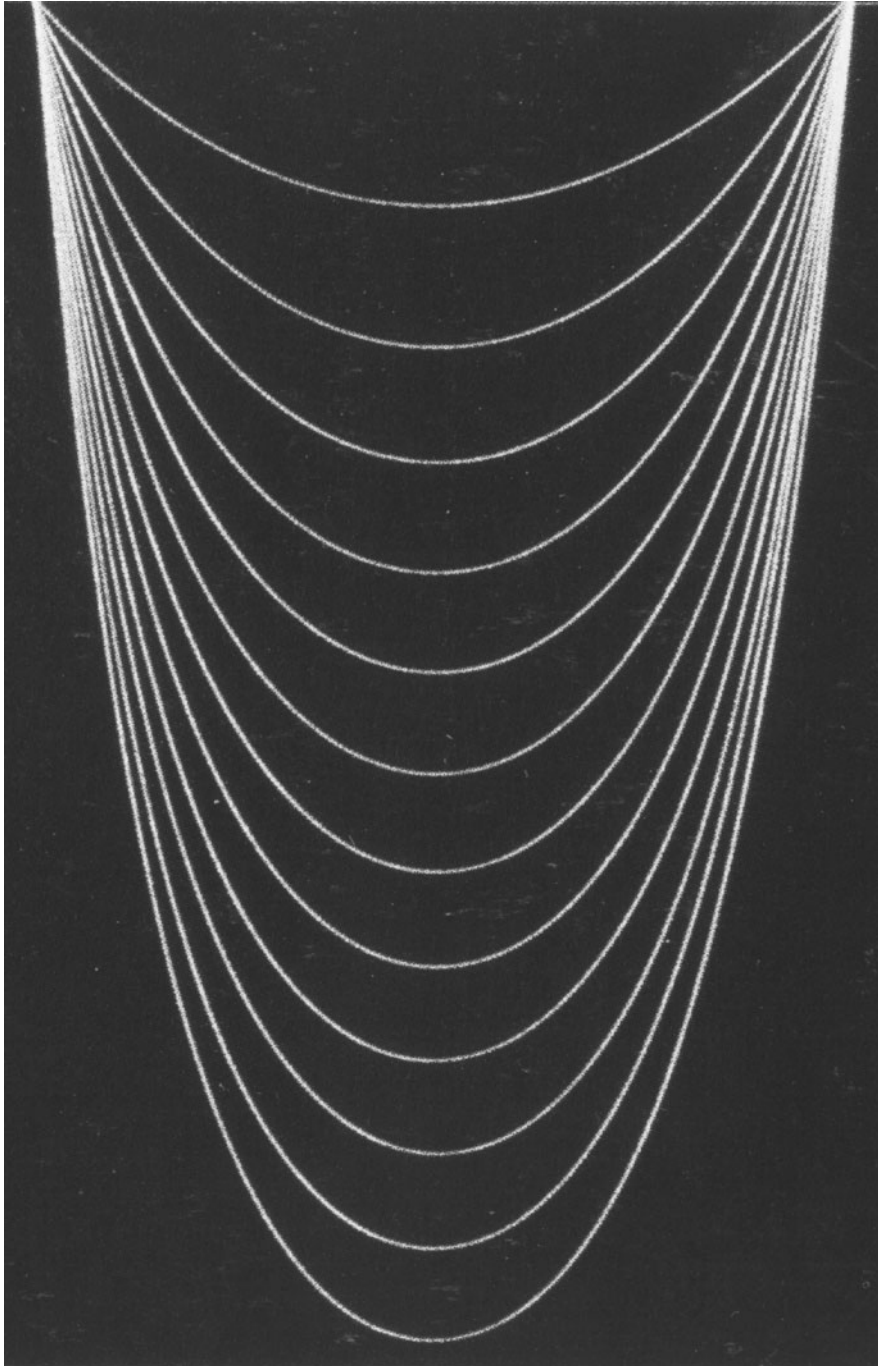


Membrankonstruktionen im Vergleich



1

Lehrstuhl: Tragwerkslehre III, Dipl.-Ing. Alexander Stahr, SS 2002
Bearbeitung: Michael Neuen, Mat.: 993076

- 1 Einleitung

- 2 Historische Entwicklung der Membrankonstruktionen
 - 2.1 Pneumatisch gestützte Membrankonstruktionen
 - 2.2 Mechanisch vorgespannte Membrankonstruktionen

- 3 Formen zugbeanspruchter Membrankonstruktionen
 - 3.1 Pneumatische Konstruktionssysteme
 - 3.11 Luftgetragene Konstruktionen
 - 3.12 Luftgestützte Konstruktionen
 - 3.12.1 Schlauchkonstruktionen
 - 3.12.2 Kissenkonstruktionen
 - 3.13 Pneus als Gusformen

 - 3.2 Mechanisch vorgespannte Konstruktionssysteme
 - 3.2.1 Segel
 - 3.2.2 Wellenfläche
 - 3.2.3 Bogenfläche
 - 3.2.4 Hochpunktfläche

- 4 Tragfähigkeit zugbeanspruchter Konstruktionen
 - 4.1 Vorspannung
 - 4.2 TRA
 - 4.3 BIC
 - 4.4 Reißlänge
 - 4.5 Zweiachsig beanspruchte Flächentragwerke
 - 4.6 Optimierung mit TRA und BIC

5 Material

5.1 Membranen

5.1.1 Fasern

5.1.2 Beschichtungen

5.1.3 Mechanische Eigenschaften von Geweben

5.2 Seile

5.2.1 Draht

5.2.2 Litze

5.2.3 Seil

6 Konstruktion

6.1 Membrankonfektionierung

6.2 Gründung

6.3 Kräfteableitende Elemente

6.4 Luftdruckerzeugung

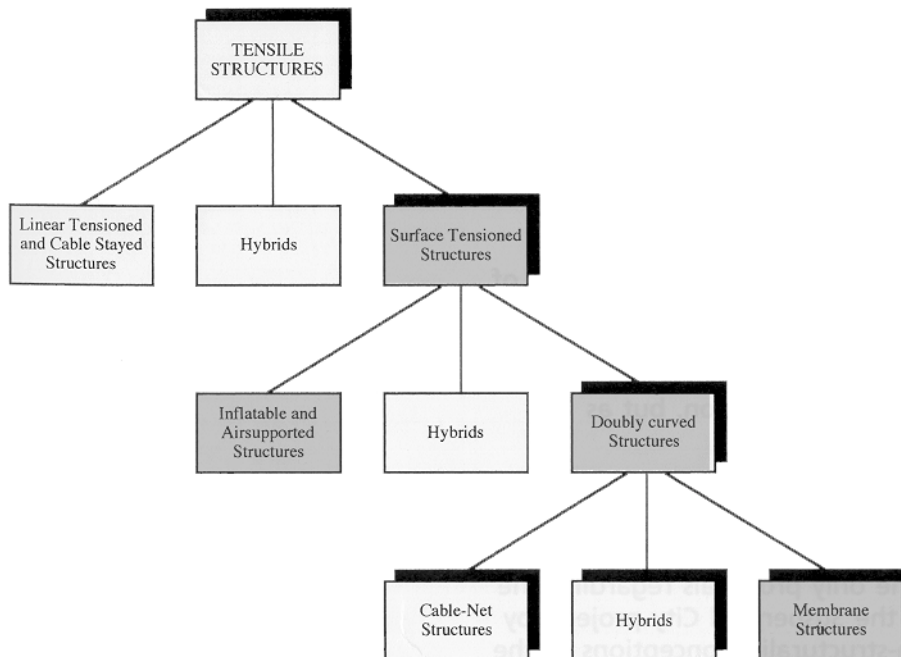
7 Schlussgedanken

8 Referenzliste

9 Bildquellennachweis

1 Einleitung

In diesem Aufsatz möchte ich zwei Konstruktionstypen innerhalb der großen Familie der zugbeanspruchten Konstruktionen untersuchen. Zum einen sind dies die aufblasbaren, luftgestützten Membrankonstruktionen und zum anderen die mechanisch vorgespannten Membrankonstruktionen.



2

Die immer größer werdende Popularität der mechanisch vorgespannten Konstruktionen im urbanen Kontext sowie die Weiterentwicklung und Verfeinerung und damit die möglichen neuen Anwendungen der pneumatisch vorgespannten Konstruktionen berechtigen zu einem direkten Vergleich der beiden verwandten Systeme.

2 Historische Entwicklung der Membrankonstruktionen

Die Anfänge der Geschichte der Architektur sind aufs Engste mit der Geschichte des Zeltbaus verbunden.

Wurden lange Zeit hindurch nur Tierhäute zum überspannen vorgefertigter Skelettbauten benutzt, so ist mit der Entwicklung der Web- und Knüpftechnik das Textil immer mehr zum maßgebenden Material für vielseitige Umhüllungen geworden.

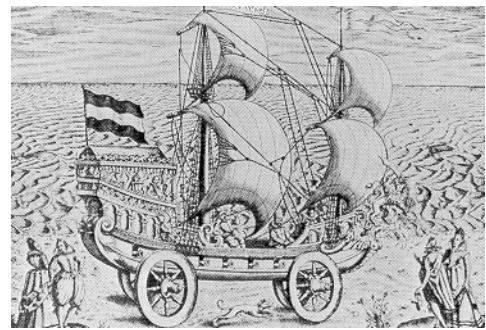
Anfänglich waren diese materiale nicht zugbeansprucht, sondern dienten lediglich als Hüllen oder offener Sonnenschutz, wie die römischen

Sonnensegel, welche als hängende Stoffbahnen an vorgespannten Seilkonstruktionen befestigt wurden.

Der Versuch, die pneumatisch und mechanisch vorgespannten Membrankonstruktionen in eine historische Traditionslinie der Zeltbaugeschichte einzugliedern, ist problematisch, da ihr Konstruktionsprinzip ein anderes ist. Natürlich befriedigen sie oft die gleichen Bedürfnisse wie früher die Zelte, doch gibt es eben diesen Unterschied, der prinzipiell durch die Bewusstwerdung der Potenziale von Membranen und einer stetigen technischen Entwicklung entstanden ist.

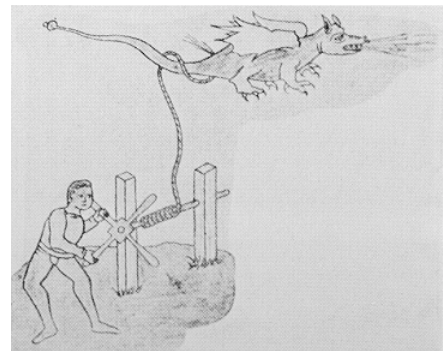
2.1 Pneumatisch vorgespannte Konstruktionen

Die erste uns wohl bekannte pneumatisch vorgespannte Konstruktion ist die des Segels. Normalerweise auf Schiffen angewendet geht aus einem Bericht hervor, dass bereits vor 4000 Jahren Amenemhet III. mit Achsen und Segeln « in die Wüste fuhr. Ein im Jahre 1599 erbauter Segelwagen, zeigt deutlich die Verwandtschaft zu Segelschiffen.



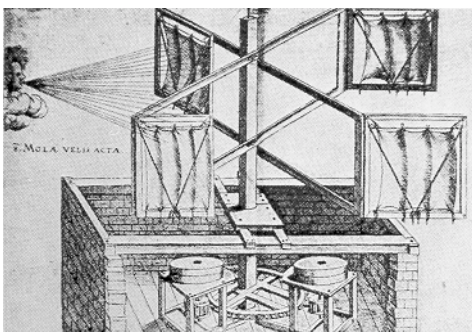
3

Schon seit Jahrtausenden kannte man Flächendraghen. Benutzt wurden sie unter anderem als Feldzeichen wie z.B. bei den Dakern. Diese Drachen bestanden aus offenen Metallköpfen und daran befestigten Membranschläuchen, die durch den Luftzug tierleibartig aufgebläht wurden.



4

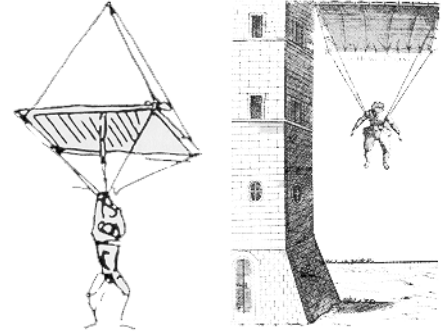
Eine neue Verwendung finden die Flächendraghen um 1752, als die Wissenschaftler Wilson und Franklin sie für atmosphärische Temperaturmessungen und zum Studium der Gewitterelektrizität einsetzten.



1595 entwarf der Italiener **Fausto Veranzio** ein Windrad mit Klappschaufeln zum Antrieb von zwei Mühlen. Hier sehen wir zum ersten mal durch Seile linear unterstützte Membranen.

5

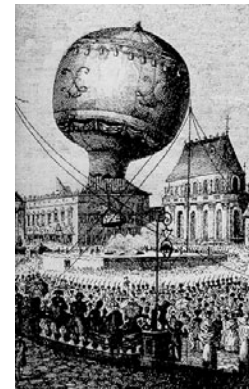
Knapp 100 Jahre zuvor skizzierte **Leonardo da Vinci** einen Fallschirm, bzw. die Idee eines Selben, da in seiner Skizze die Verformung durch die Windbelastung noch vernachlässigt wurde. Veranzio dagegen nimmt dieses Thema erneut in einer Zeichnung auf und unterstützt die Membrane wiederum durch lineare Seile.



6

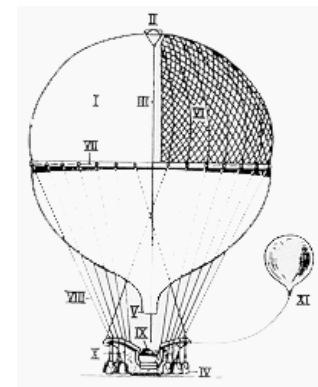
In einigen Illustrationen zu dem Buch *La Découverte Australe* von **R.d. la Bretonne**, 1781 werden phantastische Flugapparate gezeigt die mittels pneumatisch geblähter Membranen fliegen.

Als eigentliche Vorbilder für das moderne Bauen mit Pneu sind jedoch die Frei- und Fesselballone anzusehen. Mit dem Flug der **'Mongolfière'** im Jahre 1783, des wohl wichtigsten doch sicherlich nicht ersten Ballons, wurde eine bis heute andauernde Entwicklung auf dem Gebiet der pneumatischen Konstruktionen eingeleitet.



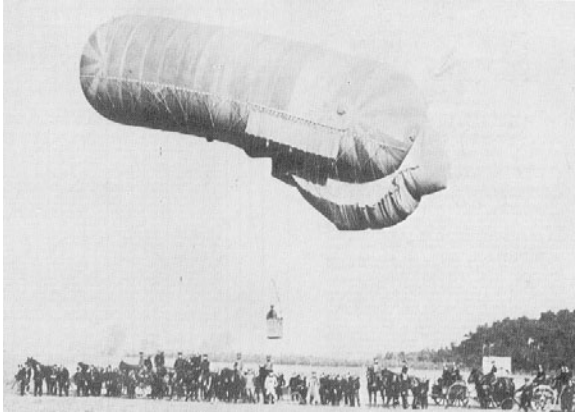
7

Schon zwei Monate nach diesem Flug ließ der Physiker **Jacques Alexandre César Charles** den ersten Wasserstoffballon starten. Die Hülle des Ballons bildete die Form einer Kugel und war reißfest und luftdicht. Sie bestand aus Seide, die innen mit Hilfe flüssigen Gummis verstärkt war. Die Gondel des Ballons war bereits an einem, den Ballon umspannendes Netz befestigt worden. Diese Innovationen waren maßgebend für die weitere Entwicklung der Ballonfahrt, so werden z.B. auch heute noch Wasserstoffballons zur Stratosphärenforschung eingesetzt.



