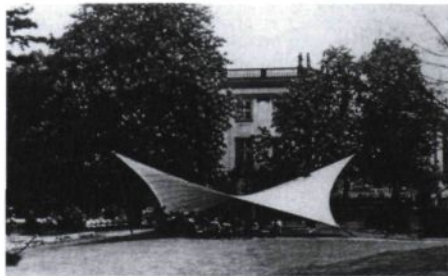
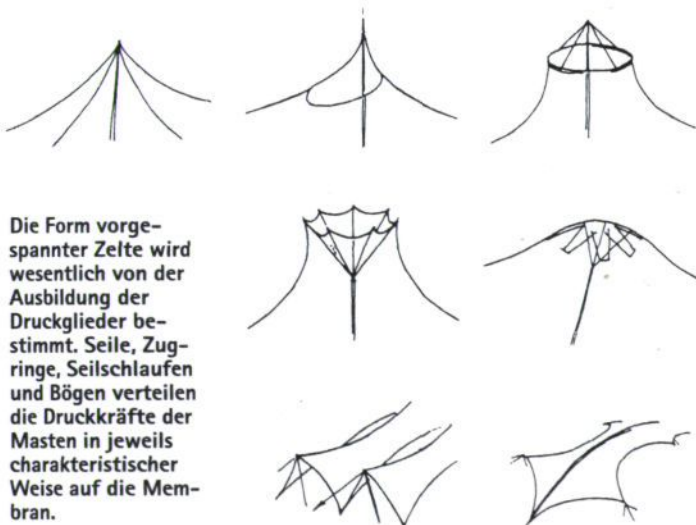
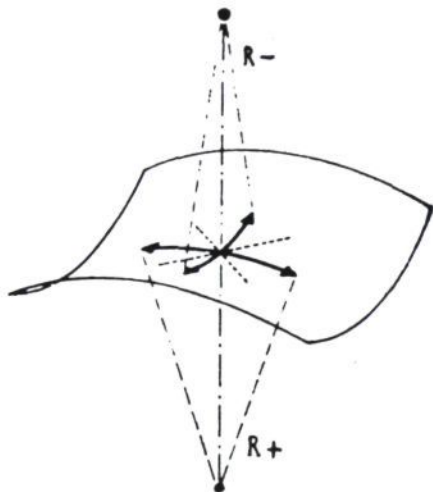


Glossar zum Leichtbau

Die erste moderne Zeltkonstruktion für die Bundesgartenschau 1955 in Kassel von Frei Otto.



Vorgespannte Zelte sind gegenläufig gekrümmt.



Die Form vorgespannter Zelte wird wesentlich von der Ausbildung der Druckglieder bestimmt. Seile, Zugringe, Seilschlaufen und Bögen verteilen die Druckkräfte der Masten in jeweils charakteristischer Weise auf die Membran.

Leichtbaukonstruktionen: sind Flächentragwerke, die frei von Biegemomenten sind und Materialfestigkeiten optimal nutzen. Sie werden massearm aus leichten Baustoffen errichtet und haben, bezogen auf ihre Tragfähigkeit, ein extrem niedriges Eigengewicht. Sie eignen sich deshalb besonders für große Spannweiten. Zu ihnen gehören im wesentlichen vorgespannte Zelte und Seilnetze, pneumatische Membranen und Gitterschalen im weiteren Sinn auch Stabtragwerke, Schalen und schwere Hängedächer.

Typisches Merkmal von Leichtbaukonstruktionen sind ihre doppeltgekrümmten Oberflächen, in denen ausschließlich Normalkräfte auftreten. Mit Ausnahme der Gitterschalen sind sie aus biegeweichen Materialien gebildet und nur auf Zug belastbar. Um sie in ihrer Form zu stabilisieren werden sie vorgespannt. Im Unterschied zu konventionellen Konstruktionen sind Leichtbauten jedoch nicht völlig steif: ihre Form paßt sich dynamisch den verschiedenen Lastfällen an, so daß die auftretenden Kräfte optimal abgeführt werden können. In diesem Verhalten gleichen Leichtbauten einem hängenden Seil, das sich in seiner Form auf die jeweils angreifenden Lasten einstellt.

