

Formaktive Tragsysteme  
Form-active Structure Systems

1

Nicht-steife, flexible Materie, in bestimmter Weise geformt und durch feste Endpunkte gesichert, kann sich selbst tragen und Raum überspannen: formaktive Tragsysteme.

Vorgänger der formaktiven Tragsysteme sind das senkrechte Hängeseil, das die Last direkt zum Aufhängepunkt abträgt, und die senkrechte Stütze, die in umgekehrter Richtung die Last direkt zum Fußpunkt weiterleitet.

Senkrechte Stütze und senkrecht Hängeseil sind Prototypen der formaktiven Tragsysteme. Sie übertragen Lasten nur durch einfache Normalkräfte, d. h. entweder durch Druck oder durch Zug.

Durch Zusammenknüpfen zweier Hängeseile mit verschiedenen Aufhängepunkten entsteht das Tragseil, das sich selbst über freien Raum spannen und Lasten durch reine Zugkräfte seitlich abtragen kann.

Die Umkehrform des Tragseiles ist der Stützbogen. Die ideale Form eines Stützbogens für eine bestimmte Belastung ist die entsprechende Hängelinie für die gleiche Belastung.

Kennzeichen der formaktiven Tragsysteme ist also, daß sie die äußeren Kräfte durch einfache Normalkräfte umlenken: der Stützbogen durch Druck, das Tragseil durch Zug.

Formaktive Tragsysteme entwickeln an ihren Festpunkten horizontale Kräfte. Die Aufnahme dieser Kräfte ist ein wesentliches Problem des Entwurfes formaktiver Tragsysteme.

Der Tragmechanismus der formaktiven Systeme beruht vorherrschend auf stofflicher Form. Abweichung von der richtigen Form, wenn ausführbar, stellt die Wirkungsweise des Systems in Frage oder erfordert zusätzliche Umlenkungsmechanismen, die die Abweichung kompensieren.

Die Strukturform der formaktiven Tragsysteme entspricht im Idealfalle genau dem Kräfteverlauf. Formaktive Tragsysteme sind daher stoffgewordene Folge „natürlicher“ Kraftrichtungen.

Die „natürliche“ Kräftelinie des formaktiven Drucksystems ist die Stützzlinie, die des formaktiven Zugsystems die Hängelinie. Stützzlinie und Hängelinie sind Ergebnis der auf das System einwirkenden Kräfte einerseits und der Pfeilhöhe und des Abstandes der Festpunkte andererseits.

Stützzlinie oder Hängelinie sind also zweites Kennzeichen der formaktiven Tragsysteme.

Jede Veränderung der Lasten- oder Auflagerbedingungen verändert die Form der Stütz- oder Hängelinie und bedingt eine neue Strukturform. Während das Tragseil als „nach-gebendes“ System bei Lastenveränderung von selbst die neue Hängelinie einnimmt, muß der Stützbogen als „widerstrebendes“ System durch Steifigkeit (Biegemechanismus) den Unterschied der veränderten Stützzlinie aufnehmen.

Weil das Tragseil bei unterschiedlicher Belastung seine Form ändert, muß es immer die Hängelinie für die jeweilige Belastung sein. Demgegenüber kann der Bogen, weil er seine Form nicht ändern kann, nur für eine ganz bestimmte Belastung Stützzlinie sein.

Formaktive Tragsysteme sind wegen ihrer Abhängigkeit vom Belastungszustand streng der Disziplin des „natürlichen Kräfteverlaufes“ unterworfen und entziehen sich daher der Willkür freier Formgebung. Bauform und Raumform sind Ergebnis der Tragmechanik.

Leichtigkeit des flexiblen Tragseiles und Schwere des gegen Lastenveränderung versteiften Stützbogens sind architektonische Nachteile formaktiver Tragsysteme. Sie können weitgehend durch Vorspannen der Systeme ausgeschaltet werden.

Ebenso wie das Tragseil durch Vorspannung so stabilisiert werden kann, daß es zusätzliche, auch aufwärts gerichtete Kräfte aufnehmen kann, ebenso kann der Stützbogen durch Zugglieder so weit vorkomprimiert werden, daß er ohne kritische Biegung asymmetrische Lasten umlenken kann.

Stützbogen und Tragseil sind aufgrund ihrer Beanspruchung durch einfachen Druck oder

Zug das materialwirtschaftlichste System der Raumüberspannung.

Wegen ihrer Identität mit dem „natürlichen“ Kräfteverlauf sind formaktive Tragsysteme die geeigneten Mechanismen, um große Spannweiten zu erzielen und weite Räume zu bilden.

Da formaktive Tragsysteme die Lasten auf direktem Wege abtragen, sind sie in Wirkung und Wesen Linienträger. Das gilt auch für Seilnetze, Membranen oder Gitterkuppeln, bei denen die Lastabtragung zwar in mehr als einer Achse aber dennoch mangels Scherkraftmechanismus linear erfolgt.

Formaktive Tragelemente können zu Flächenstrukturen verdichtet werden. Soll der einfache Spannungszustand, das Kennzeichen formaktiver Systeme, erhalten bleiben, sind auch sie den Gesetzen von Stütz- oder Hängelinie unterworfen.

Stützbogen und Tragseil sind jedoch nicht nur Grundelemente formaktiver Tragsysteme, sondern sind elementare Idee für jeden Tragmechanismus und damit Symbol technischer Raumschließung durch den Menschen schlechthin.

Formaktive Eigenschaften können in allen anderen Tragsystemen zum Einsatz gebracht werden. Besonders in flächenaktiven Tragsystemen sind sie wesentlicher Bestandteil für das Funktionieren des Tragmechanismus.

Formaktive Tragsysteme haben wegen ihrer weitspannenden Eigenschaften eine besondere Bedeutung für die Massenzivilisation mit ihrem Bedarf an Großräumen. Sie sind potentielle Tragformen für zukünftiges Bauen.

Kenntnis der Gesetzmäßigkeit formaktiver Kraftumlenkung ist Voraussetzung für die Entwicklung jedes Tragsystemes und ist daher primäre Wissensgrundlage für den entwerfenden Architekten oder Ingenieur.

Non-rigid, flexible matter, shaped in a certain way and secured by fixed ends, can support itself and span space: form-active structure systems.

Predecessors of form-active structure systems are the vertical hanger cable that transmits the load directly to the point of suspension, and the vertical column that in reverse direction transfers the load directly to the base point.

Vertical column and vertical hanger cable are prototypes of form-active structure systems. They transmit loads only through simple normal stresses; i.e. either through compression or through tension.

Two cables with different points of suspension tied together form a suspension system that can carry itself clear over free space and transfer loads laterally by pure tensile stresses.

A suspension cable turned up forms a funicular arch. The ideal form of an arch for a certain load condition is the corresponding funicular tension line for the same loading.

Distinction of the form-active structure systems then is that they redirect external forces by simple normal stresses: the arch by compression, the suspension cable by tension.

Form-active structure systems develop at their ends horizontal stresses. The reception of these stresses constitutes a major problem in designing form-active structure systems.

The bearing mechanism of form-active systems rests essentially on the material form. Deviation from the correct form, if possible at all, jeopardizes the functioning of the system or requires additional mechanisms that compensate the deviation.

The structure form of form-active structure systems in the ideal case coincides precisely with the flow of stresses. Form-active structure systems therefore are the 'natural' path of forces expressed in matter.

The 'natural' stress line of the form-active compression system is the funicular pressure line, that of the form-active tension system the funicular tension line. Pressure line and tension line are determined by the forces working on the system on the one hand, and by the rise or sag and the distance of the ends on the other.

Funicular pressure line and tension line are then the second distinction of form-active structure systems.

Any change of loading or support conditions changes the form of the funicular curve and causes a new structure form. While the load cable as a 'sagging' system under new loads assumes by itself a new tension line, the arch as a 'humping' system must compensate the changed pressure line with stiffness (bending mechanism).

Since the suspension cable under different loading changes its form, it is always the funicular curve for the existing load. On the other hand the arch, since it cannot change its form, can be funicular only for one certain loading condition.

Form-active structure systems, because of their dependence on loading conditions, are strictly governed by the discipline of the 'natural' flow of forces and hence cannot become subject to arbitrary free form design. Architectural form and space are the result of the bearing mechanism.

Lightness of the flexible suspension cable and heaviness of the arch stiffened against a variety of additional loads are architectural demerits of form-active structure systems. They can be largely eliminated through prestressing the systems.

As the suspension cable can be stabilized by prestressing so that it can receive additional forces that also may be upward directed, so too the arch can be precompressed to a degree that it can redirect asymmetrical loading without critical bending.

Arch and suspension cable, because of their being stressed only by simple compression or tension, are with regard to

weight/span ratio the most economical systems of spanning space.

Because of their identity with the 'natural' flow of forces the form-active structure systems are the suitable mechanisms for achieving long spans and forming large spaces.

Since form-active structure systems disperse loads in the direction of resultant forces they are in effect and essence linear girders. This is true also for cable nets, membranes or lattice domes in which the loads, though being dispersed in more than one axis, are still transferred in a linear way because of lack of shear mechanism.

Form-active structure elements can be condensed to form surface structures. If the single stress condition, the distinction of form-active systems, is to be maintained, they too are submitted to the rules of funicular pressure line and tension line.

Arch and suspension cable, however, are not only the material essence of form-active structure systems, but are the elementary idea for any bearing mechanism and consequently the very symbol of man's technical seizure of space.

Form-active qualities can be brought to bear on all other structure systems. Especially in surface-active structure systems they are an essential constituent for the functioning of the bearing mechanism.

Form-active structure systems, because of their longspan qualities, have a particular significance for mass civilization with its demand for large scale spaces. They are potential structure forms for future building.

Knowledge of the laws of form-active redirection of forces is requisite for the design of any structure system and hence is essential for the architect or engineer concerned with structural design.

Definition

FORMAKTIVE TRAGSYSTEME

sind Tragsysteme aus flexibler, nicht-steifer Materie, in denen die Kraftumlenkung durch geeignete FORMGEBUNG und durch charakteristische FORMSTABILISIERUNG erfolgt

FORM-ACTIVE STRUCTURE SYSTEMS

are structure systems of flexible, non-rigid matter, in which the redirection of forces is effected through particular FORM DESIGN and characteristic FORM STABILIZATION

Kräfte / Forces

Die Systemglieder werden dabei primär nur durch gleichartige Normalkräfte belastet, d.h. entweder auf Druck oder auf Zug: SYSTEME IN EINFACHEM SPANNUNGSZUSTAND

Its basic components are primarily subjected to but one kind of normal stresses, i.e. either to compression or to tension: SYSTEMS IN SINGLE STRESS CONDITION

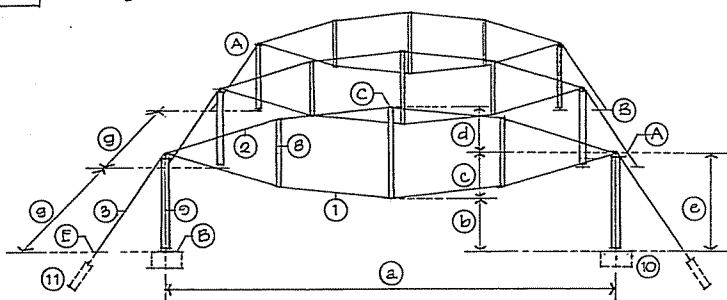
Merkmale / Features

Die typischen Struktur-Merkmale sind: KETTENLINIE (HÄNGELINIE), STÜTZLINIE, KREIS

The typical structure features are: CATENARY / THRUST LINE (PRESSURE LI), CIRCLE

Bestandteile und Bezeichnungen / Components and denominations

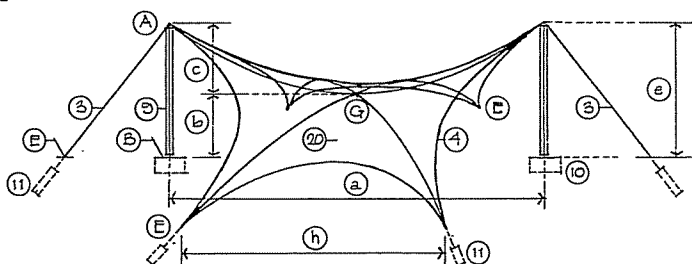
1.1 Seilsysteme / Cable systems



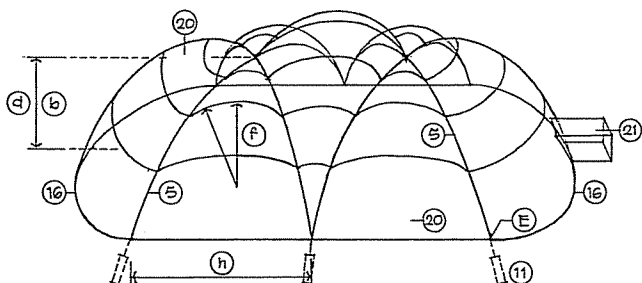
System-Glieder / System members

- ① Tragseil, Lastseil suspension cable, load cable
- ② Stabilisierungsseil, Spannceil stabilization cable, stress cable
- ③ Rückhalte-seil, Abspannseil, Stag retaining cable, stay, guy
- ④ Randseil edge cable, boundary cable
- ⑤ Kehlseil valley cable
- ⑥ Hängeseil hanger
- ⑦ Zugband, Zuganker tie rod, tieback
- ⑧ Druckstab, Spreizstab compression rod (bar), spreader
- ⑨ Stütze, Pylon, Mast column, pylon, mast, support
- ⑩ Fundament, Gründung foundation, footing
- ⑪ Erdanker, Abspannanker soil anchor, retaining anchor
- ⑫ Widerlager abutment
- ⑬ Gelenk pin joint, hinge
- ⑭ Scheitelgelenk crown hinge, top hinge, key hi.
- ⑮ Fußgelenk, Kämpfergelenk base hinge, impost hinge
- ⑯ Ankerring anchor ring
- ⑰ Bogen, Stützbogen arch, funicular arch
- ⑱ Gelenkbogen pinned arch, hinged arch
- ⑲ Strebe-pfeiler buttress
- ⑳ Tragmembrane bearing membrane
- ㉑ Luftschleuse air lock
- ㉒ Funktionsseil functional cables

1.2 Zeltsysteme / Tent systems



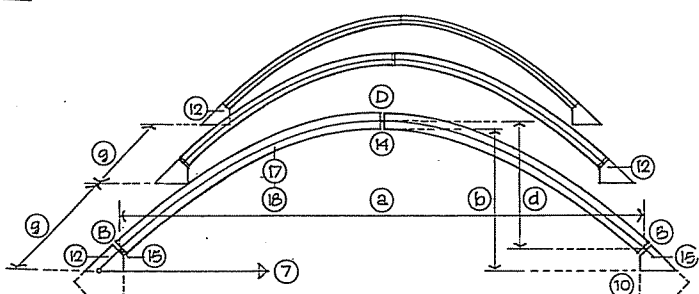
1.3 Pneusysteme / Pneumatic systems



Topografische Systempunkte / Topographical system points

- A Aufhängepunkt suspension point
- B Fußpunkt, Basispunkt base point
- C Hochpunkt peak, high point
- D Scheitelpunkt key, top, crown, vertex, apex
- E Ankerpunkt, Abspannpunkt anchor point, retaining point
- F Auflagerpunkt point of support, bearing point
- G Tiefpunkt low point
- H
- I

1.4 Bogensysteme / Arch systems

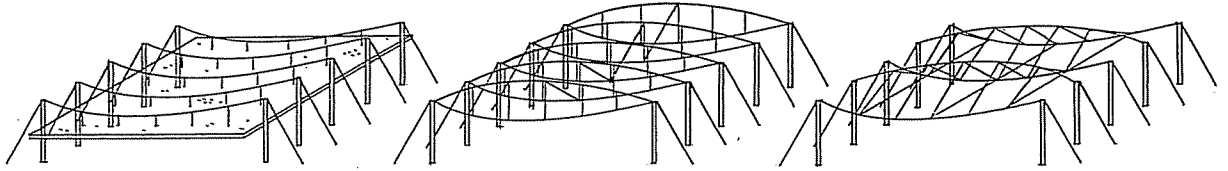


Systemabmessungen / System dimensions

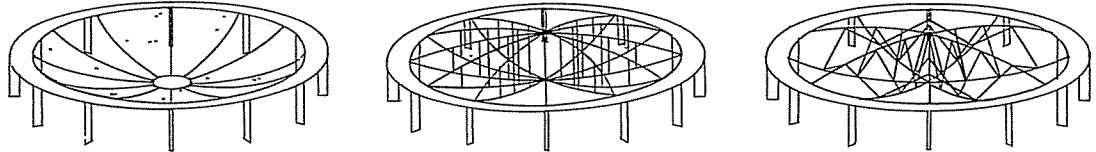
- a Stützweite, Spannweite span
- b Lichte Höhe clear height, clearance
- c Durchhang, Pfeilhöhe cable sag
- d Stich (-höhe), Pfeilhöhe arch (cable) rise
- e Stützenhöhe column height, support height
- f Krümmungsradius radius of curvature
- g Binderabstand spacing, frame distance
- h Ankerpunkt-Abstand distance of anchor points
- i
- j

## 1.1 Seil-Tragwerke / Cable structures

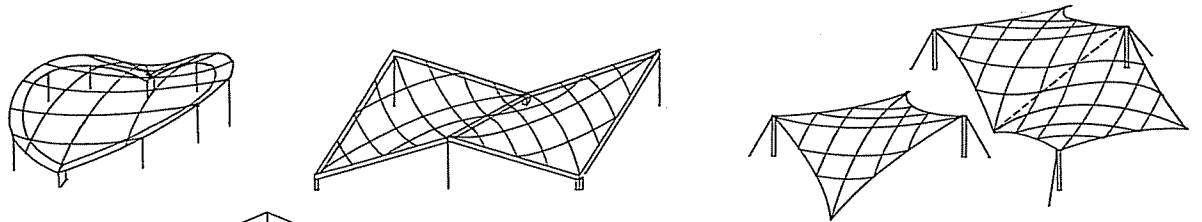
Parallele Spannsysteme  
Parallel span systems



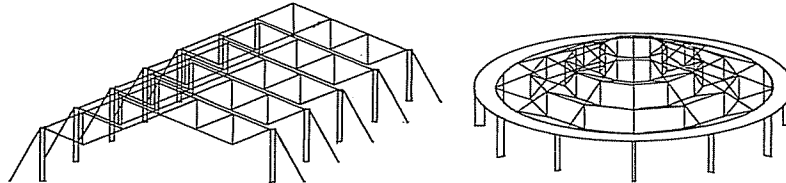
Radiale Spannsysteme  
Radial span systems



Zweiachsiges Spannsysteme  
Biaxial span systems



Seil-Fachwerke  
Cable trusses

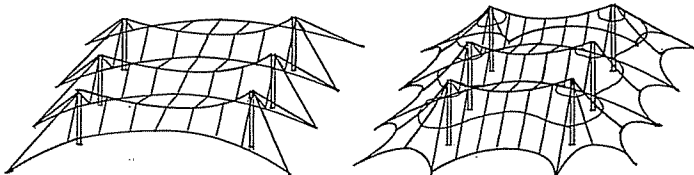


## 1.2 Zelt-Tragwerke / Tent structures

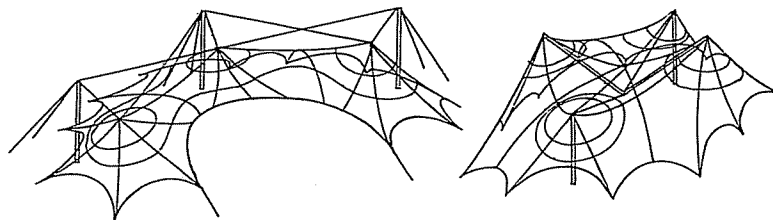
Hochpunkt-Zeltsysteme  
Peak tent systems



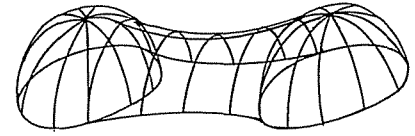
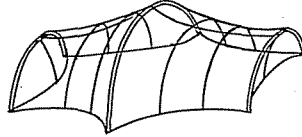
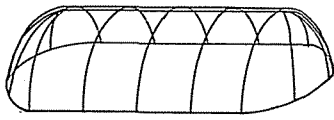
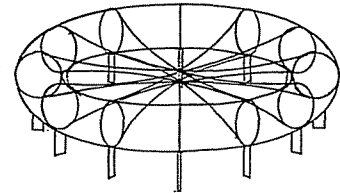
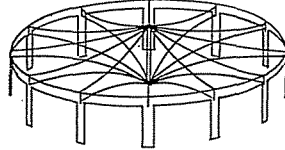
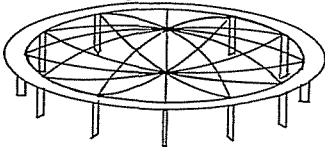
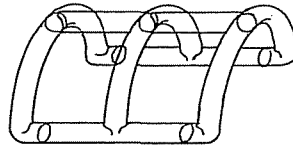
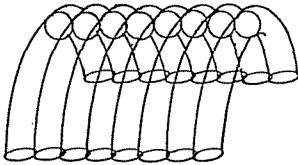
Wellen-Zeltsysteme  
Undulating tent systems



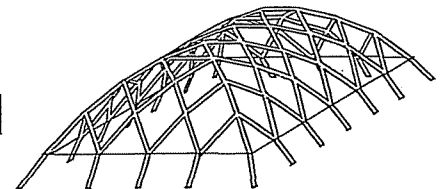
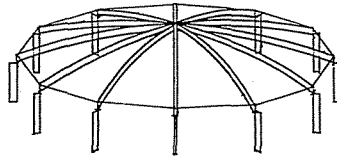
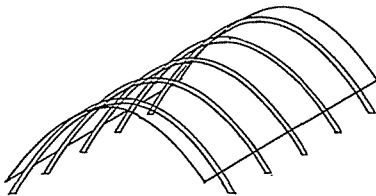
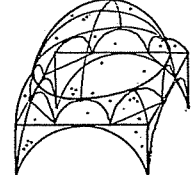
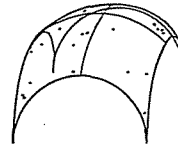
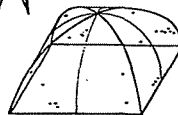
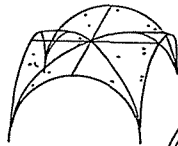
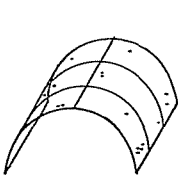
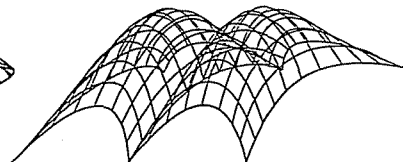
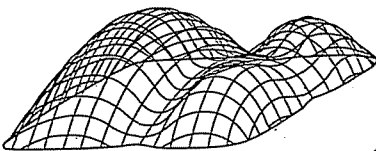
Indirekte Hochpunkt-Zelte  
Indirect peak tents



## 1.3 Pneumatische Tragwerke / Pnematic structures

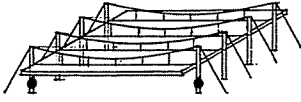
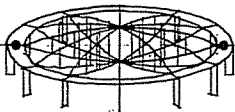
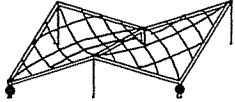

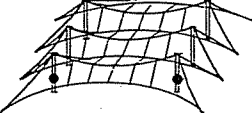


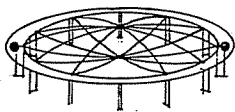
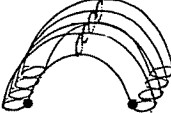


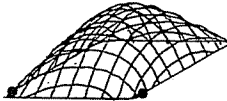
Luftballen-Systeme  
Air-controlled indoor systemsLuftkissen-Systeme  
Air cushion systemsLuftschlauch-Systeme  
Air tube systems

## 1.4 Bogen-Tragwerke / Arch structures

Lineare Systeme  
Linear systemsGewölbe-Systeme  
Vault systemsStützgitter-Systeme  
Vaulted lattice systems

Anwendungen = Tragsystem - Baustoff - Spannweite

Applications = structure system - material - span

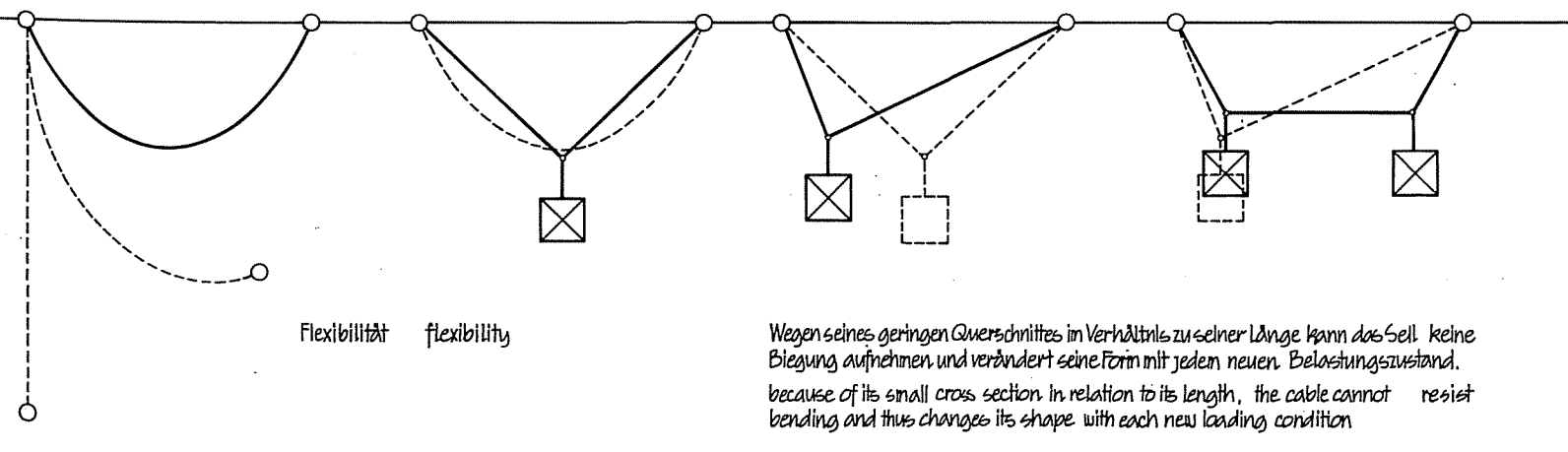
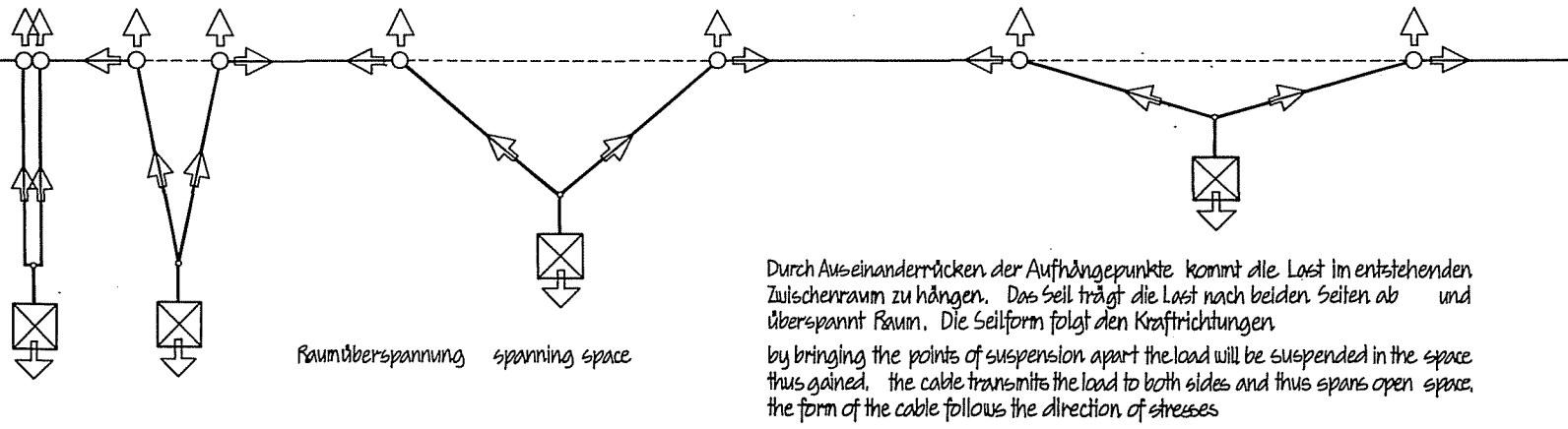
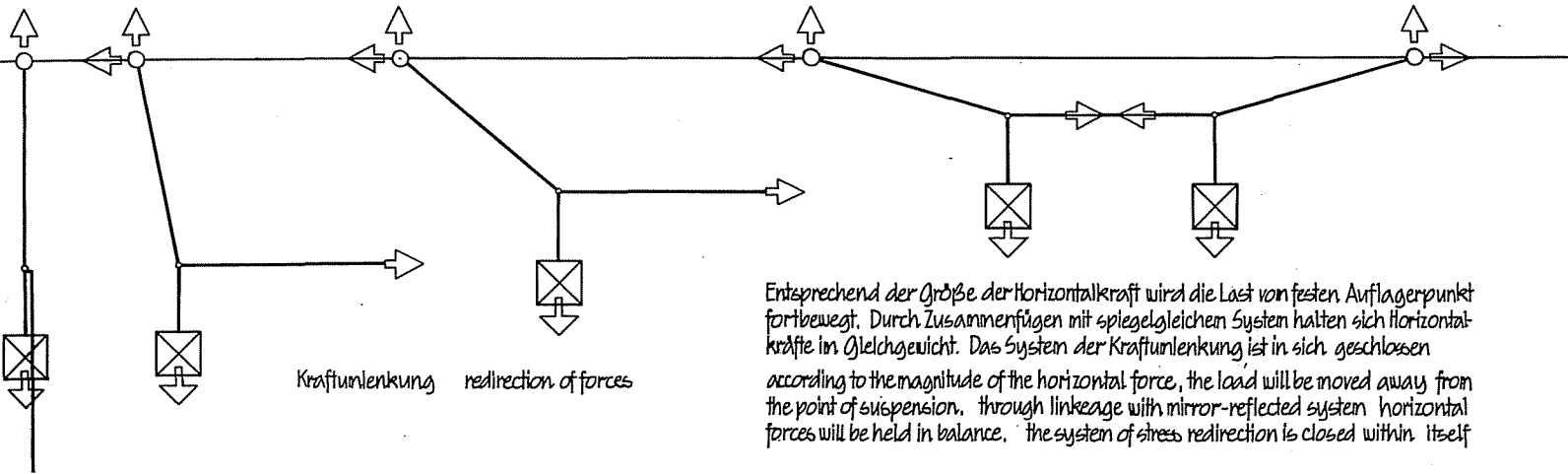
Tragsystem / Structure system		Primär-Baustoff / Primary material	Spannweiten in Metern / Spans in meters																	
			0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	400	500
SEIL- Tragwerke <b>1.1</b> CABLE structures		Ganzmetall Metall + Stahlbeton	all metal metal+reinf. concrete																	
		Ganzmetall Metall + Stahlbeton	all metal metal+reinf. concrete																	
		Ganzmetall Metall + Stahlbeton / + Holz	all metal metal+reinf. concrete / + wood																	
ZELT- Tragwerke <b>1.2</b> TENT structures		Textil + Metall/+Holz Kunststoff + Metall/+Holz	textile + metal/+wood plastics + metal/+wood																	
		Textil + Metall/+Holz Kunststoff + Metall/+Holz	textile + metal/+wood plastics + metal/+wood																	
		Kunststoff + Metall/+Stb. Textil + Metall/+Stb.	plastics + metal/+concr. textile + metal/+concr.																	
PNEU- Tragwerke <b>1.3</b> PNEUMATIC structures		Kunststoff + Metall	plastics + metal																	
		Kunststoff + Metall/+Holz / + Stahlbeton	plastics + metal/+wood / + concrete																	
		Kunststoff	plastics																	
BOGEN- Tragwerke <b>1.4</b> ARCH structures		Stahlbeton (Schicht)Holz Metall	reinf. concrete lamin. wood metal																	
		Mauerwerk	masonry																	
		Metall Holz	metal wood																	

Jedem Tragwerk-Typ ist ein spezifischer Spannungszustand seiner Tragglieder zu eigen. Hieraus ergeben sich für den Entwurf zwangsläufige Bindungen in der Wahl des Primär-Baustoffes und in der Zuordnung von Spannweiten

To each structure type a specific stress condition of its members is inherent. This essential trait submits the design of structures to rational affiliations in the choice of primary structural fabric and in the attribution of span capacity

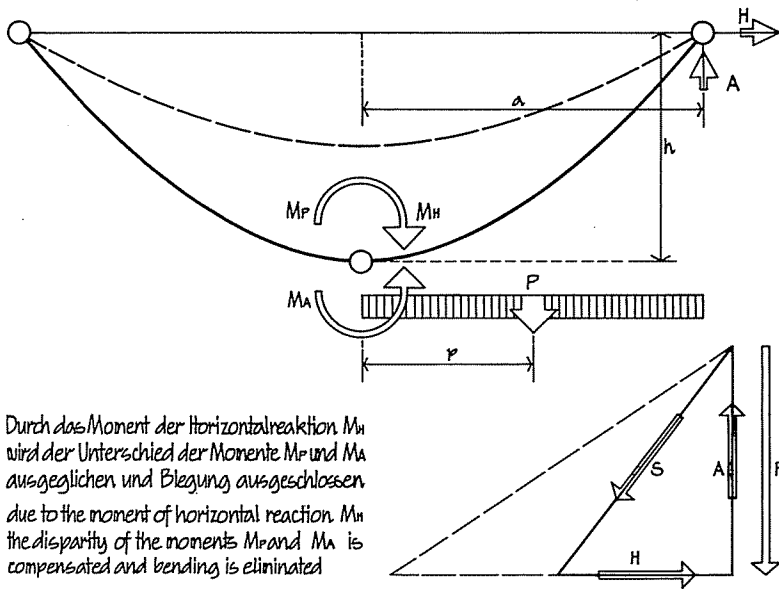
Beziehung zwischen Krafttrichtung und Tragwerkform des Seiles

relationship between stress direction and structure form of cable

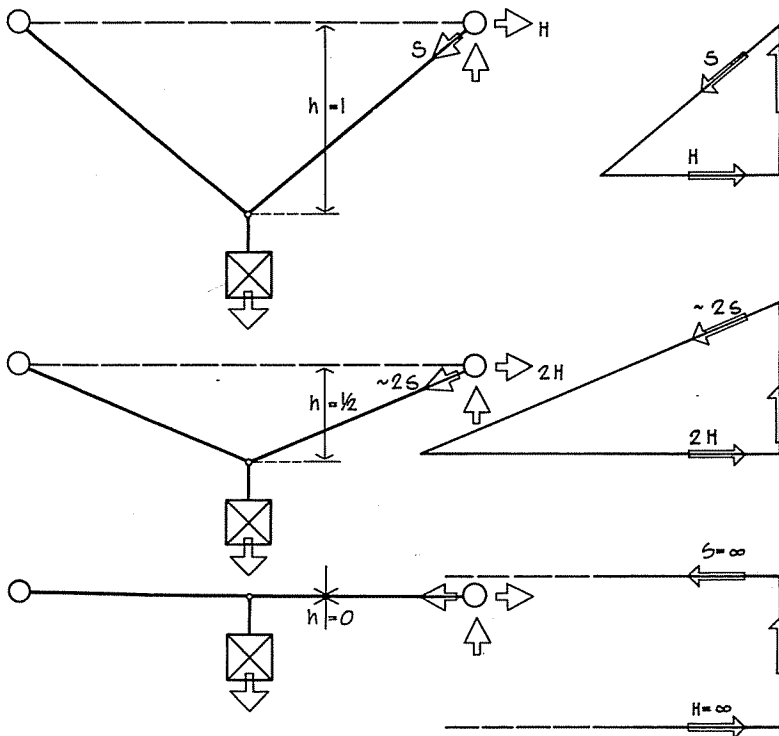




## Hebelmechanismus des Tragsesels / lever mechanism of suspension cable



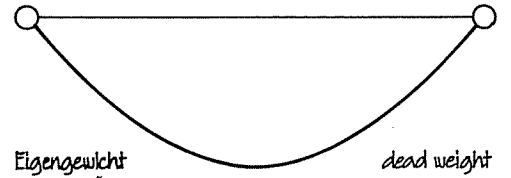
## Einfluß der Pfeilhöhe auf Kraftverteilung / influence of sag on stress distribution



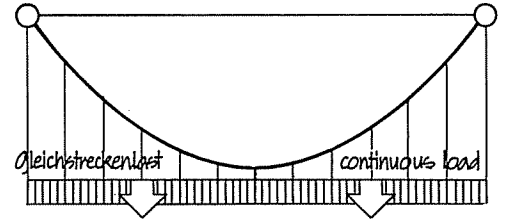
Seilkraft  $S$  und Horizontal Schub  $H$  eines Tragsesels sind umgekehrt proportional zu seiner Pfeilhöhe  $h$ . Ist Pfeilhöhe gleich Null, so werden Seilkraft und Horizontal Schub unendlich groß, d.h. das Tragsseil kann die Last nicht aufnehmen.  
 cable stress  $S$  and horizontal thrust  $H$  of a suspension cable are inversely proportional to its sag  $h$ . if the sag is zero, cable stress and horizontal thrust will become infinite, i.e. the suspension cable cannot resist to the load

## Geometrische Seillinien-Formen/geometric funicular forms

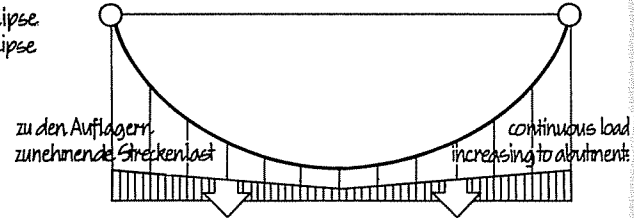
Kettenlinie catenary



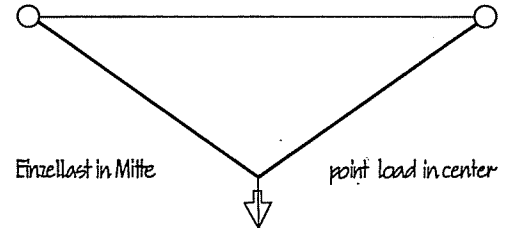
Parabel parabola



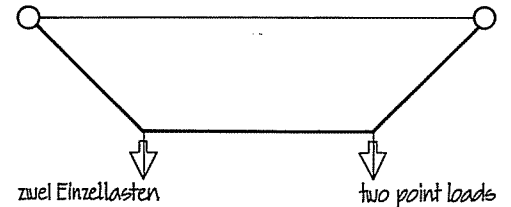
Ellipse ellipse



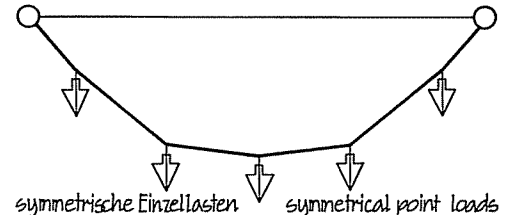
Dreieck triangle

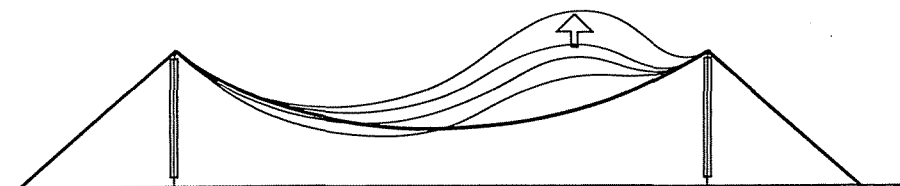


Trapezoid trapezoid

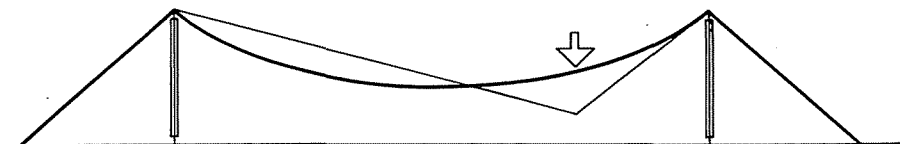


Polygon polygon

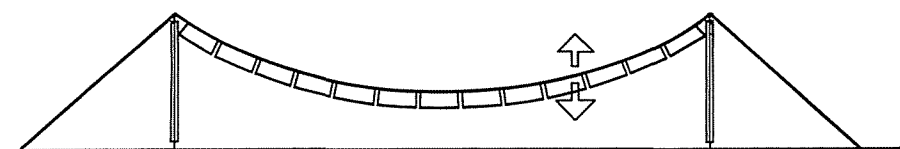




Kritische Verformungen des Tragseiles  
critical deflections of the suspension cable



Wegen seines geringen Eigengewichtes in Verhältnis zur Spannweite und wegen seiner Flexibilität ist das Tragseil sehr anfällig für: Windsog, Schwingungen, antisymmetrische und bewegliche Lasten  
due to its small dead weight in relation to its span and because of its flexibility, the suspension cable is very susceptible to: wind uplift, vibrations, asymmetrical and moving loads

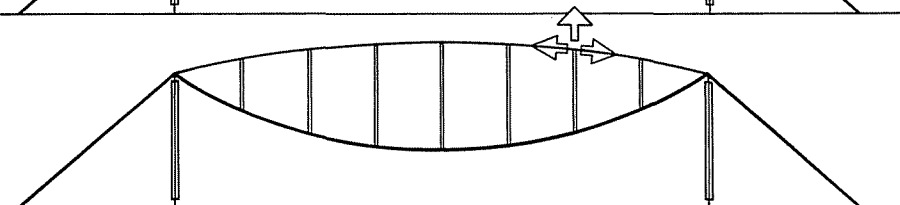


Stabilisierung des Tragseiles  
stabilization of suspension cable

Erhöhung des Eigengewichtes  
increase of dead weight



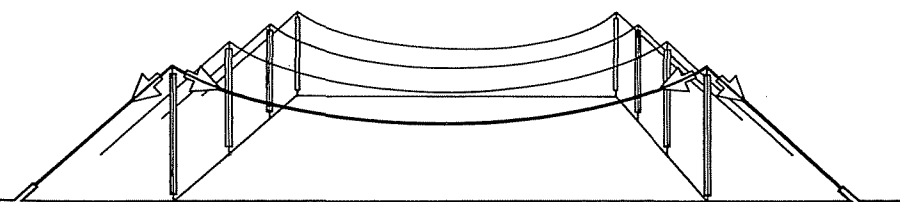
stiffening through construction as inverted arch (or shell)  
Versteifung durch Ausbildung als umgekehrter Bogen (oder Schale)



spreading against cable with opposite curvature  
Verspannung mit gegenseitig gekrümmten Seil



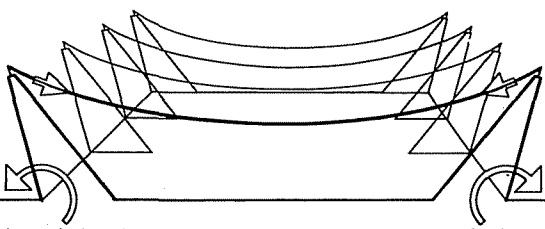
fastening with transverse cables anchored to ground  
Verspannung mit bodenverankerten Querseilen



Rückhalte-Systeme für Parallel-Tragseile  
Restraining systems for parallel suspension cables

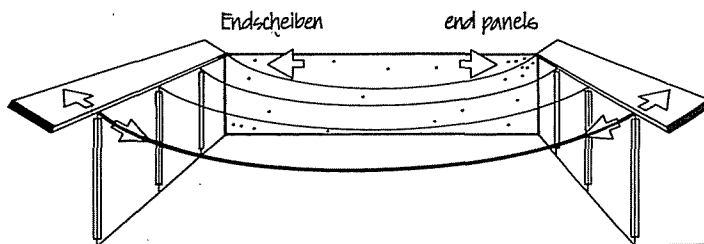
Rückhalteseil

restraining cable



biegesteife Scheibe

buttress



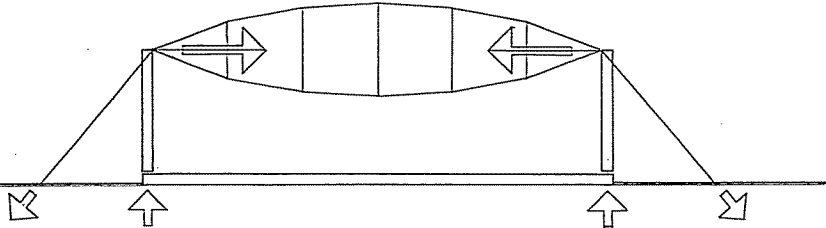
Endscheiben

end panels

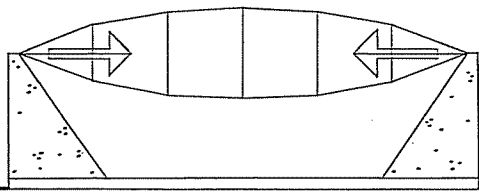
Horizontalträger

horizontal beam

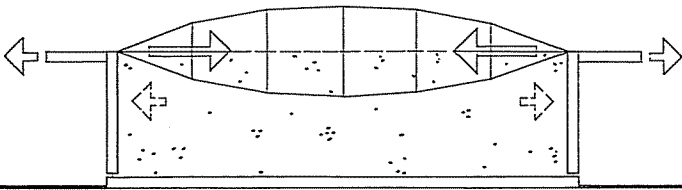
Rückhalte-Systeme zur Stabilisierung von Aufhängepunkten  
 Restraining systems for stabilization of suspension points



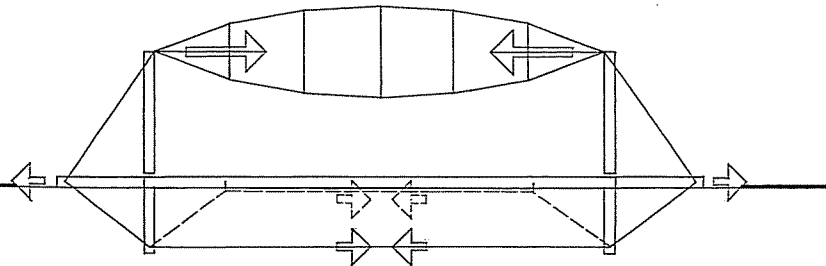
Seilabspannung der Aufhängepunkte mit Erdverankerung der Seile  
 Cable restraining of suspension points with soil anchorage of cables



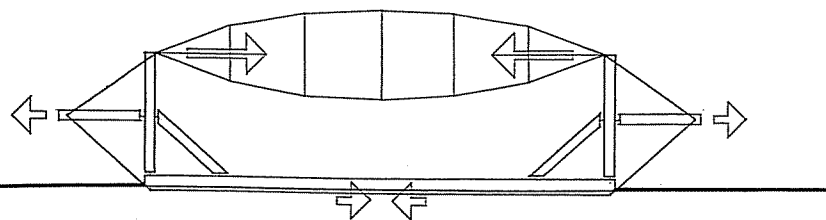
Kraftumlenkung in den Aufhängepunkten durch Pfeiler bzw. Streben  
 Redirection of forces in the suspension points through buttresses or bracings



Kraftübertragung durch Horizontalträger auf Querwände bzw. Druckbalken  
 Force transfer by horizontal girders to transverse walls or compression beams



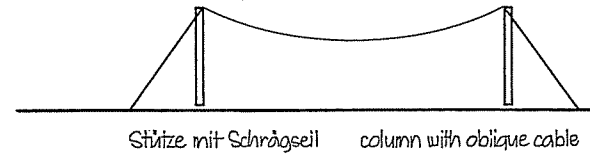
Seilabspannung mit Zuganker-Kräfteschluß unterhalb Bodenplatte  
 Cable restraining with balancing tie member connection beneath floor slab



Abspannung und Abstrebung mit Zuganker-Kräfteschluß unter/in Bodenplatte  
 Restraining and bracing with tie member connection beneath/within floor slab

Konstruktionen für Aufhängepunkte  
 Structures for suspension points

formaktiv / form-active

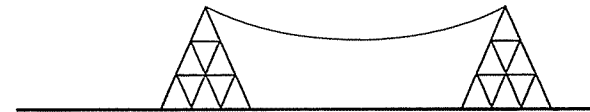


Stütze mit Schrägseil column with oblique cable



Schrägstütze mit Seil oblique column with cable

vektoraktiv / vector-active



Fachwerk-Pylon trussed pylon

schnittaktiv / section-active



Eingespannte Stütze fixed-end column



Biegesteifer Rahmen rigid frame

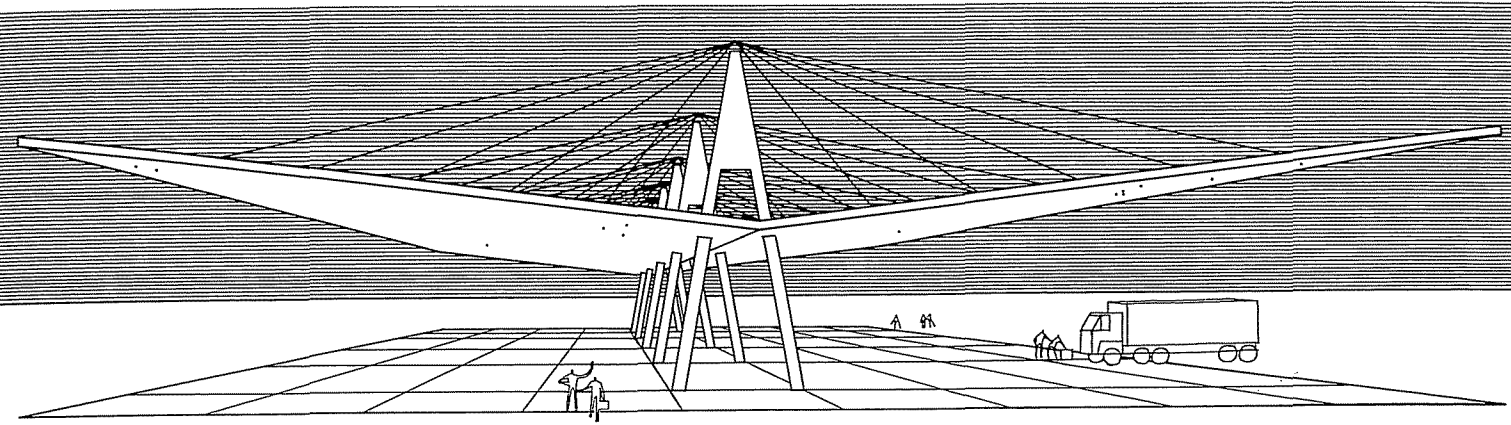
flächenaktiv / surface-active



Scheiben-Pfeiler shear wall buttress

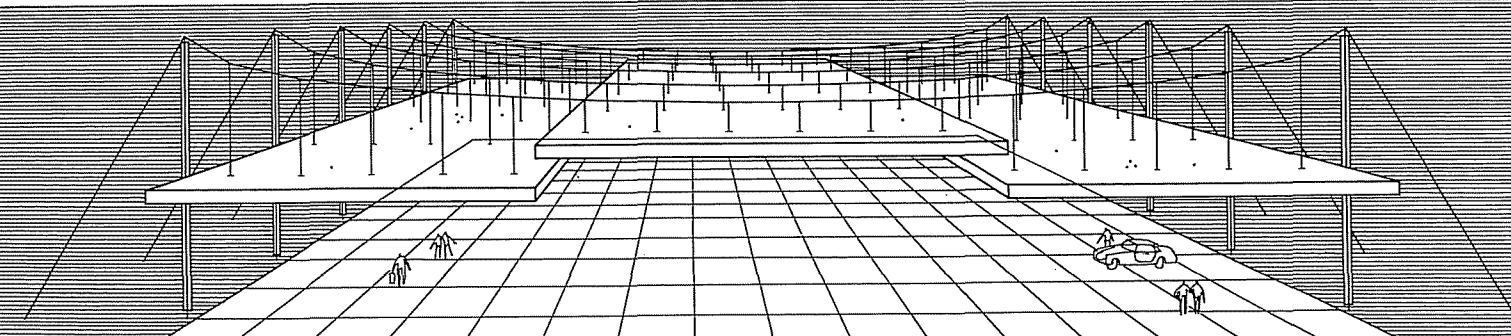
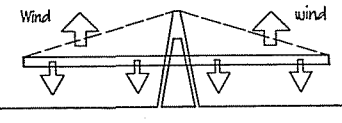
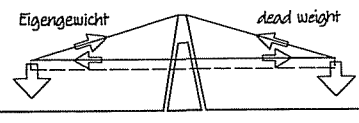
Einfache Parallelsysteme mit Stabilisierung durch Dachlast

simple parallel systems with stabilization through roof weight



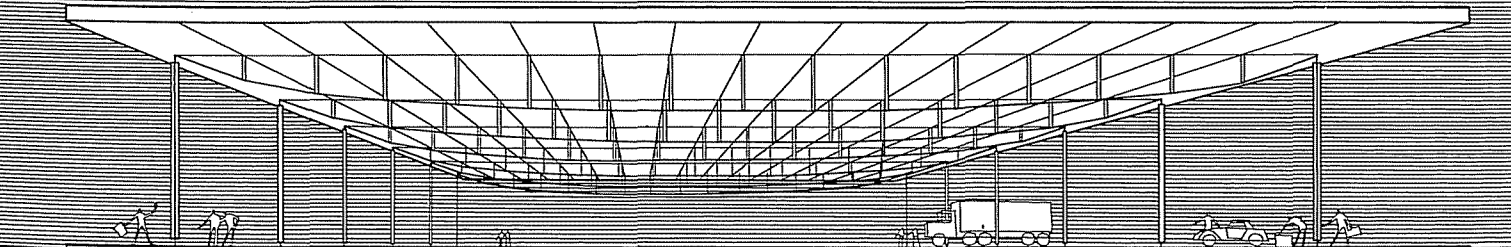
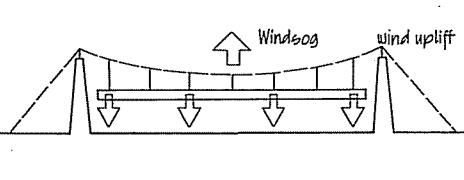
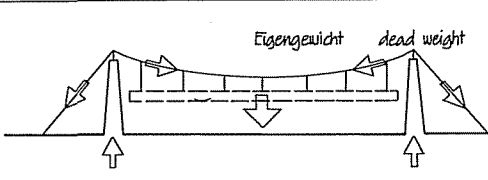
Direktaufhängung von Mittelpylone direct suspension from central pylon

Trag- und Stabilisierungsmechanismus suspension and stabilization mechanism



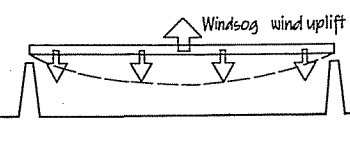
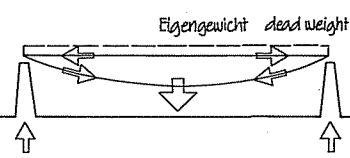
Dach von Trageil abgehängt roof suspended from cable

Trag- und Stabilisierungsmechanismus suspension and stabilization mechanism



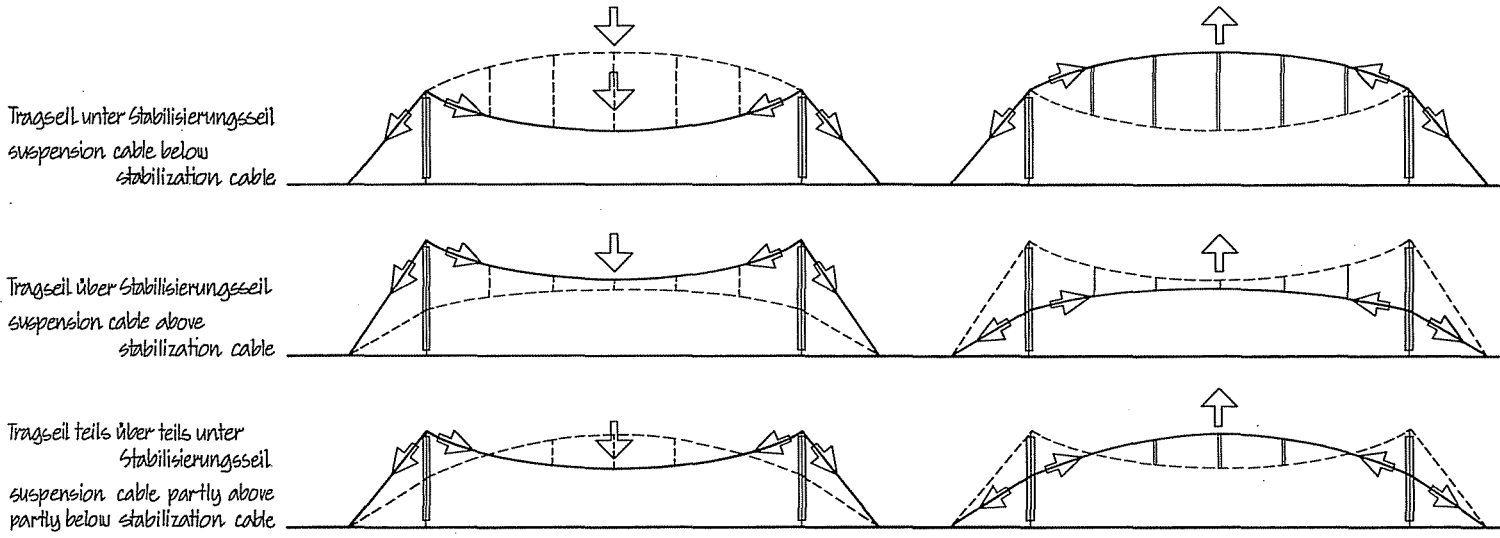
Dach auf Trageil gestützt roof stilted upon suspension cable

Trag- und Stabilisierungsmechanismus suspension and stabilization mechanism



Trag- und Stabilisierungsmechanismus der vorgespannten Systeme

bearing and stabilizing mechanism of prestressed systems

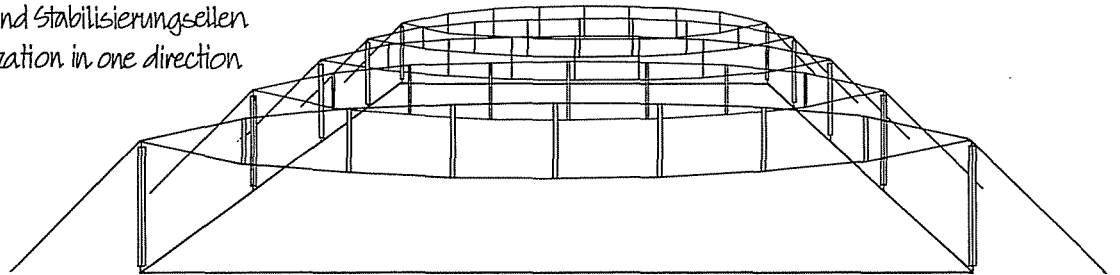


Tragmechanismus / bearing mechanism

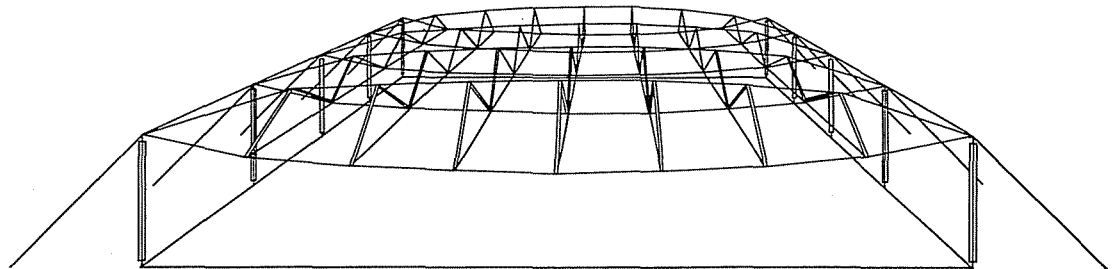
Stabilisierungsmechanismus / stabilizing mechanism