8

Erst mit dem Aufkommen geeigneter Antriebsmittel wurde der Ballon weiterentwickelt zum Luftschiff.

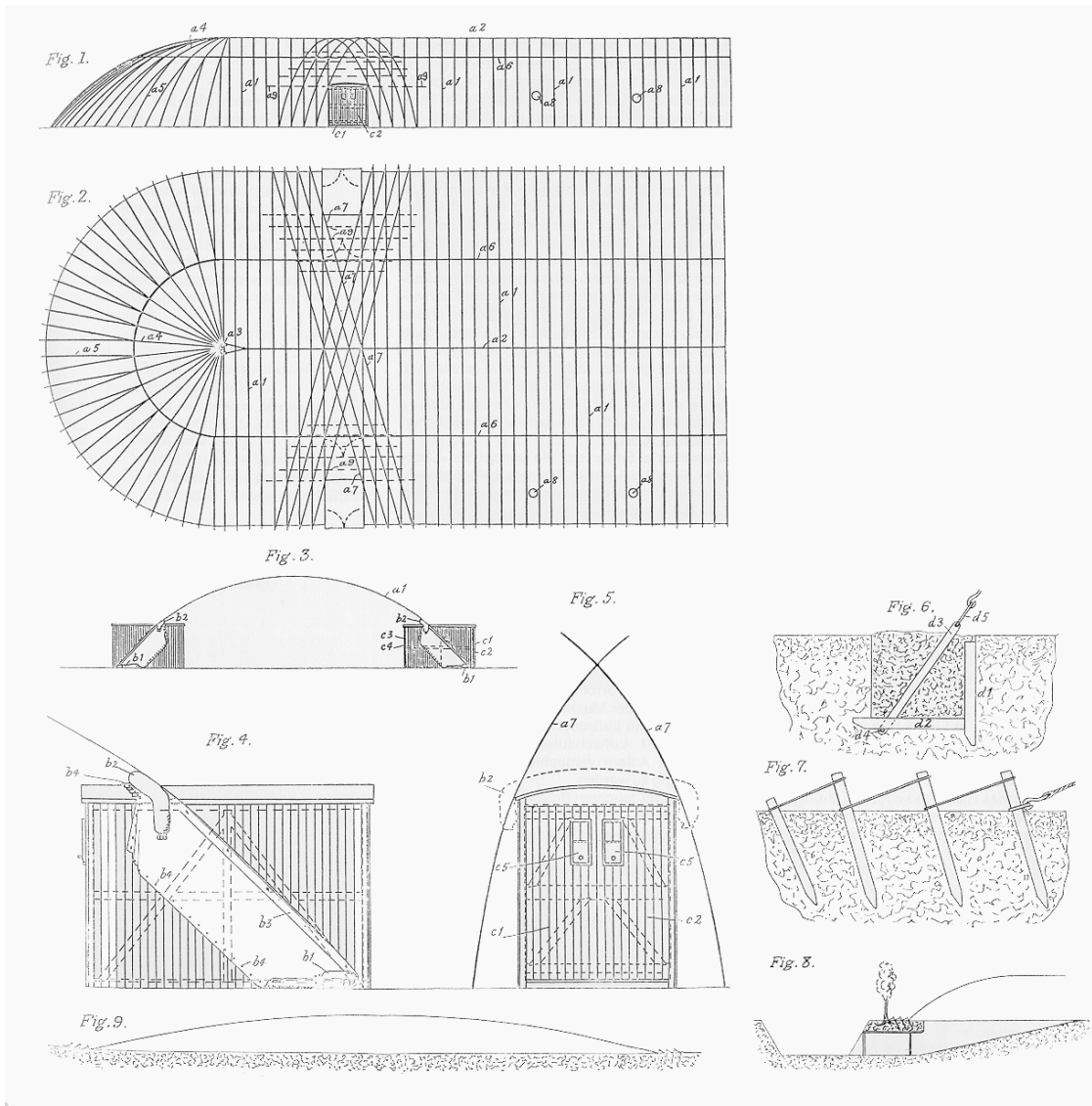


Das Luftschiff von **August von Parseval**, 1906 war das erste wirklich brauchbare und Lenkbare Luftschiff.

Die nachfolgenden Schiffe wie z.B. die Zeppeline waren eigentlich keine rein pneumatischen Konstruktionen. Ihre Form war lediglich eine aerodynamische Hülle welche die innen an der Konstruktion befestigten Gasballons umspannte.

9

Die Idee, das pneumatische Prinzip auch bei Gebäuden anzuwenden stammte von **F.W. Lancaster**, der das Prinzip 1918 zum Patent anmeldete. Lancaster



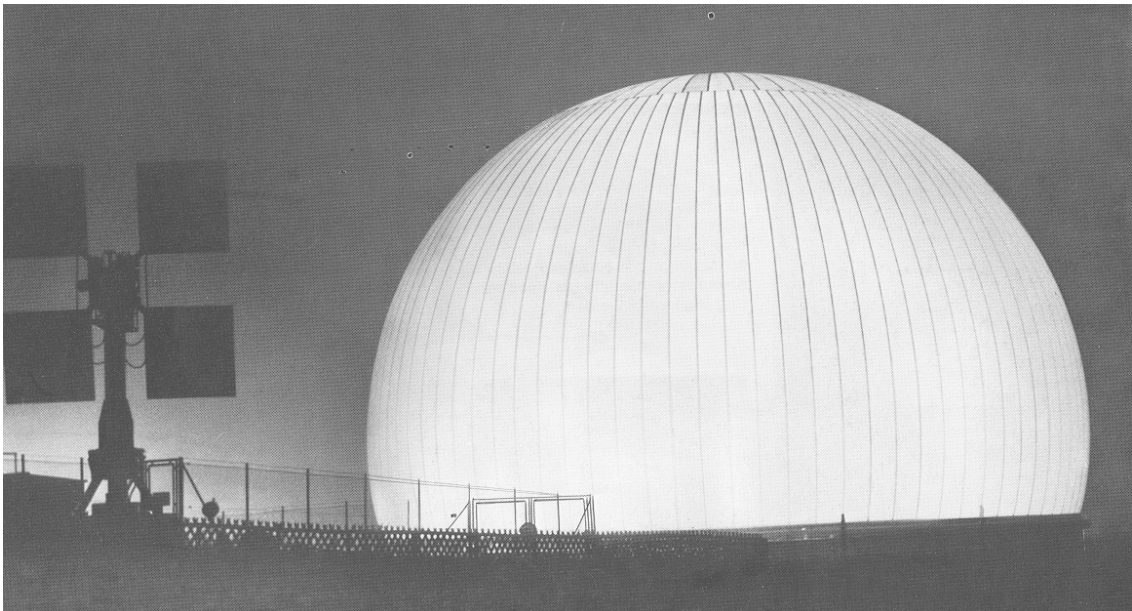
selbst hat jedoch nie die Möglichkeit gehabt selber eine pneumatische Konstruktion zu bauen.

10

Es dauerte hingegen noch fast 30 Jahre bis an die praktische Nutzung des Patentes gedacht werden konnte. Ein Grund dafür war die wohl auch durch den Krieg verlangsamte Entwicklung der plastischen Stoffe.

Im Jahre 1946 unternahm eine Gruppe von Wissenschaftlern der Cornell-University in Buffalo unter der Leitung von **Walter W. Bird** eingehende Untersuchungen zu leichten pneumatischen Bauten.

Die US-Luftwaffe hatte nach einer neuen Möglichkeit gesucht, die großen für die Antarktis geplanten Radarantennen vor der Witterung zu schützen.



11

Nahezu alle grundlegenden Arbeiten und Erkenntnisse, die der Entwicklung der pneumatischen Konstruktionen ihren Aufschwung gaben folgten aus der Zusammenarbeit zwischen der Cornell-University und der Luftwaffe.

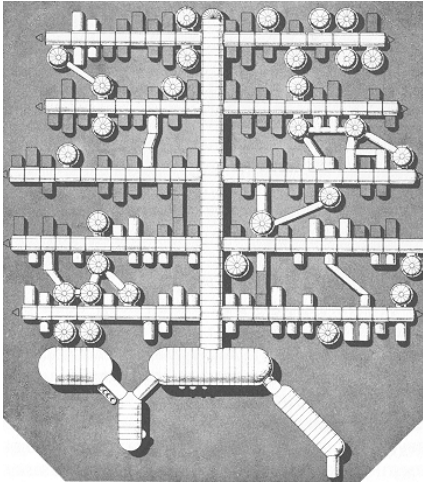
Die Einführung des 'Windkanals' ermöglichte die Erprobung der aerodynamischen Berechnungen am Model.

Neue synthetische Fasern wie Nylon und Dacron erzeugten ein Gewebe, dass mit ihrem Verhältnis von Gewicht zu Festigkeit, dem von Aluminium gleichkam.

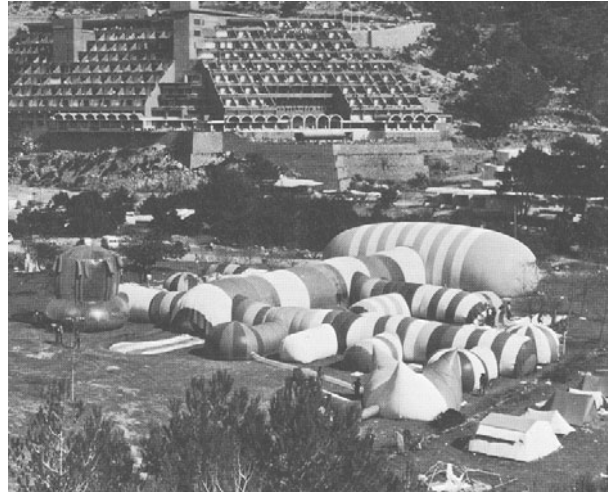
Durch ein einfaches Luftgebläse und eine automatische Steuerung konnte der nötige Druck von 0,65 libra je Quadratzoll (10-30 mm Wassersäule) - der ausreichte um den sphärischen Baukörper auch bei Windstärken von 200 MP/h zu erhalten - erzeugt werden. 1956 wurde die Firma '**Birdair Structuree, Inc**' gegründet, die seitdem an zahlreichen pneumatischen Bauten mitgewirkt haben und auch heute noch eines der renommiertesten Consulting Ingenieurbüros auf diesem Gebiet ist.

1962 erschien der erste Band des von **Frei Otto** herausgegebenen Werkes 'Zugbeanspruchte Konstruktionen', in dem er ein großes Kapitel den pneumatischen Konstruktionen widmet. Hier fasst er in detaillierter Form den Stand der Entwicklung zusammen und gibt damit die theoretische Grundlage für die nach dem ersten internationalen Kolloquium über pneumatische Konstruktionen von 1967 herrschende Experimentierfreudigkeit unter anderem auch der Pop-Szene.

Allseits versuchte man 'Environments' bei minimalem Materialaufwand und in kürzester Zeit selbst herzustellen.



12



13

Die Arbeiten von **Buckminster Fuller** sind an dieser Stelle erwähnenswert, nicht allein wegen ihres visionären Charakters - die Überdachung Manhattans - sondern auch wegen der ihrer Nutzung als Montagehilfen zur Errichtung von Aluminiumkuppeln.



Einen Höhepunkt in der Geschichte des Bauens mit Luft stellte 1970 die Weltausstellung von Osaka dar. Die dort vorgestellten Gebäude konnten sich durchaus mit den Pionierbauten früherer Weltausstellungen messen.

14



15



16



17

Durch die Weiterentwicklung der Materialien, im besonderen, der für die Membranen verwendeten Gewebe, ergeben sich heutzutage immer explizitere Anwendungsmöglichkeiten. 'Biosphere' und 'Mediadrom' sind nur einige Beispiele.

Die pneumatisch vorgespannten Konstruktionen sind heute die leichtesten Baukonstruktionen überhaupt und erlauben daher extreme Spannweiten zum



18

Beispiel die Überdachungen mehrerer Football und Baseball Stadien in den USA und Japan, nach dem Prinzip des US-Pavillon, entworfen von **David Geiger** zur Expo`70.

Sie haben von allen `Leichtkonstruktionen den höchsten Entwicklungsstand und ein hohes Maß an Verbreitung. Auch im Wasserbau und in der Klärtechnik finden Pneus als Behälter und Schlauchdämme Anwendung.

Als eine neue Art des pneumatischen Bauens, muss sicherlich die 1997 von Festo konstruierte Temporärhalle `Airtecture´ angesehen werden.



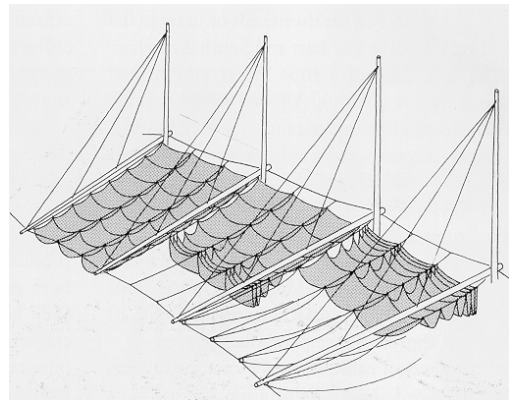
19

2.2 Mechanisch vorgespannte Membrankonstruktionen

Die Entwicklung der mechanisch vorgespannten Membrankonstruktionen war natürlich für lange Zeit mit der Entwicklung der pneumatischen Konstruktionen verbunden. Man findet ihren Ursprung weniger in den luftgeblähten Segeln als vielmehr in der Geschichte des Zeltes, obwohl sie genaugenommen einem anderen Konstruktionsprinzip folgen.

Blieb bei den pneumatischen Konstruktionen das konstruktive Prinzip das Gleiche und veränderte sich ihre Anwendung und damit ihre architektonische Bedeutung, so kann man bei den mechanischen Membrankonstruktionen feststellen, dass sich ihr konstruktives Prinzip über die Jahrhunderte verändert hat, nicht aber ihre architektonische Bedeutung. (Gottfried Semper)

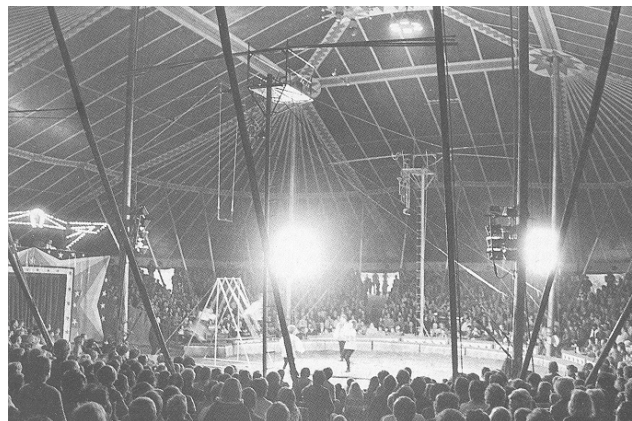
Die Sonnensegel der Antike waren an Gerüsten aufgehängte Tücher, die keinerlei Vorspannung besaßen.



