

# Lexikon

*Zelt*

*s t a t i k m o b i l*

**Alphabetisch** geordnet findet ihr hier Informationen, die euch beim Bearbeiten der einzelnen Aufgaben helfen.

**WICHTIG:** Alle in **Grau** gehaltenen Begriffe sind unter dem jeweiligen Anfangsbuchstaben zu finden und ebenfalls beschrieben.

!!! Bitte NICHT ins Lexikon schreiben !!!

---

## Aa

### **Abspannanker (Erdanker)**

Fixiert die Abspannseile, Rückhalteseile unter der Erdoberfläche.

### **Ankerpunkt (Abspannpunkt)**

Ist jene Stelle, an der eine Verankerung im Boden eine Konstruktion sichert.

### **Ankerpunktabstand**

Ist der Abstand zwischen den Ankerpunkten.

### **Ankerring**

Meist kreisförmig angeordnete Verankerung.

## Bb

### **Baustoff**

Die in Frage kommenden Baustoffe werden unterteilt in isotrope und anisotrope Stoffe.

- **Isotrope Stoffe** weisen in alle Richtungen die gleiche Festigkeit und Dehnung auf (z.B.: Kunststofffolien, Vliese, Gummihäute, Metallfolien)
- **Anisotrope Stoffe** dagegen besitzen orientierte Eigenschaften, lassen sich z.B.: dehnen sich nur in eine Richtung (z.B.: Gewebe, Gitterfolien).

In Zelltragwerken werden vorwiegend anisotrope Baustoffe verwendet.

## **Gewebe**

Als lastabtragendes Trägermaterial für Membranen eignen sich besonders die *Gewebe*. Ein Gewebe ist dadurch gekennzeichnet, dass die Fäden im gespannten Zustand orthogonal (rechtwinkelig) zueinander stehend verwebt sind.

Da die Querschnitte der Fäden sehr dünn sein können, hat sich im Textilbau statt  $\text{N/mm}^2$  als **Spannungseinheit  $\text{N/5cm}$**  zur Beschreibung der Materialfestigkeit durchgesetzt (Newton pro 5 cm).

Ob sich ein Werkstoff als Fasermaterial für weitgespannte Membrantragwerke eignet, wird nach der **Reißlänge** des Materials beurteilt.

Als **Reißlänge** bezeichnet man **das Verhältnis von Eigengewicht eines Materials zu seiner Zugfestigkeit**.

Sie gibt die ungedehnte Länge eines fiktiv an einem Ende aufgehängten prismatischen Stabes in Kilometer an. Die durch die Herstellung charakteristische Welligkeit des Kettfadens kann durch Vorspannung verringert werden, um somit eine höhere Steifigkeit und eine geringere Bruchdehnung zu erlangen. Durch unterschiedliche Einstellparameter beim Webvorgang können nahezu gleiche oder extrem unterschiedliche mechanische Kennwerte in beiden Hauptrichtungen erzeugt werden.

Reißlängen unterschiedlicher Materialien:

<i>Stahl</i>	<i>25 km</i>
<i>Baumwolle</i>	<i>48 km</i>
<i>Polyamid</i>	<i>89 km</i>
<i>Polyester</i>	<i>94 km</i>
<i>Glas</i>	<i>140 km</i>
<i>Aramid</i>	<i>190 km</i>

## **Eigenschaften:**

Eigenschaften wie z.B. die *Weiterreißfähigkeit* und die *Dauerknickbeständigkeit* können durch eine aufgetragene Beschichtung oder durch Oberflächenversiegelung beeinflusst werden.

Eine beidseitige Beschichtung (Coating), schützt das Gewebe vor *Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Feuer, Mikroben- und Pilzbefall*. Man kann somit das *Anschmutzverhalten*, die *Lebensdauer* und gegebenenfalls die *Brandeigenschaften* des Rohmaterials deutlich verbessern. Durch Beschichtungen sind *Farbgebungen* der Membran, sowie eine dauerhafte *Wasserdichtigkeit* möglich.

Der Kettfaden ist der Faden in Bahn- bzw. Herstellungsrichtung, er hat durch das Vorspannen beim Herstellungsprozess meist eine höhere Steifigkeit und eine geringere Dehnung als der Schussfaden, der orthogonal dazu verwebt ist.

## Fasereignung

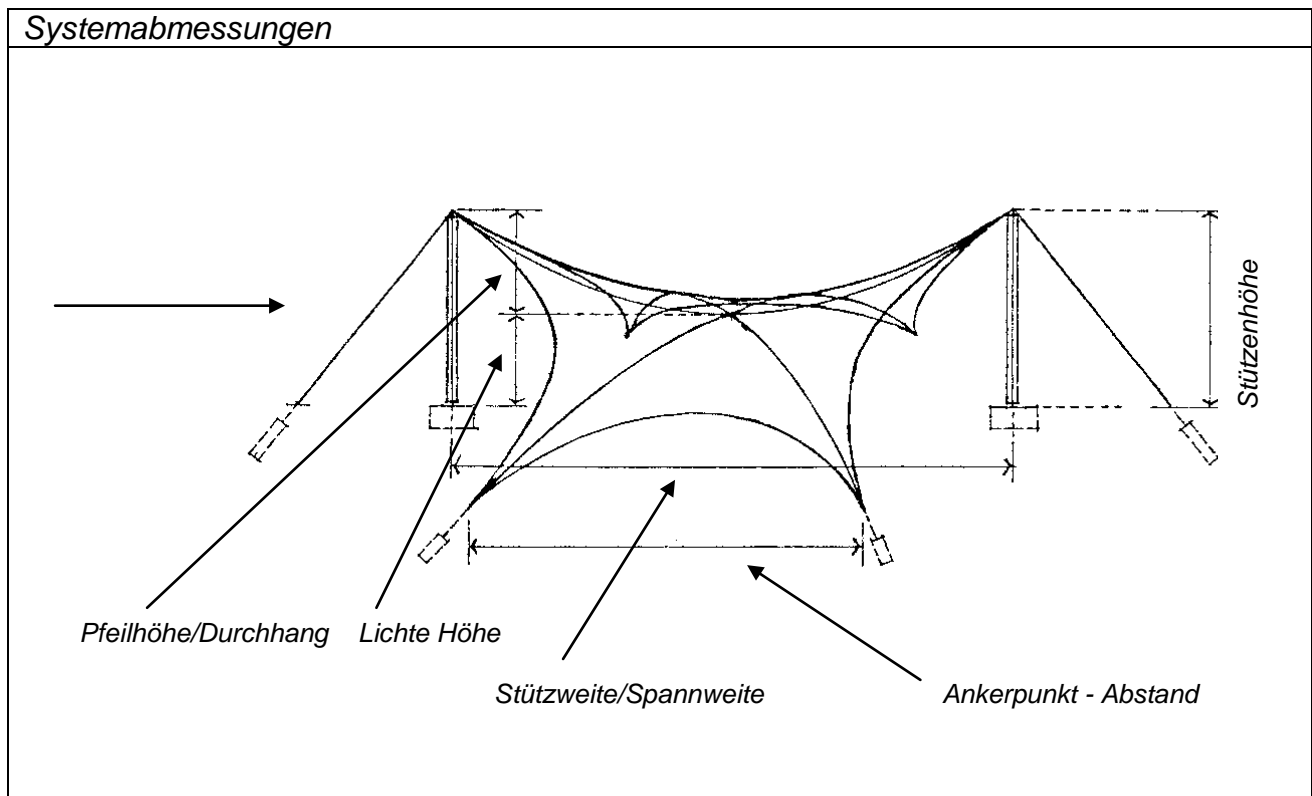
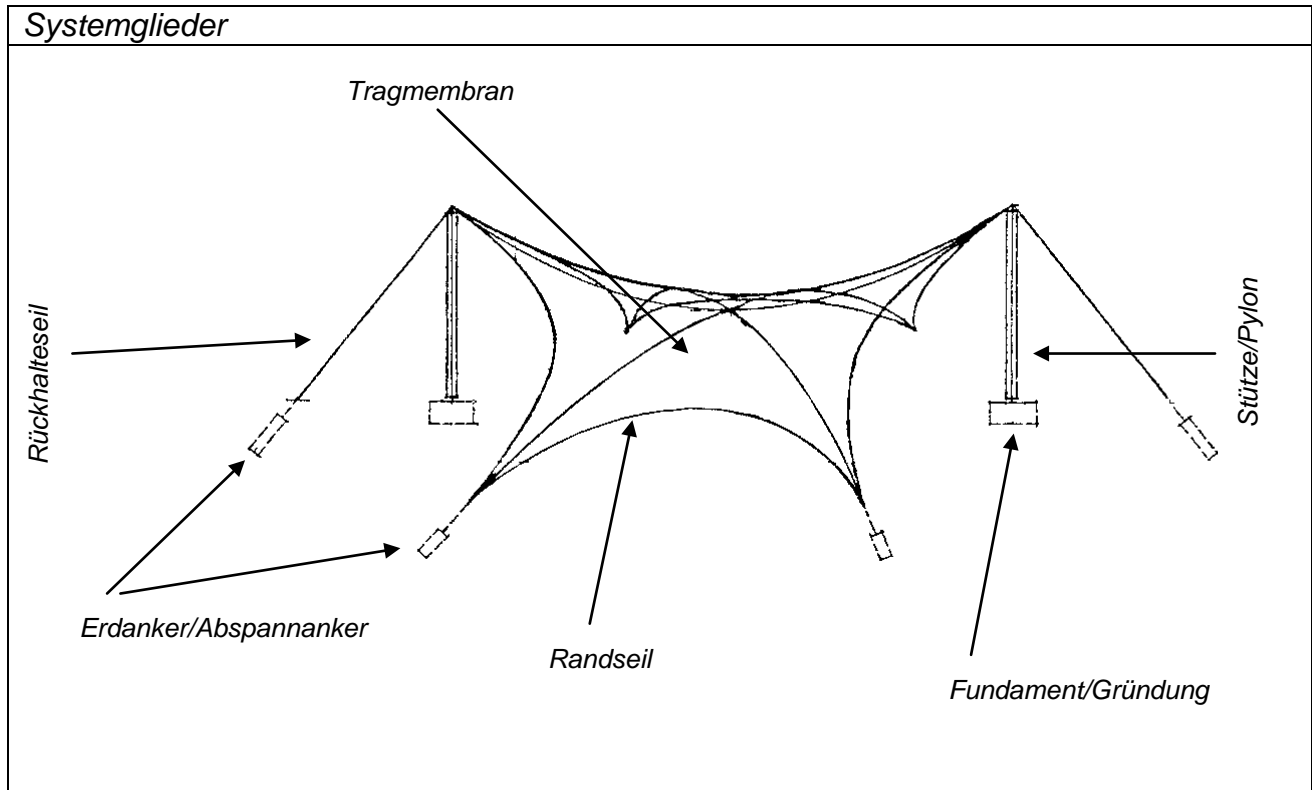
Für die Einschätzung, ob sich ein Werkstoff als Fasermaterial eignet, kann man seine *freie Reißlänge* heranziehen. Die freie Reißlänge ist die ungedehnte Länge eines fiktiv an einem Ende aufgehängten prismatischen Stabes in Kilometern, die möglich ist, ohne dass der Stab an seinem oberen Ende abreißt.