Systeme mit gleichgerichteten Trag- und Stabilisierungseilen  
systems with suspension and stabilization in one direction

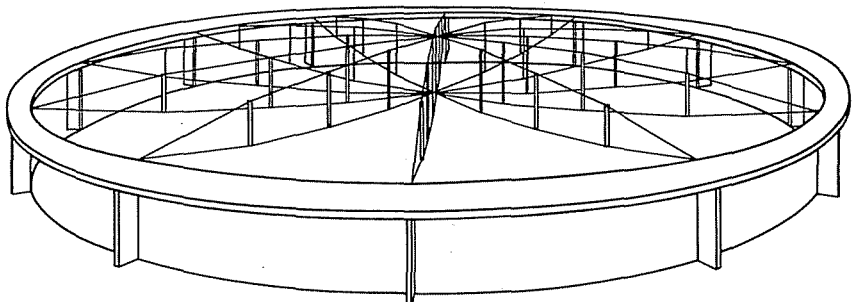
ebenes Parallelsystem  
flat parallel system



versetztes Parallelsystem  
spatial parallel system

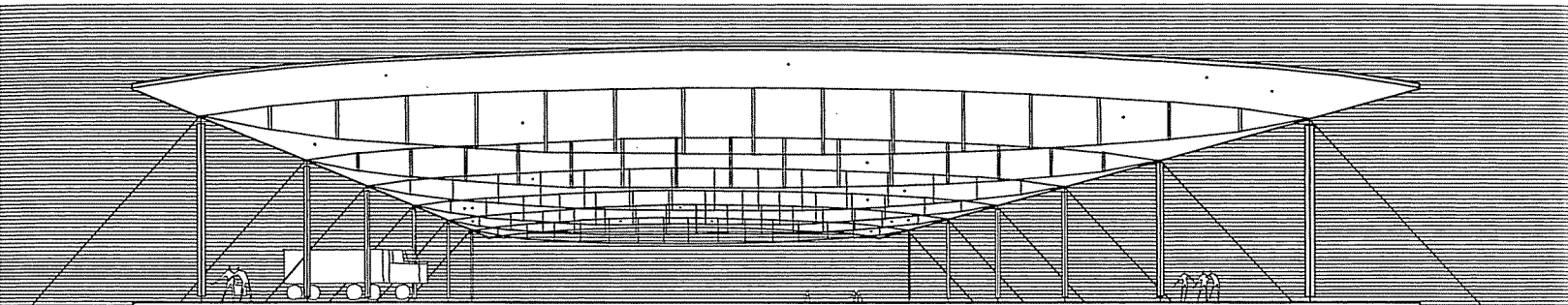


ebenes Rotationsystem  
flat rotational system



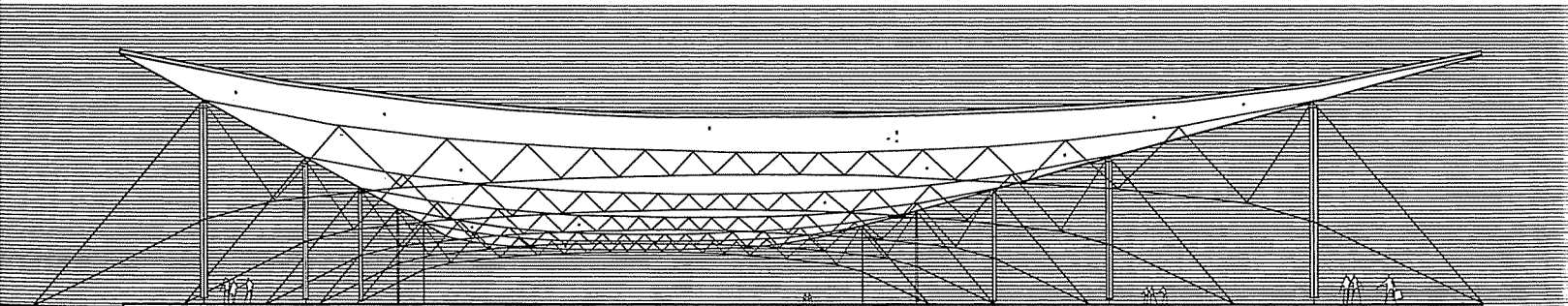
Ebene Parallelsysteme mit Stabilisierung durch Gegenseile  
Tragseil und Stabilisierungseil in einer Ebene

flat parallel systems with stabilization through counter cables  
suspension cable and stabilization cable in one plane



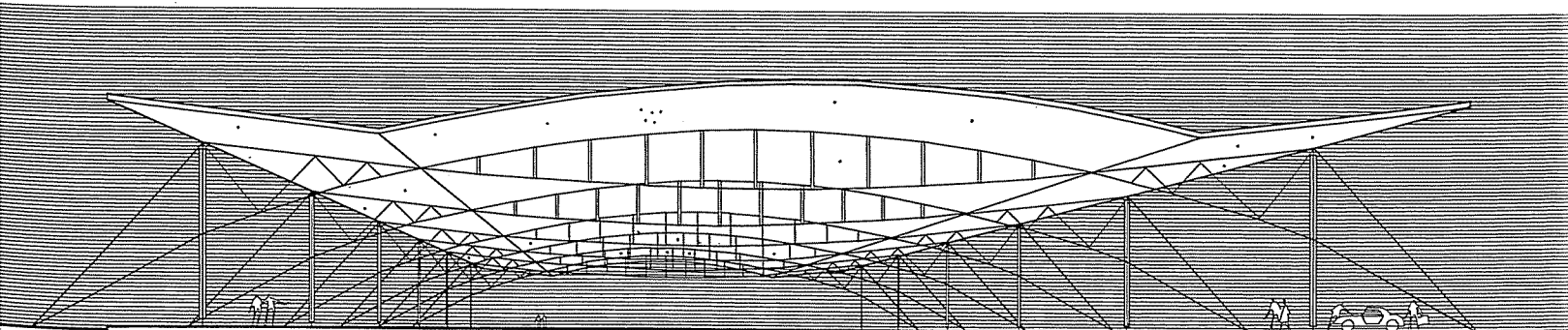
Stabilisierungseil über Tragseil

stabilization cable above suspension cable



Stabilisierungseil unter Tragseil

stabilization cable under suspension cable

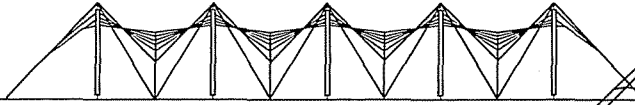
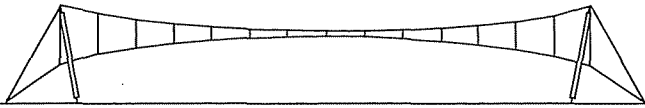


Stabilisierungseil teils über teils unter Tragseil

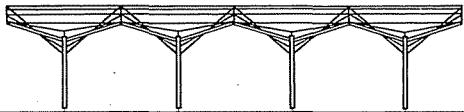
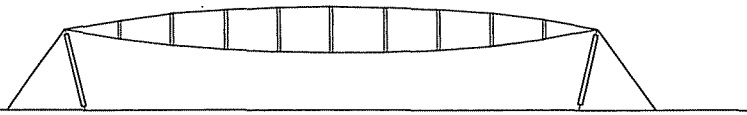
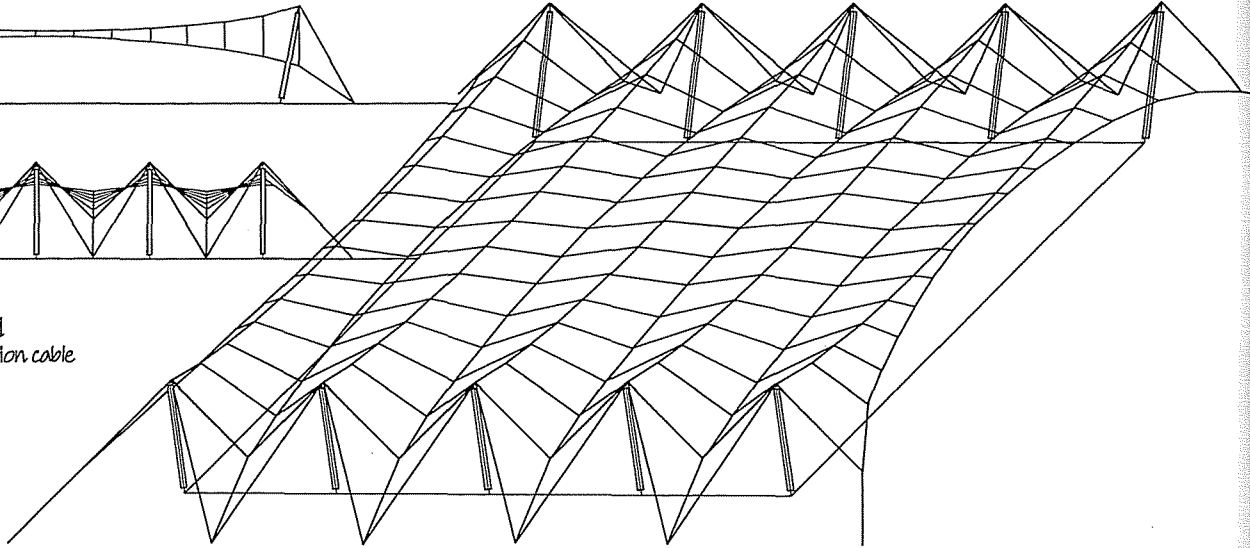
stabilization cable partly above partly below suspension cable

Versetzte Parallelsysteme mit Stabilisierung durch Gegenseil

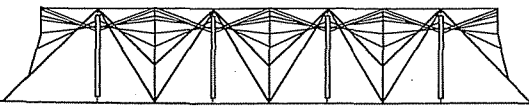
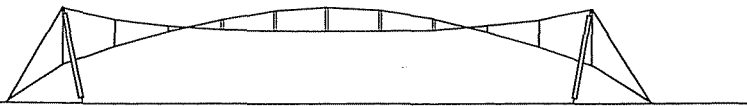
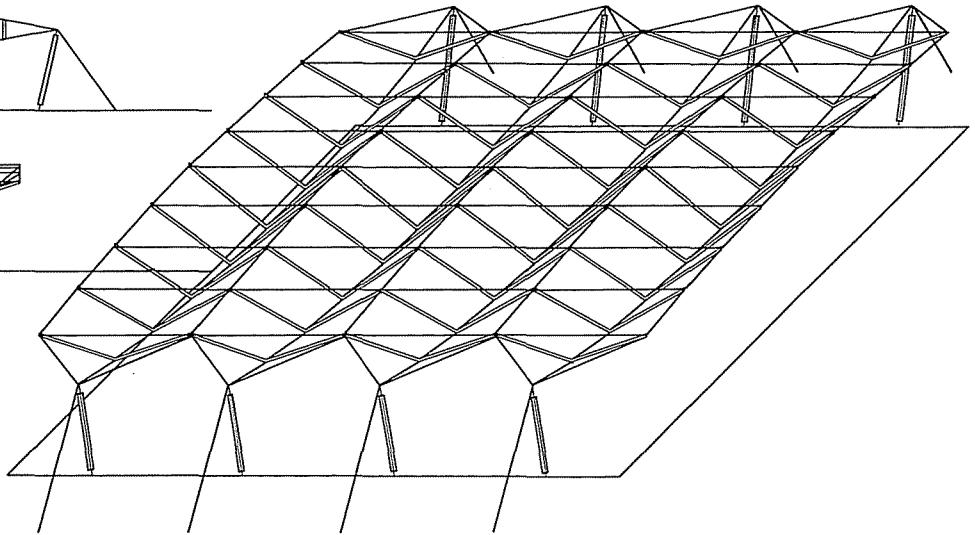
Tragseil und Stabilisierungsseil in verschiedenen Ebenen



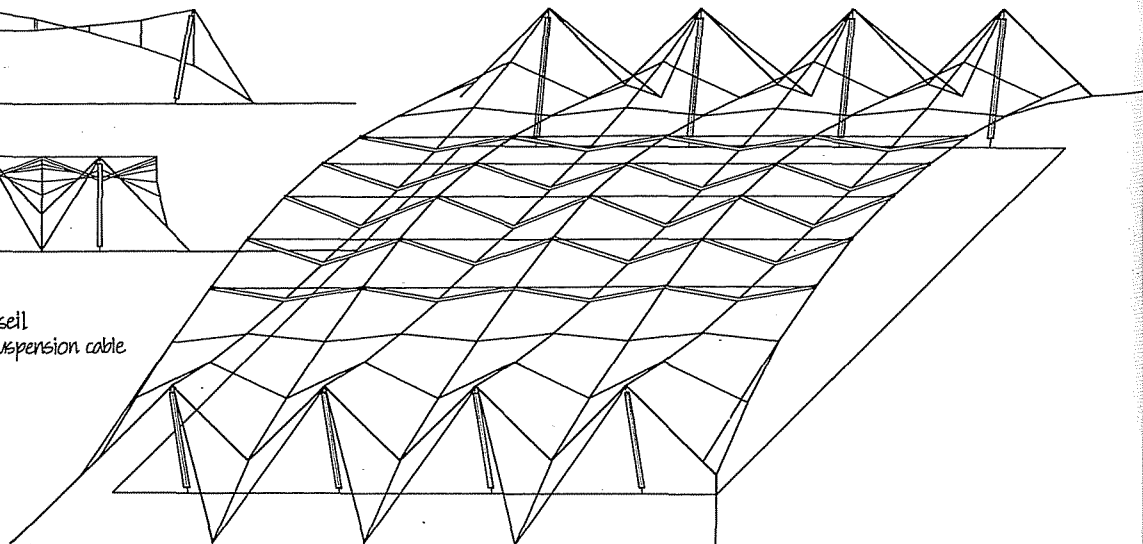
Stabilisierungsseil unter Tragseil  
stabilization cable below suspension cable



Stabilisierungsseil über Tragseil  
stabilization cable above suspension cable

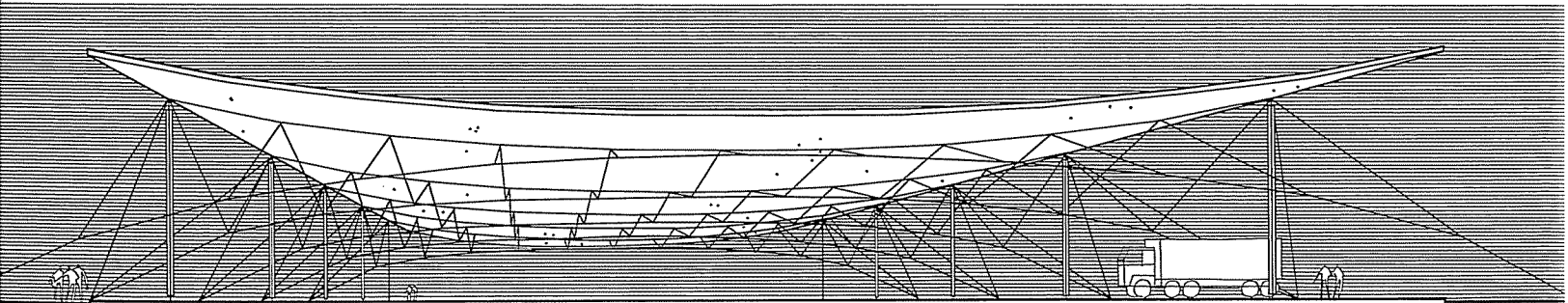


Stabilisierungsseil teils über teils unter Tragseil  
stabilization cable partly above partly below suspension cable



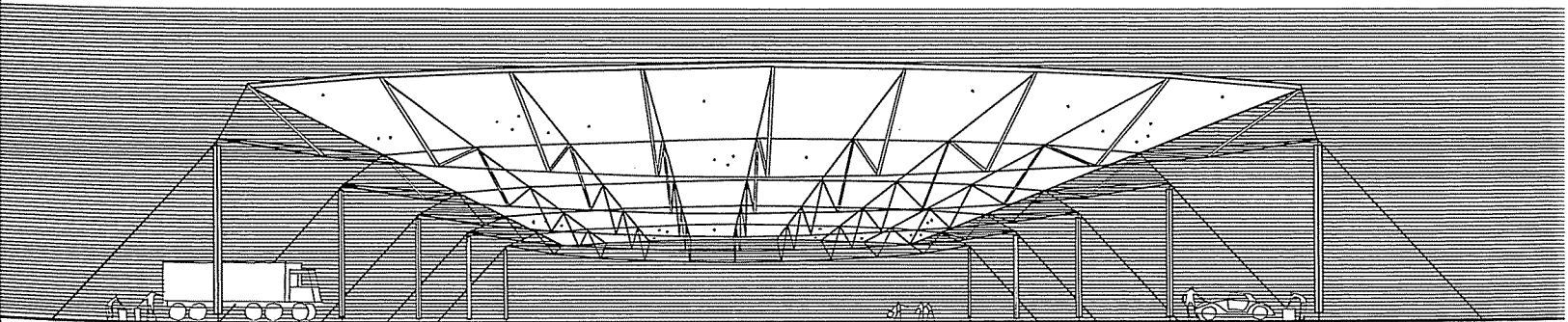
*spatial parallel systems with stabilization through counter cables*

*suspension cable and stabilization cable in different planes*



*Stabilisierungssell unter Tragsell*

*stabilization cable below suspension cable*



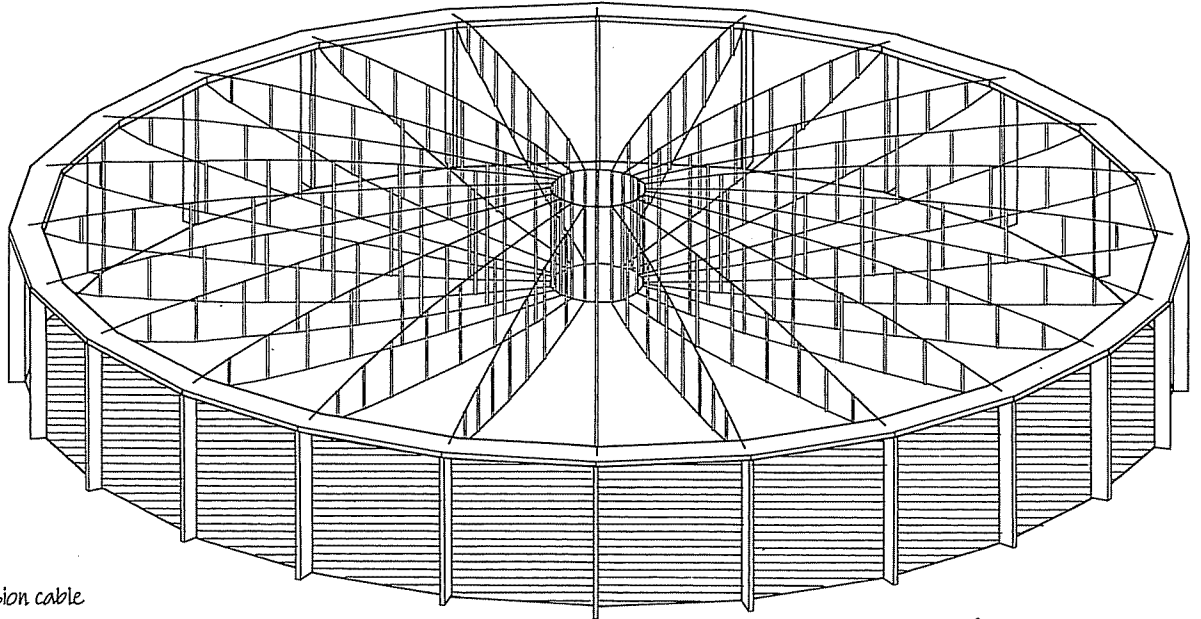
*Stabilisierungssell über Tragsell*

*stabilization cable above suspension cable*



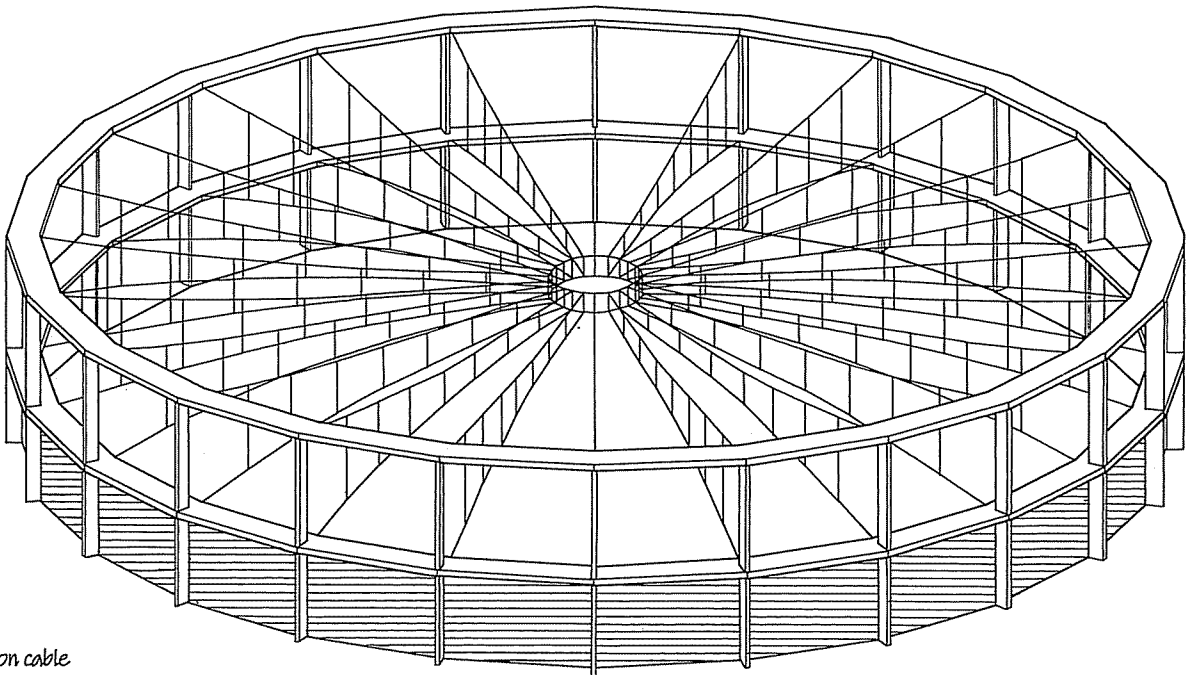
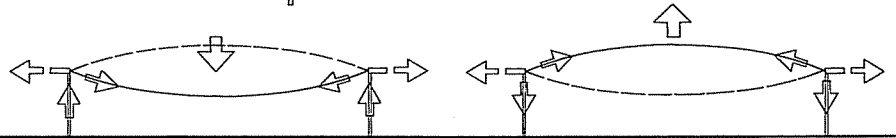
Ebene Rotationssysteme mit Stabilisierung durch Gegenseile

flat rotational systems with stabilization through counter cables



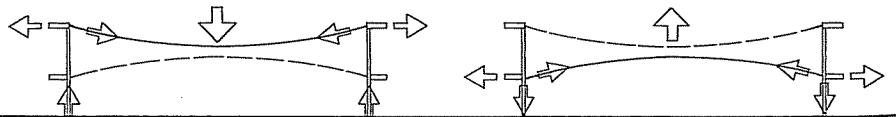
Stabilisierungsseil über Tragsseil  
stabilization cable above suspension cable

Trag- und Stabilisierungsmechanismus  
suspension and stabilization mechanism



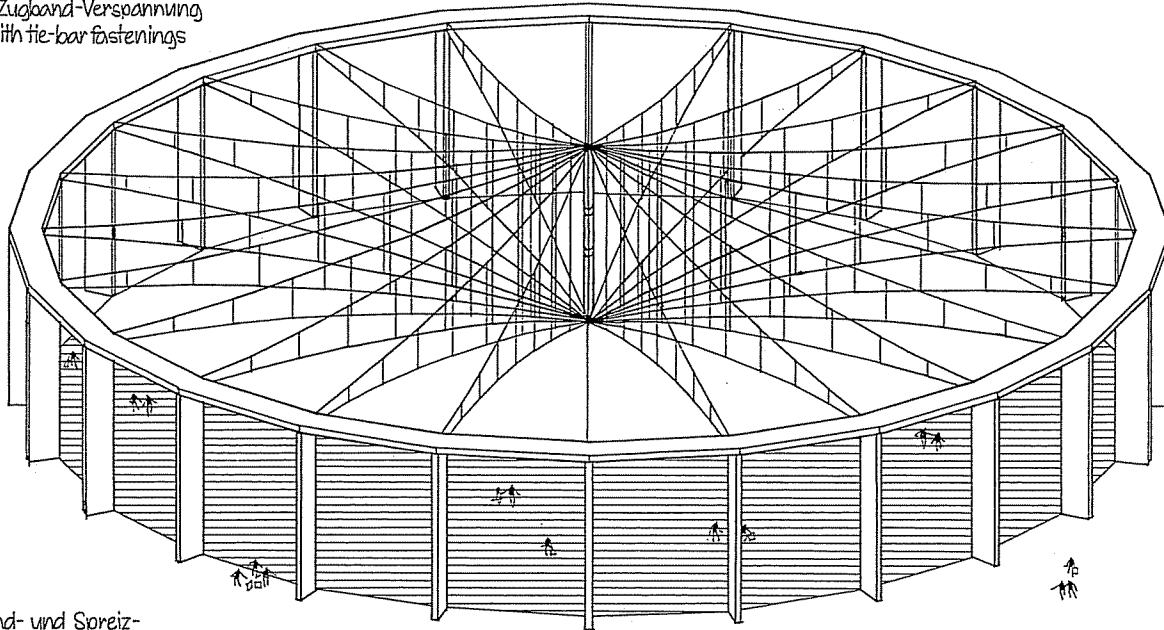
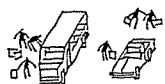
Stabilisierungsseil unter Tragsseil  
stabilization cable below suspension cable

Trag- und Stabilisierungsmechanismus  
suspension and stabilization mechanism



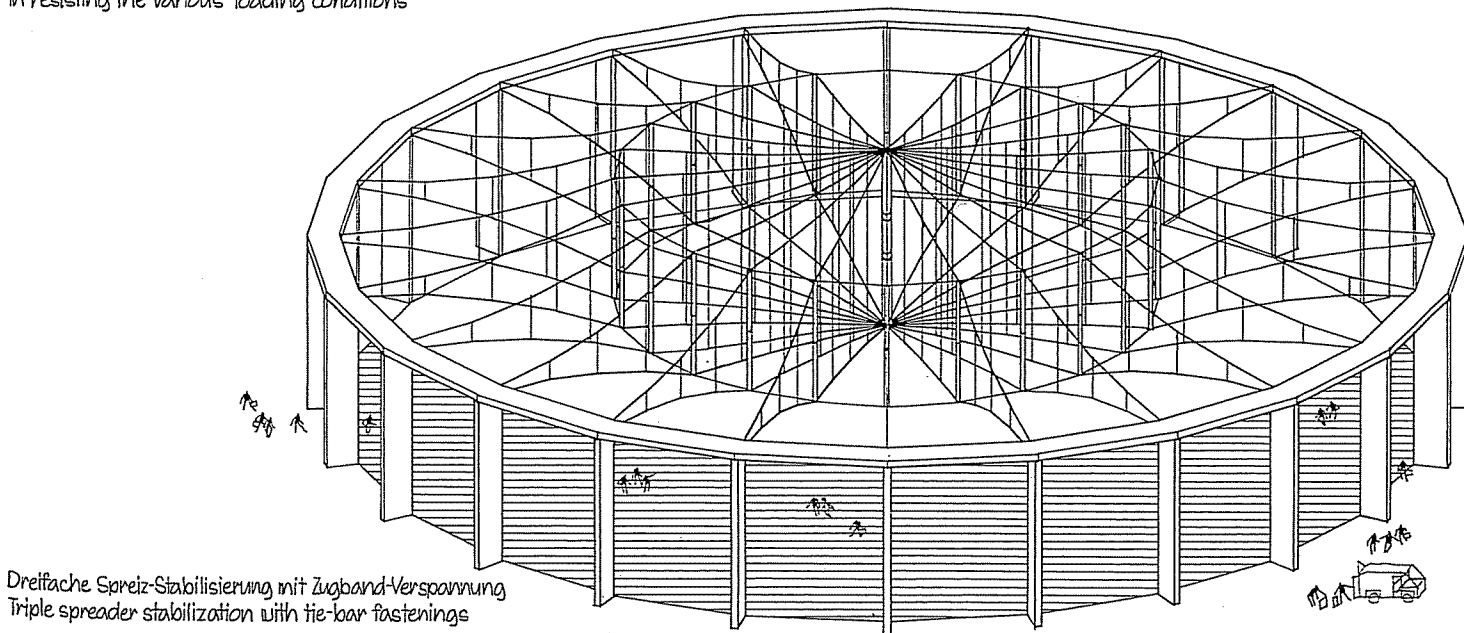
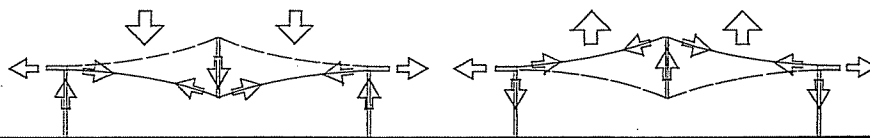
Rotationssysteme mit wechselnden Verspannungstechniken / rotational systems with alternating techniques of stabilization  
 Kombination von Spreizstab- und Zugband-Stabilisierung / Combination of spreader-bar and tie-bar fastenings

Zentrale Spreiz-Stabilisierung mit Zugband-Verspannung  
 Central spreader stabilization with tie-bar fastenings

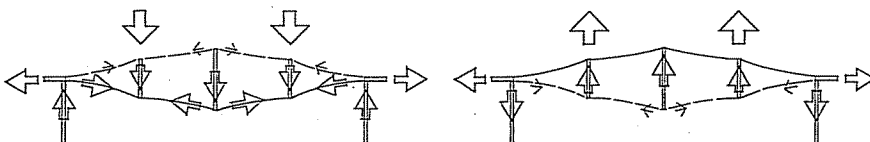


Durch Kombination von Zugband- und Spreiz-Verspannung der beiden Funktionsseile wird die eindeutige Zuordnung als Tragseil bzw. als Stabilisierungsseil aufgelöst. Beide Funktionsseile werden an jedem Belastungsfall beteiligt

By combination of tie-bar and spreader-bar fastenings the clear-cut distinction in either suspension cable or stabilization cable will be dissolved. Both functional cables will be active in resisting the various loading conditions

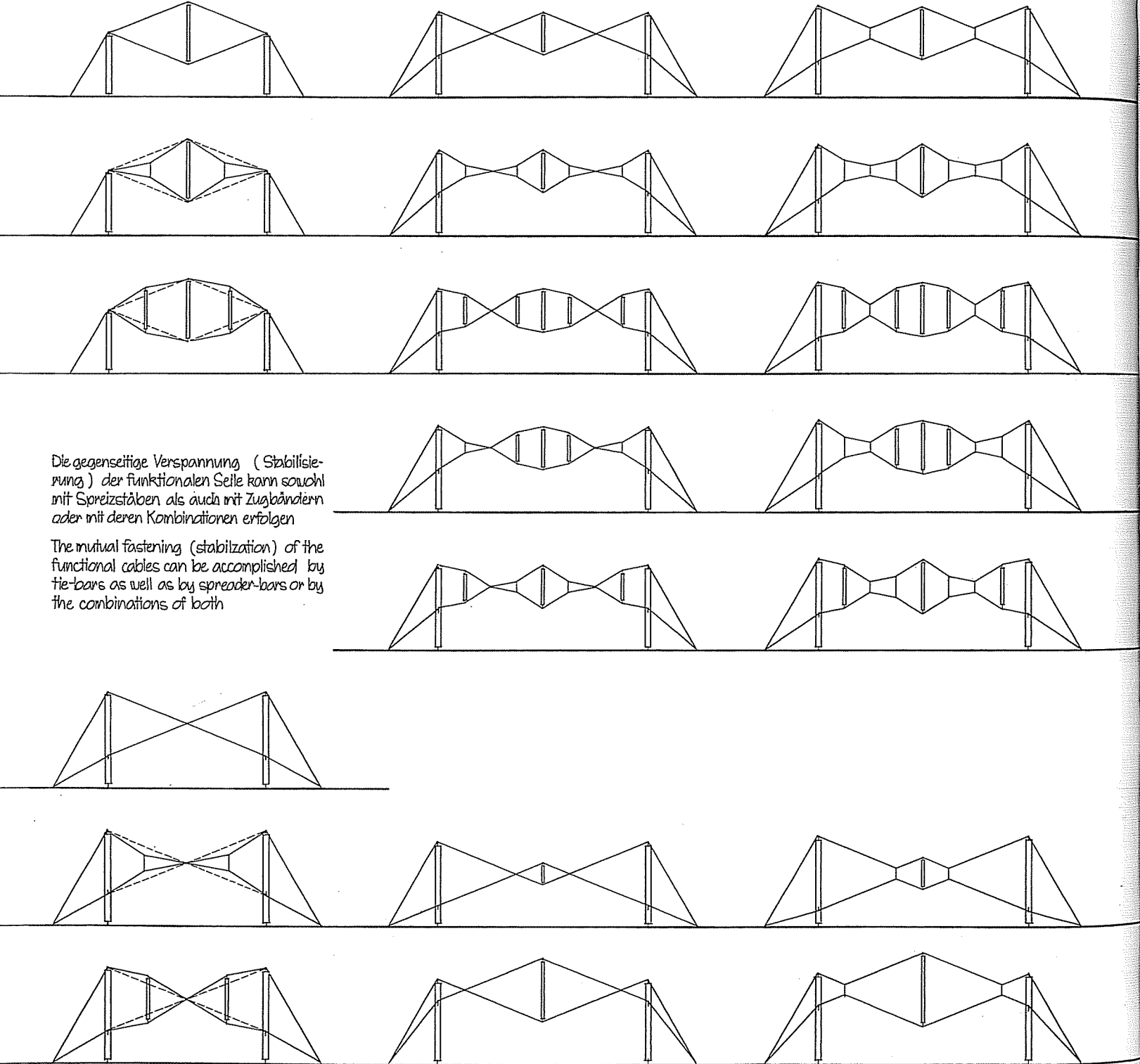


Dreifache Spreiz-Stabilisierung mit Zugband-Verspannung  
 Triple spreader stabilization with tie-bar fastenings



Verspannungssysteme zur Stabilisierung der Funktionsseile  
Zugband- und Spreizstab-Kombinationen

Fastening systems for stabilization of functional cables  
Combinations of tie-bar and spreader-bar



Die gegenseitige Verspannung (Stabilisierung) der funktionalen Seile kann sowohl mit Spreizstäben als auch mit Zugbändern oder mit deren Kombinationen erfolgen

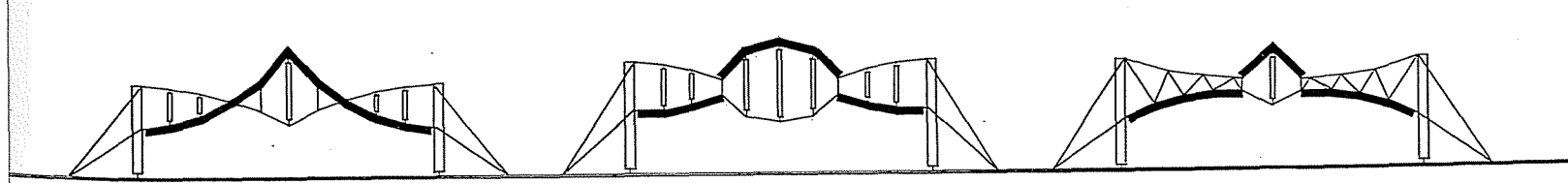
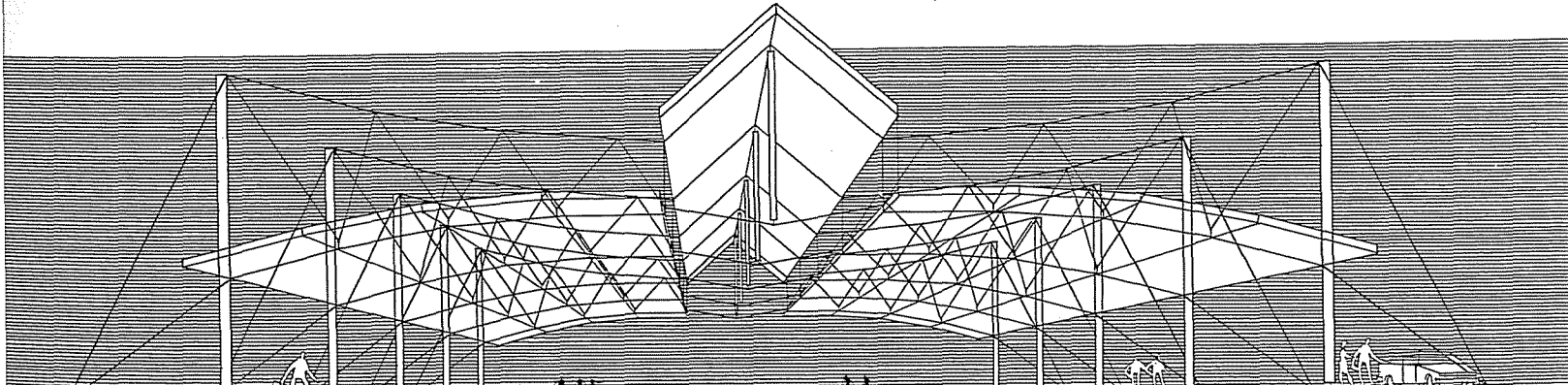
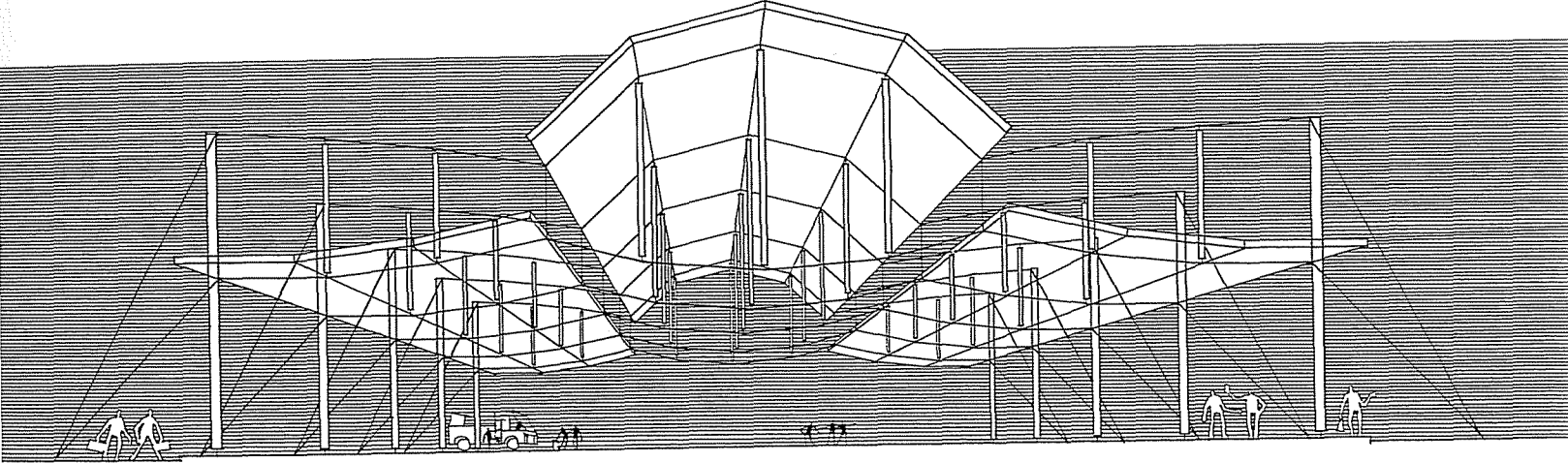
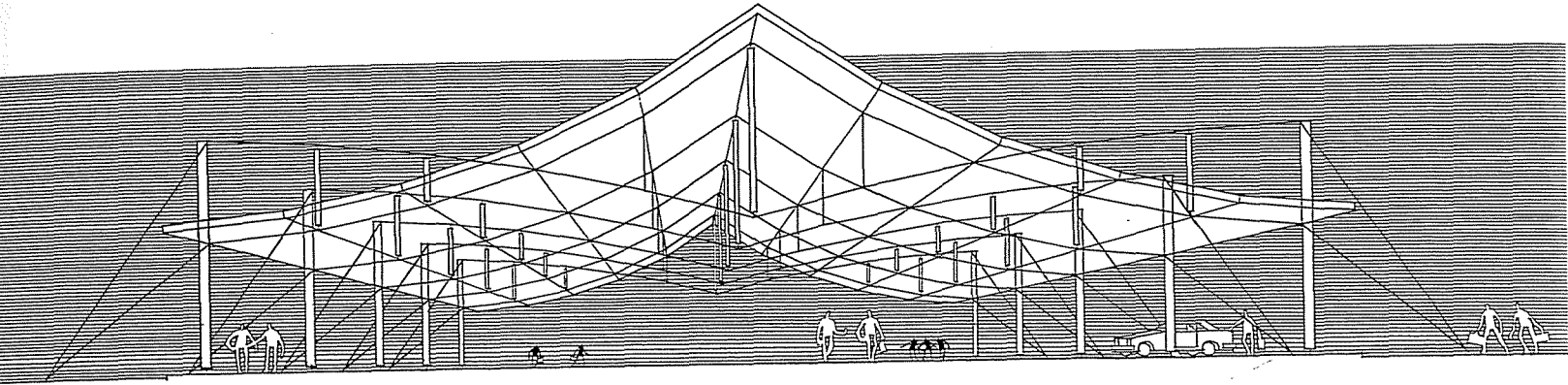
The mutual fastening (stabilization) of the functional cables can be accomplished by tie-bars as well as by spreader-bars or by the combinations of both

Durch gemeinsame Verwendung von Zugbändern und Spreizstäben für die Verspannung wird die eindeutige Zuordnung zu Tragseil oder Stabilisierungsseil aufgelöst. Beide Funktionsseile werden mit jedem Belastungsfall beansprucht

By jointly applying tie-bars and spreader-bars for stabilisation of functional cables the separate distinction of suspension cable and stabilization cable is dissolved. Both functional cables are stressed with each loading condition

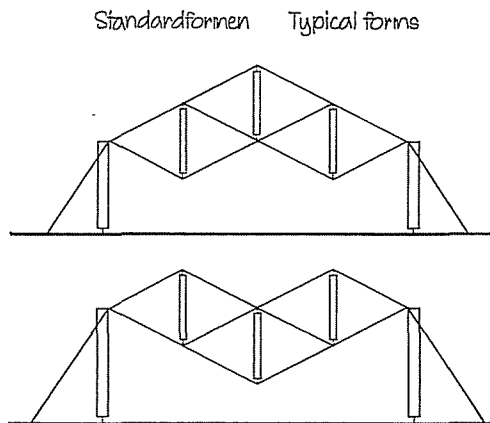
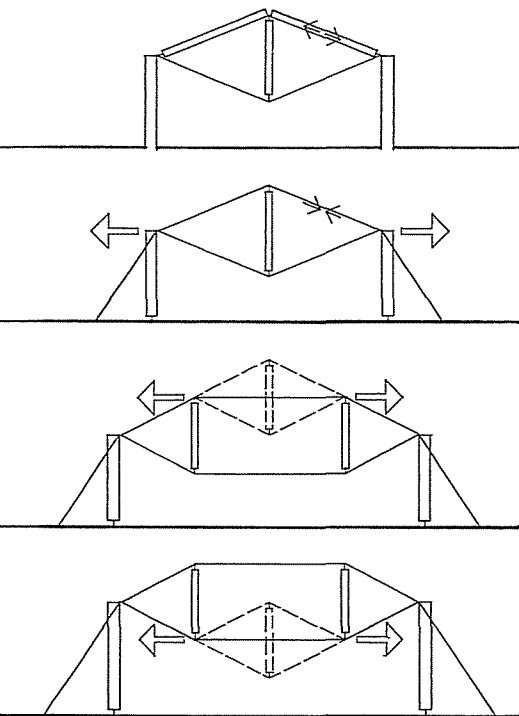
Parallelsysteme mit wechselnden Verspannungstechniken  
Kombination von Spreizstab- und Zugband-Stabilisierung

Parallel systems with alternating techniques of stabilization  
Combination of spreader-bar and tie-bar fastenings



## Entwicklung des Seilfachwerkes aus Rhombus-Fachwerk

## Derivation of cable truss from rhombic truss



Durch Anbringung entgegengesetzter Horizontalkräfte (z.B. durch Abspannungen) werden die Obergurte nicht mehr auf Druck, sondern auf Zug beansprucht. Sie können deshalb als Seile ausgebildet werden = SEILFACHWERKE

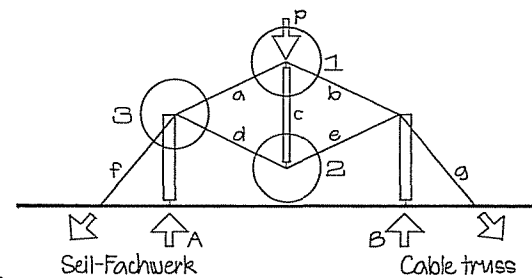
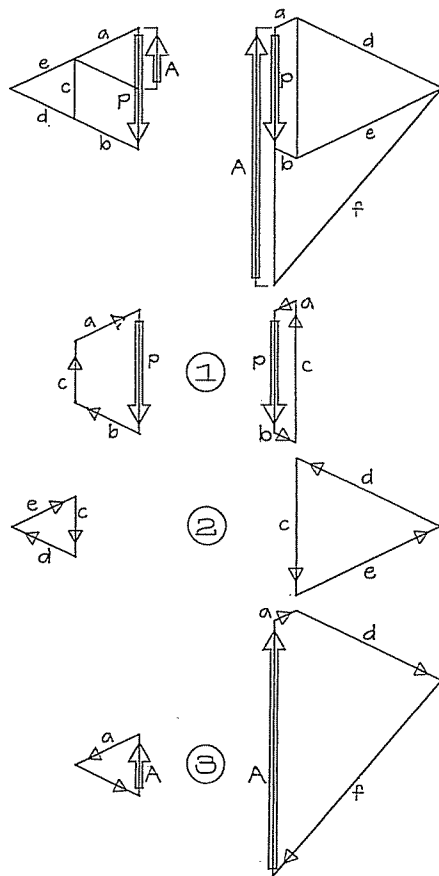
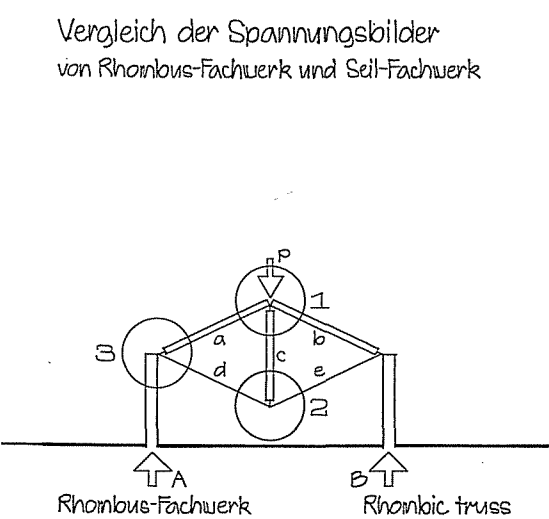
Die Tragmechanik beruht auf der Verknüpfung von einzelnen Lastaufhängungen, wodurch die Lasten stufenartig an die Auflager weitergegeben werden. Die Obergurte nehmen an diesem Vorgang nicht teil, Sie dienen nur der Verspannung und Stabilisierung.

By applying two opposite horizontal forces (e.g. with restraining cables) the upper chords no longer are subjected to compressive but to tensile stresses. Hence they can be designed as cables = CABLE TRUSSES

The structure system rests upon the interlinkage of individual load suspensions that, step by step, transmits the loads to the end supports. The top chords do not participate in this action, but serve only to stress and stabilize the structure

## Vergleich der Spannungsbilder von Rhombus-Fachwerk und Seil-Fachwerk

## Comparison of stress distribution in rhombic truss and cable truss



Bei gleicher Neigung von Obergurten  $a/b$  und Untergurten  $c/d$  wird die Auflast  $P$  gleichmäßig von den Gurten aufgenommen. Aber auch bei unterschiedlichen Neigungen der Gurte bleiben die Spannungen in den Gliedern relativ gering

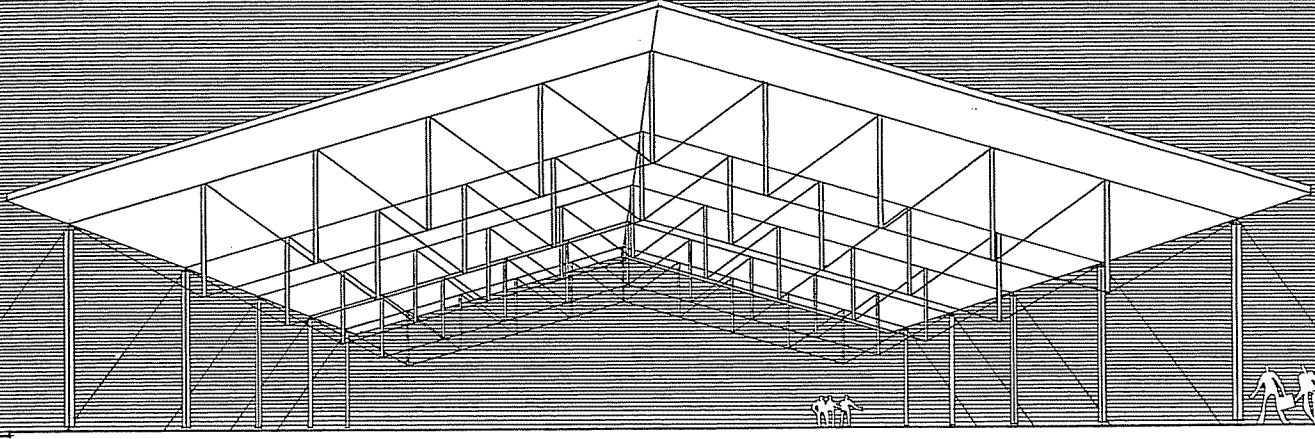
With equal pitch of top chords  $a/b$  and bottom chords  $c/d$  the load  $P$  will be evenly received by the chords. But even with differing pitches of chords the stresses in the truss members remain relatively minor

Selbst bei geringer Zugspannung der Obergurte  $a/b$  (= Stabilisierungsseile) werden beim Seil-Fachwerk unter gleicher Auflast  $P$  wesentlich höhere Spannungen in den Gliedern erzeugt als beim Rhombus-Fachwerk

Even with only lightly tensioning the top chords  $a/b$  (= stabilization cables) under equal top loading  $P$  the members in the cable truss will be subjected to essentially higher stresses than the members in the rhombic truss

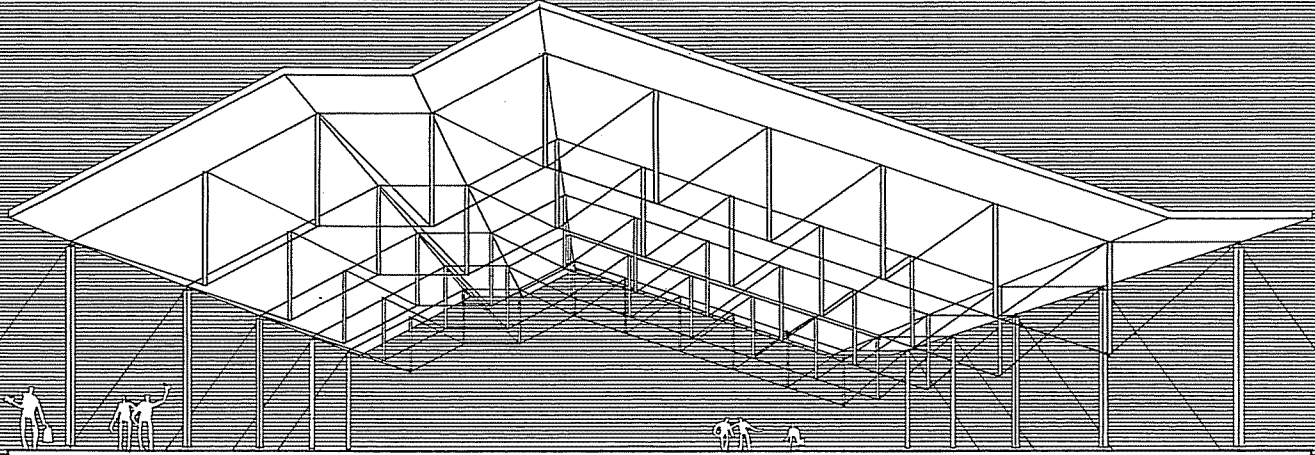
Ebene Seilfachwerk-Systeme in paralleler Anordnung

Flat cable truss systems in parallel spanning



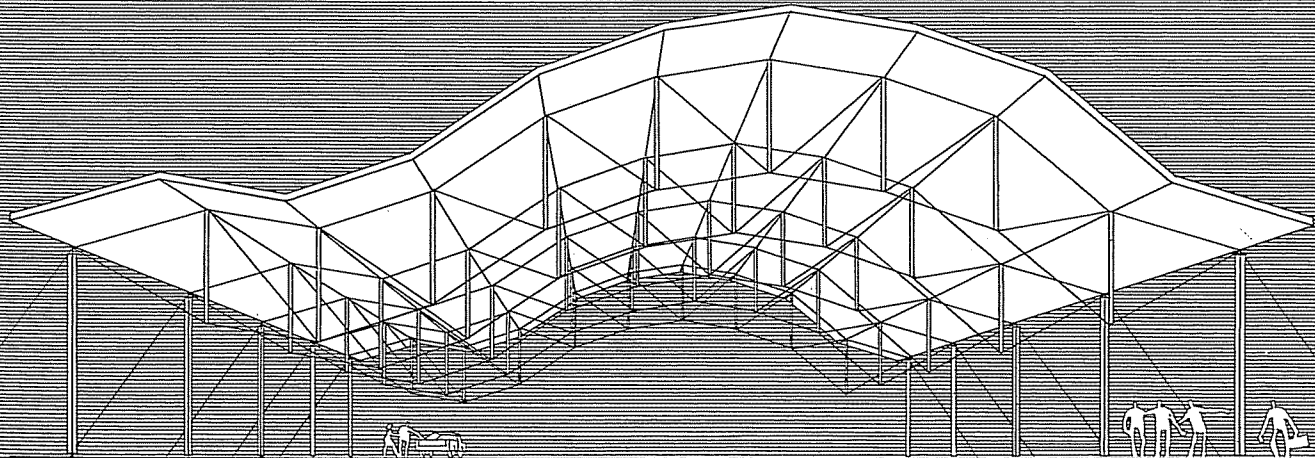
Ungebrochene einfache Satteldach-Form

Double-pitched roof in simple straight-line form



Asymmetrisch unterbrochene Satteldach-Form

Double-pitched roof form with asymmetrical line break

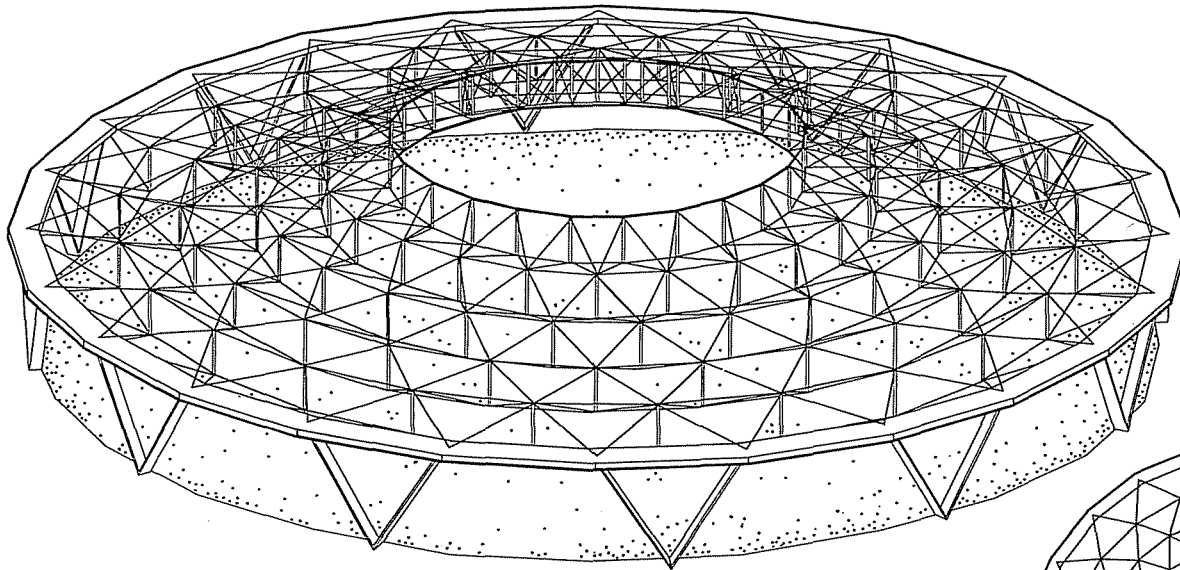


Polygonale, weitgehend freie Dachform

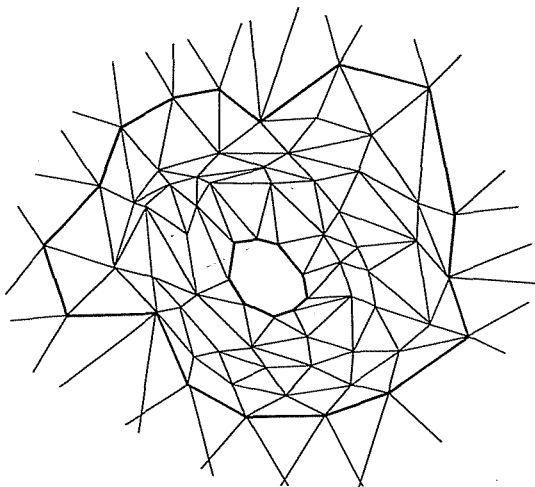
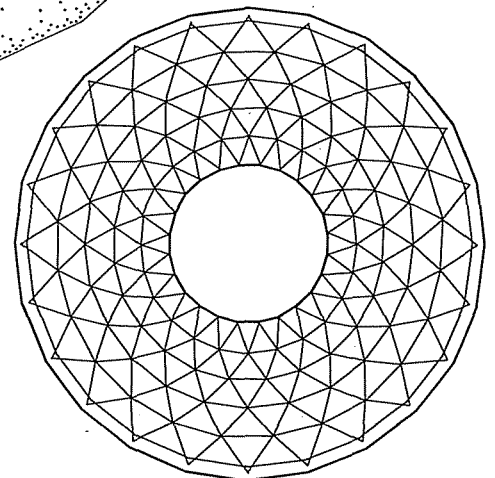
Polygonal, largely free-form design