Die Vorläufer von Leichtbaukonstruktionen reichen weit in die Geschichte zurück. Die systematische Entwicklung des Leichtbaus wurde allerdings erst durch die frühen Arbeiten Frei Ottos angeregt.

Vorgespannte Zelte: sind Flächentragwerke aus wenigen Druckgliedern und Membranen, die sattelförmig (antiklastisch) gekrümmt und ausschließlich auf Zug belastet sind. Sie werden durch mechanisch eingebrachte Vorspannung stabilisiert.

Membranen, deren Spannungen in allen Richtungen gleich groß sind, nehmen die Form einer Minimalfläche an. Dabei gilt: je stärker die Membran gekrümmt ist, um so wirkungsvoller gewährleistet die Vorspannung ihre Steifigkeit und um so kleiner sind die auftretenden Zugkräfte.

Die Vorspannung der Membrane wird über ihren Rand eingebracht. An ihm müssen deshalb enorme Zugkräfte aufgenommen werden. Dazu können steife Elemente wie Rahmen und Bögen herangezogen werden. Die weitaus häufigste Lösung aber sind biegeweiche Seile, die die Membran bogenförmig zum Boden hin abspannen. Neben der Randausbildung bestimmt vor allem die Art der Druckglieder, im wesentlichen Masten, Ringe und Druckbögen, die Form vorgespannter Membranen. Masten müssen, da Membranen keine großen Punktlasten aufnehmen können, ihre Druckkräfte über Seile auf die Membrane verteilen. Eine einfache Sattelfläche wird von zwei Masten und vier Seilen, die zugleich den Rand ausbilden, geformt. Komplex zusammengesetzte und konische Flächenformen entstehen aus mehreren Masten und Seilscharen.

Wenn Membranen von Masten punktförmig unterstützt werden, müssen sie möglichst großflächig belastet und weich abgerundet werden, um über den Stützen extreme Spannungskonzentrationen zu vermeiden. Zelte dieser Konstruktionsart werden wegen ihrer Oberflächenform auch als Buckelzelte bezeichnet und zeichnen sich dadurch aus, daß Membranen aus textilen Geweben hier keinen Zuschnitt benötigen: durch Winkelverdrehungen der Gewebefasern und die Elastizität des Materials lassen sie sich aus der Ebene in doppeltgekrümmte Flächenformen spannen. Ringe spannen, wenn sie in der Höhe versetzt sind und verschiedene Durchmesser haben, Membranen in konische Formen. Dabei wird der kleinere Ring auf Zug, der größere auf Druck belastet.

Druckbögen können als Stützelemente in Membrankonstruktionen besonders schlank ausgebildet werden, wenn ihre Form der Stützlinie entspricht. Die über den Bogen gespannte Membrane verhindert dann das Knicken oder Beulen und kann den Bogen auch an seinem Ort fixieren.

Die Vorläufer moderner Membrankonstruktionen reichen von den Zelten der Nomaden über die römischen Vela und

andalusischen Toldos bis zu den Zirkuszelten des 19. Jahrhunderts. In der Regel waren bei diesen Konstruktionen die Membranen nicht vorgespannt. Sie konnten daher nur bedingt konstruktive Funktionen übernehmen. Die erste moderne Membrankonstruktion errichtete Frei Otto 1955 in Kassel.

Seilnetze: sind baugeschichtlich eine Weiterentwicklung vorgespannter Zelte: die Gewebestruktur der sich kreuzenden Fasern findet sich in den aus Seilen geknüpften weitmaschigen Netzen wieder. Seilnetze entsprechen daher in Form und Konstruktion vorgespannten Membranen. Ihre Spannweite liegt trotz des höheren Eigengewichts über der von Zeltkonstruktionen. Die Eindeckung von Netzen kann aus Holz, Blechen, Kunststoffen, Glas oder auch mit Geweben erfolgen und mit einer Wärmedämmung verbunden sein.

