

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/english/>).

TENSILE ROOF SYSTEM

ENTWICKLUNG EINER MODULAREN TEXTILEN ÜBERDACHUNG BASIEREND AUF DEM TENSEGRITY-PRINZIP

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ. Ass. Dipl. Ing. Dr. techn. Michael Seidel

E253/5 Institut für Architektur und Entwerfen
Abteilung für Hochbau, Konstruktion, Installation und Entwerfen

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Mariella Packpfeifer

Matr.Nr. 9725787

Esslinggasse 17/8

1010 Wien

Wien am 03.03.2010

*„Das ideale Zelt ist nur Hauch, nur Gedanke mit einem Minimum technischer
Materie: vollendete, dienende Technik“*

- Frei Otto -

Kurzfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines modularen Systems für eine textile Dachkonstruktion.

Das wachsende Bedürfnis, öffentliche und private Freiräume ganzjährig zu nutzen, hat auf dem Gebiet der leichten Flächentragwerke zu vielen bemerkenswerten Projekten geführt. Die meisten dieser Membrankonstruktionen werden für einen bestimmten Ort geplant und sind in ihrer Form und Größe an diesen angepasst. Weiters gibt es Überdachungen, die zwar ortsunabhängig funktionieren, aber keine Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten ermöglichen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein System für eine membrane Dachfläche zu finden, welches auf unterschiedliche bauliche Situationen reagieren kann und daher vielseitig einsetzbar ist.

Für dieses Vorhaben wurde eine Tensegrity-Struktur entwickelt und mit einer textilen Fläche kombiniert. Bei Tensegrity-Systemen werden Druckelemente nur dort eingesetzt, wo tatsächlich Druckkräfte auftreten, die übrige Konstruktion bildet ein zusammenhängendes System von Zugelementen. Dadurch kann Material und Gewicht eingespart und trotzdem eine große Spannweite überwunden werden.

Mithilfe experimenteller Formfindungsmethoden wurden die Vor- und Nachteile der Tensegrity-Systeme für den Einsatz als modulare Dachkonstruktion erforscht und dokumentiert. Außerdem erfolgte eine sorgfältige Analyse aller Möglichkeiten, die sich aus der Kombination mehrerer Module ergibt. Im Anschluss wurden Material- und Detailvorschläge gebracht.

Das Ergebnis ist ein formaktives Tragsystem, das durch seinen modularen Aufbau vielfältig anwendbar ist. Die Dimensionierung des Systems wurde bewusst vermieden, da eine Anwendung in unterschiedlicher Ausdehnung möglich und Teil der Idee ist.

Abstract

The object of this thesis is to develop a modular system for textile roof construction.

The growing need for an all-season use of public and private spaces has led to many remarkable projects in the field of low-weight surface structures. Most of these membrane constructions are planned for a certain place and adapted thereto in terms of form and size. Further, there are canopies, which work location-independently but do not offer possibilities for adaptation to local circumstances.

Target of the thesis is to find a system for a membrane roofage which is able to react to divers situations and thus applicable in many cases.

A tensegrity-structure has been developed and combined with a textile surface. In tensegrity systems pressure members are applied only where they occur. The rest of the construction constitutes a framework of coherent systems of ties. Thus, material and weight can be cut down and a large span can be overcome.

The advantages and disadvantages of tensegrity systems for the use as modular roof constructions have been investigated and documented using experimental form-finding methods. Furthermore, an in-depth analysis of all possibilities arising out of the combination of several modules has been conducted. Subsequently, suggestions for material and details have been brought forward.

The result is a form-active structure system, applicable in many ways due to its modular assembly. The dimensioning of the system has been intentionally avoided, as an application in divers dimensions is possible and part of the concept.

Kurzfassung	5
Abstract	7
Einleitung	13
1 KONTEXT	15
1.1 Typologischer und historischer Abriss textiler Dachkonstruktionen	17
1.1.1 Typologie	17
1.1.2 Vela	18
1.1.3 Straßen- und Hofüberdachungen	18
1.1.4 Markisen	19
1.1.5 Baldachine	20
1.1.6 Schirme	20
1.2 Aktuelle Beispiele für Membrankonstruktionen	22
1.2.1 Geschlossene Konstruktionen	23
1.2.2 Offene Konstruktionen	27
1.2.3 Arbeiten in der zeitgenössischen Kunst	34
1.3 Tensegrity-Konstruktionen	38
1.3.1 Geschichtliche Entwicklung	39
1.3.2 Klassifizierung der Tensegrity-Systeme	41
2 ENTWICKLUNG UND ANALYSE	43
2.1 Anforderungen an das System	45
2.2 Modellversuche	46
2.2.1 Modellversuche zu räumlich geschlossenen Tensegrity-Systemen	47
2.2.2 Modellversuche zu räumlich offenen Tensegrity-Systemen	50

2.3 Konstruktiver Aufbau des räumlichen Seilfachwerks	52
2.4 Geometrische Eigenschaften eines Tetraeders	55
2.5 Tragverhalten und Kraftverteilung der Membrankonstruktion	56
2.6 Analyse zum Einfluss der Seillängen auf die Lage der Druckstäbe im dreidimensionalen Raum	58
2.7 Varianten der Flächenbildung aus einem räumlichen Seilfachwerk mit gegengleich gekippten Druckstäben	65
2.7.1 Bahnen	66
2.7.2 Flächen	73
2.8 Montagevarianten von Bahnen- und Flächenkonstruktionen	79
2.8.1 Anordnung von Bahnen im dreidimensionalen Raum	80
2.8.2 Kombination mehrerer Bahnen	83
2.8.3 Anordnung von Flächen im dreidimensionalen Raum	86
3 ANWENDUNG DES SYSTEMS	89
3.1 Konstruktive Beschreibung der Bauteile	91
3.1.1 Flächenelement	92
3.1.1.1 Membran	92
3.1.2 Linienelemente	95
3.1.2.1 Druckstäbe	95
3.1.2.2 Zugseile	98
3.1.3 Verbindungselemente	99
3.1.3.1 Seiltaschen	99
3.1.3.2 Seil-Endverbindungen	100
3.1.3.3 Eckverbindung mit Druckstab	102
3.1.3.4 Eckverbindung mit Seil	104

3.1.3.5 Wandanschluss	106
Schlussbemerkung	107
Literaturverzeichnis	109
Abbildungsverzeichnis	111

Einleitung

Auf dem Gebiet der Membrankonstruktionen findet seit vielen Jahrzehnten eine stetige Forschung und Weiterentwicklung statt. Eine häufige Anwendung finden textile Materialien für Straßen-, Hof- oder Terrassenüberdachungen. In südlicheren Regionen sind offenen Dachkonstruktionen geschichtlich sehr weit zurückzuverfolgen, in den nördlicheren Gebieten wächst ihre Zahl erst seit den 1950er Jahren stetig an. Der materialtechnologische Fortschritt hat eine höhere Lebensdauer der Gewebe erwirkt, sodass auch bei rauheren Witterungsverhältnissen Membrane für unterschiedliche Bauaufgaben ganzjährig eingesetzt werden können. Der Großteil der Projekte wird für einen bestimmten Ort geplant. Diese Konstruktionen sind in ihrer Form, Größe und Detailausführung an die örtliche Situation und die gewünschte Nutzung angepasst. Im Gegensatz dazu gibt es Membrane Dächer, die an beliebigen Orten eingesetzt werden können. Sie überspannen oft nur kleinere Flächen und können an bauliche Bedingungen wenig oder gar nicht angepasst werden.

Die Motivation dieser Arbeit ist es, ein konstruktives System für eine textile Dachfläche zu finden, welches sowohl ortsunabhängig ist, als auch auf verschiedene bauliche Gegebenheiten reagieren kann. Weiters soll es in seiner Ausdehnung vielfältig verwendbar sein - im öffentlichen und privaten Bereich über kleine

und große Spannweiten. Hierfür soll ein Tensegrity-System angewandt werden, das mit einer textilen Fläche kombiniert wird.

Die Arbeit setzt sich aus drei Hauptteilen zusammen: Am Beginn werden in kurzer Form typologische und historische Informationen über textile Dachkonstruktionen zusammengetragen. Anschließend erläutert eine Sammlung aktueller Beispiele die Vielfalt an konstruktiven Lösungen, die im Membranbau möglich ist. Außerdem wird das Konstruktionsprinzip Tensegrity erklärt und klassifiziert.

Der zweite Hauptteil widmet sich der empirischen Formfindung, aus der die Entwicklung eines modularen, räumlich offenen Tensegrity-Prinzips hervorgeht. Dieses Prinzip wird anschließend einer Formstudie unterzogen. Die Ergebnisse dieser Studie sind die Grundlage für eine Analyse, bei der alle Kombinationsmöglichkeiten des modularen Prinzips ermittelt werden.

Zuletzt erfolgt die Übertragung des konstruktiven Systems in eine realisierbare Dachkonstruktion. Dafür werden Material- und Detailvorschläge gebracht.

1 KONTEXT

2 ENTWICKLUNG & ANALYSE

3 ANWENDUNG DES SYSTEMS

1.1 Typologischer und historischer Abriss textiler Dachkonstruktionen

1.1.1 Typologie

Das Gebiet der **Membrankonstruktionen** umfasst alle Anwendungen, bei denen eine textile Membran mit einer Trag- oder Unterkonstruktion kombiniert wird. Die vorliegende Arbeit befasst sich in erster Linie mit den **Membrandächern**, welche nach ihren Konstruktionsweisen wie folgt differenziert werden können:

Vela waren die Sonnensegel der römischen Theater, Amphitheater und Stadien. Ihre weit auskragenden, abgehängten Konstruktionen wurden mit textilen Membranen bespannt, die je nach Bedarf aus- oder eingerollt werden konnten.

Straßen- und Hofüberdachungen (span. **Toldos**) sind ausschließlich zwischen massiven Konstruktionen befestigt. Bei der üblichsten Form der Straßentoldos werden Segel mit eingenähten Ösen entlang parallel gespannter Drahtseile bewegt.

Markisen überdachen üblicherweise kleinere und private Flächen. Sie sind zur Hälfte an einer massiven Konstruktion befestigt und auf der gegenüber liegenden Seite an freistehenden Stützen oder frei abge-spannt.

Schirme kommen mit nur einer Stütze aus, sind mobil und wandelbar, haben jedoch eine begrenzte Spannweite.

Der Begriff **Baldachin** beschreibt eine an ihren Eckpunkten an freistehenden Stützen befestigte Membrankonstruktion.

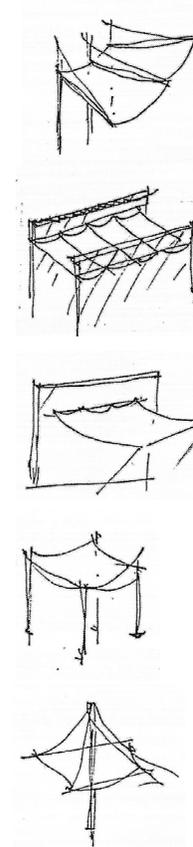


Abb. 1: Grundsätzliche Konstruktionsweise der Schutzdächer
von oben: Velum, Toldo, Markise, Baldachin, Schirm

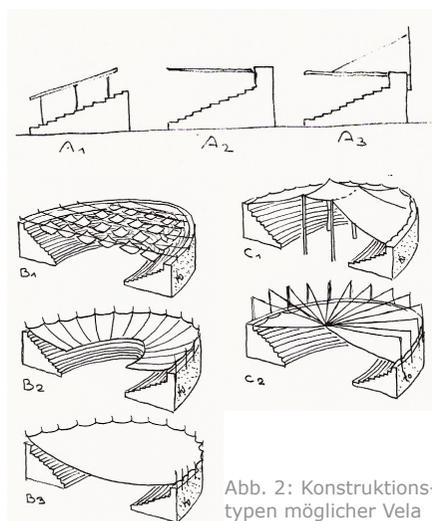


Abb. 2: Konstruktionstypen möglicher Vela

Die Konstruktionstypen möglicher Vela nach Frei Otto:¹

- Der Stangentyp (A)

A1 Aufgeständerte Stangen

A2 Auskragende Stangen

A3 Aufgehängte Stangen

- Der Segedachtyp (B)

B1 Segel:

Sie werden frei über das Theater gehängt, die Raffung erfolgt nach außen oder durch Zusammenklappen der Segel in ihrer hängenden Position.