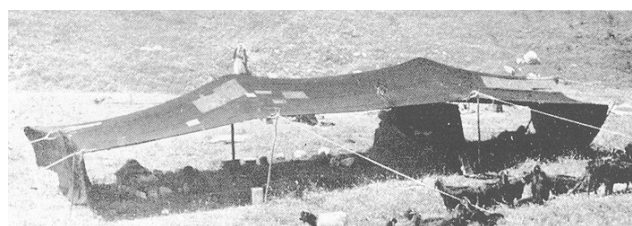
Auch die typischen historischen Zelte, wie sie auch heute noch bei vielen Naturvölkern gebräuchlich sind haben eine Primär- und eine Sekundärkonstruktion, also ein irgendwie geartetes Gestänge, über die man dann eine Haut aus Textilien oder tierischen Häuten legt. Diese Haut wird oft am Boden verankert und stabilisiert somit das Gestänge.

20

Wird der Sprung von den nicht vorgespannten zu den vorgespannten Membrankonstruktionen in Europa relativ spät, und zwar erst mit der Einführung des Viermast-Chapiteau als modernes Zirkuszelt vollzogen so findet man in Afrika bereits früh mit dem Beispiel der Lederzelte der Tuaregs ein Bindeglied zum modernen Membranbau.



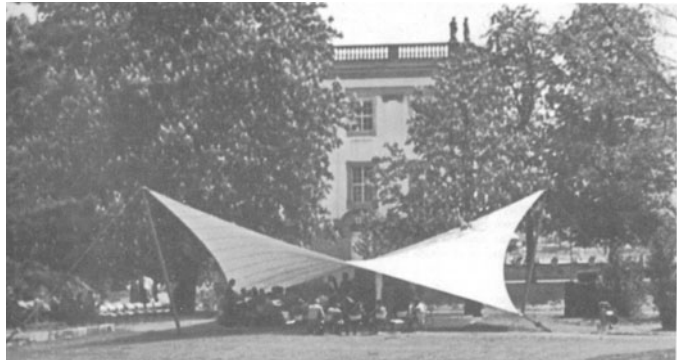
21



22

Was diesen modernen Membranbau auszeichnet ist die doppelt gekrümmte Membran. Dadurch entsteht die typische Sattelform der vorgespannten Membran, wobei sich die beiden Krümmungen gegenseitig stabilisieren. Wiederum ist es Frei Otto, der auf diesem Gebiet die Basis für eine weltweite Anwendung der vorgespannten Membranen geschaffen hat. In seiner Dissertation von 1954 bezeichnet er die mechanisch vorgespannten Membranen als die eigentlichen Zelte.

»Bei ihnen ist das Zelttuch an jeder Stelle sowohl positiv als auch negativ gekrümmt und steht ständig in beiden Wirkrichtungen unter Spannung. Es wirkt wie eine gekrümmte vorgespannte Membrane oder ähnlich wie ein vorgespanntes Seilnetz. Die einfachste Form ist das zwischen vier, nicht auf einer Ebene liegenden Punkten gespannte Zelttuch. «



23

Durch die immer größer werdende Effizienz der, im Membranbau verwendeten Textilien, verändert sich die Membrankonstruktion von einer ehemals temporären zu einer permanenten Bauart. Immer häufiger wird sie zum permanenter Teilstück (Nutzungserwartung ≥ 30 Jahre) eines sonst eher konventionellen Gebäudes.



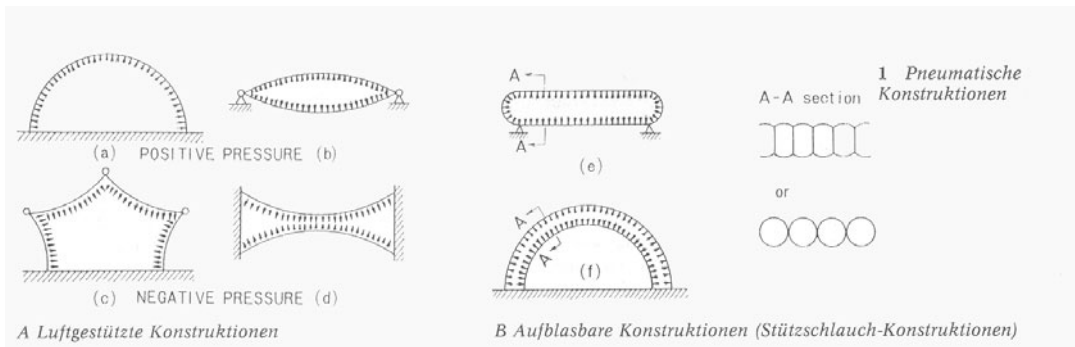
24

3. Formen zugbeanspruchter Konstruktionen

3.1 Pneumatische Konstruktionssysteme

Pneumatische Konstruktionssysteme haben mit Ausnahme der Unterdrucksysteme synklastische Formen. Es gibt drei Systeme pneumatischer Konstruktion. Es sind dies die **luftgetragenen Konstruktionen**, in denen der Luftüberdruck im gesamten Innenraum der Konstruktion wirkt, die **luftgestützten Konstruktionen**, in denen der begehbare Innenraum drucklos ist und die Tragfunktion von luftgefüllten Körpern verschiedenster Form übernommen wird und **versteifende oder**

versteifte Konstruktionen (Gussformen), bei denen die vorgespannte Membran durch, beispielsweise Beton versteift wird.



25

3.11 Luftgetragene Konstruktionen (Ballonkonstruktion)

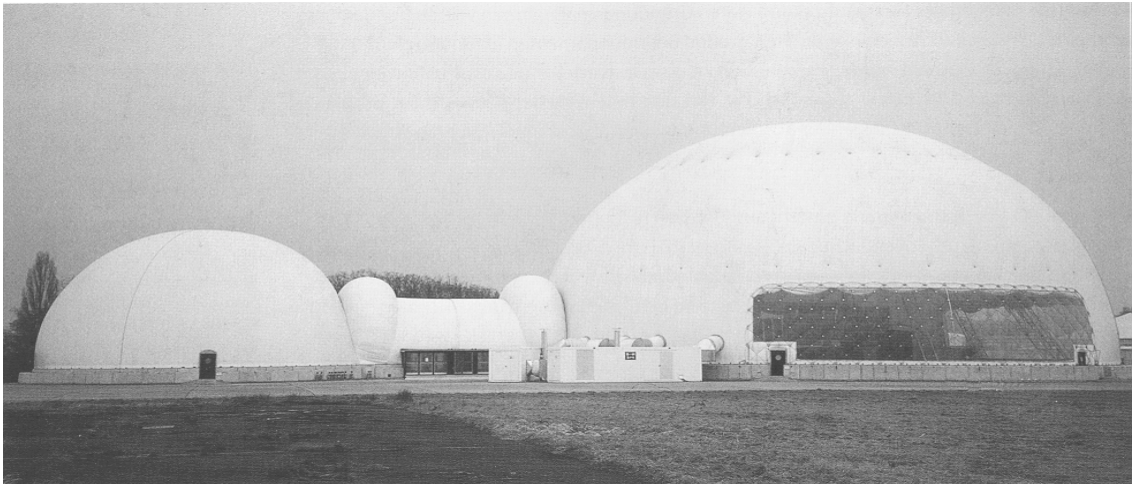
Diese sind sogenannte Niederdruckkonstruktionen bei denen sich der im begehbaren Inneren der Konstruktion befindliche Überdruck das eigentliche Konstruktionselement ist. Die Membran ist lediglich Trennelement zwischen dem Luftpolster und der Last (Regen, Wind, Schnee, Eigengewicht und gegebenenfalls unterstützende Seilnetze). Die Membran selbst steht nicht unter Spannung.

Ihr Konstruktionsprinzip ist denkbar einfach. Über ein im Idealfall ebenes Gelände wird eine vorher zugeschnittene und konfektionierte Membran ausgelegt. Der Rand der Membran wird am Boden gesichert um ein Aufheben der Hüllenmembran beim Aufblasen zu verhindern. Diese Sicherung erfolgt normalerweise durch Verankerung am Untergrund oder durch Schwerlastfundamentierung in Form von Betonfundamenten, Sandsäcken, Wasserschläuchen oder Ähnlichem. Der zum aufblasen der Membran nötige Luftdruck von 10-30 mm Wassersäule wird oft durch ein einfaches Gebläse erzeugt. Das Gebläse ist nahezu ständig in Betrieb, da durch undichte Stellen an den Türen (Schleusen) und Nähten mit geringen Luftverlusten zu rechnen ist.

Das Erscheinungsbild der luftgetragenen Konstruktionen ist variabel. Als hauptsächliche geometrische Körper treten die Kugel, der Zylinder, der Kegel und die Tropfenform auf, wobei Kugel- und Halbkugelkuppeln das Volumen mit der geringsten Oberfläche (Minimalfläche) einnehmen.

Mit Seil- und Drahtnetzen kann die Form weiterhin für bestimmte Nutzungen manipuliert werden.

Beispiel : **Mediadrom für das ZDF**



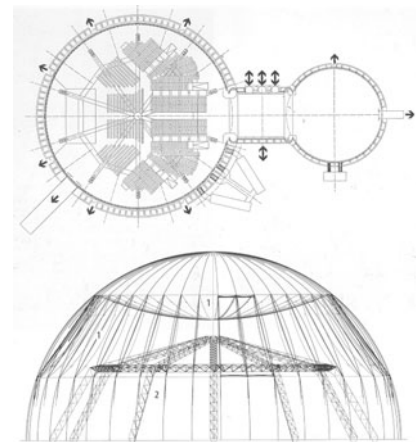
26

Das Mediadrom aus dem Jahre 1995 ist eine mobile Pneuhalle und wird zur Ausrichtung von Unterhaltungsshows genutzt. Die gesamte, überbaute Fläche beträgt 2700m². Bis zu 3000 Personen können an den Veranstaltungen teilnehmen. Das Gebäude kann innerhalb einer Woche durch eine speziell ausgebildete Crew von 50 Personen auf- und abgebaut werden.

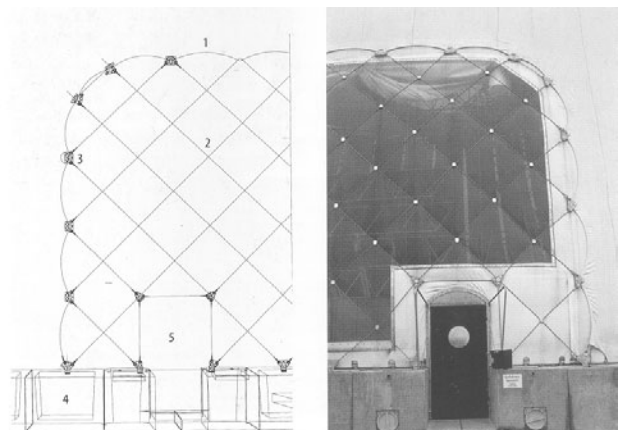
Das Tragwerk ist eine reine Traglufthalle nach DIN 4134. Die Membrankuppeln sind durch den Luftinnendruck von 30 – 50mm Wassersäule vorgespannt. Eine windabhängige Steuerung regelt die Luftdruckerzeugung.

Die Gründung erfolgt durch wannenförmige Stahlbetonfertigteile, welche nach der Montage mit Wasser gefüllt werden. Durch den Gebrauch von Wasser als Gründung reduziert sich das anfänglich errechnete Transportgewicht von 900 t um ein Drittel.

Als Membran wurde ein semi-transparentes, PVC beschichtetes Polyestergewebe verwendet. Die Membranfenster sind aus ET-Folie mit einer Dicke von 200µm. Um die in der großen Halle auftretenden Zugkräfte aufnehmen zu können wurden die Fenster durch ein Seilnetz mit einer Maschenweite von 1m x 1m verstärkt.



27



28

3.12 Luftgestützte Konstruktionen

Bei der luftgestützten Konstruktion wird die tragende Funktion durch unter Hochdruck stehende Körper übernommen. Diese Körper können auf vielfältige Art miteinander verbunden werden um Räume zu schaffen.

Luftschleusen sind nicht notwendig, da die Innenräume den normalen Umgebungsluftdruck haben.

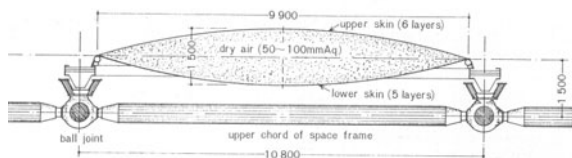
Man unterscheidet zwei Typen von luftgestützter Konstruktion, die **Kissenkonstruktion** und die **Schlauchkonstruktion**

3.12.1 Kissenkonstruktionen

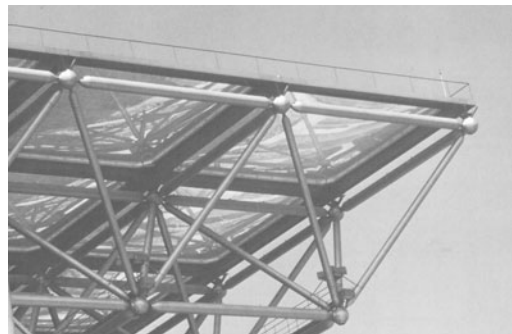
Kissenkonstruktionen entstehen, wenn man zwei Membranen luftdicht miteinander verbindet und sie dann aufbläst. Ihre Form ist vielfältig. Von runden bis zu vieleckigen Kissen findet man jegliche Form. Sie werden als Hebewerkzeuge eingesetzt, sowie in vielförmiger Weise für großflächige



29

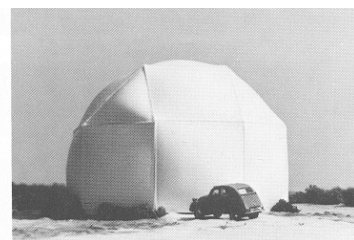
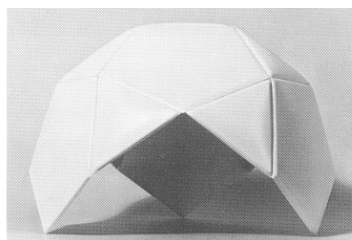
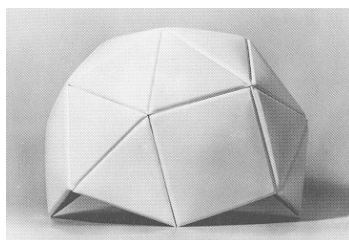


30



31

Überdachungen bei der es besonders auf die Leichtigkeit der Konstruktion ankommt. Die Kissenkonstruktion kann durch Randseile, Stäbe, Bögen und Ringe gehalten werden, wobei diese Elemente die druckbelasteten sind und dementsprechend ausgesteift werden müssen



32

Beispiel: **Stierkampfarena-Dach in Madrid**



33



34

Das Dach aus dem Jahre 2000 setzt sich aus einem festen und einem beweglichen Teil zusammen: Der äußere, breite, ringförmige Abschnitt ist fest aufgelagert, der innere Abschnitt – ein Kissen – über kreisförmigem Grundriss ist in seiner Höhenposition beweglich.

Der Vorteil des pneumatischen Kissens liegt in seiner leichten eleganten Erscheinung und seiner Wirtschaftlichkeit, weil das Flächengewicht nur rund fünf Kilogramm pro Quadratmeter beträgt.

