen sind übliche Lösungen. Bei sehr starken Krümmungen müssen an den Hoch- oder Tiefpunkten konstruktionsbedingte Aussparungen in der Membrane in Kauf genommen oder gegebenenfalls wasserdicht überdeckt werden. Die »Hütchen«, die sich dazu eingebürgert haben, sind in den wenigsten Fällen als elegante Lösung zu bezeichnen (Bild 1). Auf *Grate* und *Kehlen* kann mit dem Zuschnitt der Membranbahnen reagiert und gegebenenfalls eine Tuchverstärkung vorgesehen werden. Zur Ausbildung von Nähten siehe auch Sobek/Speth, Seite 74.

Zur Gestaltung

Die größte Schwierigkeit, mit der man beim Gestalten von Seilnetz- und Membranbauten konfrontiert wird, betrifft den – meistens ungewohnten – Umgang mit geschwungenen Linien und Flächen. Im wesentlichen greift das klassische Gestaltungsrepertoire (Proportionen, Ornamente, Oberflächenbeschaffenheit) hier nicht, und auch der Blick ins Reich der Natur, der davon ausgeht, daß doch »schön« sein müsse, was die Natur hervorbringt, trägt: Weder Formen noch Materialien noch Strukturen lassen sich mir nichts, dir nichts in andere Dimensionen und Umfelder übertragen. So sehr sich die Konstruktionsweise von den hierzulande üblichen unterscheidet, so wenig lassen sich Gestaltungsprinzipien übertragen. Es ist auch wenig sinnvoll, nach neuen, abstrahierenden Raumstilbegriffen zu suchen, wenn doch jeder Ort nach seiner im Wortsinn eigenartigen Lösung verlangt. Diese Bauweise ist vielmehr auf eine eigene Erfahrungswelt angewiesen. Der Einstieg beginnt mit dem Anschauen und Kennenlernen von Bauten; in diesem Sinne sollen die Beispiele, die in dieser Ausgabe vorgestellt werden und – mit einer Ausnahme – in unseren Breiten gebaut wurden, anregen und zur Kritik herausfordern.

W. S., ub

Literatur

- Otto, Frei (Hrsg.), Zugebeanspruchte Konstruktionen. Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen. 2 Bde., Berlin, 1962–66
- Bubner, Ewald (Hrsg.), Membrankonstruktionen, Bde. 1, 2, 4, Köln-Braunsfeld
- Herzog, Thomas, Pneumatische Konstruktionen, Bauten aus Membranen und Luft; ein Handbuch für Architekten und Ingenieure, Stuttgart, 1976
- IL 5, »Wandelbare Dächer«. Veröffentlichungen des Instituts für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1972
- IL 9, »Pneus in Natur und Technik«. Veröffentlichungen des Instituts für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1977
- Bergermann, Rudolf und Werner Sobek, »Die Überdachung der Antiken Arena in Nîmes«, in: Der Bauingenieur 5/1992
- Sobek, Werner und Rudolf Bergermann, »Ein Dach für die Arena in Zaragoza«, in: db 1/92

- 11 »Lufthalle« auf der Weltausstellung in New York (Frei Otto)**
- 12 Hochpunkt des Seilnetzes der Voliere im Tierpark Hellabrunn, München**