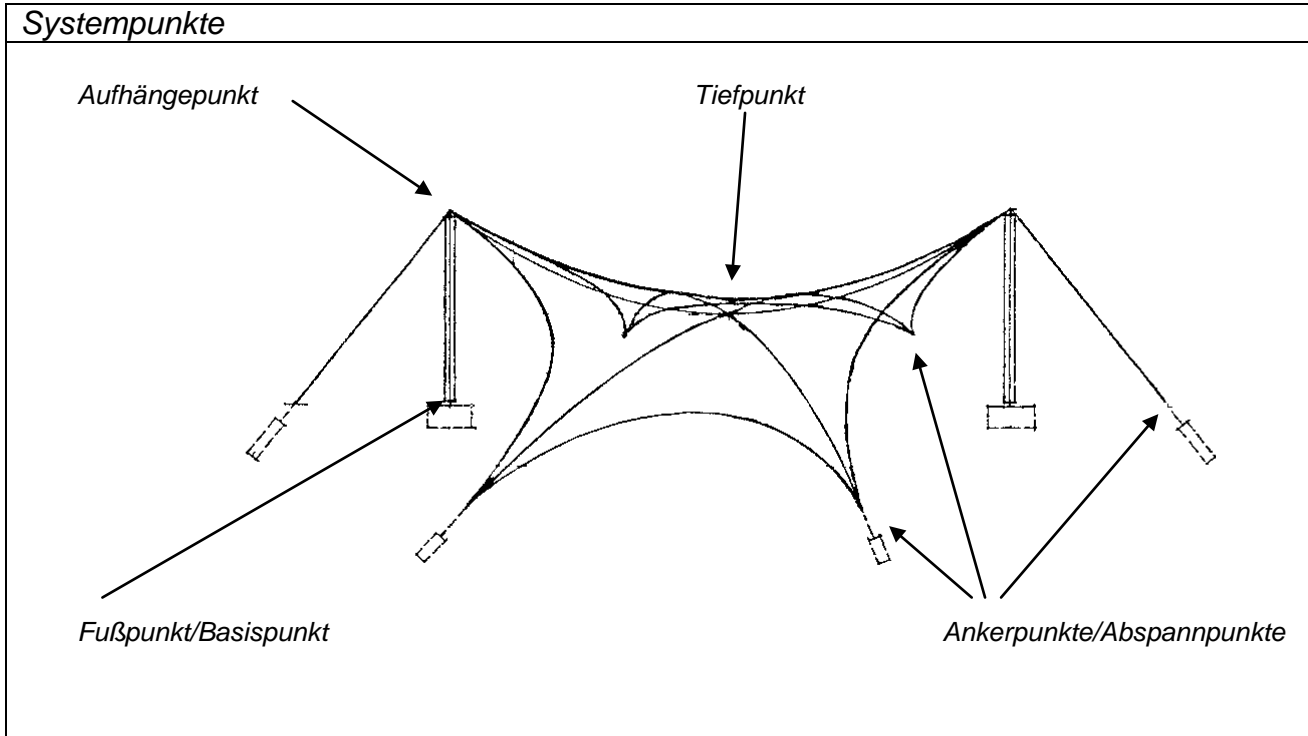
## Verwendete Membranmaterialien im Außenbereich

- einfache Membrane:	Polyestergewebe, PVC-beschichtet, Lackierung zur Verbesserung der Langzeiteigenschaften wasserfest, durchscheinend, Lebensdauer ca. 15-20 Jahre, Rollenmaterial zwischen 7-13 €/m <sup>2</sup>
- hochwertige Membran:	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet, wasserfest, nimmt keinen Schmutz an, durchscheinend, Lebensdauer mind. 30 Jahre, Rollenmaterial ca. 60-90 €/m <sup>2</sup> PTFEGewebe, UV-stabil, wird auch für Raumanzüge von Astronauten verwendet, hohe Lichtqualität, Lebensdauer mind. 30 Jahre, innert gegen äußere Angriffe, Rollenmaterial ca. 65-100 €/m <sup>2</sup>
- neuere und besondere Membrankonstruktionen:	Glasfasergewebe, Silikon-beschichtet, (z.B. Sikabran) wasserfest, durchscheinend, im Brandfall entstehen keine toxisch wirkenden Produkte, Lebensdauer mind. 20-30 Jahre, Rollenmaterial ca. 17-25 €/m <sup>2</sup> , unter ökologischen Aspekten ein Material mit Zukunft, Polyestergewebe, Silikon-beschichtet wasserfest, durchscheinend, Lebensdauer ca. 15-20 Jahre, Rollenmaterial zwischen 17-25 €/m <sup>2</sup> Aramidgewebe, PVC-beschichtet, Sonderanfertigung, nicht transluzent,
- stark durchscheinendes Material:	Glasfaser-Gittergewebe mit beiseitiger ETFE-Folie, wasserfest, nimmt keinen Schmutz an, optischer Eindruck ähnlich Drahtgitterglas, Lebensdauer ca. 25 Jahre, Rollenmaterial ca. 65-75 €/m <sup>2</sup>
- voll transparentes Material:	ETFE-Folie ohne eingearbeitete Armierung, bei Spannweiten ab ca. 1 m mit Seilnetz zur Unterstützung, wasserfest, nimmt keinen Schmutz an, optisch voll transparent, kann bedruckt werden um Verschattung mit optischen Gittern zu erzeugen, Lebensdauer ca. 25 Jahre, Rollenmaterial ca. 25–35 €/m <sup>2</sup>
- Gittermembran:	feinmaschiges Polyestergittergewebe, mit PVC-ummantelung der Fäden, geeignet für Werbetransparente und Markisen, Rollenmaterial 4 - 10 €/m <sup>2</sup> grobes offenmaschiges Polyestergewebe, mit PVC-ummantelung der Fäden, geeignet für sehr leichte Schättendächer oder Rankhilfen, Rollenmaterial 6,50-9 €/m <sup>2</sup> offenmaschiges Glasfasergewebe, geeignet für mechanisch gespannte Schattendächer, Rollenmaterial 40-65 €/m <sup>2</sup> Metallgitter 75-250 €/m <sup>2</sup>
- Naturfasergewebe wie Baumwolle oder Leinen:	sind im Textilien Bauen seit den 60er Jahren vollständig von PVC-Plane verdrängt. Nachteil ist die fehlende Wasserfestigkeit (Wasseraufnahme bis zu 50% des Eigengewichts) und die überaus hohe UV-Anfälligkeit (Zerfall in ganzjähriger Freibewitterung in 3 bis 5 Jahren).

Ff

# Bauteile und Bezeichnungen





## Ff

### Formaktive Tragsysteme

Sind Systeme aus flexibler, nicht steifer Materie, in denen die Kraftumlenkung durch geeignete Formgebung und charakteristische Formstabilisierung erfolgt.

Der Tragmechanismus beruht vorwiegend auf stofflicher Form. Die Strukturform entspricht im Idealfall genau dem Kräfteverlauf.

Die „natürliche“ Kräftelinie des formaktiven Drucksystems ist die Stützlinie, die des formaktiven Zugsystems die Hängelinie (Kettenlinie).

Sie lenken äußere Kräfte durch einfache Normalkräfte (Druck, Zug) um und sind somit Systeme in einfachen Spannungszuständen (Druck, Zug).

Formaktive Tragsysteme entwickeln an ihren Festpunkten horizontale Kräfte.

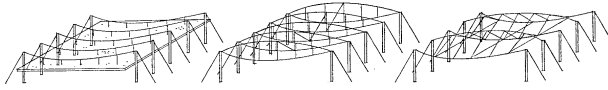
Wegen dieser Übereinstimmung mit den natürlichen Kraftverläufen eignen sich formaktive Tragsysteme ausgezeichnet für große Spannweiten in der Raumüberspannung.

Man unterscheidet **Seil** -, **Zelt** -, **Pneu** - und **Bogen** – Tragwerke.

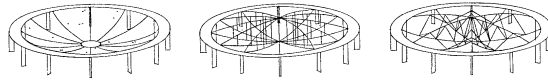
# Arten formaktiver Tragwerke

## 1.1 Seil-Tragwerke

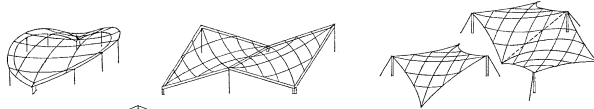
Parallele Spannsysteme



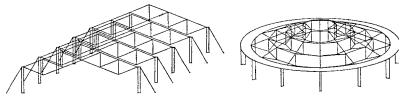
Radiale Spannsysteme



Zwischelagige Spannsysteme



Seil-Fachwerke



## 1.2 Zeit-Tragwerke

Hochpunkt-Zeltsysteme



Wellen-Zeltsysteme



Indirekte Hochpunkt-Zelte

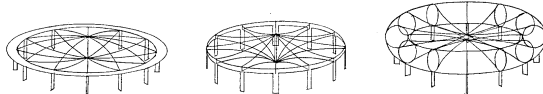


## 1.3 Pneumatische Tragwerke

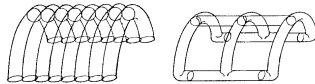
Luftkissen-Systeme



Luftkissen-Systeme



Luftschlauch-Systeme

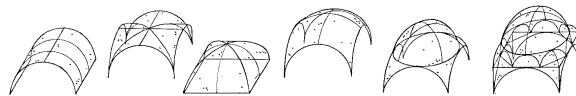


## 1.4 Bogen-Tragwerke

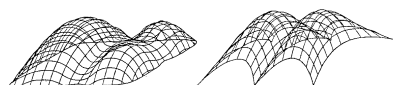
Lineare Systeme



Gewölbe-Systeme



Schwälgitter-Systeme



# Aufbau und Bestandteile formaktiver Tragwerke

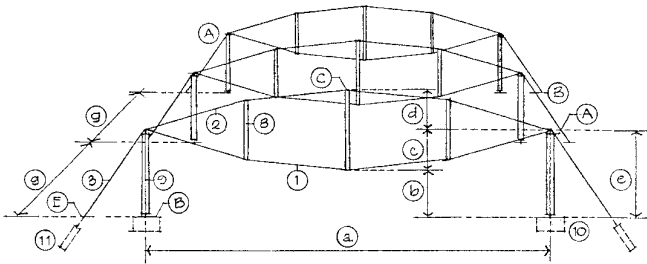
**Definition** FORMAKTIVE TRAGSYSTEME sind Tragsysteme aus flexibler, nicht-steifer Materie, in denen die Kraftumlenkung durch geeignete FORMGEBUNG und durch charakteristische FORMSTABILISIERUNG erfolgt