Radiale Seilfachwerk-Systeme mit zentraler Überhöhung

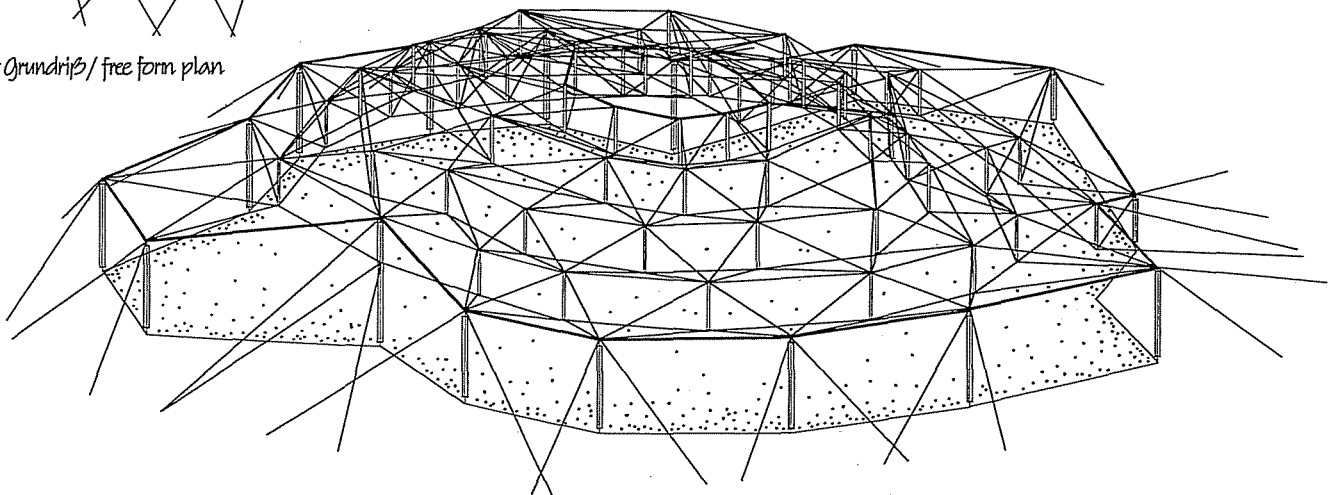
radial cable truss systems rising toward center



kreisförmiger Grundriß / circular plan

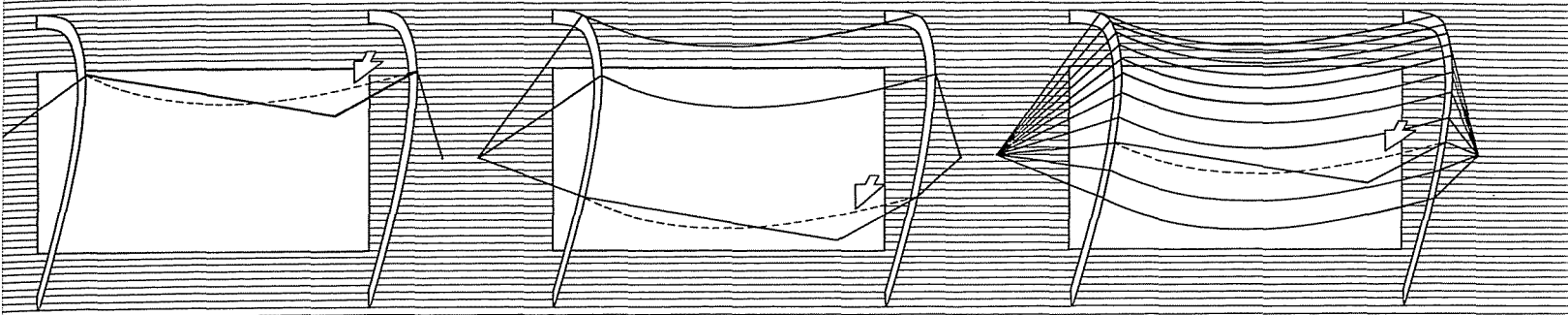


unregelmäßiger Grundriß / free form plan



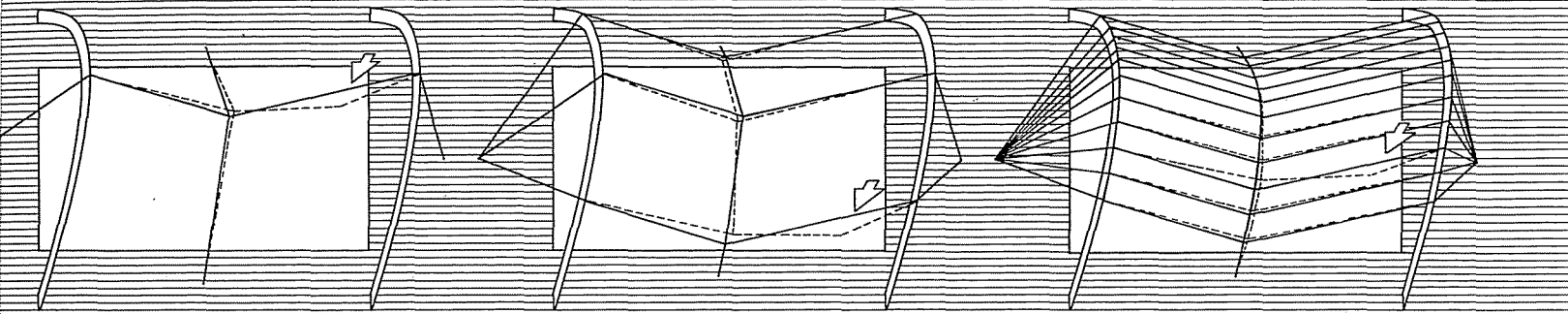
Vorgespannte Systeme mit querlaufenden Stabilisierungsseilen  
Entwicklung vom einfachen Tragsseil zum gegenseitig gekrümmten Seilnetz

prestressed systems with transverse stabilization cables  
development from simple suspension cable to the cable net with opposite curvature



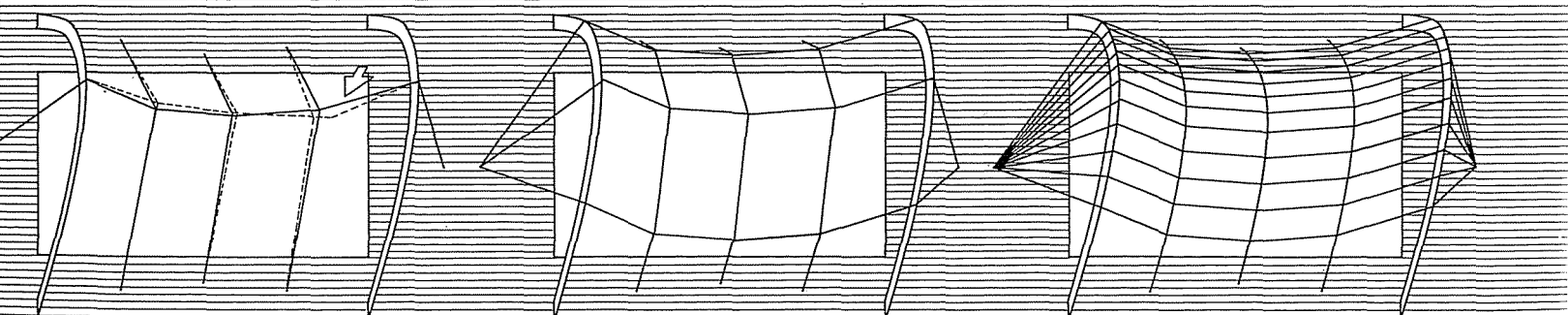
Einzellast verursacht größere Deformation, die sich nur auf betroffenes Seil erstreckt

single load causes major deflection that remains localized to the cable under load



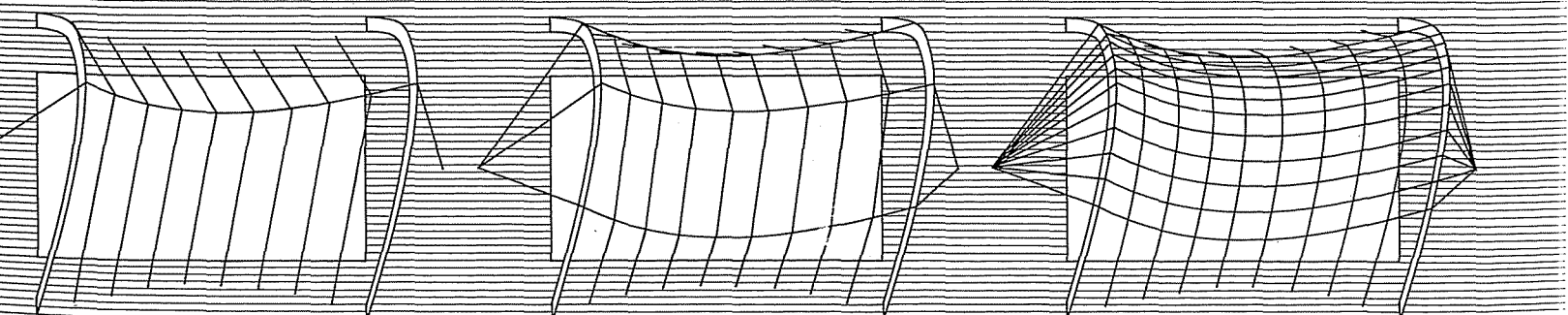
Querlaufendes Stabilisierungsseil spannt Tragsseil und verhindert größere Deformation

transverse stabilization cable stresses suspension cable and resists deflection



Vermehrung der Stabilisierungsseile verstärkt Widerstandskraft gegen Einzellasten

increase of stabilization cables strengthens resistance against point loads



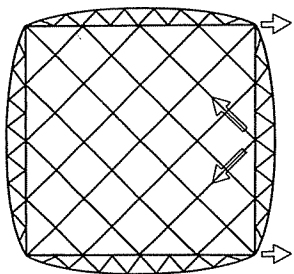
Sämtliche Seile sind am Widerstandsmechanismus gegen Verformung beteiligt

all the cables are participating in the mechanism of resisting single load deflection

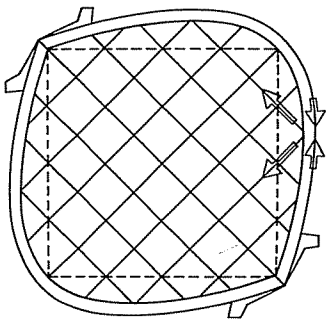
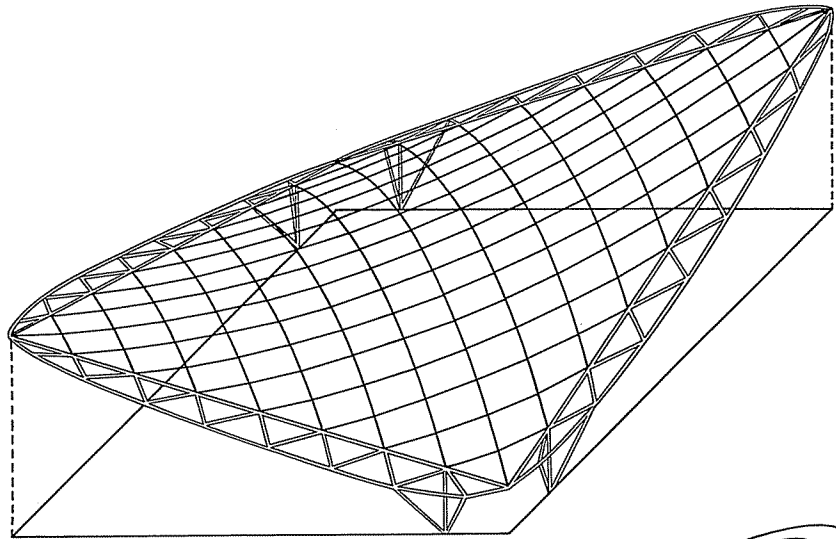


Systeme der Randausbildung für gegensinnig gekrümmte Seilnetze  
Ableitung von quadratischer Grundrißform

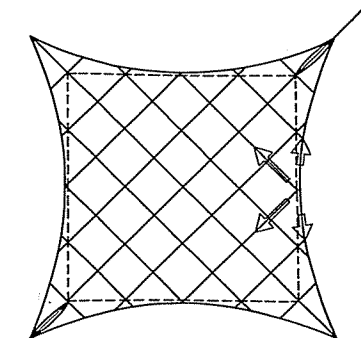
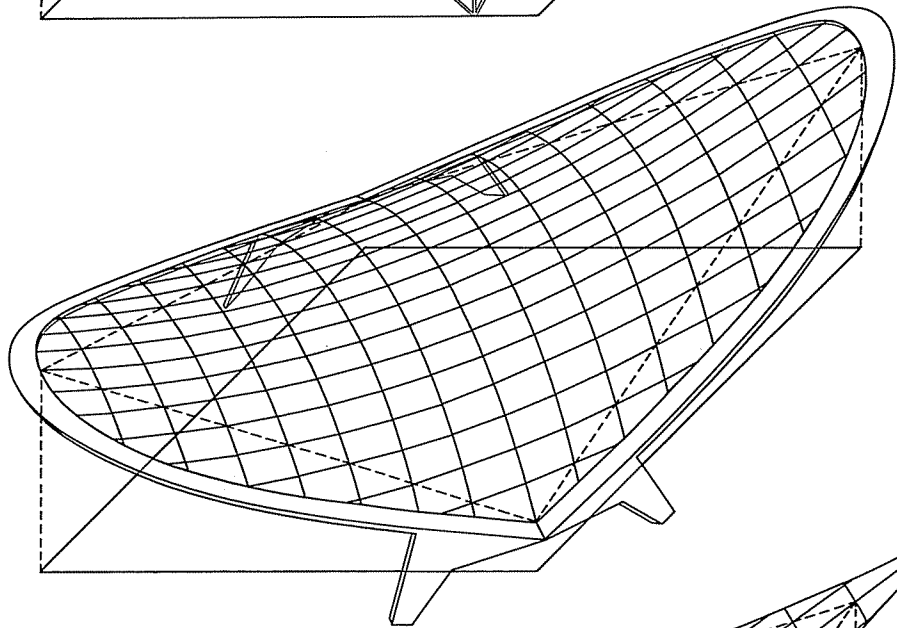
systems of edge design for cable nets with opposite curvatures  
derivation from square floor plan



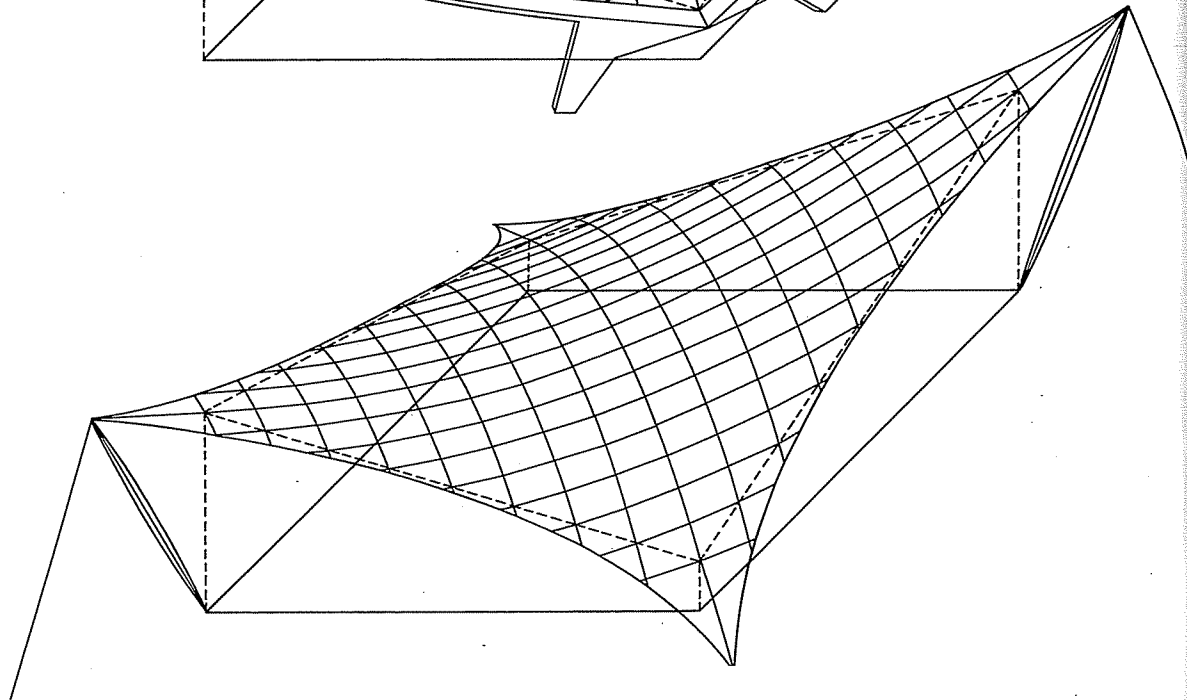
Geneigte Fachwerkträger auf Stützen  
sloped edge trusses on supports



Geneigte Stützbögen auf Rahmen  
sloped arches on frame supports

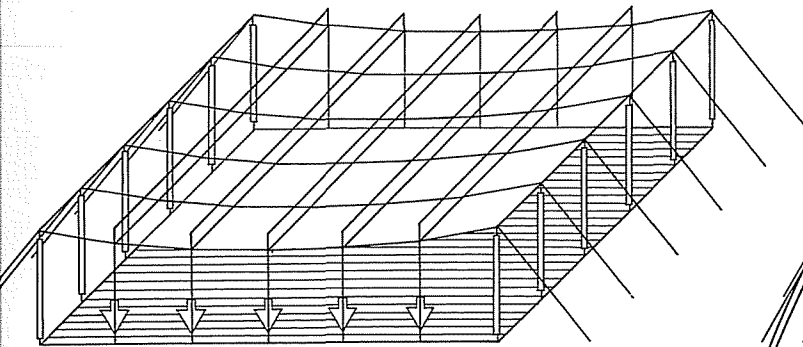


Randseile zwischen Pylonen  
edge cables between pylons

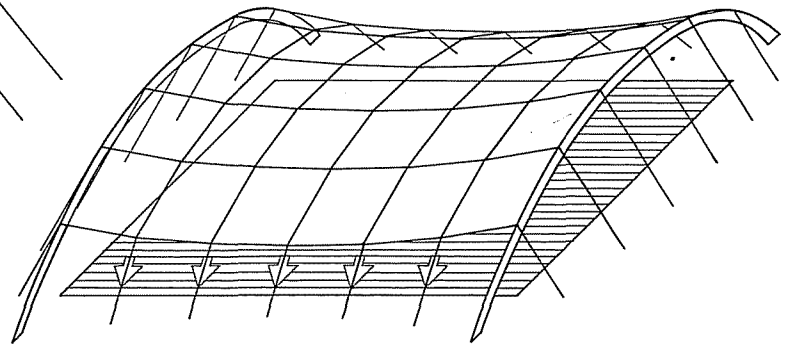


Vorgespannte Systeme mit querlaufender Stabilisierung

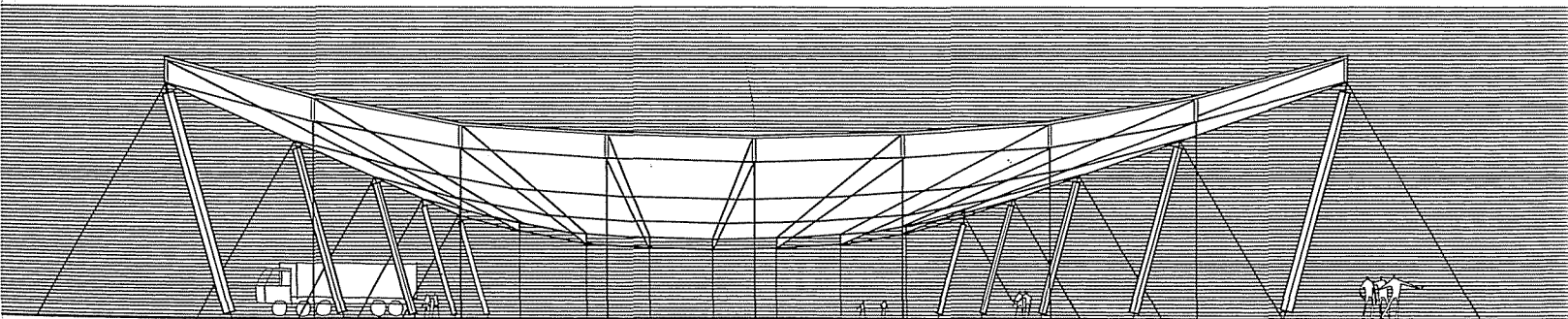
prestressed systems with transverse stabilization



Stabilisierung durch bodenverankerte Biegeträger  
stabilization through transverse beams tied to ground

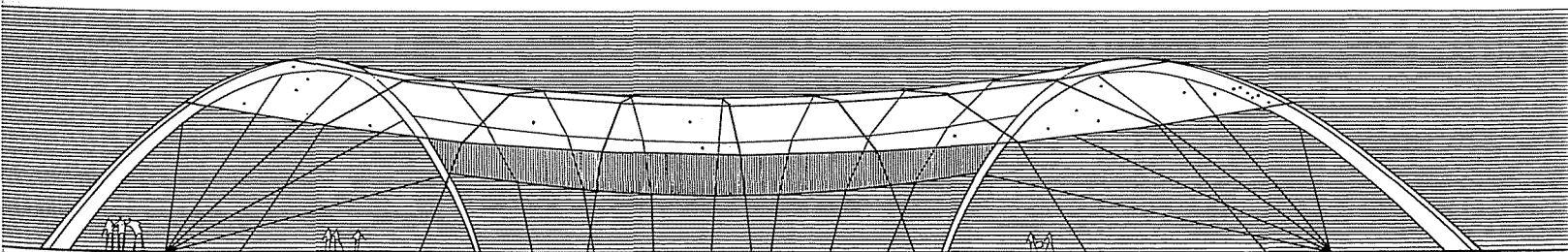


Stabilisierung durch bodenverankerte Seile mit gegensinniger Krümmung  
stabilization through transverse cables with opposite curvature



System mit querlaufenden Stabilisierungsbalken

system with transverse stabilization beams

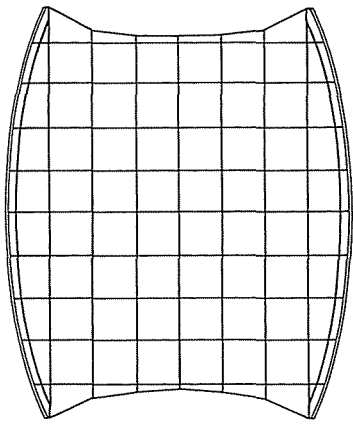
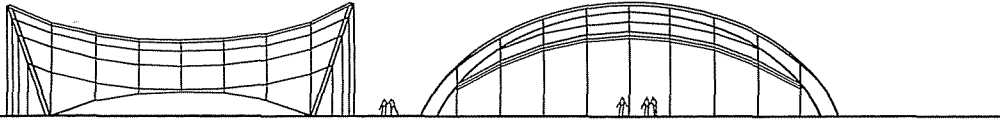


System mit querlaufenden Stabilisierungsseilen

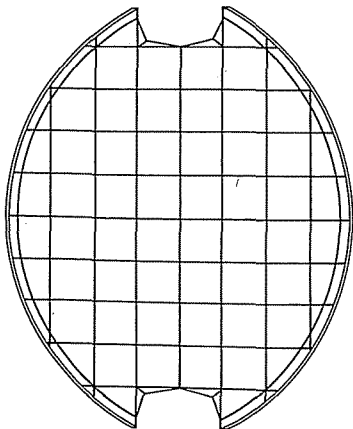
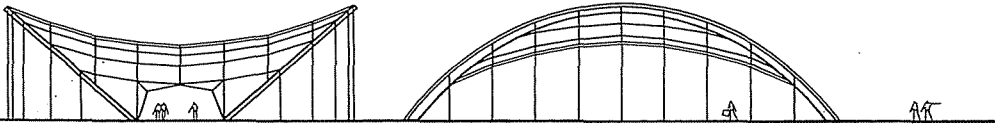
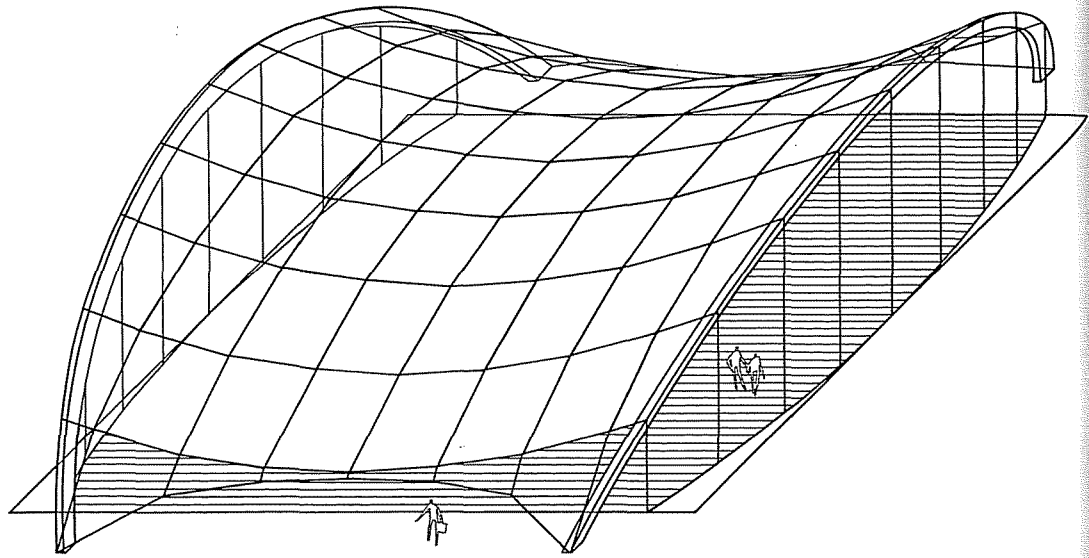
system with transverse stabilization cables

Stützbogen-Systeme für gegensinnig gekrümmte Seilnetze

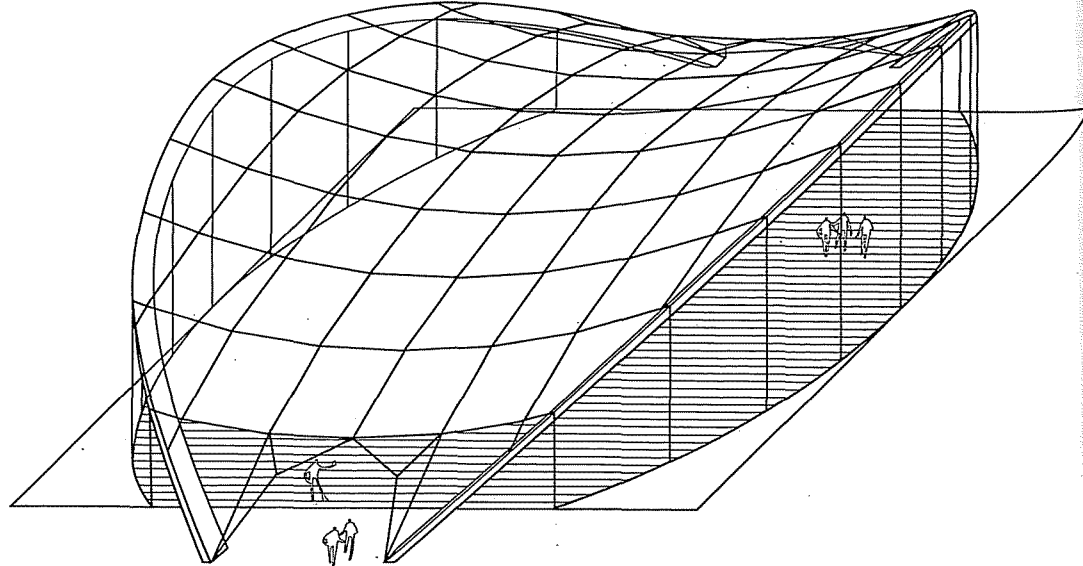
arch systems for cable nets with opposite curvatures



Stützbögen leicht nach außen geneigt  
arches slightly slanted to the outside

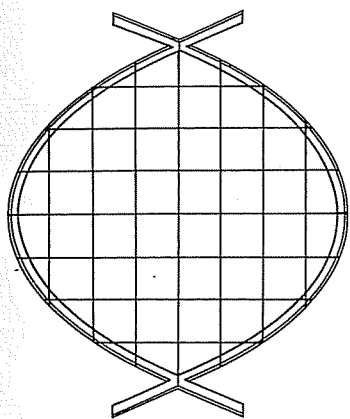
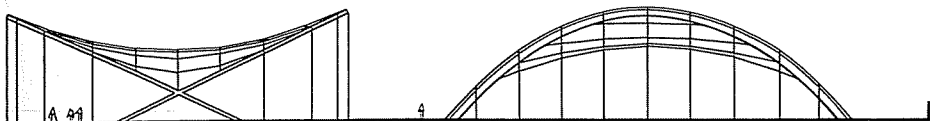


Fußpunkte der Stützbögen nach innen gezogen  
base points of arches pulled inwardly

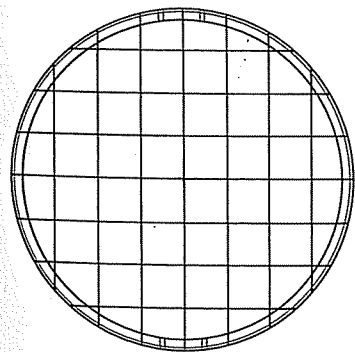
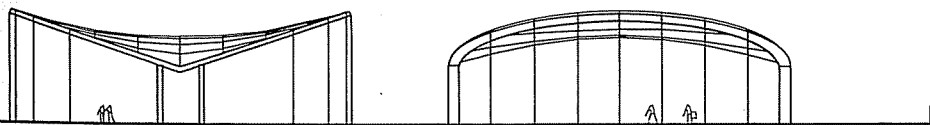
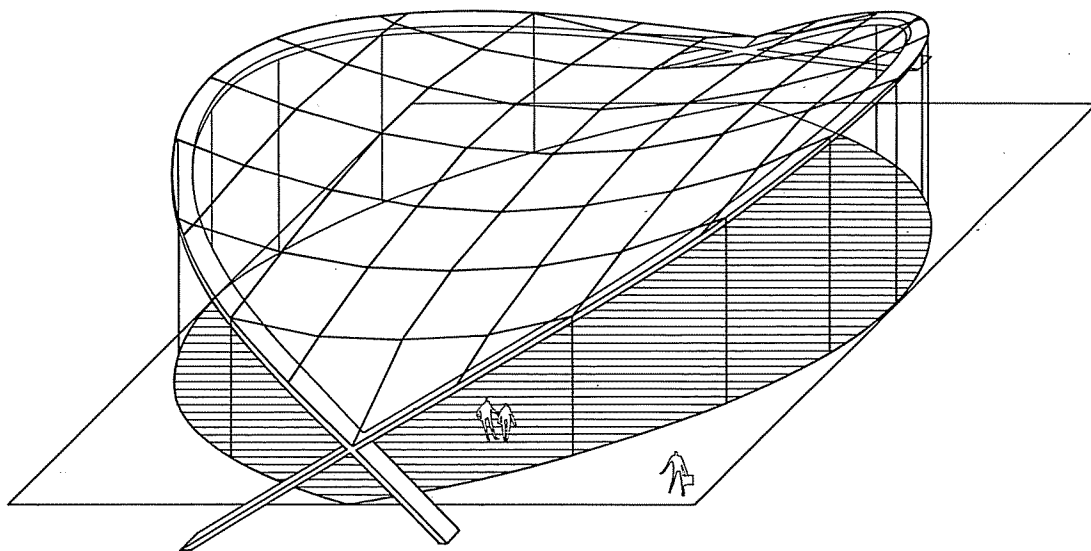


Stützbogen-Systeme für gegensinnig gekrümmte Seilnetze  
Übergang vom Stützbogen zum Ringträger

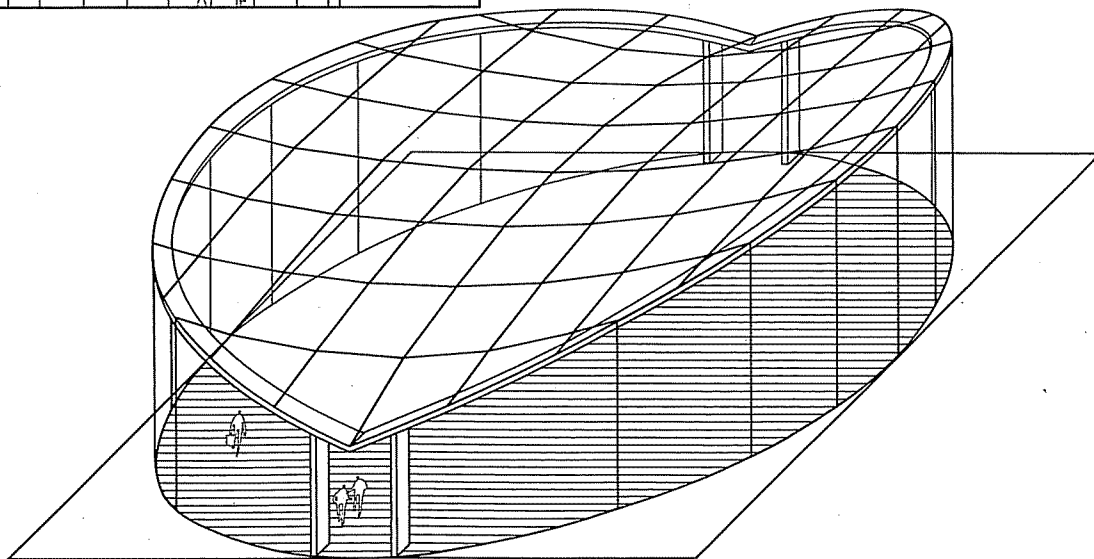
arch systems for cable nets with opposite curvature  
transition from arch to base ring



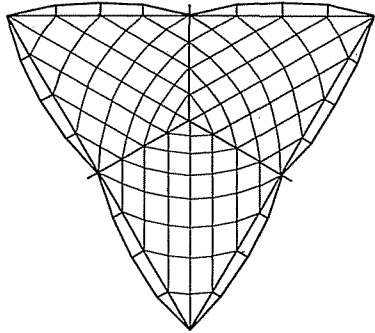
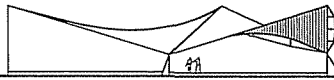
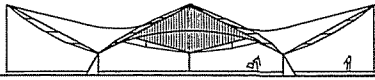
schräge, sich über den Fußpunkten, kreuzende Bögen  
inclined arches crossing each other above their bases



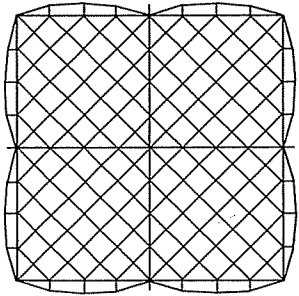
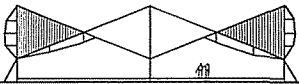
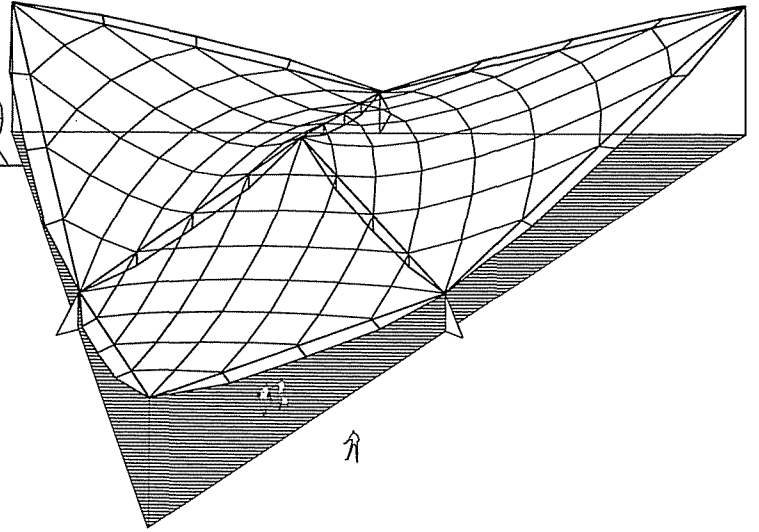
geknickter Ringträger auf Endstützen  
folded base ring on end supports



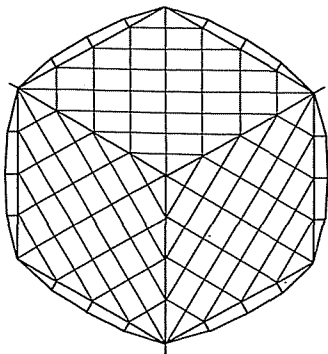
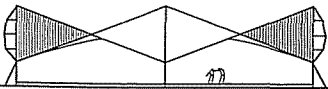
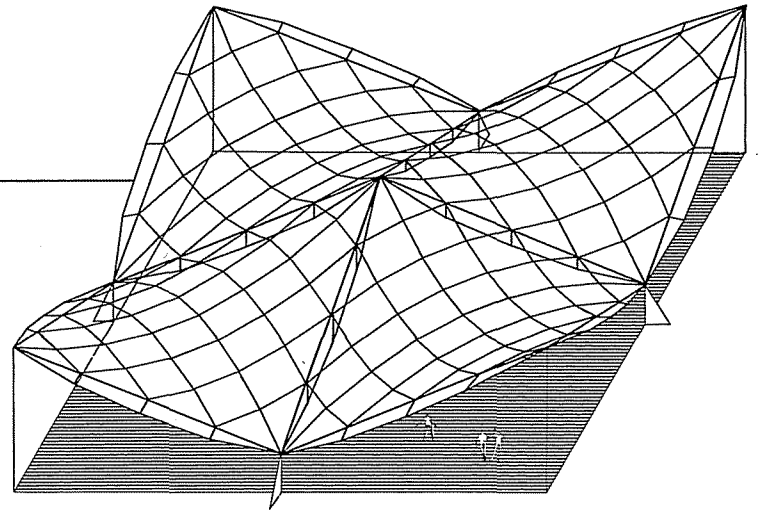
Kombination von gegensinnig gekrümmten Seilnetzen mit geraden Rändern / combination of reversely curved cable nets with straight edges



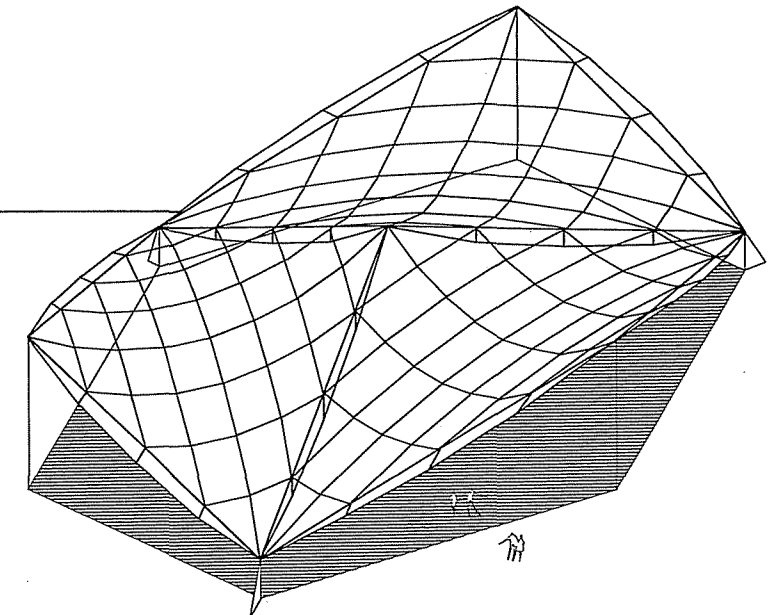
drei Einheiten über Dreieck-Grundriß  
three units over triangular plan



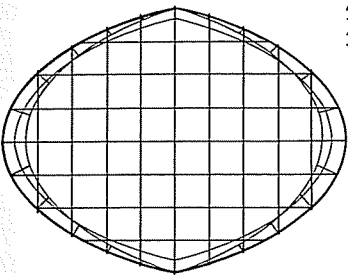
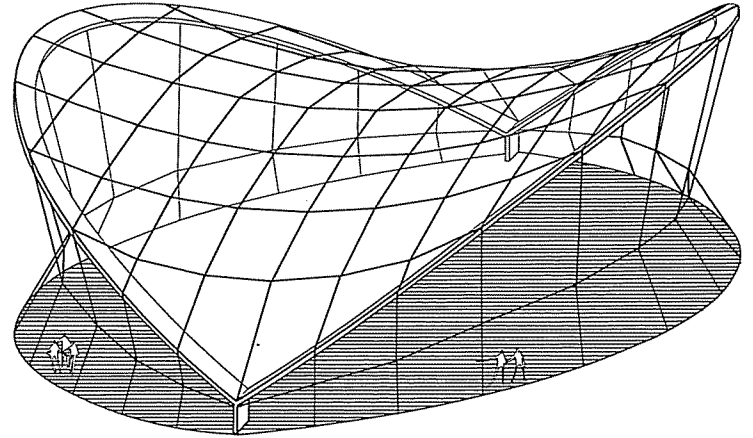
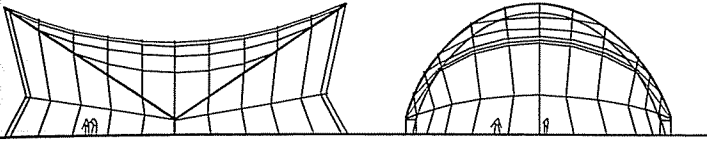
vier Einheiten über quadratischem Grundriß  
four units over square plan



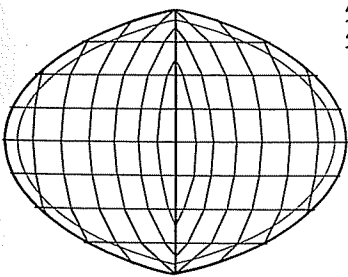
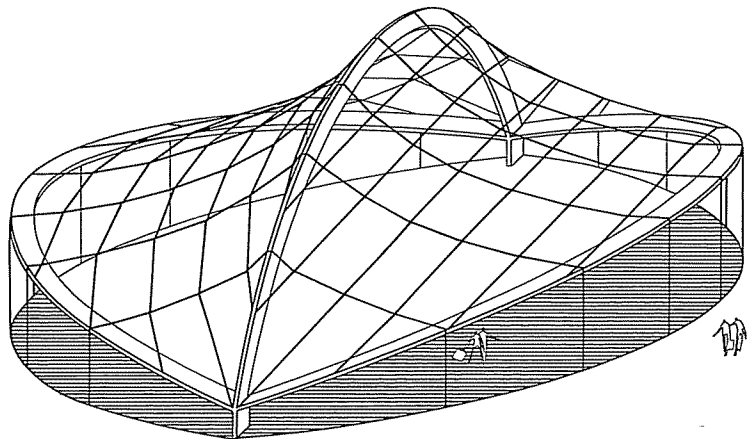
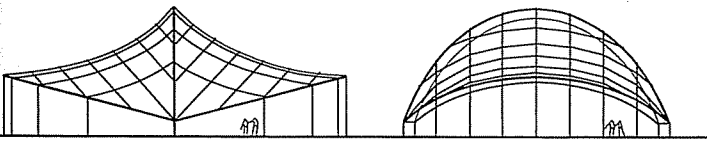
drei Einheiten über hexagonalen Grundriß  
three units over hexagonal plan



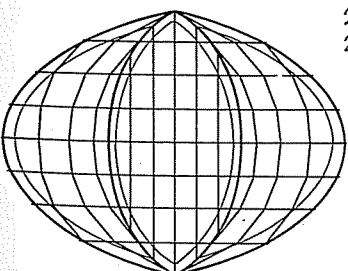
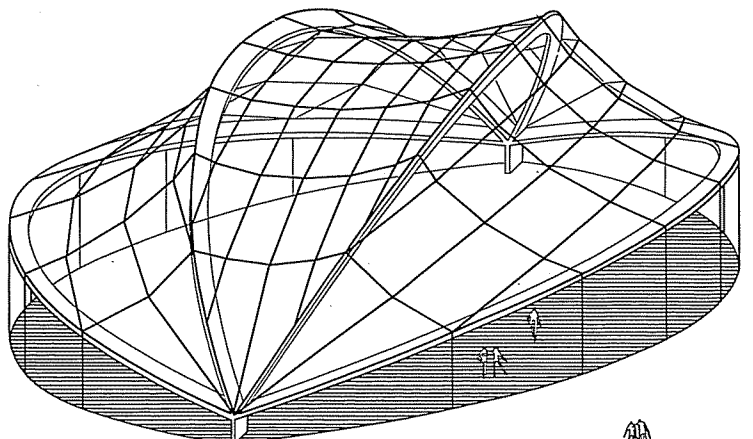
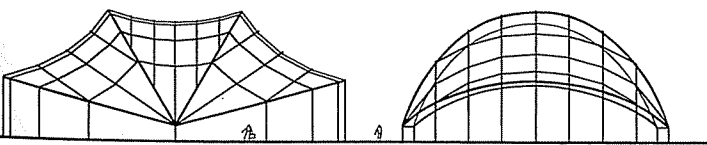
Kombination von gegensinnig gekrümmten Seilnetzen mit Randbögen / combination of reversely curved cable nets with boundary arches



2 Randbögen mit gemeinsamen Fußpunkten  
2 boundary arches with common base points



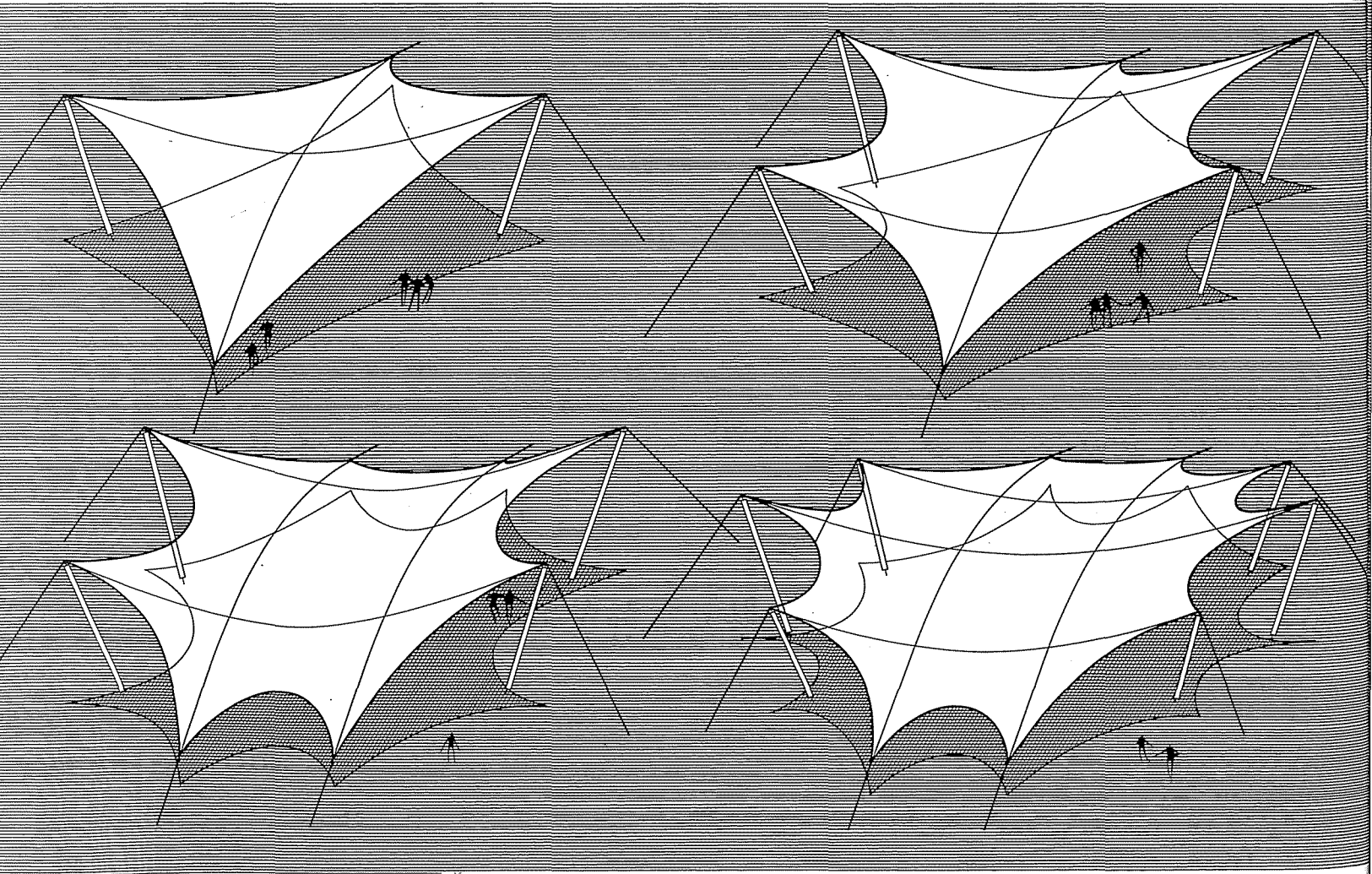
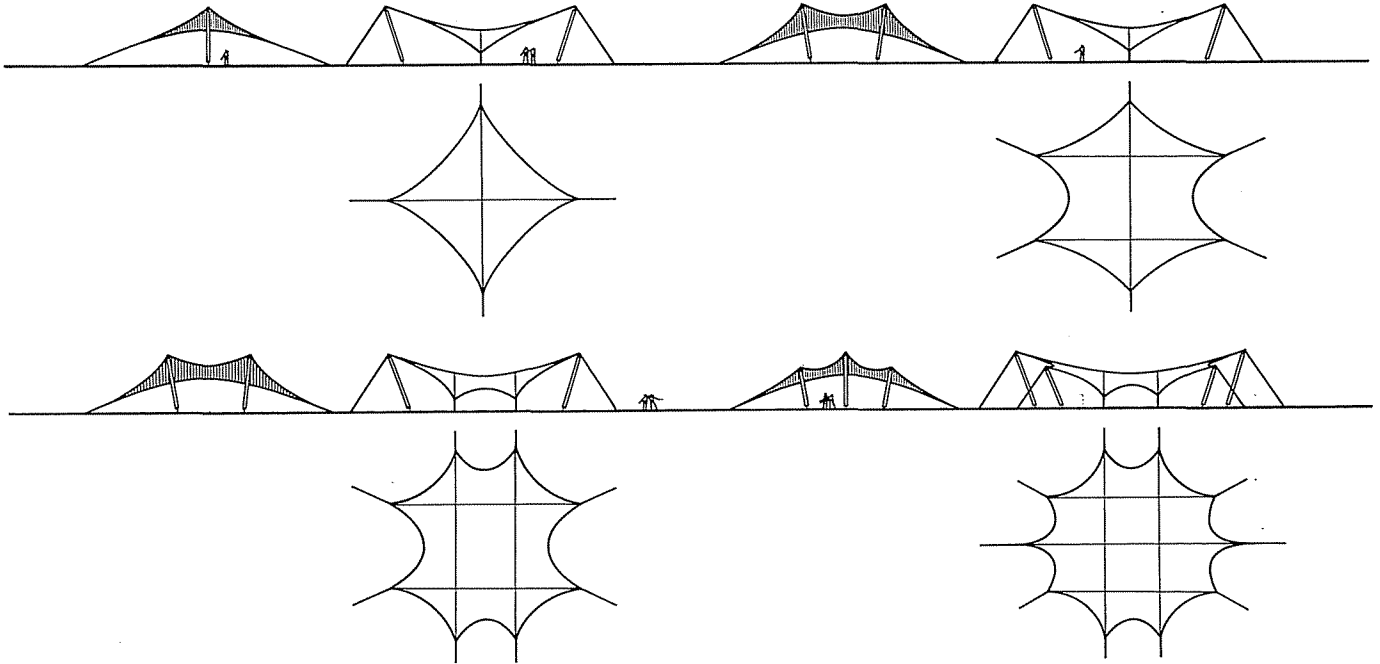
2 Randbögen mit einem Mittelbogen  
2 boundary arches with one central arch



2 Randbögen mit 2 Zwischenbögen  
2 boundary arches with 2 intermediate arches

Zeltssysteme mit äußerer Unterstützung durch Druckstäbe  
systeme mit einfachen Sattelflächen

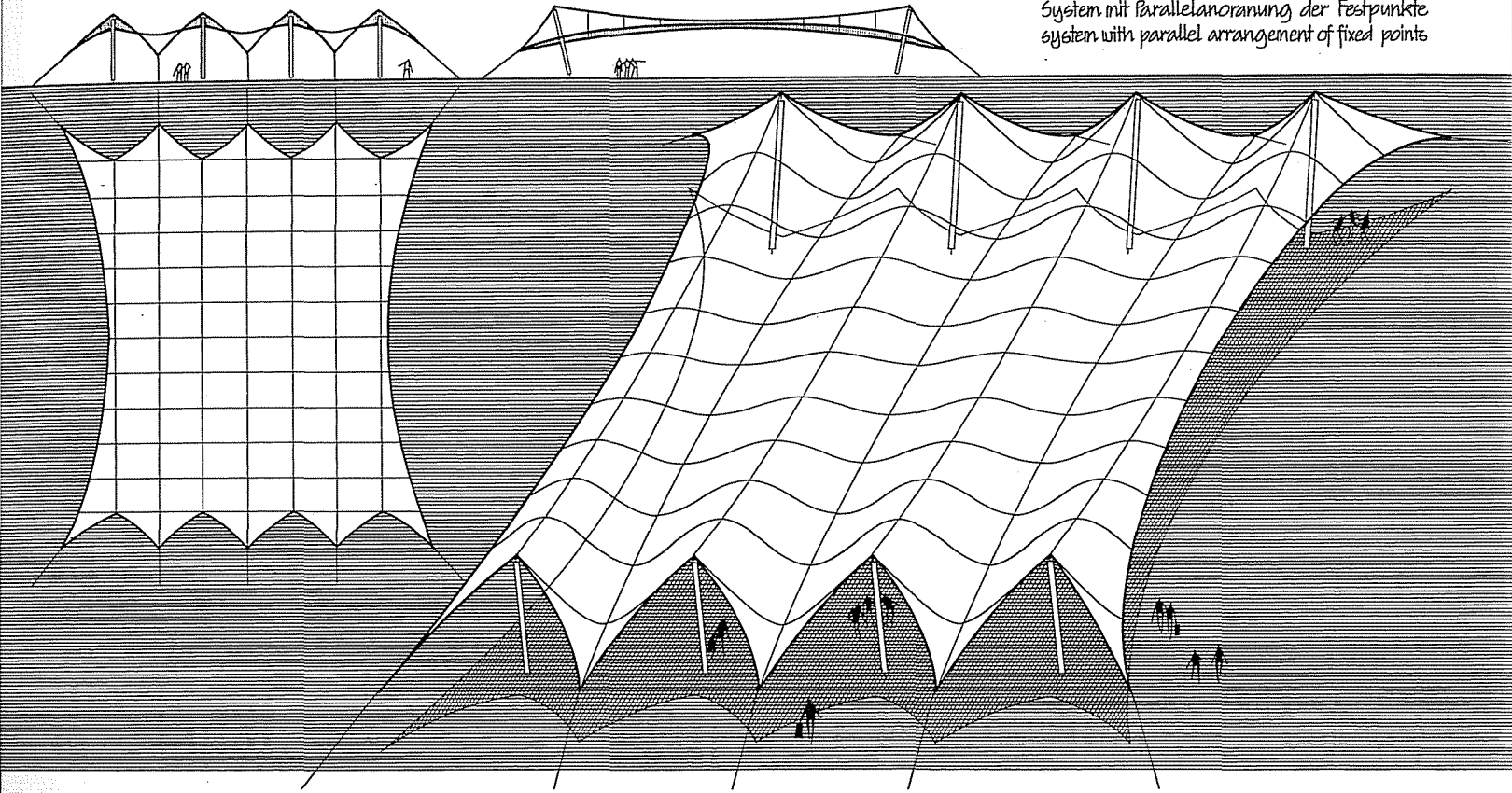
tent systems with exterior support through compression members  
systems with simple saddle surfaces



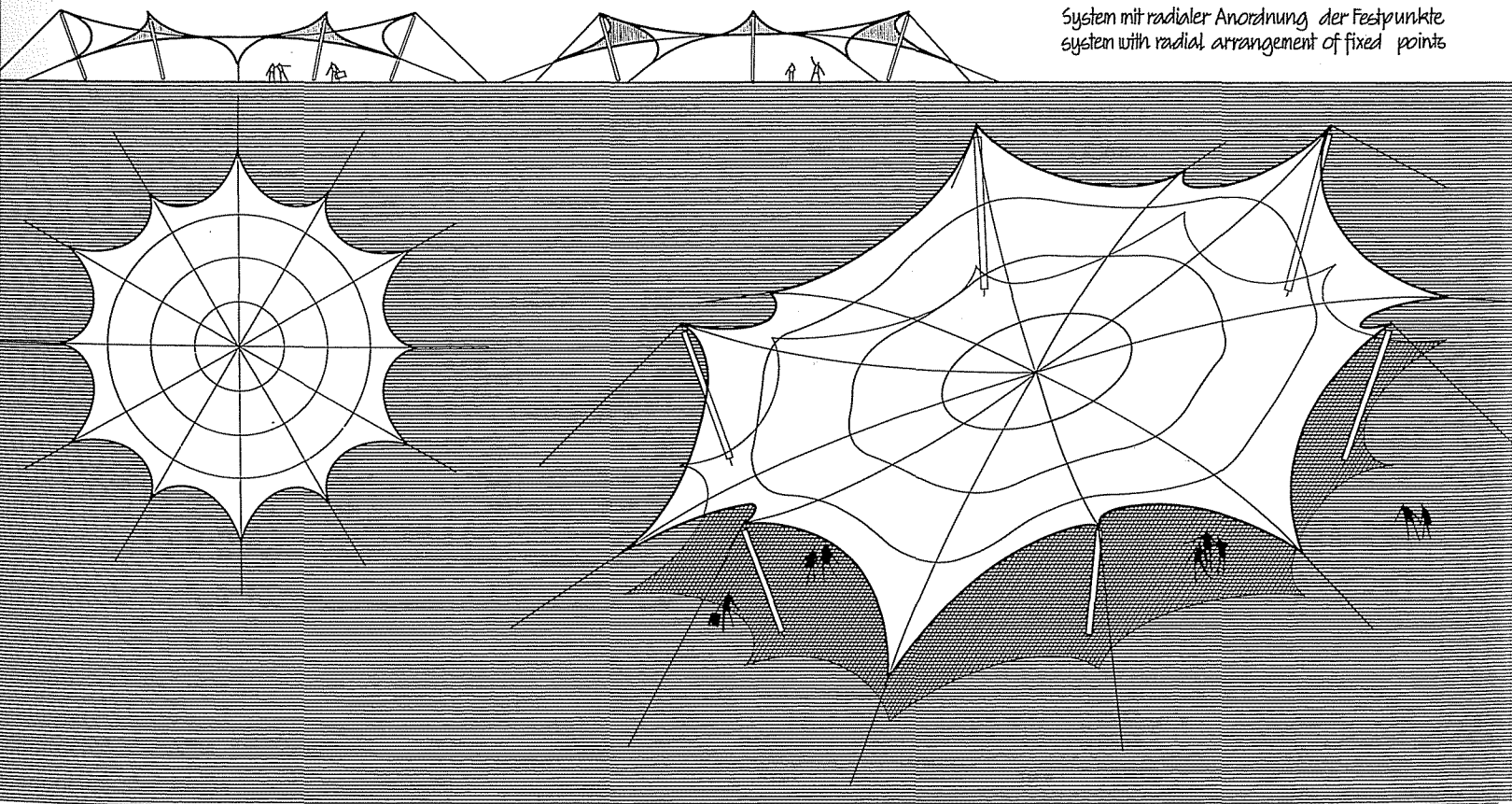
Zeltsysteme mit abwechselnden Unterstützungs- und Abspannpunkten  
Systeme mit Wellenflächen

tent systems with supports and anchor points alternating  
systems with undulating surfaces