B2 Der Hängering:

Er ist ein stangenfreies Segeldach. Sein Radialseilnetz ist nicht geschlossen, sondern in der Mitte offen. Das Tuch kann zum Mittelring oder nach außen gerafft werden.

B3 Die Hängekuppel:

Ein Radialseilnetz überspannt das gesamte Theater in hängender Kuppelform, das Tuch wird zur Mitte oder nach außen hin gerafft.

- Der Zeltdachtyp (C)

C1 Das Zelt mit Masten:

Die Masten stehen im Innenraum, das Zelttuch wird zu den Masten oder nach außen hin gerafft.

C2 Das Kuppelzelt:

Die Masten stehen außen, das Zeltdach wird mit Seilen an die Mastköpfe gehängt, die Raffung des Tuches kann zur Mitte oder nach außen hin erfolgen.

1.1.2 Vela

Der Einsatz textiler Dächer zum Schutz vor Sonne oder Regen reicht geschichtlich sehr weit zurück. Bereits die Römer entwickelten zum Sonnenschutz von Höfen und Straßen das Velum, welches aus dem Lateinischen übersetzt „Schiffssegel“ oder „in verschiedener Weise hängende Tücher“ bedeutet. Zur Beschattung der Zuschauertribünen der **Theater, Amphitheater** und **Stadien** bauten sie diese zu riesigen Sonnensegeln aus, deren Unterkonstruktion bis heute nicht restlos geklärt werden konnte.

Frei Otto erstellte 1984 in seinem Buch „IL 30“ diesbezüglich eine Typologie möglicher Konstruktionen.

Diese reichen von auskragenden oder abgehängten Stützen bis zu durchlaufenden Seilen oder Ringseilnetzen und sind in der Abb. 2 dargestellt.

Als erwiesen scheint, dass die Vela nicht aus einer großflächigen Plane, sondern vielen Teilstücken bestand, welche über Seilzüge bewegt und gerafft wurden. Vela wurden nur für den Sonnenschutz eingesetzt und zur Schonung des Gewebes bei ungünstigem Wetter eingefahren. Das Gewebe war vermutlich aus Baumwolle oder grobem Leinen, meist rostrot (umbra) eingefärbt. Die Gebäude wurden nicht vollständig überdacht, da eine kühlende Wirkung erst durch einen fortwährenden Luftstrom erreicht werden konnte. Die römischen Vela wurden fast 600 Jahre lang zur Beschattung eingesetzt und galten als besonderer Luxus, mit dem Herrscher um die Gunst des Volkes warben.

Frei Otto beschäftigt sich seit den 1950er Jahren intensiv mit den von ihm sogenannten „Wandelbaren Dächern“. Hierzu zählen all jene Konstruktionen, die auf- und abgespannt oder aus- und eingerollt werden können. Seiner fortdauernden Arbeit ist es zu verdanken, dass vela-artige Konstruktionen auch heute wieder aktuell sind. Beinahe alle neu errichteten Konstruktionen lassen sich auf seine systematisch dargelegten Kategorien über mögliche Velakonstruktionen zurückführen.

Beispiele neuer wandelbarer Dächer sind u.a. die Überdachung des antiken Amphitheaters in Zaragoza (Abb. 3) oder das Schutzdach der Stiftsruine Bad Hersfeld in Deutschland.

1.1.3 Straßen- und Hofüberdachungen

Der Sonnenschutz auf öffentlichen Flächen hat vor allem in südlicheren Regionen eine lange Tradition. In Spanien, insbesondere in Sevilla, kann über 2000 Jahre hinweg die Verwendung von Sonnensegeln (span. Toldos) zurückverfolgt werden.

Dazu in der Publikation „IL 30“: „Kulturelle Traditionen wie die der römischen und arabischen Zeltdächer mögen ihre Entwicklung und Konstruktion beeinflusst haben, genauso wie die Entstehung von Einkaufsstrassen im 19. Jahrhundert oder die Schiffsbautechnik. Toldos dienen zum Schutz vor zu starker Sonneneinstrahlung, vermindern dadurch die Aufheizung der darunterliegenden Luft, schützen vor lästigem Flugstaub und bieten bisweilen auch Sichtschutz.“

¹ vgl. IL 30, S. 34

Eindrucksvoll ist ihre raumumgreifende und raumerzeugende Wirkung, die bei festlichen Anlässen besonders wirkungsvoll eingesetzt wird.

Neben vorhangähnlichen Segeln und Zeldächern über Marktständen oder temporären Bühnen haben sich vor allem der Typ des Prozessionstoldos sowie des Straßentoldos herausgebildet. Das sevillanische **Prozessions-** oder **Festtoldo** besteht aus einzelnen Segelabschnitten, die miteinander vernäht oder verschnürt sind. Es hängt nicht raffbar an Tragmasten. Der - abgesehen von privaten Segeln - am meisten verbreitete Typ, das **Straßentoldo**, hängt auf Traufhöhe zwischen gegenüberliegenden Häusern der Geschäftsstraßen. Mit Hilfe einer Raffkonstruktion kann es ein- und ausgefahren werden.

Durch das Kombinieren verschiedener Segeltypen werden die Schattendächer den unterschiedlichen Geometrien von Straßenräumen angepasst. Es gibt hierfür, neben einer Vielzahl von Zuschnittsmöglichkeiten, auch Hilfskonstruktionen aus Eisen, die Lücken überbrücken oder Höhenunterschiede ausgleichen. Das klassische, raffbare Segel hängt mit seinen aufgenähten Ösen an parallel gespannten Drähten, die an zwei Wänden verankert sind. []

In Spanien finden sich klassische Toldos im öffentlichen Straßenraum in fast allen größeren Städten der südlichen Landeshälfte. Überhaupt treten im Mittelmeerraum mehrere verwandte Formen auf, so in Marokko, Ägypten, Syrien und der Türkei. Außerhalb Europas finden sie sich in Mittelamerika, z.B. Mexiko, sowie in Japan.“²

² vgl. IL 30, S. 94

Die Überdachung öffentlicher Stadträume ist zwar traditionell in heißeren Regionen verankert, jedoch steigt auch in nördlicheren Breiten der Wunsch nach einer ganzjährigen Benutzbarkeit der öffentlichen Räume. Die Entwicklung der Materialtechnologie brachte beschichtete Membrane hervor, die sich ohne weiteres für den dauerhaften Einsatz bei Sonne und bei Regen eignen.

Wie bei den spanischen Toldos steht auch bei vielen neuen Straßen- und Hofüberdachungen die Funktion des geschützten Einkaufens im Vordergrund. Sie bieten darüber hinaus aber auch einen gesellschaftlichen Treffpunkt, wie das Beispiel der **Hofüberdachung des Imagination Center - Staffordshire House in London** zeigt. Hier wurden zwei Baublöcke (1902) mit einer transluzenten Membran verbunden (Abb. 5). Die Unterkonstruktion der Membran bilden Fachwerkträger und mit Stahlseilen abgespannte Druckschirme, die die Hochpunkte der Dachfläche erzeugen. Die neu gewonnen Flächen werden als Ausstellungs-, Präsentationsräume und Restaurant genutzt.

1.1.4 Markisen

Markisen haben sich vermutlich aus den in römischen Atriumhäusern zum Witterungsschutz und zur Dekoration aufgespannten Tüchern entwickelt. Sie bezeichnen Konstruktionen, die einseitig fix an einer massiven Struktur befestigt sind und deren „offene“ Seiten mittels einer Kragunterkonstruktion, einer Abspannung oder leicht demontierbarer Stützen abge-spannt werden.

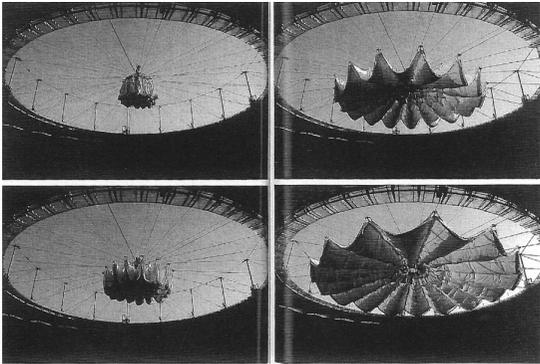


Abb. 3: Vela des Amphitheaters in Zaragoza, Spanien



Abb. 4: Straßentoldo, Sevilla



Abb. 5: Imagination Center, London, Querschnitt

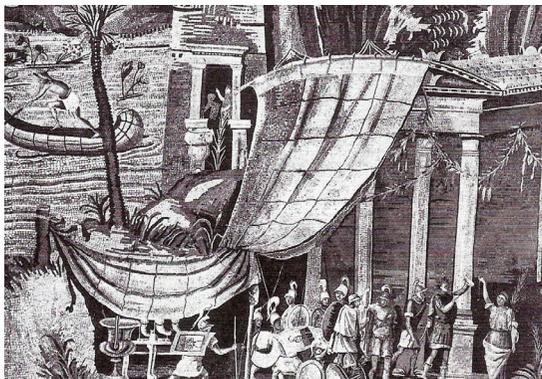


Abb. 6: Sonnensegel, Mosaik aus Praeneste, 80 v. Chr.



Abb. 7: Amt für Abfallwirtschaft, München



Abb. 8: Haj Terminal, Jeddah Int. Airport, Saudi Arabien

Markisen sind roll- oder raffbar und hauptsächlich als kleinflächige Membran privat eingesetzt.

Bilddokumente zeigen, dass in der Antike auch ausgediente Schiffssegel als Markisen weiterverwendet wurden (Abb. 6). Ihre horizontale Rahstange diente zur Befestigung der Membran und hat sich bis heute als konstruktives Element erhalten. Ab der Mitte des 18. Jahrhunderts kam der Gebrauch von Markisen zum Schutz großer Fensterflächen hinzu.

1.1.5 Baldachine

Traditionell werden Baldachine bei festlichen Anlässen verwendet. Sie dienen als Schattendach für eine geehrte Persönlichkeit oder kennzeichnen einen besonderen Ort.

Für den modernen Membranbau sind die Baldachine hinsichtlich ihrer Konstruktionsweise interessant. Die Membran ist an allen Ecken an frei stehenden Stützen befestigt und eignet sich gut für additive Systeme. Durch die Kombination mehrerer Baldachine können Dachflächen unterschiedlichster Form und Größe erzeugt werden.

Als moderne Beispiele für dieses Konstruktionsprinzip können die **Überdachung des Amtes für Abfallwirtschaft in München** (Abb. 7) oder der **Haj Terminal des Jeddah International Airports 31 in Saudi Arabien** (Abb. 8) genannt werden.

1.1.6 Schirme

Schirme sind vermutlich die ältesten Membrankonstruktionen und gleichzeitig die komplexesten hinsichtlich ihrer Konstruktionsweise. Sie kommen mit nur einem Mittelmast aus, in dem die gesamte weitere Konstruktion konzentrisch zusammenläuft. Die speichenförmige Unterkonstruktion ist mit einem Ring verbunden, der entlang des Mastes bewegt werden kann, wodurch sich der Schirm auf- oder abspannt. Grundsätzlich gelten Schirme als mobile Konstruktionen, wenn auch die materialtechnische Entwicklung in der Architektur zu immer größeren Konstruktionen geführt hat, welche nicht mehr als „mobil“ bezeichnet werden können. Aufgrund der auskragenden Konstruktion ist die Abmessung der Dachfläche begrenzt. Das additive Zusammenfügen mehrerer Schirme - vorzugsweise quadratischer Form - lässt jedoch auch mit dieser Konstruktion große Flächen überdecken. Entwicklungsgeschichtlich gesehen galten Schirme in vielen Kulturkreisen nicht nur als Schattenspender, sondern unterstrichen auch - ähnlich wie bei den Baldachinen - die Würde einer Person. Die Verwendung von Schirmen ist zurück bis ins 13. Jahrhundert v. Chr. dokumentiert und war auch im gesamten Fernen Osten sehr verbreitet. In China und Japan haben bis heute Schirme aus Bambus und geöltem Papier Tradition. Bereits für römische Frauen galt der Schirm als modisches Accessoire und wurde nachgewiesenermaßen auch zum Regenschutz angewandt. Ab dem 17. Jahrhundert lassen sich größere Schirme (bis zu ca. fünf Metern Durchmesser) nachweisen, die dem Regen- und Sonnenschutz der Marktstände dienten.