Das äußere feste Ringdach ist ein Kugelausschnitt von 25 Metern Breite, sein Außendurchmesser beträgt 100 Meter. Dieses Schalentragerwerk ist aus radial und tangential verlaufenden Stahlprofilen aufgebaut, die mit Diagonalstäben ausgesteift werden und mit Aluminiumblech verkleidet sind. Der bewegliche Teil des Daches ist ein leichtes, pneumatisch gestütztes Membrankissen, das zwischen einem Druckring aus Stahl gespannt ist.

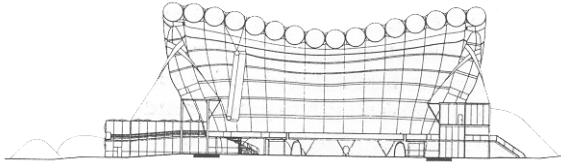
Die obere Membran besteht aus weißem PVC-beschichteten Polyester, die untere aus vollkommen transparenter Folie. Diese kann bei einem Innendruck von 4 Millibar nicht frei über 50 Meter weit gespannt werden; sie wird deshalb von einem leichten, am Druckring befestigtem Seilnetz gestützt. Mit knapp 2000 Quadratmetern Fläche ist die Folie wohl die Größte ihrer Art auf der Welt. Der Raum zwischen den Membranen wird mit Luft gefüllt – mit einem Überdruck, der die Membrane auch unter Schnee- und Windlast stabil hält. Ursprünglich sollten beide Membranen transparent sein. Allerdings scheint in Madrid die Sonne oft, lang und intensiv – weswegen für die obere Membran ein semi-transparentes Material gewählt wurde. Es lässt immer noch genug Licht durch, um Zeitung lesen zu können. Außerdem wurde mit dieser Materialwahl ein eindrucksvoller Kuppel-effekt erzeugt, weil die untere Membran vor der semi-transparenten oberen Membran optisch fast völlig verschwindet. Die Dramatik des Kissenhebens wird durch die schnell zunehmende Helligkeit im Innenraum deutlich verstärkt.

(Quelle für Bilder und Text

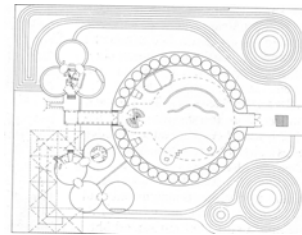
http://www.tensinet.com/documents/magazines/Arena_Madrid_db.pdf)

3.12.2 Schlauchkonstruktionen

Darunter versteht man Hochdrucksysteme pneumatisch stabilisierter Membrantragwerke, die aus schlauchartigen Elementen bestehen.



35



36

Diese Elemente weisen in eine Richtung eine sehr starke, in die andere Richtung jedoch eine sehr geringe oder sogar gar keine Krümmung auf. Sie übernehmen oft die Funktion eines Balkens oder Bogens. Deshalb ordnet man sie auch in den Stabtragwerken zu.

Da die Membranen dieser Tragwerke nur Zugkräfte aufnehmen können muss die bei Belastung entstehende Druckspannung durch eine Vorspannung der Membranen ausgeglichen werden. Die dafür benötigte Druckdifferenz liegt zwischen 2000 und 70000 mm Wassersäule und ist damit 100-1000 mal so groß wie bei den sonst üblichen Niederdrucksystemen.

Aus den in der Tabelle beschriebenen Merkmalen der pneumatischen Hochdrucksysteme ergeben sich 9 verschiedene Konstruktionssysteme. Diese können wiederum in verschiedene Tragwerkstypen, z.b. den 'Balken' etc. , und später dann in die einzelnen Tragwerksformen aufgeteilt werden.

Generell lässt sich sagen, dass die Hochdrucksysteme die gleichen Tragwerkssysteme, -typen, und -formen aufweisen wie die Stabtragwerke. Ihre Anwendung ist nur in seltenen Fällen zweckmäßig und wurde erst in jüngster Zeit durch das Projekt 'Airtecture' wieder aktuell.

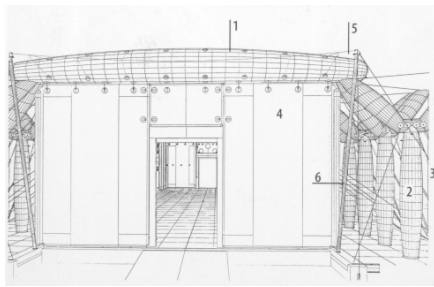
Beispiel: **Airtecture**



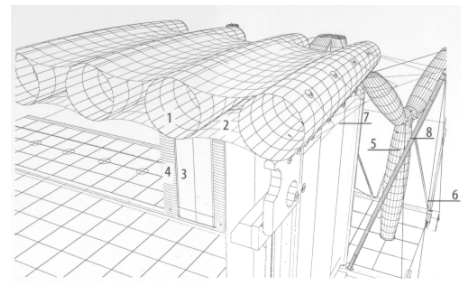
37



38



39



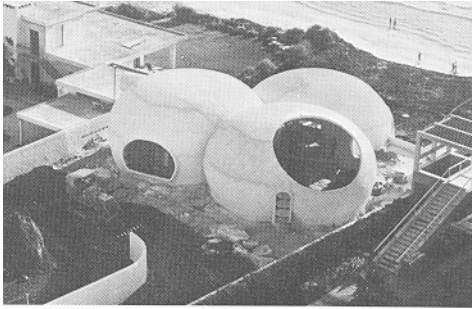
40

Dieses schlauchgestützte Gebäude aus dem Jahre 1997 der Firma Festo ist die erste pneumatische Konstruktion mit kubischem Innenraum. Bei einer überbauten Außenfläche von 800 m² entsteht ein Innenraum mit 375 m² Grundfläche. Ihr Gewicht liegt bei nur 7,5 Kg/m². Sie besteht aus 330 einzelnen Luftelementen die in 6 Arten von Bauteilen aufgeteilt sind. Diese sind: Wandelemente, transparente Fensterkissen, Gabelstützen, Dachträger, semi-transparente Zwischenmembranen und pneumatische Zuelemente, die sogenannten Muskeln. Die Luftelemente haben unterschiedliche Innendrucke. So haben zum Beispiel die Dachträger, auch Airbeams genannt einen Druck von 500 mbar. Die sie umschließenden Zwischenmembranen dagegen haben einen Unterdruck von 2,5 mbar. Dieser Wechsel von Überdruck und Unterdruck erzeugt eine ausgesteifte Decke. Bei unterschiedlicher Windbelastung reagieren die Muskeln. Ihr Innenruck variiert zwischen 0,3 – 1 bar und reguliert dadurch ihre Zugkraft. Die zweiwandigen Wandelemente haben einen Innendruck von 500 mbar. Um die gleichmäßige Distanz der parallelen Wandmembranen zu gewährleisten, werden diese durch 72000 Distanzfäden pro m² im Lot gehalten. Eine Besonderheit ist außer der zum ersten Mal geschaffenen kubische Form von Airtecture, die Möglichkeit, aktiv auf Wind- und Schneelasten reagieren zu können. Als übergeordnetes Steuersystem wird eine programmierbare Steuerung eingesetzt, die mit den einzelnen Steuereinheiten (Baelemente) und der angeschlossenen Wetterstation über eine Datenleitung kommuniziert. Entsprechend der Klimaverhältnisse errechnet das System den für jedes Baelement benötigten Druck. Die gesamte Halle, incl. Service-Komponenten, wiegt nur 6 t und kann somit schnell mit nur einem 40-ft Container transportiert werden.

3.13 Pneus als Gusformen

Schon während des 2. Weltkrieges, versuchte der Ingenieur **W.Neff**, Gebäude, durch Aufspritzen von Beton auf Gummiballons herzustellen. Leider gelang der Versuch aufgrund technischer Probleme nicht. Man konnte damals nicht den nötigen konstanten Innendruck des Ballons erzeugen, wodurch es zu Rissen und Deformationen in den aufgetragenen betonschalen kam.

Erst im Jahre 1971 erfuhr diese Idee durch den Israeli **Haim Heifetz** seine technische Ausreifung. Er entwickelte das 'Domecrete'- verfahren, wobei auf



41



42

Hochdruckgebilden von der Größe eines Hauses 15mm dicke Schichten hochwertigen Betons von Hand aufgetragen wurden. Nach Erreichen einer Gesamtstärke von 3-6 cm konnte bereits nach 90 Minuten die Schalung entfernt werden. Auf diese Weise wurden in weniger als einem Tag Wohnhäuser einschließlich Vermiculite Dämmschicht, Innen- und Außenputz, Elektro- und Wasserinstallationen, sowie Fenster und Türen hergestellt.

Weitere Verschalungssysteme wurden unter anderem von den Firmen Bayer AG, P.Frankenstern & Sons, Ltd. und Basic Products Development CO entworfen.

Doch nicht nur zur Errichtung von Wohn- und Arbeitsstätten werden die Verschalungstechniken durch Pneus angewendet.

Bei der Herstellung von Betonkanälen mit großem Querschnitt, haben sich die pneumatischen Verschalungen als besonders wirtschaftlich erwiesen.



43

3.2 Mechanisch vorgespannte Membrankonstruktionen

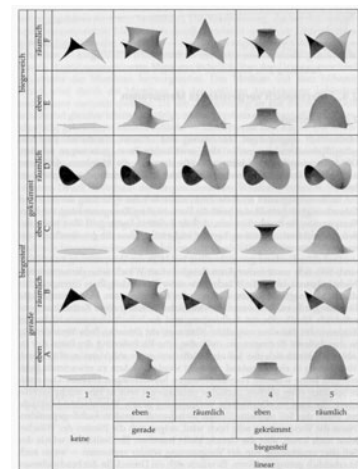
Mechanisch vorgespannte Konstruktionssysteme haben antiklastische Formen.

Sie sind daher sattelförmig oder bilden ein hyperbolisches Paraboloid.

Im Gegensatz zu synklastischen Formen, bei denen sich die Mittelpunkte der Membrankrümmungen auf der gleichen Flächenseite befinden, sind bei den antiklastischen Formen die Mittelpunkte der Hauptkrümmungsradien auf unterschiedlichen Seiten der Fläche zu finden. Durch die doppelte, gegenläufige Krümmung wird die Konstruktion stabilisiert. Um dies zu erreichen ist eine Vorspannung der Membran unbedingt notwendig.

Eine gewünschte Vorspannung ist allerdings nicht mit jeder beliebigen Form möglich.

Daraus ergeben sich bestimmte Typen einer vorgespannten Membrankonstruktion.

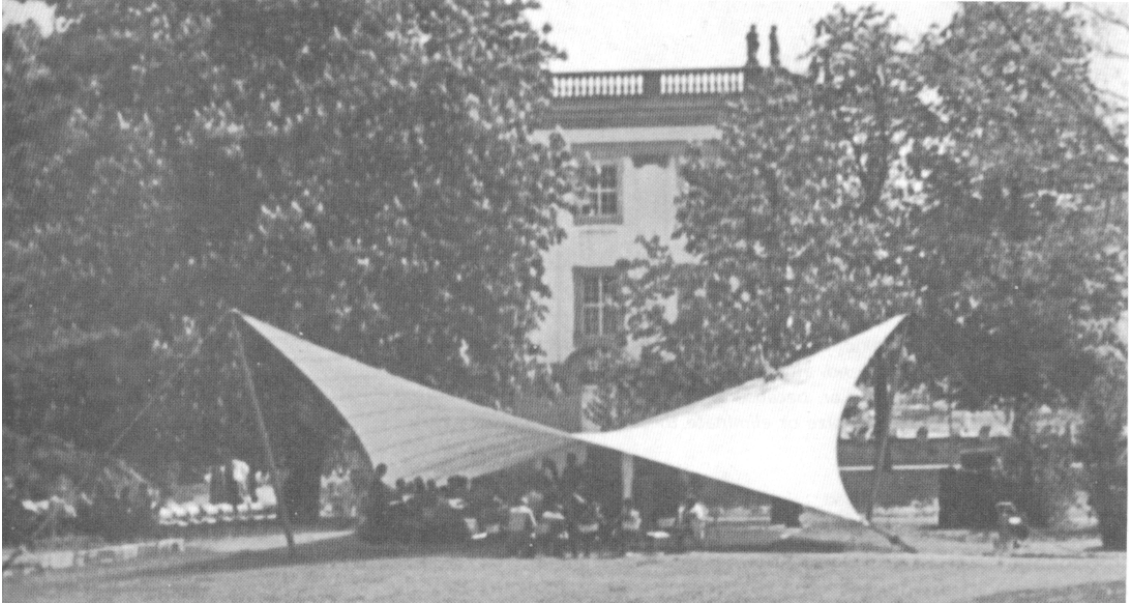


44

3.2.1 Segel

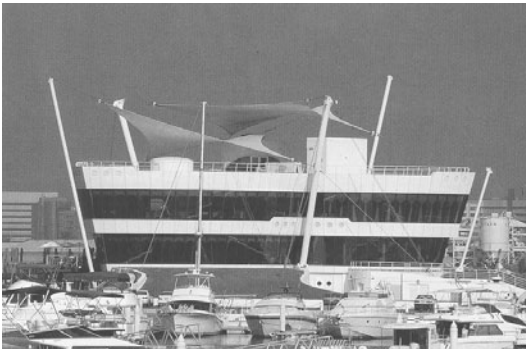
Das Segel wird auch Vierpunktfläche genannt. Sie ist die einfachste Membranfläche über einem quadratischen oder rautenartigen Grundriss. Die Ränder sind oft als Seilränder ausgebildet, wobei die Seile oft durch sogenannten Randseiltaschen geführt werden.

Es hat vier Eckpunkte, die sich aufgrund der Notwendigkeit der Bildung einer antiklastischen Form auf unterschiedlichen Ebenen befinden müssen.



45

Beispiel: **Dubai Creek Yacht Club**

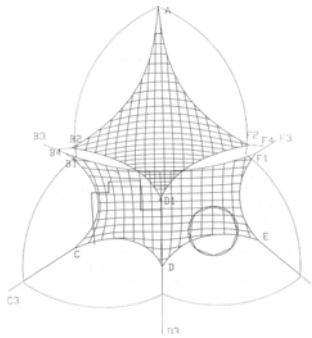


46

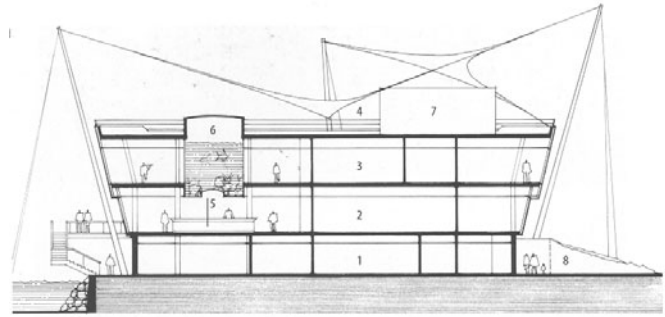


47

Das 1992 gebaute Dachtragwerk ist eine selbsttragende vorgespannte Gewebemembran. Die Kräfte werden durch Randseile, welche in Membrantaschen verlaufen über Klemmplatten und kurze zur Feinabstimmung nötige Zugglieder auf die Masten übertragen. Die Masten sind eigentlich für das Dach zu groß, doch passen sie proportional zum Gesamtgebäude. Sie werden durch Doppelseile (Edelstahl) mit den in der Erde aber auch teilweise Unterwasser liegenden Beton-Schwergewichtsfundamenten verbunden.