System mit Parallelanordnung der Festpunkte  
system with parallel arrangement of fixed points



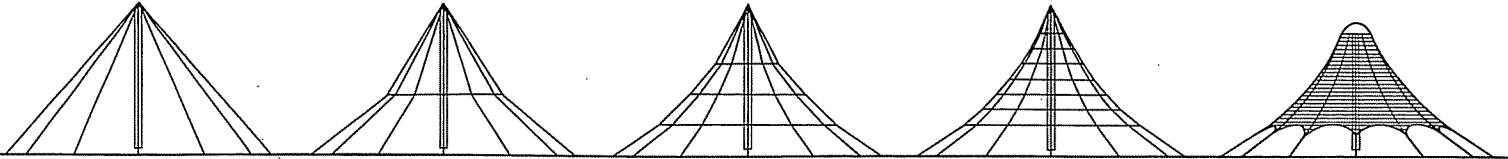
System mit radialer Anordnung der Festpunkte  
system with radial arrangement of fixed points





Zeltssysteme mit innerer Unterstützung durch Druckstäbe  
Systeme mit Buckelflächen

tent systems with interior support through compression members  
systems with hunched surfaces



Ableitung der Buckelfläche vom kegelförmigen Seilnetz

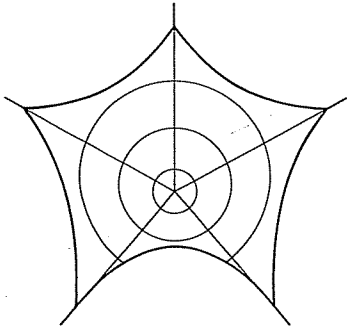
Durch Einschnürung mit horizontalen Ringseilen wird Widerstandsfähigkeit gegen asymmetrische Lasten erhöht. Verdichtung der Ringseile und Meridianseile führt zur Zeltmembrane. Wegen Konzentration der Kräfte im Hochpunkt muß Fläche des Hochpunktlagers verbreitert werden. Es entsteht die Buckelfläche

derivation of hunched surface from cone-shaped cable net

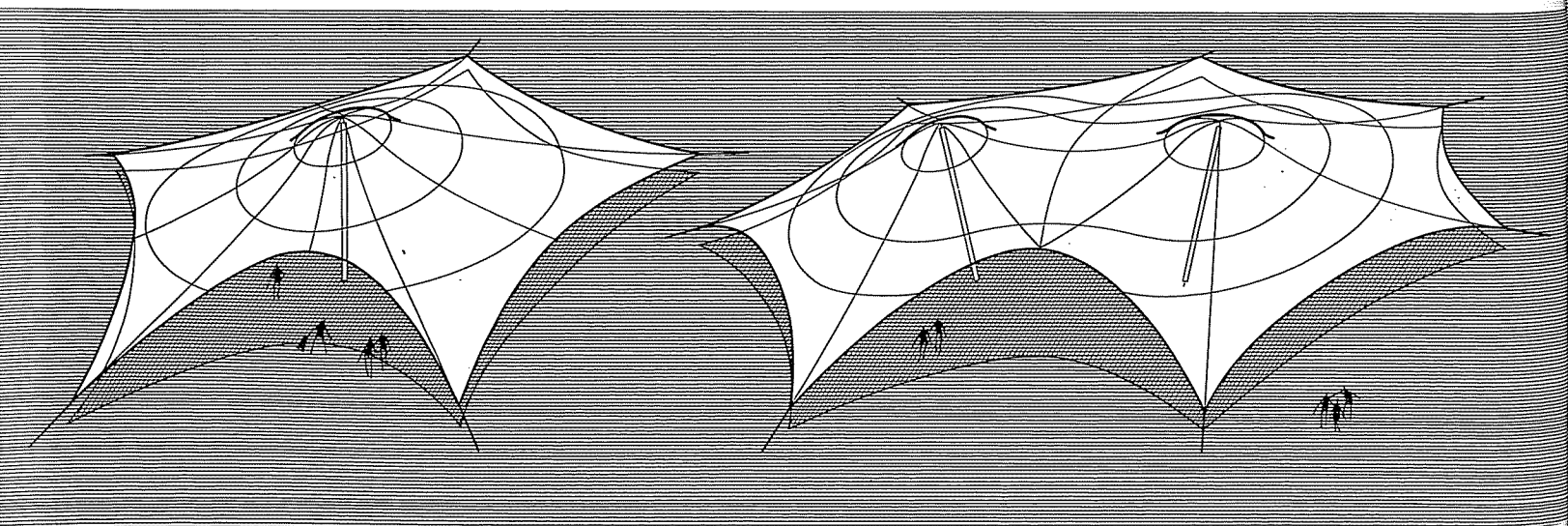
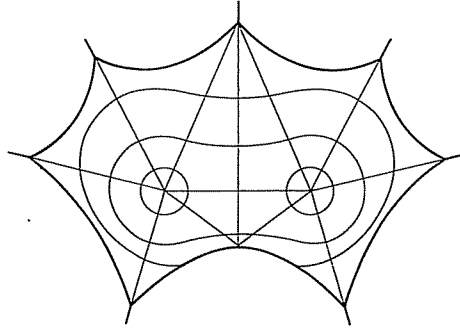
through indentation with horizontal ring cables resistance against asymmetrical loads is increased. condensation of circular and meridional cables leads to the tent membrane. because of concentration of forces in the high point the top must be flattened for enlargement of surface. the form becomes hunched



System mit einem Hochpunkt  
system with one high point

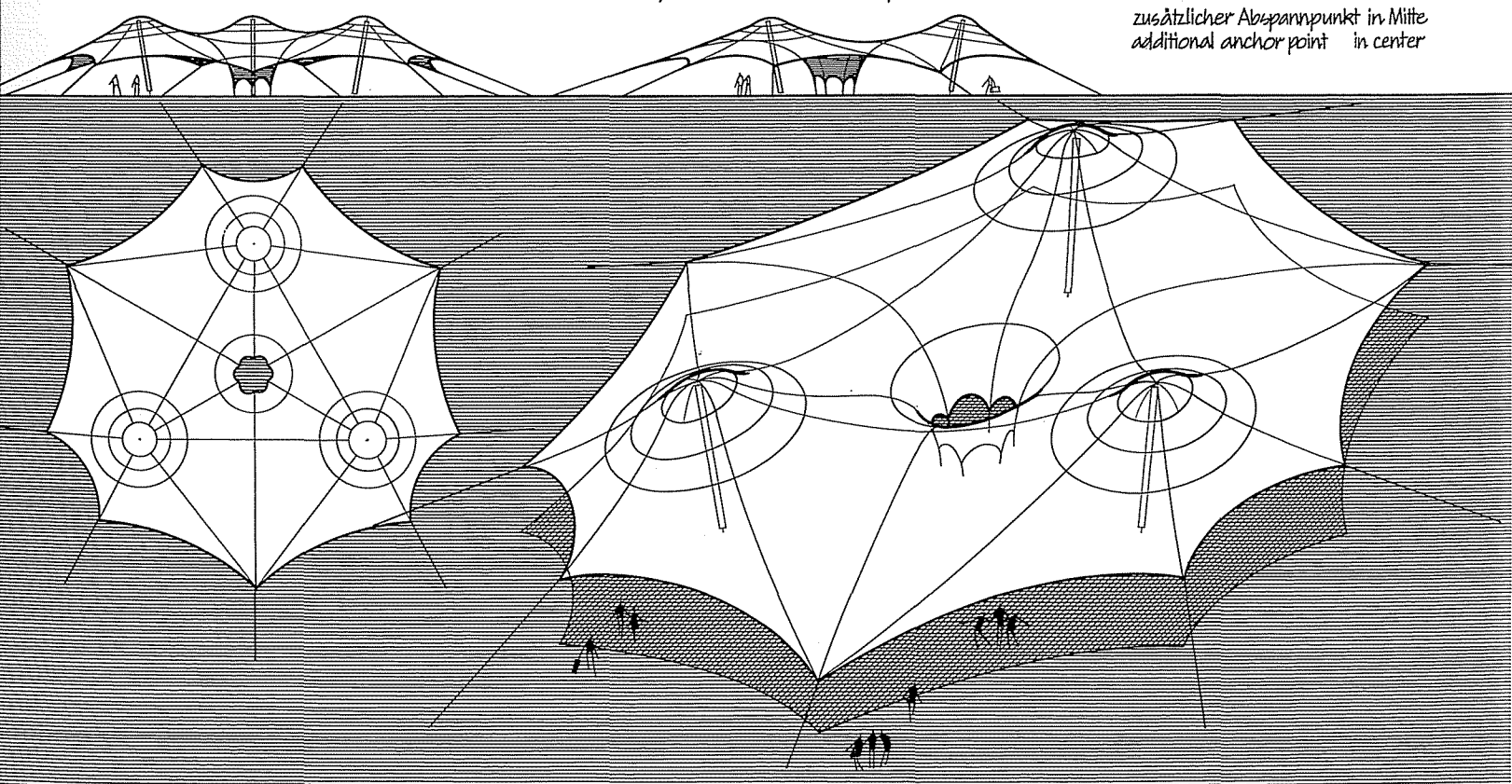
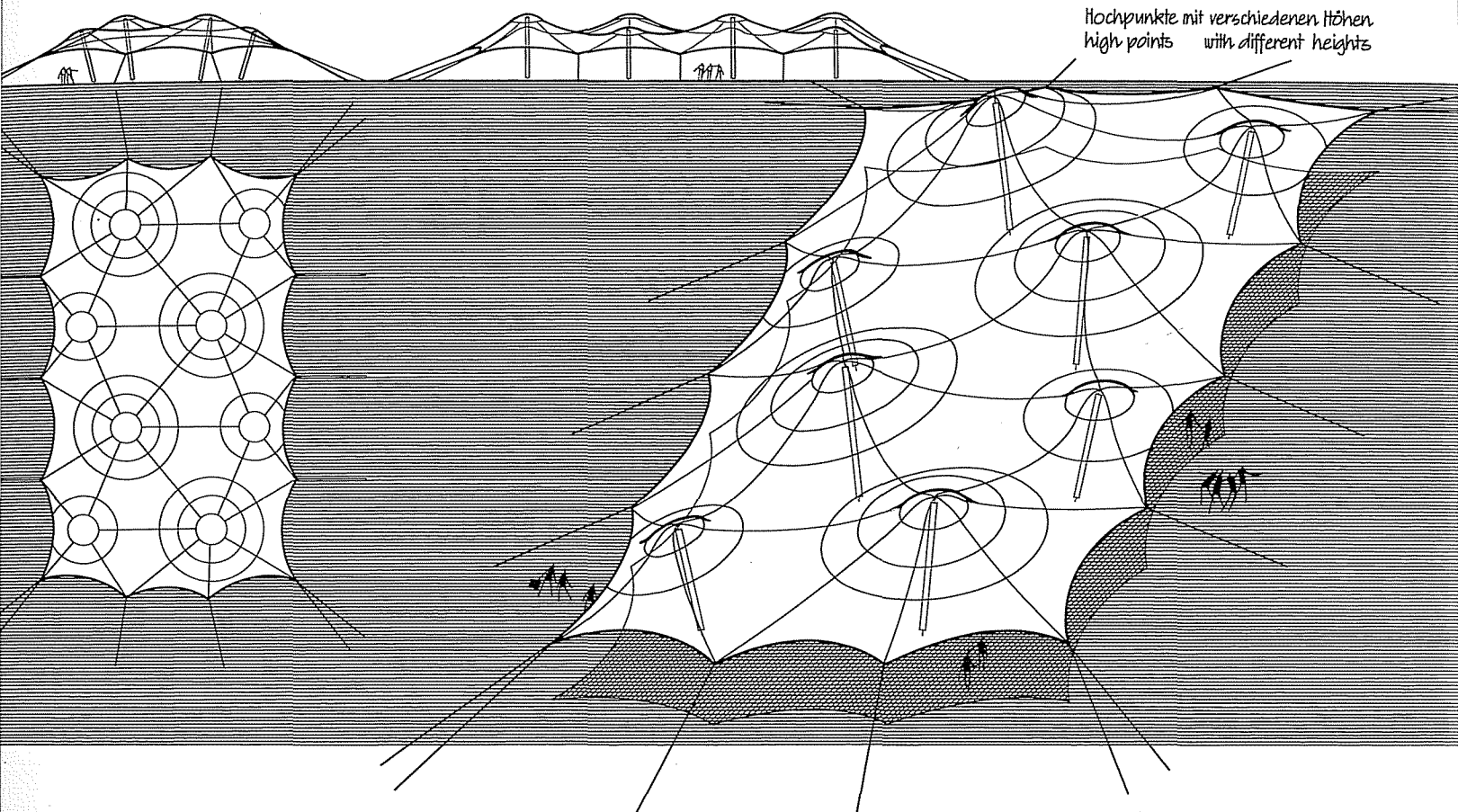


System mit zwei Hochpunkten  
system with two high points



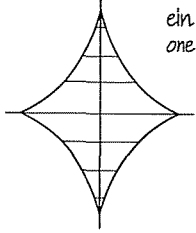
Zeltsysteme mit innerer Unterstützung durch Druckstäbe

tent systems with interior support through compression members

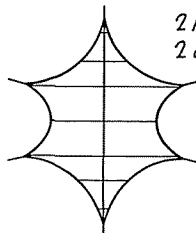


Zeltsysteme mit innerem Stützbogen als Hochpunkt-Konstruktion

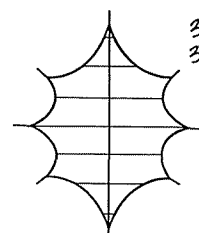
tent systems with interior arch for high point construction



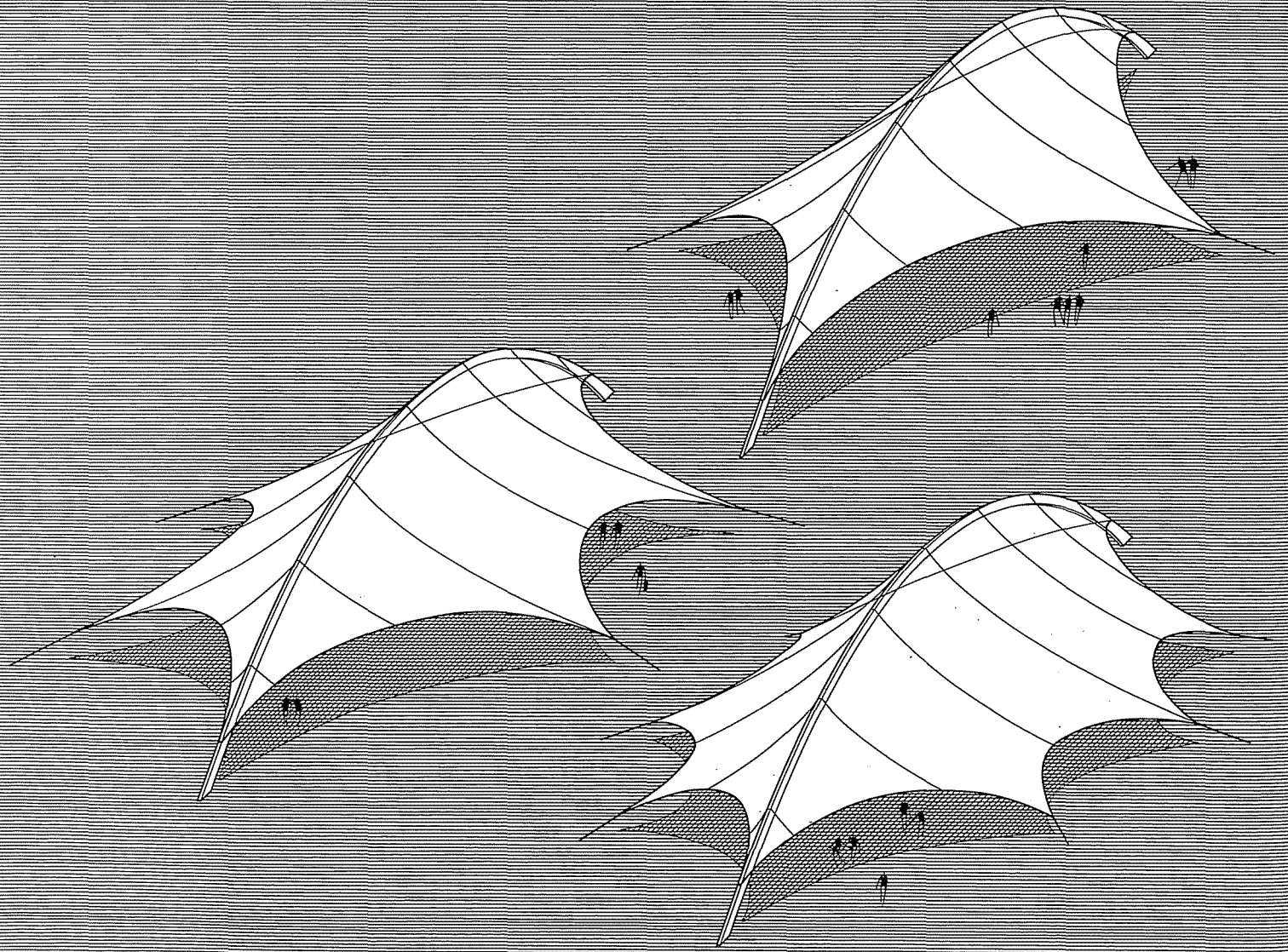
ein Abspannpunkt auf jeder Seite  
one anchor point on each side



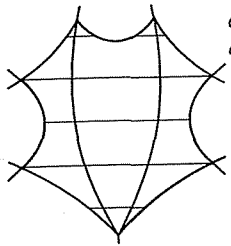
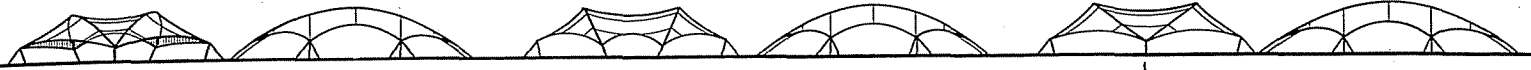
2 Abspannpunkte auf jeder Seite  
2 anchor points on each side



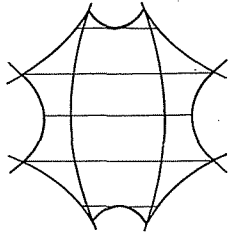
3 Abspannpunkte auf jeder Seite  
3 anchor points on each side



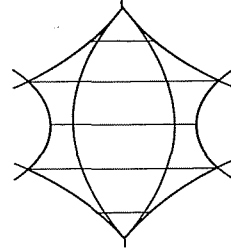
Zeltsysteme mit zwei inneren Stützbogen als Hochpunkt konstruktion / tent systems with two central arches for high point construction



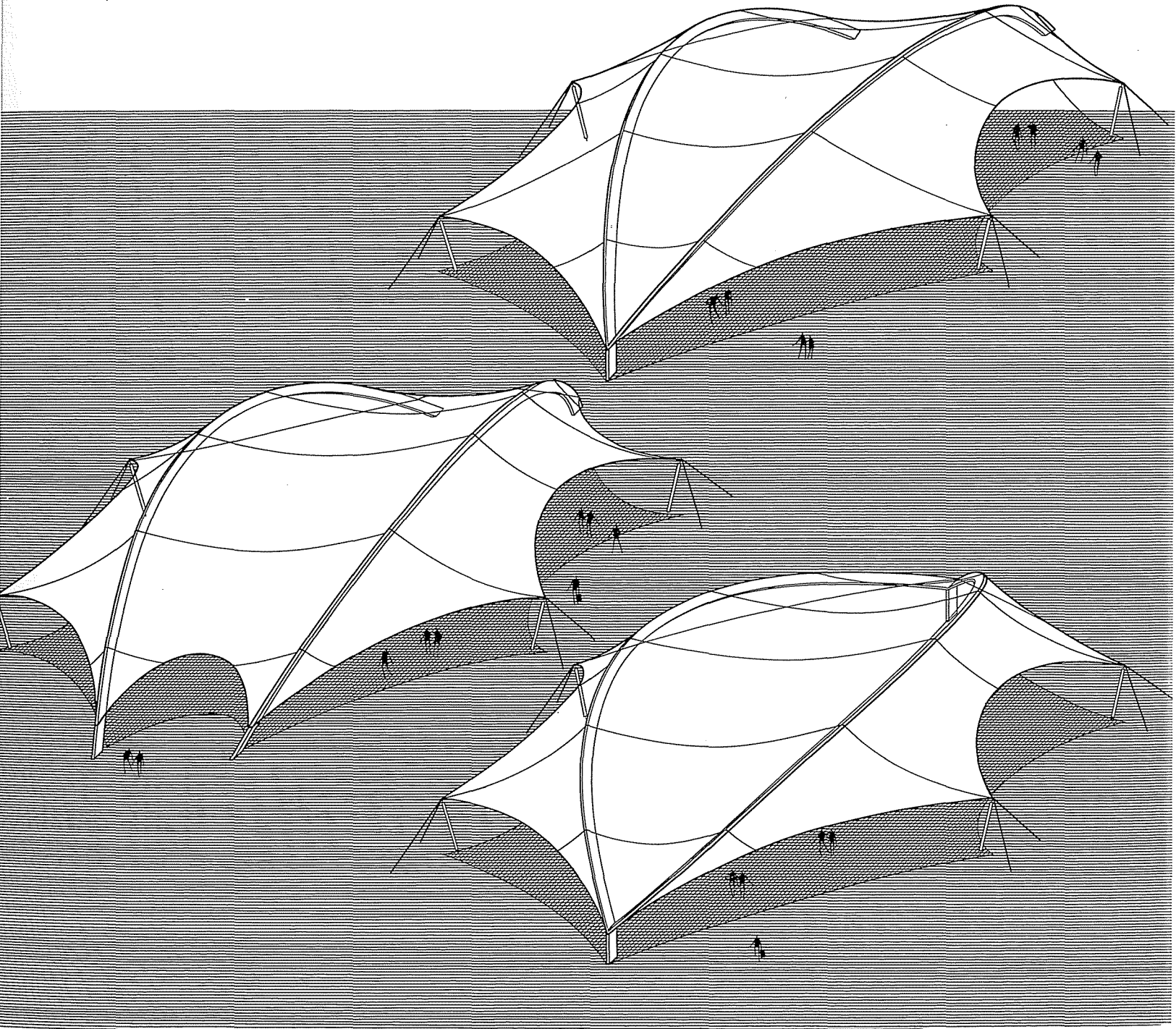
ein gemeinsamer Fußpunkt  
one common base point

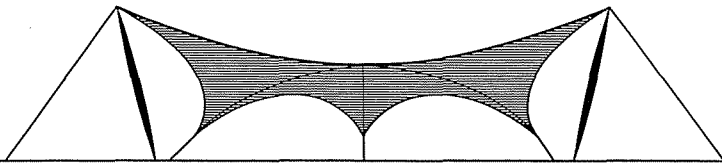


getrennte Fußpunkte  
separate base points



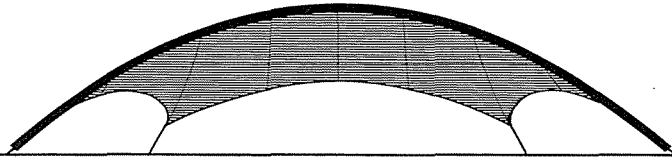
gemeinsame Fußpunkte  
common base points



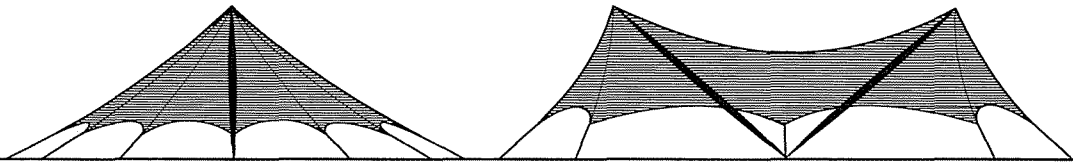


Direkte Konstruktionssysteme für Hochpunkte  
direct construction systems for high points

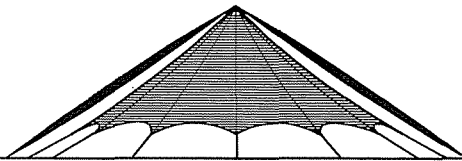
Außenstützen für peripherisch angeordnete Hochpunkte / exterior supports for high points arranged peripherally



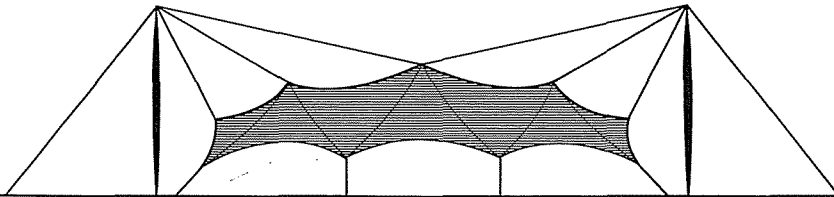
Innenbogen für axial (linear) angeordnete Hochpunkte / interior arch for high points arranged axially



Innenstützen für mittig angeordnete Hochpunkte / interior supports for high points arranged centrally

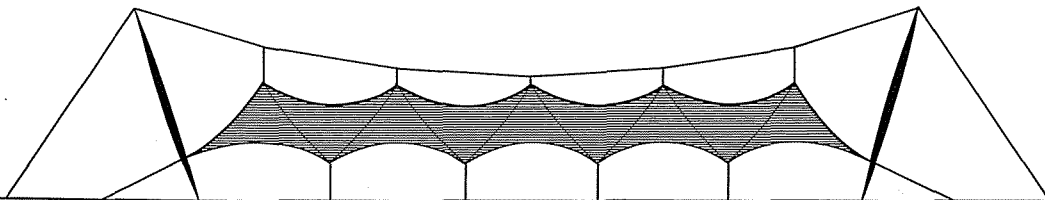


Außenstützen für mittig angeordnete Hochpunkte / exterior supports for high points arranged centrally

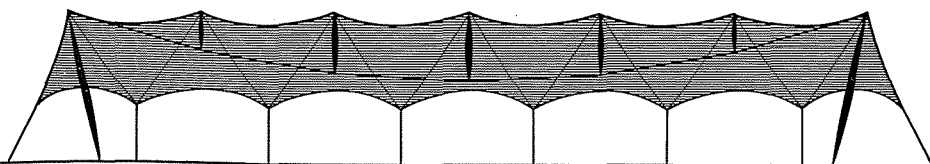


Indirekte Konstruktionssysteme für Hochpunkte  
indirect construction systems for high points

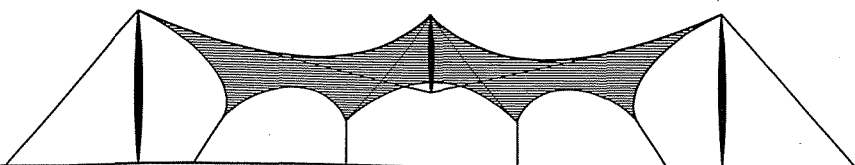
Außenstützen mit Abspannseilen für mittig angeordnete Hochpunkte / exterior supports with hanger cables for high points arranged centrally



Außenstützen mit Tragsseil für Abhängung von mittig angeordneten Hochpunkten / exterior supports with load cable for suspension of high points arranged centrally

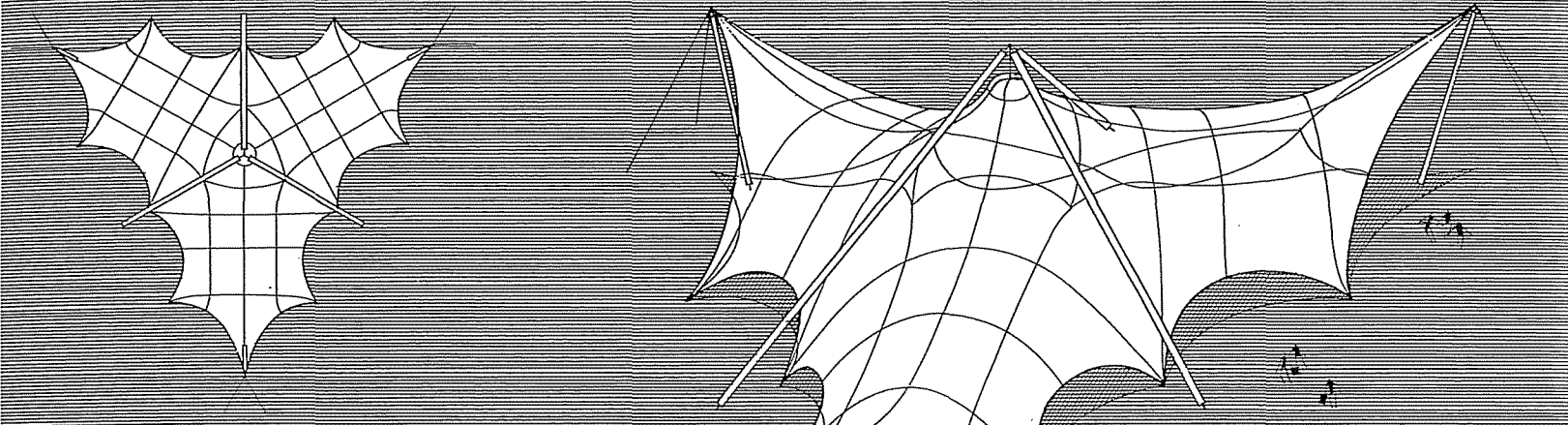
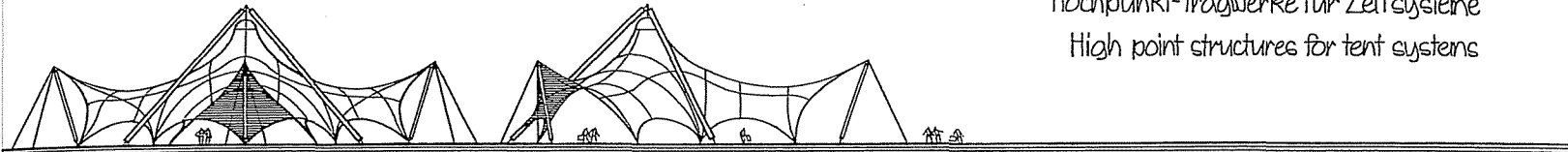


Innenstützen mit Tragsseil für Unterstützung von mittig angeordneten Hochpunkten / interior supports with load cable for support of high points arranged centrally

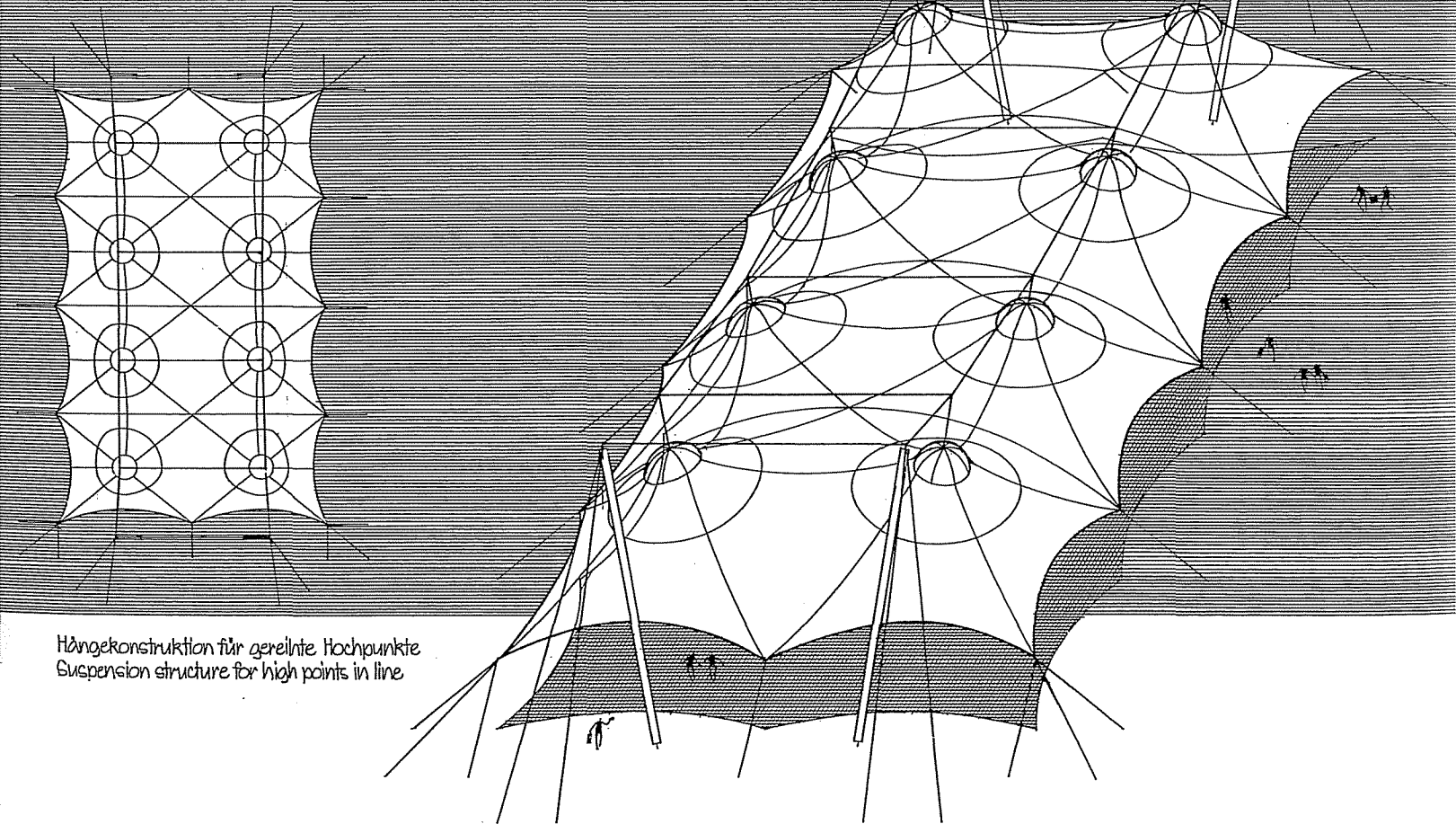
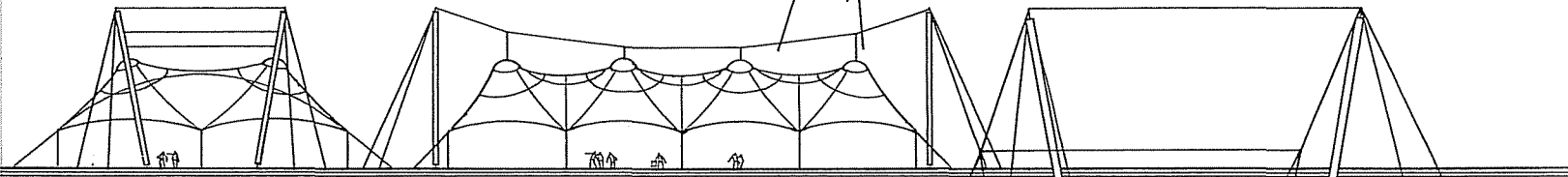


Außenstützen für peripherische Hochpunkte mit Abspannseil für zusätzlichen mittig angeordneten Hochpunkt / exterior supports for peripheral high points with hanger cable for additional high point arranged centrally

Hochpunkt-Tragwerke für Zeltsysteme  
High point structures for tent systems



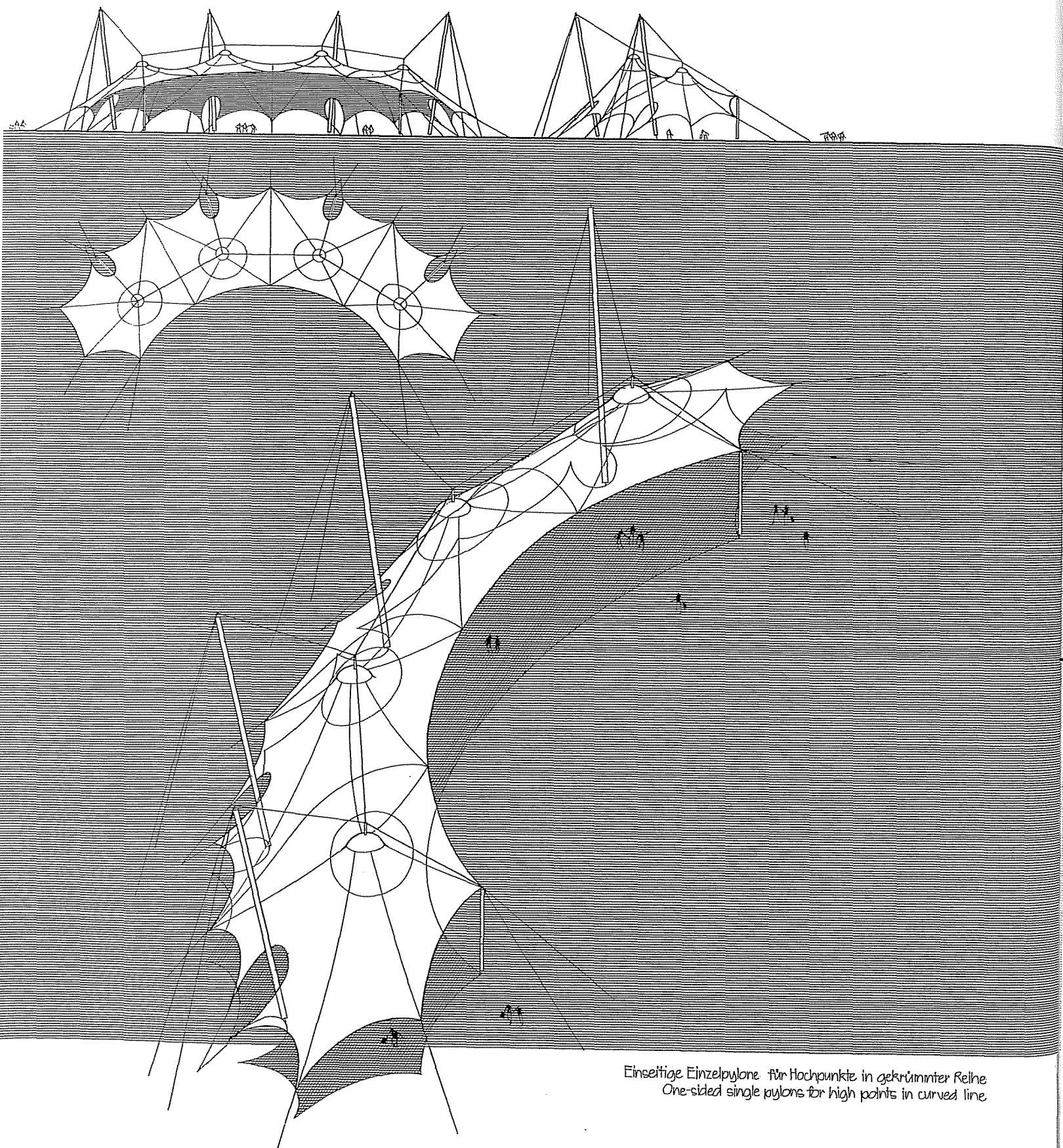
Drei-Stützen-Konstruktion für zentralen Hochpunkt  
Three column structure for central high point



Hängekonstruktion für gereihnte Hochpunkte  
Suspension structure for high points in line

Hochpunkt-Konstruktionen für Zeltsysteme

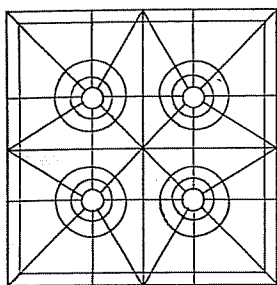
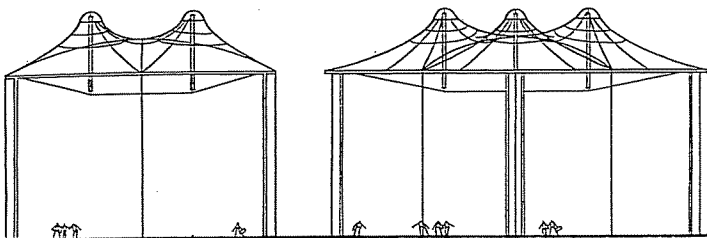
High point structures for tent systems



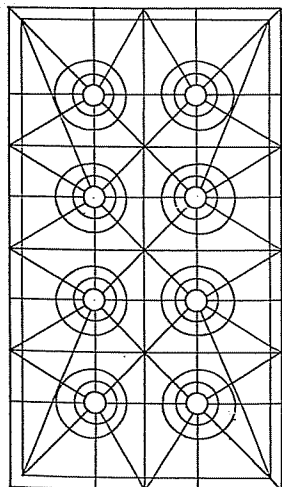
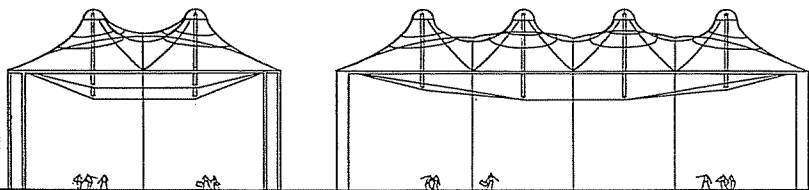
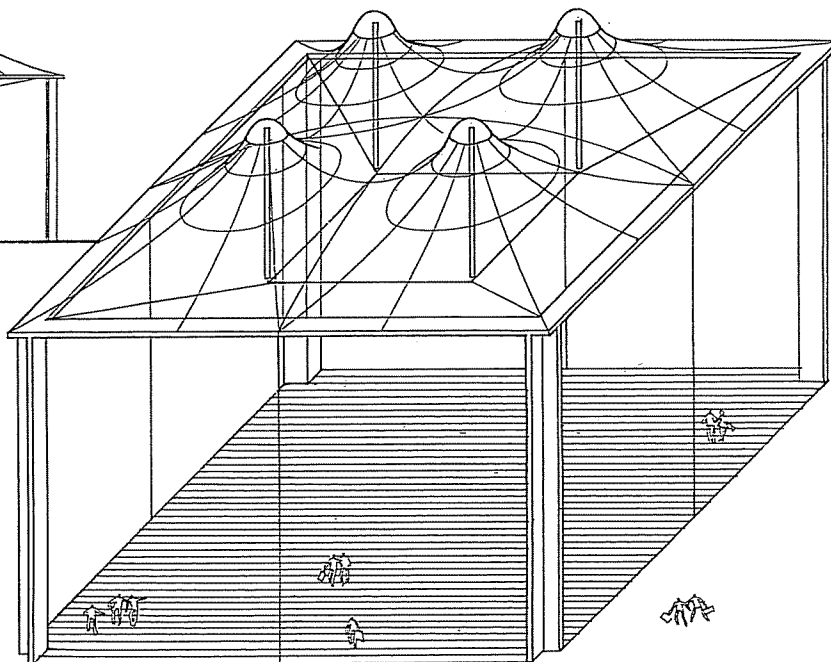
Einseitige Einzelpylone für Hochpunkte in gekrümmter Reihe  
One-sided single pylons for high points in curved line

Zeltsysteme zur Überdachung von geradlinigen Massivbauten  
Unterspannte Hochpunkt-Konstruktionen

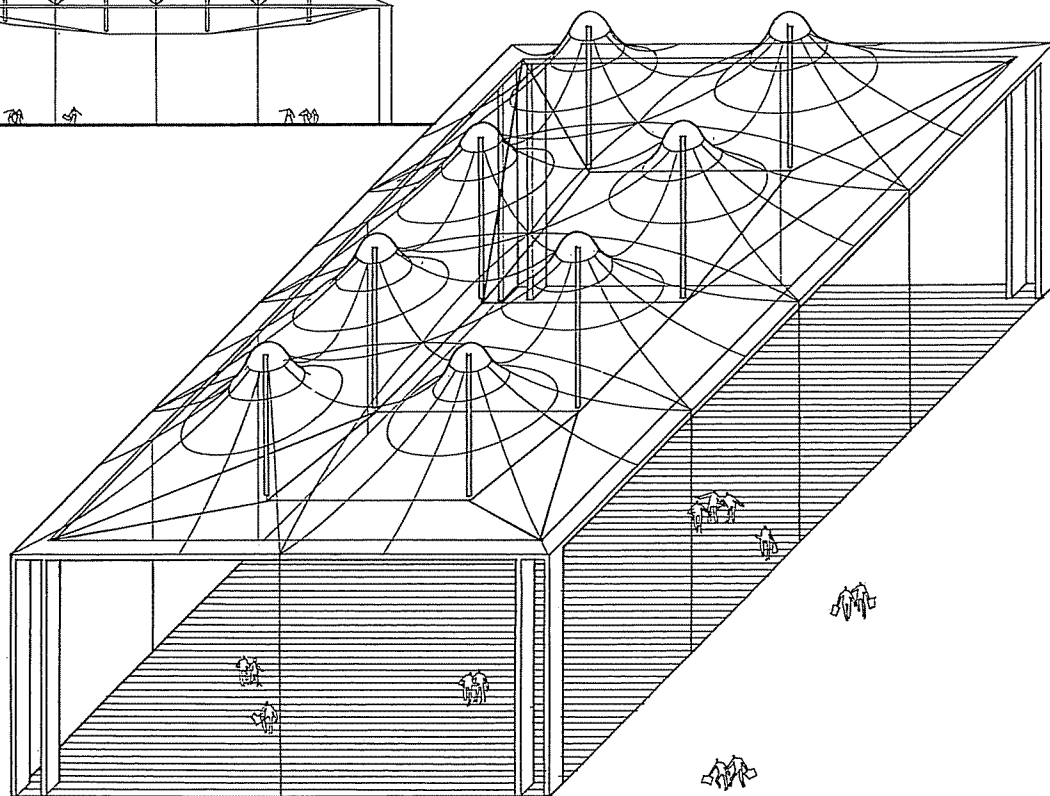
Tent systems for spanning rectilinear solid substructures  
Cable-supported high-point constructions



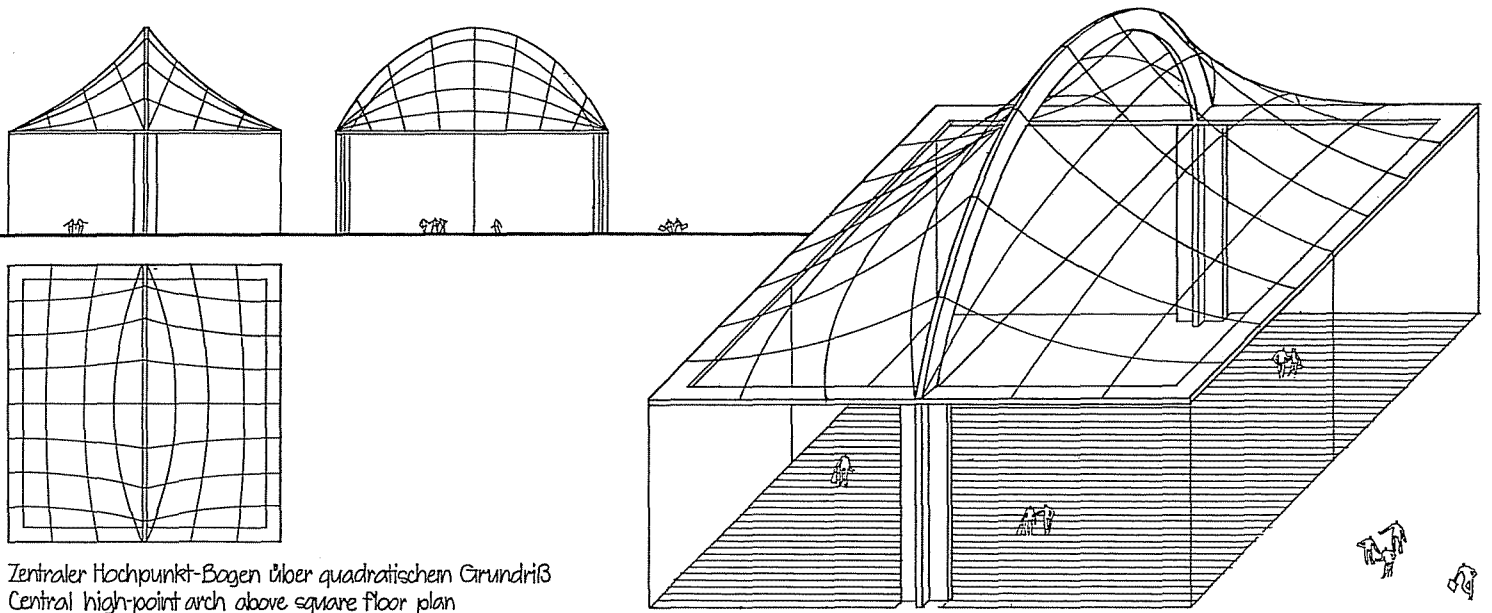
Zentral angeordnete Hochpunkte über quadratischen Grundriß  
Centrally positioned high-points above square floor plan



Gereihte Hochpunkt-Anordnung über rechteckigen Grundriß  
Lined disposition of high-points above rectangular floor plan



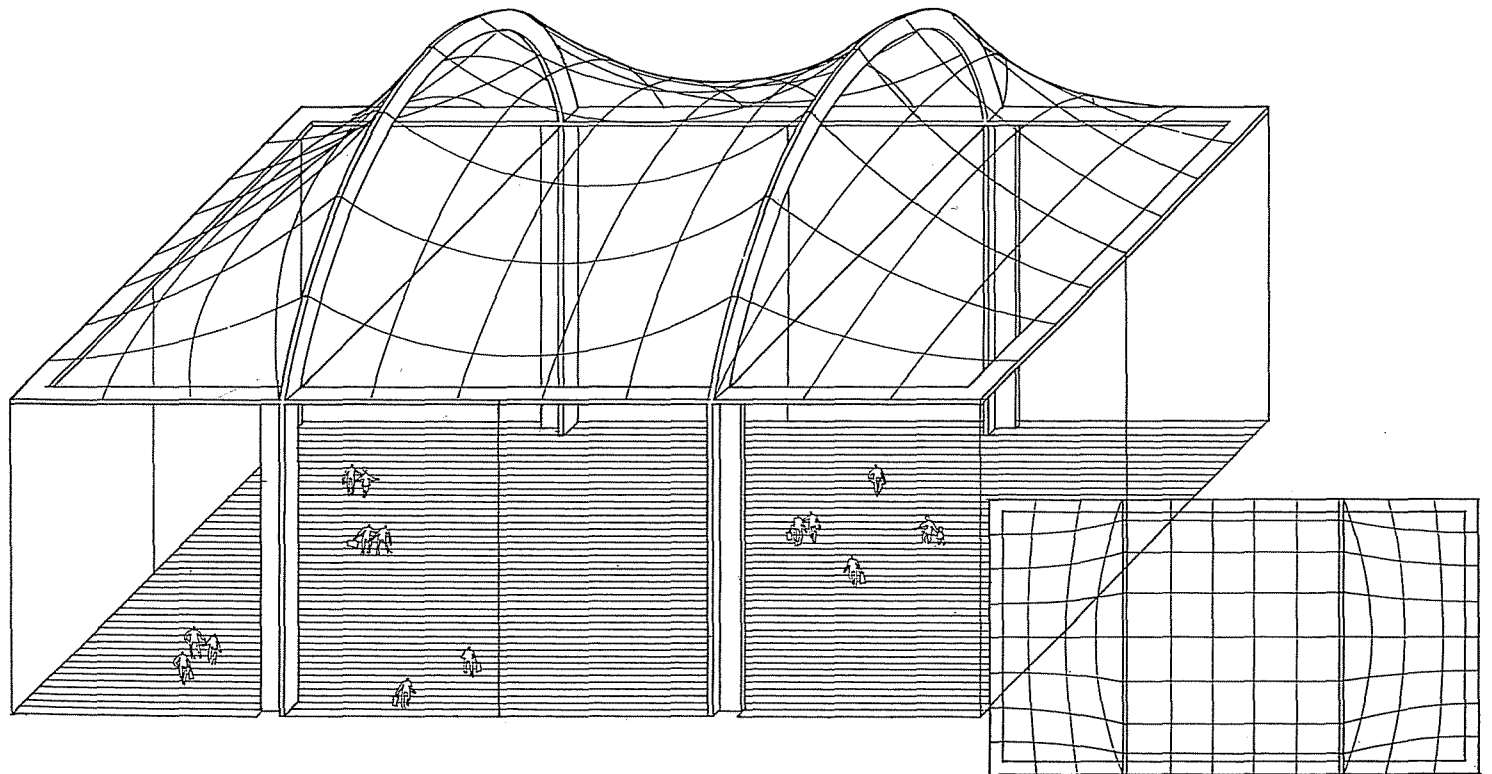




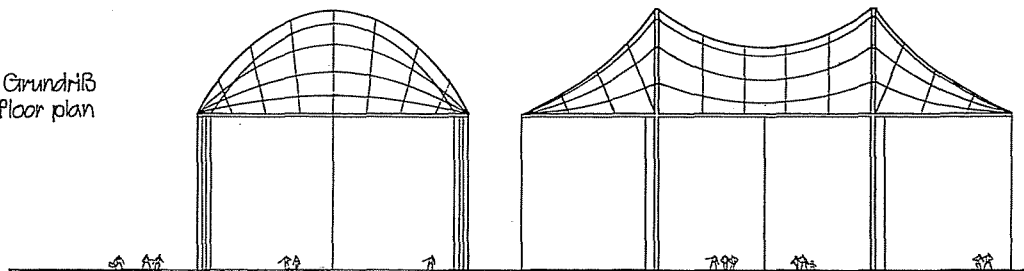
Zentraler Hochpunkt-Bogen über quadratischem Grundriß  
Central high-point arch above square floor plan

Zeltsysteme zur Überdachung von geradlinigen Massivbauten  
Innenbögen als Hochpunkt-Konstruktionen

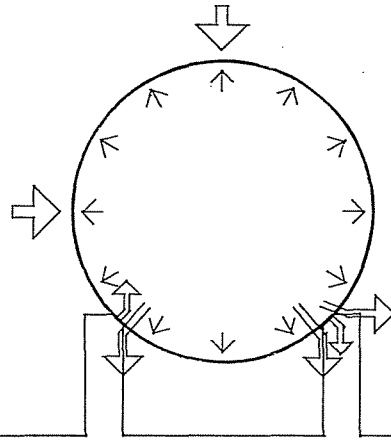
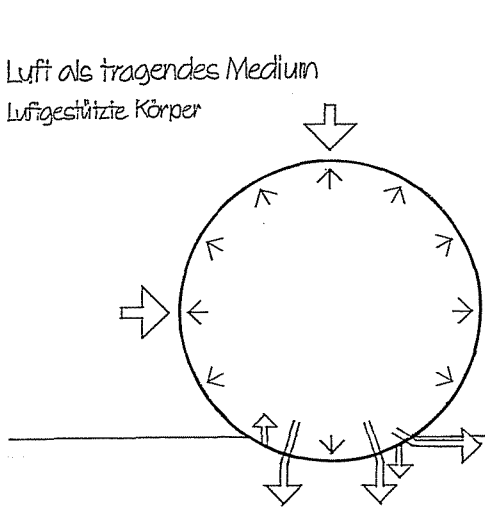
Tent systems for spanning rectilinear solid substructures  
Interior arches as high-point constructions



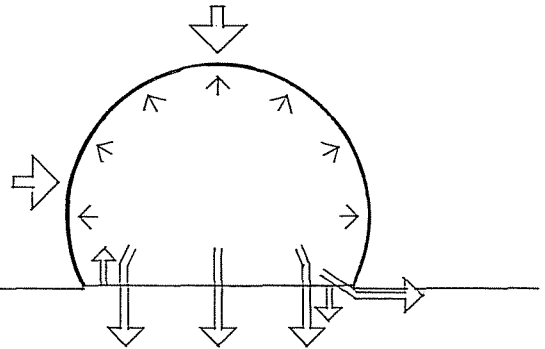
Parallele Hochpunkt-Bögen über rechteckigen Grundriß  
Parallel high-point arches above rectangular floor plan



Luft als tragendes Medium  
Luftgestützte Körper



Air as load bearing medium  
Air supported objects



LUFTMENGE in einer zugfesten, flexiblen Hülle (=Membrane) eingeschlossen und gegenüber der umgebenden Luft verdichtet (=Überdruck) verhält sich wie ein homogener, elastischer KÖRPER. Als solcher kann Luftmenge äußere Kräfte aufnehmen, weiterleiten und abgeben= PNEUMATISCHE TRAGWERKE

- Diese mechanische Eigenschaft einer Luftmenge beruht auf 3 Bedingungen =
- 1 Die umschließende Hülle muß zugfest und luft-undurchlässig sein
  - 2 Der stabilisierende Innendruck der Luft muß dauerhaft sein und immer größer als alle der Membrane einwirkenden Kräfte
  - 3 Jede Veränderung der Hüllengestalt (bei gleicher Flächengröße) muß zu einer deutlichen Verringerung des eingeschlossenen Volumens führen

Zusammengefaßt: Die Tragmechanik der Luft beruht auf dem Widerstand der Pneu-Form gegenüber äußeren Kräften = FORMAKTIVE TRAGSYSTEME

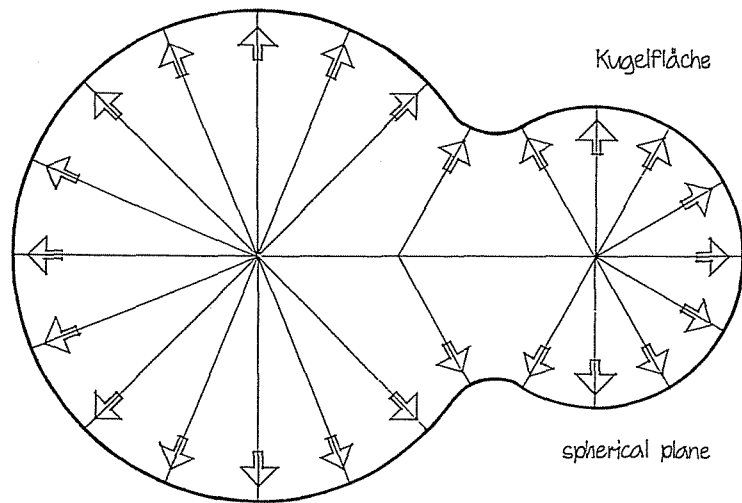
AIR VOLUME locked into a tension-resistant, flexible envelope (=membrane) and pressurized versus the surrounding air (=overpressure) behaves like a homogeneous, resilient SOLID. As such, air volume can receive, transfer and discharge external forces= PNEUMATIC STRUCTURES

- This mechanical quality of air acting like a solid rests upon 3 conditions =
- 1 The enclosing fabric must be tension-resistant and impermeable to air
  - 2 The stabilizing indoor air pressure must be permanent and always be higher than all the forces acting upon the membrane from without
  - 3 Each deflection of the envelope shape (with size of area unchanged) must lead to a definite reduction of the volume enclosed

Summarized: The structural mechanics of air rest upon the resistance of the pneumatic form against external forces = FORM-ACTIVE SYSTEMS

Grundform der Membrane

Basic shape of membrane



Die Kräfte eines eingeschlossenen Luftvolumens im Zustand des Überdruckes sind überall gleich groß. Sie wirken zentrifugal in Richtung der umgebenden Hülle, d.h. in Richtung des möglichen Druckausgleiches

Die aus diesem Kräftezustand resultierende Membranform ist die Grundgeometrie pneumatischer Strukturen= KUGELFLÄCHEN

Die Kugelfläche umschließt Rauminhalt mit minimaler Oberfläche. Als solche ist sie eine Hüllenform, deren Volumen durch jede Formänderung maximal gemindert wird, d.h. sich optimal jeder Deformation widersetzt

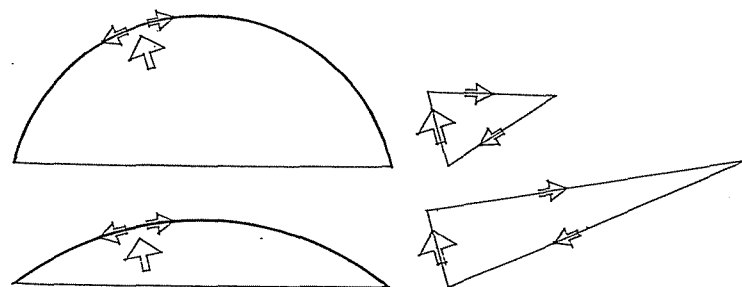
Die homogene, gleichmäßige Membrane in Kugelform entwickelt unter Innen-Überdruck an jeder Stelle die gleichen Zugspannungen

The forces of an air volume, being locked in and pressurized, are equal throughout the volume. They act centrifugally in the direction of the enclosing membrane, i.e. in direction of possible pressure equalization

The membrane form resulting from this constellation of forces is the basic geometry of pneumatic structure patterns= SPHERICAL SURFACES

The spherical surface encloses space with a minimum of surface. As such it constitutes an envelope configuration, the volume of which at each deflection will be diminished maximum, i.e. will resist deflection optimum

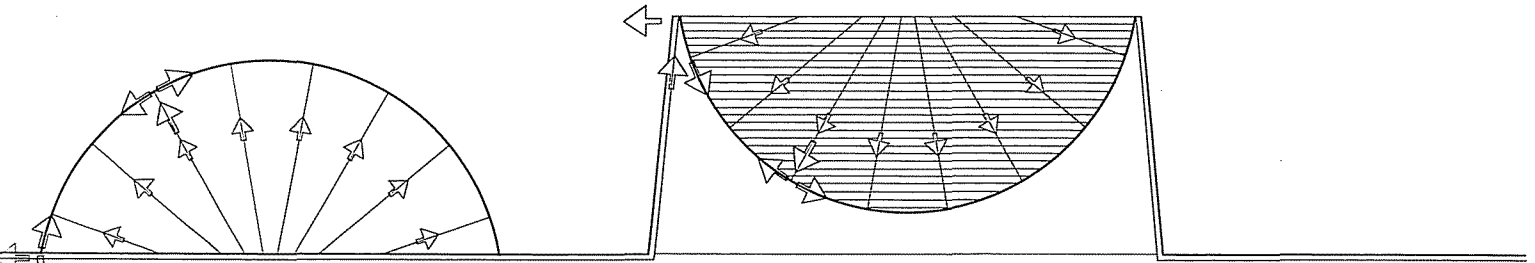
Under indoor overpressure the homogeneous, uniform sphere membrane develops equal tensile stresses at each point.