Das Konstruktionsprinzip des Schirmes wird heute sehr häufig für neue textile Membrandächer angewandt. Seine Wandelbarkeit durch den praktischen Klappmechanismus, die einzelne Stütze und die Erweiterungsmöglichkeit sind gerne in Anspruch genommene Qualitäten. Einen weiteren Vorteil bietet die Umkehrung der Flächenkrümmung von synklastisch zu antiklastisch. Dadurch kann das Regenwasser über die mittlere Stütze abgeleitet werden. Ein Beispiel für eine derartige Konstruktion bietet die **Hofüberdachung der Großen (Al Haram al Shareef) Moschee in Medina, Saudi Arabien** (Abb. 9).

Textile Konstruktionen werden seit vielen Jahrtausenden zum Schutz vor Sonne und Regen eingesetzt. An der Entwicklung und der stetig steigenden Zahl von weitgespannten Membrankonstruktionen in den letzten sechzig Jahren war der Architekt **Frei Otto** ausschlaggebend. In Europa leistete er seit den 1950er Jahren einen wesentlichen Beitrag zum Fortschritt auf diesem Gebiet. Er suchte neue Formen für Membrankonstruktionen unter Ausreizung der Grenzen der modernen Materialien und Technologien.

Seine Dissertation von 1953 mit dem Titel „Das hängende Dach“ leitete die Erforschung echter freigespannter Membrankonstruktionen ein. 1955 wurde sein erstes sogenanntes Vierpunktsegel für die Bundesgartenschau in Kassel realisiert (Abb. 11). Die quadratische Dachfläche war gegengekrümmt vorgespannt, die Hochpunkte wurden mittels zwei abgespannten Masten erreicht, die Tiefpunkte waren

im Boden verankert. Diese Konstruktion wurde zum Archetyp der neuen Zeltbauten. Ausgehend vom Vierpunktsegel, das dem Typ der Sattelfläche entspricht, kreierte Frei Otto drei weitere Haupttypen rein freigespannter Membrankonstruktionen: die Wellenfläche, die Bogenfläche und die Hochpunktfläche.

Diese vier Grundformen (Abb. 10) stellen bis heute die Basis nahezu aller Membrankonstruktionen dar. Frei Otto gab mit seinen Arbeiten einen wesentlichen Impuls für den rasanten Fortschritt in der Zelttechnologie.³

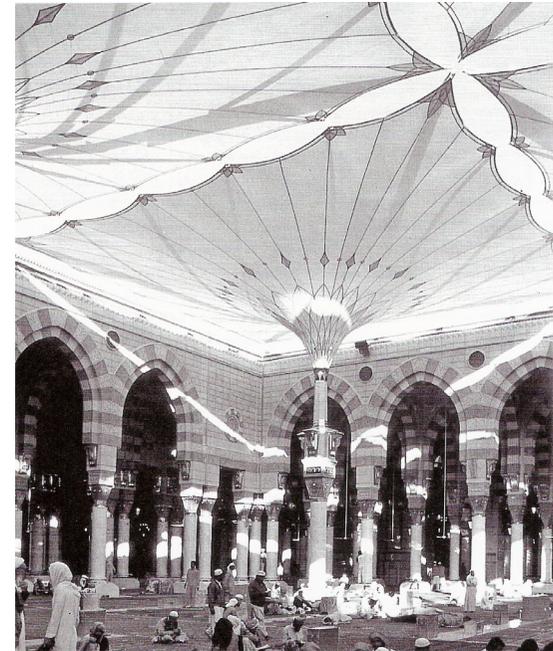


Abb. 9: Große Moschee, Medina, Saudi Arabien

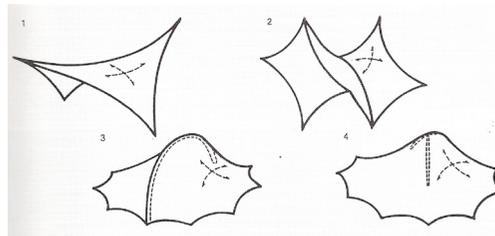


Abb. 10: Vier Haupttypen freigespannter Membranflächen

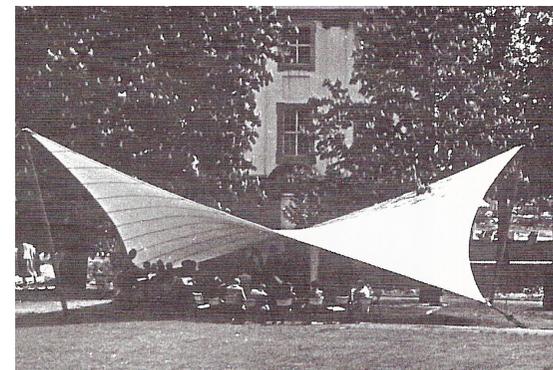


Abb. 11: Vierpunktsegel, Kassel 1955

³ Vertiefende Literatur zum Thema Geschichte und Typologien von Schutzdächern siehe: Freigespannte textile Membrankonstruktionen, S. 181-231

1.2 Aktuelle Beispiele für Membrankonstruktionen

Die folgende Beispielsammlung zeigt eine Auswahl interessanter, textiler Projekte aus den letzten zwanzig Jahren. Die Zusammenstellung der Arbeiten erfolgte vorrangig nach ihrer architektonischen Qualität und nach ihrer Größe. Da für die vorliegende Arbeit eher Konstruktionen mittleren Ausmaßes relevant sind, wurde hier auf Großprojekte nicht weiter eingegangen.

Die Arbeiten sind sortiert nach **geschlossenen** und **offenen Konstruktionen** und nach **Arbeiten in der zeitgenössischen Kunst**. Der Fokus der Beispiele liegt bei den offenen Dachkonstruktionen. Die Betrachtung der künstlerischen Arbeiten stellte sich besonders im Bezug auf ihre Gestaltung und ihre Raumwirkung als äußerst interessant dar.

1.2.1 Geschlossene Konstruktionen

MOMI-Zelt, Future Systems

Das temporäre Zelt aus dem Jahre 1991 wurde für das Museum of the Moving Image (MOMI) in London entworfen.

Das weiße Tenara-Gewebe des Zeltdaches wurde über bogenförmige, aneinander gelehnte Rippen aus glasfaserverstärktem Kunststoff gespannt. An beiden Stirnseiten befindet sich jeweils ein nach außen geneigter Bogen, der an einem Bodenträger aus Stahl verankert ist. Die Rippen werden durch Stahlstreben und Zugseile stabilisiert. Die gesamte Konstruktion ist auf einer höhenverstellbaren Bodenplatte aus Aluminiumpanelen montiert, die die elektrischen Versorgungsleitungen aufnimmt. Das MOMI-Zelt ist für eine längerfristige Nutzung konzipiert und kann von sechs Personen in nur zwei Tagen aufgebaut werden.⁴



Abb. 12: MOMI-Zelt, Eingangssituation

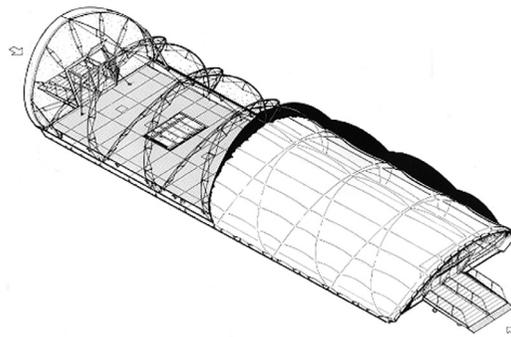


Abb. 13: Axonometrie



Abb. 14: Detail, Konstruktion

⁴ vgl. Future Systems, S. 195

**Veranstaltungszelt in Freiburg,
GJL-Architekten**



Abb. 15: Veranstaltungszelt Freiburg

Dieses temporäre Gebäude wurde für die Freiburger Architekturwoche 1998 als zentraler Veranstaltungsort für Ausstellungen und Vorträge entwickelt. Die Schlichtheit seiner Form sollte als Symbol für die Veranstaltung wirken: ein abstrahiertes Haus. Ein doppelwandiges System aus Gerüstbauelementen, im Dachbereich durch Steckverbindungen gehalten, bildete die Tragstruktur. Außen und innen wurde das Gerüst mit aluminiumbedampften Stoffbahnen bespannt, die zusätzlich gegen Regen imprägniert waren. Die Bodenfläche bestand aus Schaltafeln, Erdanker sicherten das Zelt gegen Windauftrieb.⁵



Abb. 16: Dacheindeckung mit aluminiumbedampften Stoffbahnen



Abb. 17: Konstruktionsgerüst

⁵ vgl. Detail - Mobiles Bauen 8/1998

Hofüberdachung Schöllerbau, Wien, Jabornegg & Pálffy, Wien

Der Hof der Schöllerbau wurde im Zuge eines Umbaus mit einer pneumatischen Luftkissenkonstruktion überdacht. Der fünfzehn x achzehn Meter große Hof wird von sechs schlanken Stahlbögen überspannt, zwischen denen die fünf luftgefüllten Kissen liegen. Die Dachmembranen bestehen aus 0,2 mm starken Polyethylen-Tetrafluorethylen-Folien mit einer Lichtdurchlässigkeit von 95%. Die Schub- und Drucklasten der Stahlbögen werden auf zwei horizontale und zwei vertikale Fachwerke übertragen (Abb. 18). Schräge zug- und druckfeste Stäbe verbinden das gesamte System mit horizontal gespannten Seilen und stabilisieren es.⁶

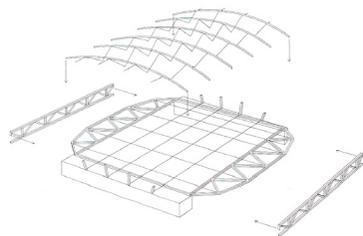


Abb. 18: Konstruktiver Aufbau



Abb. 19: Hofüberdachung Schöllerbau, Innenansicht, Foto © Werner Kaligofsky

⁶ vgl. Detail - Dächer 7/8/2002, S. 937

139 Shelter, Future Systems

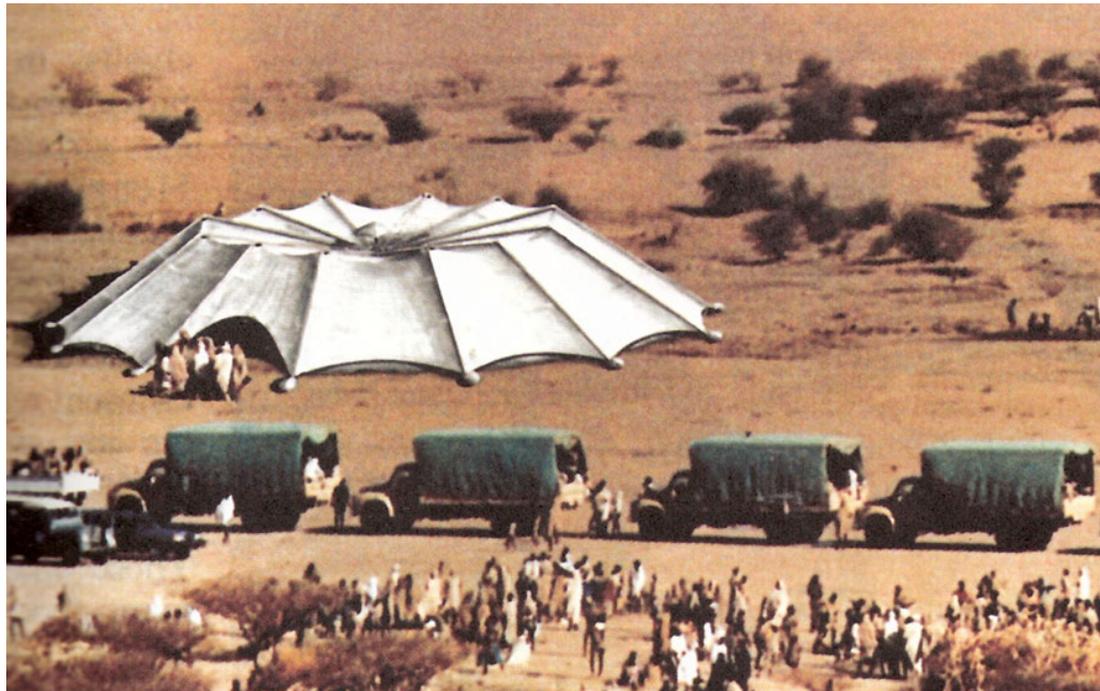


Abb. 20: 139 Shelter

Das Schirmzelt 139 Shelter von Future Systems aus dem Jahr 1989 wurde als temporäre Notunterkunft für Flüchtlinge konzipiert, jedoch nie realisiert.