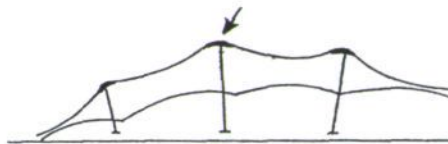
Pneumatische Membranen: kurz Pneus, sind kuppelförmig (synklastisch) gekrümmt und ausschließlich auf Zug beansprucht. Sie werden durch den Über- oder Unterdruck eines Mediums, in der Regel durch Luft, vorgespannt und stabilisiert. Dabei ist das druckerzeugende Medium das eigentlich tragende Element der Konstruktion. Die geläufigste Form pneumatischer Membranen im Hochbau ist die Traglufthalle. Ihre Membrane wird durch einen leichten, von Gebläsen erzeugten Überdruck der Luft im Halleninnenraum gestützt. Der Zugang zur Halle erfolgt über Schleusen. Die Zugspannung in den Membranen von Traglufthallen ist gewöhnlich kleiner als in mechanisch vorgespannten Membranen. Traglufthallen reagieren deshalb nicht sehr empfindlich auf Material- und Fertigungsfehler der Membrane und sind die Konstruktion, mit der die größten Spannweiten erreicht werden. Realisierte Hallen spannen bis etwa 300 Meter. Wenn die Membrane mit einem weitmaschigen Seilnetz verstärkt wird, sind selbst Spannweiten von mehreren Kilometern technisch machbar.

Andere Formen pneumatischer Membranen sind Kissen und Schläuche. Kissen bestehen aus zwei, an den Rändern verbundenen Membranen, die pneumatisch aufgespannt werden. Sie halten den eigentlichen Nutzraum unter sich frei von Druckunterschieden, haben aber in der Regel eine sehr große Konstruktionshöhe. Schläuche sind durch einen extrem hohen Luftüberdruck vorgespannt und verhalten sich statisch wie biegesteife Träger. Sie werden einzeln oder in Kombination als Träger, Wand oder Decke eingesetzt. Wegen des hohen Überdrucks und des kleinen Luftvolumens reagieren sie selbst auf kleinste Lecks in der Membrane äußerst empfindlich. Sie werden deshalb fast ausschließlich in temporären Konstruktionen eingesetzt.

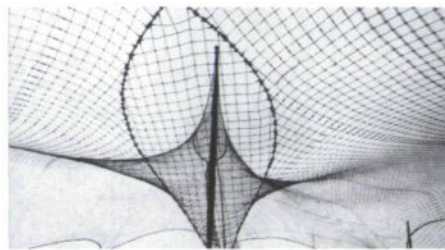
Pneus sind als Fahrradschlauch oder Milchtüte Teil unseres Alltags und haben in den verschiedenen Bereichen der Technik unzählige Vorläufer, so zum Beispiel im Segelschiff oder Heißluftballon. Die erste pneumatische Baukonstruktion wurde 1918 von dem englischen Ingenieur F. W. Lanchester entwickelt und patentiert. Sein Entwurf enthält bereits alle wesentlichen Elemente der Traglufthalle: eine seilverstärkte Membrane, Gebläse und Schleusen. Als in den 50er Jahren dann geeignete Membranen zur Verfügung standen, konnte der amerikanische Ingenieur Walter Bird die ersten Traglufthallen realisieren.

Gitterschalen: setzen sich aus durchlaufenden, überwiegend druckbelasteten Stäben zusammen, die ein Gitter mit meist viereckigen Maschen und konstantem Knotenabstand bilden. Sie haben kuppelförmig (synklastisch) gekrümmte Oberflächen.

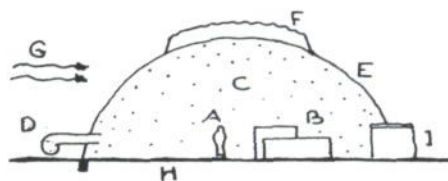
Gitterschalen haben eine relativ geringe Schubsteifigkeit. Einseitige Belastungen führen deshalb leicht zum Beulen oder Knicken der Konstruktion. Zusätzlich eingeführte Elemente wie diagonal zum Gitter verlaufende Zugseile können diese grundsätzliche Schwäche zum Teil ausgleichen. Trotz-



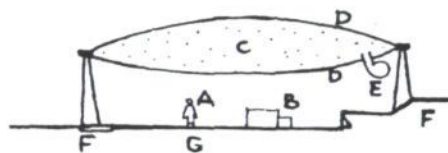
Buckelzelle entstehen, wenn die Membran mit Seilen unmittelbar über weich abgerundete Masten gespannt wird.