Mit größer werdender Krümmung der Kugelfläche (= kleiner werdendem Radius) und gleichbleibendem Innenluft-Überdruck verringern sich die Membranspannungen. Die Wirksamkeit der Membrane zur Aufnahme von Innendruck-Kräften nimmt zu. Damit erhöhen sich auch die Widerstandskräfte gegenüber einer Verformung der Hüllengeometrie

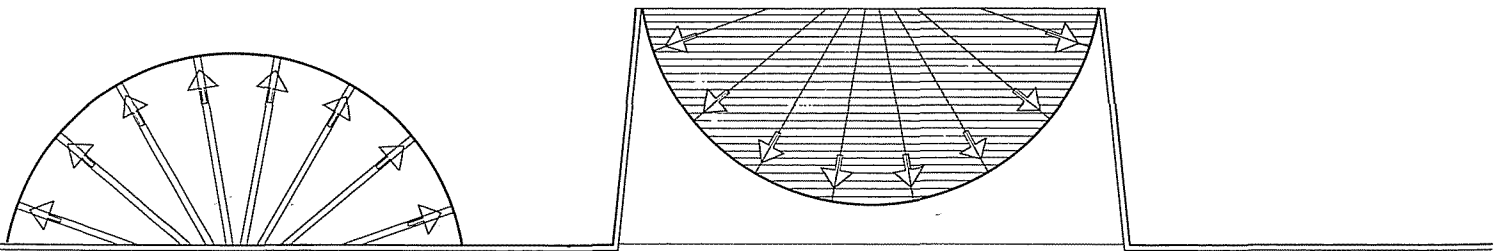
With increasing curvature of the spherical plane (= decreasing radius) and with indoor air over-pressure remaining constant, the membrane stresses will decrease. The capacity of the membrane to receive indoor compressive forces will increase. Therefore, also the resistance capacity against the deflection of the envelope geometry will increase

Pneumatischer Tragmechanismus: Vergleich mit Membranbehälter / pneumatic structure mechanism: comparison with membrane container  
 Luftgestützte Tragsysteme air-supported structure systems



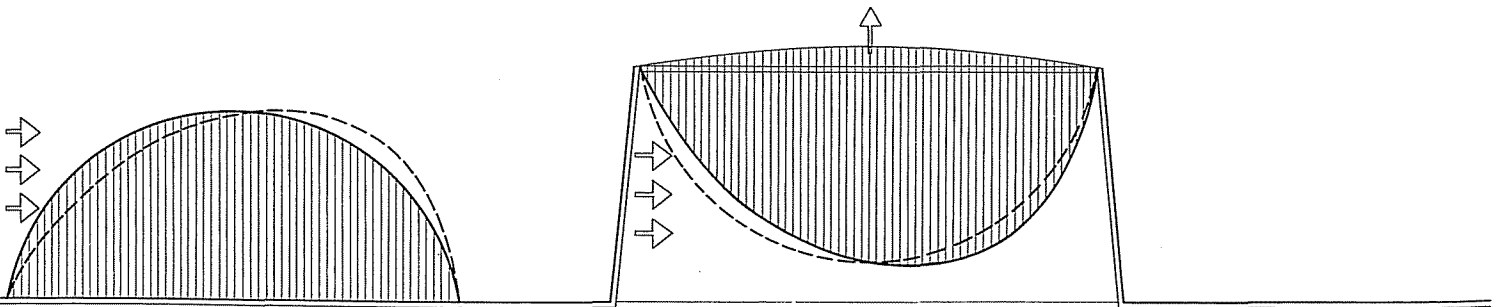
Durch Überhöhung des inneren Luftdruckes wird nicht nur das Eigengewicht der Raumhülle aufgewogen, sondern die Membrane so weit vorgespannt, daß sie durch asymmetrische Belastung nicht eingedrückt werden kann. Die Kraftumlenkung durch Membrane betrifft also nur nach außen gerichtete Resultierende ähnlich der Wirkungsweise eines Membranbehälters, der nur dem Druck seines Inhaltes (Flüssigkeit, Schüttgüter) ausgesetzt ist.

through increasing the inside air pressure not only the dead weight of the space envelop is balanced, but the membrane is stressed to a point where it cannot be indented by asymmetrical loading, redirection of forces by the membrane therefore involves only centrifugal resultants, similar to the action of a membrane container that is exposed only to the pressure of its content (liquids, granular solids)



Der Innendruck wirkt sich wie eine fortlaufende elastische Unterstützung der Membrane an jeder Stelle aus. Ähnlich wird die Form eines Membranbehälters durch den zentrifugalen Druck seines Inhaltes stabilisiert. Der Vorteil der pneumatischen Stützung ist, daß sie die freie Nutzung des Raumes nicht beeinträchtigt.

the inside pressure functions like a continuous flexible support of the membrane at any point. similarly, the form of a membrane container is stabilized by the centrifugal pressure of its content. the advantage of the pneumatic support is that it does not encumber the free use of space.

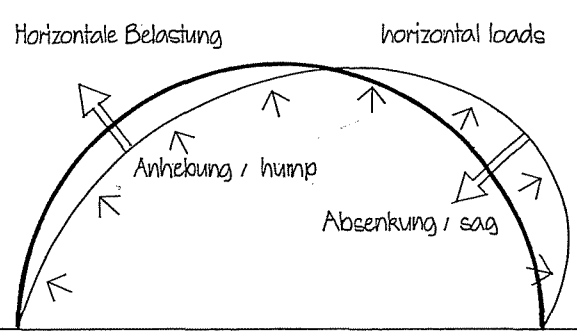
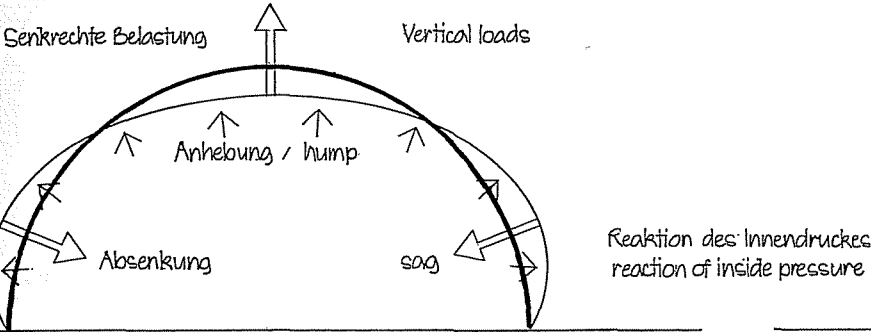
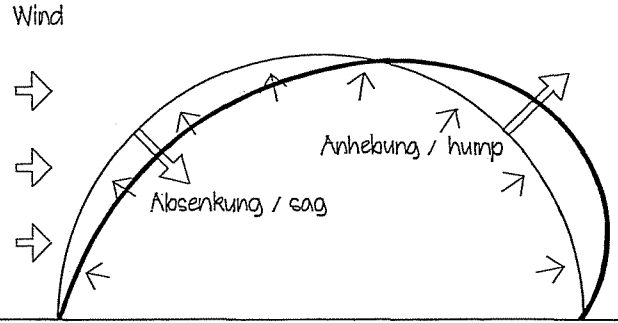
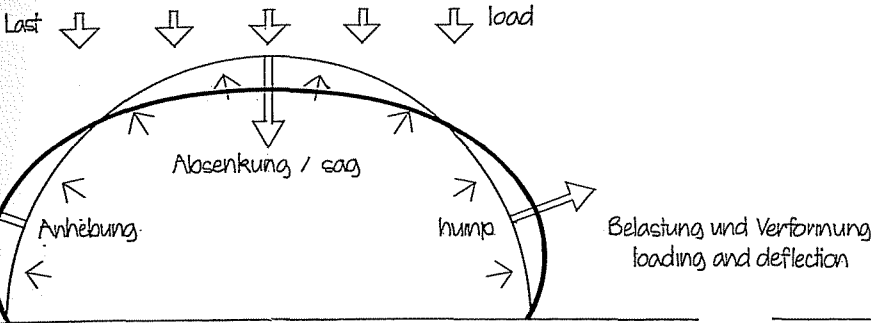


Der Widerstand gegen Deformation wird durch luftdichten Abschluß und Zugfestigkeit der Membrane gewährleistet. Nur unter Verlust des Volumens oder Flächenausweitung der Hülle kann sich die Tragform verändern im Gegensatz zum aufgehängten Membranbehälter, dessen Inhalt nach der offenen Seite (oben) ausweichen kann und Deformation zuläßt.

resistance against deflection is provided by the air-tight enclosure and the tensile strength of the membrane. the structure form can deflect only at a loss of volume or at an increase of surface, contrary to the hung membrane container in which the content can evade to the open (upper) side and thus allows deflection

Mechanismus der Pneu-Körper gegen Verformung

Mechanics of pneumatic figures against deformations



Zwei Widerstandsmechanismen gegen Verformung

Two mechanisms of resistance against deformation

- 1 Entgegensteuernde Wirkung der Innendruck-Kräfte auf die Hülle:  
Erhöhte Wirkung bei abnehmender Krümmung = Hüllenanhhebung  
Reduzierte Wirkung bei zunehmender Krümmung = Hüllenabsenkung
- 2 Erhöhung der Membranspannungen insgesamt nach Ausdehnung der Oberfläche infolge Volumen-Umschichtung und damit Mobilisierung von Kräften zur Wiedergewinnung der pneumatischen Ausgangsform

- 1 Counter-acting effect of compressive indoor forces upon envelope:  
Increasing effect with receding curvature = arching of envelope  
Decreasing effect with progressing curvature = flattening of envelope
- 2 Overall increase of membrane stresses after extension of the membrane surface due to volume displacement, and consequently, mobilization of forces for regaining the original pneumatic shape

Zusammenwirkung von Überdruck-Luftmenge und Hüllennembrane

Coaction of pressurized air volume and envelope membrane

Die Membranhülle (Eigengewicht) wird durch die Druckdifferenz der Luft zwischen innen und außen getragen und stabilisiert:  
- LUFTGESTÜTZTE TRAGSYSTEME

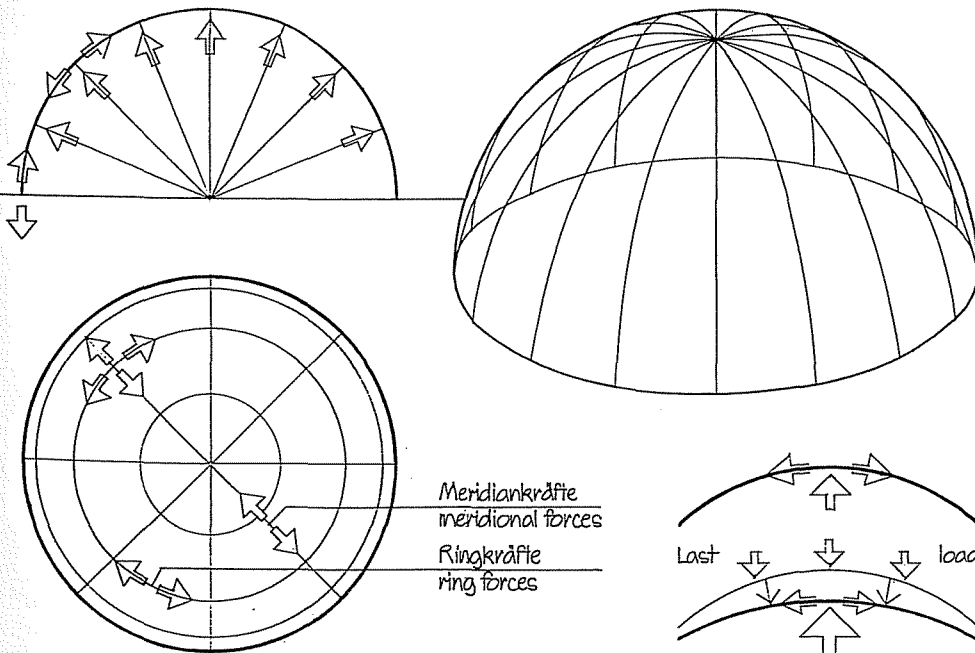
Bei zusätzlichen Kräfteinwirkungen gibt die Hülle zunächst nach und bewirkt, daß die eingeschlossene Luftmenge zusammengepreßt und verschoben wird. Dadurch erhöht sich der Differenzdruck nach außen bei gleichzeitiger Veränderung der Hüllengestalt (-krümmung)

Beide Vorgänge verstärken den Widerstand gegen Verformungen. D.h., erst durch die eingeleitete Verformung werden die Kräfte zur Herstellung des Gleichgewichtes mobilisiert.

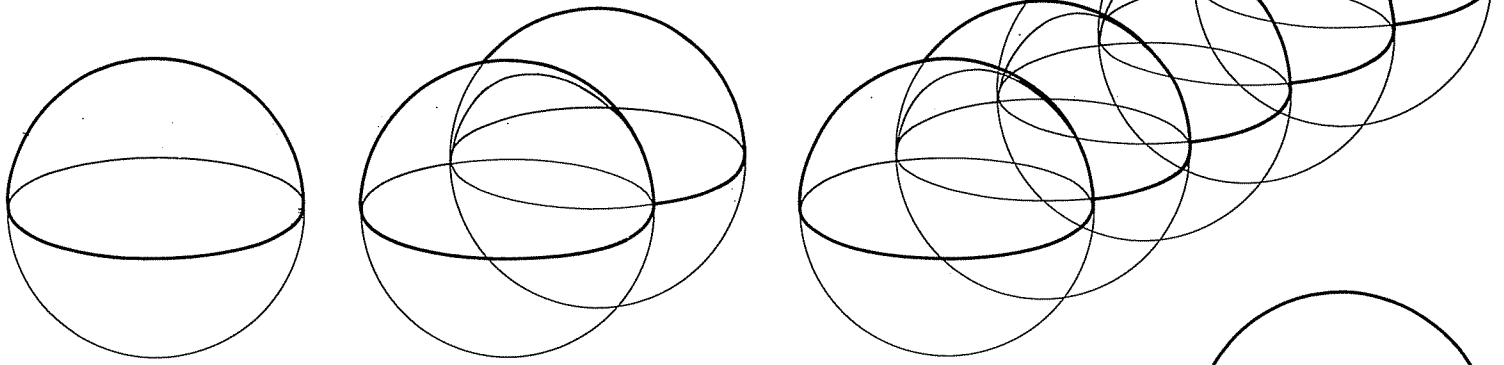
The membrane envelope (dead weight) is carried and stabilized by the air pressure differential between inside and outside:  
- AIR SUPPORTED STRUCTURE SYSTEMS -

Under the onset of additional loading, at first the envelope gives way and causes the locked-in air volume to become diminished and displaced. Thereby the pressure differential directed to the outside increases, while the shape (curvature) of the envelope is changing its figure

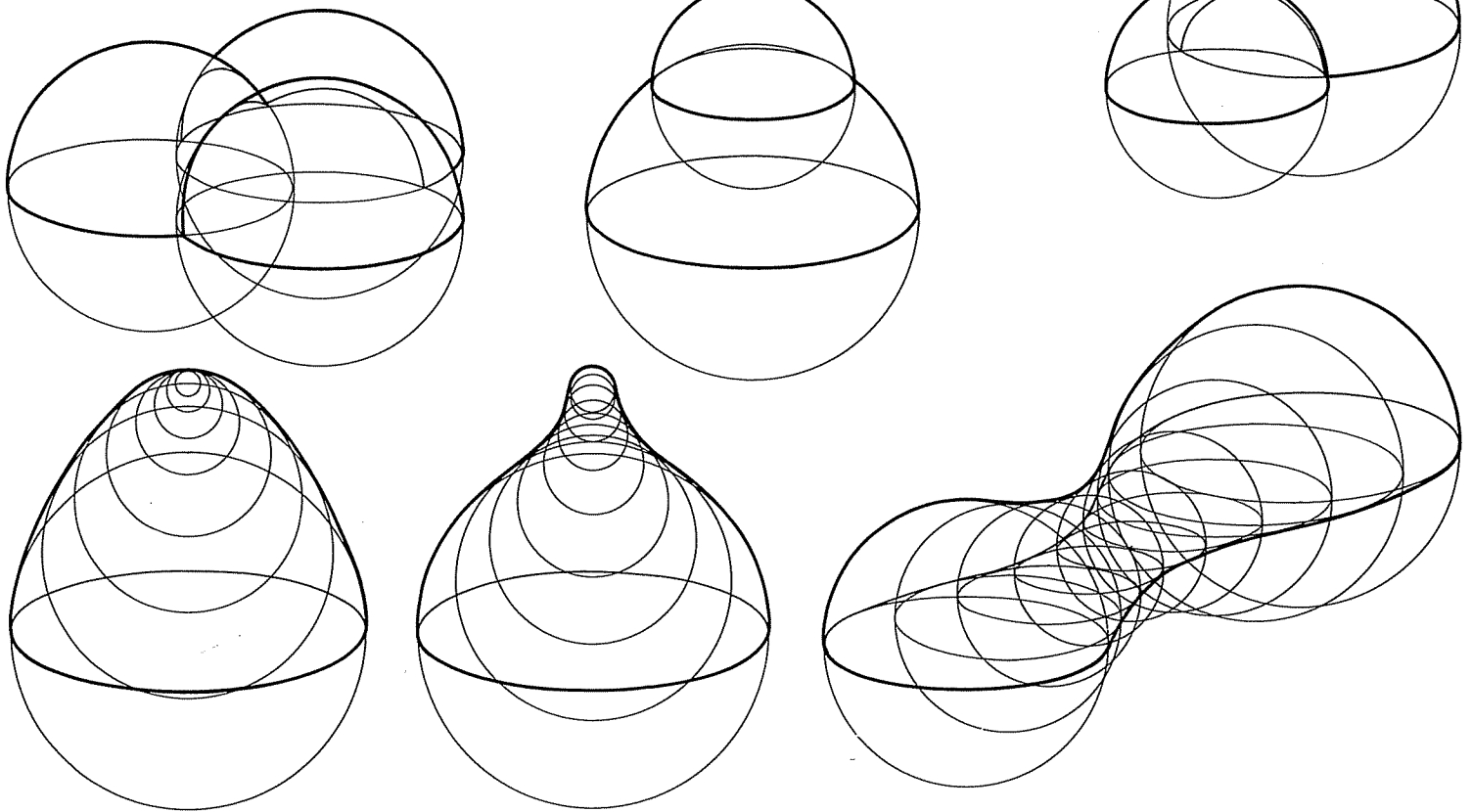
Both actions intensify the resistance against deformations. That is to say: Only through the deflection in process are forces being mobilized that will attain the state of equilibrium



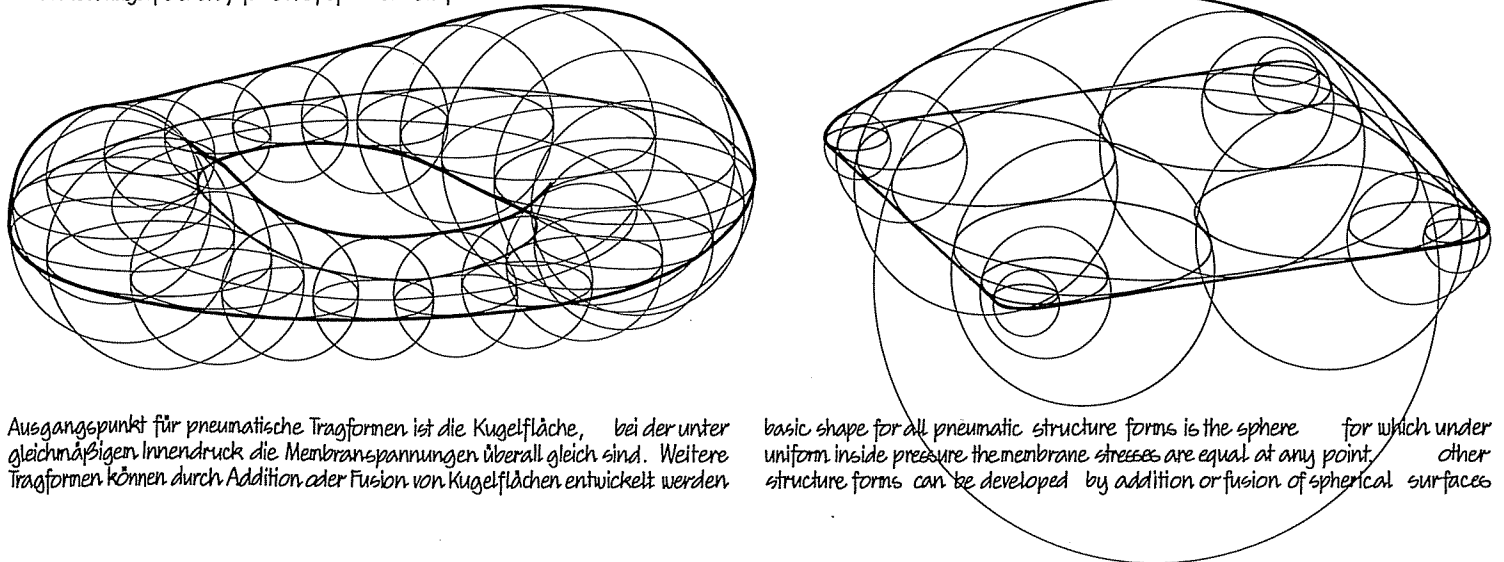
Geometrie der pneumatischen Tragformen / geometry of pneumatic structure forms



Addition von Kugelflächen / addition of spherical surfaces



Fusion von Kugelflächen / fusion of spherical surfaces

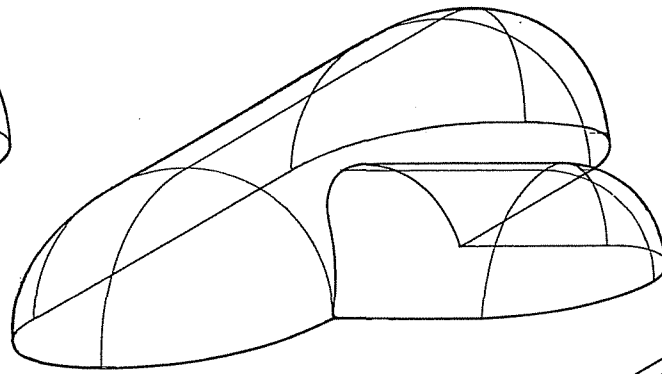
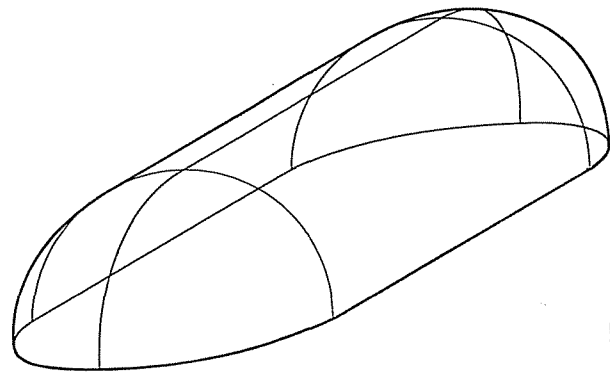


Ausgangspunkt für pneumatische Tragformen ist die Kugelfläche, bei der unter gleichmäßigen Innendruck die Membranspannungen überall gleich sind. Weitere Tragformen können durch Addition oder Fusion von Kugelflächen entwickelt werden.

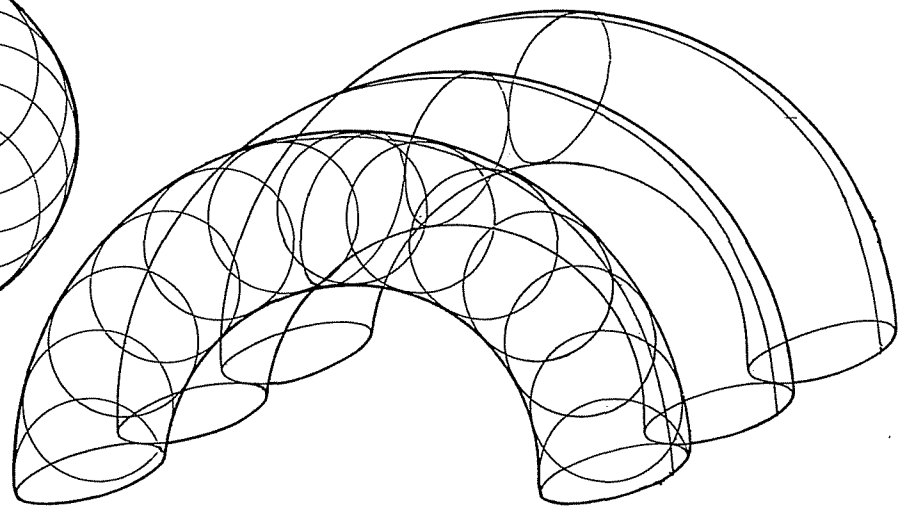
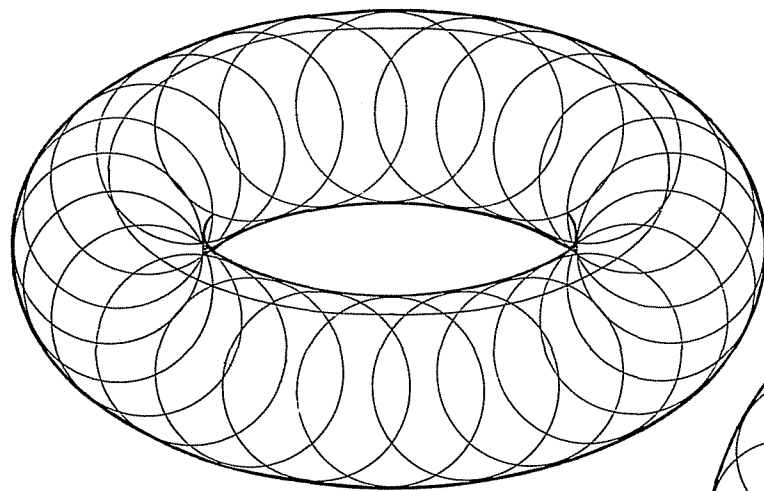
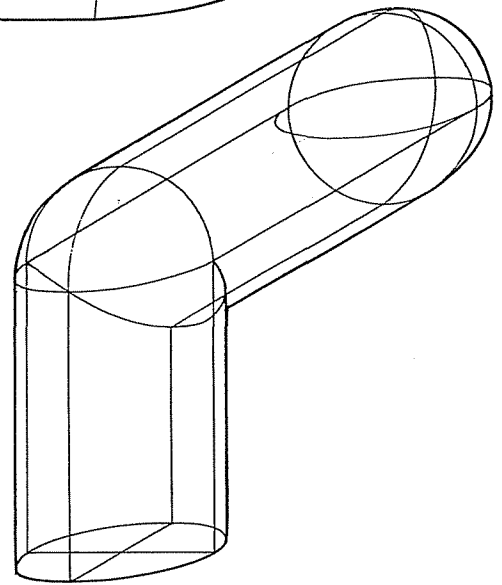
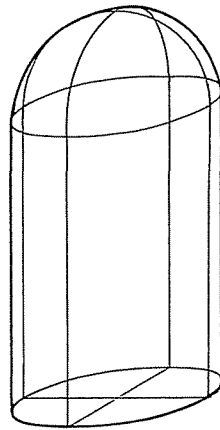
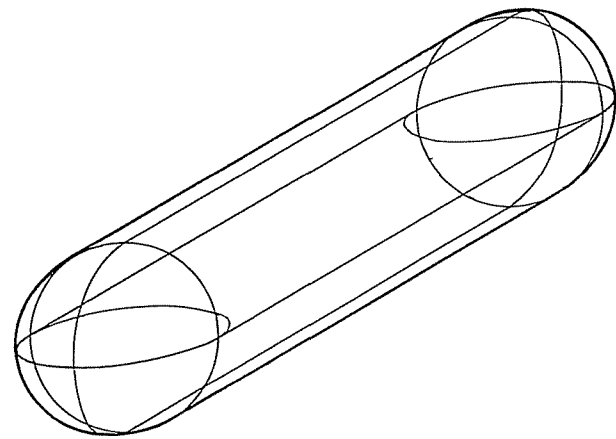
basic shape for all pneumatic structure forms is the sphere for which under uniform inside pressure the membrane stresses are equal at any point. other structure forms can be developed by addition or fusion of spherical surfaces

Prototypische Formen der pneumatischen Tragsysteme

Prototypical shapes of pneumatic structure systems



Kugelflächen mit Zylinderflächen / spherical and cylindrical surfaces



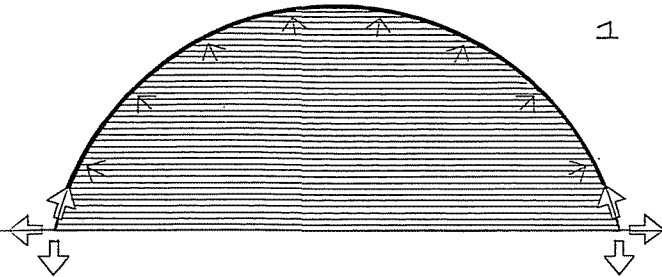
Kreisring-(Torus-) Flächen / toroidal surfaces

Da die Kugelfläche und ihre Addition oder Fusion hinsichtlich Herstellung und Grundrißgestaltung Nachteile aufweist, kommen aus Gründen der Vereinfachung (wenngleich nicht der Verbesserung der Tragmechanik) vornehmlich die Kombinationen von Kugelflächen mit Zylinderflächen, sowie die Torusflächen, als pneumatische Standardformen zur Anwendung.

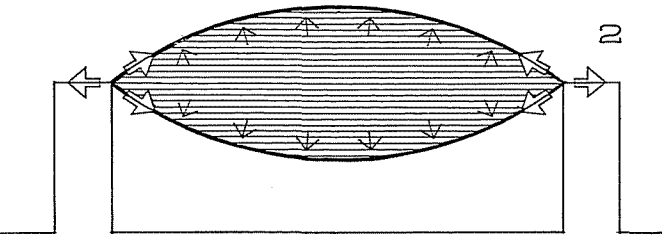
Since the spherical surface and its addition or fusion evidence drawbacks concerning production and plan configuration, for reasons of simplification (although not of improvement of mechanical efficiency) preferably the combinations of spherical with cylindrical surfaces as well as toroidal surfaces are applied as standard forms of pneumatic structures.

Grundsysteine der pneumatischen Tragwerke  
Überdruck-Systeme

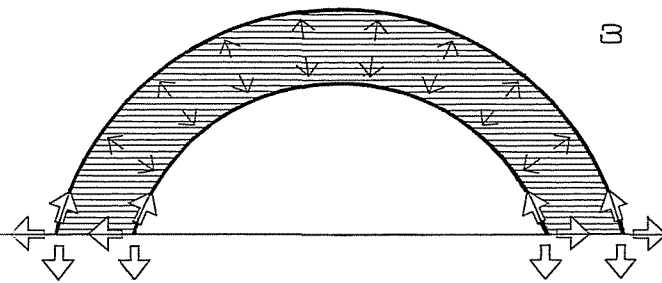
Basic systems of pneumatic structures  
Overpressure systems



1 Lufthalle / Innendruck-Systeme  
Der Luftüberdruck im ungeschlossenen Raum trägt die Raumhülle und stabilisiert sie gegen angreifende Kräfte. Der Überdruckraum ist gleichzeitig Nutzraum. Die Membrankräfte werden an den Rändern direkt abgegeben.  
Air supported hall / pressurized indoor systems  
The pressurized air in the locked-in volume supports the space envelope and stabilizes it against acting forces. The pressurized volume is the use space as well. The membrane forces are directly discharged at the boundaries.



2 Luftkissen / Doppelmembran-Systeme  
Der Luftüberdruck im Kissen dient nur zur Stabilisierung der Tragmembrane und bildet zusammen mit der oberen Membrane einen Dachkörper. Die Aufnahme der Membrankräfte an den Rändern erfordert eine Rückhaltekonstruktion.  
Air cushion / double membrane systems  
The pressurized air within the cushion serves only to stabilizing the bearing membrane and, together with the upper membrane, forms a roof structure. The forces at the membrane edges require for reception a restraining construction.



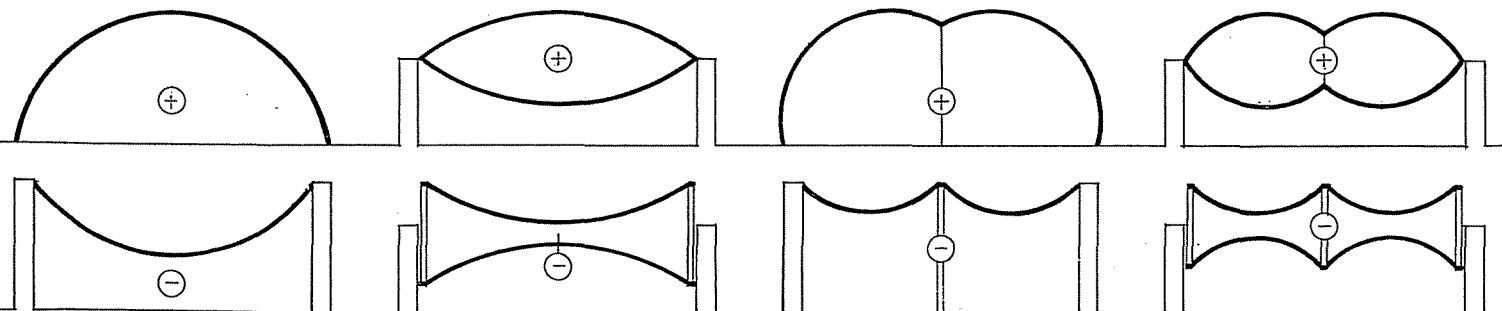
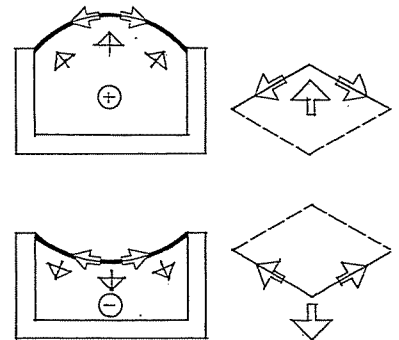
3 Luftschlauch / Lineare Hüllen-Systeme (Hochdruck-Systeme)  
Der Luftüberdruck stabilisiert die Schlauchform und bildet somit lineare Tragkörper für unterschiedliche Konstruktionen zum Überspannen von Räumen. Die Membrankräfte werden wie bei der Lufthalle an den Rändern direkt abgegeben.  
Air tube / linear envelope systems (high pressure systems)  
The pressurized air stabilizes the tube shape and thus forms linear structure members for diverse frameworks of spanning spaces. The membrane forces will be discharged directly at the edges much like the air supported halls.

Ausnahme: Unterdruck-Systeme

Die Praxis, von Prinzip der Luftüberdruck-Mechanik Tragsysteme auf der Grundlage von Luft-Unterdruck abzuleiten und als eigenständigen Tragwerk-Typ zu werten ist nicht einsichtig. Hier bleibt nämlich das KÖRPER-BILDENDE POTENTIAL 'Luft' ungenutzt und muß durch zusätzliche und vielfach aufwendige Stütz- bzw. Rahmenkonstruktionen ersetzt werden. Unterdruck-Systeme sind kein Tragwerktyp für sich sondern KONSTRUKTIONEN ZUR STABILISIERUNG von tragenden (Hänge-)Membranen

Exception: Under-pressure systems

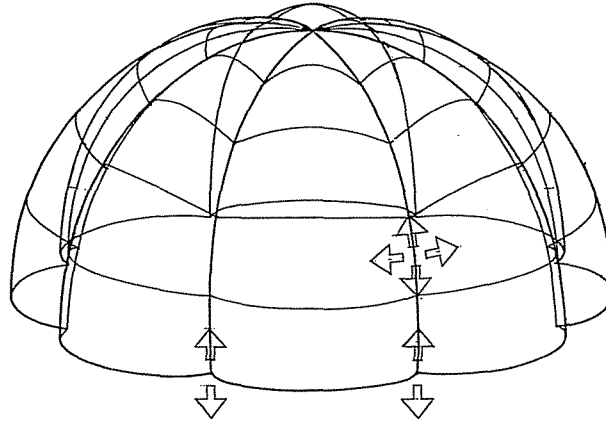
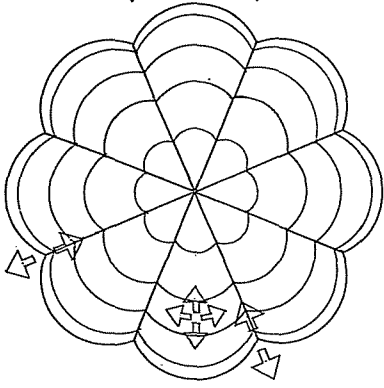
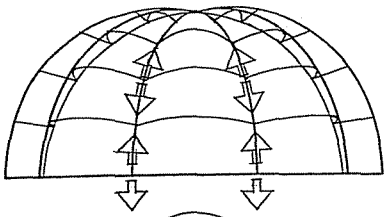
Deriving from the mechanical principle of positive air pressure also systems based on negative pressure and ranking them as a separate type of pneumatic structures is unfounded. For, the air's POTENTIAL OF MAKING UP SOLIDS cannot be activated and has to be replaced by additional, mostly laborious, supporting or framing constructions. Negative pressure systems are not a separate type of structures but DEVICES FOR STABILIZATION of load bearing (suspended) membranes.



Struktur-Gegenüberstellung: Überdruck- und Unterdruck-Systeme

Structure comparison: positive-pressure and negative pressure systems

Lufthallen- (Innendruck-) Systeme mit Hauptlastabtragung durch Seile  
 Air-supported (indoor) systems with major load transfer through cables

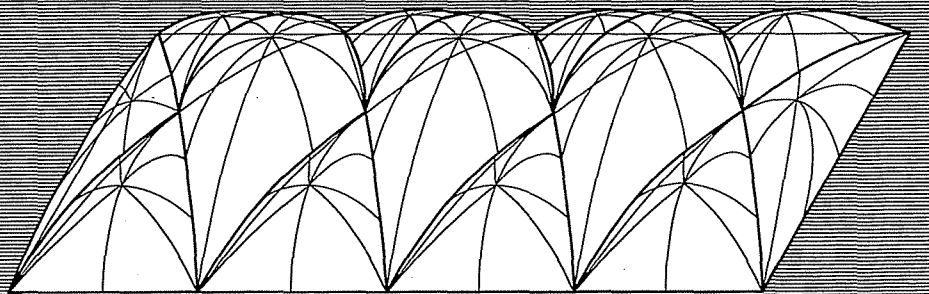
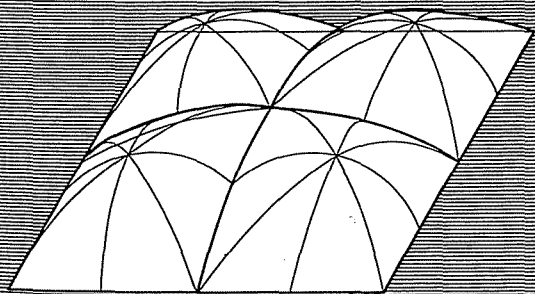
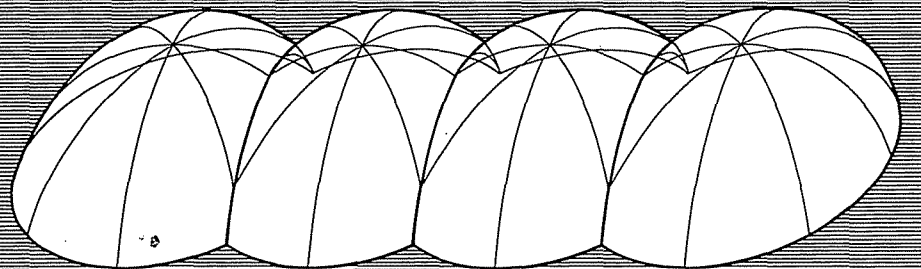
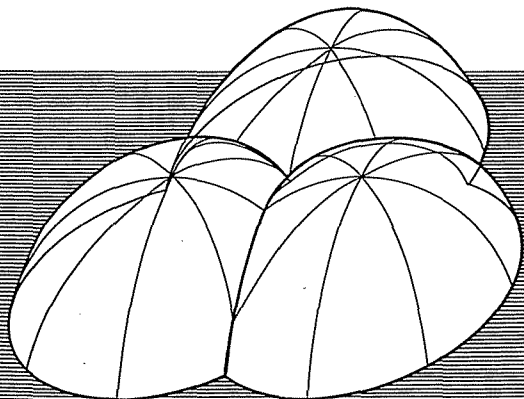
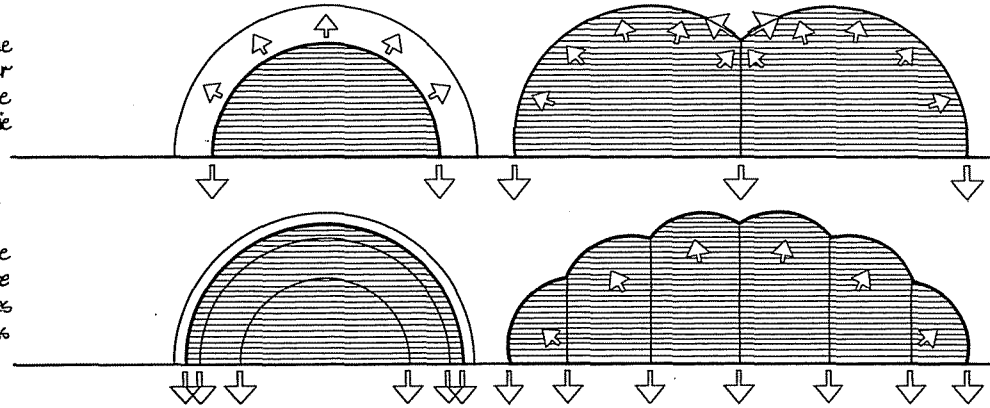


Die Form-Stabilisierung der Kugelhülle wird durch Einbeziehung von einzelnen Seilzügen und durch Ausgestaltung der Einzelsegmente mit Membranen größerer Krümmung stark verbessert; Auf diese Weise werden Lufthallen mit größten Spannweiten ermöglicht

The form stabilization of the sphere envelope will be markedly improved by introducing single cable strings and furnishing the segmental units with membranes of increased curvature. By this method, air-supported halls of largest spans can be made feasible

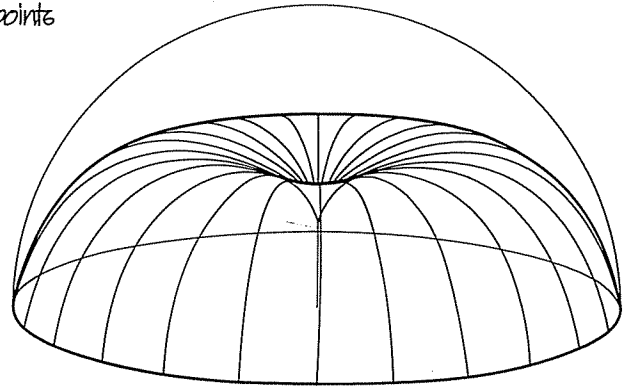
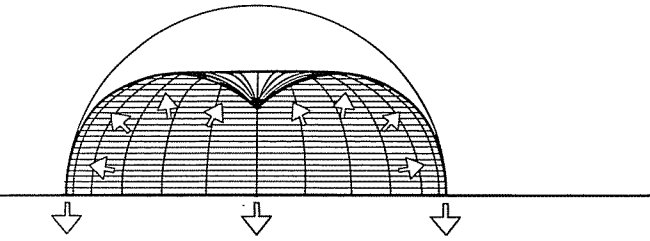
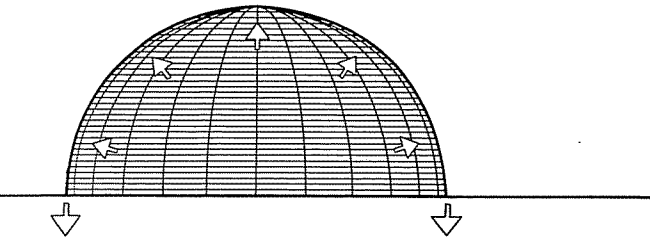
Durch Überspannen mit einzelnen Seilen kann Kuppelfläche in Teilflächen mit kleinerem Krümmungsradius und daher geringeren Membranspannungen aufgliedert werden. Die Seile tragen die Hauptkräfte ab, während die Membran die Funktion von Zwischenträgern ausübt

by means of spanning single cables the spherical surface can be divided into sections with smaller radius of curvature and therefore smaller membrane stresses. the cables transfer the major forces while the membrane functions as intermediate secondary structure

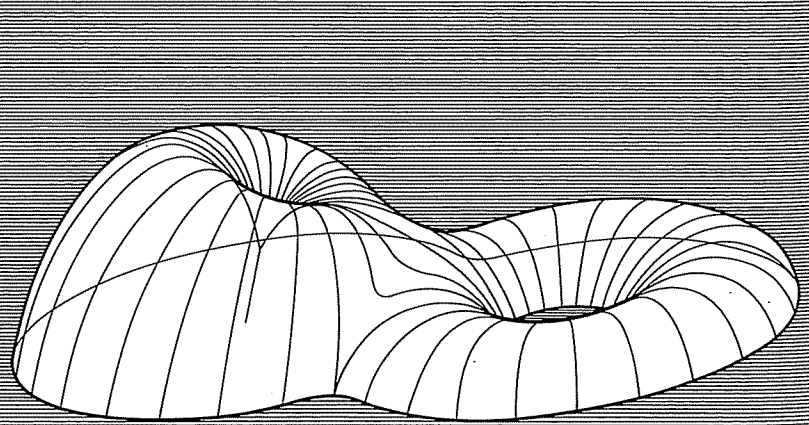
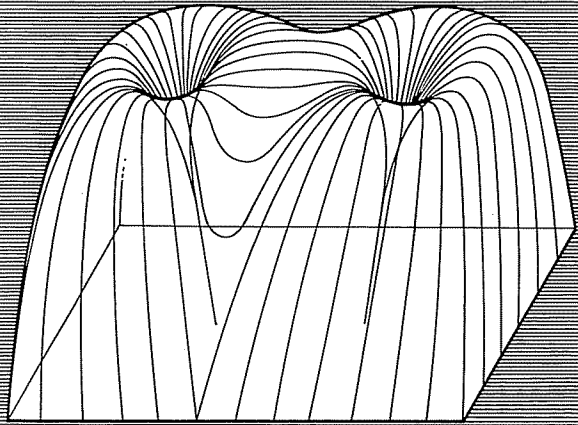
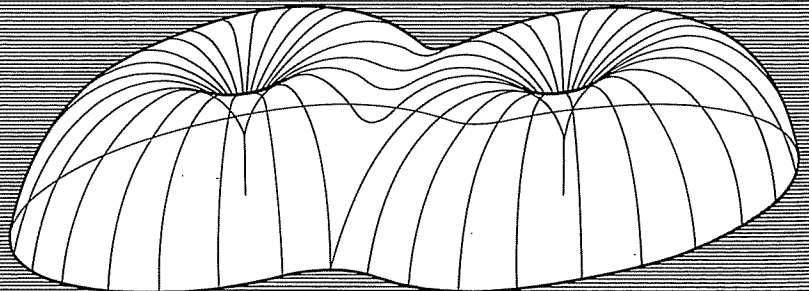
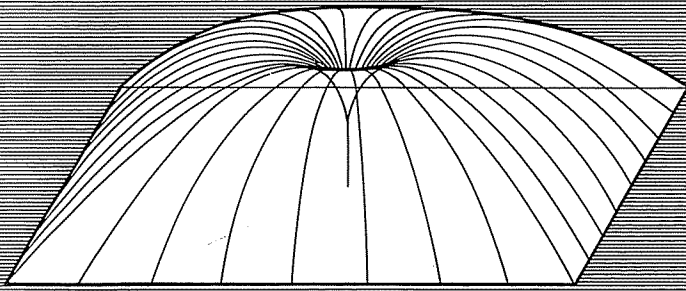


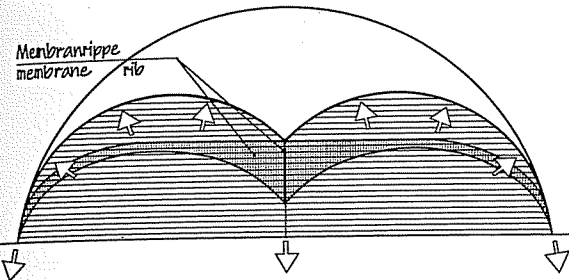


Innendruck-Systeme mit Tiefpunkten / inside pressure systems with interior anchor points



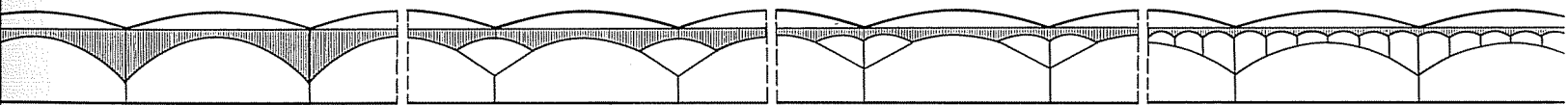
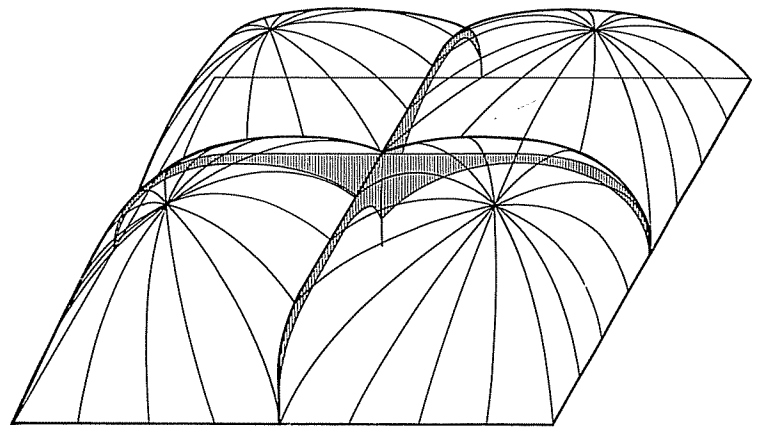
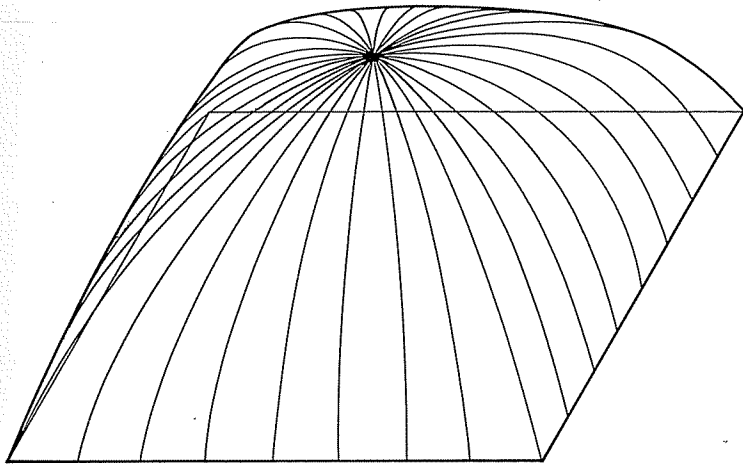
Durch Verankerung der Membrane nicht nur an Rande, sondern auch im mittleren Bereich werden der Krümmungsradius und damit auch die Membranspannungen reduziert. Dadurch ist die Überdeckung und Einschließung weiter Räume ohne größere Konstruktionshöhe möglich  
 through fastening the membrane not only along the edge but also in the central portion, the radius of curvature and thus also the membrane stresses are reduced. in this way the covering and enclosure of wide spaces is possible without increasing construction height



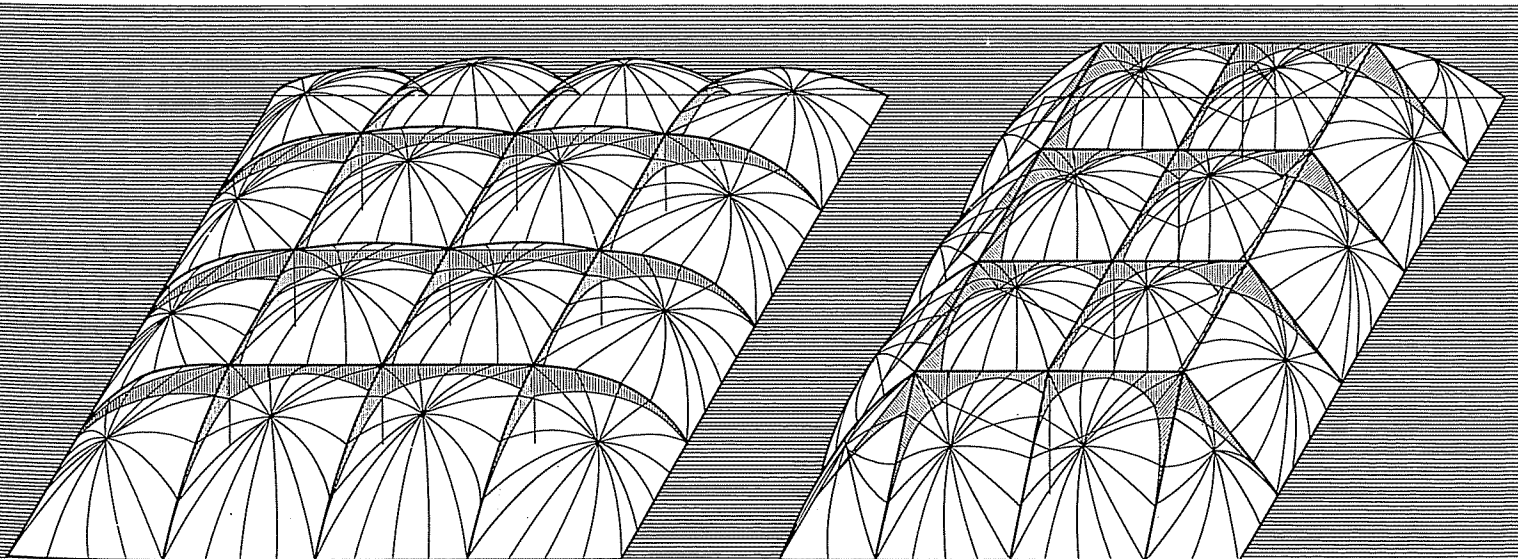


Pneumatische Innendruck-Systeme mit Hauptlastabtragung durch Membranrippen  
 pneumatic inside pressure systems with major load transfer through membrane ribs