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

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

## Bestandteile und Bezeichnungen

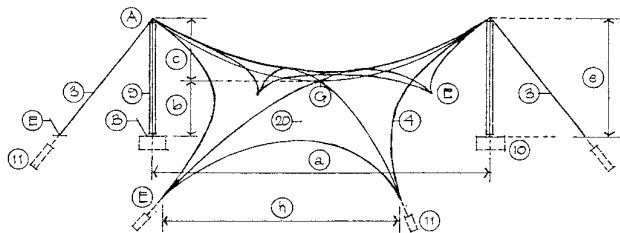
### 1.1 Seilsysteme



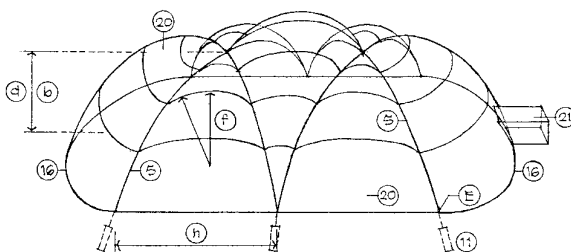
#### System-Glieder

- ① Tragseil, Lastseil
- ② Stabilisierungsseil, Spannseil
- ③ Rückhalteseil, Abspannseil, Stag
- ④ Randseil
- ⑤ Kehlseil
- ⑥ Hängeseil
- ⑦ Zugband, Zuganker
- ⑧ Druckstab, Spreizstab
- ⑨ Stütze, Fylon, Mast
- ⑩ Fundament, Gründung
- ⑪ Erdanker, Abspannanker
- ⑫ Widerlager
- ⑬ Crelenk
- ⑭ Scheitelgelenk
- ⑮ Fußgelenk, Kämpfergelenk
- ⑯ Ankerring
- ⑰ Bogen, Stützbogen
- ⑱ Crelenkbogen
- ⑲ Strebe Pfeiler
- ⑳ Tragmembrane
- ㉑ Luftschleuse
- ㉒ ①-③ Funktionsseile

### 1.2 Zeltsysteme



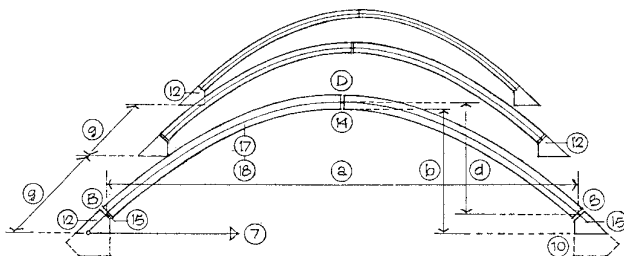
### 1.3 Pneusysteme



#### Topografische Systempunkte

- A Aufhängepunkt
- B Fußpunkt, Basispunkt
- C Hochpunkt
- D Scheitelpunkt
- E Ankerpunkt, Abspannpunkt
- F Auflagerpunkt
- G Tiefpunkt
- H
- I

### 1.4 Bogensysteme



#### Systemabmessungen

- a Stützweite, Spannweite
- b Lichte Höhe
- c Durchhang, Pfeilhöhe
- d Stich (-höhe), Pfeilhöhe
- e Stützenhöhe
- f Krümmungsradius
- g Binderabstand
- h Ankerpunkt-Abstand
- i
- j

## Formfindung

Leichte und weit spannbare Flächentragwerke werden nicht in der gewohnten Weise entworfen. Ihre Formen und Konstruktionen entstehen in einem Prozess, der sich in wesentlichen Punkten von dem konventioneller Bauwerke unterscheidet. Dessen Kernstück ist die *Formfindung*. Sie tritt an die Stelle des zeichnerischen Entwerfens und Gestaltens, ohne diese Vorgehensweise generell überflüssig zu machen.

Wichtigste Parameter der Formfindung sind das Modell - Medium und die Formbildungsgesetze, die je nach Bauart unterschiedlich sind und auf physikalischen Grundlagen beruhen.

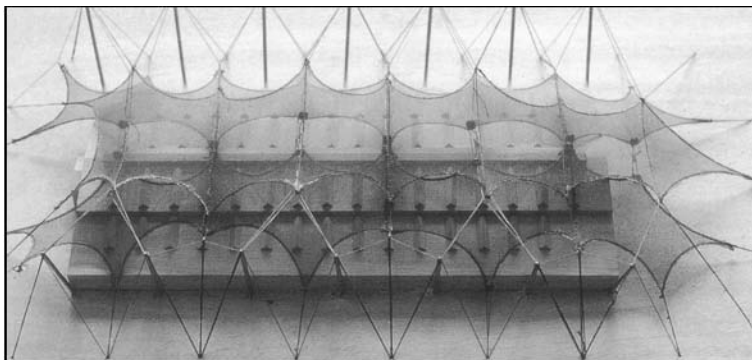
In der Formfindung für Zelltragwerken wird unter **Analogmethoden** und **Rechengestützten Methoden** unterschieden.

### 1) Analogmethoden - Analogiemodelle

Der Begriff Analogmethoden steht für die **experimentellen Verfahren** zur Formfindung. Diese Methoden setzen in ihrer Analogiebildung auf ein physikalisches Modell, das spezifisch für den jeweiligen Fall gewählt wird. Ein Analogiemodell folgt, im Gegensatz zu rechengestützten Methoden, bestimmten Gesetzmäßigkeiten, die auch als „Naturgesetze“ bezeichnet werden können. Dadurch lässt sich eine Form oder eine Gruppe von Formen entwickeln, deren Eigenschaften dann auf das Bauwerk übertragbar sind.

#### a) Strumpfmodelle

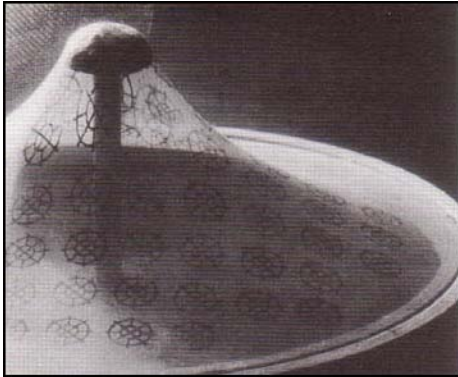
Strumpfmodelle sind sehr leicht zu fertigende Vormodelle, an denen eine Entwurfsvariante erarbeitet werden kann. Die sich ergebenden Formen sind durch das hochelastische Nylon zwar unrealistisch, spiegeln jedoch die Verteilung der Spannungen gut wieder



Nylonstrumpfmodell (Karin Hirsch)

## b) Gummimodelle

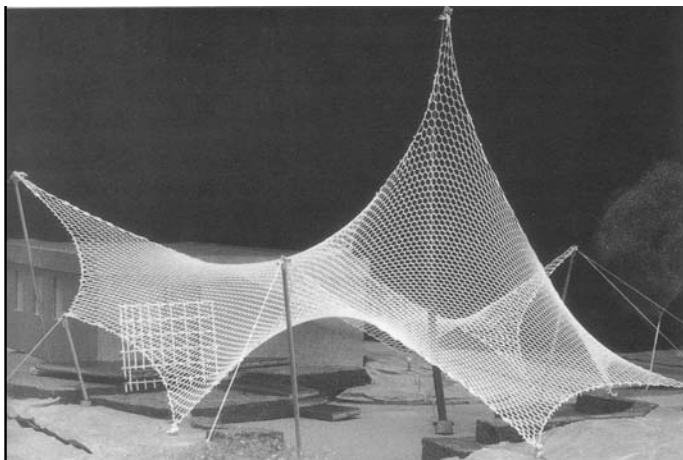
Gummimodelle sind vorgespannte Gummimembranen. Der Vorspannungsgrad muss so groß sein, dass die durch Verformung der ursprünglichen ebenen Membran entstehenden Zusatzspannungen gegenüber dem Vorspannungszustand vernachlässigbar klein sind. Man hat dann eine verformte Fläche, in der die Membranschnittlasten näherungsweise aus, in allen Richtungen gleich großen, Membrannormalkräften bestehen, und somit näherungsweise die zugehörige Minimalfläche.



*Minimalflächenversuch mit vorgespannter Gummimembran*

## c) Tüllmodelle

Tüllmodelle werden in Sechsecktüll- und Gittertüllmodelle unterteilt. Mit Hilfe von Sechsecktüll ist es möglich in einem nächsten Schritt nach erfolgter Formfindung die Form zu beurteilen. Aus der Form der Sechseckmaschen lassen sich die Hauptspannungen und ihre Richtungen ablesen. Gittertüllmodelle spielen erst in der letzten Phase des Entwurfs eine Rolle, wenn die gefundene Form vor der Umsetzung in eine gebaute Form steht. Der Gittertüll wird analog zu dem verwendeten Material eingebaut.

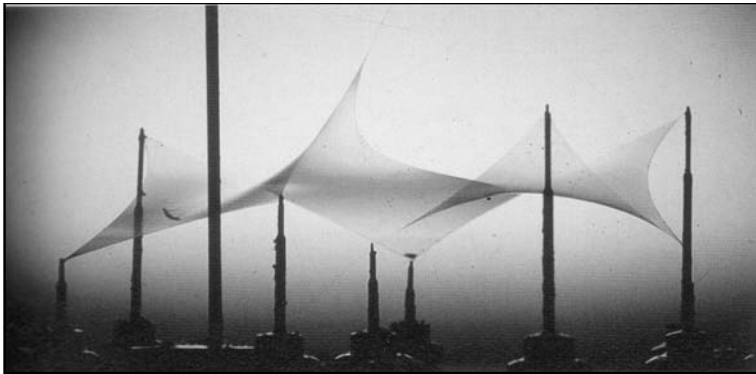


*Gittertüllmodell (Siegfried Gaß)*

#### d) Seifenhautmodelle

Der belgische Physiker Joseph Antoine Ferdinand Plateau (1801 - 1883) erkannte, dass sich in jede beliebige Kontur eines Drahtrahmens wenigstens eine Seifenhautlamelle spannen lässt, wie kompliziert ihre geometrische Form auch immer sein mag.

Diese Modelle sind tatsächliche Formgenerierungsmodelle, mit denen sich fast beliebige Formen erzeugen lassen. Die Seifenhautanalogie stellt einen idealisierten Bildungsprozess von Membranflächen (auch Pneus) dar. Innerhalb der Größenordnungen von ca. 1 m<sup>2</sup>, die für die experimentelle Formfindung mehr als ausreichend sind, lässt sich das Eigengewicht vernachlässigen. Seifenhäute befinden sich in einem homogenen, isotropen, das heißt an jeder Stelle und in jeder Richtung gleichen, Spannungszustand. Diese Besonderheit der Seifenhaut hat sie schon in früherer Zeit als Modell für mathematische Untersuchungen der Minimalfläche geeignet erscheinen lassen.



*Seifenhautmodell für Membranbau (Siegfried Gaß)*


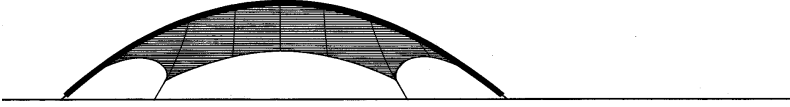
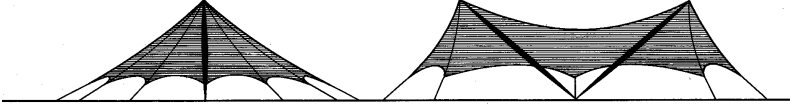

#### 2) Rechnergestützte Methoden

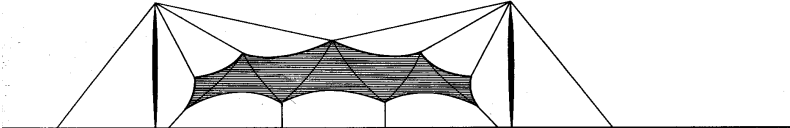
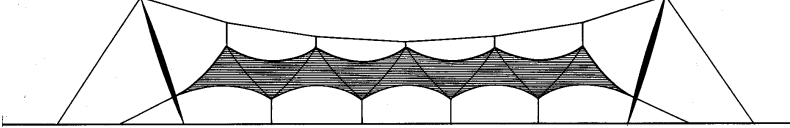
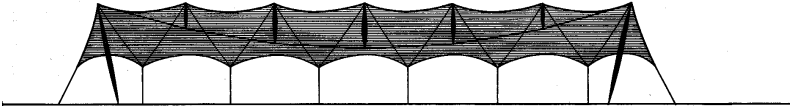
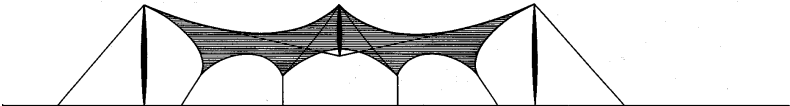
Rechnergestützte Methoden basieren auf einem Minimierungs- und Optimierungsansatz.