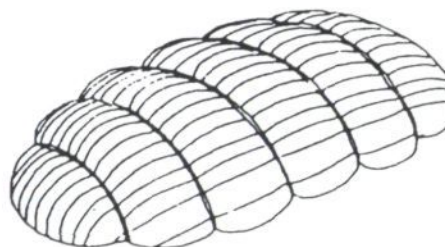
Mit dem deutschen Pavillon auf der Expo 1967 in Montreal realisierte Frei Otto die erste große Seilnetzkonstruktion – hier noch vor der Eindeckung.



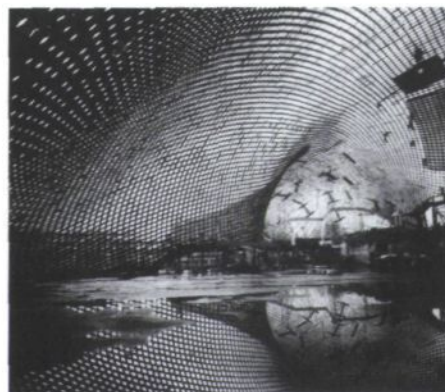
Die Traglufthalle ist die geläufigste pneumatische Konstruktion. Eine Membran wird von einem Überdruck der Luft im Halleninnenraum vorgespannt. Der Zugang zur Halle führt durch eine Schleuse.



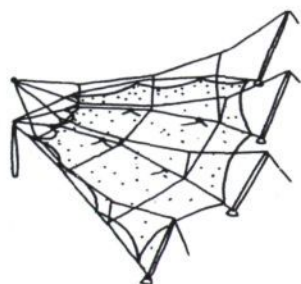
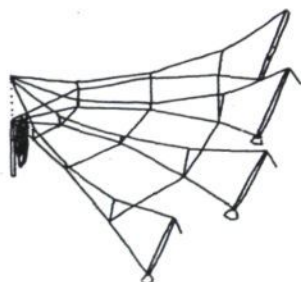
Luftkissen halten den eigentlichen Nutzraum frei von Druckunterschieden, haben aber eine große Konstruktionshöhe und benötigen eine Unterkonstruktion aus Druckelementen.



Bei größeren Spannweiten muß die Membran von Traglufthallen mit Seilen verstärkt werden. Sie modellieren gleichzeitig die Oberflächenform der Membran.

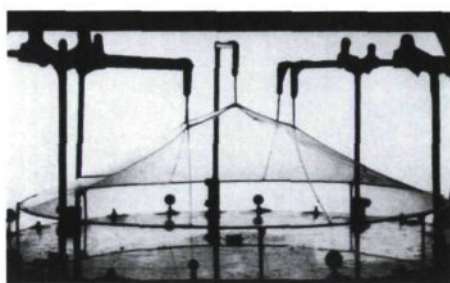
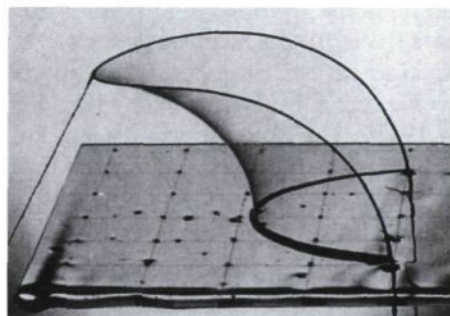


Gitterschalen sind bisher sehr selten eingesetzt worden. Mit der Multihalle für die Bundesgartenschau in Mannheim realisierte Frei Otto 1975 die erste größere Konstruktion dieser Art.



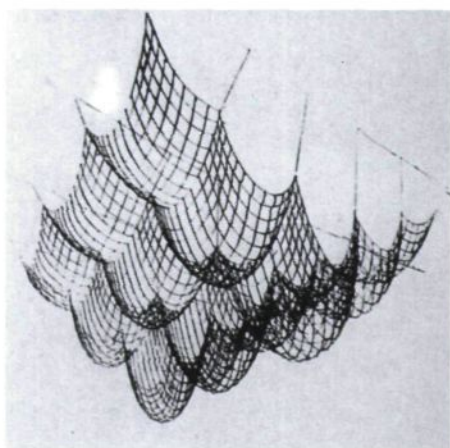
Wandelbare Dächer aus biegeweichen Membranen werden in doppeltgekrümmte Oberflächenformen aufgespannt und entweder parallel zu einem der Ränder oder, wie hier, zentral auf einen Punkt hin gerafft.