Aufgespannt bedeckt die Konstruktion eine Fläche von 500 m² auf der bis zu 200 Personen Platz finden. Der zusammengeklappte Schirm kann einfach per Lastwagen oder Flugzeug transportiert werden und von zwölf Personen in nur dreißig Minuten aufgebaut werden. Das Schirmgestänge wird dabei mit Unterstützung einer Seilwinde auseinander gezogen und die Stangenenden mit Sandsäcken am Boden fixiert. Die Membran besteht aus PVC-beschichtetem Polyester, für den Luftaustausch ist durch eine Öffnung in der Dachmitte des Zeltgesesorgt.⁷

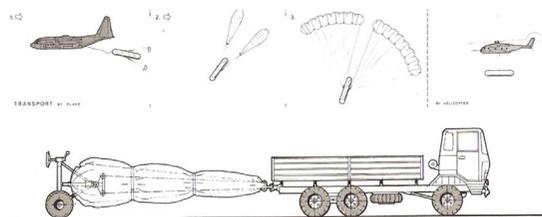


Abb. 21: Transportvarianten

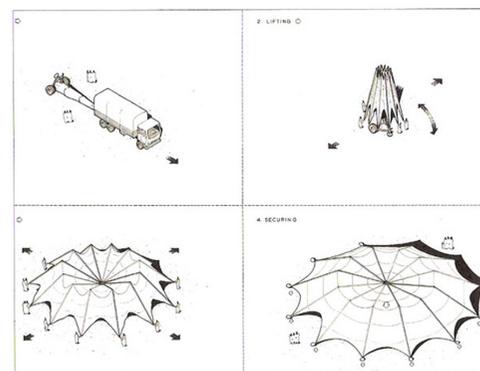


Abb. 22: Aufbau

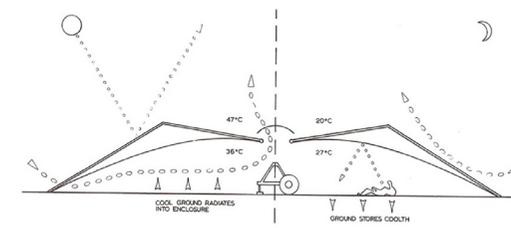


Abb. 23: Ventilationssystem

⁷ vgl. Design Like You Give a Damn, S. 88

1.2.2 Offene Konstruktionen

EXPO 2000 Schirme, Schulitz und Partner

Die Schirme für das EXPO-Gelände in Hannover funktionieren wie umgekehrte Regenschirme, die das Wasser durch ihre Mittelstütze ableiten. Die Konstruktion besteht aus vier doppelt gekrümmten Membranflächen, die zwischen einem quadratischen Rahmen von 7,5 m x 7,5 m und Stahlprofilen gespannt werden. Zug- und Druckstäbe stabilisieren gegen Windsog und Winddruck. Die Membranen sind linienförmig am Randträger befestigt und werden über die Montage am Hauptträger nachgespannt. Das Regenwasser wird in ein Regenfallrohr im Inneren einer Stahlstütze, die aus L-Profilen zusammengesetzt ist, geleitet und abgeführt. Jeder Schirm funktioniert einzeln oder in additiver Anordnung mit weiteren Elementen, die dann mit verschraubbaren Verbindungsstücken fixiert werden. Die Membranschirme wurden für die fünfmonatige Dauer der EXPO 2000 in Hannover entworfen und gebaut und konnten nach Ende der Weltausstellung zerstörungsfrei demontiert und weiter verwendet werden.⁸



Abb. 24: EXPO 2000 Schirme



Abb. 25: Axonometrie, Konstruktion



Abb. 26: Additiver Aufbau

⁸ vgl. Detail - Bauen mit Membranen 6/2000, S. 996



Abb. 27: Folding Canopies, Prototyp

Folding Canopies, Richard Horden

1994 entwarf Richard Horden addierbare Schirme für den Freibereich des Buckingham Palace, die ebenfalls auf dem Prinzip des umgedrehten Schirmes basierten. Auch bei diesem System wird das Wasser durch die Mittelstütze in den Boden abgeleitet, im Vergleich zu den EXPO-Schirmen kann die Konstruktion jedoch eingeklappt werden. Die quadratischen Schirme haben eine Kantenlänge von 3,6 m. Im aufgeklappten Zustand werden die Eckpunkte der Schirme mit dünnen Zugstangen an einer Bodenplatte mit den gleichen Abmessungen fixiert.

Das Projekt wurde bis auf einen Prototypen nie realisiert.⁹

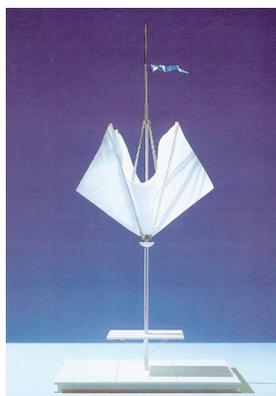


Abb. 28: Klappmechanismus

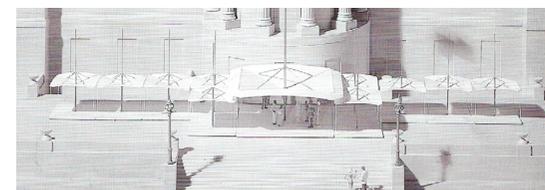
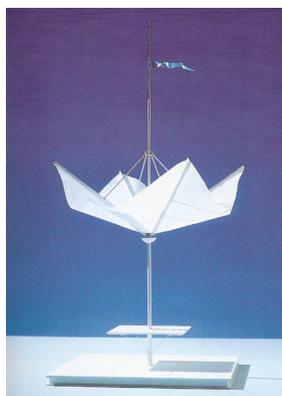


Abb. 29: Additiver Aufbau, Modell

⁹ vgl. light tech - towards a light architecture

Hofüberdachung Schloss Wasseralfingen, Bodo Rasch und Jürgen Bradatsch, Aalen

Der Hof des Renaissanceschlusses wird für Open Air Veranstaltungen von einem wandelbaren Dach aus vier Schirmen wettergeschützt. Bei einsetzendem Regen können die Schirme binnen sechs Minuten ausgefahren werden.

Im Innenhof mit den Abmessungen von ca. 14 x 14,6 m stehen die Schirme in der Höhe gestaffelt und überlappend angeordnet. Die Schirme sind in ihrer Höhenentwicklung auf die anschließenden Fassaden, das Gefälle des Hofes und die Hauptwindrichtung abgestimmt.

Der klare Abstand zu den umgebenden Wänden betont den Kontrast zwischen schwerer Mauer und leichter Membrankonstruktion.

Das Gestänge der Schirme ist aus rostfreiem Stahl gefertigt. Vier Diagonalarme mit jeweils zwei gelenkig angeschlossenen Passivarmen spannen die Membran (7,3 x 7,3 m) aus PVC-beschichtetem, transluzentem Polyestergewebe auf. Das Regenwasser wird über einen Sammler aus Edelstahl ins Mastinnere abgeleitet.¹⁰



Abb. 30: Schirme Wasseralfingen, Aalen

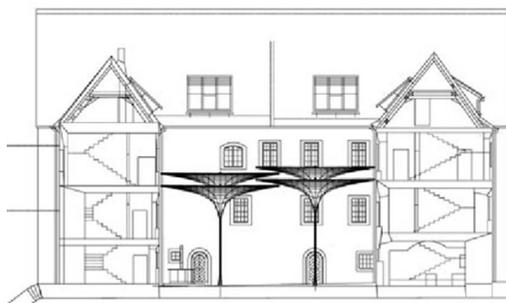


Abb. 31: Höhengestaffelte Überdachung



Abb. 32: Spannvorgang eines Schirmes

¹⁰ vgl. Entwässerung von Membrankonstruktionen, S. 25-26



Abb. 34: Dachkonstruktion aus zwei ineinander laufenden Spiralen



Abb. 33: Schwimmender Pavillon

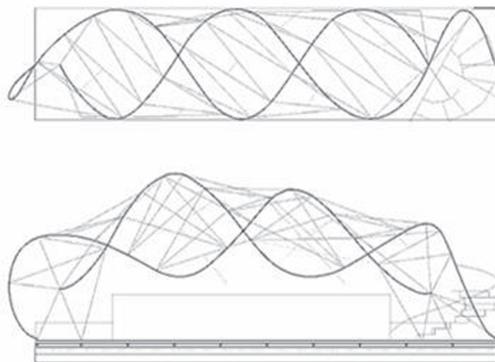


Abb. 35: Grundriss, Ansicht

Schwimmender Pavillon, Fumihiko Maki

Der Schwimmende Pavillon aus dem Jahr 1996 von Fumihiko Maki ist eine mobile Membrankonstruktion, die jedoch nicht zum häufigen Auf- und Abbau konzipiert wurde.

Das Gerüst aus zwei ineinander laufenden Spiralen, welches mit einer weißen, semitransparenten Membran bespannt ist, ist auf einem 150 m² großen Schwimmkörper fixiert. Mittels Booten kann die Veranstaltungsbühne auf dem niederländischen Kanalsystem nahe der Stadt Groningen an die vorgesehenen Anlegestellen gezogen werden. Die Bühnenplattform ist seitlich durch gebogene, als Sitzreihe ausgeformte Lochblechwände begrenzt, die nach außen geklappt werden können, sodass die Bühne einsehbar wird. In dem flachen Betonkubus des Schwimmkörpers sind die Umkleiden, Sanitärräume und Garderoben für die Künstlerinnen und Künstler untergebracht.

Starwave Zelt, Frei Otto und Bodo Rasch

Frei Otto und Bodo Rasch entwarfen für die Architektur Biennale 1996 in Venedig eine membrane Dachfläche, die als Orientierungspunkt und möglicher Veranstaltungsort fungierte.

Als weithin sichtbares Zeichen positionierten sie die Konstruktion mit ihrer beinahe quadratischen Grundfläche am Kreuzungspunkt zweier Alleen des Ausstellungsgeländes. Die Membranfläche überdachte einen Bereich von ungefähr 15 m x 15 m und hatte an ihren Ecken vier Hochpunkte, die mit Zuggurten an A-förmigen Stützen hochgespannt wurden. Die dazwischen gelegenen vier Tiefpunkte wurden bis zum Boden geführt. Die Membranspannungen und Windkräfte nahmen acht mit Kies gefüllte Behälter auf.



Abb. 36: Starwave Zelt, Venedig 1996



Abb. 37: Membranaufhängung, Detail

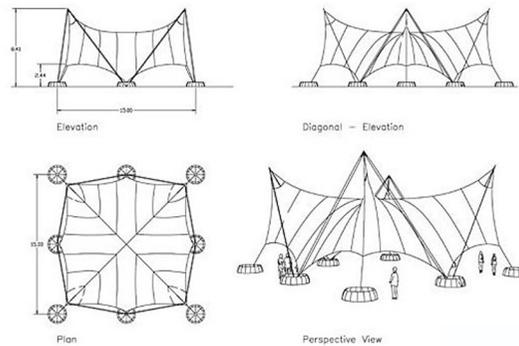


Abb. 38: Grundriss, Ansichten



Abb. 39: Innenraum



Abb. 40: Wiener Rathaus, Nachbildung der neugotischen Arkadenbögen durch Faltung der Dachfläche



Abb. 41: Entwässerungsschläuche



Abb. 42: Ausgefahrener Zustand

Hofüberdachung Wiener Rathaus, Silja Tillner

Zur temporären Überdachung des Innenhofs des Wiener Rathauses wurde ein 1000 m² großes, verfahrbares Membrandach entwickelt. Die 34,2 x 32,5 m große Konstruktion über dem Arkadenhof dient als Regen- und Sonnenschutz für zahlreiche Veranstaltungen und erspart den Auf- und Abbau der zuvor verwendeten Bierzelte. Die gesamte Membran- und Seilkonstruktion sowie die Querträger sind fahrbar auf Linearführungsschienen angeordnet. Zwischen den an der Fassade montierten Laufschielen sind die Gratseile der Dachfläche gespannt, dazwischen liegende Kehlseile steifen die Membran aus und sichern sie gegen Windsog. Im geöffneten Zustand bildet die gefaltene Dachfläche die neugotischen Arkadenbögen nach.