Man unterscheidet zwischen der **Matrix-** und die **Vektor-Methode**. Beide versuchen die Berechnung durch Iteration zu lösen.

# Hh

## Hochpunkt

Direkte Konstruktionssysteme für Hochpunkte	
	<i>Außenstützen für peripherisch angeordnete Hochpunkte</i>
	<i>Innenbogen für axial angeordnete Hochpunkte</i>
	<i>Innenstützen für mittig angeordnete Hochpunkte</i>
	<i>Außenstütze für mittig angeordnete Hochpunkte</i>

indirekte Konstruktionssysteme für Hochpunkte	
	<i>Außenstützen mit Abspannseilen für mittig angeordnete Hochpunkte</i>
	<i>Außenstützen mit Trageseil für Abhängung von mittig angeordneten Hochpunkten</i>
	<i>Innenstützen mit Trageseil für Unterstützung von mittig angeordnete Hochpunkte</i>
	<i>Außenstütze für peripherische Hochpunkte mit Abspannseil für zusätzlich mittig angeordnete Hochpunkte</i>

# Mm

## Membran

**die Membran** und **Membrane** [lateinisch: zarte, dünne Haut]<sup>1</sup>  
bezeichnet eine biegeeweiche, lediglich zugbeanspruchbare Haut

## Membraneigenschaften

Membrane sollen bei **geringem Eigengewicht** eine **hohe Zugfestigkeit** und **Dehnsteifigkeit** aufweisen.

Wichtig ist außerdem die dauerhafte Beständigkeit gegenüber UV-Licht, Feuchtigkeit und Mikroorganismen.

Erweiterte Anforderungen können Transluzenz (die Durchdringung von Licht) und Brandverhalten/Feuerbeständigkeit sein.

## Membranspannung

Bezeichnet die Zugspannung innerhalb der Membran.

Diese sollte gering gehalten werden

## Membrantragwerke

Leichte Membrantragwerke aus Geweben werden u.a. durch **Rand-, Spann- und Tragseile** gehalten und stabilisiert. Zudem weisen sie Ähnlichkeiten im Tragverhalten zu Seilnetzen auf (z.B. Stabilisierung durch gegensinnig doppelseitige Krümmung), da durch Kett- und Schussfäden im Gewebe wiederum Seilnetze entstehen.

*Deshalb kann das Tragverhalten von Membrantragwerken nicht ohne Betrachtung des Tragverhaltens von Seilen und Seilnetzen behandelt werden.*

## Minimalfläche

**"Die Natur macht nichts umsonst. Und jedes Mehr ist umsonst, wenn ein Weniger ausreicht."** Isaac Newton

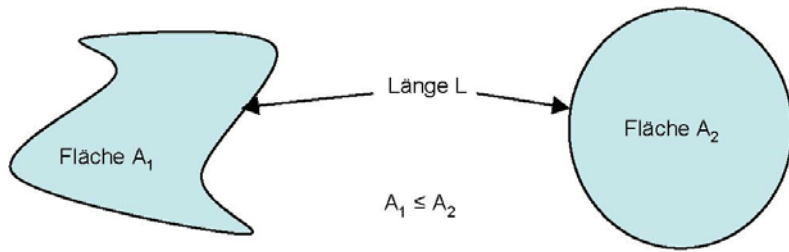
<b>Minimalfläche</b> = die <b>kleinstmögliche Oberfläche</b> bei <b>größtmöglichem Volumen</b>
---------------------------------------------------------------------------------------------------

Minimalflächen können durch Computerprogramme oder durch Analogmethoden (z.B. Seifenhautmodell) erstellt werden.

## Formbildung von Minimalflächen

Im Jahr 1743 erkannte Euler dass sich die Gesetze der Mechanik aus einem allgemeinen Minimumprinzip ableiten lassen. Ein Jahr später formulierte Pierre-Louis Moreau de Maupertuis sein *Prinzip der kleinsten Wirkung*, welches besagt, dass die Natur (z.B. die Physik) stets mit größtmöglicher Sparsamkeit verfare. Euler entwickelte das mathematische Werkzeug, um dieses Prinzip anwenden zu können: die Variationsrechnung. So lassen sich heute neben der Mechanik auch die Elektrodynamik und die Relativitätstheorie aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung ableiten.

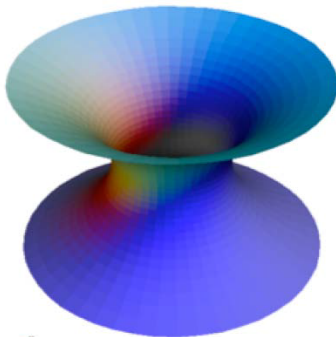
<sup>1</sup> „Skript zum Seminar - Bubble gums“, S. 4



Ein geometrisches Beispiel: **Das isoperimetrische Problem.** Welche Kurve gegebener Länge  $L$  umschließt die größte Fläche? Es ist der Kreis! Der Beweis ist jedoch schwierig.

Verformt man eine Fläche im dreidimensionalen Raum, so ändert sich ihr Flächeninhalt. Kann durch eine relativ kleine Verformung der Flächeninhalt stark verändert werden, so spricht man von einer *hohen Flächenspannung*. Betrachtet man beispielsweise eine Sphäre, d.h. die Oberfläche einer Kugel, so verringert sich der Flächeninhalt bei Verkleinerung des Radius relativ stark; daher hat die Sphäre eine relativ hohe Flächenspannung.

Von besonderem Interesse sind in vielen Anwendungen *spannungsfreie Flächen*, die in der Mathematik als *Minimalflächen* bezeichnet werden. Zieht man einen geschlossenen Draht durch Seifenlauge, so bildet sich ein Film, dessen Flächeninhalt minimal ist und daher eine solche Minimalfläche darstellt. Verwendet man beispielsweise zwei kreisförmige Drahringe, so bildet sich zwischen ihnen als Seifenhaut das *Katenoid*.



Beim Eintauchen von zwei kreisförmigen Ringen in Seifenlauge bildet sich als Seifenhaut das **Katenoid**.

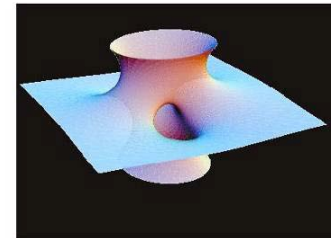
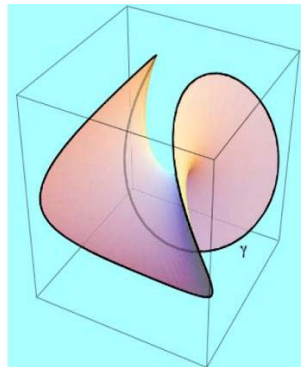
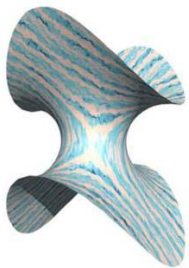


Kühltürme des Kraftwerks Gelsenkirchen-Scholven. Um die Flächenspannung zu minimieren, werden Kühltürme meist in Form (der unteren Hälfte) eines Katenoids gebaut.

Beispiele von Katenoiden

Um die Flächenspannung zu minimieren, werden Kühltürme meist in Form (der unteren Hälfte) eines Katenoids gebaut.

Als *Plateau-Problem* bezeichnet man in der Mathematik die Frage, ob es für jede geschlossene Kurve (= Drahring) stets eine von diesem berandete Minimalfläche (= Seifenhaut) gibt. Für viele Spezialfälle ist die Existenz einer solchen Fläche gesichert. Die explizite Konstruktion von Minimalflächen bei gegebener Randkurve ist allerdings ein schwieriges Problem an der Schnittstelle der Differentialgeometrie und der geometrischen Analysis.



*Beispiele von räumlichen Minimalflächenausbildungen*

## Die Seifenblase als Minimalfläche

Bei Seifenblasen stellt sich immer die kugelige Form ein, weil damit die kleinstmögliche Oberflächenspannung mit dem größtmöglichen Volumen verbunden ist.

Das Minimalprinzip bei einfachen Seifenblasen zeigt sich gut, wenn man mehrere Blasen zusammenlagert. Hierbei bilden sich gemeinsame Trennwände, die ebene Flächen bilden und bei mehr als zwei Blasen in gleich großen Winkeln angeordnet sind (bei drei Blasen zum Beispiel jeweils  $120^\circ$ ). Dadurch schafft die Seifenblase wieder das *größtmögliche Volumen bei kleinster Oberfläche*.

Wenn man noch mehr Seifenblasen zusammenlagert, bilden sich regelrechte Strukturen mit Vielecken (zum Beispiel Sechsecke oder Achtecke; siehe oben), während andere Gasbläschen wie zum Beispiel Kohlensäure in Mineralwasser anderen Bindungskräften unterliegen und sich kreisrund anordnen.

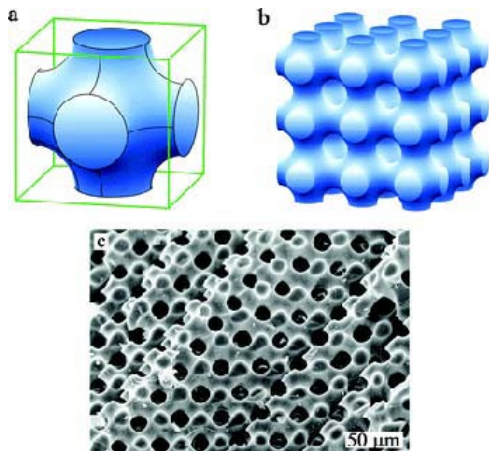
Minimalflächen, die mit Seifenhäuten bestimmt wurden, kommen auch bei Modellen in der Bautechnik zur Anwendung. So ist zum Beispiel das Olympiastadion in München (siehe unten) ein Produkt dieser Modelle. Auch die Dachkonstruktion der Berliner Kongresshalle und sogar die kleineren Zeldächer der vielen Pavillons in Parks arbeiten mit den speziellen Eigenschaften der Minimalflächen. Die Dächer dieser Bauwerke wirken trotz ihrer oft erstaunlichen Größe nicht erdrückend, sondern eher leicht und beschwingt.

### Minimalflächen in der Natur

Von besonderem Interesse sind auch periodische Minimalflächen, die aus Bausteinen bestehen, die glatt zusammengesetzt werden können. Diese werden tatsächlich in der Natur beobachtet, beispielsweise bei den so genannten *Lipiden*, die als Strukturkomponenten in Zellmembranen lebender Organismen auftreten.

z.B. als *Periodische Minimalflächen*

Periodische Minimalflächen sind wie Kristalle aufgebaut, eine "Einheitszelle" wird periodisch wiederholt. 3D: dreifach periodische Minimalflächen.



a) Einheitszelle

b) dreifach periodische Schwarzsche P-Fläche (kubisch) und Anwendung in der Natur

c) Seeigel-Skelett

### Minimalflächen in der Architektur

Aufgrund ihrer hohen Ästhetik spielen Minimalflächen auch in der Architektur eine besondere Rolle. Im Besonderen werden Minimalflächen in *Leichtbau-Flächentragwerken* eingesetzt. Seit den 50er Jahren experimentieren Architekten und Ingenieure mit Seifenblasen, um Lösungen für extrem materialsparende Bauten zu entwickeln. So nutzen die Architekten die natürliche Form der Seifenhäute als Vorbild für stabile und sichere Baukonstruktionen.