48



49

Die Dachmembrane bestehen aus PTFE-beschichteten Glasfasergeweben. Da die Segel sehr flach liegen treten an den Eckpunkten starke Kräfte auf, die über die schon erwähnten Klemmplatten und die Doppelseile weitergeleitet werden.

3.2.2 Wellenfläche

Die Membranoberfläche spannt sich wellenförmig zwischen hohen und tiefen Linienstützungen, wobei es sich meistens um Kehl- und Gratseile handelt. Sie können parallel zum Grundriss verlaufen oder aber auch radial, wie bei der Kreuz- und Sternwelle von einem gemeinsamen Mittelpunkt aus.

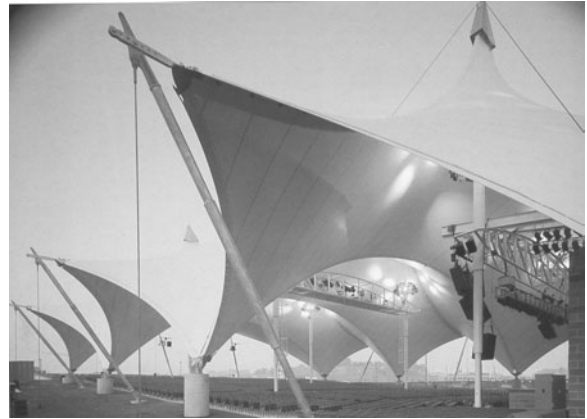


50

Beispiel: **Pier Six**



51



52

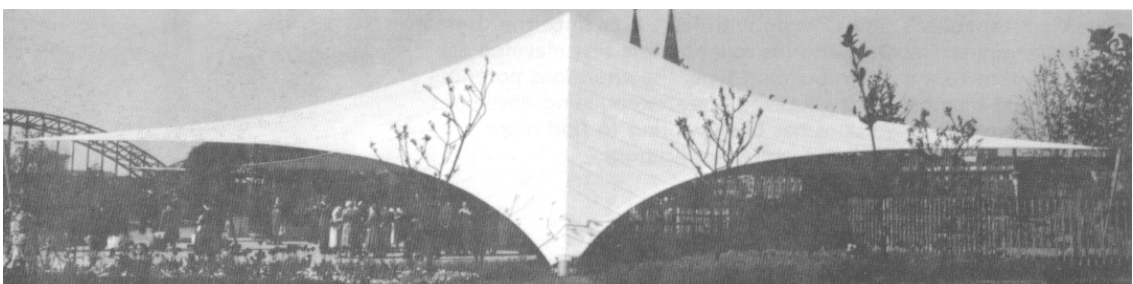
Die Geschichte von Pier Six zeigt deutlich die hohe Akzeptanz sowie die noch heute steigende Popularität von Membrankonstruktionen, besonders im Unterhaltungsbereich. 1981 wurde die ursprüngliche Konstruktion für 2000 Zuschauer konzipiert. Die damals verwendete Membran hatte eine Lebenserwartung von fünf Jahren, doch wurde sie aufgrund der großen Beliebtheit der Einrichtung und der über die fünf Jahre hinausgehenden konstruktiven Sicherheit erst nach 10 Jahren durch die heutige, leicht modifizierte Version von Pier Six ersetzt. Die 1991 errichtete Membrankonstruktion bildet eine sogenannte Wellenfläche und bietet Platz für 3500 Zuschauer.

Die Membran besteht aus einem mit Vinyl beschichteten Polyestergewebe. Mit einer Lebenserwartung von 15-18 Jahren.

Durch seine Lage ist Pier Six zu einem der Wahrzeichen Baltimores geworden.

3.2.3 Bogenfläche

Hier wird die Membranoberfläche durch einen oder mehrere druckbelastete Bögen oder ähnliche Rahmen aus dem Grundriss heraus geformt. Es entstehen sehr rundliche Formen, die sich einer großen Beliebtheit erfreuen, da diese Formen besonders für großflächige Überdachungen auf einem rechtwinkligen Grundriss geeignet sind.



53

Beispiel 1: **Dynamic Earth**



54



55

Dynamic Earth ist ein 1999 am Fuß des Arthur's Seat erbauter, edukativer Unterhaltungskomplex in Edinburgh. Das Gebäude besteht aus drei Teilen. Zum einen aus dem historischen Unterbau, dann dem neuen Amphitheater und schließlich das große Bogenzelt. Die sieben Bögen führen nicht direkt bis zum Boden, sondern werden durch vier Mastenpaare getragen, wobei die drei, jeweils inneren Bögen durch Seile und die vier, jeweils äußeren Bögen direkt getragen werden. Dadurch ergibt sich ein Freiraum zwischen Membran und Unterbau welcher mit einer Glasverkleidung geschlossen wurde.



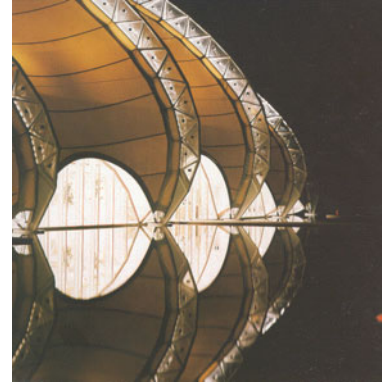
56



57

Die Membran besteht laut Bauherr aus einem PTFE beschichtetem Glasfasergewebe. (Das `handling on site` war nicht gerade von der bei diesem Material gewünschten Vorsicht bestimmt) Die Lebenserwartung der Membran übersteigt 30 Jahre. Die auf die einzelnen Bauelementen einwirkenden Kräfte sind enorm. Dadurch war eine sehr massive Gründung notwendig. Die Diskrepanz zwischen scheinbarer Leichtigkeit und wirklichem Gewicht pro m² ist groß. Das Erscheinungsbild entspricht nicht mehr der Wahrheit und das Gebäude wurde deshalb von den ansässigen Architekten mit gemischten Gefühlen aufgenommen. Dennoch ist es ein bewundernswürdiges Bauwerk, welches mit seinem Erscheinungsbild den barocken Kanon bereichert.

Beispiel 2: Forschungslabor Vanafro



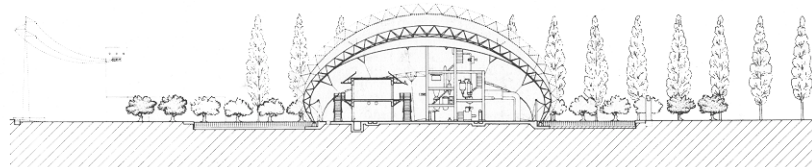
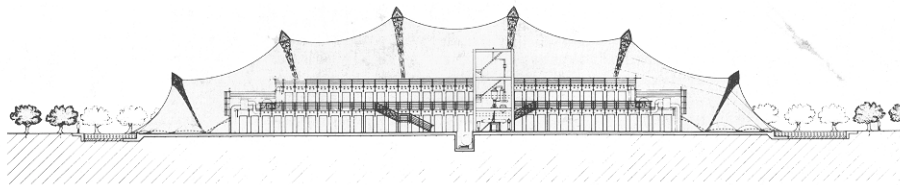
58

59

Die äußere Hülle, des 1992 fertiggestellten Gebäudes, besteht aus sechs, verschieden großen Dachmembranen, sowie tragende Fachwerkbögen in Korbbogenform. Der dreieckige Querschnitt der Träger ist über die Bogenlänge von unterschiedlicher Größe. Die Bögen sind außerdem mit einer durchsichtigen PVC-Folie überspannt. Diese bietet zum einen, einen guten Korrosionsschutz und macht die Bögen gleichzeitig zum tageslichtspendenden Element.

Die Dachmembran ist zwischen den Bögen und dem am Fuß der Bögen rundlaufendem Randseil gespannt. Sie besteht aus einem PVC beschichteten Polyestergewebe mit einer Reißfestigkeit von 150 kN/m (Typ 4).

Hinter den Randseilbögen schließen ebene, bogenförmige Glasfassadenelemente die Konstruktion ab.

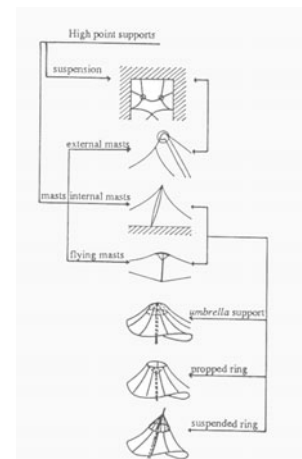


60

Eine durchgehende Stahlbeton-Platte bildet das Fundament wobei die Bögen auf aus der Platte herausragenden Widerlagern in Wasserhöhe stehen.

3.2.4 Hochpunktfläche

Sie sind in ihrer Grundform den klassischen Zelten am ähnlichsten. Innerhalb der Grundrissfläche sind ein oder mehrere Hochpunkte, d.h. durch druckbelastete Stäbe, Stützen oder schirmähnlichen Gebilden erzeugte Auflagepunkte für die Membran, in oft, aber nicht notwendiger Weise, unterschiedlicher Höhe angeordnet. Dabei müssen diese Stützen nicht unbedingt aus der Grundfläche erwachsen. Sie können ebenso durch Seile, welche von einer Primärkonstruktion abhängen gestützt werden. Hat eine Konstruktion relativ viele und in der Höhe unterschiedliche Hochpunkte, so bezeichnet man die darüber laufende Membrane als Buckelfläche.

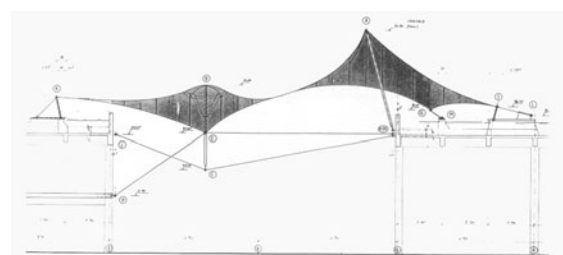


61



62

Beispiel 1: Schlumberger Werke, Paris



63

Der Umbau der Schlumberger Werke von 1985 zeigt eines der ersten Projekte, bei denen eine Membrankonstruktion für die Neugestaltung eines wichtigen städtischen Raumes verwendet wurde.

Die verwendete Form der Membran ist eine sogenannte Buckelfläche. Sie besteht aus einem PTFE beschichtetem Glasfasergewebe. Das gesamte Dach wird durch ein System alternierender fliegender Masten und direkt an die Fassadenwand angebrachten Stützen getragen. Über jedem fliegenden Masten verteilt ein schirmähnlicher Halter die Last auf die Membran. Ein ovaler, ähnlich geformter Halter, verteilt die Lasten über den Stützen. An den Rändern wird die Membran durch ein Randseil gespannt. In regelmäßigen Abständen sind Klemmplatten montiert. Von Ihnen führen Spannseile zu den Gründungen. Das Nachspannen der Membran erfolgt durch verlängern der fliegenden Masten und Stützen.

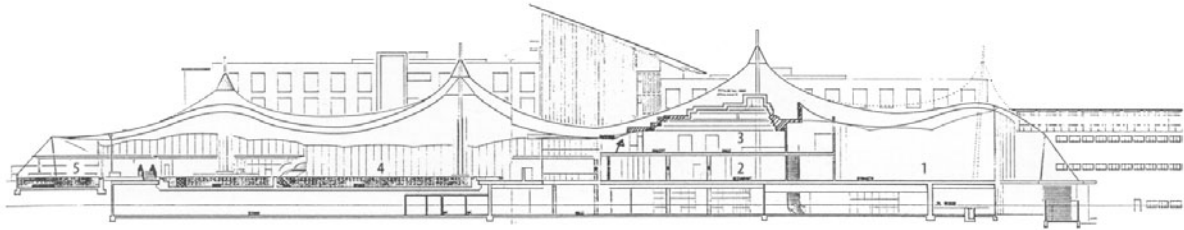
Beispiel 2: **Kurklinik Masserberg**



64

Diese 1994 fertiggestellte Membrankonstruktion ist ein selbsttragendes, vorgespanntes Tragwerk vom Typ Hochpunktmembran mit Innenmasten, Randseilen und abgespannten Randstützen.

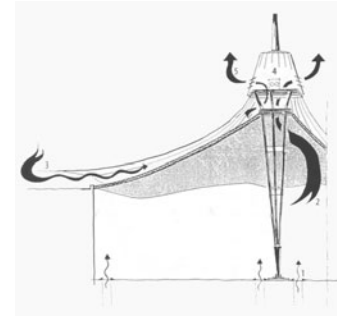
Die Primärkonstruktion besteht aus 6 Hauptmasten, 33 Randstützen sowie 9 Randverankerungen an der Stelle, wo ein Teil des Hochbaus an die Membrankonstruktion stößt. Die Hauptmasten sind durch Sicherheitsseile mit den Randabspannungen verbunden, um im Fall eines Versagens der Membran ein Umstürzen der Masten zu verhindern. Die Masten haben eine Höhe von 8,4 m bis zu 17,2 m. An den Hochpunkten der Masten sind zwei übereinander liegende Stahlringe von unterschiedlicher Größe angebracht.



65

Der äußere und höhere der beiden Ringe trägt die Außenmembran. Den Abschluss bildet ein konischer Metalhut, der ein Hineinregnen verhindert.

Der innere und niedrige Ring trägt eine innere Membran. Die Anordnung zweier Membranen ermöglicht eine Hinterlüftung und damit eine Isolation des Daches.



66

4 Tragfähigkeit zugbeanspruchter Konstruktionen

4.1 Vorspannung

Ein großer Unterschied zwischen den pneumatischen und mechanischen vorgespannten Membrankonstruktionen, besteht darin, dass die pneumatischen Konstruktionen ganz auf eine Vorspannung verzichten.

Generell ist noch einmal daran zu erinnern, dass in einer Membrane nur Zugkräfte übertragen werden. Daher ist verständlich, dass bei einer eben gespannten Membran senkrecht auf diese Ebene einwirkende Kräfte (Biege- und Druckkräfte), zu erheblichen Verformungen und sogar relativ schnell zum völligen Ausfall der Konstruktion führen können. Auch sind eben gespannte Membranen sehr anfällig auf durch Wind verursachte Schwingungen. Nur die Vorspannung einer Membran ist daher zur Stabilisierung der Konstruktion unzureichend. Die Membran muss auch eine Vorkrümmung erfahren um ein Flattern im Wind sowie große Verformungen unter Last zu vermeiden. Die Vorkrümmung bestimmt die Form einer mechanisch vorgespannten Membrankonstruktion. Diese Form wiederum ist nur mit einem spezifischen Spannungsverhältnis denkbar, d.h. gleichzeitig, das bestimmte Spannungsverhältnisse auch nur eine begrenzte Zahl von Formen ermöglichen.

4.2 TRA

Ein wichtiges Maß für das Geschehen innerhalb von Bauelementen ist das Produkt aus Kraft mal Weg. Dieses Produkt ist ein Maß für die Leistung der Konstruktion, und steht in fundamentalem Zusammenhang mit dem physikalisch definierten Begriff der Arbeit.

Am `Institut für leichte Flächentragwerke` unter Leitung von Frei Otto wurde unter Anlehnung an die Methode von C. Maxwell zur theoretischen Begründung des Leichtbaus das Produkt aus Kraft mal Weg TRA genannt.

$$T = F \cdot s$$

Darin wird F in Kräfteinheiten und s in Längeneinheiten gemessen

Je nach Konstruktion unterscheidet man zwischen einem inneren und äußeren TRA. Der Gesamt-TRA wird dann aus dem Quotienten der beiden Einzel-TRAs gewonnen.