Als Trägermaterial der Dachhaut wurde ein PVC-beschichtetes Polyestergewebe verwendet. Die Lichtdurchlässigkeit des gesamten Membranaufbaus beträgt 15%. Die Entwässerung der acht Kehlen in der ausgefahrenen Position erfolgt über Membranschläuche, welche an der Traufe befestigt sind und zum Boden hin gesichert werden.¹¹

¹¹ vgl. www.tw-arch.at

Überdachung Urban-Loritz-Platz, Silja Tillner, Wien

Die Membranüberdachung am Urban-Loritz-Platz hat eine Gesamtlänge von ca. 140 m. Das Tragsystem des Daches besteht aus Stahlbogenträgern (fünf gekippten Bogenpaaren) auf Stahlstützen, die sämtliche Lasten in die Gründung einleiten.

Der Horizontalschub der Bögen wird durch Zugseile aufgenommen, sodass Bogen und Zugseil ein in sich geschlossenes Kräftesystem ergeben und gelenkig mit den Stützköpfen verbunden werden können.

Die Zugkraft der zwischen den Bogenpaaren eingespannten Membran wird durch Druckstäbe aufgefangen, welche oberhalb des Textils an den Bogenfirstpunkten angreifen. So liegt das Dach wie eine Platte auf den Stützen auf.

Die Stützen selbst sind paarweise in Einzelfundamenten eingespannt.¹²



Abb. 43: Urban-Loritz-Platz, Luftbild



Abb. 44: Detail



Abb. 45: Seilunterspannte Stahlbogenträger

¹² vgl. Entwässerung von Membrankonstruktionen, S. 31

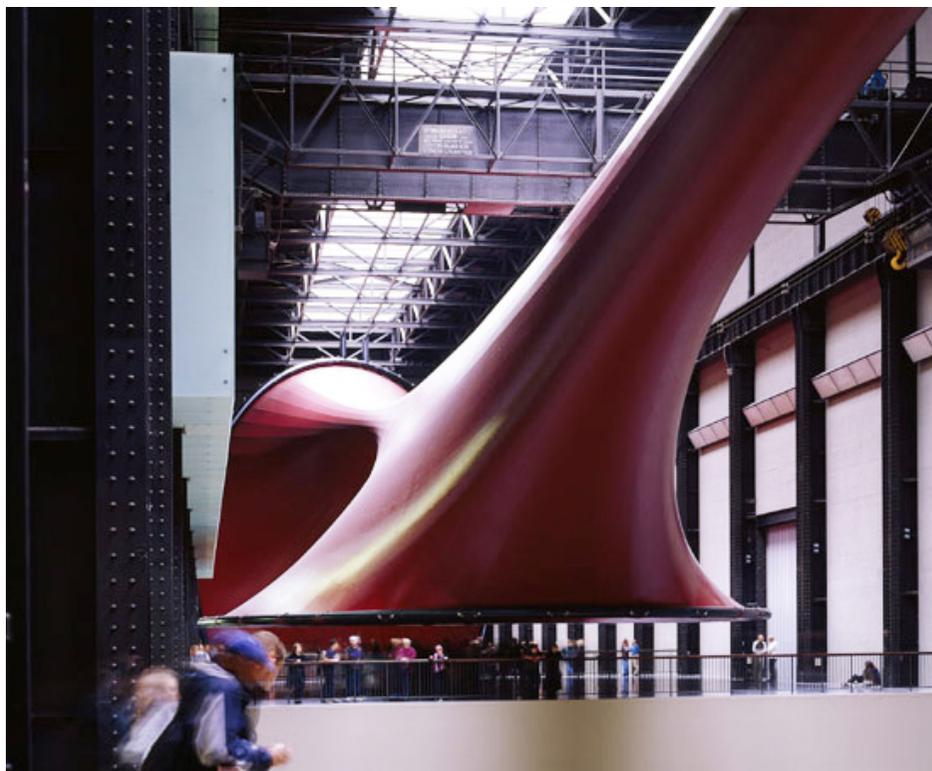


Abb. 46: Marsyas, Horizontaler Stahlring über der Besucherplattform

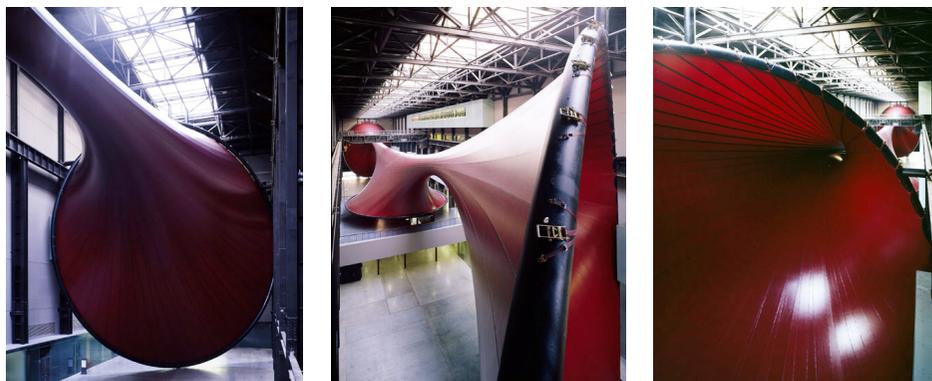


Abb. 47 - Abb. 49: Ansichten von unterschiedlichen Raumpositionen

1.2.3 Arbeiten in der zeitgenössischen Kunst

Marsyas, Anish Kapoor, Tate Modern 2002

Für die Turbinenhalle der Tate Modern in London schuf der Künstler Anish Kapoor eine gewaltige Raumskulptur. Die Installation aus leuchtend roter PVC-Membran erstreckte sich beinahe über den gesamten Raum, der eine Länge von 155 Metern misst.

Marsyas - so der Name der Skulptur - wird von drei Ringen aus Stahl aufgespannt. Zwei sind vertikal jeweils am Ende des Raumes positioniert, der dritte schwebt horizontal über den Köpfen der Besucherinnen und Besucher. Von allen Positionen des Raumes ist jeweils nur ein Ausschnitt der Skulptur zu sehen und je nach Standort scheint sie eine andere Gestalt anzunehmen. Das Größenverhältnis des Betrachters zum Kunstwerk war ein zentraler Gedanke der Arbeit.

**The Gates, Christo und Jeanne-Claude,
New York 2005**

Im Februar 2005 realisierten Christo und Jeanne-Claude ihr Projekt The Gates im Central Park, New York, für welches sie seit 1979 um Genehmigung angesucht hatten. Insgesamt 7503 safranfarbene Tore aus Vinyl-Stangen kombiniert mit freihängenden Gewebbahnen wurden entlang des Wegenetzes des Parks aufgestellt. Der Abstand der Tore zueinander betrug 3,65 Meter bei einer Höhe von 4,87 Metern. Gesichert wurde die Konstruktion mit Stahlsockelgewichten, sodass Bohrungen in den Boden vermieden werden konnten. Die rechteckige Form der Tore spiegelte die geometrische Anlage der Stadt wieder. Im Kontrast dazu standen die ständig wechselnden runden Bewegungen der frei im Wind wehenden Gewebbahnen.

Nach sechzehn Tagen wurde das von Christo und Jeanne-Claude selbst finanzierte Projekt wieder abgebaut.



Abb. 50: The Gates, New York 2005



Abb. 51: The Gates, Februar 2005

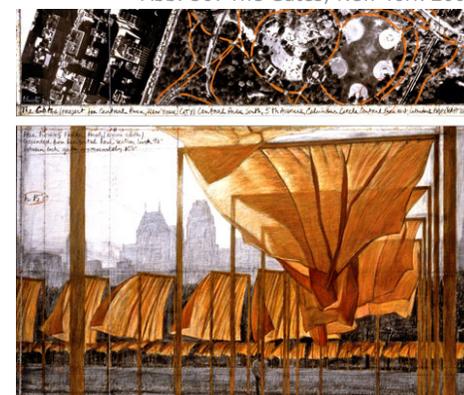


Abb. 52: Skizze mit Gesamtplan des Parks, 2001



Abb. 53: Windshape, obere Terrasse mit zweiter Terrasse im Hintergrund

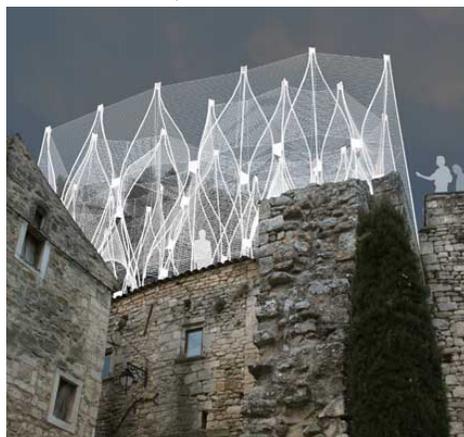


Abb. 54: Obere Terrasse, Rendering



Abb. 55 und Abb. 56: Untere Terrasse

Windshape, nARCHITECTS

Windshape war eine temporäre Konstruktion für den Campus des Savannah College of Art and Design in Lacoste, Frankreich. Zwei skulpturenhafte „Pavillons“ auf den Terrassen der Burg Lacoste dienten im Sommer 2006 als Treffpunkt und Veranstaltungsort für Konzerte und Ausstellungen.

Aus Plastikrohren - durch Aluminiumtriangeln miteinander verbunden und voneinander verspreizt - entstanden acht Meter hohe Geflechte, die mit Polypropylenschnüren verwoben wurden. Die dynamische Konstruktion reagierte je nach Windstärke unterschiedlich: von rhythmischen Schwingungen über wellenartiges Flattern der Oberfläche bis zu dramatischen Bewegungen der gesamten Konstruktion, mit denen ein starkes Rauschen einherging.

Windshape war der Versuch einer Konstruktion, die auf natürliche Impulse reagieren kann.

**Open Burble, Haque design + research,
Singapore 2006**

Der Londoner Medienkünstler Usman Haque gestaltete den Abendhimmel der Singapore Biennale 2006 mit seinem interaktiven Projekt Open Burble. Halb Installation, halb Performance war die riesige, farbig leuchtende Wolke aus rund 1000 Heliumballons. Die Struktur wurde vom Publikum selbst zusammengebaut und anschließend gesteuert, die Form der Burble ergab sich also aus der Summe aller Mitwirkenden. Zusammengesetzt war die Konstruktion aus 140 modularen Kohlefaser-Einheiten mit je zwei Metern Durchmesser. Jede Einheit war von sieben extra großen, Helium gefüllten Latexballons getragen, die Sensoren, LEDs und Mikrokontroller enthielten. Durch diese technische Ausrüstung konnten pixelartig zusammengesetzte, farbige Muster erzeugt werden.



Abb. 57: Open Burble, Singapore 2006

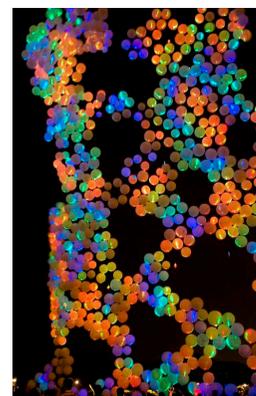


Abb. 58 und Abb. 59: Unterschiedliche Beleuchtung der Open Burble



Abb. 60: Konstruktion beim Aufbau



Abb. 61: Snelson Skulptur, Frederik Meijer Gardens Park

1.3 Tensegrity-Konstruktionen

Bei dieser besonderen Art von Tragkonstruktionen wird ein zusammenhängendes System von Zugelementen mit nicht zusammenhängenden Druckelementen kombiniert, sodass mit der dafür nötigen Vorspannung ein in sich stabiles Raumvolumen erzeugt wird.

Der Begriff Tensegrity ist ein von R. Buckminster Fuller geschaffenes Kunstwort, das sich aus den Wörtern „tension“ (Spannung) und „integrity“ (Intaktheit, Vollständigkeit) zusammensetzt. Tensegrity bedeutet demnach Zusammenhalt durch Spannung.