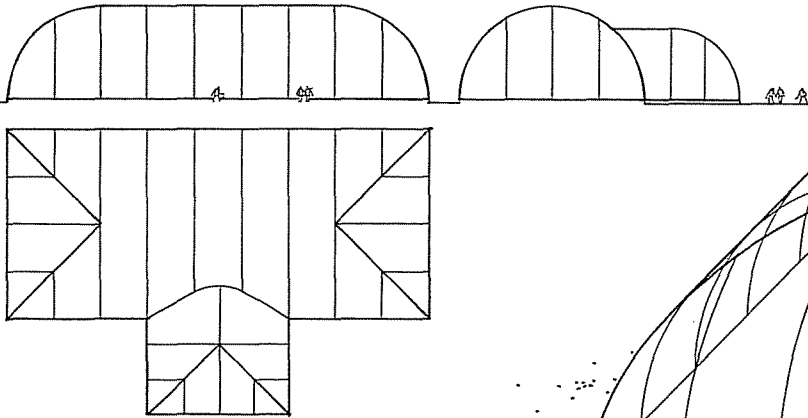
Anstelle von einzelnen Seilen kann Kuppelfläche auch durch senkrechte, nach unten abgespannte Membranflächen (Membranrippen) in kleinere Teilflächen mit geringeren Krümmungsradius und demzufolge geringeren Membranspannungen aufgeteilt werden. Da es auf diese Weise möglich ist, gerade Dachkehlen zu bilden, können sehr weite Räume überspannt werden.  
 not only by single cables but also by using vertical membranes (membrane ribs) and fastening them to the ground. the spherical surface can be subdivided into smaller sections with smaller radius of curvature and therefore smaller membrane stresses. since it is possible by this way to form straight roof valleys, wide floor areas can be spanned



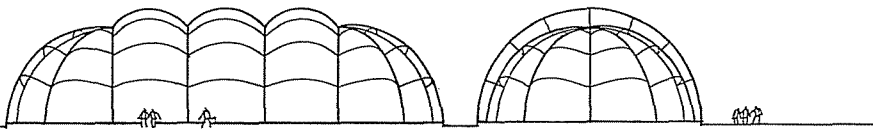
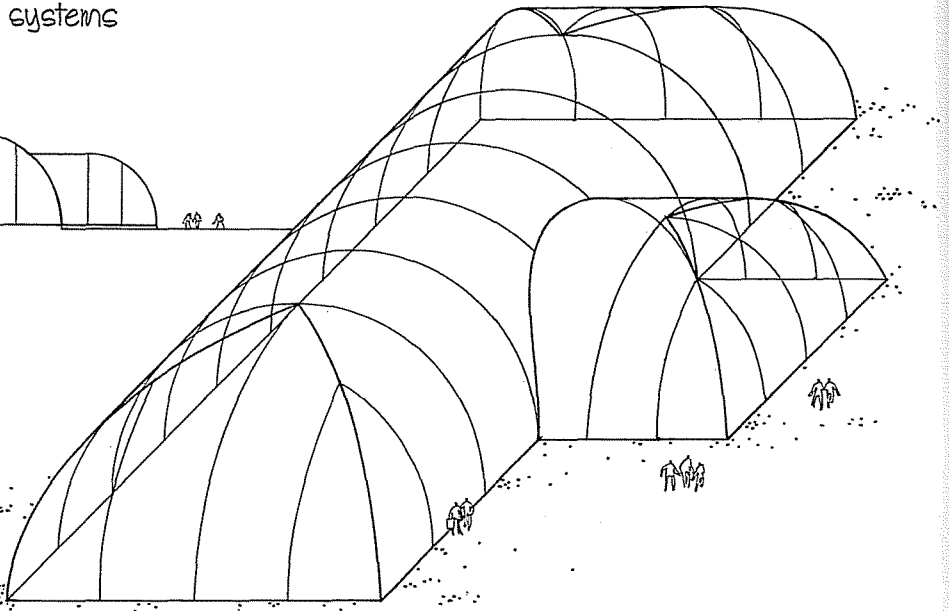
Ausbildung der Membranrippen/ design of membrane ribs



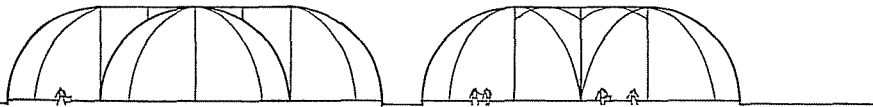
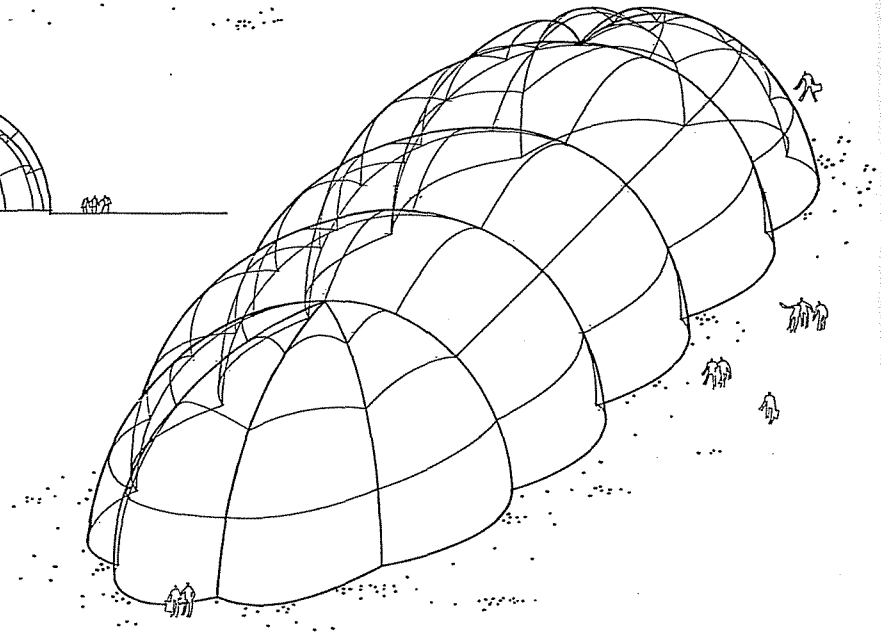
## Lufthallen-Systeme / Air controlled indoor systems



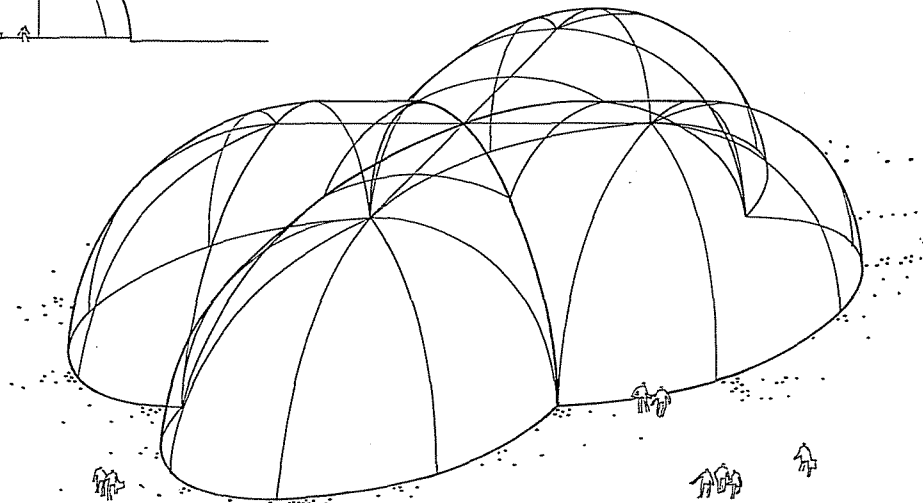
Zylindrische Membranen als primäre Tragelemente  
Cylindrical membranes as primary structural elements



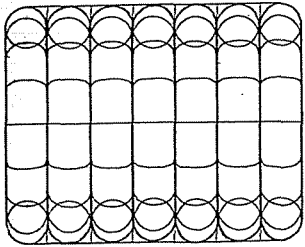
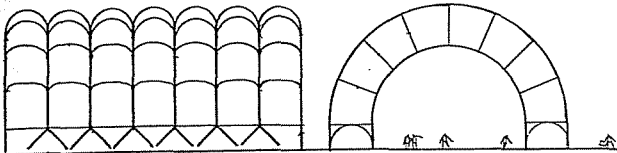
Torusmembranen zwischen gereihten Seilabspannungen  
Torus membranes between load cables in row formation



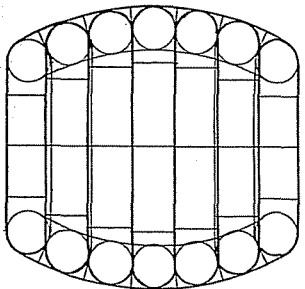
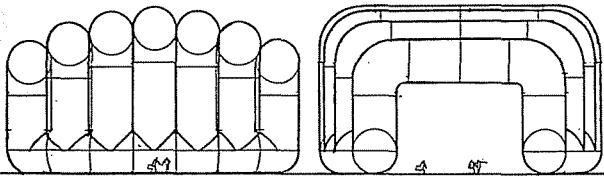
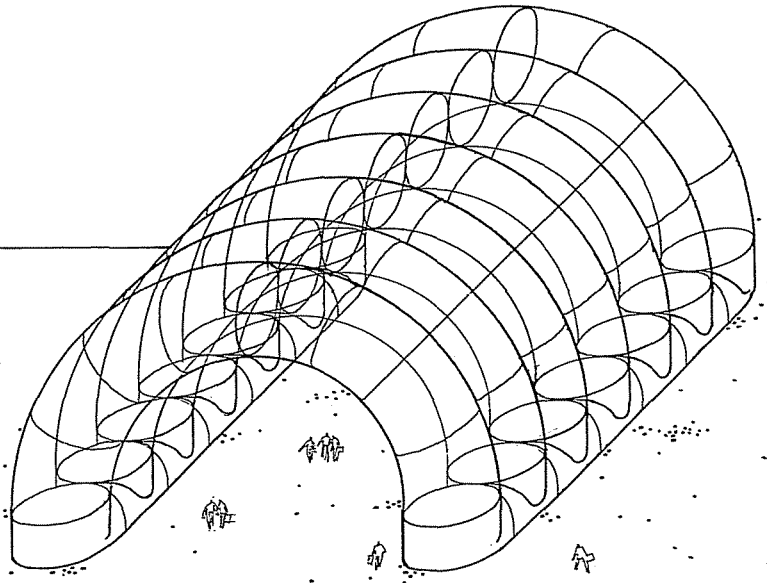
Gekreuzte zylindrische und sphärische Membranen  
Crossed cylindrical and spherical membranes



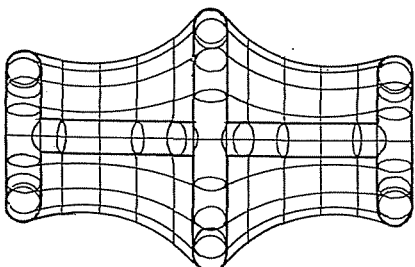
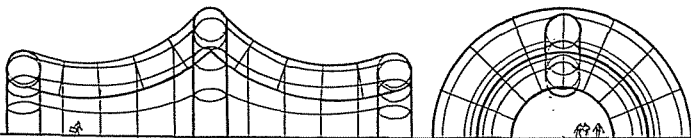
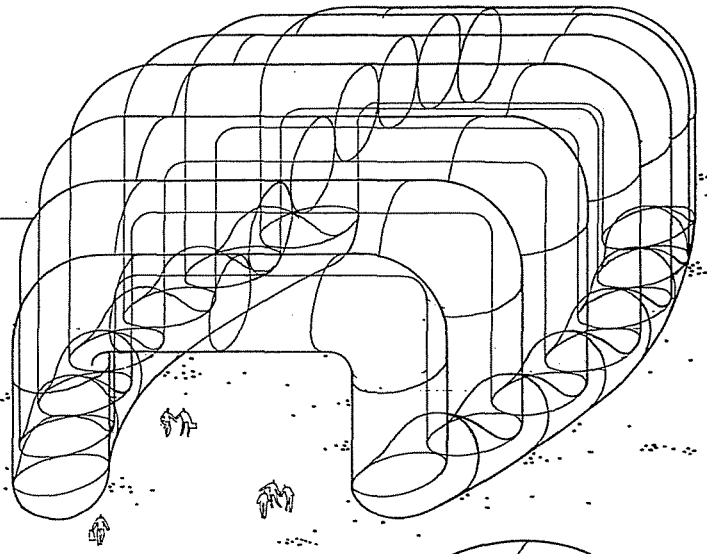
Luftschlauch-Systeme / Air tube systems



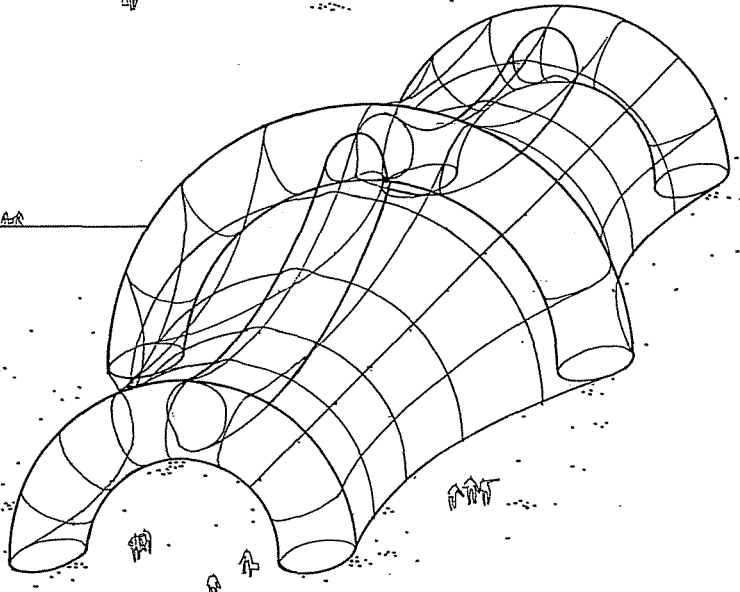
Gereimte Schlauchbögen aufgesetz auf gerader Halbschlauch-Basis  
Tube arches in row formation placed upon straight semi-tube basis



Gereimte Schlauchrahmen aufgesetz auf gekrümmter Schlauch-Basis  
Tube frames in row formation placed upon curved tube basis



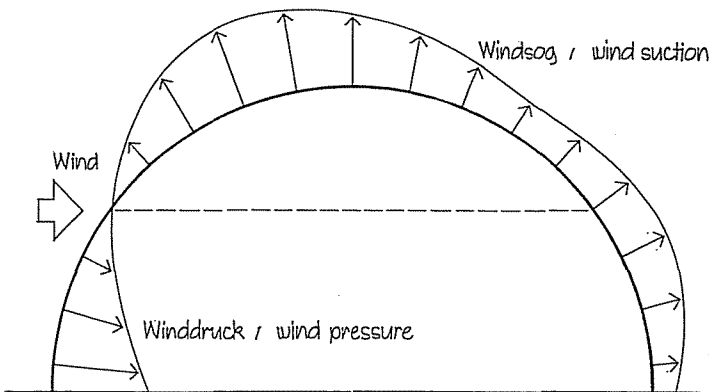
Gekrümmtes Schlauchskelett mit Seilnetz- oder Membran-Raumabschluss  
Curved tube skeleton with cable net or membrane as space enclosure



Entwicklung der seilnetz-verspannten Flachkuppel-Lufthalle aus Standardsystem der luftgestützten Hallen

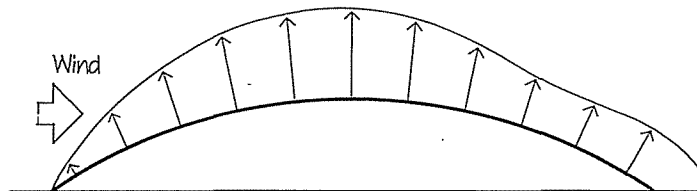
Development of cable-restrained low-profile air halls from standard system of air-supported halls

Windbelastung der Halbkreis-Kuppel  
Zusätzlicher Luftinnendruck erforderlich zur Stabilisierung der Membrane gegen Wind-DRUCKkräfte



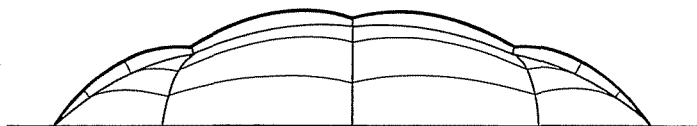
Wind loading on semispherical dome  
Additional indoor air pressure necessary for stabilization of membrane against COMPRESSIVE wind forces

Profil-Reduzierung zum Flachsegment  
Membrane nur von Wind-SOG belastet; jedoch wegen reduzierter Membran-Krümmung zusätzlicher Innen-Überdruck zur Stabilisierung der Membrane erforderlich



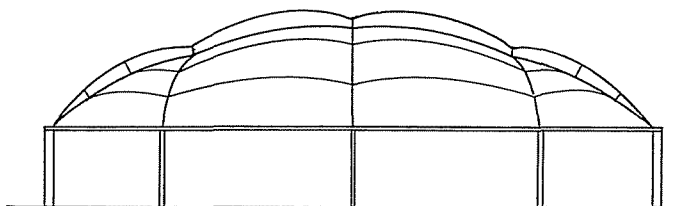
Profile reduction for low-rise segment  
Membrane being stressed only by wind SUCTION; but additional indoor-over-pressure necessary for stabilization of membrane due to reduced curvature

Haupt-Lastabtragung durch Seile  
Membran-Entlastung durch Seilabspannung / wirksamere Stabilisierung durch erhöhte Membran-Krümmung



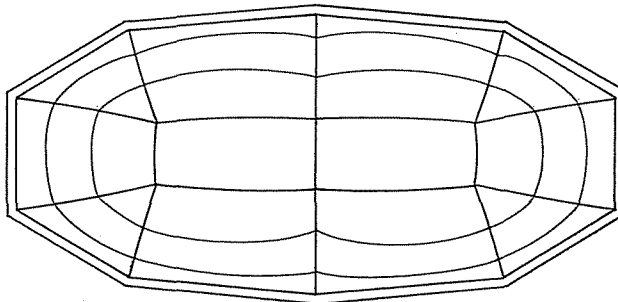
Major load transfer through cables  
Unloading of membrane through restraining cables / improved stabilization due to smaller radius of membrane curvature

Aufständigung der Flachkuppel  
Erweiterung des Innen-Lufttraumes durch Aufständigung der Verankerungsebene ( anstelle der Erdverankerung wie bei der Standard-Lufthalle )



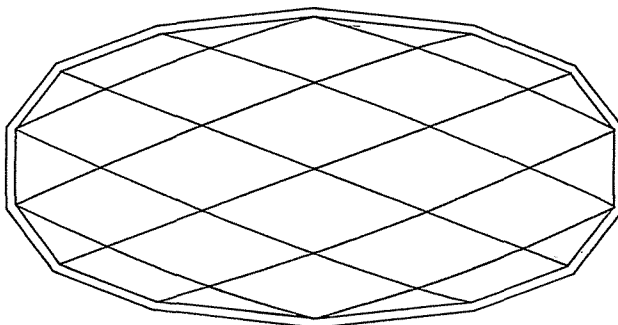
Stilting of low-rise dome  
Enlargement of indoor air space through setting the plane of anchorage upon stilts ( instead of leaving it on level ground as with the standard air-supported hall )

Formgebung des Ringträgers  
Funiculare Formgebung des Ringträgers (= horizontaler Stützboogen) entsprechend den Seilkräften zwecks Reduzierung der Biegespannungen



Configuration of ring girder  
Funicular delineation of the ring girder (= horizontal funicular arch) according to the cable forces for the reduction of bending stresses

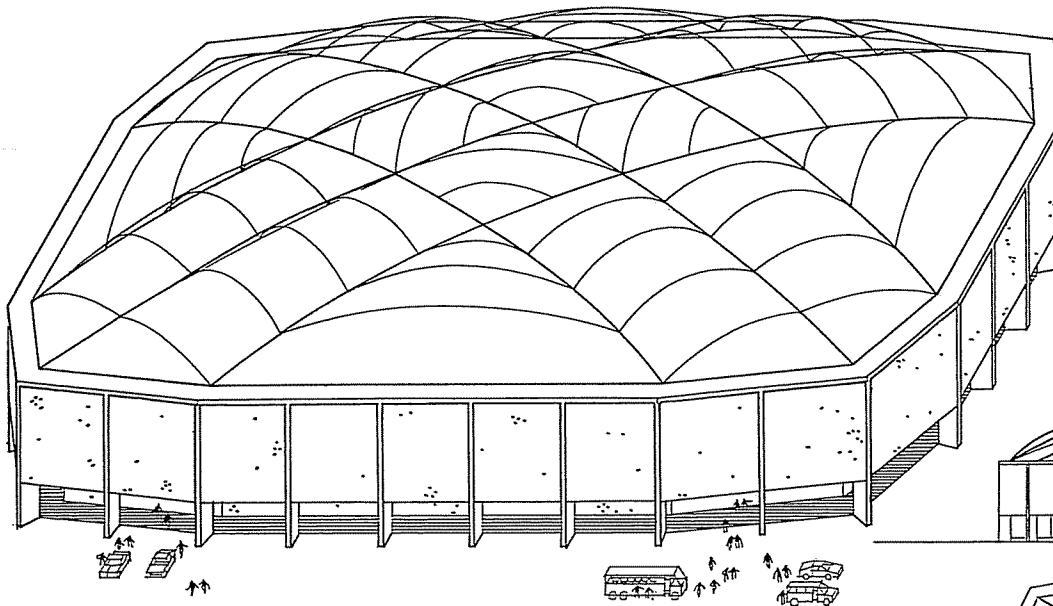
Abspann-Verdichtung durch Seilnetze  
Stabilisierungszuwachs infolge Verbund-Aktion des Seilnetzes, bei gleichzeitiger Verkleinerung mit modularer Gliederung der Membran-Segmente



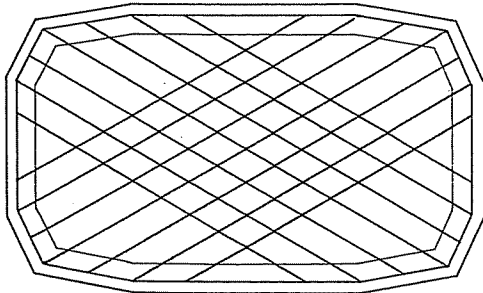
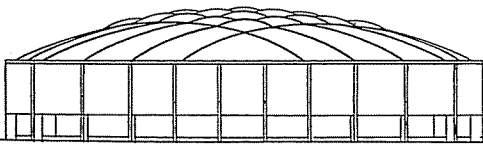
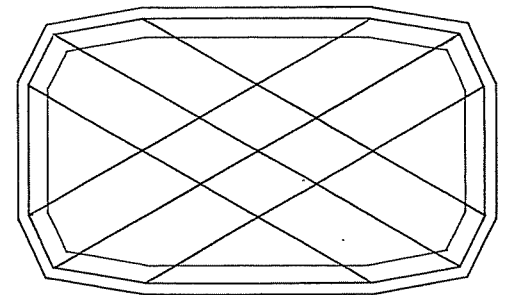
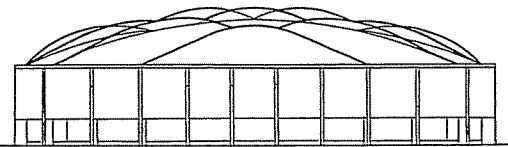
Restraining extension by cable networks  
Increase in stabilization owing to co-active behaviour of cable net; together with size reduction of, and modular subdivision in, membrane segments

Seil-verspannte Flachkuppel-Großlufthallen

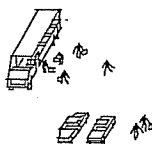
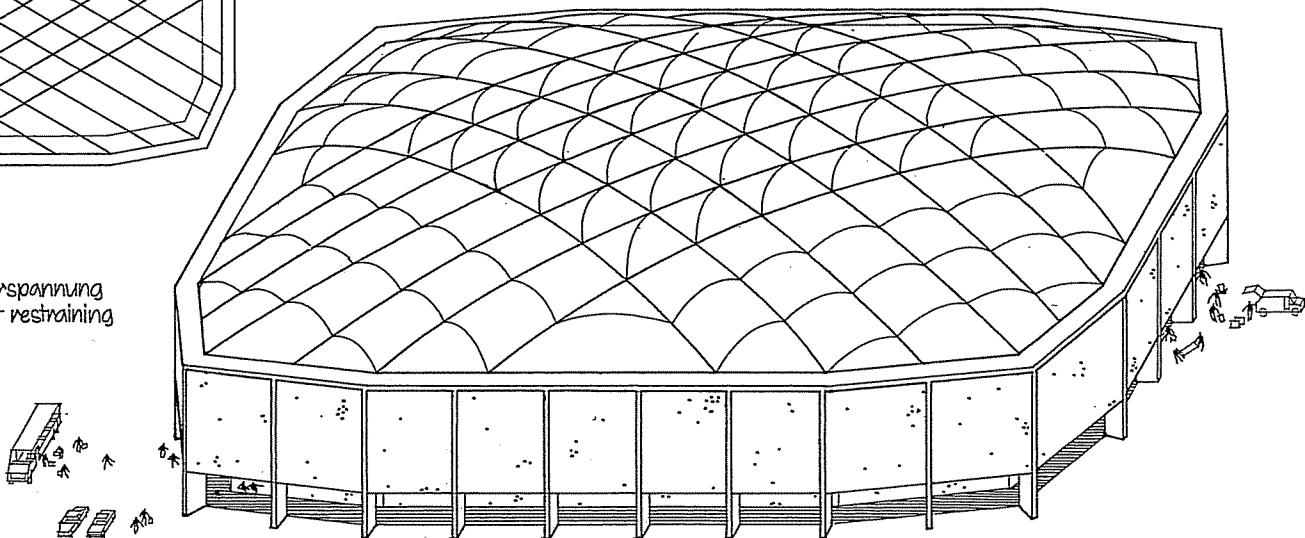
Cable-restrained low-profile air super-halls



Membrane mit Einzelseil-Abspannung  
Membrane with single-cable restraining



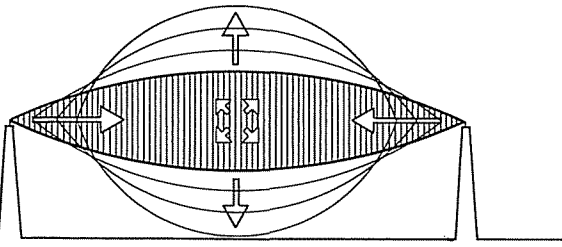
Membrane mit Seilnetz-Verspannung  
Membrane with cable net restraining



Rückhalte-Systeme der Luftkissen

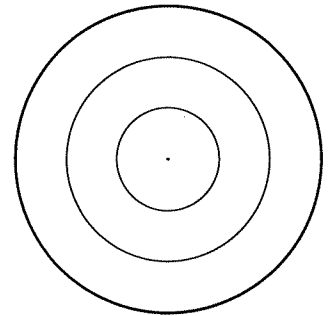
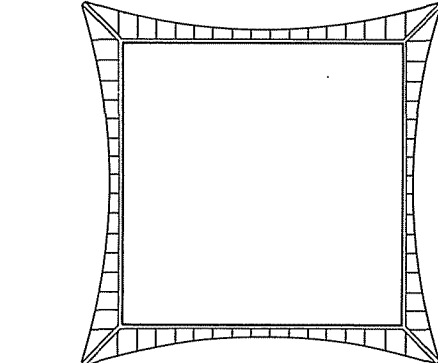
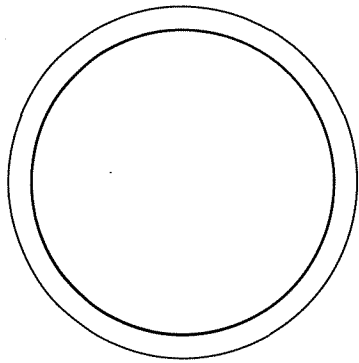
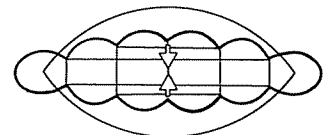
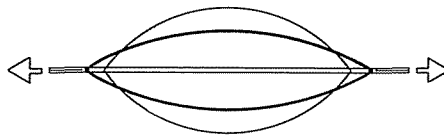
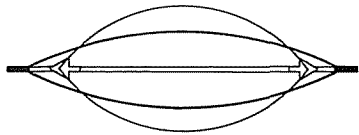
restraining systems of air cushions

Durch unteren Abschluß des Überdruck-Raumes mit zweiter Membrane (statt Einbeziehung des Fußbodens) können Räume überspannt werden, die nach außen offen sind. Voraussetzung für die Tragmechanik ist, daß kugelförmiges Aufbauchen der Mitte infolge Innendruck verhindert wird  
 through closing the pressurized air space with another membrane underneath (instead of incorporating the floor) spaces can be spanned that are open to the outside. prerequisite to the bearing mechanism is that the membrane is kept from bulging in its middle toward a spherical shape



Rückhalte-Systeme der Luftkissen

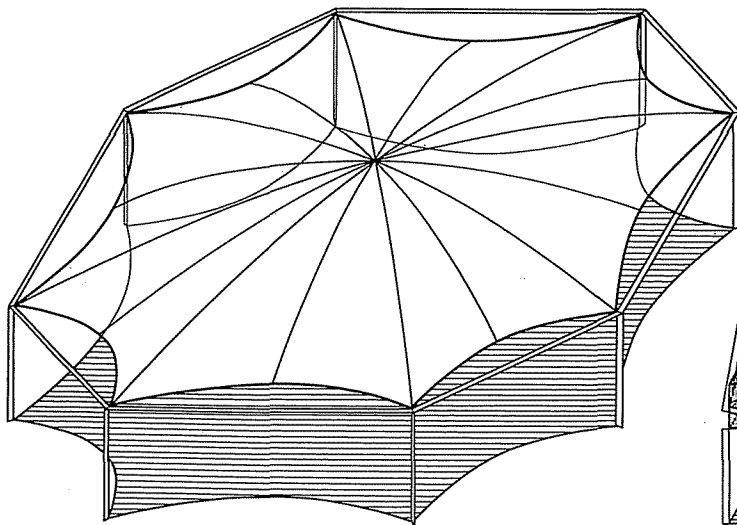
restraining systems of air cushions



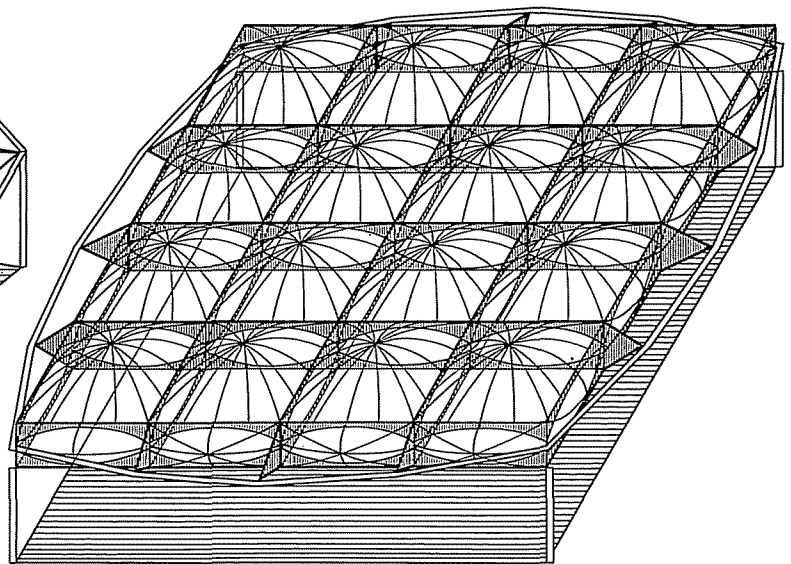
Randbefestigung mit Druckring  
 edge control with compression ring

Randbefestigung mit Druckstab und Tragseil  
 edge control with compression members and suspension cables

Höhenkontrolle durch innere Seile oder Rippen  
 height control with inside cables or ribs

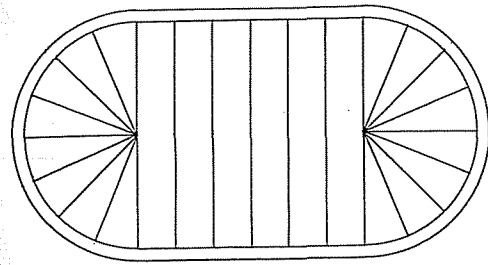
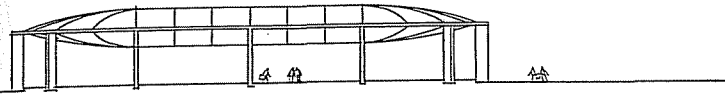


Einkammersystem mit Druckstabring als Rückhalte-mechanismus  
 single chamber system with polygonal compression ring

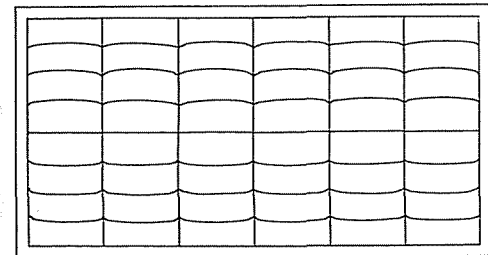
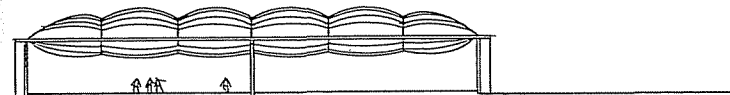
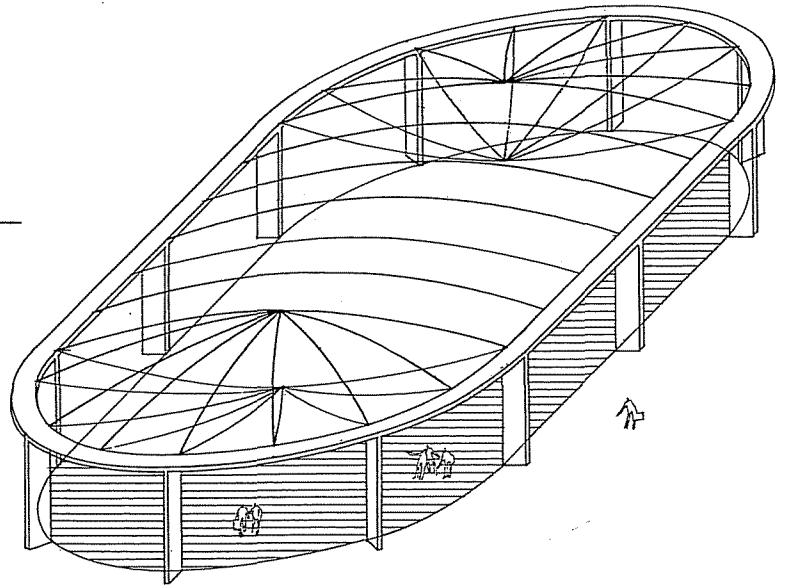


Mehr-kammersystem mit Membranrippen und Druckbögen als Rückhalte-mechanismus  
 multi-chamber system with membrane ribs and arches as restraining mechanism

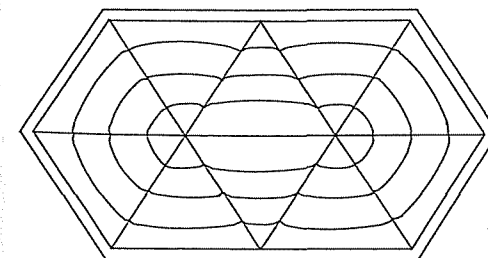
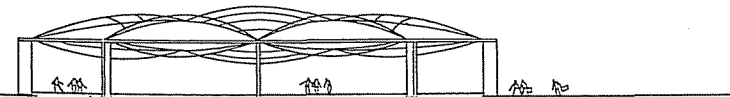
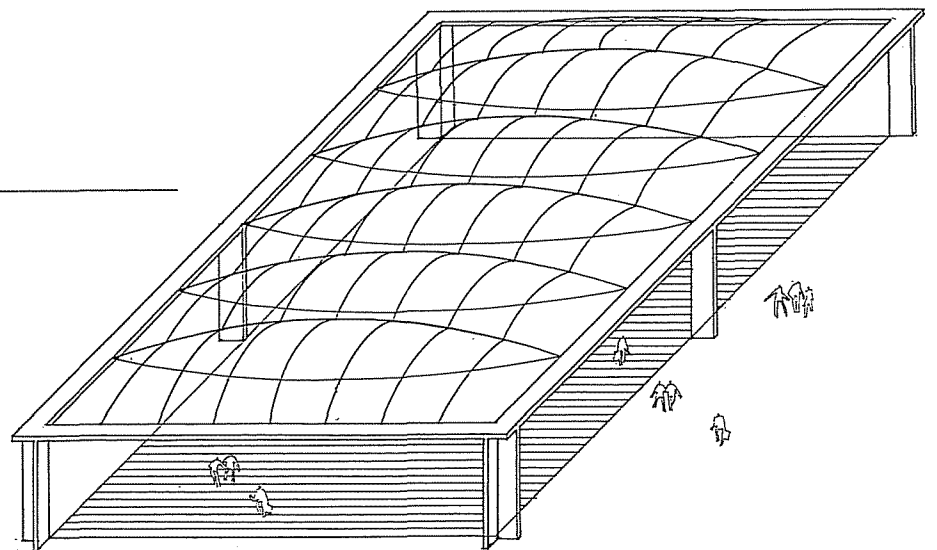
Luftkissen-Systeme / Air cushion systems



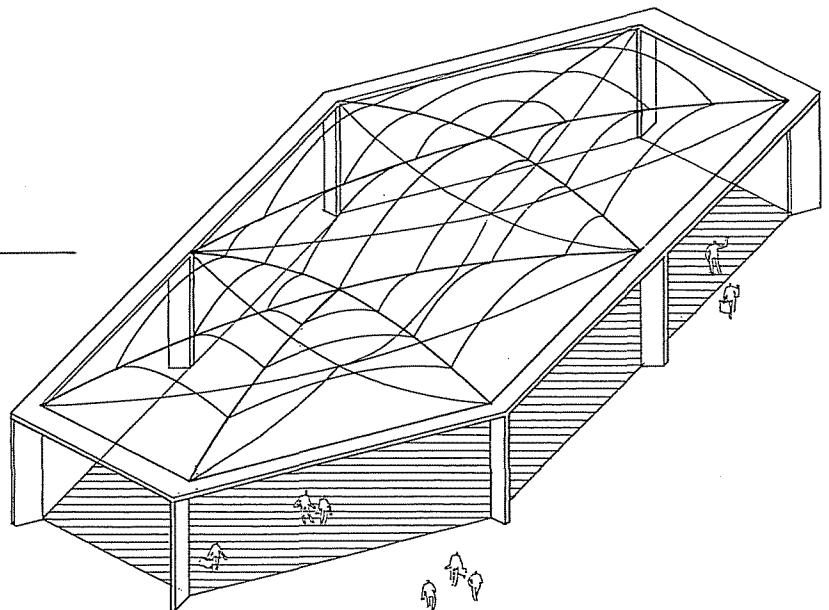
Kugel- und Zylindermembranen als primäre Tragelemente  
Spherical and cylindrical membranes as primary structure elements



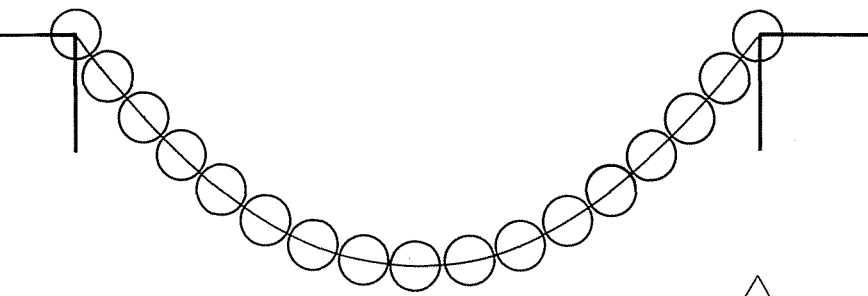
Membranen zwischen gereihten Seilabspannungen  
Membranes between load cables in row formation



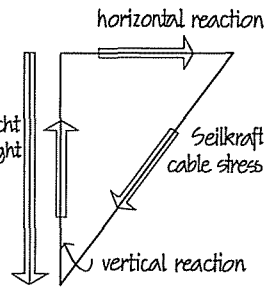
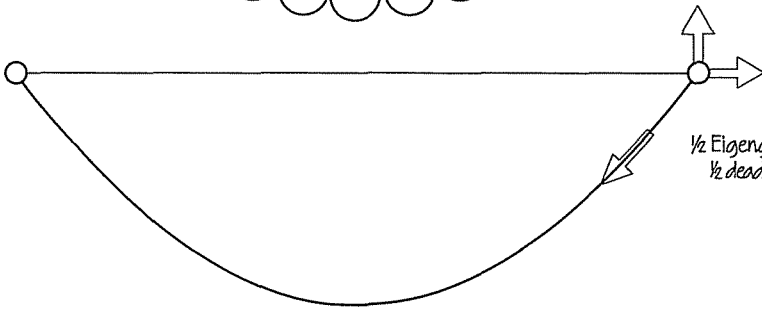
Membran-Segmente zwischen schräg gekreuzten Seilabspannungen  
Membrane segments between load cables in skew grid pattern





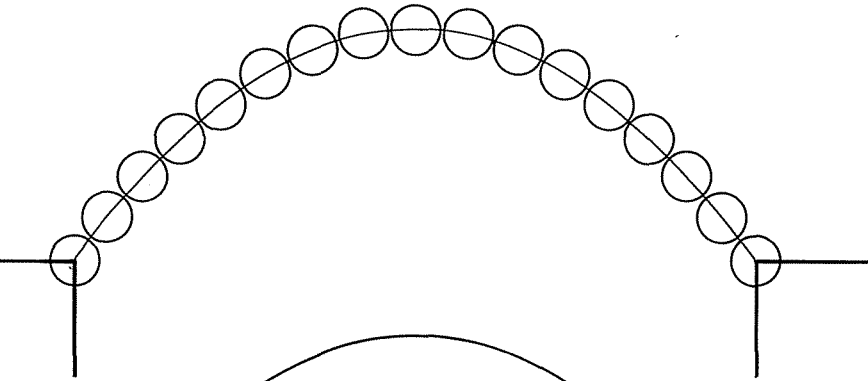


Tragseil und Stützbogen: suspension cable and arch  
Tragwerk-Mechanismus: Spannung mechanism

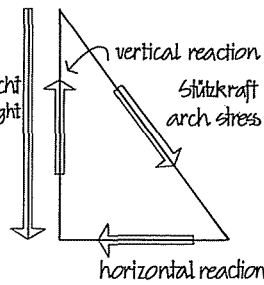
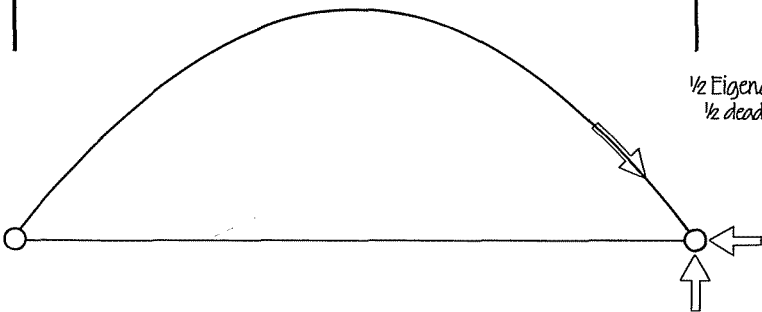


Tragseil suspension cable

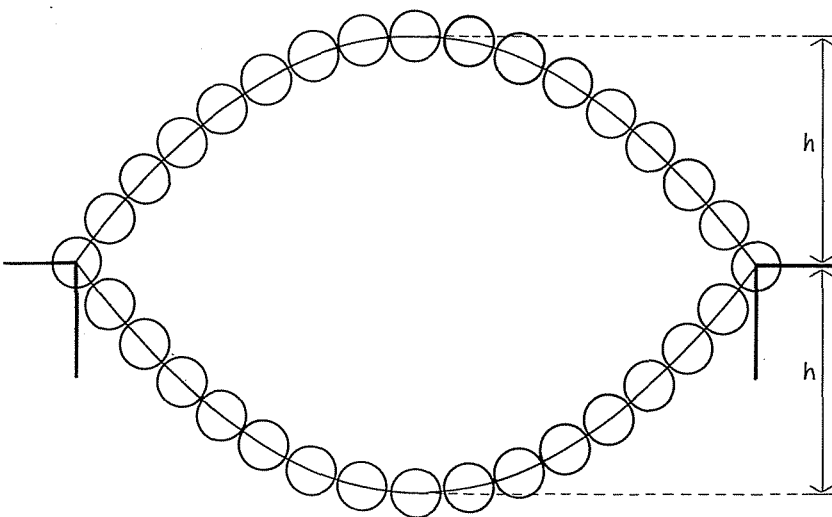
Das Tragseil kann nur Zugkräfte aufnehmen. Unter Eigengewicht nimmt es die Gestalt einer Kettenlinie an.  
the suspension cable is able to develop only tensile stresses. under its own weight it assumes the shape of a catenary



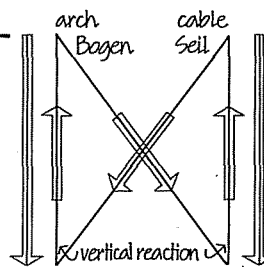
Stützbogen funicular arch



Das umgekehrte "Tragseil" nimmt nur Druckkräfte auf und zwar von der gleichen Größe wie die Zugkräfte im Tragseil. Die Stützlinie eines Bogens unter Eigengewicht ist daher eine umgekehrte Kettenlinie.  
the "cable" turned upside down develops only compressive stresses of the same magnitude as the tensile stresses in the cable. the funicular shape for an arch under its own weight thus is an inverted catenary

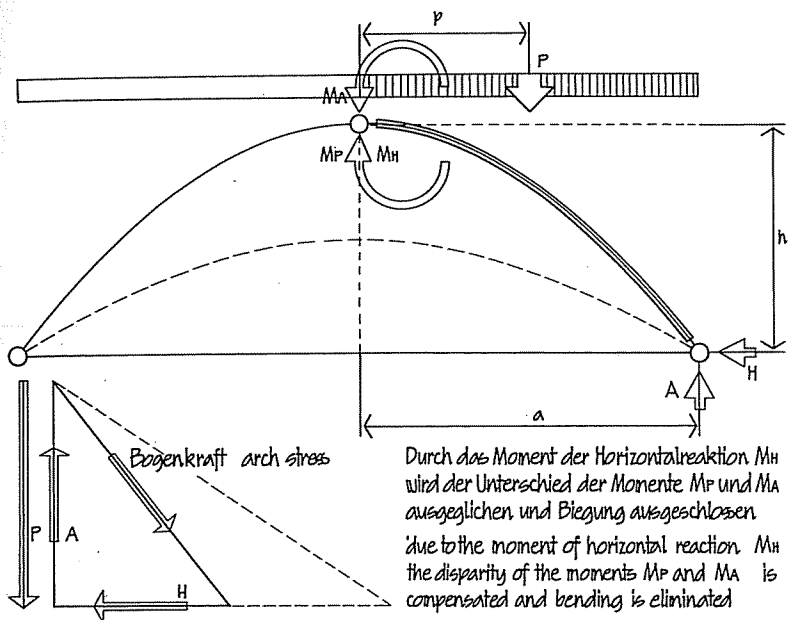


Stützbogen/Tragseil -Verbindung arch/suspension cable combination

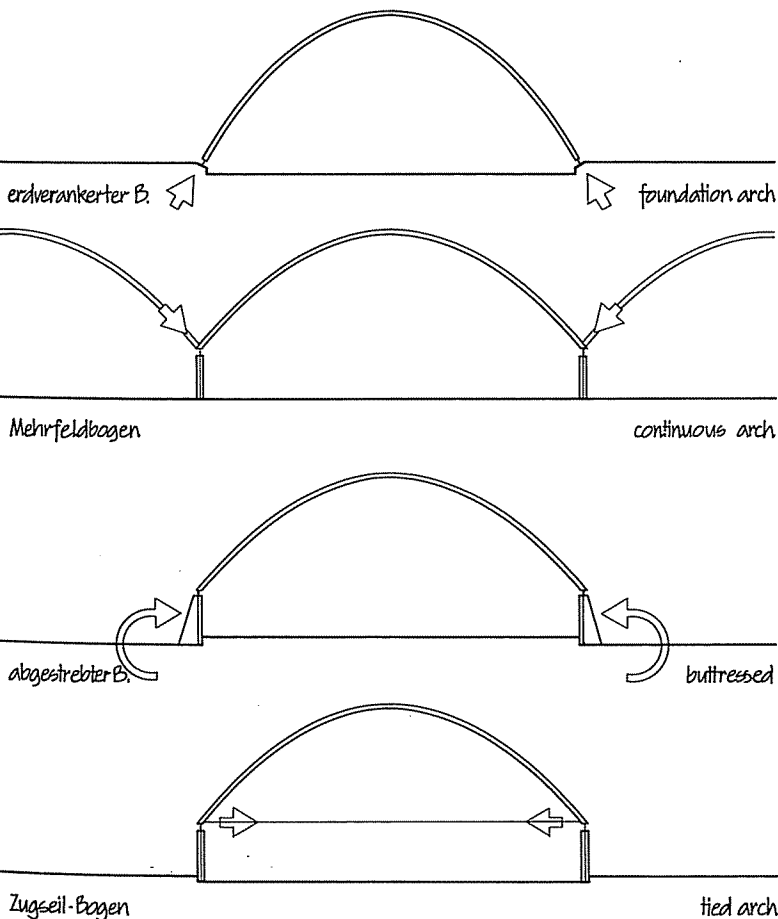


Die Verbindung von Tragseil und Stützbogen löst keine horizontale Reaktion aus, da die horizontalen Komponenten beider entgegengesetzt sind und einander aufheben.  
the combination of suspension cable and arch will not produce any horizontal reaction since the horizontal components of both have opposite direction and nullify each other

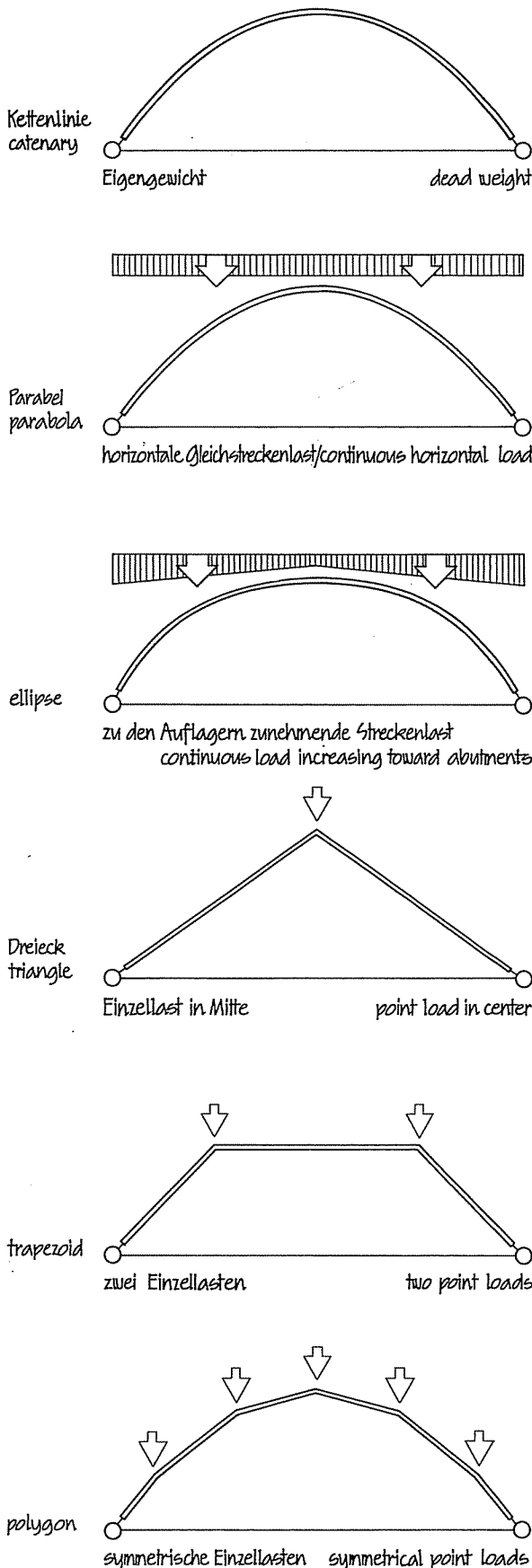
Hebelmechanismus des Stützbogens lever mechanism of funicular arch



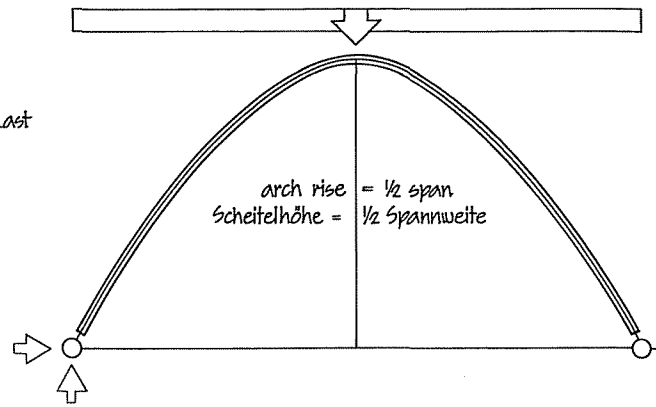
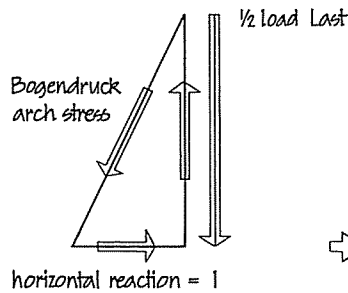
Bogensysteme gekennzeichnet durch Art der Horizontalschub-Aufnahme arch systems characterized by method of horizontal thrust resistance



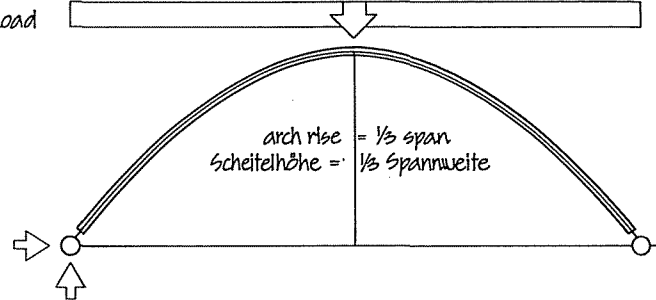
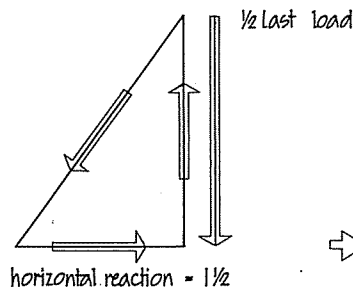
Geometrische Formen geometrical forms  
 in Abhängigkeit von Belastungszustand / dependance on load condition



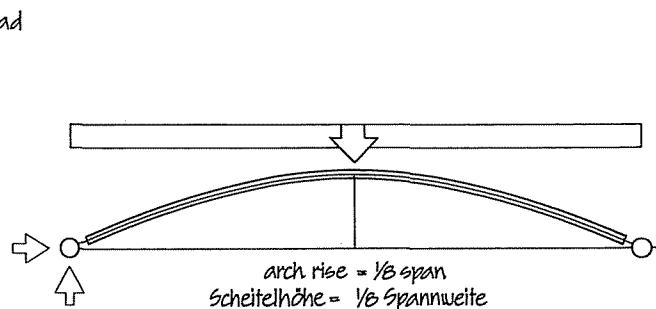
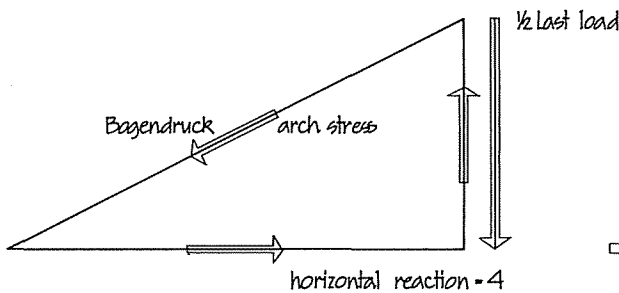
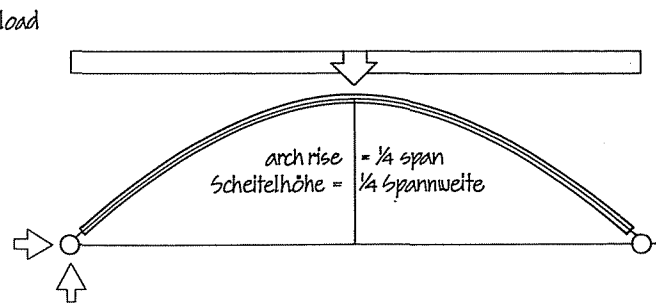
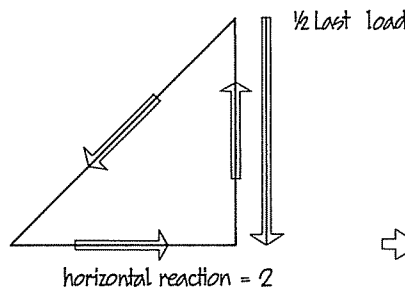
Einfluß der Scheitelhöhe auf die Auflagerkräfte  
influence of arch rise on hinge stresses



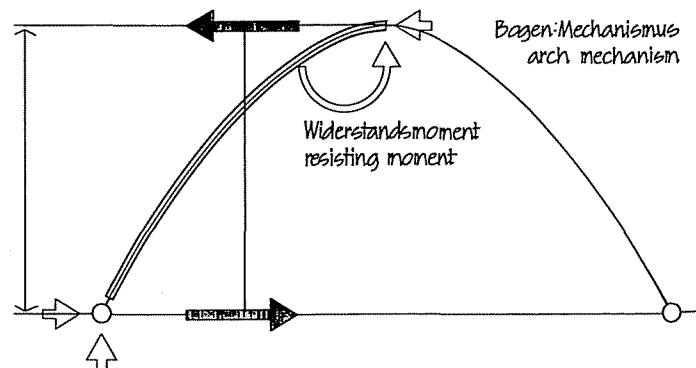
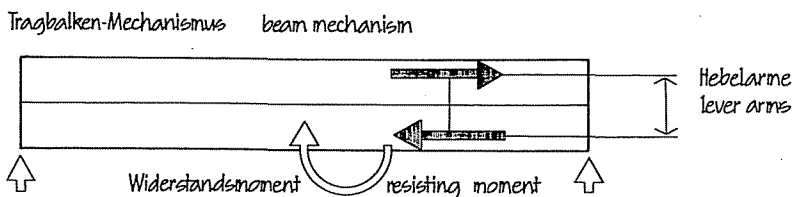
Der Horizontalschub eines Stütz Bogens ist umgekehrt proportional zu seiner Scheitelhöhe. Zur Schubminderung sollte die Scheitelhöhe so hoch wie möglich gewählt werden.



the thrust of an arch is inversely proportional to its rise. for reduction of thrust the arch rise should be as high as possible



Vergleich zwischen Balkenmechanismus und Bogenmechanismus  
comparison between beam mechanism and arch mechanism