Die doppeltgekrümmten Oberflächen von Leichtbaukonstruktionen können experimentell mit Seifenhautmodellen ermittelt werden. Nach dem Eintauchen in eine Seifenlösung spannt sich zwischen einem vorgebogenen Draht die Seifenhaut in der Form einer Minimalfläche.



Seifenhautmodell zur Optimierung des traditionellen Zirkuszeltens

Hängemodell eines Seilnetzes, aus dem sich nach der Umkehrung die Form einer Gitterschale ergibt, in der ausschließlich Druckkräfte auftreten.



dem erreichen Gitterschalen nicht die Spannweiten zugbeanspruchter Konstruktionen.

Die Entwicklung der Gitterschalen geht auf Frei Otto zurück, der 1962 die ersten zwei Projekte in dieser Konstruktionsart realisierte. Bis heute sind allerdings nur etwa 30 Gitterschalen entstanden, die größte mit einer maximalen Spannweite von 80 Metern baute Frei Otto 1975 für die Bundesgartenschau in Mannheim.

Wandelbare Dächer: lassen sich öffnen oder schließen und passen sich in ihrer Form wechselnden Bedingungen an – in der Regel schützen sie bei Bedarf vor Regen oder der Sonne. Sie können konventionell als steife, verfahrbare Konstruktion oder aber mit Membranen ausgeführt werden.

Membranen werden beim Öffnen eines wandelbaren Daches gerafft, also wie ein Segel in Falten gelegt, oder aufgerollt. Sie bewegen sich entweder parallel zu einer ihrer Flächenbegrenzungen oder zentral auf einen Punkt hin, der innerhalb oder außerhalb der überdachten Fläche liegen kann und werden dabei von einem übergeordneten Tragwerk aus Schienen oder Seilen geführt. Wenn sie Wind oder Regen ausgesetzt sind und größere Flächen überspannen, müssen sie sich in doppeltgekrümmten Formen aufspannen, um tragfähig und gegen Sogkräfte gesichert zu sein.

Das klassische Beispiel einer wandelbaren Membrankonstruktion ist der Schirm. Schon den antiken Hochkulturen der Ägypter und Griechen bekannt, wurde dessen Konstruktion in seiner langen Entwicklung beständig perfektioniert. Aber auch Toldos, Vela und die Markisen des 19. Jahrhunderts zeigen die weite Verbreitung des wandelbaren Daches in der Geschichte.

Minimalfläche: Die Minimalfläche ist die kleinste Fläche zwischen einem beliebig geformten, geschlossenen Linienzug. An jedem Punkt ihrer Fläche ist die Summe aller (positiven und negativen) Krümmungsradien null. Senkrecht aufeinander stehende Krümmungen sind also gegenläufig und gleich groß. Zwischen Linienzügen, die nicht in einer Ebene liegen, bilden sich immer sattelförmige Minimalflächen.

Experimentell können Minimalflächen mit Seifenhäuten erzeugt werden. Aufgrund ihrer gleichmäßigen Oberflächenspannung bilden sie sich immer als Minimalfläche aus. Seifenblasen werden als Minimalflächen bezeichnet, obwohl sie es im streng-mathematischen Sinn nicht sind. Sie umschließen mit der kleinsten Oberfläche das größtmögliche Volumen.

Entwurf: Die komplexen doppeltgekrümmten Oberflächen des Leichtbaus lassen sich nicht mehr zeichnerisch entwickeln. Leichtbaukonstruktionen müssen deshalb am Modell entworfen werden. Dabei hat jede Konstruktionsart ihre eigene Modellbautechnik: vorgespannte Zelte werden mit Seifenhäuten, Pneus mit Seifenblasen und Gitterschalen mit Hängemodellen simuliert. Ziel des Entwurfsprozesses ist ein räumlich exaktes Modell der Konstruktion, in dem die entstehenden Räume architektonisch überprüft und die auftretenden Kräfte und Spannungen bekannt sind. Es muß zugleich die Ermittlung von Zuschnittsmustern ermöglichen. Seit einigen Jahren bieten spezielle CAD-Programme die Möglichkeit, Leichtbaukonstruktionen teilweise oder ganz auch am Computer zu entwickeln. Erstmals erlauben sie den genauen Zuschnitt und statische Berechnungen, die die dynamischen Formveränderungen der Konstruktionen im Leichtbau berücksichtigen.