Seifenhautmodelle sind als Minimalflächen für Architekten deshalb so interessant, weil sie gleichzeitig die optimale, sicherste und stabilste Grundform bilden.

Die Flächen von Seifenhäuten sind mathematisch sehr schwer zu berechnen und gezieltes

Entwerfen ist nur selten möglich. Deshalb steht bei der Suche nach der perfekten Baukonstruktion unbedingt das *Experimentieren mit Seifenlauge* vor der abschließenden Arbeit am Computer.

Lange Zeit waren Seifenhäute das einzige Mittel zur zuverlässigen Bestimmung der optimalen Neigung von nicht-trivialen Dachkonstruktionen auf Basis von Seilsystemen und Tragbögen. Dazu wurde die Konstruktion als Rahmen aus Draht geformt und dann in Seifenwasser getaucht. Beim vorsichtigen Herausziehen ergaben sich Kurvenverläufe, die als das experimentell gefundene Optimum der Form zu gelten hatten. Durch Fotografie und andere Methoden wurde das Ergebnis fixiert und auf die zugehörigen Konstruktionszeichnungen übertragen. Die jeweilige Statik für die vorgegebene Form ließ sich dann mit anderen Methoden bestimmen.

So ist zum Beispiel die Dachkonstruktion des 1972 eröffneten Olympiastadions in München der Architekten Günther Behnisch und Frei Otto ein Ergebnis von Seifenhautmodellen aus Drahtrahmen und Seifenhäuten. Die Seifenhäute wurden dann vermessen und maßstabgerecht übertragen. (siehe **Otto Frei**)

### Modellformen (analoge)

Weil die Berechnungen von Zeltformen recht aufwendig sind, werden in den ersten Schritten der Entwurfsarbeit Modelle eingesetzt. Modelle ermöglichen es, mit Formen zu experimentieren und grundlegende Entscheidungen zu treffen. (siehe **Formfindung**)

## Oo

### Otto Frei

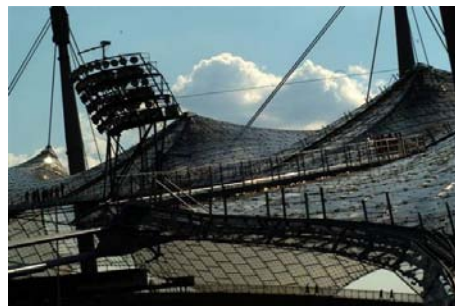
Der Künstler und Architekt Frei Otto wurde im Mai 1925 in Sachsen geboren. Erste Erfahrungen mit Leichtbauweisen machte Otto durch die Beschäftigung mit Modellbau und Segelfliegen während seiner Zeit auf der Handelsschule. Von 1943-1947 war er Pilot im Wehrdienst, wobei er die letzten zwei Jahre dieser Zeit in französischer Gefangenschaft verbrachte. In dieser Zeit begann er zum ersten Mal, im Auftrag der Franzosen, möglichst stabile Bauwerke mit minimalem Materialaufwand zu planen. In den nächsten Jahren bis 1952 folgte ein Architekturstudium in Berlin, während dessen er einen einjährigen Auslandsaufenthalt in Virginia, USA, hatte. Seine Promotionsarbeit von 1955 über das Thema „*Das hängende Dach*“, wurde in drei Sprachen übersetzt und gilt als die erste Publikation über zugbeanspruchte Flächentragwerke. In der Zeit bis 1976, wo er eine Professur in Stuttgart annahm, trat Frei Otto zahlreiche Gastprofessuren in den USA, Venezuela, Mexiko und Indien an und gründete 1964 das „Institut für leichte Flächentragwerke“ in Stuttgart. 1991 zog sich Frei Otto als Leiter des Institutes und von seiner Professur zurück; unterhält aber heute immer noch sein eigenes Architekturbüro in Stuttgart.

Verschiedene Dachkonstruktionen machen Frei Otto zu einem der berühmtesten Architekten. Sein wohl in Deutschland bekanntestes Werk ist das Dach des Olympiazentrums in München, das von 1968 bis 1972 gebaut wurde.

Ursprünglich war Frei Otto an diesem Projekt gar nicht beteiligt, denn den ausgeschriebenen Wettbewerb hatten die Architekten Benisch und Partner gewonnen, die für das Dach die Fachwerkbauweise wählen oder eine Seilnetzkonstruktion mit Beton ausfachen wollten. Nachdem alle ihre Versuche misslangen, wurde schließlich Frei Otto hinzugezogen, der seine eigenen Ideen gegenüber den Bauherren durchsetzen konnte.

Das geplante Dach besteht aus einer tragenden Seilnetzkonstruktion, die an der Außenseite durch Acrylplatten ausgefacht ist. Das Bauwerk wurde auf Druck des Büros von Benisch massiver und stabiler als berechnet konstruiert, was das große Misstrauen gegenüber Ottos Bauweise widerspiegelt. Durchgängig wurden Doppelseile für das Netz verwendet, obwohl einfache ausreichend gewesen wären.

Das Olympiastadion besteht aus einem Netz aus Stahlseilen, in dessen Felder Acrylglasplatten eingesetzt sind. Aus der Ferne betrachtet, erinnert die kunstvolle Dachkonstruktion an eine an mehreren Punkten aufgehängte gigantische Seifenhaut. Hier wird die mechanische Belastung auf die einzelnen Acrylglasflächen minimiert. Ein weiteres aktuelles Beispiel ist der (geplante) Stuttgarter Hauptbahnhof.



Auch das Dach des Olympiastadions wurde mit Hilfe von Drahtrahmen und Seifenhäuten ausprobiert, anschließend wurden die Seifenhäute vermessen und maßstabsgerecht übertragen.

"Olympiahalle " © [Radox](http://www.radox.com); Quelle: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Olympiahalle.jpg>

# Ss

## Seifenblase

Eine Seifenblase ist ein dünner Film Seifenwasser, der eine hohle Kugel mit schillernder Oberfläche formt. Seifenblasen halten gewöhnlich nur für wenige Momente und zerplatzen dann entweder von allein oder bei der Berührung mit einem anderen Objekt.

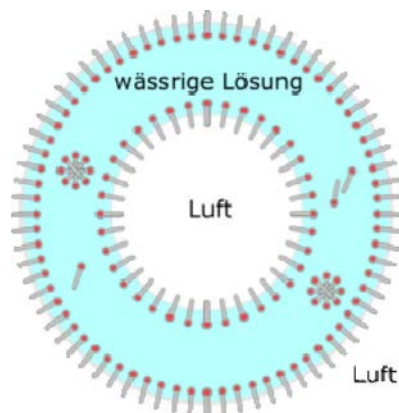
Seifenblasen lösen auf physikalische Weise komplexe räumliche Probleme in der Mathematik, da sie jederzeit die kleinste Oberfläche zwischen Punkten und Kanten bilden.

### Aufbau

Das Innere der Seifenblase besteht aus einem Hohlraum, der mit Luft gefüllt ist. Diese Luftblase wird von einem ganz dünnen Wasserfilm umhüllt, an dem sich innen und außen Tensidmoleküle in zwei Reihen anlagern und so dem Wasserfilm vorübergehend Stabilität verleihen.

Die kugelige Gestalt der Seifenblase entsteht dadurch, dass die Oberflächenspannung des Wassers die Molekülschichten zwingt, die kleinstmögliche Oberfläche einzunehmen. Und das ist unabhängig von der Größe die Kugelform (Minimalfläche).

Tensidmoleküle



### Weshalb Seifenblasen platzen

Infolge der Schwerkraft, die auf die Seifenhautflüssigkeit wirkt und nach unten zieht, dünnt eine Seifenblase in ihrem oberen Teil zunehmend aus. Zudem erfolgt im Laufe des Auslaufprozesses eine Anreicherung von Seifenfilm-stabilisierenden Tensidmolekülen im unteren Bereich der Seifenblase, so dass deren obere Region infolge des relativen Mangels von an die Oberfläche adsorbierten Tensidmolekülen zusätzlich destabilisiert wird.

Gleichzeitig herrscht im Innern der Seifenblase ein Überdruck, der ihr eine gewisse Stabilität verleiht. Der Überdruck ist umso größer, je kleiner die Seifenblase ist. Das kann man anhand einer einfachen Formel nachvollziehen:

$$p = 4 \cdot \sigma / r$$

$p$  bezeichnet dabei den Druck,  $r$  den Radius und  $\sigma$  (Sigma), eine Konstante, die von Substanz und Temperatur abhängig ist, die Oberflächenspannung (in einer typischen Seifenlösung beträgt die Oberflächenspannung  $2,5 \cdot 10^{-4}$  N/cm.).



"Two soap bubbles" © en:User:Tagishsimon

Quelle: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Soap\\_Bubble\\_-\\_foliage\\_background\\_-\\_iridescent\\_colours\\_-\\_Traquair\\_040801.jpg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Soap_Bubble_-_foliage_background_-_iridescent_colours_-_Traquair_040801.jpg)

## Formbildung von Seifenblasen

### *Einzelne Seifenblase*

Die Oberflächenspannung ist ebenfalls der Grund für die kugelförmige Gestalt der Seifenblasen. Durch Minimierung der Oberfläche zwingt sie die Blase in diese Form, da von allen möglichen Formen zu einem gegebenen Volumen die Kugel die kleinste Oberfläche aufweist. Ohne äußere Kräfte (insbesondere Schwerkraft in Kombination mit Luftreibung) würden alle Blasen ideale Kugelform besitzen. Aufgrund ihres geringen Eigengewichts kommen Seifenblasen diesem Ideal in der Realität sehr nahe.

### *Mehrere verbundene Seifenblasen*

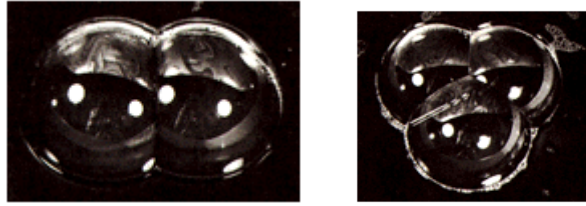
Wenn zwei Seifenblasen aufeinander treffen, wirken dieselben Prinzipien weiterhin, und die Blasen nehmen die Form mit der kleinsten Oberfläche an. Ihre gemeinsame Wand wölbt sich in die größere Blase hinein, da eine kleinere Seifenblase einen höheren Innendruck besitzt. Wenn beide Seifenblasen gleich groß sind, entsteht keine Wölbung, und die Trennwand ist flach.

Diese Regeln wurden im neunzehnten Jahrhundert aufgrund von experimentellen Untersuchungen vom aufgestellt.