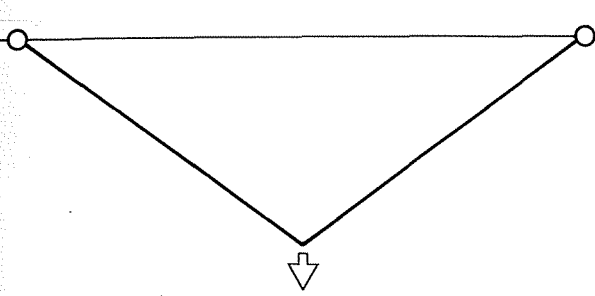


Beziehung zwischen Tragseil und Stützbogen

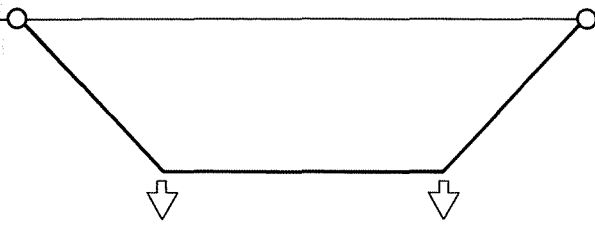
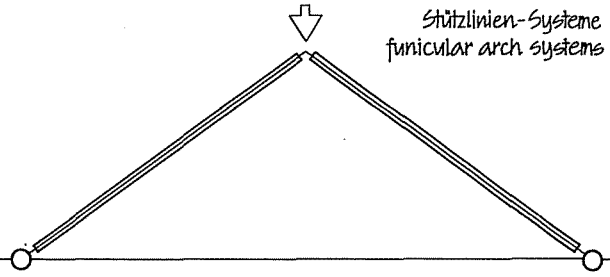
relationship between suspension cable and funicular arch

Tragseil-Systeme  
suspension systems

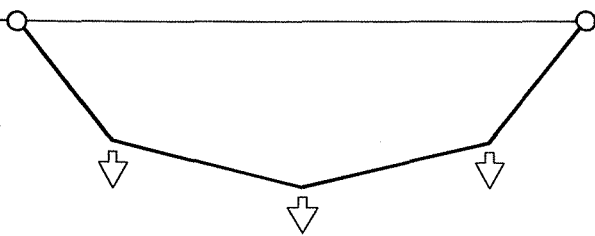
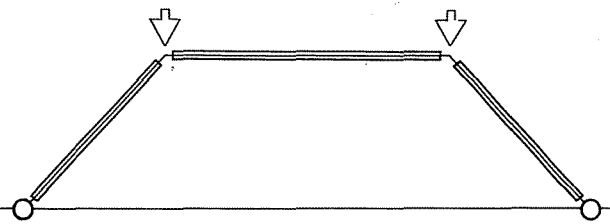
Stützlinsen-Systeme  
funicular arch systems



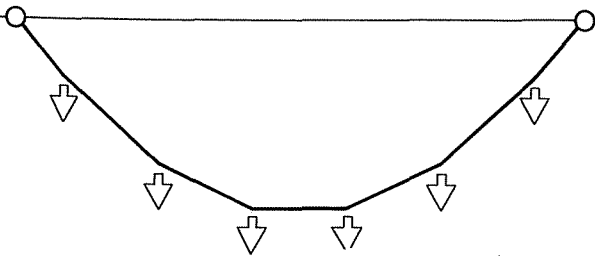
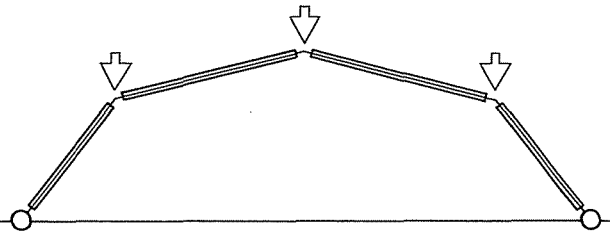
eine Einzellast  
one point load



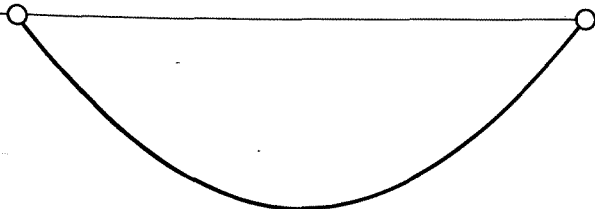
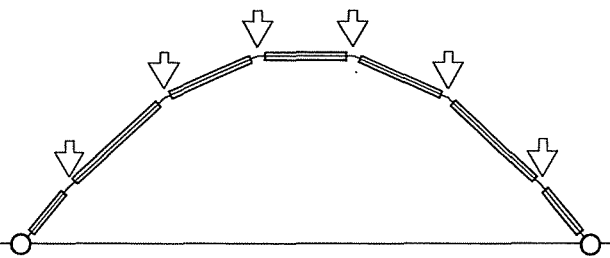
zwei Einzellasten  
two point loads



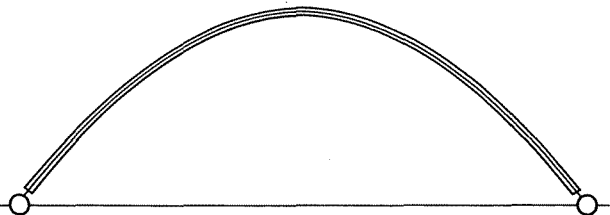
drei Einzellasten  
three point loads



sechs Einzellasten  
six point loads

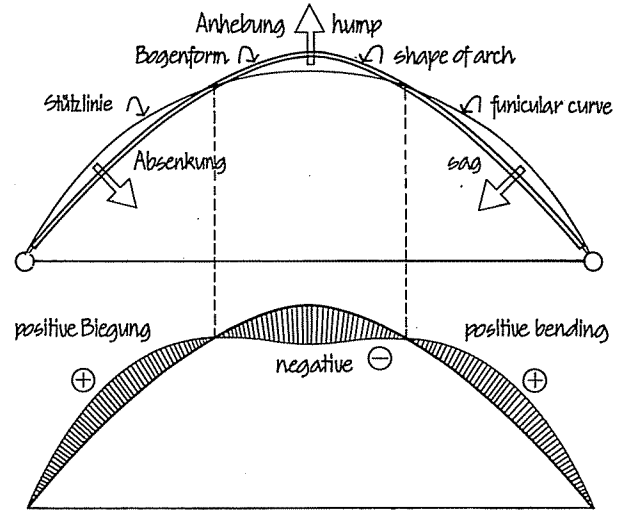
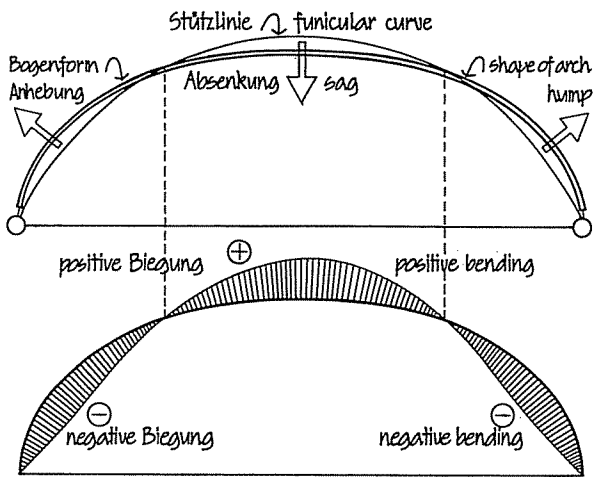


Eigengewicht  
continuous load



Biegung infolge Abweichung der Bogenmittellinie von der Stützlinie

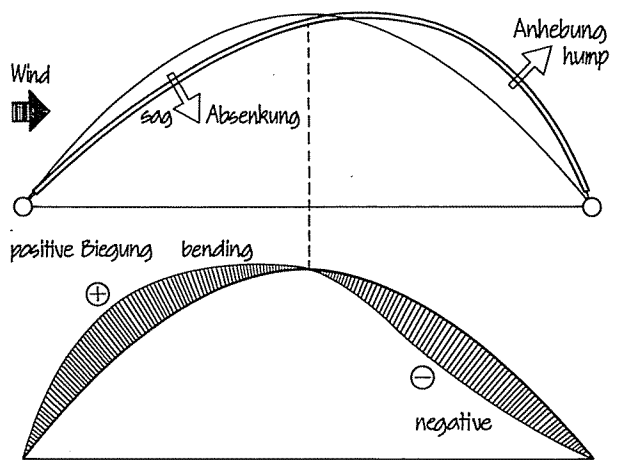
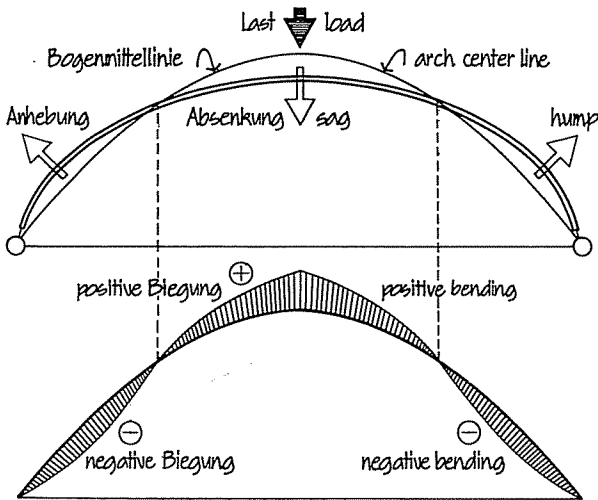
bending due to deviation of center line from funicular curve



Jede Abweichung der Bogenmittellinie von der Stützlinie bewirkt, daß der Bogen sich entweder hebt oder senkt, und verursacht dadurch Biegung  
any deviation of the arch center line from the funicular compression line will cause either hump or sag of the arch resulting in bending

Biegung infolge vertikaler oder horizontaler Zusatzlasten

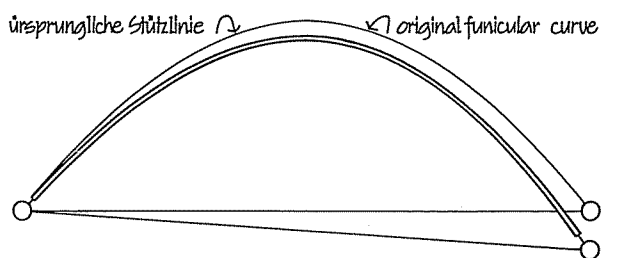
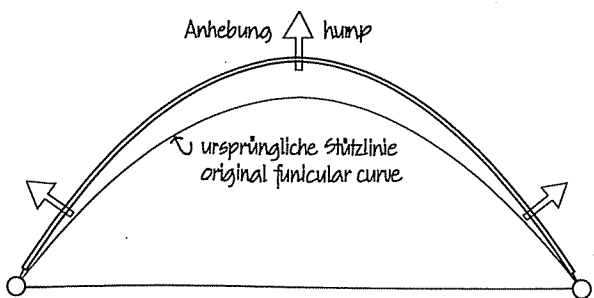
bending due to additional vertical or horizontal loading



Jede Zusatzlast bewirkt, daß die Bogenform sich ändert und somit die Mittellinie von der Stützlinie abweicht. Es entsteht Biegung  
any additional load will cause deflection of the arch and hence deviation from the funicular line of compression resulting in bending

Temperaturveränderungen thermal changes

Fundamentsetzungen foundation settings

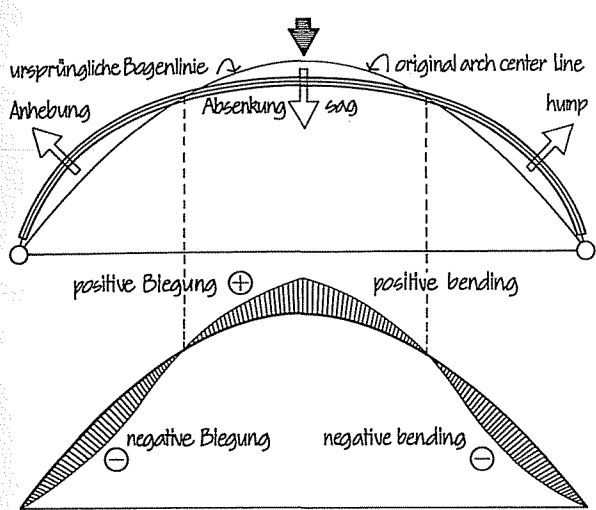


Ausdehnung (Kontraktion) durch Temp. Änderung verursacht Biegung  
extension (contraction) due to thermal changes introduces bending

verschobene Belastung durch ungleiche Setzungen bewirkt Biegung  
different loading caused by unequal setting produces bending

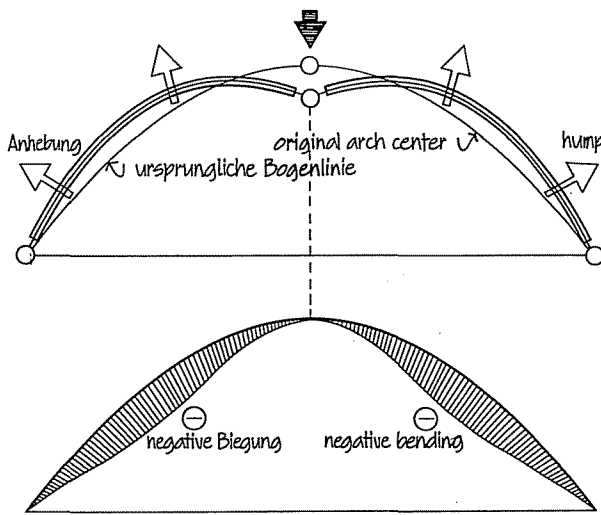
Vergleich zwischen Zweigelenkbogen und Dreigelenkbogen

comparison between two-hinged arch and three-hinged arch



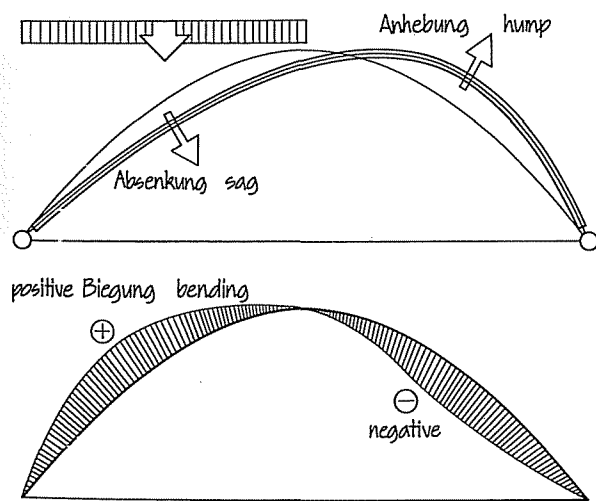
Zusatzbelastung in Mitte  
additional load in midspan

Deformation



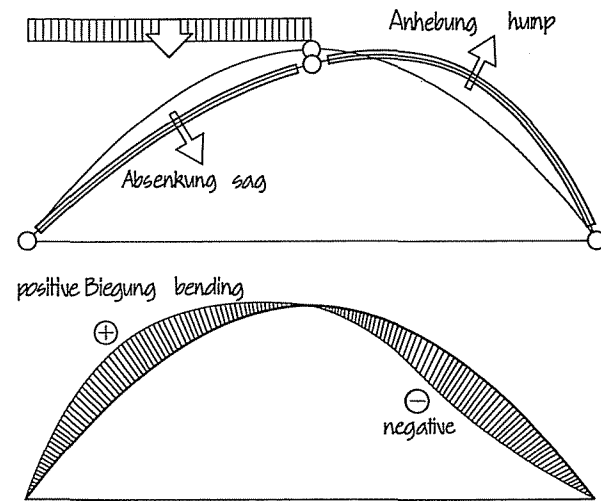
deflection

Biegemomente: Größenbild  
bending: relative magnitude



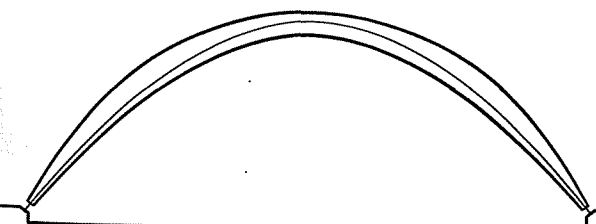
Einseitige Zusatz-Belastung  
additional halfspan loading

Deformation

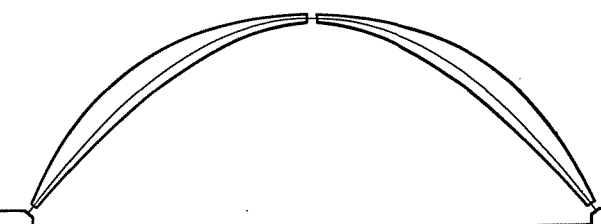


deflection

Biegemomente: Größenbild  
bending: relative magnitude

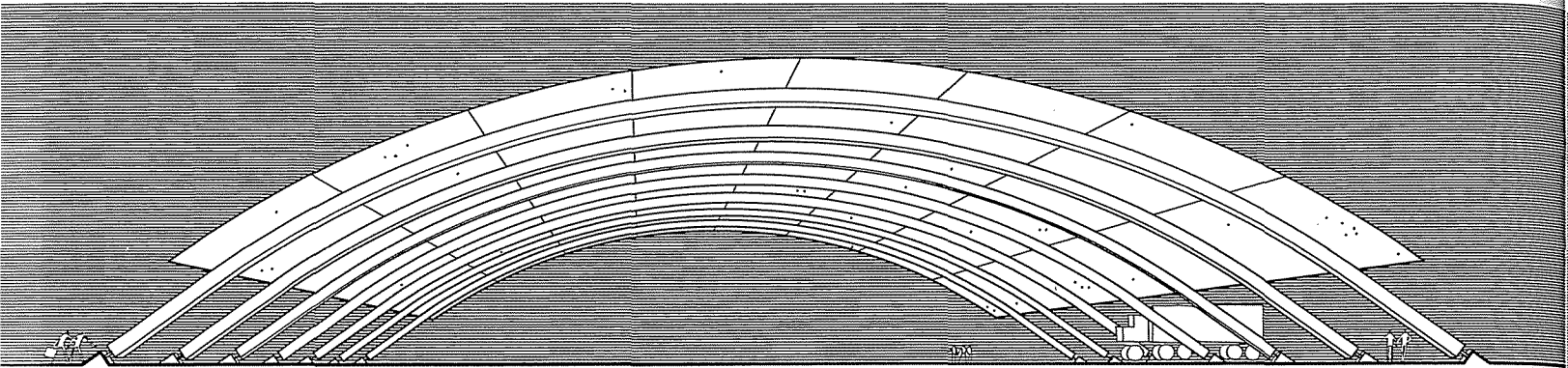


typische Tragwerkform  
typical structure form



Weitzgespannte Tragsysteme mit Zweigelenkbögen

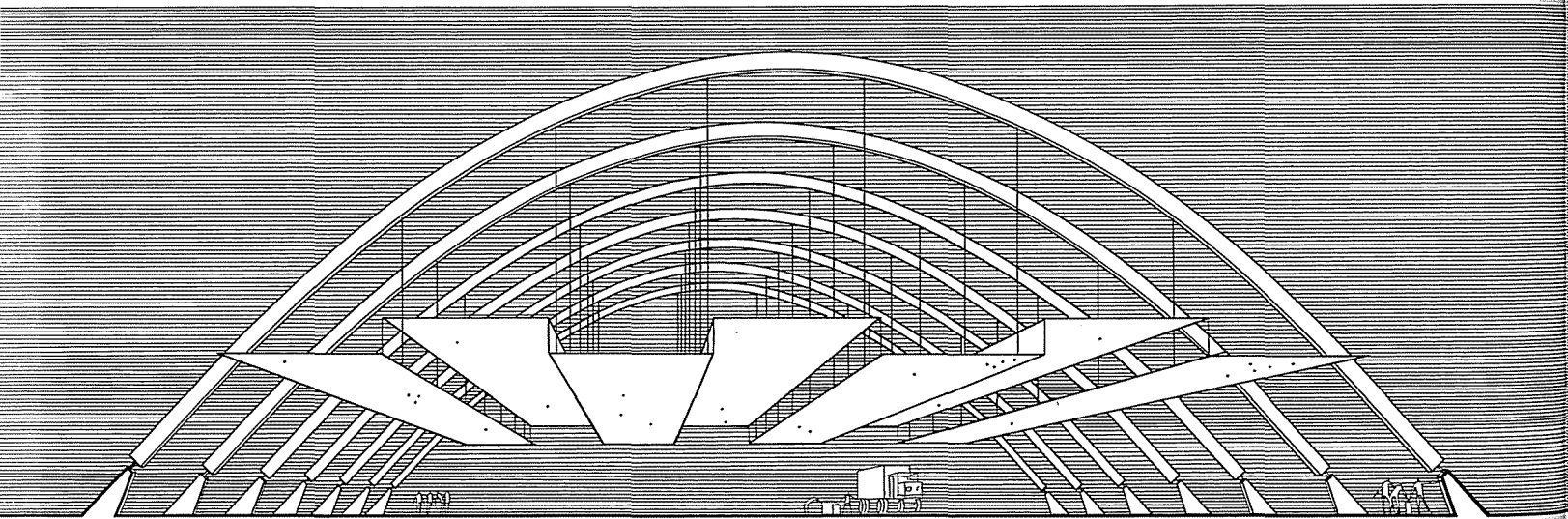
longspan structure systems with two-hinged arches



Erdverankerte Bögen mit aufliegender gewölbter Dachkonstruktion  
 foundation arches with curved roof structure on top

Form der Stützlinie: Kettenlinie  
 funicular curve: catenary

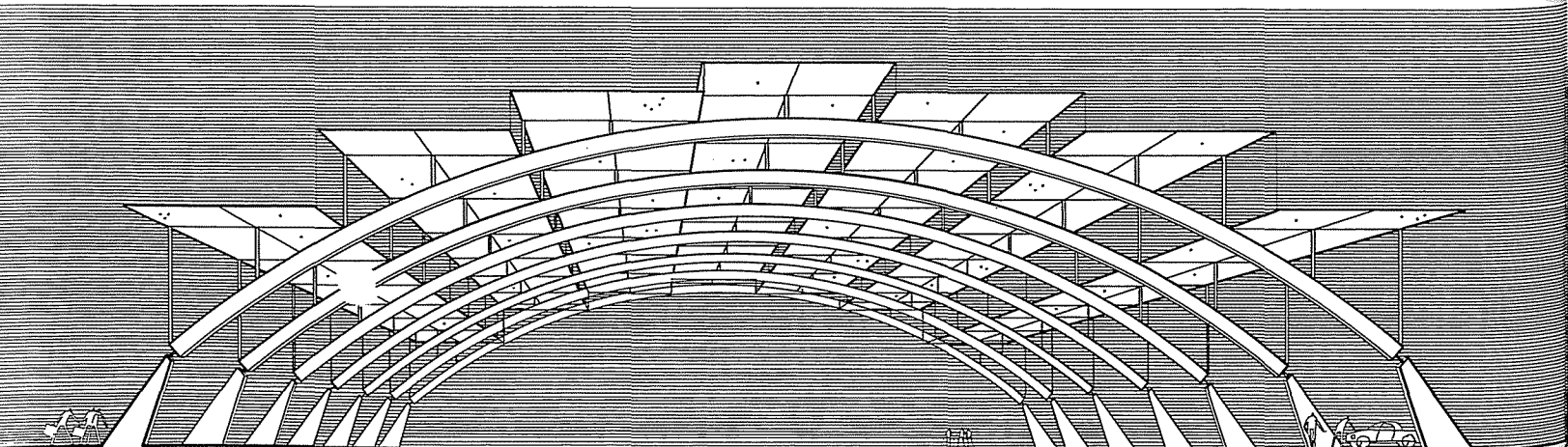
Scheitelhöhe =  $\frac{1}{8}$  Spannweite  
 arch rise =  $\frac{1}{8}$  span



Abgestrebte Bögen mit abgehängter horizontaler Dachkonstruktion  
 buttressed arches with suspended horizontal roof structure

Form der Stützlinie: parabolisches Polygon  
 funicular curve: parabolic polygon

Scheitelhöhe =  $\frac{1}{8}$  Spannweite  
 arch rise =  $\frac{1}{8}$  span



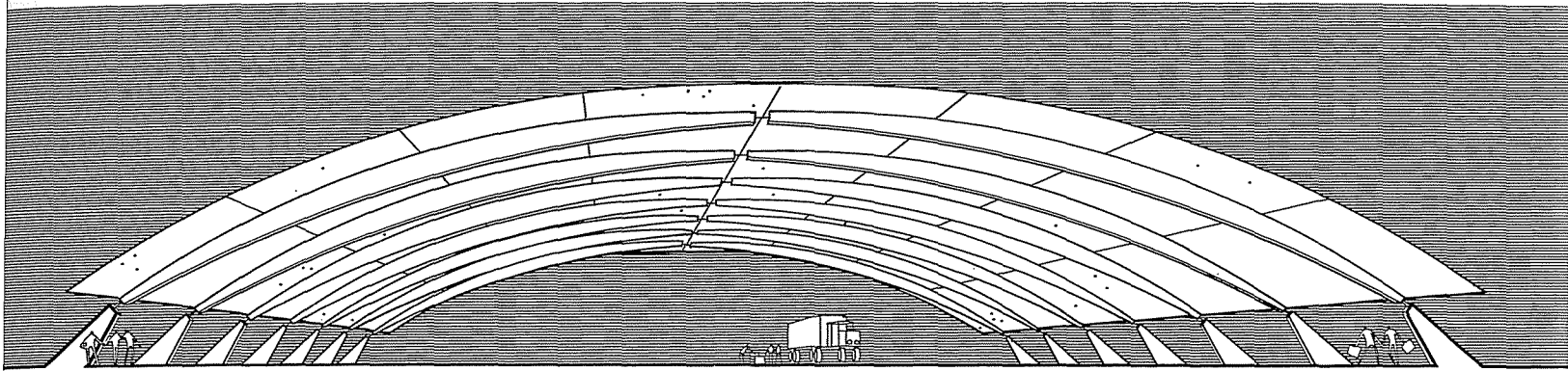
Abgestrebte Bögen mit aufgesetzter horizontaler Dachkonstruktion  
 buttressed arches supporting horizontal roof structure at top

Form der Stützlinie: parabolisches Polygon  
 funicular curve: parabolic polygon

Scheitelhöhe =  $\frac{1}{8}$  Spannweite  
 arch rise =  $\frac{1}{8}$  span

Weitzgespannte Tragsysteme mit Dreigelenkbögen

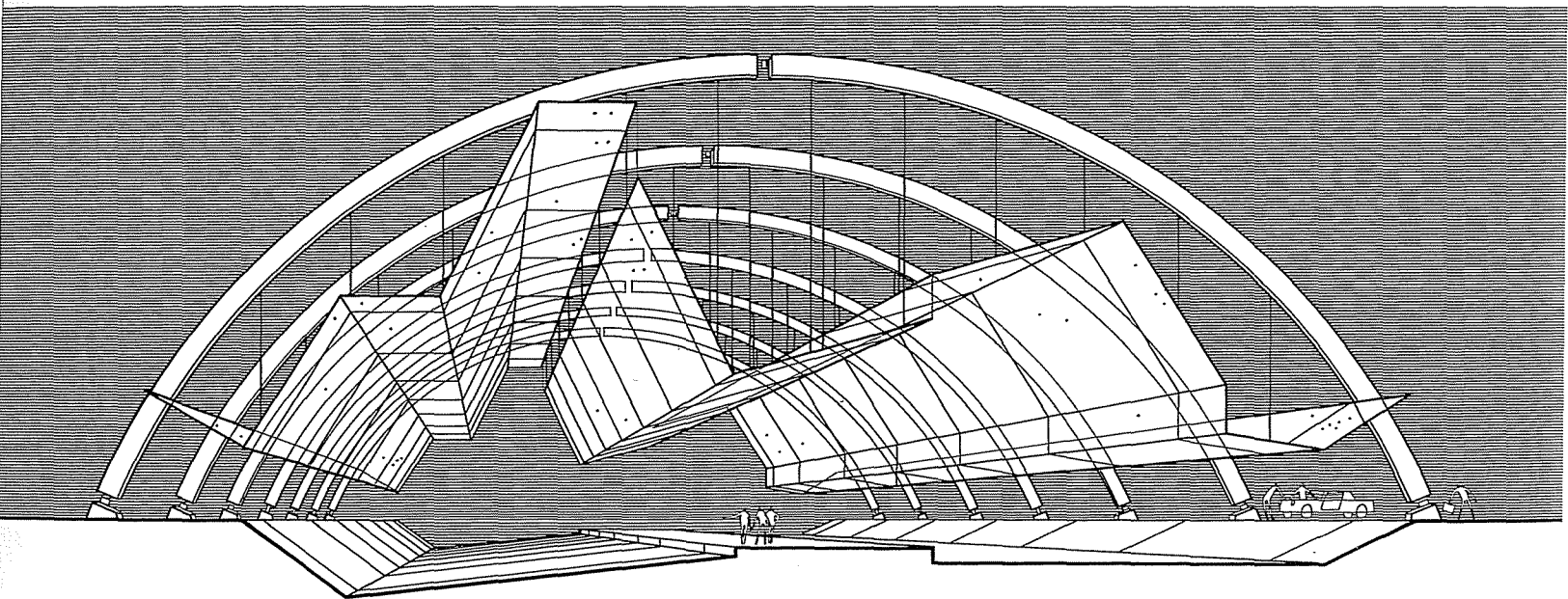
longspan structure systems with three-hinged arches



Abgestrebte Bögen mit aufliegender gewölbter Dachkonstruktion  
 buttressed arches with curved roof structure atop

Form der Stützlinie: Kettenlinie  
 funicular curve: catenary

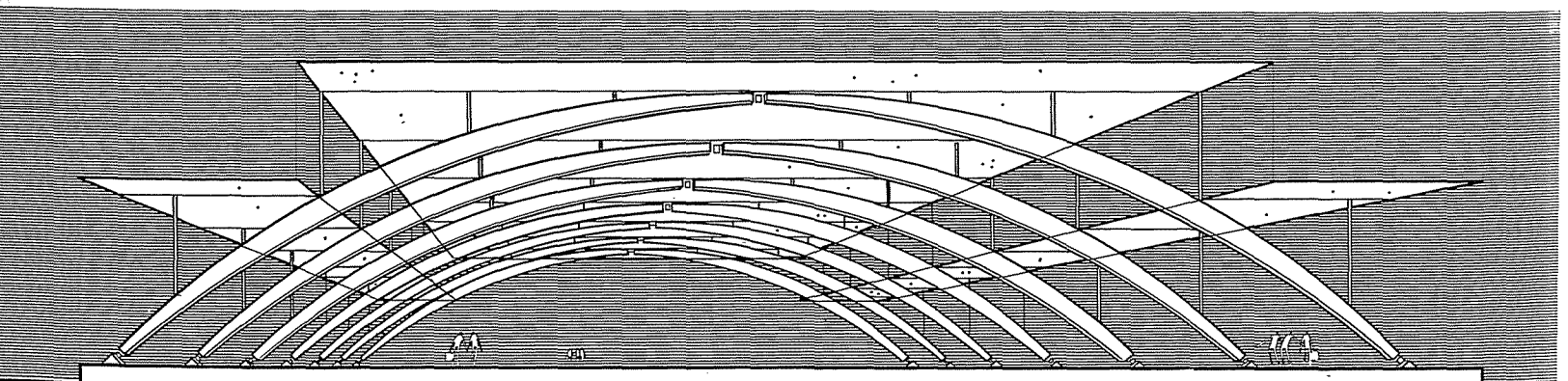
Scheitelhöhe =  $\frac{1}{2}$  Spannweite  
 arch rise =  $\frac{1}{2}$  span



Kreisförmige erdverankerte Bögen mit abgehängter freigestalteter Dachkonstruktion  
 segmental foundation arches with suspended free-form roof structure

Form der Stützlinie: unregelmäßiges Polygon  
 funicular curve: irregular polygon

Scheitelhöhe =  $\frac{1}{3}$  Spannweite  
 arch rise =  $\frac{1}{3}$  span



erdverankerte Bögen mit aufgesetzter horizontaler Dachkonstruktion  
 foundation arches supporting horizontal roof structure atop

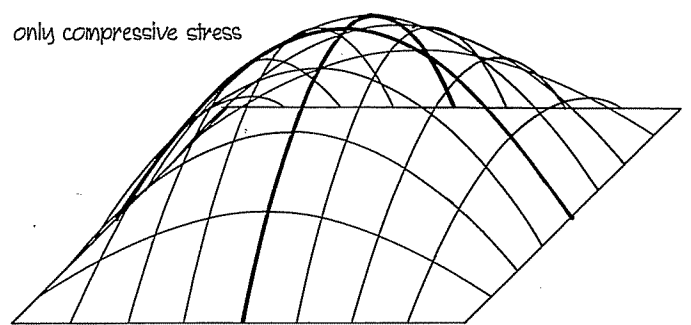
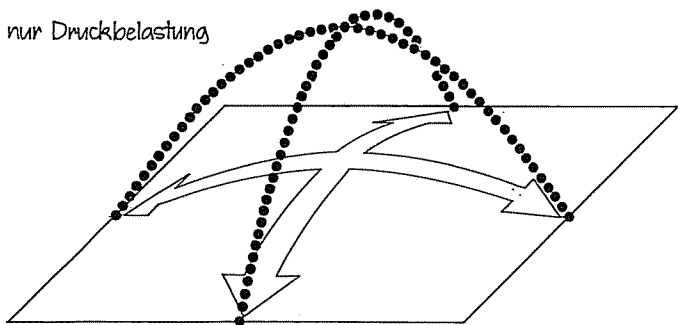
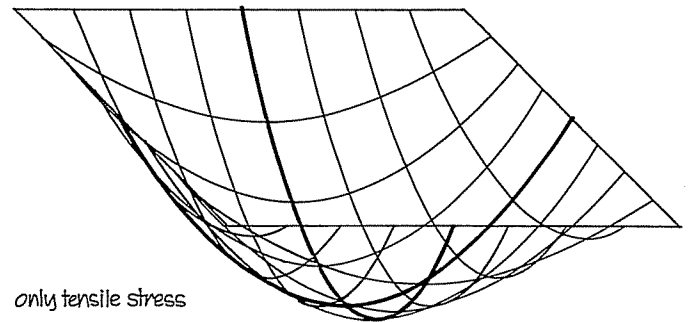
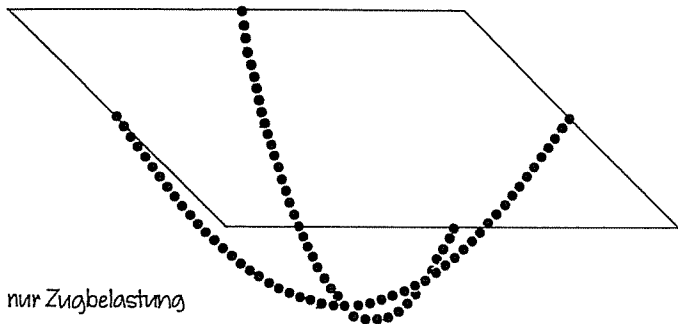
Form der Stützlinie: parabolisches Polygon  
 funicular curve: parabolic polygon

Scheitelhöhe =  $\frac{1}{5}$  Spannweite  
 arch rise =  $\frac{1}{5}$  span



Grundlagen der räumlichen Stützgitter-Systeme  
Tragmechanik und Tragwerkform als umgekehrtes Hängesystem

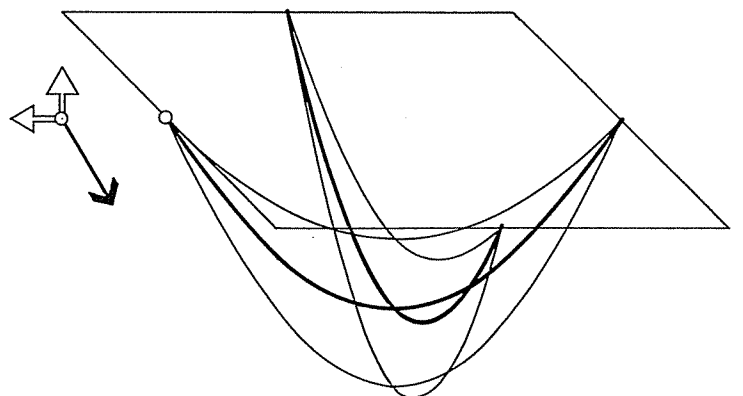
Basics of the 3-dimensional thrust lattice systems  
Bearing mechanism and structure form as inverted suspension system



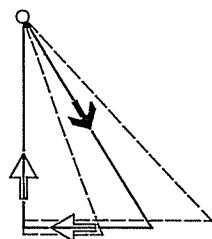
3-dimensionale Lastabtragung und Raumüberspannung durch Kreuzung zweier Stützbögen (bzw. Tragseile) in zwei Achsen  
3-dimensional load transfer and space spanning through crossing two funicular arches (alternately suspension cables) in two axes

Bildung einer Viereck-Maschenstruktur durch Parallelreihung und gegenseitige Durchdringung der Bogen- (bzw. Hänge-) Linien  
Formation of a quadrangular mesh pattern through parallel juxtaposition and interpenetration of arch (alternately suspension) lines

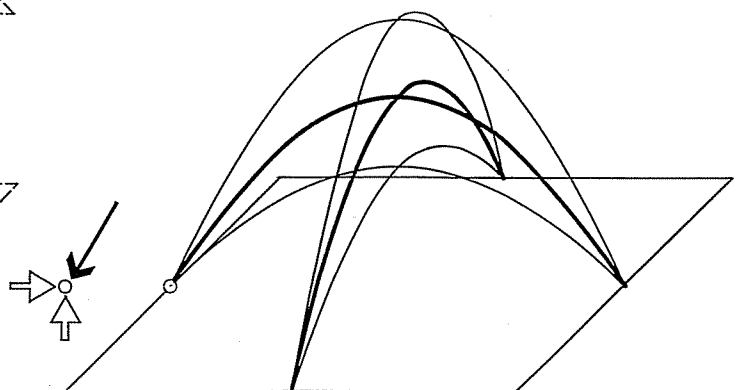
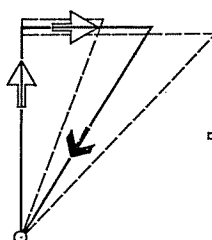
Auflagerkräfte im Hängernetz und Stützgitter  
Forces at supports of suspension net and thrust lattice



Die optimale Bogenform unter Eigengewicht ist die Stützlinie (Drucklinie). Die Stützlinie ist die umgekehrte Kettenlinie (Hängelinie)  
Die an Auflager entstehenden Kräfte des Stützgitters entsprechen den Kräften im Hängernetz. D.h., die Bogenkräfte und der Horizontalschub sind umgekehrt proportional zur Scheitelhöhe

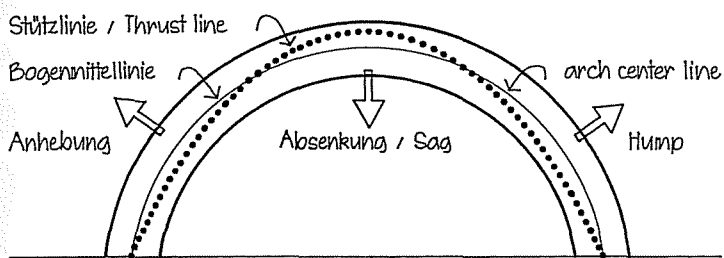
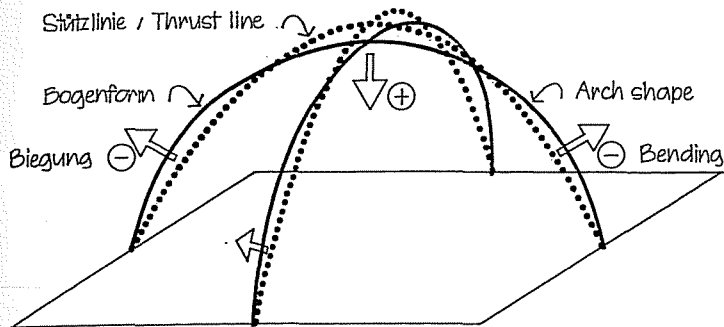


The optimum arch form under dead load is the funicular line (thrust line). The funicular arch is the inverted catenary  
The forces acting upon the supports of the thrust lattice match with the like forces in the suspension net; i.e., the arch force and the horizontal thrust are inversely proportional to the arch rise



Biegebeanspruchung des Stützgitters

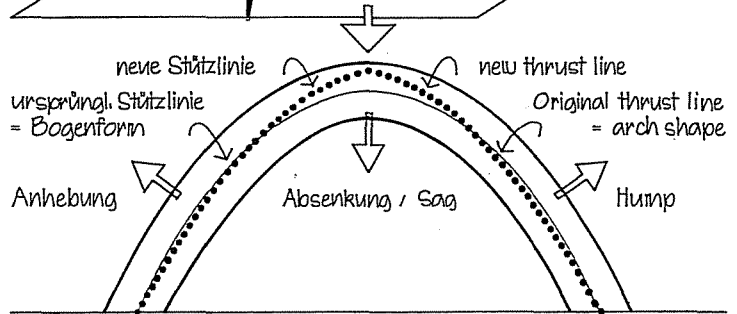
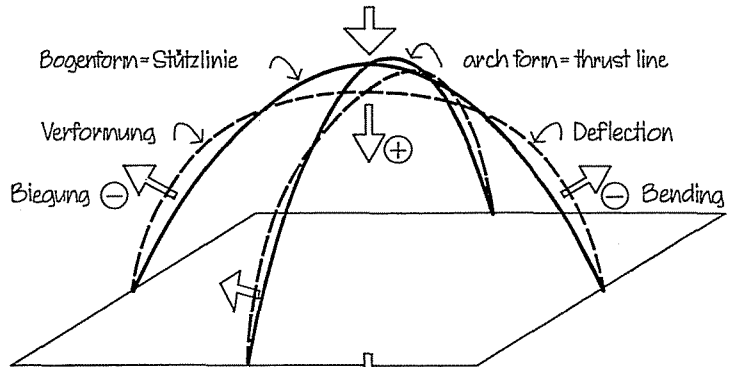
Abweichung von Stützlinie / Deviation from funicular thrust line



Abweichung der Bogenmittellinie von der Stützlinie erzeugt Kräfte quer zur Achse und damit Biegebeanspruchung des Querschnittes  
Deviation of the arch center line from the funicular thrust line produces forces normal to the axis and thus bending stresses in the arch section

Bending stressing in the vaulted thrust lattice

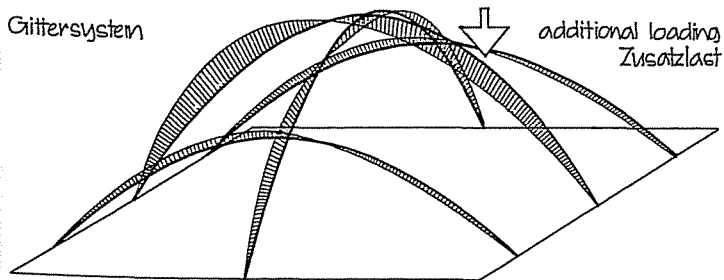
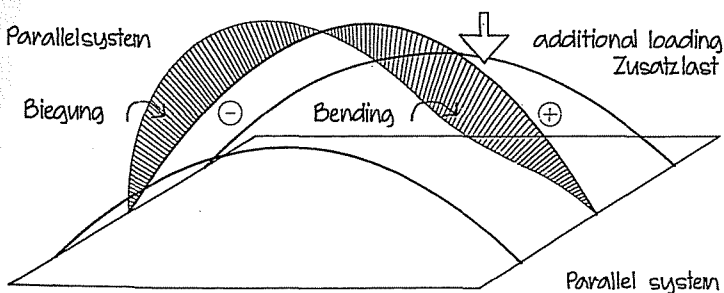
Zusatz-Last / Additional load



Bei zusätzlichen Lasten entspricht die Stützlinien-Bogenform nicht mehr dem neuen Belastungszustand, in Bogen entsteht Biegung.  
Under additional loading the funicular arch form no longer matches with the new load condition resulting in bending of the arch section

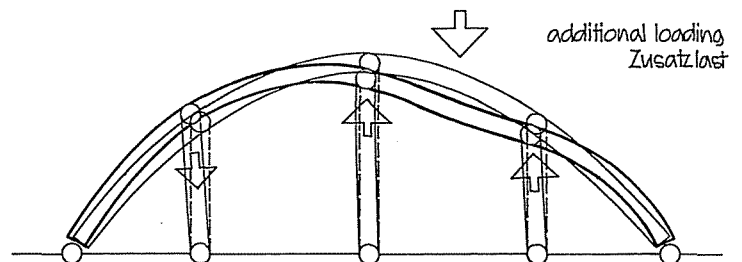
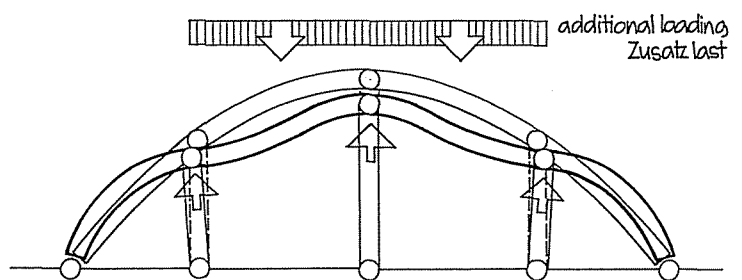
Widerstandsmechanik des Stützgitters bei Zusatzlasten / Resistance mechanics of thrust lattice under additional loading

Unterschied zwischen Parallelsystem und Gittersystem bei Punktbelastung  
Difference between parallel system and lattice system under point loading



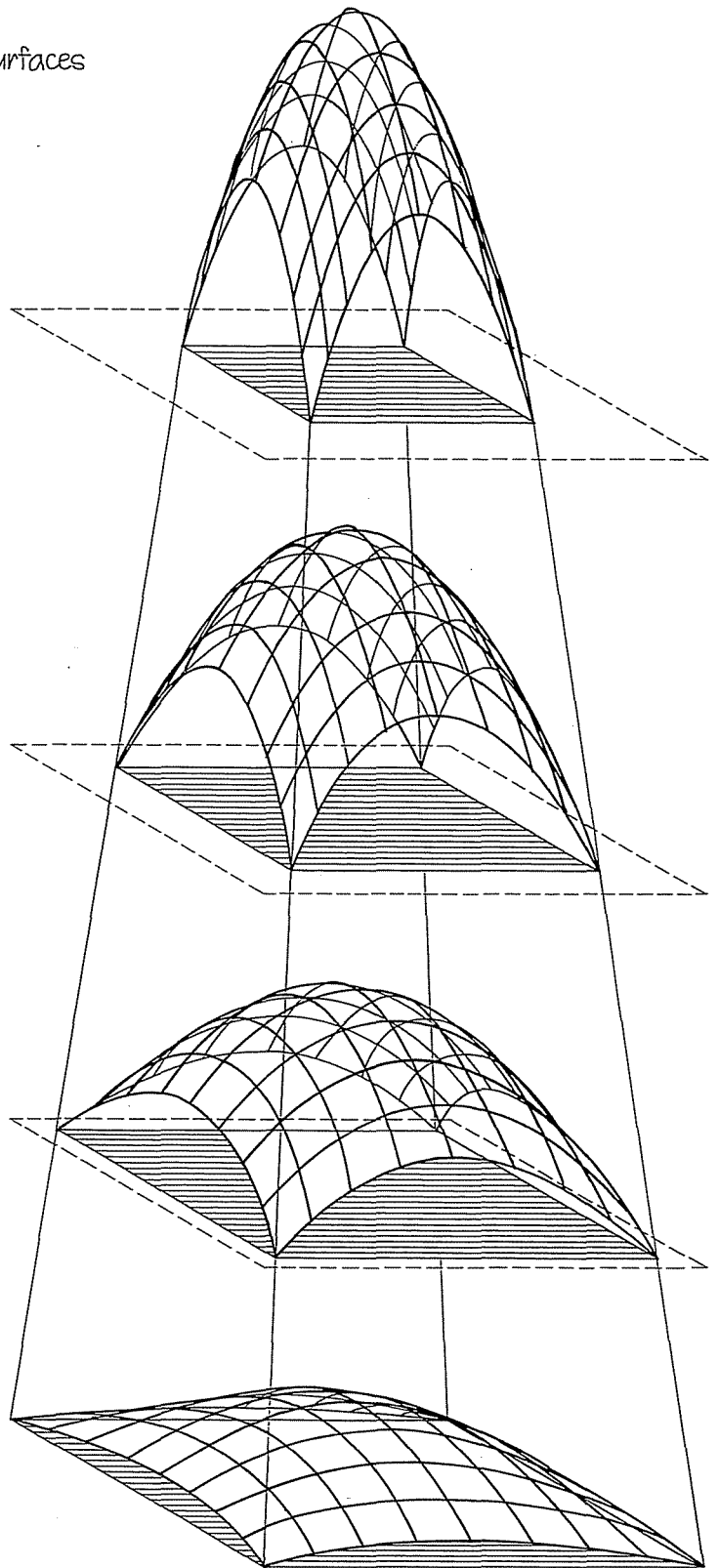
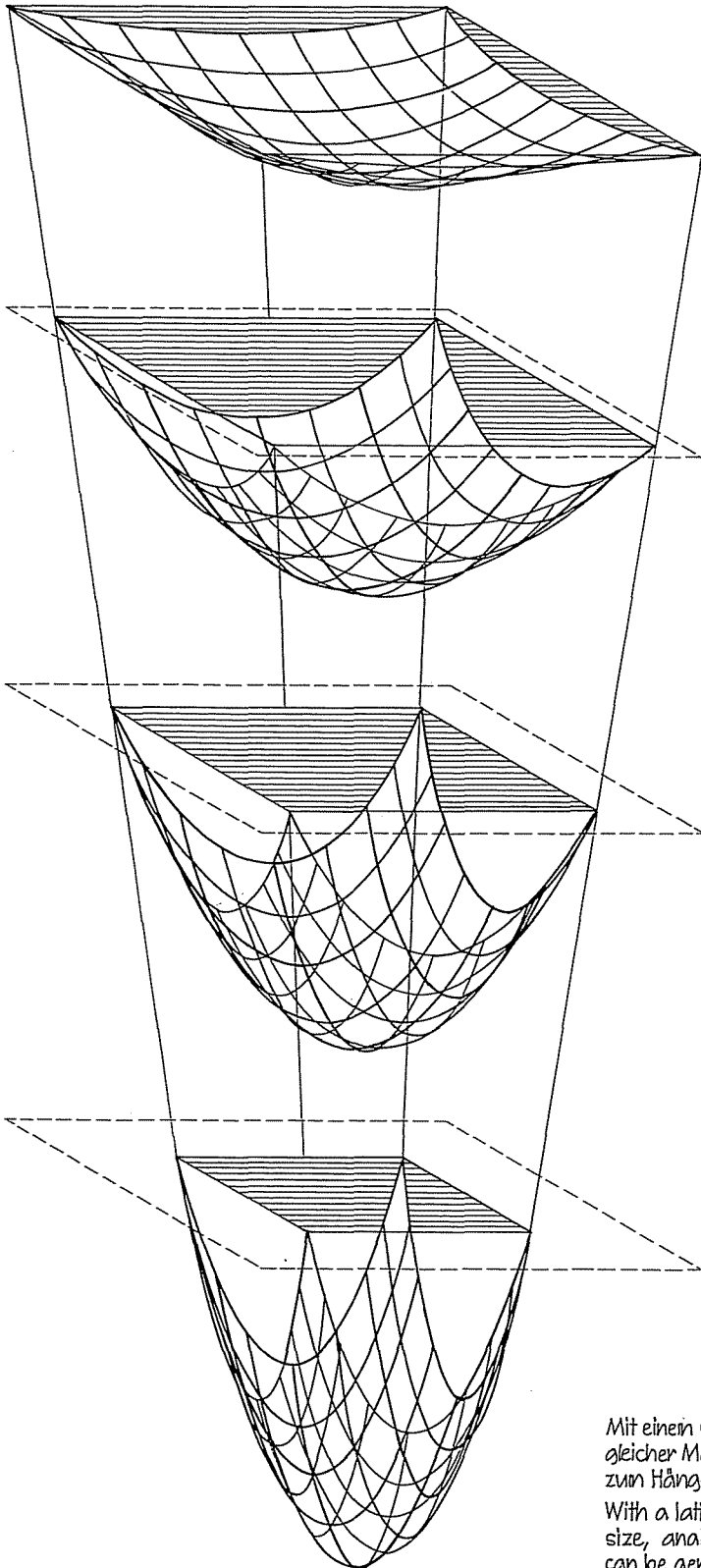
Durch kreuzweise Durchdringung mit steifen Verbindungen nehmen auch die unbelasteten Stützbögen an der Widerstandsmechanik gegen Verformungen teil  
Due to crosswise interpenetration and rigid connection, also the arches without loading are drawn into the resistance mechanics against deformations

Widerstand des Gesamtsystems in Stützgitter bei zusätzlicher Belastung  
Resistance of total system in the thrust lattice under additional loading



Die Widerstandsmechanik resultiert aus: Biegung der Bogenachse, Torsion des Bogenquerschnittes, Verschiebung des Kreuzungs-(Maschen-)Winkels  
The resistance mechanics results from: Bending of arch axis, torsion of arch cross section, wrenching of intersection angles (mesh angles)

Formentwicklungen von Hängeflächen und Stützflächen  
 Form developments of suspension surfaces and thrust surfaces



Mit einem Gitter ebenen quadratischen Zuschnittes (in orthogonaler Abwicklung) und gleicher Maschengröße lassen sich durch rhombische Verformung der Maschen analog zum Hängenez Stützflächen mit unterschiedlichen Scheitelhöhen bilden

With a lattice of flat square geometry (as orthogonal development) and uniform mesh size, analogous to the suspension net, funicular thrust surfaces with varying rises can be generated by modifying the rhomb shape of the mesh

## Stützgitter: Definition und Merkmale

## Funicular thrust lattice: Definition and characteristics

## Definition

Das Stützgitter ist ein räumlich gekrümmtes flächiges Maschen-Tragwerk mit durchläufigen Linienelementen in dem die Lasten durch Stützmechanismus in zwei Achsen abgetragen werden

The funicular thrust lattice is a doubly curved planar mesh structure with continuous lineal members, in which the loads are transmitted into two dimensions through thrust mechanics

## Merkmale

## Zwei Scharen von Stützbögen

Das Tragsystem wird gebildet aus zwei Scharen einander durchdringender Stützbogen-Linien. Die Linien-elemente müssen wie beim unabhängigen Stützbogen biegesteif gegenüber Sekundär-Lasten sein

## Gleiche Maschengröße

Die Durchdringung der Bogenlinien muß so erfolgen, daß Maschen mit gleichen Seitenlängen (= gleichen Knotenabständen für alle Bogenlinien) entstehen

## Unterschiedliche Maschenwinkel, fixiert

Die Gesamtform des Tragsystems wird, außer durch die Bogenkrümmungen, durch die einzelnen Maschenwinkel bestimmt. Zur Erhaltung der Strukturform muß daher die Fixierung der Maschenwinkel sichergestellt sein

## Umgekehrte Hängeform

Die optimale Stützgitterform kann empirisch durch Umkehrung des entsprechenden Hängesystems mit gleichmaschigen Netz gewonnen werden

## Characteristics

## Two sheaves of funicular arches

The structure system is formed by two sheaves of funicular arch lines interpenetrating each other. The lineal members, as with the independant funicular arch, must be bending-resistant against secondary loads

## Equal mesh size

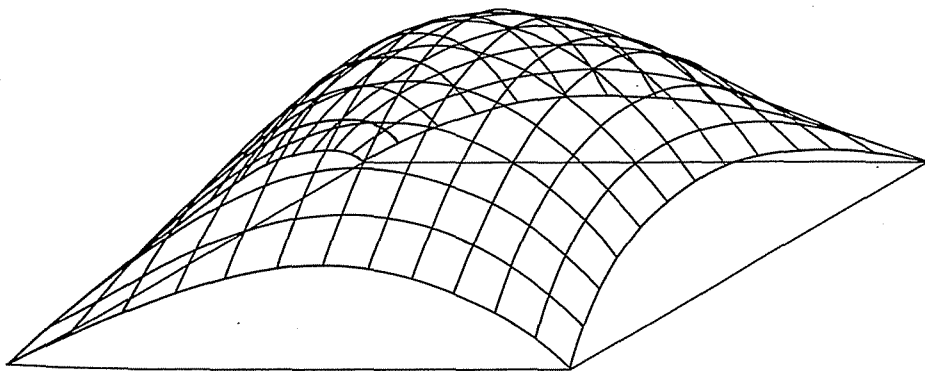
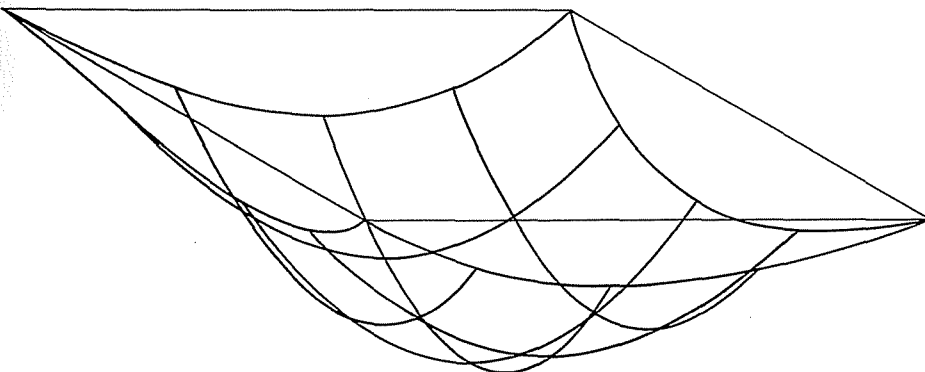
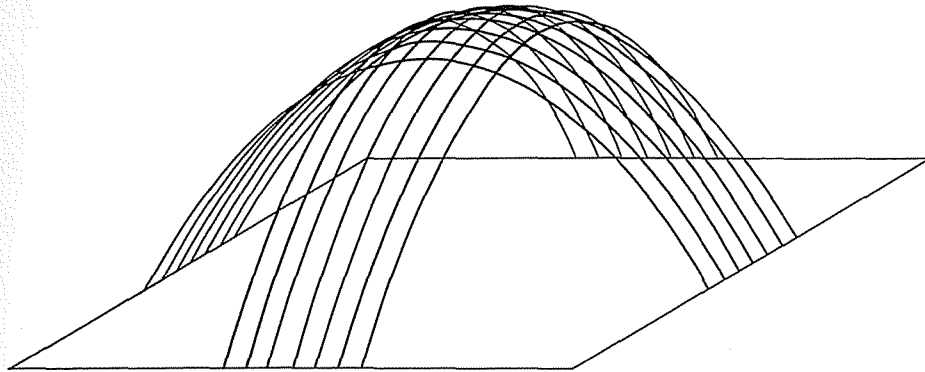
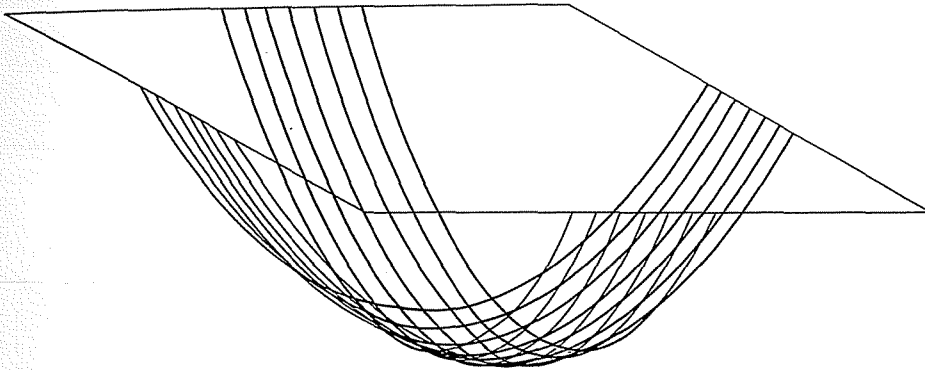
The interpenetration of arch lines must be in such a way that meshes with equal side length (= equal knot distances in all arch lines) will result

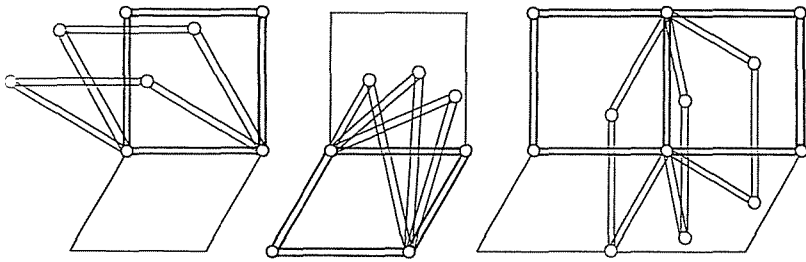
## Differing mesh angles, fixed

The overall shape of the structure is determined not only by the arch curvatures, but also by the individual mesh angles. Thus, for maintaining the structure form, the fixing of mesh angles is prerequisite

## Inverted suspension shape

The optimum shape for the thrust lattice can be developed empirically by inverting the analogous suspension system with uniform meshes

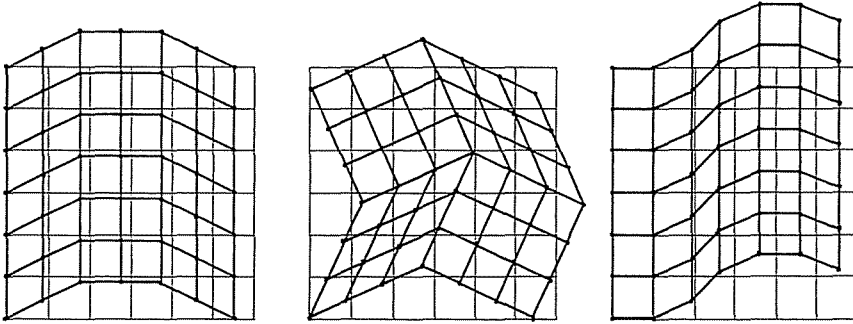




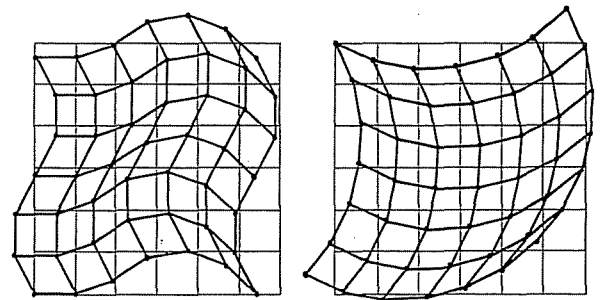
Formsteuerung durch Maschenwinkel / Form manipulation through mesh angle

## Geometrie des gleichmaschigen Gitters Geometry of the lattice with uniform meshes

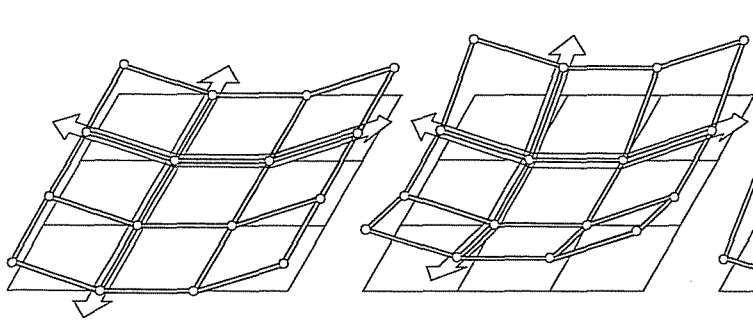
Die gleichseitige Gittermasche ist das Grundelement der Stützgitter-Geometrie. Die (theoretisch) flexiblen Maschenknoten ermöglichen Gitterflächen jeder Formgebung.  
The equilateral lattice mesh is the basic element of the vaulted lattice geometry. The (theoretically) flexible knots allow for lattice surfaces of any shape.