Wegen dem unmittelbaren Zusammenhang von Form und Konstruktion sind dem architektonischen Entwerfen im Leichtbau enge Grenzen gesetzt. Nach der Festlegung der Konstruktionsart und Parametern wie Randausbildung und Druckgliedern ist die Form nicht mehr frei wählbar. Es sind nur noch solche Formen möglich, die an jeder Stelle Gleichgewichtsfiguren bilden. Diese Gleichgewichtsformen können nur in schrittweiser Optimierung experimentell am Modell oder am Computer „gefunden“ werden.

Tipi: nannte man die Zelte der nordamerikanischen Indianer. Ihr Grundgerüst bestand aus etwa acht Meter langen Holzstangen, die kegelförmig gegeneinander gelehnt und an ihrem Schnittpunkt mit einem Seil verknotet waren. Der Durchmesser des Kegels betrug in der Regel zwischen sechs und acht Metern, in Ausnahmefällen sogar bis 16 Meter. Um das Zeltgerüst gegen den Wind zu sichern, wurde der Kegel leicht gegen den Wind geneigt und der Schnittpunkt der Zeltstangen nach unten in die Mitte des Tipis abgespannt.

Die Zeltmembrane wurde aus über 20 Bisonfellen gefertigt. Ihr Zuschnitt entsprach der abgewinkelten Kegeloberfläche, so daß die Membrane in einem Stück auf das Gerüst gezogen werden konnte. Lüftungsklappen an der Spitze des Zeltes, die mit langen Stangen bedient werden konnten, und eine zweite Lederhaut, die im unteren Bereich des Tipi von innen am Zeltgerüst befestigt war, um zusätzlichen Schutz vor Zug und Feuchtigkeit zu bieten, machten das Tipi zum klimatechnisch bestdurchdachten Kegelzelt überhaupt.

Jurten: sind die Zelte mongolischer Nomaden, die es von Sibirien bis zum kaspischen Meer verbreiteten. Ihre Membranen bestehen aus bis zu acht Schichten Filz und bieten ausgezeichneten Schutz vor Kälte und Feuchtigkeit. Filz kann allerdings keinerlei Zugkräfte aufnehmen. Das Gerüst der Jurte muß deshalb besonders stabil und feingliedrig sein. Es hat sich zu einem Vorläufer moderner Gitterschalen entwickelt.

Die Seitenwand der Jurte umschließt einen Raum, der im Durchmesser bis zu sieben Metern mißt. Sie besteht aus diagonal gekreuzten Weidenruten, die mit Lederschnüren gelenkig verbunden sind, so daß die Seitenwand zum Transport wie ein Scherengitter zusammengeschoben werden kann. Weidenruten bilden auch das kuppelförmige Dach der Jurte. Sie spannen von der Seitenwand zur „Krone“ der Jurte einen Druckring, der mit Speichen verspannt ist und gleichzeitig zur Belichtung und Belüftung dient. Die Schubkräfte der Zeltkuppel werden von einem gewebten Zugband aufgenommen, das die Seitenwand am oberen Rand zusammenhält.

Beduinenzelte: sind Spannzelte. Sie bestehen lediglich aus einer Dachmembrane, die von einzelnen hölzernen Stangen gestützt und mit langen Seilen gespannt wird. Als Seitenwände werden, wenn nötig, einzelne Stoffbahnen wandelbar eingehängt. Im Unterschied zu anderen Nomadenzelten weisen Beduinenzelte kein Gerüst mehr auf und kommen modernen vorgespannten Zelten verblüffend nahe.

Ihr wichtigstes konstruktives Element ist die textile Dachmembrane. Sie setzt sich aus einzelnen, gewebten Stoffbahnen zusammen, die parallel vernäht sind und deren Fasern aus elastischen Ziegenhaaren bestehen. Um die Membrane auch in Querrichtung, also gegen die Nähte, spannen zu können, ist sie in dieser Richtung mit Spannbändern verstärkt. Die Punktlast der Zeltstangen wird von kurzen Querhölzern oder Stoffbündeln auf die Membrane verteilt. Die Spannseile sind an Reisigbüscheln, die fest im Wüstensand vergraben sind, verankert.