Die Regeln des belgischen Physikers Joseph Plateau besagen, dass beim Zusammentreffen mehrerer Seifenblasen alle Winkel gleich groß sind. In einem Schaum mit vielen Blasen treffen immer jeweils drei Flächen in einem Winkel von  $120^\circ$  zusammen. Hierbei ist die Oberfläche gleichfalls minimal. Durch die gleiche Oberflächenspannung entsteht ein Kräftegleichgewicht. Jeweils vier Kanten treffen sich unter einem Winkel von etwa  $109^\circ 28' 16''$  in einem Knoten, auch als Vertex bezeichnet.

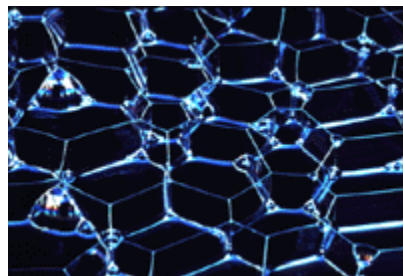
Werden zwei gleich große Seifenblasen zusammengeführt, bilden sie eine gemeinsame Trennwand, die eine ebene Fläche bildet.

Bei zwei unterschiedlich großen Blasen ragt die kleinere in größere hinein, weil der Innendruck kleinerer Seifenblasen stets höher ist.



Drei Seifenblasen bilden drei ebene Trennwände, die stets im Winkel von  $120^\circ$  angeordnet sind. Dies gilt auch dann, wenn die Seifenblasen unterschiedlich groß sind. Man kann dies auch sehr gut bei Seifenschäumen erkennen.

Sehr gut demonstrieren kann man das, wenn man Seifenschaum oder eine Ansammlung mehrerer Seifenblasen zwischen zwei parallelen Glasscheiben betrachtet.



### Formbildungsmöglichkeiten in Seifenblasenmodellen:

- Seifenhäute mit **biegesteifem Rand**

= fester Rahmen, der 2- oder 3-dimensional geformt sein kann

- Seifenhäute mit **biegeweichem Rand**

Seifenhäute lassen sich auch zwischen Fäden einspannen. Weil Fäden aber nicht biegesteif sind, lassen sie sich nicht auf Druck sondern nur auf Zug belasten. Das bedeutet, dass die Seifenhaut aufgrund ihrer Oberflächenspannung den beweglichen Fäden immer nach Innen ziehen wird.

- Seifenhäute mit **freiem Rand**

- **Unterstützung von Seifenhäuten**

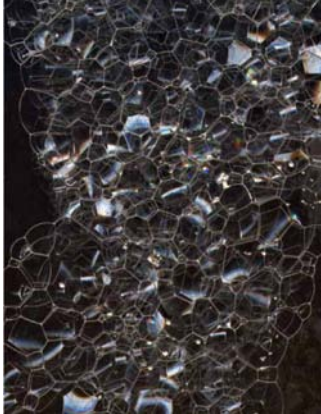
Seifenhäute können keine punktförmigen Belastungen aufnehmen, weshalb man diese auch nicht mit einem spitzen Gegenstand berühren kann, ohne dass sie zerplatzen. Anders flächige Belastungen. Weiche, flächige Formen (Ringe, Scheiben, Kugeln, ...) verletzen die feine Haut nicht und können so zur Dehnung und somit zur Formveränderung von Seifenhäuten eingesetzt werden.

## Oberflächenspannung

Die Erzeugung von Seifenblasen ist möglich, da die Oberfläche einer Flüssigkeit – in diesem Falle des Wassers – eine Oberflächenspannung besitzt, die zu einem elastischen Verhalten der Oberfläche führt. Häufig

Die Oberflächenspannung des Seifenwassers ist nur etwa ein Drittel so groß wie die des Wassers. Seifenblasen mit reinem Wasser zu machen ist so schwierig, weil die Oberflächenspannung zu hoch ist, wodurch die Blase sofort zerplatzt. In Seifenblasen muss die Oberflächenspannung um ca.  $\frac{2}{3}$  verringert sein. Zusätzlich verlangsamt die Seife die Verdunstung, so dass die Blasen länger halten.

## Schäume



Schäume: jede Schaumzelle ist eine Fläche konstanter mittlerer Krümmung (CMC)



Weaire-Phelan-Schaum (W-P – Schaum)

## Anwendung von Schaumstrukturen in der Architektur



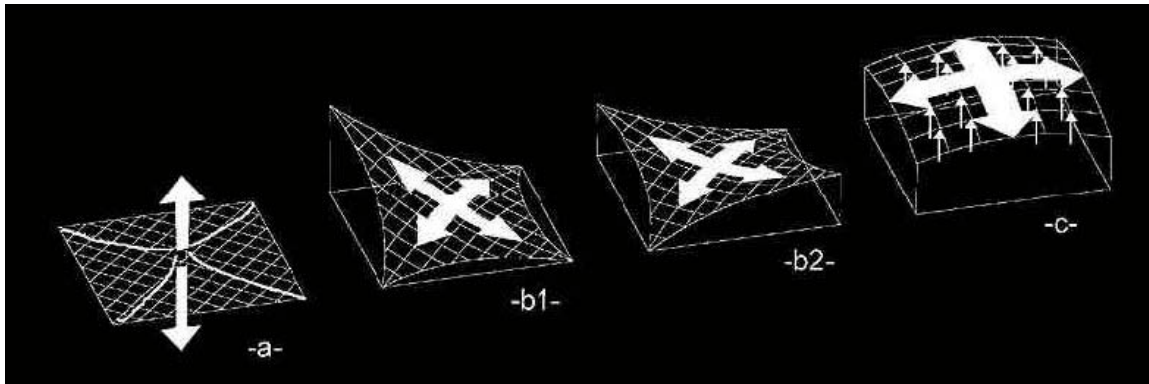
Olympia-Schwimmhalle, Peking 2008 ("Water-Cube") aus W-P-Schaum

## Stabilisierung

Membrane können als dauerhafte Bauelemente nur dann eingesetzt werden, wenn sie **gespannt** werden. Membrane ohne Spannung sind lose, flattern im Wind und werden dadurch beschädigt.

Werden Membrane eben aufgespannt, sind sie noch nicht flattersicher, da sie mit wenig Kraft senkrecht zur Ebene ausgelenkt werden und schwingen können (a).

Erst wenn man sie beim Spannen **gegen- oder gleichsinnig krümmt**, dann bilden sie eine flattersichere Fläche, in der jeder Punkt (durch räumliche Kraftvektoren) gehalten ist (b1, b2). Damit lassen sich flächige, textile und leichte Bauelemente und Tragwerke mit abschätzbarer Lebensdauer bilden. Daher die auch die Bezeichnungen „Textilbau“ und „Leichte Flächentragwerke“.



- a: Flachplane: flattert leicht, sie ist mit geringer Kraft aus der Ebene bewegen

- b1 + b2: mechanisch gespannte Konstruktion: Ecke(n) angehoben, zweiachsig gegensinnig gekrümmte Flächen

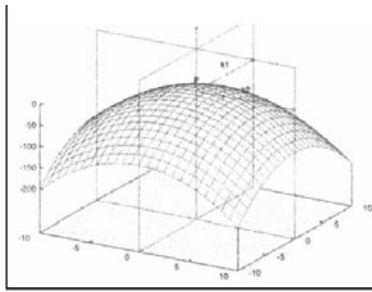
- c: pneumatisch gespannte Konstruktion, zweiachsig gleichsinnig gekrümmte Flächen

Welche Form eine gespannte Fläche einnimmt, hängt von **Lage und Form der Haltelinien und Haltepunkte** ab. Es kommt also darauf an, wo Randseile und Haltelinien entlang geführt werden, wo Randstützen gesetzt werden, an welchen Stellen Mittelmasten oder Stützbögen eingefügt werden und welche Krümmungen und Höhenlagen dabei jeweils im Spiel sind. Die textile Haut wird zwischen diesen Haltelinien eine Lage einnehmen, bei welcher die gesamte Fläche annähernd gleiche Spannungen aufzeigt. Seilnetzkonstruktionen können von dieser Geometrie stärker abweichen.

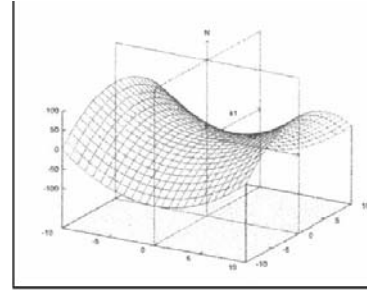
## Raumkrümmungsformen

Je nach Richtung der Krümmung unterscheidet man:

- **synklastische** Flächen (kuppelförmig)
- **antiklastische** Flächen (sattelförmig)



synklastisch



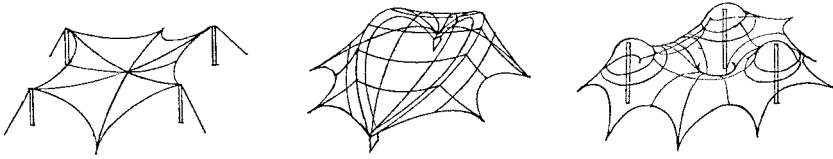
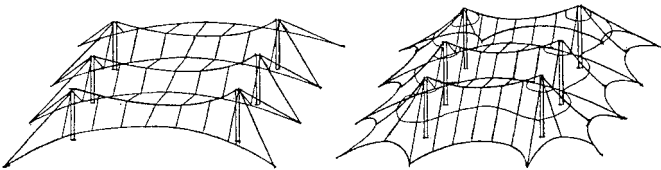
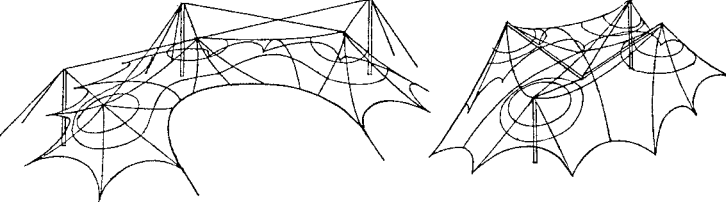
antiklastisch

# Tt

## Tragwerk

= die Gesamtheit der Teile eines Bauwerks, die eine tragende Funktion ausüben

## Übersicht über Tragwerkeinteilung bei Zeltbauten

<b>Zelttragwerke Übersicht</b>		
		<b>Hochpunkt - Zeltsysteme</b>
		<b>Wellen - Zeltsysteme</b>
		<b>Indirekte Hochpunkt - Zeltsysteme</b>

## Tragstruktur

= das Ordnungsmuster für den Zusammenhang der einzelnen Tragglieder eines Bauwerks

## Tragsystem

= das Wirkungs- und Ordnungsschema für die Umlenkung und Ableitung der Kräfte im Bauwerk

# Vv

## Vorspannung

= Kräfte und Spannungen innerhalb einer Konstruktion ohne Einwirkung von äußeren Kräften – d.h. in unbelastetem Zustand.

Dient der Stabilisierung von Bauteilen oder ganzer statischer Systeme.

Dabei werden Bauteile vor oder während der Montage in Spannung versetzt, um so Kräfte besser aufnehmen und ableiten zu können.

Zeltkonstruktionen benötigen in der Regel Vorspannungen, um gegen **Verformung** resistent zu sein. Der Grad der Vorspannung hängt von den Anforderungen an das Tragsystem ab und beeinflusst infolge auch die **Formbildung** von Zeltragwerken.

Eine Membran steht auch im eigengewichtslosen und unbelasteten Zustand unter einer Grundspannung. Die Vorspannung ist eine ständig wirkende Vorbelastung, welche nicht zuletzt großen Einfluss auf den Alterungsprozess der Membran hat.