Nicht immer lässt sich allerdings der TRA eindeutig definieren. Oft müssen Definitionen gefunden werden, die den jeweils besonderen Verhältnissen entsprechen.

Je niedriger der Wert des Gesamt-TRAs ist, desto höher ist der Optimierungsgrad der Konstruktion.

4.3 BIC

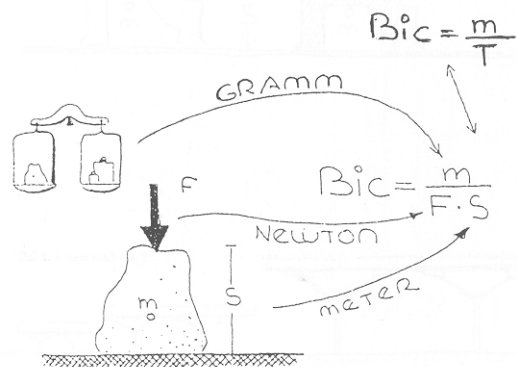
Wiederum am `Institut für leichte Flächentragwerke` sah man bald die Notwendigkeit, den TRA in direktem Verhältnis zur Masse eines Objektes zu sehen.

Man wollte Konstruktionen leichter bauen und sie damit auch gleichzeitig sinnvoller machen. Sinnvoll geformte Objekte haben bei vergleichbar geringerer Masse eine gleiche oder höhere Sicherheit als ein nicht entsprechend geformtes Objekt.

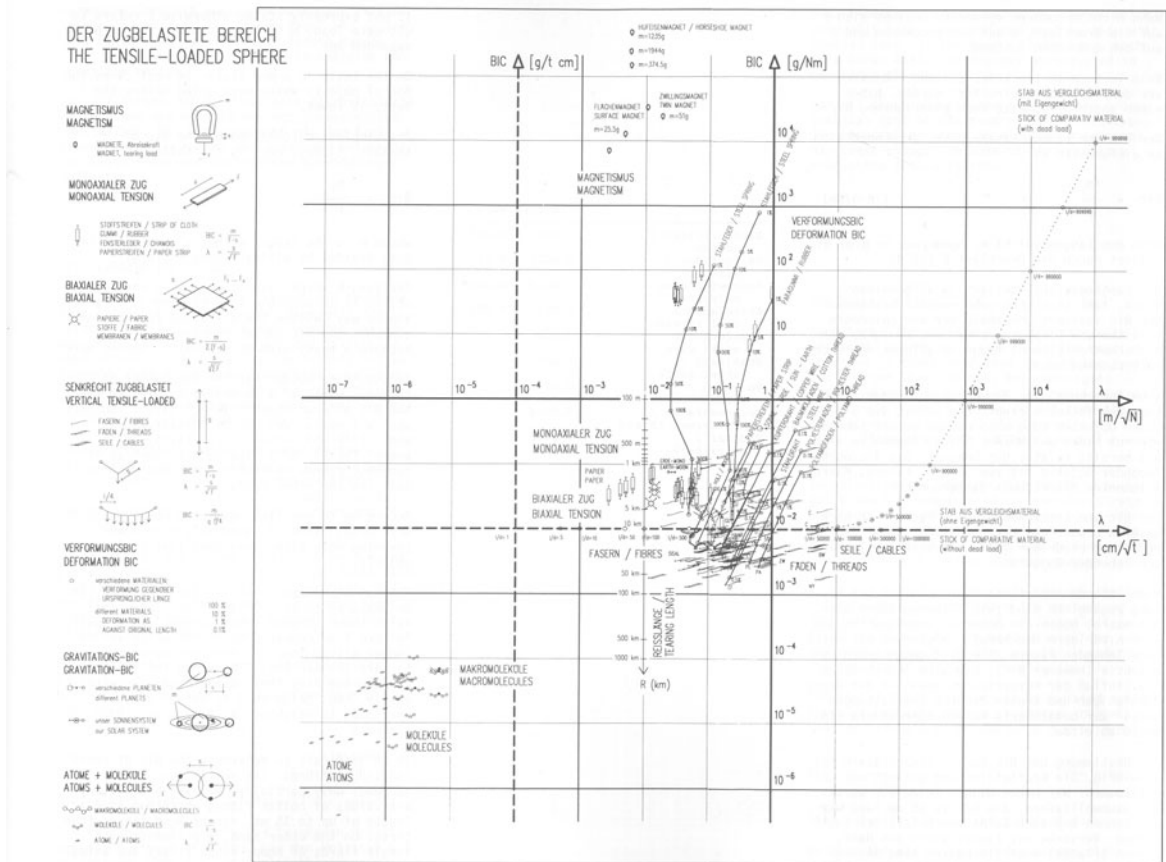
Die geringere Masse, bzw. `leicht` bezieht sich auf das Verhältnis von der Masse des Objektes zu seiner Fähigkeit Kräfte zu übertragen.

Die Fähigkeit zur Übertragung von Kräften wird mit TRA bezeichnet. Das Verhältnis von der Masse eines Objektes zum TRA wird als BIC bezeichnet.

$$BIC = \text{Masse} / \text{TRA} = m / T$$



Demnach wird der BIC von drei Komponenten bestimmt. Der Form, der Kraft und der Masse. Er ist eine physikalische Größe. Ist der BIC klein, dann ist ein Objekt leicht und *visa versa*. Der BIC ist der Wert mit dem sich bei ähnlicher Tragfähigkeit unterschiedliche Konstruktionen miteinander vergleichen lassen. Auch können mit dem BIC Objekte nicht nur relativ sondern auch absolut miteinander verglichen werden. Darüber hinaus gibt der BIC auch Auskunft über die maximale Größe eines Objektes. Generell haben ein- und zweidimensionale Bauelemente (Membranen) einen geringen BIC-Wert und sind somit leicht. Viele BIC-Werte wurden bereits im Experiment festgelegt. Daraus ergab sich ein BIC-Diagramm.



4.4 Reißlänge

Die Reißlänge ist ein in der Textilindustrie häufig gebrauchter Kennwert. Er gibt an, bei welcher Länge eine Faser unter ihrem Eigengewicht reißt. Im Bereich der zugbeanspruchten Konstruktionen spielt die Reißlänge eine wichtige Rolle, denn je größer die Spannweite einer Konstruktion ist, desto geringer muss ihr Eigengewicht sein und desto wichtiger wird die materialspezifische Effizienz. Diese Effizienz wird in BIC gemessen, und da ihre direkte Beziehung zur Reißlänge zwingend ist, ergibt sich, dass die Reißlänge aus dem Normal-BIC erchenbar ist.

$$H_{max} = 100 / Bic$$

Reißlängen und Bic einiger Materialien

Material	Reißlänge = R (km)	Bic (1/R)
1 Blei	0,15	6,6667
2 Beton	2,13	0,4700
3 Gummi	2,32	0,4300
4 Aluminiumdraht	6,50	0,1538
5 Baustahl St 37	6,00	0,1670
6 Baustahl St 52	8,00	0,1246
7 Duraluminium	18,00	0,0556
8 Wolle	10 - 20	0,100 - 0,0500
9 Kiefernholz	20,00	0,0500
10 Stahldraht	28,00	0,0357
11 Baumwolle	25 - 50	0,040 - 0,0200
12 Seide	45,00	0,0223
13 Perlondraht	50,00	0,0200
14 Spinnenwegfaden	-70	0,0143
15 Viskose	40 - 75	0,025 - 0,0130
16 Polyamid	70	0,0140
17 Polyester	70 - 95	0,014 - 0,0105
18 Glasfaser	70 - 120	0,014 - 0,0083
19 Kohlefaser	200	0,0050
20 Aluminiumoxyd-Whisker	606	0,0016
21 Graphit-Whisker	1500	0,0007

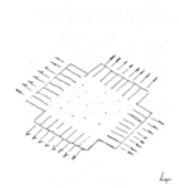
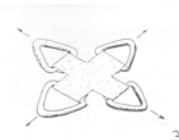
69

4.5 Zweiachsig beanspruchte Flächentragwerke

Alle Membrankonstruktionen sind zweiachsig zugbeansprucht, d.h. sie sind Spannungen auf einer Ebene aber in verschiedenen Richtungen ausgesetzt. Die Errechnung des BIC bleibt aber aufgrund der Zweidimensionalität von Membranen noch relativ einfach. Schon wie bei der Berechnung von TRA ermittelt man auch hier die verschiedenen Produkte aus Kraft mal Weg. Die gesamte Masse der Membran wird dann durch die Summe der Produkte geteilt und so erhält man den BIC für die jeweilige Membran.

$$BIC = m / (F^1 \cdot S^1) + (F^2 \cdot S^2)$$

Hierbei ist noch wichtig, das der Querschnitt des Materials, also seine Dicke keine Rolle bei der Bestimmung des BIC spielt. Ebenfalls wird der BIC im Experiment bestimmt. Hierbei ist die richtige Montage des Versuchsstoffes wichtig.



70

4.6 Optimierung mit TRA und BIC

Die Optimierung einer Fläche mit den beiden Werten TRA und BIC ist ein relativ einfacher Prozess. Man stellt dabei fest, dass immer wieder sogenannte Minimalflächen, wie sie zum Beispiel von Seifenhäuten gebildet werden entstehen. Diese bilden den Idealfall, doch sind in der Realität meist bei etwas komplizierterer Bauanordnung nicht zu verwirklichen. Daher ist für die Konstruktion der optimierte Wert nicht der zu erfüllende, sondern nur der zu erstrebende.

5 Material

Für die Entwicklung bei den Membrankonstruktionen spielte die Verbesserung der für die Fabrikation der Membranen verwendeten Stoffe eine wesentliche Rolle.

Man unterscheidet hier im wesentlichen zwischen isotropischen und anisotropischen Stoffen, wobei erstere gleiche Eigenschaften in alle Richtungen aufweisen, und letztere richtungsabhängige Eigenschaften haben. Aufgrund der gerichteten Produktionsprozesse, sowie bei der gewebetypischen Textur von Kette und Schuss ist der Großteil der für den Membranbau verwendeten Materiale anisotropisch.

Bei der Herstellung der anisotropischen Stoffe unterscheidet man zwischen natürlichen und synthetischen Fasern.

5.1.10 Fasern

Ein Garn bildet sich aus mehreren Fasern. Natürliche Fasern haben nur eine begrenzte Länge und werden zu Strängen gebündelt. Das sind die sogenannten gesponnenen Fasern. Synthetische Fasern dagegen haben theoretisch eine unendliche Länge und werden Fäden genannt. Der Durchschnitt einer natürlichen Faser ist kleiner als 0,1 mm, wogegen die Kunstfaser erheblich größere Querschnitte aufweisen kann.

Der runde Querschnitt einer Faser ist für die Membrankonstruktion der sinnvollere. Folgend erwähne ich einige Charakteristika der, wohl am weitesten verbreiteten Fasern.

Baumwollfaser

Noch Ende der fünfziger Jahre wurde zum Großteil die Baumwollfaser verwendet. Auch heute noch wird sie oft im Bau von größeren Leihzelten verwendet. Sie ist allerdings anfällig gegen Pilzbefall und Feuchtigkeit und die für Membranen aus Baumwolle erwartete Lebensdauer beträgt lediglich 4 Jahre.

Nylon

Diese Faser wird in der Architektur nur selten verwendet, da es sehr UV-empfindlich ist und sich unter Nässe in eine Richtung dehnt. Allerdings wird es oft wegen seinem geringen Gewicht bei gleichzeitigen Stärke in der Segelindustrie eingesetzt.

Polyester

Diese Faser wird in Verbindung mit anderen Fasern sehr häufig verwendet und zählt daher zu den Standardprodukten der textilen Architektur. Sie widersteht hohen Zugbelastungen und hat eine große Elastizität. Aufgrund der Elastizität wird diese Faser auch als nachgebend bezeichnet. Diese Nachgiebigkeit ermöglicht kleinere Korrekturen während der Konstruktion. Das Material verliert allmählich unter Sonneneinstrahlung seine mechanischen Eigenschaften und altert leicht.

Fiberglas

Diese Faser hat eine sehr hohe Reißfestigkeit, ist aber spröder und hat eine geringe Elastizität. Es wird hauptsächlich mit anderen Fasern verwebt um deren Stärke und Dauerhaftigkeit zu erhöhen. Wegen seiner Zerbrechlichkeit erfordert dieses Material besondere Vorsicht bei der Verarbeitung. Die Reißfestigkeit verringert sich unter Nässe.

Aramid

Dies ist eine neue Art von Kunstfaser mit einer sehr hohen Reißfestigkeit und einer ebenfalls hohen chemischen Resistenz. Ein Nachteil ist seine schlechte UV- und Hitzeverträglichkeit.

Material	Dichte	Zugkraft	Zugbelastung	Elastizität	Bemerkungen
Baumwolle	1,5-1,54	350-700	6-15	4500-9000	- nur für den temporären Gebrauch von Interesse
Nylon	1,14	Bis 1000	15-20	5000-6000	- schnelle Alterung bei UV-Strahlung - Anschwellen bei Nässe - Kaum von Interesse für die textile Architektur
Polyester	1,38-1,41	1000-1300	10-18	10000-15000	- weit verbreitet und zusammen mit Fiberglas ein Standardprodukt
Fiberglas	2,55	Bis 3500	2,0-3,5	70000-90000	- bei Nässe reduzierte Bruchkraft - spröde Faser, wird daher zu Fäden von 3µ Durchmesser verwoben
Aramid	1,45	Bis 2700	2-4	130000-150000	- besondere High-tech Faser
PTFE	2,1-2,3	160-380	13-32	700-4000	- nässeunempfindlich - schmutzabweisend - nichtbrennbar
Kohlefaser	1,7-2,0	2000-3000	<1	200000-500000	- besondere High-tech Faser - nichtbrennbar

5.1.11 Beschichtungen

Die Fasern allein weisen immer wieder Unzulänglichkeiten in bezug auf die Umwelt auf und müssen daher durch einen Überzug versiegelt werden. Manchmal reicht ein einseitiger Bezug, doch meistens wird das Gewebe beidseitig mit einer chemischen Substanz überzogen. Oft wird dieser Überzug auch gleich als Klebemittel zwischen verschiedenen Teilen der Membrane genutzt. Folgend erwähne ich einige Versiegelungsmaterialie und deren Anwendungsbereich.

PVC auf Polyestergerewebe

Das PVC wird entweder auf das Gewebe geschichtet oder laminiert. Es entsteht so die am weitesten verbreitete Art von Membrane. Es gibt sie mit verschiedenen zusätzlichen Oberflächenbeschichtungen (PVDF, PVF, Acryl) und sie ist in vielen Farben lieferbar. Sie ist feuerabweisend und ihre durchschnittliche Lebenserwartung beträgt 15-20 Jahre.

PVC auf Aramidgerewebe

Aramidfasern kommen häufig in der Herstellung von Hochdruckröhren zur Anwendung. Sie ummanteln dort eine meist einfache Urethanmembran und werden dann durch eine einseitige PVC-Beschichtung vor der UV-Strahlung geschützt.

PTFE auf Fiberglassgerewebe

Das mit Teflon beschichtete Fiberglassgerewebe ist das dauerhafteste unter den architektonischen Gewebe. Es hat eine Lebenserwartung von mehr als 30 Jahren. Die Membran ist aufgrund seiner Brüchigkeit nicht leicht zu transportieren und zu verarbeiten und es kann leider nur an permanenten Gebäuden zur Anwendung kommen, da es nicht einer erneuten und damit, wenn auch nur leicht veränderten Vorspannung ausgesetzt werden darf. Seine Lichtdurchlässigkeit beträgt bis zu 25% und es wurde unter anderem beim Bau des Denver Airports und des Millennium Domes eingesetzt.