In seinem Buch „Your Private Sky“ beschreibt R. Buckminster Fuller diese außergewöhnlichen Tragwerke folgendermaßen:

„Tensegrity ist eine anticlassische Herangehensweise an Struktur und Konstruktion und impliziert eine Umkehrung der Wahrnehmung: was als kompakt-stehend und solide erscheint, erweist sich als hängend und ephemere.“¹³

Tensegrity-Systeme sind statisch nicht leistungsfähiger als konventionelle Fachwerkträger oder Stützen und sind durch ihren komplizierten Kraftabtrag, die große Anzahl aufwendiger Details und ihre Montage in ihrer baupraktischen Anwendung eingeschränkt. Trotz alledem sind Tensegrity-Systeme in der Leichtbautechnik ein sehr interessanter Lösungsansatz.

Dieses System können all jene Bereiche zu ihren Gunsten einsetzen, bei denen die Reduktion des Eigengewichtes entscheidend ist. Diese sind beispielsweise die Überbrückung großer Spannweiten oder temporäre und mobile Bauten, bei denen ein geringes Gewicht den Transport und die Montierbarkeit erleichtern. Auch wandelbare Konstruktionen wie zum Beispiel faltbare Überdachungen können von diesem System profitieren.

¹³ vgl. Your Private Sky

1.3.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Skulptur des russischen Künstlers **Karl Ioganson** ist das erste dokumentierte Beispiel einer Tensegrity-Struktur. Schon im Jahr 1920 brachte er drei Druckstäbe durch eine kontinuierliche Verbindung mit Seilen ins Gleichgewicht.

Obwohl meist R. Buckminster Fuller als Entdecker der Tensegrity-Systeme gepriesen wird, so war es doch eigentlich der amerikanische Architekt **Kenneth Snelson**, ein Schüler Fullers, der sich als erster intensiv mit Skulpturen beschäftigte, denen dieses Prinzip zugrunde lag.

Mit dem X-Piece von 1948 gelang ihm bereits in seiner frühen Studienzeit eine Skulptur, die den Grundsätzen der Tensegrity-Systeme folgte. Dieses eine Objekt gab den Anstoß für eine ganze Reihe von Forschungsprojekten, die zu immer größeren und komplexeren Strukturen führte. Obwohl unter Snelsons Leitung erstmals Strukturen größeren Maßstabs verwirklicht wurden, wechselte er in seiner Arbeit nie von der Skulptur hin zur Architektur.

Der achzehn Meter hohe Needle Tower von 1968 im Skulpturengarten des Hirshhorn Museum in Washington besteht aus vielen übereinander gestapelten Dreieck-Prismen, bei denen kein Druckstab den anderen berührt.

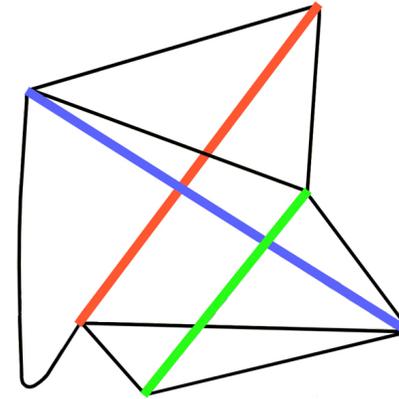


Abb. 62: Skizze der Skulptur Iogansons von 1920

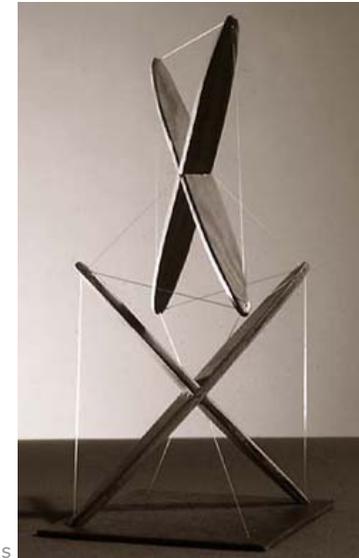


Abb. 63: X-Piece, Snelson 1948

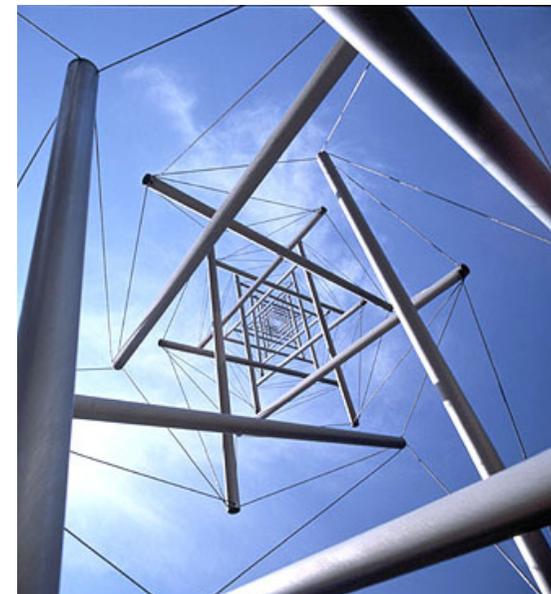
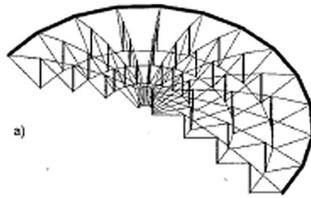
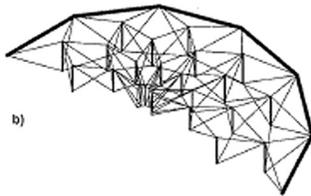


Abb. 64 und Abb. 65: Needle Tower, Snelson 1968



System Geiger Kuppel



System Aspension Kuppel

Abb. 67: Systemvergleich Geiger / Fuller

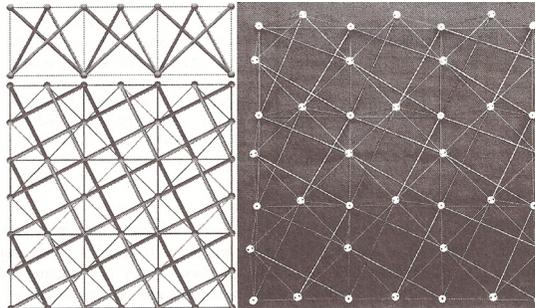


Abb. 69: Tensegrity-Netz aus zwei übereinandergelegten Seilnetzen, die mit Druckelementen verspannt werden

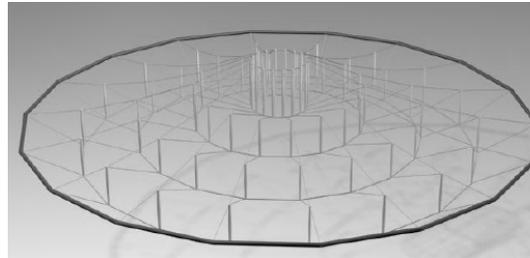


Abb. 66: Geiger Kuppel

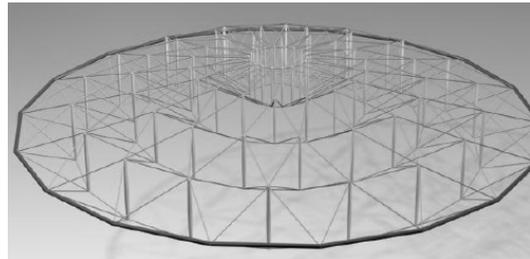


Abb. 68: Aspension Dome

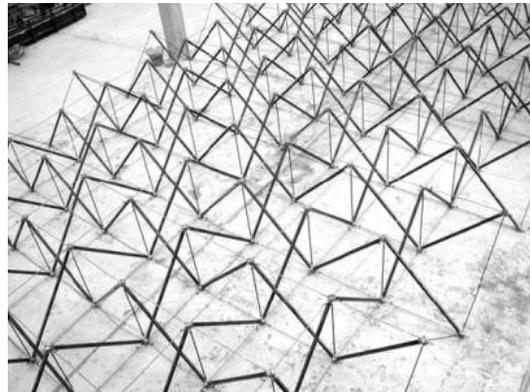


Abb. 70: Tensegrity-Netz aus Seilfachwerkträgern

Von den Skulpturen seines Schülers Snelson inspiriert, entwickelte **R. Buckminster Fuller** eine Vielzahl von Basissystemen und suchte nach deren Anwendung im Leichtbau.

Eine Addition dieser Basismodule stellte die Grundlage für seine Geodätischen Kuppeln dar. Der Tensegrity Dome von 1962 besteht aus einer Aneinanderreihung von Tensegrity-Polyedern. Beim Aspension Dome (Abb. 68) von 1964 wurden mehrere Ringe mit abgestuftem Durchmesser in ansteigender Reihenfolge aneinander aufgehängt. In der untersten Ebene ist ein Druckring erforderlich. Mit dieser Konstruktion konnte die maximale Spannweite mit einem Minimum an Konstruktionsgewicht erreicht werden.

Für **David Geiger** diente diese patentierte Kuppelform als Vorlage für seine Cable Domes (Abb. 66). Er verband radial angeordnete, unterspannte Gratseile mit einer ebenfalls radial ausgerichteten Membranfläche und konnte so den inneren Zugring einsparen. Mehrere hochgehängte Zugringe tragen die Lasten von innen nach außen ab.

René Motro legte zwei Netze aus Zugelementen verdreht übereinander und verband diese mit diagonalen Druckelementen (Abb. 69). Auf dem unten liegenden Netz treffen je vier Stäbe auf einen Knoten, auf dem oberen sind es je zwei Stäbe.

Im Jahr 2000 entwickelte Motro ein weiteres Tensegrity-Netz aus ineinander verwobenen Seilfachwerkträgern.

1.3.2 Klassifizierung der Tensegrity-Systeme

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Tensegrity-Strukturen einzuteilen. Wir unterscheiden zwischen offenen und geschlossenen, ebenen oder räumlichen Systemen sowie jenen 1. Ordnung oder 2. Ordnung.

Geschlossene Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie unabhängig von ihrer Lage stabil sind. In jeder beliebigen Projektion überlappen sich die Druckstäbe.

Offene Systeme müssen die auftretenden Kräfte an eine Sekundärkonstruktion oder einen Baugrund weiterleiten. Die Druckstäbe müssen nicht als Diagonalen eingesetzt werden und können daher kürzer und mit kleinerem Querschnitt ausgeführt werden.

Ebene offene Tensegrity-Systeme werden meistens als Seilbinder eingesetzt. Ein Tragseil und ein Spannseil werden mit einem oder mehreren Druckstäben verspannt. Bei vertikaler Belastung steigt die Spannung im Tragseil, die Vorspannkraft im Spannseil dagegen wird abgebaut. Zur Verbesserung des Verformungsverhaltens ist es möglich, bei mehreren Druckstäben diese zusätzlich mit Seilen auszukreuzen.

Räumlich offene Tensegrity-Systeme sind dreidimensional verspannt. Spann- und Tragseile werden an mindestens drei Punkten abgespannt, auch die Druckstäbe können räumlich angeordnet werden. Zu den räumlich offenen Tensegrity-Systemen gehören beispielsweise auch räumliche Seilfachwerke.