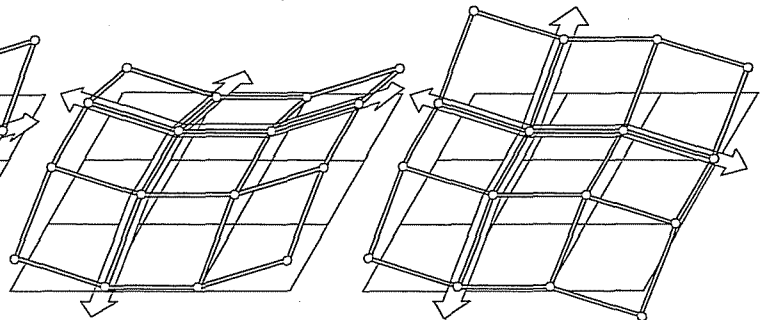
Flexibilität der gleichmaschigen Struktur im ebenen Gitter



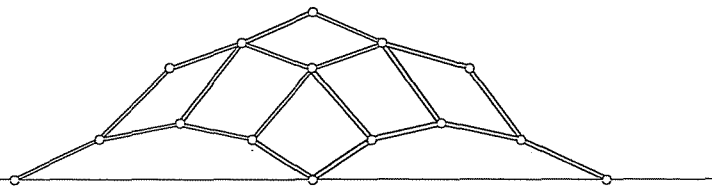
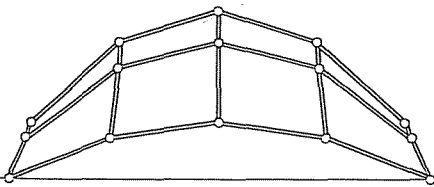
Flexibility of the uniform mesh pattern in the plane lattice



Räumliche Flexibilität der gleichmaschigen Gitterstruktur

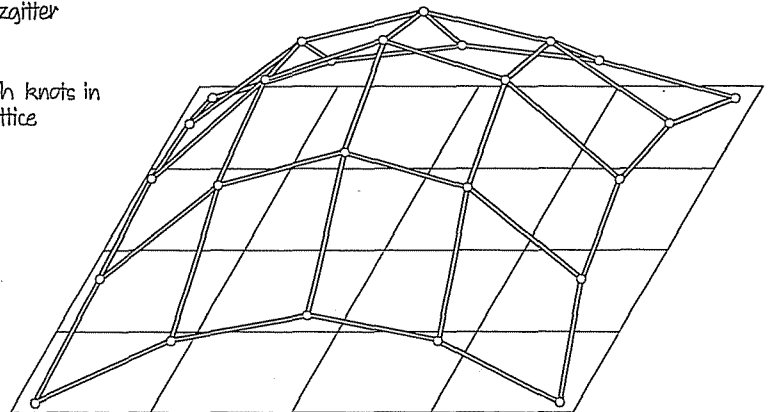
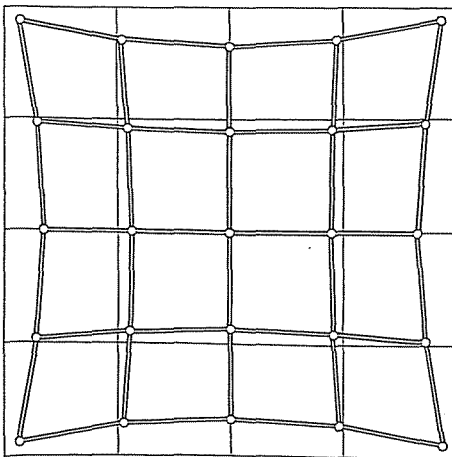


3-dimensional flexibility of the uniform mesh lattice



Verschiebung der Maschenknoten  
in quadratischen Stützgitter

Dislocation of the mesh knots in  
the square thrust lattice



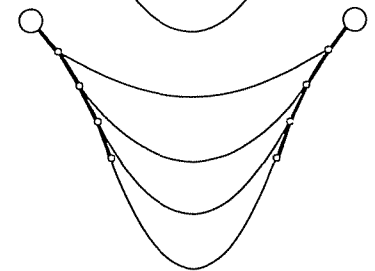
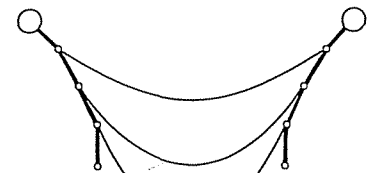
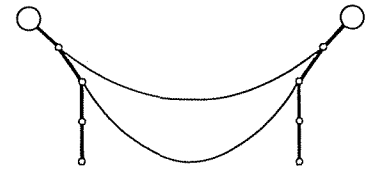
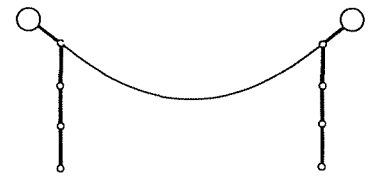
Doppelte Krümmung des Randbogens im Stützgitter: Ableitung vom Hängernetz  
 Double curving of boundary arch in thrust lattice: Derivation from suspension net

Zwei gegenüberliegende, einfach aufgehängte Randseile werden durch eingehängte Tragseile in Richtung der angreifenden Seilkräfte bewegt  
 Entsprechend dem abnehmenden Angriffswinkel entsteht eine Krümmung in Ebene der Tragseile  
 Analog wird das zweiseitig aufgehängte Randseil zusätzlich in Projektion der Tragseile gekrümmt

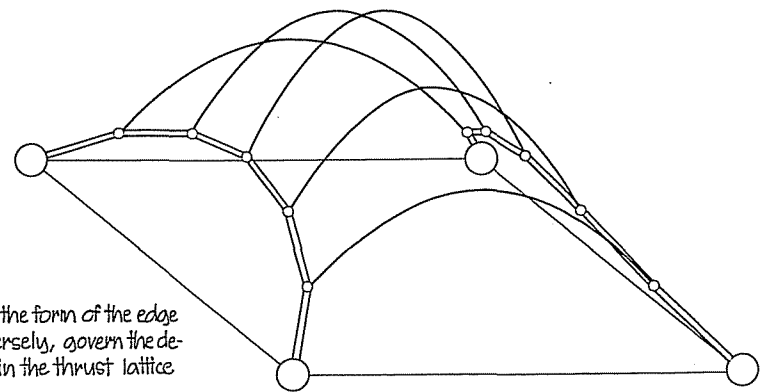
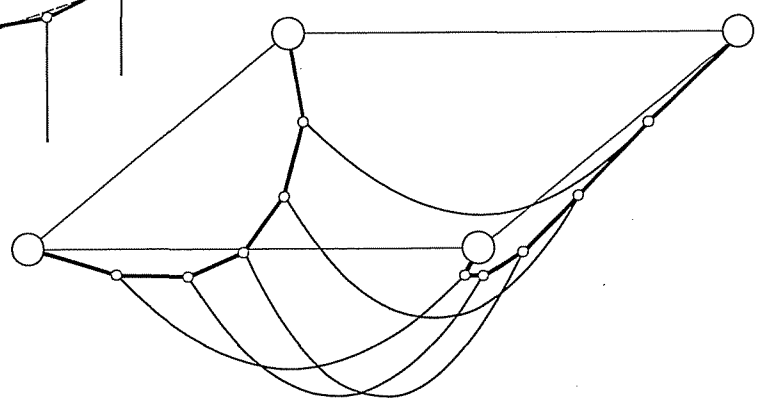
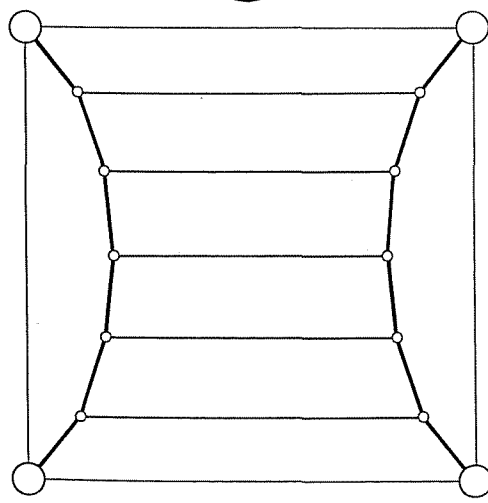
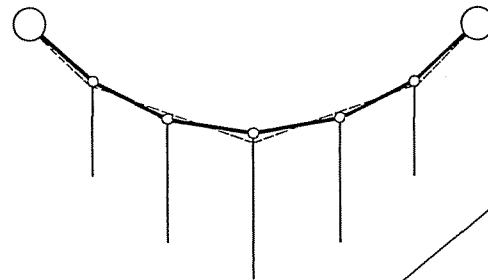
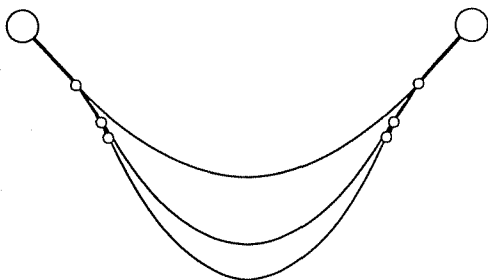
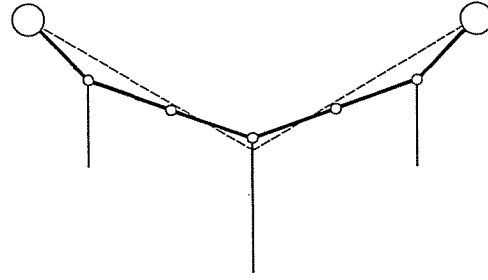
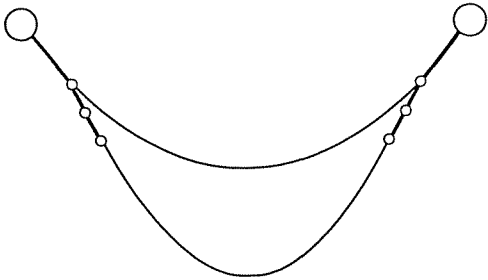
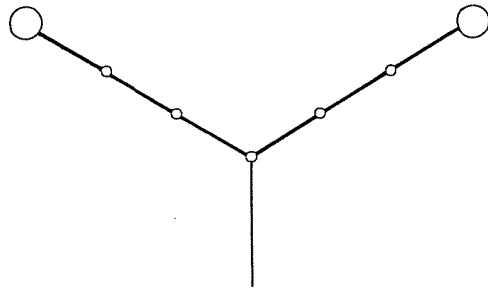
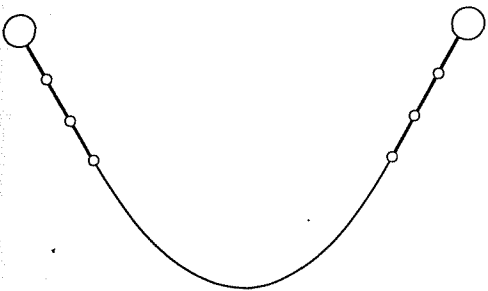
Two opposite, singly suspended edge cables, when interlocked with load cables, will follow the direction of acting cable forces

According to the decreasing angle of load onset a curving in the plane of load cables will develop

Analogously, an end-suspended edge cable will also be curved in projection of load cables

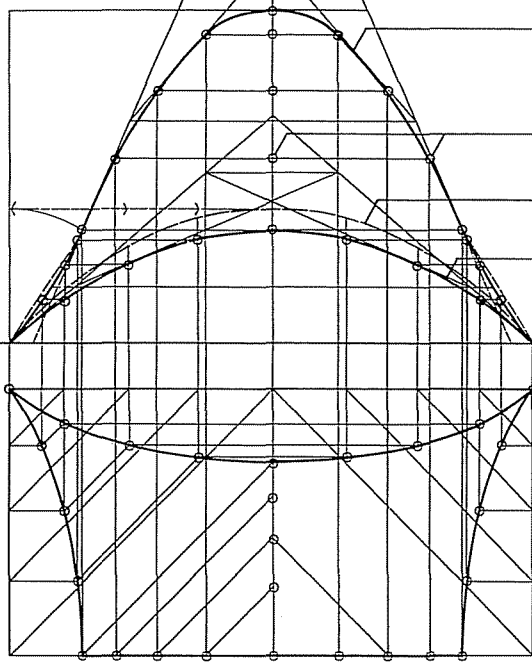


Krümmung der beiden Randseile infolge Einhängung von einzelnen Tragseilen  
 Curving of both edge cables due to linkage with separate load cables



Die Gesetzmäßigkeit der Randseil-Ausbildung im Hängernetz gilt im umgekehrten Sinn für die Gestaltung des Randbogens im Stützgitter

The principles conditioning the form of the edge cable in the hanging net, inversely, govern the design of the boundary arch in the thrust lattice

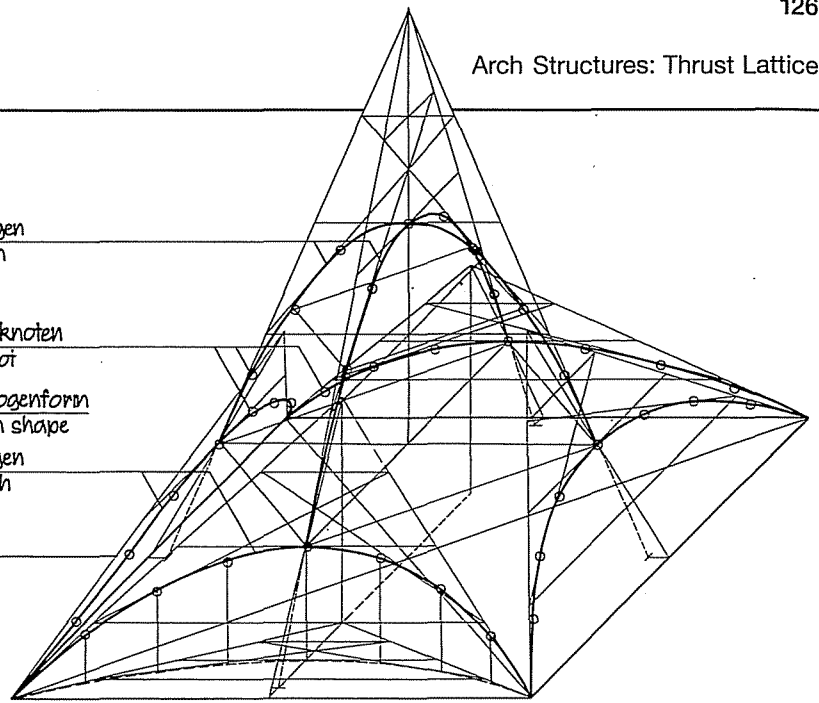


Hauptbogen  
main arch

Maschenknoten  
mesh knot

wahre Bogenform  
true arch shape

Randbogen  
edge arch



Angenäherte geometrische Formfindung für das gleichmaschige Stützgitter  
Approximate geometric delineation of the thrust lattice with uniform meshes

Alle Bögen haben die gleiche Lauflänge. Die Stützlinienform wird zur Vereinfachung als Parabel konstruiert

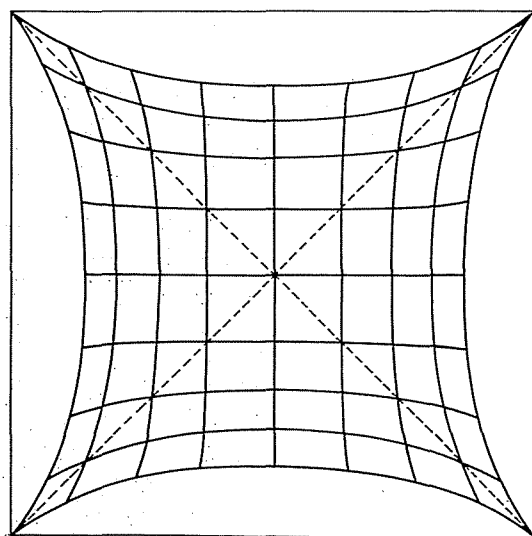
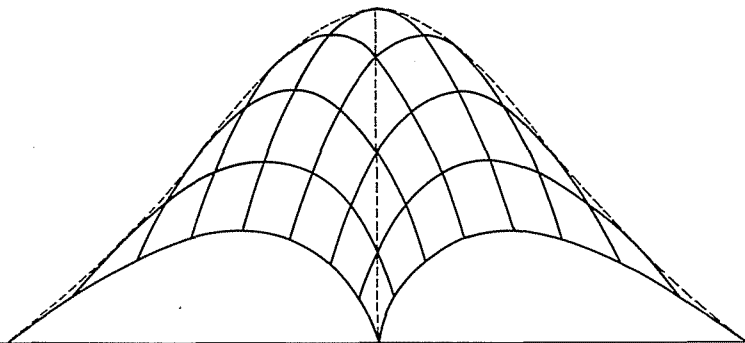
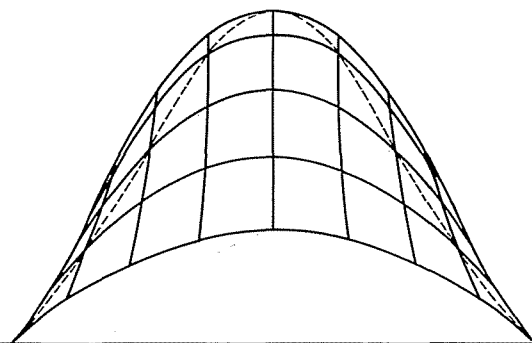
Mit der Wahl der beiden sich kreuzenden senkrechten Hauptbögen werden Tragwerk-Grundform, Bogen-Lauflänge und Maschenteilung festgelegt

Die Randbögen werden in eine Ebene gelegt, deren Neigung größer ist als die Endtangente der Hauptbögen

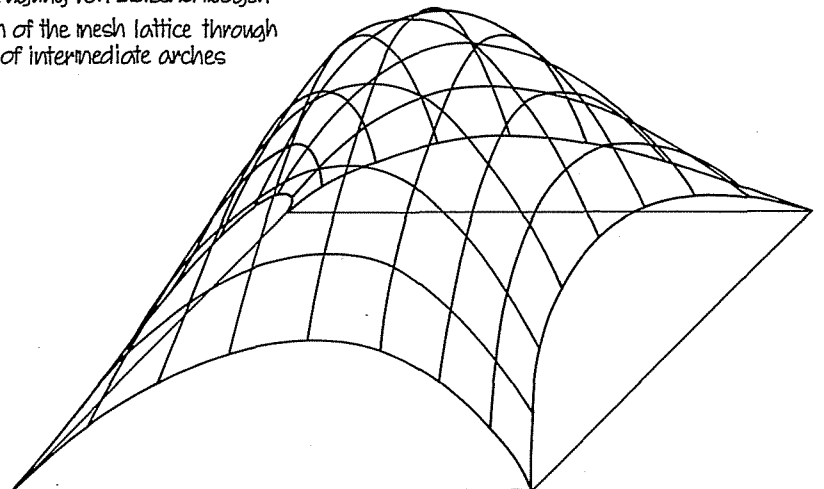
All arches have the same lineal length. The funicular arch configuration, the thrust line, for simplicity will be delineated as a parabola

With the choice of the two main arches crossing each other the structural form basis, the lineal arch length and the mesh division are determined

The edge arches are laid out in a plane having an inclination larger than the final tangent of the main arches



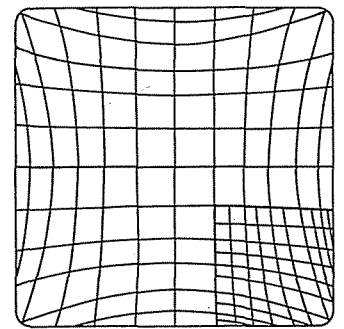
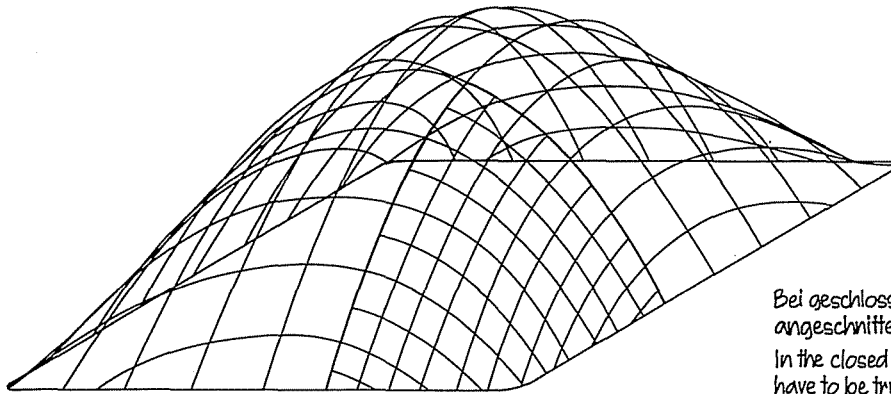
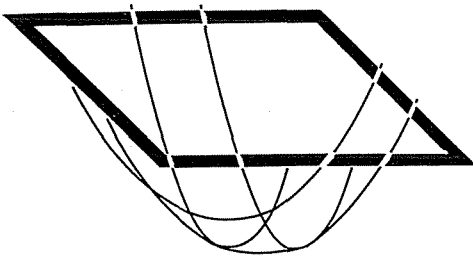
Vervollständigung des Maschengitters durch Einfügung von Zwischenbögen  
Completion of the mesh lattice through insertion of intermediate arches



Haupttypen der Ausbildung des Stützgitter-Randes

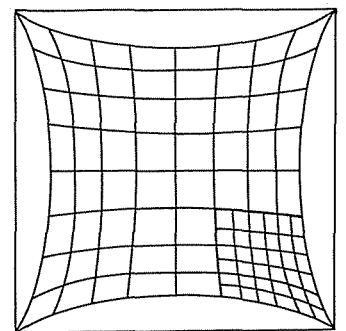
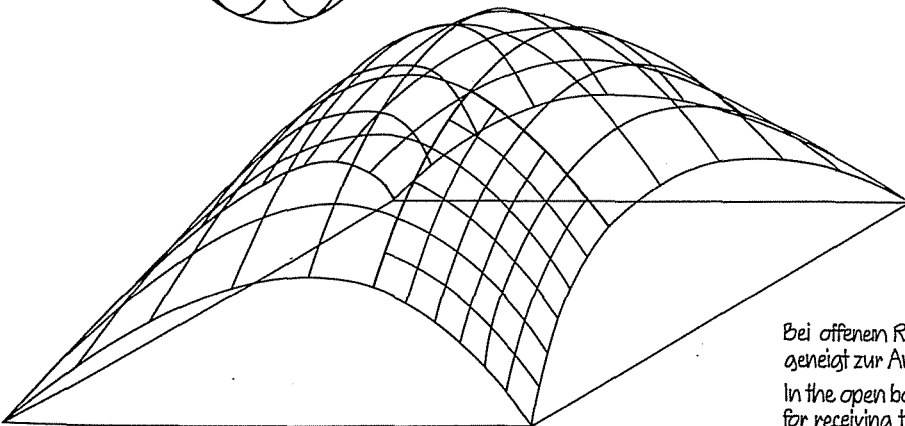
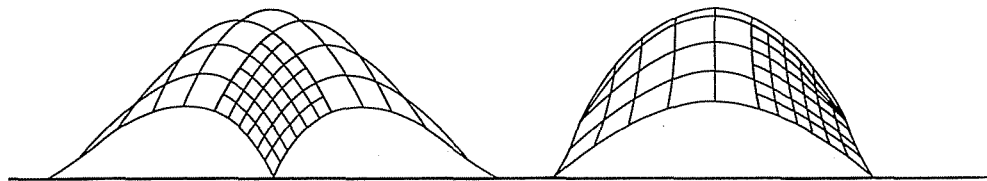
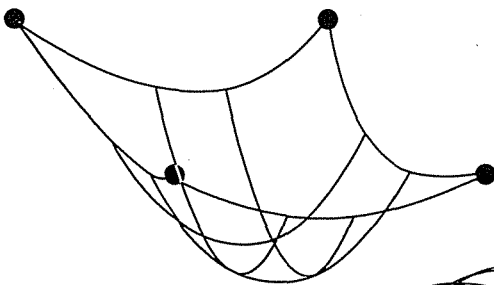
Major types of boundary design in the funicular thrust lattice

Geschlossener ebener Randschnitt / Closed flat boundary cut



Bei geschlossenem Rand mit geradlinigen Seiten werden die Randmaschen angeschnitten. Der Randschnitt wird auf Horizontalbiegung beansprucht  
In the closed boundary type with rectilinear sides the boundary meshes have to be truncated. The flat edge is subjected to horizontal bending

Offener Maschenbogen-Rand / Open mesh arch boundary

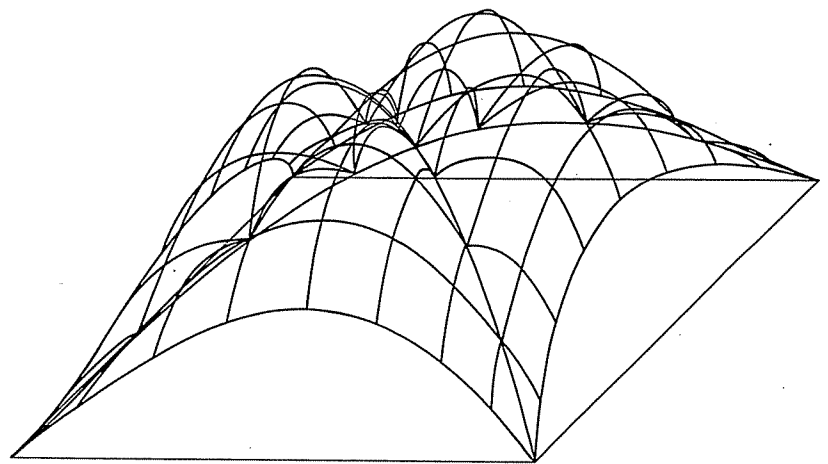
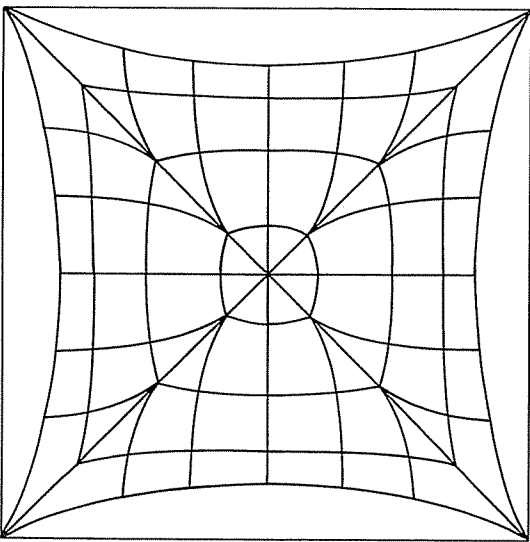
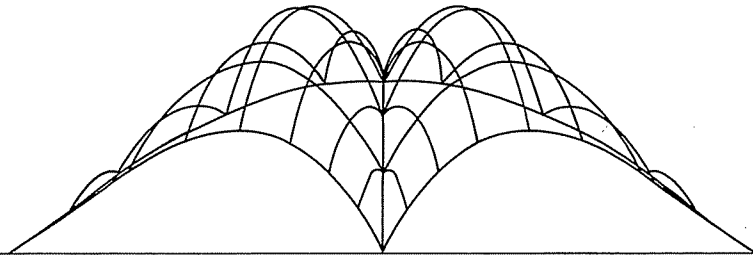
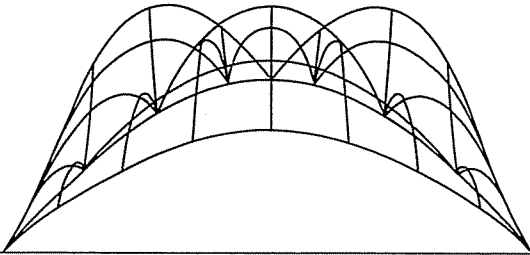


Bei offenem Rand bildet ein Maschenbogen den Abschluß. Er ist nach innen geneigt zur Aufnahme des Gitterschubes und wird nur auf Druck belastet  
In the open boundary type a mesh arch forms the edge. It is inclined inwardly for receiving the lattice thrust and is subjected to compressive stresses only

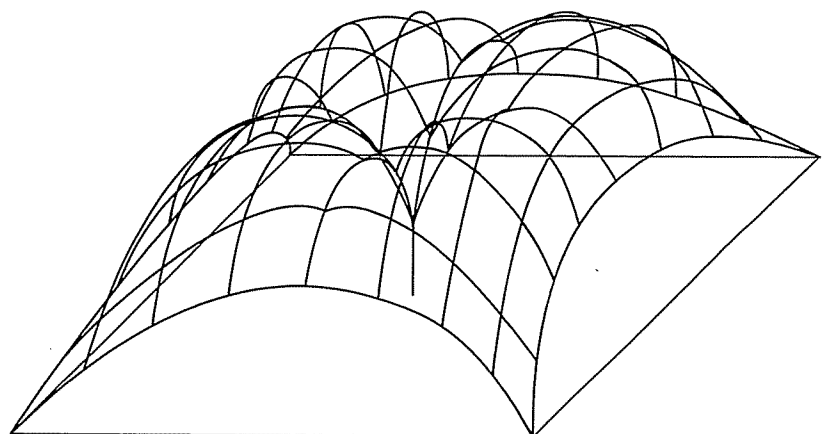
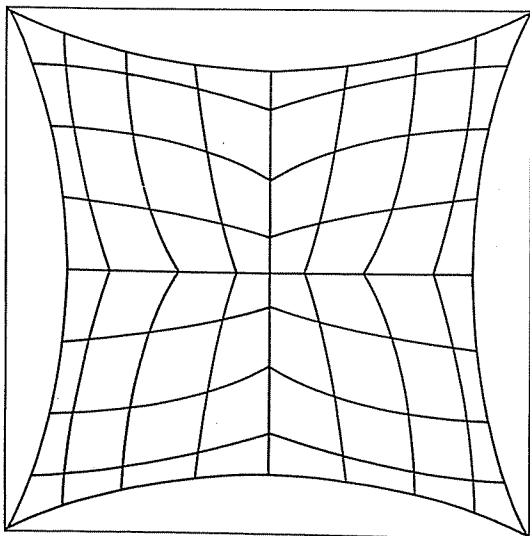
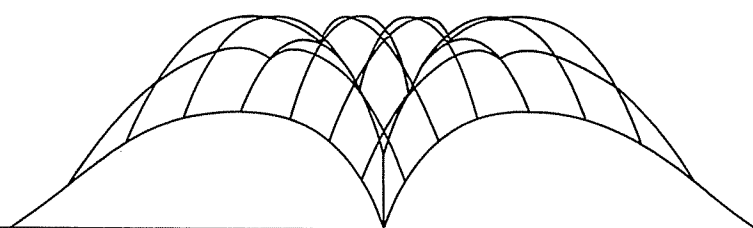
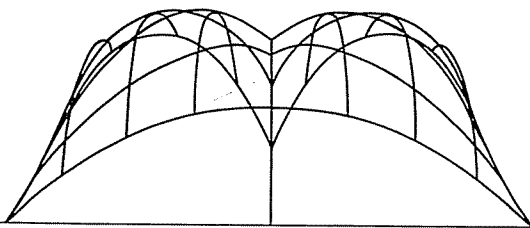


Stützflächen-Geometrie bei veränderter Lastabtragung

Geometry of thrust surface with altered load transfer



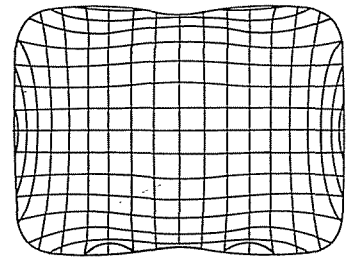
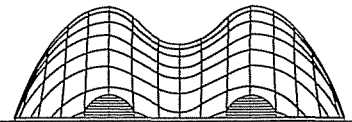
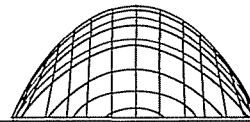
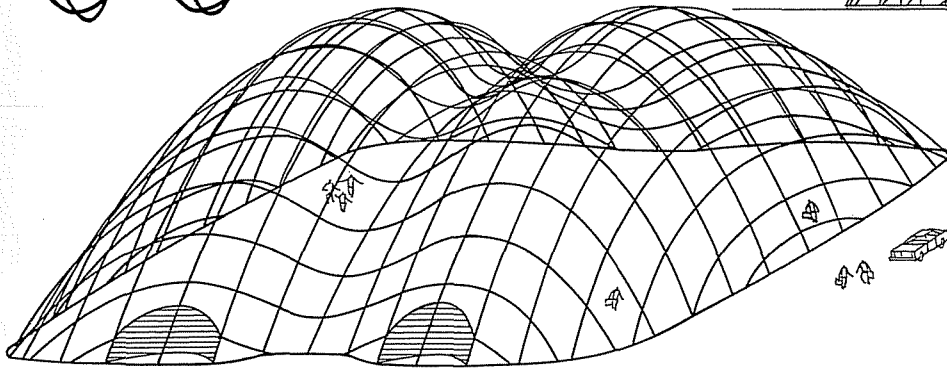
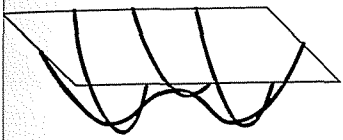
Zusätzliche Lastenabtragung über Diagonalbögen  
Additional load transfer through diagonal arches



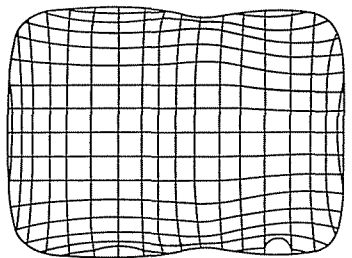
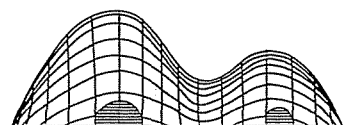
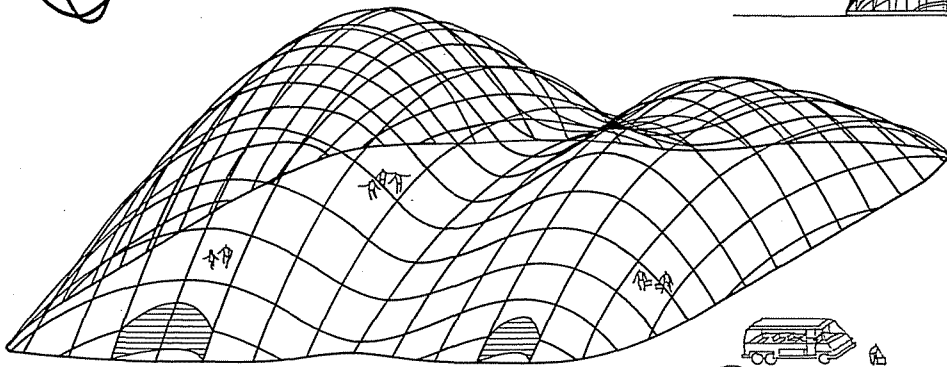
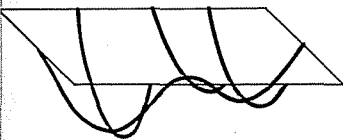
Zusätzliche Lastenabtragung über Mittelstütze  
Additional load transfer through center support

Stützgitter-Systeme mit ebennem Randschnitt-Abschluß  
gegliedert durch Flächen-Einschnürung

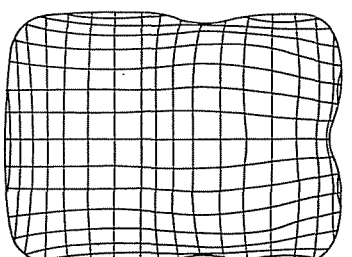
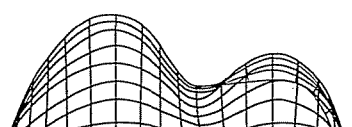
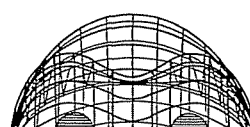
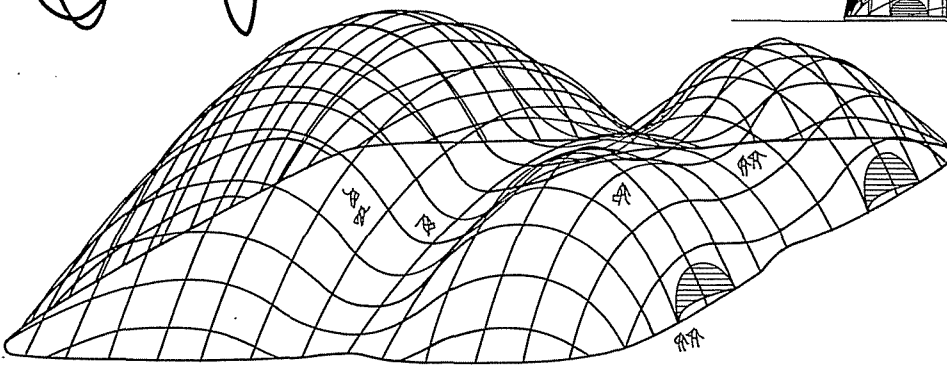
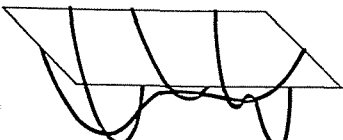
Thrust lattice systems with level-cut edge definition  
articulated through surface indentation



Mittige Einschnürung der Stützfläche  
Central indentation of thrust surface



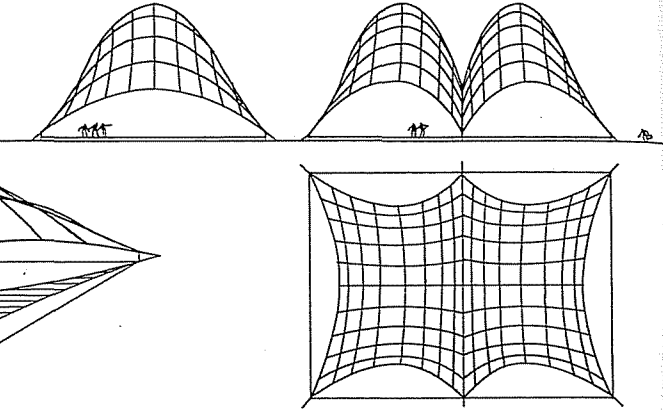
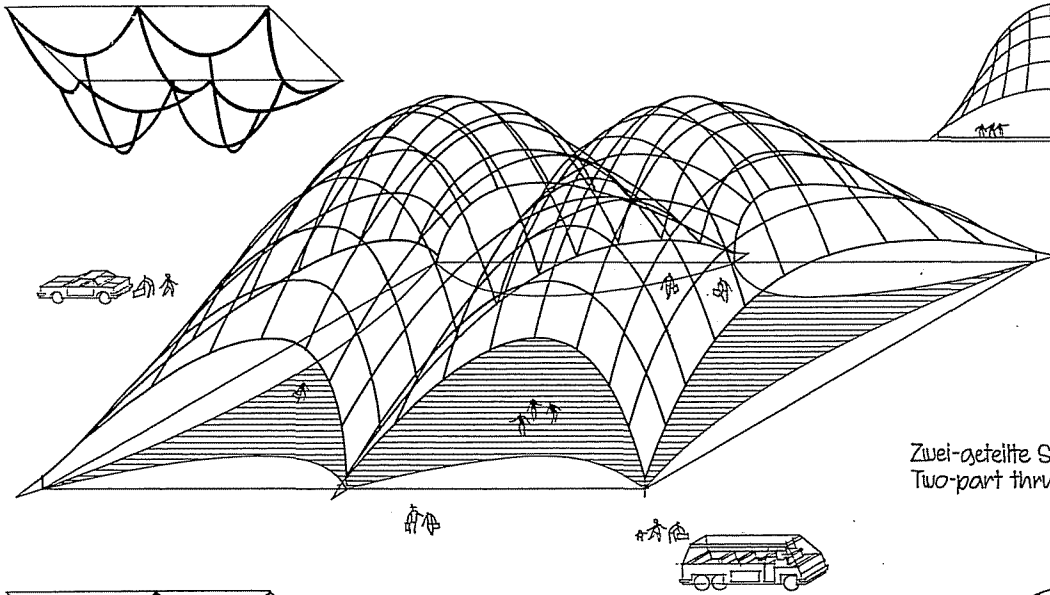
Außer mittige Einschnürung der Stützfläche  
Off-center indentation of thrust surface



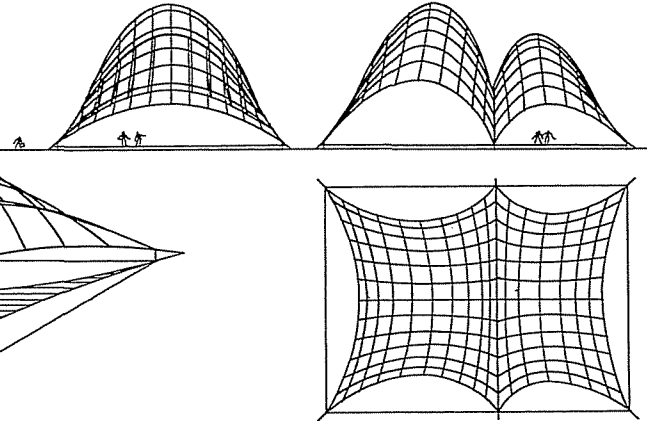
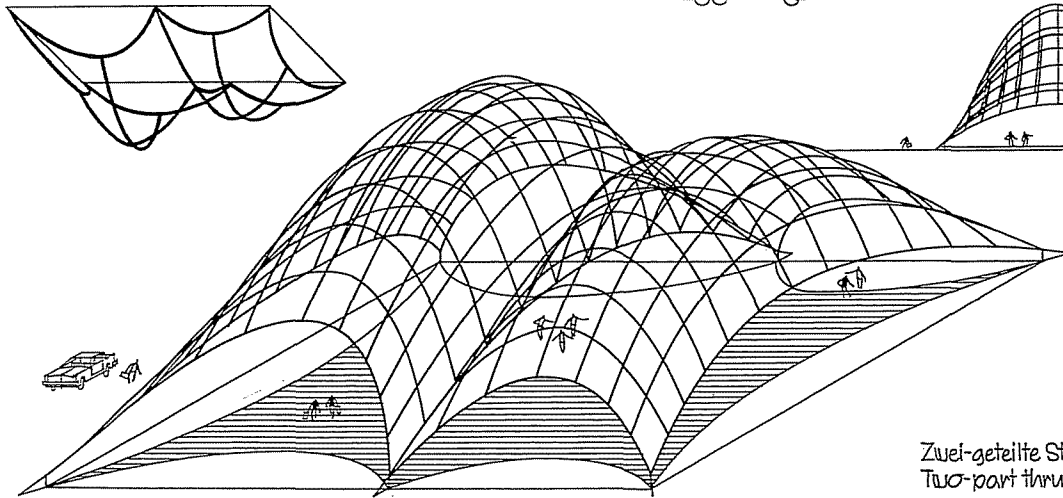
T-förmige Einschnürung der Stützfläche  
T-shaped indentation of thrust surface

Stützgittersysteme mit Maschenbogen als Randabschluß  
und als Gitter-Unterteilung

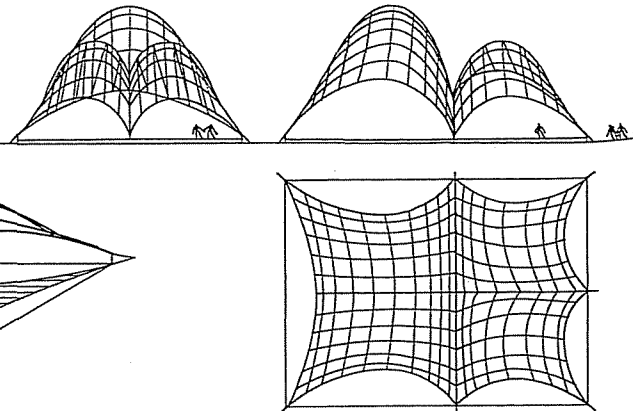
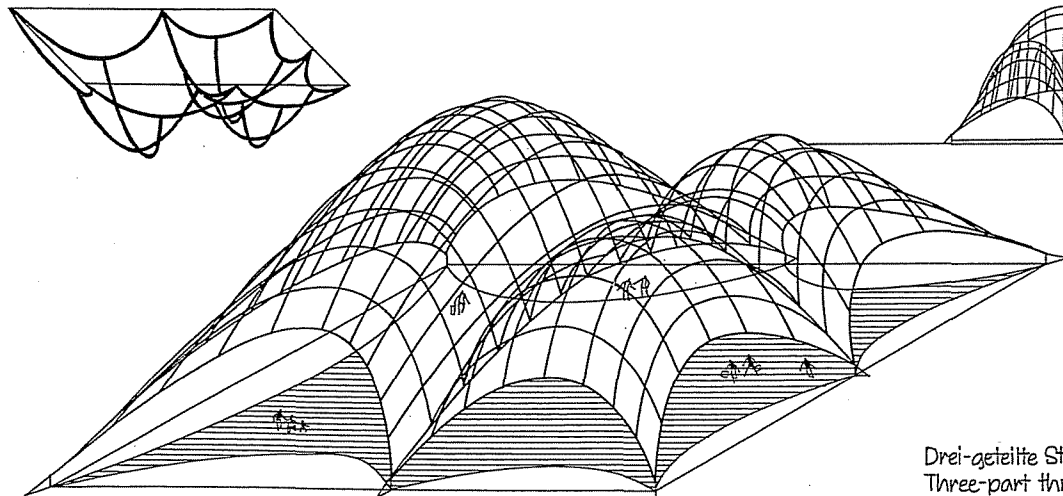
Thrust lattice systems with mesh arch as edge definition  
and as lattice subdivision



Zwei-geteilte Stützgitter-Fläche in symmetrischer Anordnung  
Two-part thrust lattice surface in symmetrical disposition



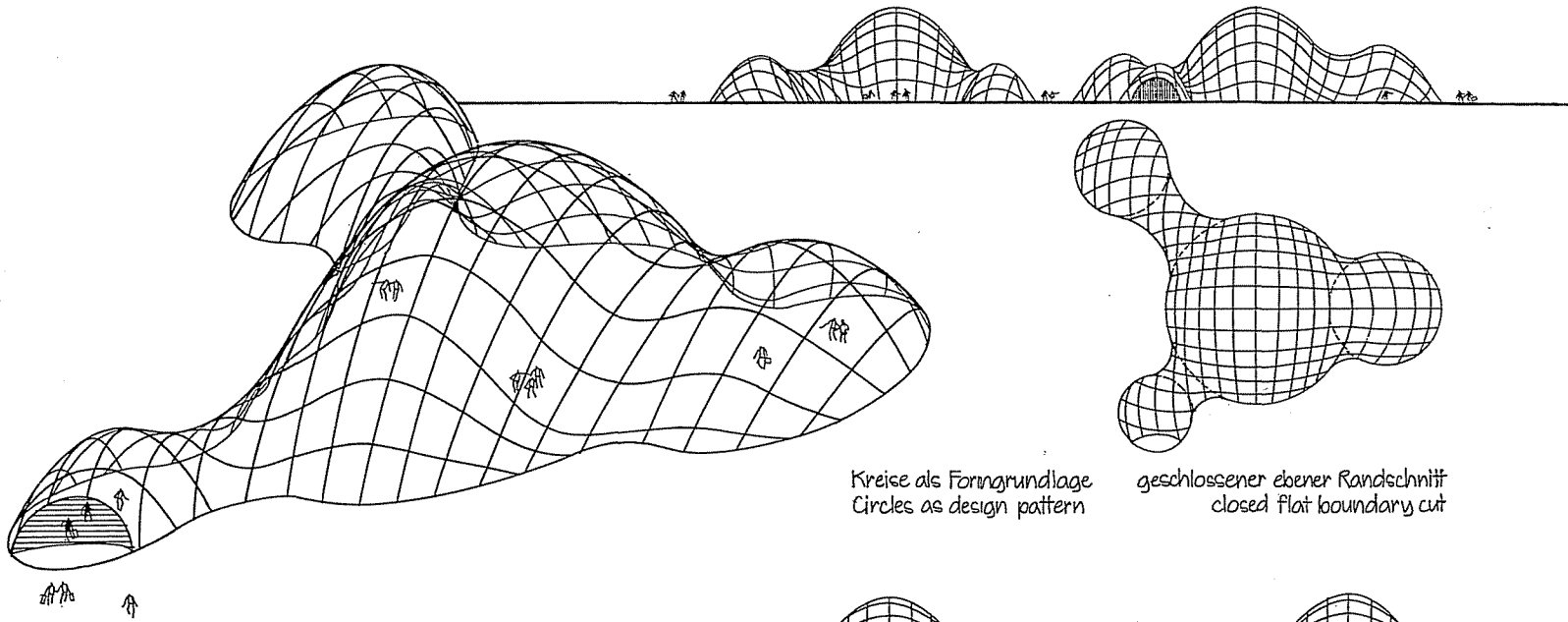
Zwei-geteilte Stützgitter-Fläche mit ungleichen Einzelflächen  
Two-part thrust lattice surface with unequal component parts



Drei-geteilte Stützgitter-Fläche in T-förmiger Anordnung  
Three-part thrust lattice surface in T-shape disposition

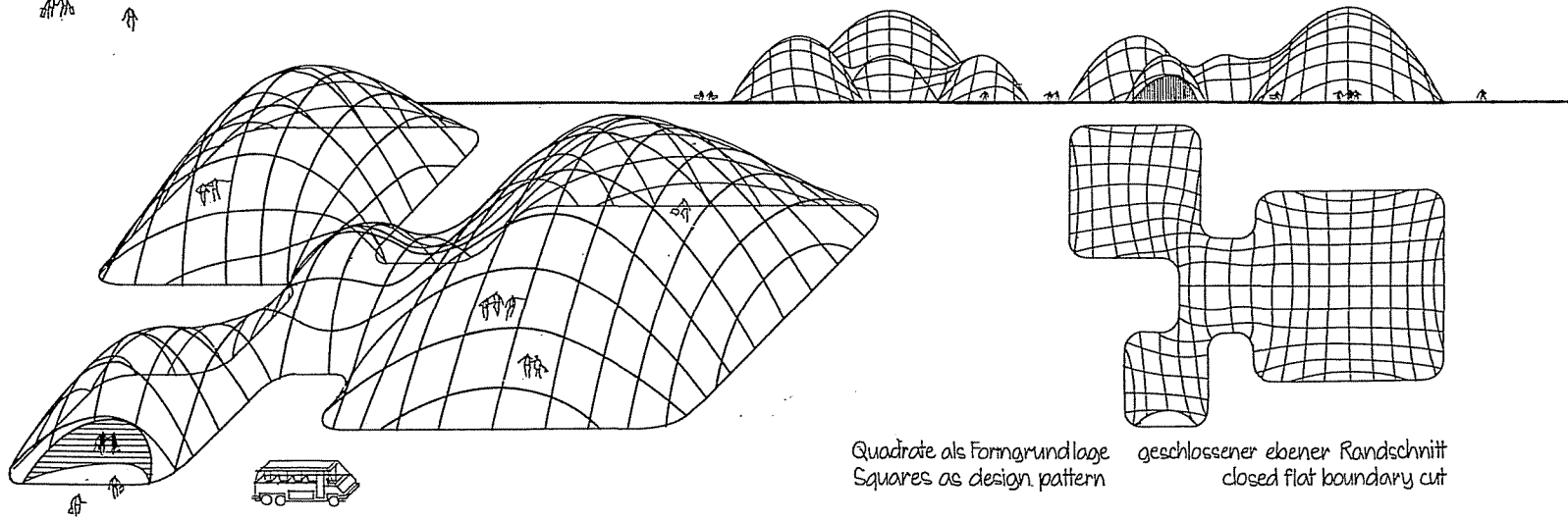
Stützgitter-Systeme für unregelmäßige Grundrißgestaltung

Thrust lattice for free-form design of floor plan



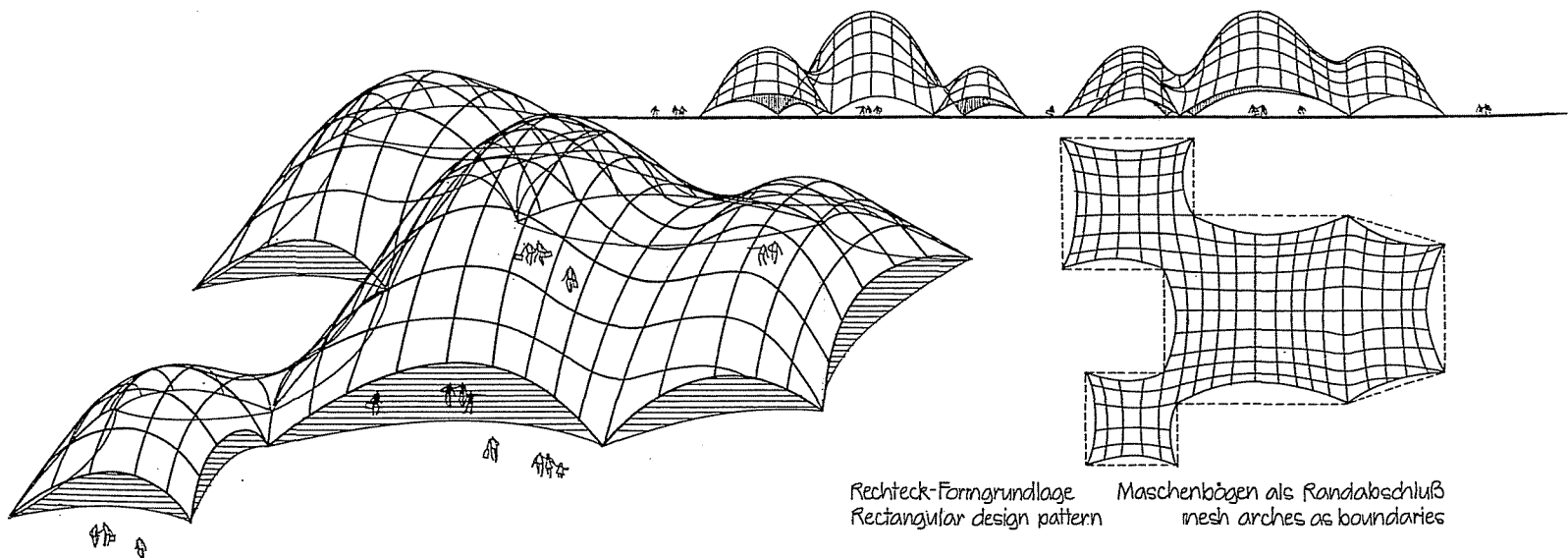
Kreise als Formgrundlage  
Circles as design pattern

geschlossener ebener Randschnitt  
closed flat boundary cut



Quadrate als Formgrundlage  
Squares as design pattern

geschlossener ebener Randschnitt  
closed flat boundary cut



Rechteck-Formgrundlage  
Rectangular design pattern

Maschenbögen als Randschluß  
mesh arches as boundaries