Silicon auf Fiberglassgerewebe

Silicon ist wesentlich elastischer als Teflon und bewirkt dadurch eine Vereinfachung im Umgang mit der Membran. Der Selbstreinigungsgrad wurde dem von Teflon nahezu angepasst, so das eine einmalige Reinigung pro Jahr ausreichend ist. Darüber hinaus ermöglicht die Siliconbeschichtung eine Lichtdurchlässigkeit von 25% bei der architektonischen Membran und von 90% beim Futtermaterial. Siliconbeschichtetes Fiberglassgerewebe ist auch erheblich günstiger als das Teflonbeschichtete.

Beschichtung	Polyester Gewebe			Fiberglas Gewebe	
	PES/PVC	PES/PVC	PES/PVC	PTFE	Si
Oberflächenbeschichtung	Acryl	PVF-Lamination	PVDF-verbindend		
Lebenserwartung	8-10	12-15	12-15	>30	>30
Alterung	Normal	Gut	GUT	Sehr gut	Sehr gut
Selbstreinigung	Normal	Gut	Gut	Sehr gut	Sehr gut
Transparenz	Gut	Gut	Gut	Gut	Sehr gut
Feuerabweisung	Gut	Normal	Gut	Sehr gut	Sehr gut
Faltbarkeit	Sehr gut	Normal	Gut	Schlecht	Normal

5.1.12 mechanische Eigenschaften von Geweben

Ein Gewebe reagiert im Vergleich zu anderen Baustoffen generell auf eine besondere Art und Weise.

Geht man bei herkömmlichem Material von einer linearen Elastizität und einem isotropen Verhalten aus, so hat Gewebe drei Charakteristika.

- **Nicht-Linearität.** Das Kraft/Last Verhalten des Materials lässt sich nicht anhand eines linearen Graphen modellieren
- **Anisotropie.** Das Material hat zwei Hauptrichtungen, was alle wichtigen mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig macht.
- **Nicht-Elastizität.** Das Verhalten des Materials ist abhängig von der zugeführten Last.

Praktisch haben sich daraus einige Konsequenzen ergeben. So hat zum Beispiel ein Fabrikant von Polyestergerewebe eine Vorspannung der Schussfäden vorgenommen um damit die Anisotropie auf ein Minimum zu reduzieren.

5.2 Seile

Schon seit langem verwendet man in der Konstruktion Seile. Die bis zum Anfang des 19. Jahrhundert verfügbaren Materialien hatten allerdings keine sehr große Festigkeit und der Einsatz der Seile war somit auf den Zeltbau, das Erstellen von Behelfsbrücken und die Fördertechnik beschränkt.

Erst 1830 gelang es dem Hannoveraner Oberbergrath Albert ein Förderseil aus drei Litzen zu je vier Eisendrähten herzustellen. Das Stahlseil erfuhr ab dann einen bis heute andauernden Aufschwung in der Bauindustrie. Neueste Entwicklungen gehen in Richtung Korrosionsschutz und erhöhter Zugfestigkeit. Das sogenannte Kevlar-Seil hat eine zwanzigmal höhere Zugfestigkeit als

herkömmliche Stahlseile, kommt aber aufgrund seines hohen Preises nur selten zur Anwendung.

Im Folgenden werde ich kurz den Aufbau von Seilen erklären

5.2.10 Draht

Draht wird aus warmgewälzten Rund oder Z-Profilen mit einem Durchmesser bis zu 5mm hergestellt. In einer Drahtzieherei werden diese Profile durch Ziehdrüsen zu kleineren Durchmessern kaltgezogen. Durch das Kaltziehen erhöht sich die Festigkeit des Drahtes.

5.2.11 Litze

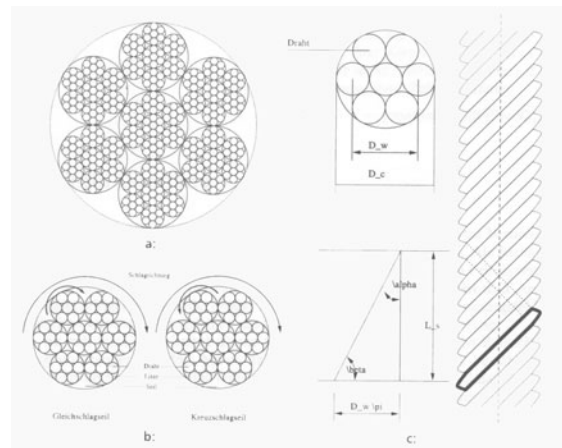
Eine Litze wird aus mehreren Drähten hergestellt. Durch sechs miteinander verdrehten Drähten in deren Mitte sich ein sogenannter Einschlagfaden (lat. Licium) befindet entsteht ein biegsamer Draht.

5.2.12 Seil

Durch Zusammendrehen mehrerer Litze entsteht das Seil. Man unterscheidet bei den Seilen grundsätzlich zwischen Gleichschlag- und Kreuzschlagseilen, wobei bei Ersteren die Litzendrehung der Seildrehung entspricht und bei Letzteren die Drehungen gegenläufig sind.

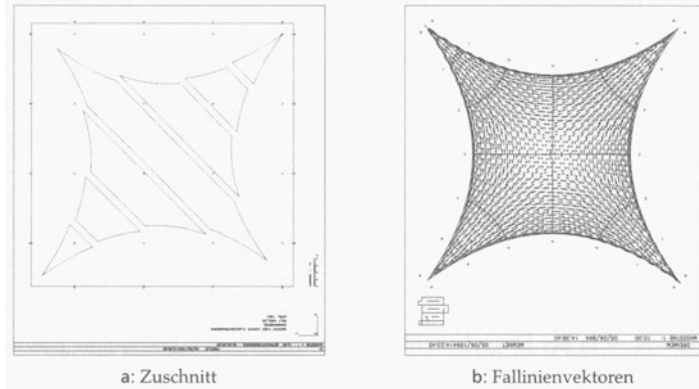
Da das Bauen mit Seilen heutzutage weit verbreitet ist, gibt es drei Typen kommerziell erwerbbarer Seile.

- **Offene Spiralseile.** Diese sind reine Litzen und werden daher in weniger beanspruchten Bereichen eingesetzt. Sie sind anfällig für Korrosion. Sie kommen zum Einsatz als Geländerseile, Untergurtseile und Abspannseile für Antennen und Schornsteine.
- **Vollverschlossene Seile.** Sie sind die im Industriebau am häufigsten verwendeten Seile. Die Drahtprofile sind Z-förmig und haben an der Außenseite eine geringe Oberfläche. Sie sind dadurch weniger anfällig für Korrosion.
- **Rundlitzenseile.** Sie bestehen aus mehreren Lagen von Litzen und sind daher sehr flexibel aber leider auch sehr anfällig. Sie werden häufig als Randseile im Membranbau eingesetzt.



direkt in die Ebene abgewickelt werden können. Heutzutage wird dieser Vorgang durch eine Software-Program gesteuert.

In der Phase der **Kompensation** müssen die verebneten Teilflächen, um die vorgegeben Spannung in den Membranflächen zu erreichen, um einen bestimmten Dehnungsfaktor kleiner zugeschnitten werden. Der Dehnungsfaktor beruht auf der Grundlage der Biaxtests getroffenen Steifigkeitsannahmen. Um eine konstante Vorspannung über den gesamten Rand zu erreichen, muss in Bereichen höherer Steifigkeit das Material weniger gedehnt werden.



73

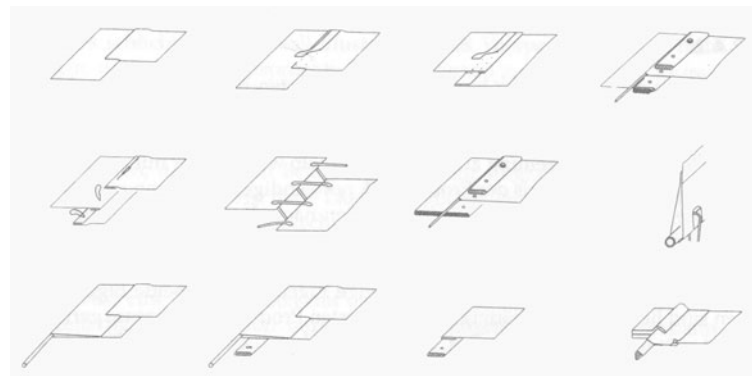
Um die **Zuschnitte** festzulegen werden auf der Grundlage der Kompensation, Rand- und Nahtzugaben hinzuberechnet. Aufgrund der vorab geschilderten Maßnahmen liegt der Verschnitt normalerweise zwischen 20% - 40%. Kleine oder komplizierte Teilflächen werden oft anhand einer Papierschablone per Hand zugeschnitten, wogegen große Flächen mit computergesteuerten Cuttern geschnitten werden.



74

Während des **Zusammenfügens** ist der Hersteller aufgrund der hohen Anforderungen an die Festigkeit der Verbindungen der Teilstücke generell darauf bedacht die Verbindungen im Werk vorzunehmen.

Leider ist dies aber nicht vollständig möglich, da besonders an den Flächenrändern immer der Einsatz von lösbaren Verbindungen wie zum Beispiel Klemmverbindungen erforderlich sind. Diese

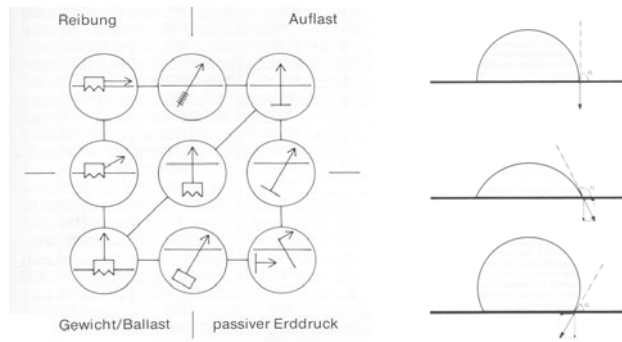


75

werden oft erst Vorort montiert, wobei dann auch besonders durch auftretende Tangentialkräfte geforderte Bereiche durch anschweißen von Gurten oder weiteren Membrananlagen verstärkt werden. Generell werden sowohl die PVC-beschichteten Polyestergewebe als auch die PTFE-beschichteten Glasfasergewebe miteinander verschweißt.

6.2 Gründungen

Bei den Gründungen zeigt sich ein großer Unterschied zwischen pneumatischen und mechanisch vorgespannten Membrankonstruktionen. Bei den Pneus verläuft die Gründung, mit Ausnahme der Kissenkonstruktionen, linear entlang der Grundrisslinie des Gebäudes. Ähnlich wie bei druckbeanspruchten

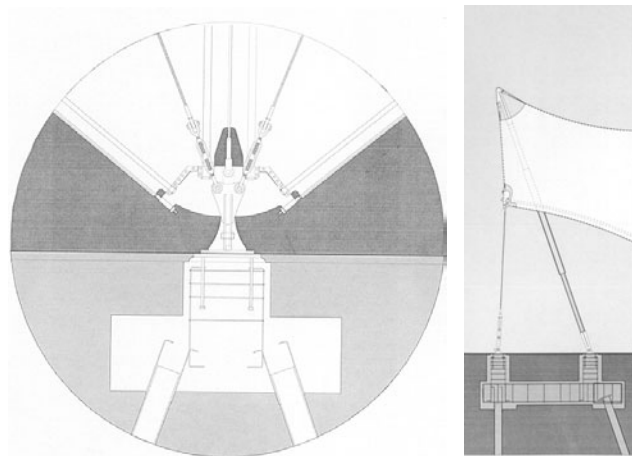


76

Konstruktionen wird die Last nahezu senkrecht in den Boden weitergeleitet, obwohl man hier eigentlich sagen sollte, dass die Kräfte nahezu senkrecht zum Boden verankert werden. Das vereinfacht natürlich die Verwendung temporärer Gründungen, da die horizontalen Kraftkomponenten entweder durch das direkt angrenzende Erdreich oder durch die von der Oberfläche einer temporären Gründung erzeugten Reibung, wie zum Beispiel beim Mediadrom.

Bei den mechanisch vorgespannten Membrankonstruktionen sieht das oft ganz anders aus. Generell handelt es sich nicht um lineare, sondern vielmehr um punktuelle Gründungen.

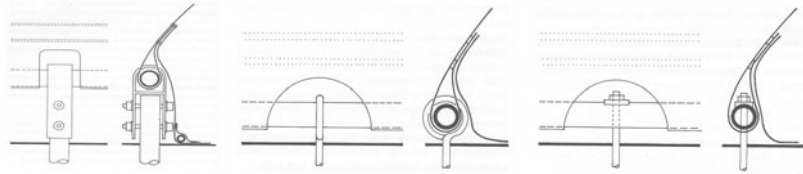
Sind diese bei einfachen Vierpunktzelten noch leicht zu lösen und woanders wiederverwendbar so treten bei größeren Konstruktionen schon derart starke Belastungen auf, dass permanente Gründungen unumgänglich sind. Auch werden die Kräfte nicht senkrecht im Boden verankert, da erhebliche Biegebelastungen auftreten.



77

6.3 Kräfteableitende Elemente

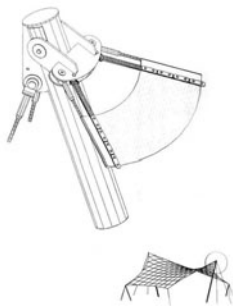
Es gibt viele Formen von kraftübertragenden Elementen, daher möchte ich hier nur wenige Beispiele graphisch darstellen. Da diese Elemente bei pneumatischen Konstruktion an weniger exponierter Stelle zu finden sind, ist



auch ihre graphische Ausarbeitung weniger spektakulär.

78

Bei den Elementen für den mechanisch vorgespannten Membranbau dagegen sind dem Designer nahezu keinerlei Grenzen gesetzt, wobei es allerdings drei Grundformen der Kraftübertragung gibt.



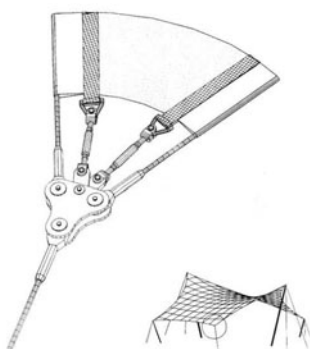
ABSPANNPUNKT MIT STÜTZE

Hochpunkt mit einer Stütze und zwei Abspannseilen. Membransicherung auf den Randseilen durch Gurte. Zwei Abspannseile sichern den Mast.



MAST MIT ZWEI ABSPANNSEILEN

Mast mit zwei Abspannseilen. Der Mast stellt den Mittelpunkt eines Seilkreuzes dar. Aus der kraftschlüssigen Verlängerung der Randseile ergibt sich der Winkel der Abspannseile.