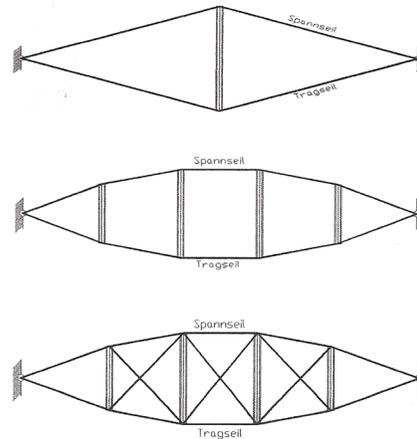


Abb. 71: Ebene offene Tensegrity-Systeme

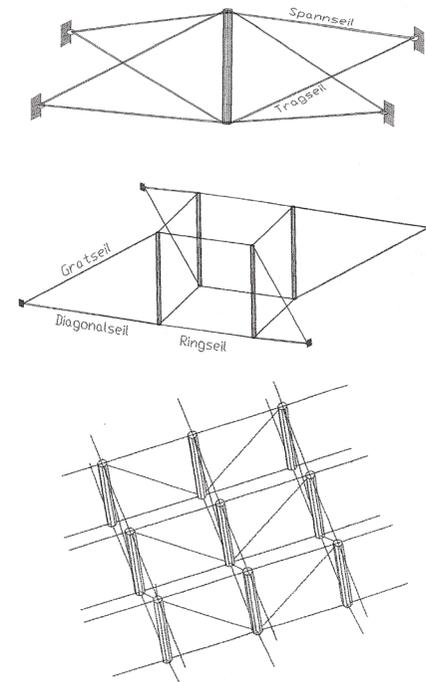


Abb. 72: Räumlich offene Tensegrity-Systeme

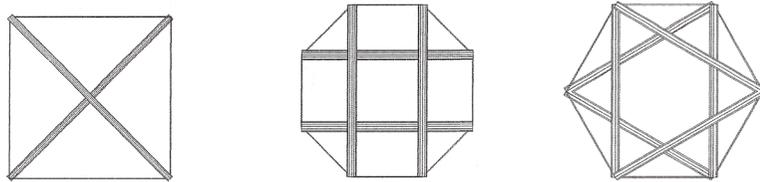


Abb. 73: Ebene geschlossene Tensegrity-Systeme

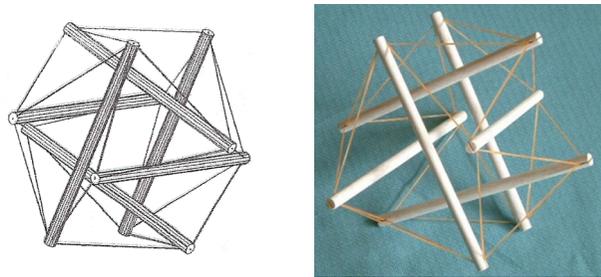


Abb. 74: Räumlich geschlossene Tensegrity-Systeme

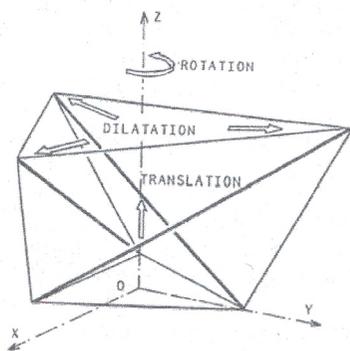


Abb. 75: Bildungsgesetz eines Twistelementes

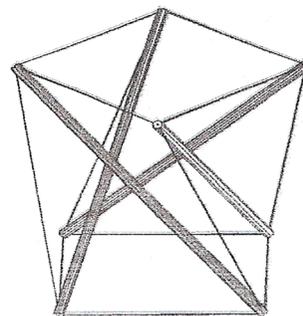


Abb. 76: Twistelement

Ebene geschlossene Tensegrity-Systeme entstehen durch das Auskreuzen einfacher geometrischer Formen, ihre Eckpunkte bestimmen die Enden der Druckstäbe. Berühren zwei Stäbe einander in einem dieser Eckpunkte, liegt kein reines Tensegrity-System vor, da in diesem Punkt eine Kraftübertragung stattfindet.

Räumlich geschlossene Tensegrity-Systeme entstehen durch das Auskreuzen geometrischer Körper. Auch hier bilden die Druckstäbe die Eckpunkte, während die Zugseile die Kanten darstellen. Wir unterteilen sie in jene 1. Ordnung und in Systeme 2. Ordnung.

Bei Systemen **1. Ordnung** liegen zwei oder mehrere Druckstäbe in einer Ebene.

Bei Tensegrity-Systemen **2. Ordnung** liegt jedes Druckelement in einer anderen Ebene.

Eine häufige Form von Systemen 2. Ordnung sind die Twistelemente. Sie werden aus zwei gegenüberliegenden, gleichmäßigen Polygonflächen gebildet, die zueinander verdreht sind. Die Kanten entstehen wiederum durch die Zugelemente. Bei der Verdrehung der beiden Polygone gibt es eine einzige Stelle, an der die Zugseile, welche die Eckpunkte verbinden, ihre minimale Länge erreichen. In dieser Stellung ist das Element vorspannbar und damit in sich stabil. Sind die zwei erzeugenden Polygone unterschiedlich groß, entsteht ein pyramidenförmiger Körper.¹⁴

¹⁴ vgl. Arbeitsblätter Tensegrity, S. 1-13

1 KONTEXT

2 ENTWICKLUNG & ANALYSE

3 ANWENDUNG DES SYSTEMS

2.1 Anforderungen an das System

Die meisten Membrankonstruktionen werden für einen bestimmten Ort geplant und sind in ihrer Form und Größe an diesen angepasst. Andere Überdachungen funktionieren zwar ortsunabhängig, können sich aber den örtlichen Gegebenheiten in keiner Form anpassen.

Die Motivation für diese Arbeit war es, ein System für eine Membranüberdachung zu entwickeln, das auf unterschiedliche bauliche Gegebenheiten reagieren kann und dabei die Vorzüge des Tensegrity-Prinzips sinnvoll anwendet.

Die Umsetzung des Begriffs der Leichtigkeit in Material gelingt mit keiner anderen Konstruktionsweise besser als der der Tensegrity-Systeme. Weiters ist die tatsächliche Einsparung von Material und Gewicht im Leichtbau von Vorteil und erstrebenswert. Daher ist es hier die Absicht, dieses Konstruktionsprinzip für eine membrane Dachkonstruktion zu verwenden.

Selbstverständlich gilt bei den Überlegungen zu einer Dachfläche dem Wetterschutz besondere Aufmerksamkeit. Die angestrebte Membrankonstruktion soll vor Sonne und Regen schützen, stellt aber nicht zwingend den Anspruch wasserundurchlässig zu sein. Vielmehr soll der entstehende Raum im Freien die Umgebung stark miteinbeziehen und mit Licht und Schatten und dem abfließenden Regen spielerisch umgehen.

Weiters wäre ein vielfältiger Einsatz günstig, welcher durch Addition eines modularen Systems erreicht werden könnte. Eine breite Anwendung im öffentlichen wie auch privaten Bereich, über große Spannweiten oder kleine Terrassen, würde die Nutzungsfrequenz und damit die Wirtschaftlichkeit steigern.



Abb. 77: Easy Landing, Kenneth Snelson 1977

2.2 Modellversuche

Nach einer intensiven theoretischen Auseinandersetzung mit dem Thema Tensegrity stellte sich die Frage, ob es möglich sei, die Leichtigkeit, die diese Konstruktionen vermitteln, auf eine Membrankonstruktion zu übertragen. Die umgekehrte Überlegung war, ob eine Tensegrity-Konstruktion in Kombination mit flächigen Elementen allzu viel von ihrer schwebend leichten Erscheinung einbüßen müsse.

Als entwurfsfindendes Mittel erwiesen sich Skizzen als eher untauglich und daher folgten den zuvor gestellten Fragen die ersten praktischen Modellversuche mit den Grundformen der Tensegrity-Systeme.

Anhand dieser Modelle konnten Erkenntnisse über die Bedeutung des Zusammenspiels von Vorspannkraft, Seil- und Stablänge gewonnen werden. Jedoch zeigten sich auch die Schwierigkeiten dieser Systeme im Modellbau. Die experimentelle Ermittlung des Verhaltens der Druckstäbe im Raum bedarf vieler Modelle. Geringe Änderungen der Stab- oder Seillängen wirken sich stark formverändernd aus, wodurch eine hohe Genauigkeit im Modellbau gefordert ist. Verschiebbare Knoten zur nachträglichen Änderung der Seillängen erwiesen sich als sehr hilfreich.

2.2.1 Modellversuche zu räumlich geschlossenen Tensegrity-Systemen

Aus Holzstäben, Stecknadeln und Zwirn entstanden vorerst Modelle von räumlich geschlossenen Tensegrity-Strukturen.

Den ersten Formen von Twistelementen aus drei Stäben folgte eine Kombination mehrerer dieser Systeme.

Die pyramidenförmigen Körper waren einander gegenüber gestellt, sodass jeweils eine Stange als Stütze diente und sie ein gemeinsames Druckelement teilten (Abb. 79). Der Einsatz von Drei-Stab-Twistelementen erwies sich jedoch als eher ungünstig, da die hierfür notwendigen Zugseile den nutzbaren Raum in einem sehr flachen Winkel durchkreuzen.

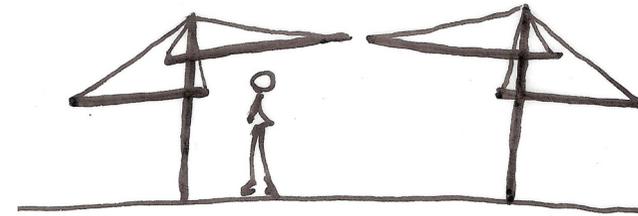


Abb. 78: Räumlich geschlossene Tensegrity-Systeme, Skizze



Abb. 79: Kombination zweier Twistelemente

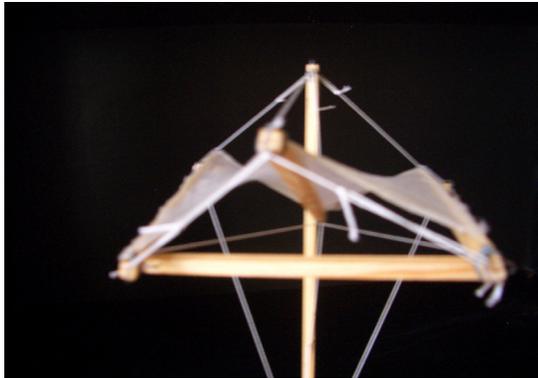


Abb. 80: Tensegrity-System 1. Ordnung

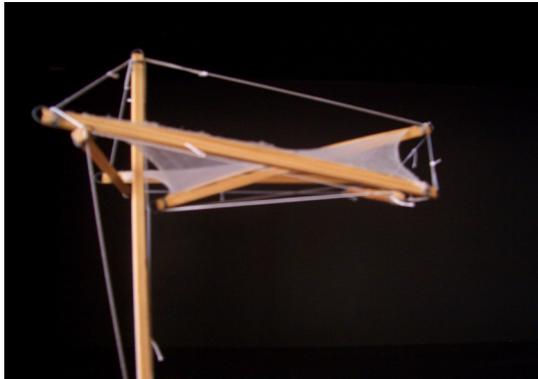


Abb. 81: Tensegrity-System 1. Ordnung, Seitenansicht

Im nächsten Schritt folgte der Versuch, ein Tensegrity-System 1. Ordnung an eine Stütze anzuhängen und so eine schirmartige Konstruktion zu erhalten. Die gesamte geschlossene Konstruktion bestand aus:

1 Stütze,

3 Stäben, die

2 Membranflächen aufspannten, und

2 Druckstäben, die um 90° verdreht zu den Membranstangen diese auseinander spreizten.

Mögliche Erweiterungsvarianten für dieses System wären nebeneinander oder gegenüber aufgestellte Schirme, die einander überragen.

Der allseitige Anbau von weiteren Schirmen ist jedoch bei dieser Konstruktion nicht möglich, da der Schirm nur einseitig ausgerichtet ist und die Anordnung der konstruktiven Stangen dies nicht zulässt.

Diese Konstruktion zeigte sich als sehr komplex und benötigte viel Material. Weiters war die positive Eigenschaft der allseitigen Erweiterung von Schirmen bei diesem Beispiel nicht gegeben und das Risiko der Verdrehung bei Windbelastung erschien sehr hoch.

Um dem Risiko der Verdrehung entgegenzuwirken, wurden mehrere dieser Systeme aneinander gereiht, sodass eine Membranbahn entstand, die an mehreren Stützen abgehängt werden musste. Die Bahn wurde durch auf- und abgekippte Membranstangen zweiseitig gekrümmt, im Bereich der Wände wurde dieses System vertikal weitergeführt.

So folgte die Stangenkonstruktion der Grundform zweier ineinander verschränkter Rahmen (Abb. 82), die nach dem Tensegrity-Prinzip aufgelöst wurden.

Die Membranbahn konnte nur in ihrer Längsrichtung erweitert werden, bei der Gegenüberstellung zweier dieser Konstruktionen überlappten sie einander im Zeltgiebel.

Ähnlich wie der vorangegangene Versuch brachte auch diese Konstruktion keinerlei Materialeinsparung mit sich. Weiters schien die Konstruktion aufwendig erweiterbar und das Einbringen der Vorspannkraft sehr komplex.