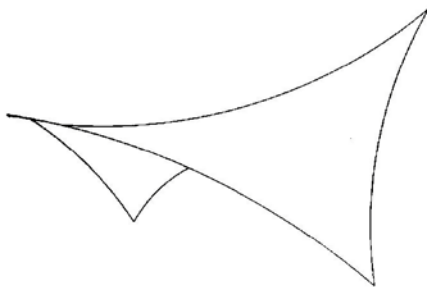
Darum soll diese Spannung in angemessenen Grenzen gehalten werden, Membrane mit sehr hoher Vorspannung neigen z.B. zum Schwinden. Der Richtwert für die Vorspannung bei technischen Geweben ist die 10% Marke der Kurzzeitfestigkeit. Bei Überschreitung sinkt die Lebensdauer der Membran rapide.

## Vorspannarten

Je nach Art der Einbringung der Vorspannkraft lassen sich verschiedene Bauformen unterscheiden:

### 1) mechanische Vorspannung und Minimalfläche

Mechanisch vorspannen kann man bei ebenen und gekrümmten Membranen. Bei gekrümmten Membranen wird die Vorspannung innerhalb eines definierten Randes aus Hoch und Tiefpunkten erzeugt. Eine Membran ist dann allseitig vorgespannt, wenn sie in jedem Punkt gegensinnig gekrümmt ist, das heißt in einer Richtung positiv und in der anderen negativ.



Es wird je nach Krümmung zwischen **Trag-** und **Spannrichtung** unterschieden, die Tragrichtung hängt nach unten durch, die Spannrichtung „hängt“ nach oben.

Je stärker die Krümmung ist, desto geringer sind unter Last (Wind, Schnee) die Membranspannungen und die Kräfte an den Verankerungspunkten, und umso geringer sind die Verformungen der Membran.

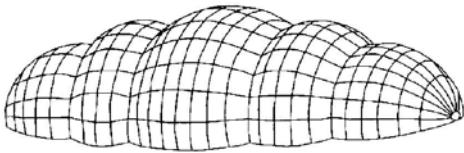
Besondere Bedeutung bei mechanischer Vorspannung hat die **Minimalfläche**. Die Minimalfläche ist die Fläche mit der geringsten Oberfläche innerhalb eines vorgegebenen Randes.

Wenn also eine entsprechend geformte Membran durch Belastung Formveränderungen erfährt, so können dies nur Dehnungen sein, und damit hat man auf jeden Fall eine Zugbeanspruchung.

Die Minimalfläche bildet unter der Voraussetzung, dass Spannungsgleichheit in alle Richtungen herrscht, die für das Tragverhalten ideale Form. Solch eine Spannungsgleichheit, wie sie sich z. B. bei der Seifenhaut einstellt, nennt man *isotroper Zustand*. Diese Art der Vorspannung kann nur bei gleichsinnig gekrümmten Membranen angewendet werden. Die Membranen werden dann durch ihr Eigengewicht oder eine zusätzliche Auflast stabilisiert. Das bedeutet, dass formverändernde äußere Lasten durch die Gewichtskraft aufgehoben werden.

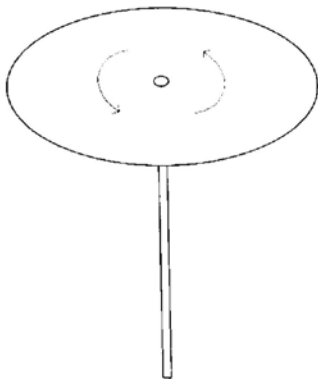
## 2) Vorspannung durch Druckdifferenzen

Bei dieser Art von vorgespannten Membranen handelt es sich meist um doppelt gleichsinnig gekrümmte. Die Vorspannung erfolgt pneumatisch durch Über- oder Unterdruck. Ein Beispiel für Innenüberdruck ist die Traglufthalle. Die nötige Druckdifferenz kann auch durch Füllungen mit anderen Medien, wie z. B. Gasen oder Wasser, erzeugt werden.



## 3) Vorspannung durch Fliehkräfte

Die Fliehkräfte werden durch Rotation erzeugt. Eine wichtige Rolle bei dieser Vorspannung spielen Drehgeschwindigkeit, Luftreibung und Randausbildung des Rotationspneus. Ein Anwendungsbeispiel sind Sonnensegel in der Raumfahrt, die nach diesem Prinzip aufgespannt werden. Für das Bauwesen spielt diese Vorspannart nahezu keine Rolle.



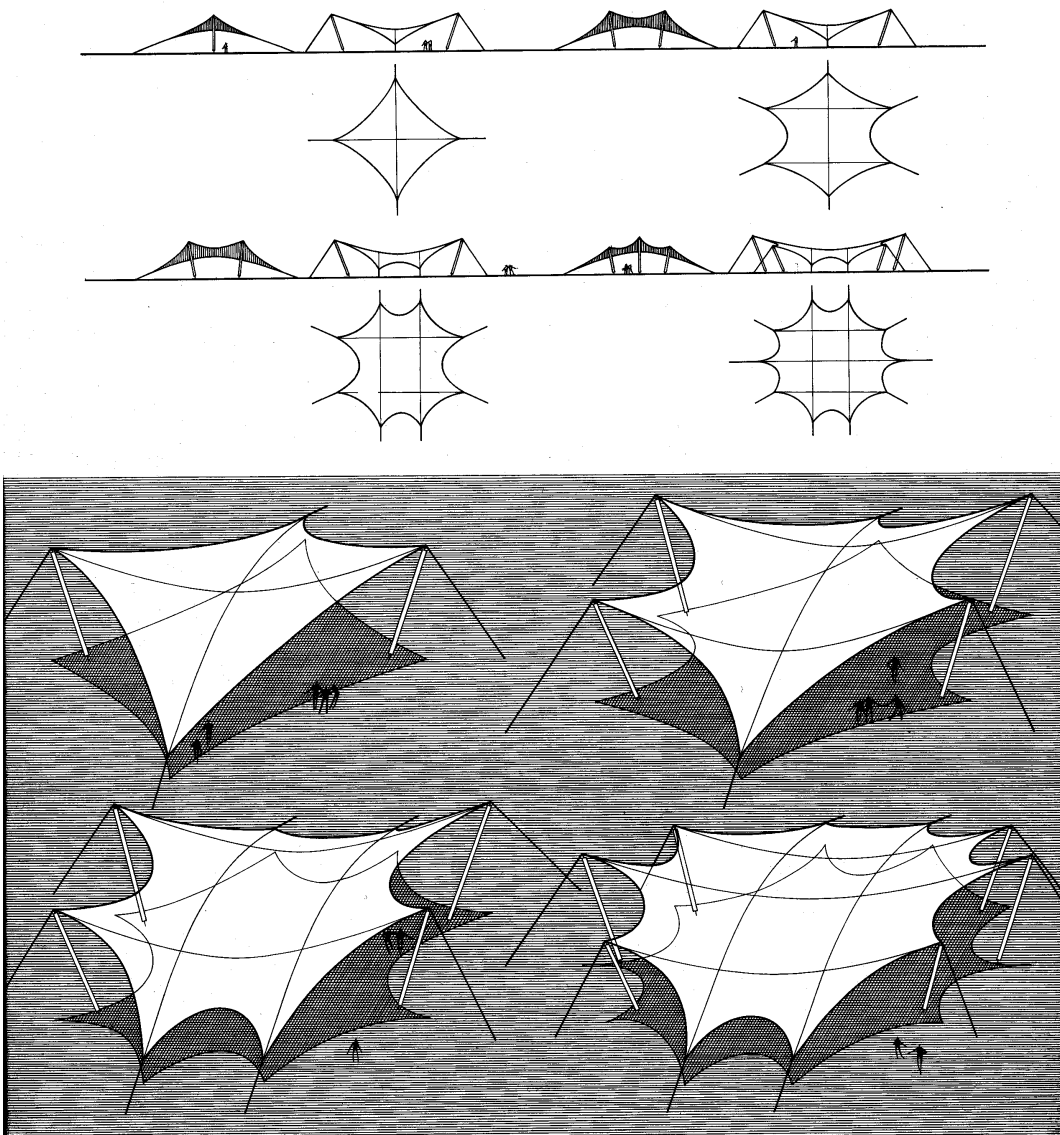
# Zz

## Zeltragwerke

### Einteilung der Zeltragwerke nach Art der Unterstützungspunkte und Abspannung

- 1) Zeltsystem mit äußerer Unterstützung durch Druckstäbe  
Dabei entstehen Sattelflächen (antiklastische Flächen)

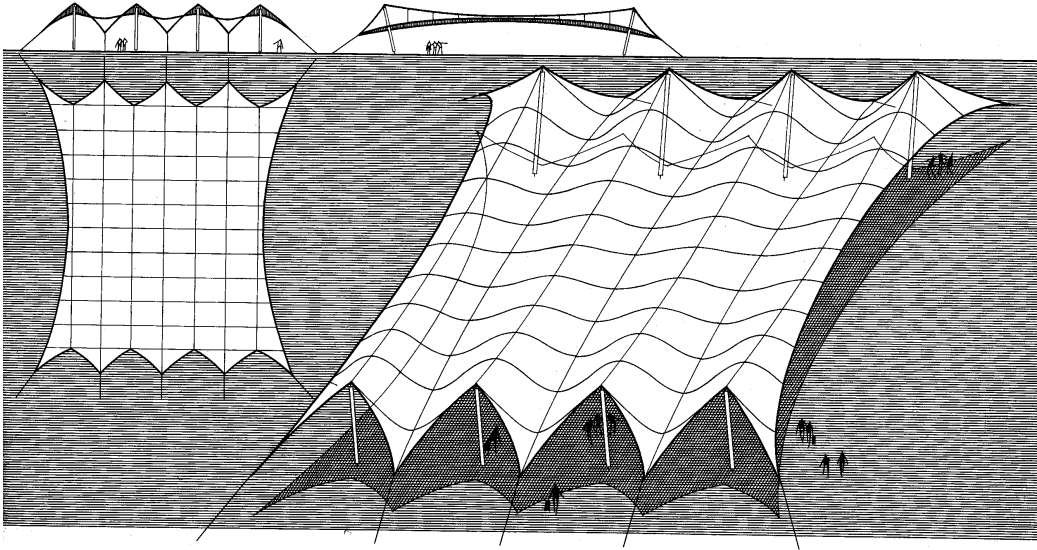
#### Systeme mit einfachen Sattelflächen