Vela: waren Zeltdächer, die die antiken römischen Theater und Amphitheater verschatteten und wahrscheinlich auch die Akustik verbessern sollten. Sie sind die größten Zeltkonstruktionen, die vor unserem Jahrhundert gebaut wurden. Schrift- und Bildquellen, aber auch Reste der Konstruktion selbst belegen die Existenz der Vela eindeutig, sie geben jedoch keinen genauen Aufschluß über ihr Tragwerk. Vermutlich bestand es aus senkrechten Masten, die in regelmäßigen Abständen die Außenmauern der Theater überragten. Von ihnen waren horizontale, bis zu 30 Meter in den Innenraum tragende Stangen abgehängt, an denen das Zeltdach in einzelnen Stoffbahnen befestigt war. Um die Konstruktion gegen den Wind zu schützen, mußten sie wie Segel raffbar sein.

Toldos: sind Sonnensegel, die den öffentlichen Raum der Geschäftsstraßen vor der Sonne schützen. Als Variante der nordeuropäischen Glaspassage findet man sie in allen Städten des südlichen Spaniens, aber auch in Marokko, Ägypten und der Türkei. Ihre Geschichte läßt sich über 2000 Jahre zurückverfolgen.

Sie sind meist in Traufhöhe angeordnet und mit Ösen an Seilen oder Drähten befestigt, die parallel zwischen gegenüberliegenden Häuserfluchten gespannt sind. Mit Zugseilen können die Stoffbahnen ein- und ausgefahren und so vor Wind geschützt werden. Ihre raumerzeugende Wirkung wird auch in besonderen Toldos für Feste und Prozessionen eingesetzt.

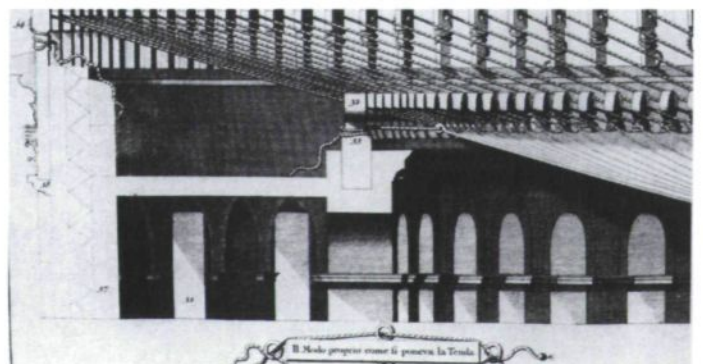
Zusammengestellt und geschrieben von Markus Kuhn unter besonderer Berücksichtigung von: J. Hennie, Vom Umgang mit leichten und weitspannbaren Flächentragwerken, in: Leicht und Weit. Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke, hrsg. von G. Brinkmann, Weinheim 1990; P. Rice, Lightweight structures. Introduction, in: The Arup Journal, 9/80, Firmenbroschüre von Ove Arup Partnership, London

Weitere Literatur:

Philip Dreew: Tensile Architecture, London 1979
Torwald Faegre, Zelte: Die Architektur der Nomaden, Hamburg 1980
Rainer Graefe, Vela Erunt: Die Zeltdächer der römischen Theater und ähnlicher Anlagen, Mainz 1979
Thomas Herzog, Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft, Stuttgart 1976
Patterns 5, Firmenbroschüre von Büro Happold; Consulting Engineers, Bath
Conrad Roland, Frei Otto-Spannweiten: Ideen und Versuche zum Leichtbau, Berlin 1965
Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart:
IL 5 Wandelbare Dächer
IL 16 Zelte
IL 17 The work of Frei Otto and his teams 1955-76
IL 30 Sonnensegel, Vela, Toldos und Blechzelte



Toldos sind wandelbare Sonnensegel, die als Variante der nordeuropäischen Glaspassage die Geschäftsstraßen im südlichen Spanien vor der Sonne schützen.



Seit der Renaissance versuchen Architekten die Velumdächer der antiken römischen Theater zu rekonstruieren. (Fontana, 1714)