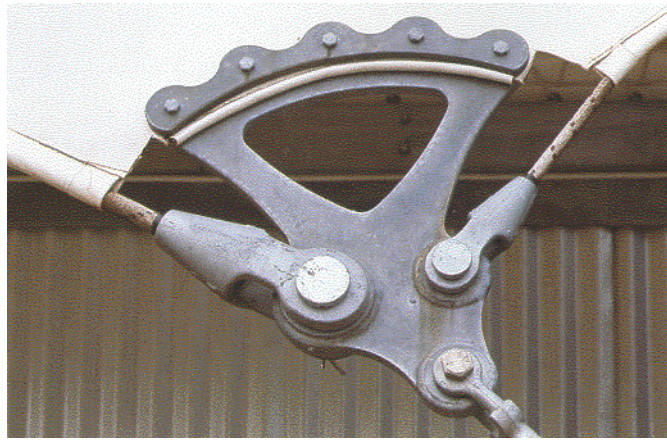


ABSPANNPUNKT OHNE STÜTZE

Abspannpunkt ohne Stütze mit einem Abspannseil. Zwei Randseile und ein Abspannseil werden an einer Stahlplatte miteinander gekoppelt. Auf die Membrane aufgebrachte Gurte sichern die Membrane gegen ein Verrutschen auf den Randseilen.

(Quelle für Text und Zeichnungen: CENO TEC GmbH, Textile Konstruktionen)

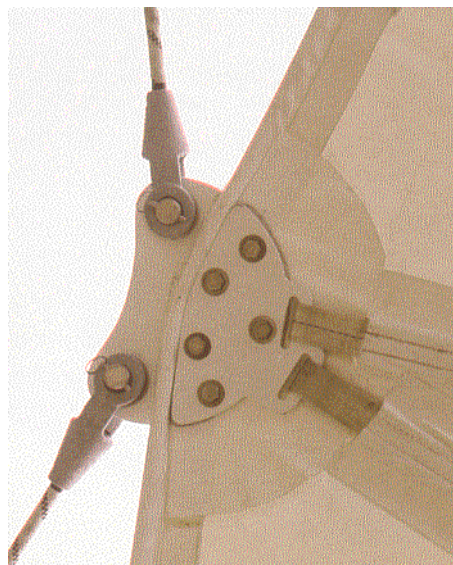
Hier nun noch einige Beispiele aus dem mechanisch vorgespannten Membranbau.



79



80

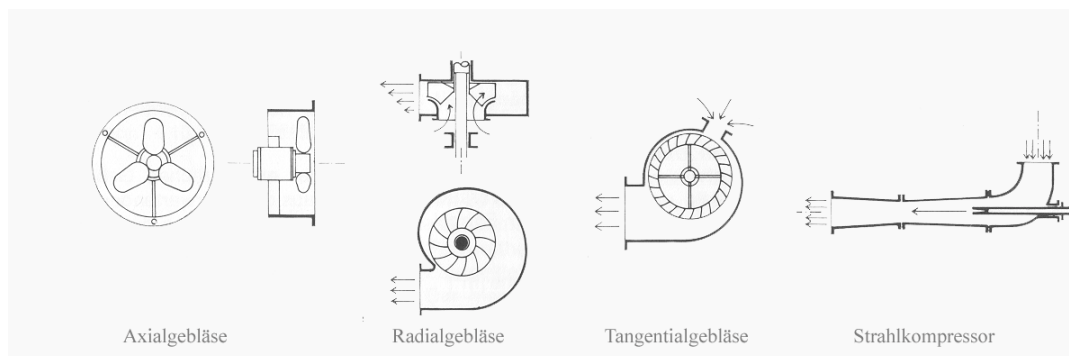


81

6.4 Luftdruckerzeugung

Für die luftgetragenen Konstruktionen gibt es vier wichtige Regeln hinsichtlich, der für den Stabilisationsdruck verantwortlichen Geräte.

- Die Gebläseaggregate müssen für Dauerbetrieb ausgerichtet sein. Der maximale Stabilisationsdruck muss kurzfristig und sicher erreichbar sein.
- Es müssen mindestens zwei Aggregate zur Druckerzeugung angeschlossen sein, wobei lediglich eines betrieben wird. Das andere dient im Falle eines Ausfalls zur Sicherung des Drucks. Um Luftverlust durch nicht laufende Aggregate zu verhindern, werden Klappen installiert.
- Schnee oder auch Laub dürfen sich nicht im Ansaugbereich des Aggregats befinden, damit eine ungeminderte Luftzufuhr gewährleistet ist.
- Der Einblasdruck sollte nur knapp über dem gewünschten Innendruck liegen um eine optimale Energieausnutzung zu erreichen.



82

Je nach Führung des Luftstromes unterscheidet man zwischen axial, radial und tangential arbeitenden Aggregaten. Axiale Aggregate können in Reihe geschaltet werden, erzeugen aber im Vergleich zu den anderen Geräten wesentlich mehr Lärm. Radiale Aggregate werden nicht in Reihe geschaltet. Sie sind trotz erheblich höheren Laufgeschwindigkeiten ruhiger als die axial Aggregate. Tangentiale Aggregate werden hauptsächlich in kleineren Gebäuden eingesetzt und eignen sich besonders für die Erzeugung von Unterdruck.

Neben den Gebläsen dienen verschiedene Arten von Kompressoren der Luftdruckerzeugung. Sie werden oft zur Erzeugung von Hochdrücken für luftgestützte Konstruktionen eingesetzt.

Der durchschnittliche Stromverbrauch eines Gebläses lässt sich überschlägig mit folgender Formel ermitteln.

$$\text{KW erforderlich} = \frac{\text{überdachte Fläche in m}^2}{200}$$

Nach der eingehenden Beschäftigung mit Membrankonstruktionen, welches diese Arbeit natürlich mit sich brachte, sind mir nicht nur die rein konstruktiven Unterschiede zwischen den pneumatischen und den mechanisch vorgespannten Konstruktionen aufgefallen.

Interessant war festzustellen, dass die pneumatischen die wirklich leichteren Konstruktionen sind, obwohl sie durch den Anschein einer integeren Körperlichkeit für den Laien genau das Gegenteil vermuten lassen. Es ist wohl gerade diese Körperlichkeit, besonders bei den luftgetragenen Gebäuden, die das pneumatische Bauen für Architekten weniger interessant macht. Daher stellt man fest, dass der pneumatische Bau generell durch Ingenieure und der mechanisch vorgespannte Bau zu einem hohen Anteil von Architekten realisiert wird. Obwohl sie, wie schon erwähnt, nicht so leicht wie die Pneus sind erlauben die vorgespannten Membranen fast immer ein Hindurch- bzw. Zwischendurchschauen. Sie sind dadurch irgendwo zwischen Himmel und Erde angesiedelt und genau da liegt ihre Faszination. Sind die, durch die Pneus gefundenen Lösungen eher sachlich; dadurch allerdings nicht unbedingt unästhetisch, so gelingt es den mechanisch vorgespannten Membrankonstruktionen oftmals zu der rein physischen Problemlösung noch eine archaisch ätherische Komponente hinzu zu fügen. Vor den Elementen zu schützen und gleichzeitig das Gefühl des Vergänglichen, nicht Entgültigen zu schaffen, entspricht der Schnelllebigkeit unserer Zeit und erinnert gleichzeitig an das Nomadische und damit Freie im Menschen.

Brauche ich also eine Überdachung für einen sehr großen Platz, wie zum Beispiel ein Fußballstadion oder möchte ich einen großen vor allen Wettern geschützten Raum erschaffen, den ich heute hier und übermorgen dort aufstellen möchte, so würde ich mich wahrscheinlich für eine pneumatische Konstruktion entscheiden. Möchte ich aber einen Raum erschaffen der mich schützt und doch mit den Elementen und dem Himmel verbindet, in dem ich meine Gedanken, bei einem Konzert, beim Flanieren oder einfach bei einem Treffen mit Freunden fliegen lassen kann, so würde ich sicherlich eine mechanisch vorgespannte Membrankonstruktion bevorzugen.

- Ayrle**, Hartmut, (1998), "Welche Chancen hat der Textilbau in der Veranstaltungsarchitektur?" *Bauen mit Textilien 1*, Heft 3: 14 – 16
- Berger**, Horst, (1996), *Light Structures – Structures Of Light: the art of engineering of tensile architecture*, Basel: Birkhäuser
- Buchholdt**, H.A., (1999), *An Introduction To Cable Roof Structures*, 2. ed., London: Telford
- Capron**, J. L., (1998), "Textile Membranbauwerke – eine ausgereifte Technologie: Projekte von Samyn & Partner", *Bauen mit Textilien 1*, Heft 4: 11 - 15
- Davies**, Colin, (2001), *Hopkins 2: the work of Michael Hopkins and Partners*, London: Phaidon
- Drüsedau**, Heide, (1983), *Lufthallenhandbuch = Airhallhandbook*, Stuttgart: (IL) Univ.
- Hebbelinck**, S., (1999), "Modulare Membransysteme – auf der Suche nach neuen Anwendungsmöglichkeiten für zugbeanspruchte Konstruktionen", *Bauen mit Textilien 2*, Heft 1: 14 – 17
- Herzog**, Thomas, (1976), *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*, Stuttgart: Hatje
- Höller**, Ralf, (1999), *FormFindung: architektonische Grundlagen für den Entwurf von mechanisch vorgespannten Membranen und Seilnetzen*, Mähringen: Balistier
- Institut für leichte Flächentragwerke**, (1984), *Schattenzelte = Sun and Shade = Toldos = Vela*, Stuttgart: Krämer
-
- _____, (?), *Zelte: Bilder ausgeführter weitspannbarer Membrankonstruktionen; Anmerkungen aus der Praxis = Tents*, Stuttgart: Krämer
- Kronenburg**, Robert, (1997), *FTL: softness, movement and light*, Chichester: Academy Ed.
- Künzel**, Eberhardt, (1968), *Beitrag zur Anwendung luftgetragener Konstruktionen in Funktionsbereichen des Hochbaues*, Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen, Sekt. Archit., Diss.
- Lindner**, J., Schulte, M., Breitschaft, G., (1999), "Die Membran des Forumdachs im Sony Center Berlin", *Bauen mit Textilien 2*, Heft 4: 10 – 17

- Moritz**, K., (2000), "Konfektionierung von Membranstoffen", *Bauen mit Textilien* 3, Heft 4: 3 – 6
- Otto**, Frei, (1966), *Zugbeanspruchte Konstruktionen: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen*, Bd.1 & 2, Frankfurt: Ullstein
- Otto**, Frei u.a. (1998), *Prinzip Leichtbau*, Stuttgart: Krämer
- Otto**, Frei & Institut für Leichte Flächentragwerke, (1995), *Pneu und Knochen = Pneu and Bone*, Stuttgart: Krämer
- Robbin**, Tony, (1996), *Engineering a New Architecture*, New Haven: Yale Univ. Press
- Schanz**, Sabine u.a.,(1992), *Frei Otto, Bodo Rasch: Gestalt finden: auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen*, München: Deutscher Werkbund
- Schaur**, Eda & Institut für Leichte Flächentragwerke, (1977), *Pneus in Natur und Technik = Pneus in Nature and Technics*, Stuttgart: Krämer
- Scheuermann**, Rudi & Boxer, Keith, (1996), *Tensile Architecture In Urban Context*, Oxford: Butterworth-Heinemann
- Schneider**, Martina, (1990), *Der umgekehrte Weg: Frei Otto zum 65. Geburtstag*, Köln: R. Müller
- Schock**, Hans-Joachim, (1997), *Segel, Folien und Membrane: innovative Konstruktionen in der textilen Architektur*, Basel: Birkhäuser

9 Bildquellennachweis

- 1 **Schanz**, Sabine u.a.,(1992), *Frei Otto, Bodo Rasch: Gestalt finden: auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen*, München: Deutscher Werkbund, s. 42
- 2 **Scheuermann**, Rudi & Boxer, Keith, (1996), *Tensile Architecture In Urban Context*, Oxford: Butterworth-Heinemann, s. VII
- 3 **Herzog**, Thomas, (1976), *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*, Stuttgart: Hatje, s. 31
- 4 wie 3, s. 32
- 5 wie 3, s. 32
- 6 wie 3, s. 32
- 7 wie 3, s. 33
- 8 wie 3, s. 33
- 9 wie 3, s. 33
- 10 wie 3, s. 35
- 11 wie 3, s. 93
- 12 wie 3, s. 126
- 13 wie 3, s. 126
- 14 wie 3, s. 116
- 15 wie 3, s. 117
- 16 **Schneider**, Martina, (1990), *Der umgekehrte Weg: Frei Otto zum 65. Geburtstag*, Köln: R. Müller, s.11
- 17 www.edenguide.co.uk/images/1010087.html
- 18 wie 16, s. 35
- 19 **Schock**, Hans-Joachim, (1997), *Segel, Folien und Membrane: innovative Konstruktionen in der textilen Architektur*, Basel: Birkhäuser, s. 102
- 20 **Berger**, Horst, (1996), *Light Structures – Structures Of Light: the art of engineering of tensile architecture*, Basel: Birkhäuser, s. 23

- 21 **Höller**, Ralf, (1999), *FormFindung: architektonische Grundlagen für den Entwurf von mechanisch vorgespannten Membranen und Seilnetzen*, Mähringen: Balistier, s. 48
- 22 wie 16, s. 34
- 23 wie 20, s. 38
- 24 **Davies**, Colin, (2001), *Hopkins 2: the work of Michael Hopkins and Partners*, London: Phaidon, s. 83 (Ausschnitt)
- 25 wie 16, s. 8
- 26 wie 19, s. 114
- 27 wie 19, s. 115
- 28 wie 19, s. 118
- 29 wie 3, s. 48
- 30 wie 16, s. 22
- 31 wie 3, s. 48
- 32 wie 3, s. 51
- 33 www.tensinet.com/documents/magazines/Arena_Madrid_db.pdf
- 34 wie 33
- 35 wie 16, s. 10
- 36 wie 16, s. 10
- 37 wie 19, s. 24
- 38 wie 19, s. 24
- 39 wie 19, s. 103
- 40 wie 19, s. 103
- 41 wie 3, s. 183
- 42 wie 3, s. 183
- 43 wie 3, s. 185
- 44 wie 21, s. 56

- 45 siehe 23
- 46 wie 19, s. 71
- 47 wie 19, s. 73
- 48 wie 19, s. 73
- 49 wie 19, s. 72
- 50 wie 2, s. 3
- 51 **Kronenburg**, Robert, (1997), *FTL: softness, movement and light*, Chichester: Academy Ed., s. 24
- 52 wie 51, s. 24
- 53 wie 2, s. 2
- 54 www.dynamicearth.co.uk/indexwm.html
- 55 wie 24, s. 89
- 56 eigene Photos, 1999
- 57 eigene Photos, 1999
- 58 wie 19, s. 43
- 59 wie 19, s. 27
- 60 wie 19, s. 46
- 61 ?????
- 62 wie 2, s. 3
- 63 wie 2, s. 101/103/106
- 64 wie 19, s. 18
- 65 wie 19, s. 49
- 66 wie 19, s. 51
- 67 **Otto**, Frei u.a. (1998), *Prinzip Leichtbau*, Stuttgart: Krämer, s. 51
- 68 wie 67, s. 97
- 69 wie 21, s. 75

- 70 wie 67, s. 107
- 71 wie 21, s. 65
- 72 wie 2, s. 22
- 73 wie 21, s. 65
- 74 wie 2, s. 23
- 75 wie 21, s. 60
- 76 wie 3, s. 149
- 77 wie 51, s. 24
- 78 wie 3, s. 152
- 79 wie 51, s. 84
- 80 wie 51, s. 49
- 81 wie 51, s. 67
- 82 wie 3, s. 159