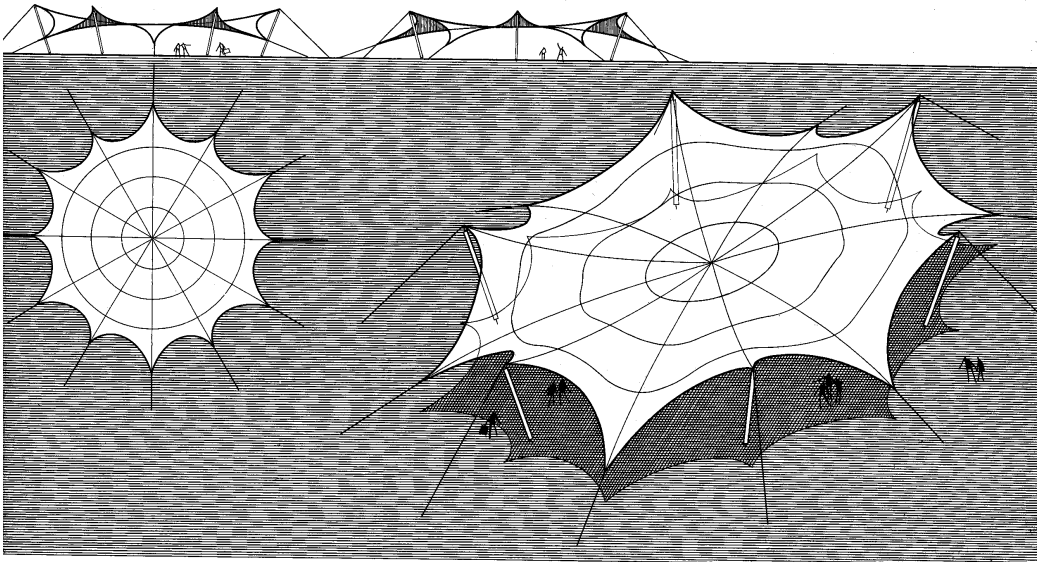
## 2) Zeltsysteme mit abwechselnden Unterstützungs- und Abspannpunkten

Dabei entstehen Wellenflächen (antiklastische und synklastische Formen wechseln einander ab)

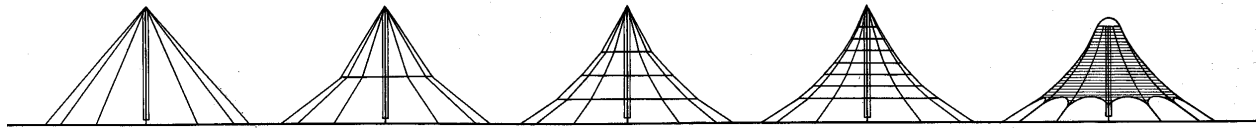
### Systeme mit **Wellenflächen**



### Systeme mit **radialer Anordnung der Festpunkte**

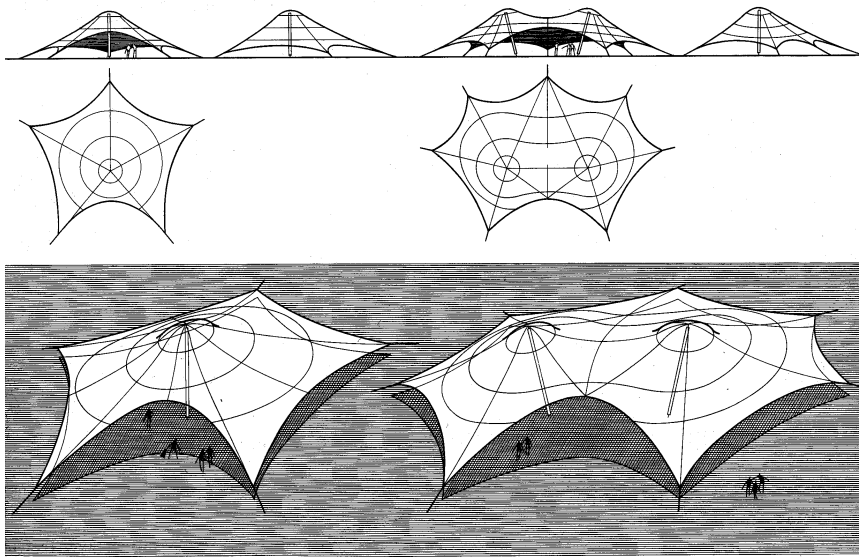


### 3) Zeltsystem mit innerer Unterstützung durch Druckstäbe/Stützen

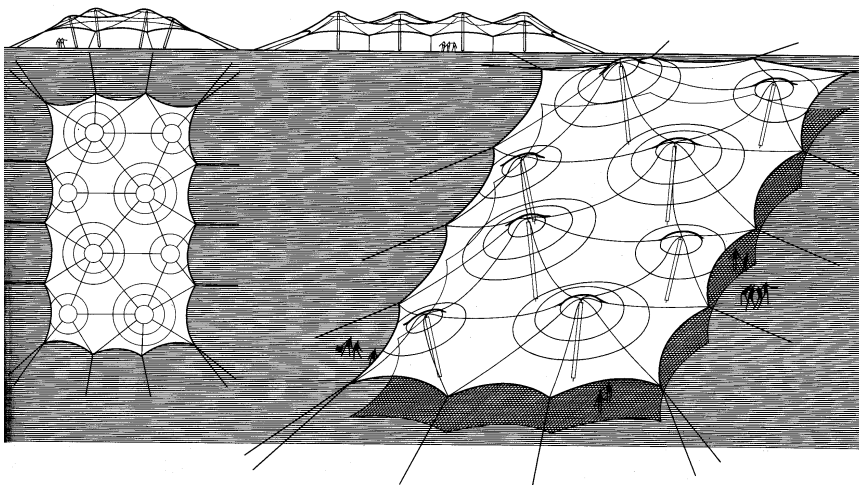


Ableitung der Buckelfläche vom kegelförmigen Seilnetz

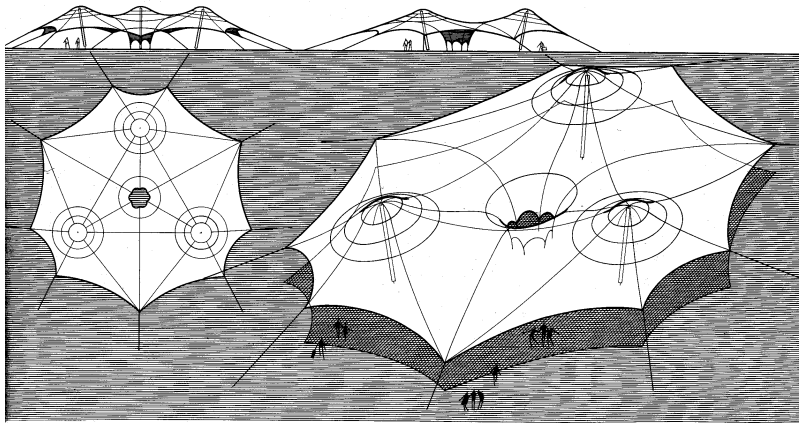
Systeme mit <b>einem Hochpunkt</b>	mit <b>zwei Hochpunkten</b>
------------------------------------	-----------------------------



Hochpunkte mit <b>verschiedenen Höhen</b>
-------------------------------------------



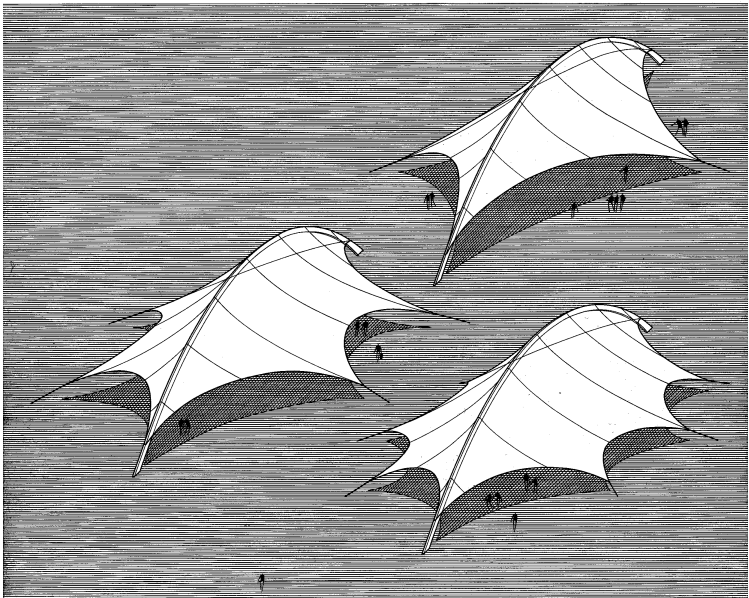
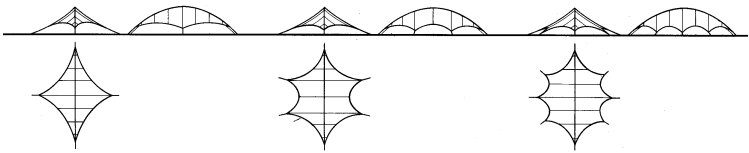
mit **zusätzlichem Abspannpunkt in der Mitte**



Eine Stabilisierung von Membranen durch eine **gegenseitige Krümmung** kann mithilfe von **Masten, Hochpunkten** und **Abspannungen** oder auch durch **Stützbögen**, die von unten gegen die Haut gedrückt werden, erreicht werden.

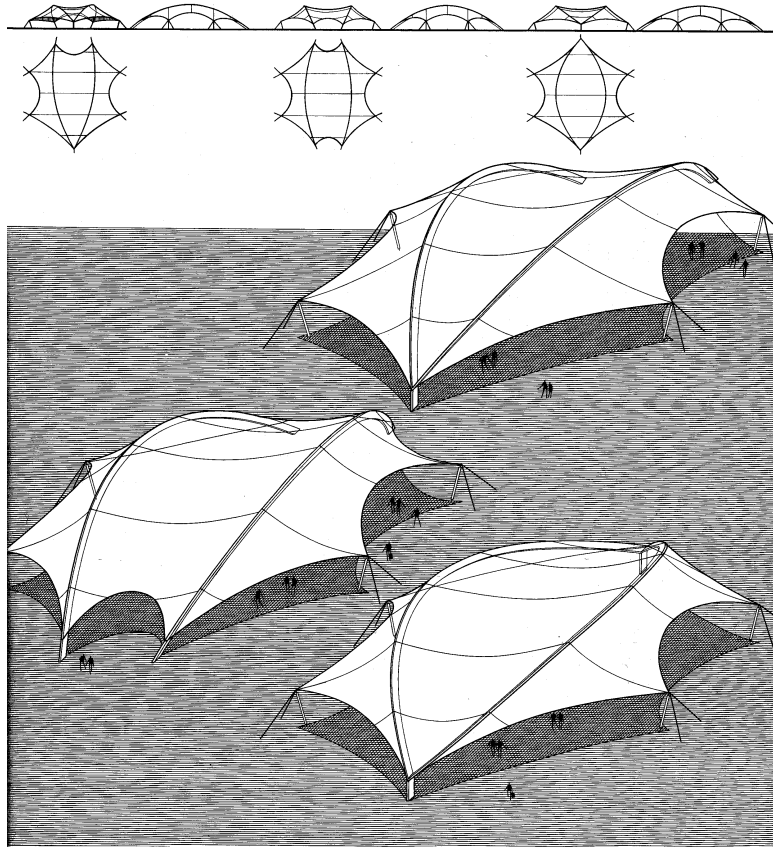
**4) Zeltsysteme mit einem inneren Stützbogen**

mit <b>2</b> Abspannpunkten	<b>4</b> Abspannpunkten	<b>6</b> Abspannpunkten
-----------------------------	-------------------------	-------------------------



## 5) Zeltsysteme mit zwei inneren Stützbögen

mit 1 gemeinsamen Fußpunkt	getrennte Fußpunkte	2 gemeinsame Fußpunkte
----------------------------	---------------------	------------------------



Quelle:

ENGEL, Heino: *Tragsysteme - Structure Systems*. Ostfildern 2009

KOLBITSCH, A: *Seiltragwerke*. TU Wien/Institut für Hochbau und Industriebau Skriptum