Abb. 82: Zwei ineinander verschränkte Rahmen

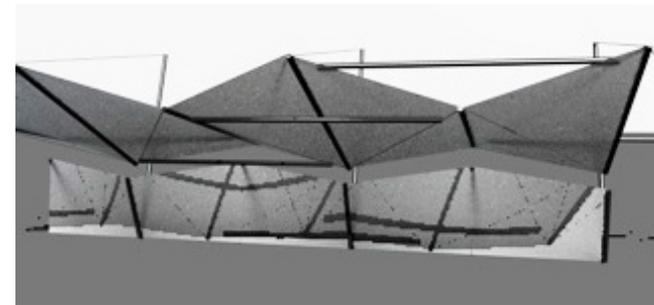


Abb. 83: Aneinanderreihung mehrerer Systeme zu einer Bahn

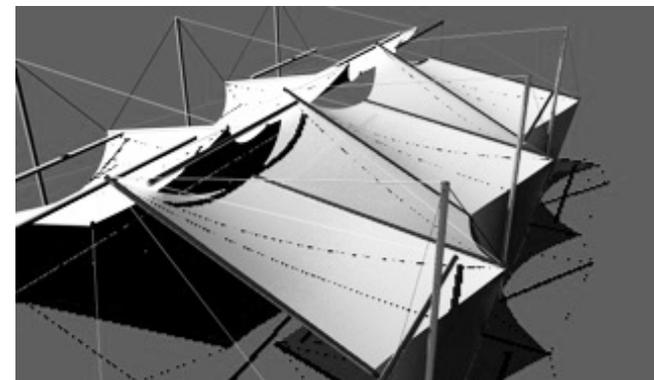


Abb. 84: Gegenüberstellung zweier Bahnen

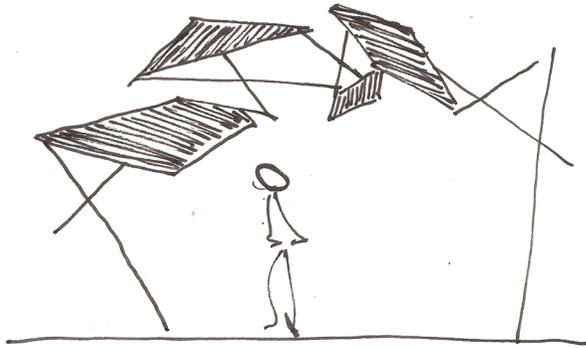


Abb. 85: Räumlich offenes Tensegrity-System, Skizze

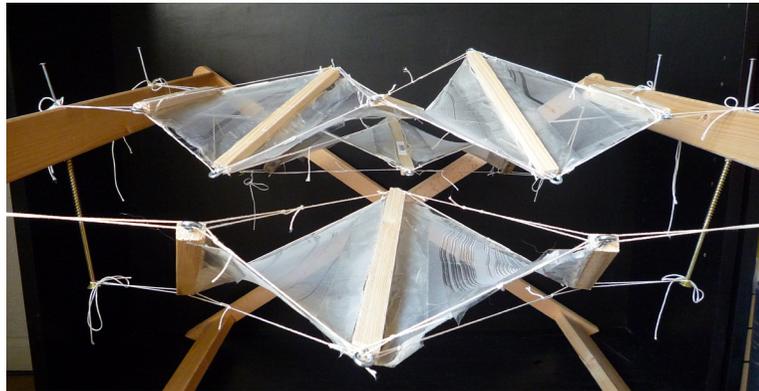


Abb. 86 und Abb. 87: Erste Versuche eines räumlich offenen Tensegrity-Systems aus gegengleich gegippten Druckstäben

2.2.2 Modellversuche zu räumlich offenen Tensegrity-Systemen

Die Erfahrungen aus den Versuchen mit räumlich geschlossenen Tensegrity-Systemen führten dazu, anschließend räumlich offene Konstruktionen zu untersuchen.

Es folgte der Versuch, die Zeltbahn des vorangegangenen Modells auf ein räumlich offenes System anzuwenden. Dazu wurden alle oberen Enden der gekippten Membranstangen mit Zugseilen verbunden, ebenso die unteren Enden. So entstand ein räumliches Seilfachwerk, ein räumlich offenes Tensegrity-System. Dieses System verlangt eine Sekundärkonstruktion, von der die horizontalen Kräfte aufgenommen werden.

Eine Erweiterung der gesamten Konstruktion wäre durch Aneinanderreihung mehrerer Bahnen an ihrer Längsseite möglich. Die Bahnen wurden auf zwei verschiedenen Höhen angelegt, damit das Regenwasser von den Tiefpunkten der oberen Membran auf die versetzt untere Bahn fließen kann, die dann das Wasser nach außen abführt. Dieses räumlich offene Seilfachwerk könnte über einen großen Stützenabstand geführt werden und dabei - im Vergleich zu den vorangegangenen Entwürfen - viel Material einsparen. Die gesamte Zeltbahn könnte mit allen Seillängen voreingestellt werden und würde sich bei der Montage durch die Vorspannung auffalten.

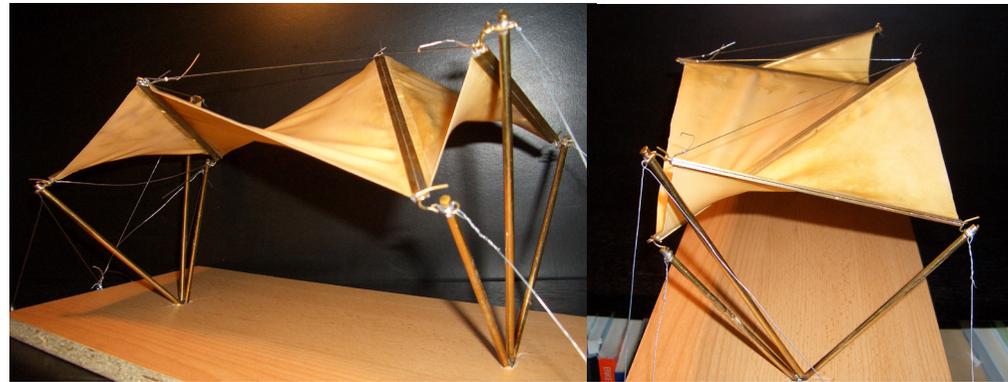


Abb. 88

Abb. 89

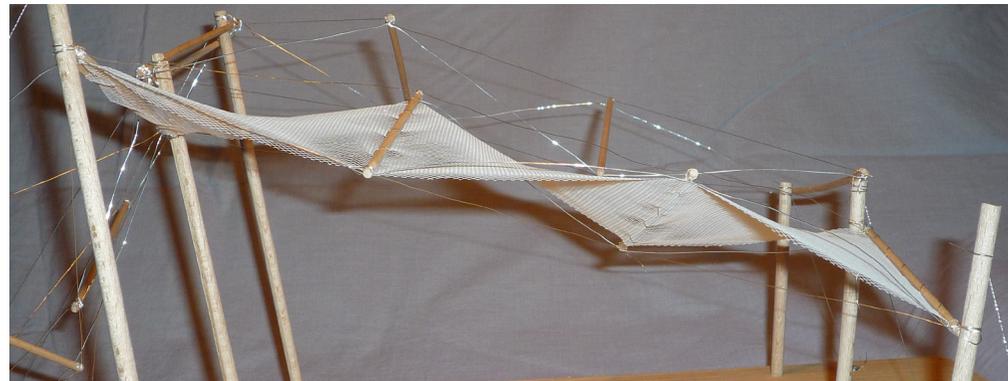


Abb. 90

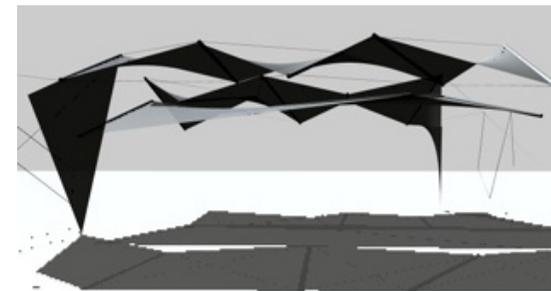
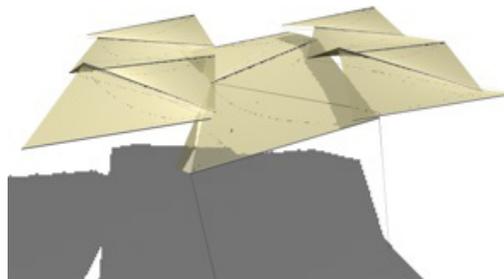


Abb. 88 - Abb. 92: Diverse Modellversuche und mögliche Kombinationen mehrerer räumlich offener Tensegrity-Systeme

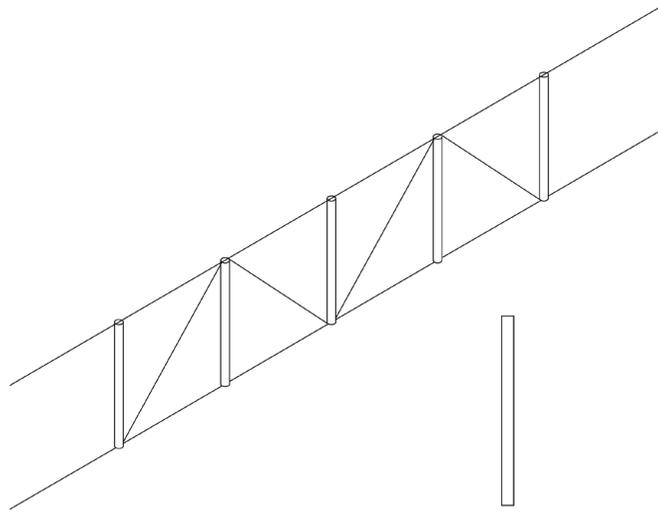


Abb. 93: Vertikales Seilfachwerk

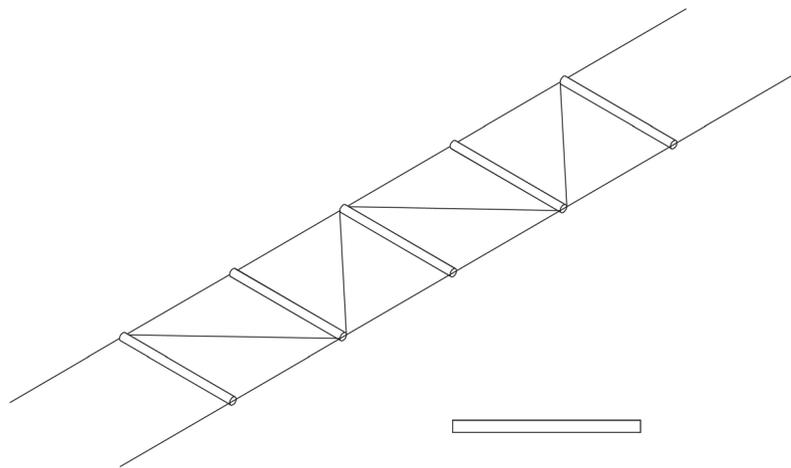


Abb. 94: Seilfachwerk um seine Längsachse um 90° gedreht

2.3 Konstruktiver Aufbau des räumlichen Seilfachwerks

Das vorliegende Kapitel erklärt den konstruktiven Aufbau des entwickelten räumlichen Seilfachwerks. Um diese Struktur besser verständlich zu machen, wurde ein Fachwerkträger schrittweise verändert, bis er dem räumlich offenen Tensegrity-System entsprach.

Durch Anbringung entgegengesetzter Horizontalkräfte in einen Fachwerkträger (z.B. durch Abspannung) werden die Obergurte nicht mehr auf Druck, sondern auf Zug beansprucht. Sie können deshalb als Seile ausgebildet werden. Diese Form des Tragwerks wird als Seilfachwerk bezeichnet.¹⁵

Bei einem Seilfachwerk werden Obergurt- und Untergurtseile durch Druckstäbe auseinander gespannt, Diagonalseile zwischen den Stäben verbessern das Verformungsverhalten des gesamten Systems.

Dreht man das vertikale Seilfachwerk um seine Längsachse um 90°, ist die erste Voraussetzung geschaffen, den Fachwerkträger als Dachfläche zu verwenden.

¹⁵ vgl. Tragsysteme, S. 76

Nun wird jeder zweite Druckstab auf einer Seite aufgekipppt (Abb. 95), die an diesem Punkt befestigten Längs- und Diagonalseile werden ebenfalls vertikal verdreht.

Im nächsten Schritt werden alle übrigen Stäbe um den gleichen Winkel hochgeklappt, diesmal jedoch das entgegengesetzte Ende (Abb. 96). Wieder machen die Längs- und Diagonalseile diese Bewegung mit.

Durch das Aufkippen der Stäbe werden Obergurt- und Untergurtseile räumlich verdreht, daher ändert sich auch die Lage der Druckstäbe. Ihr Abstand zueinander verringert sich.

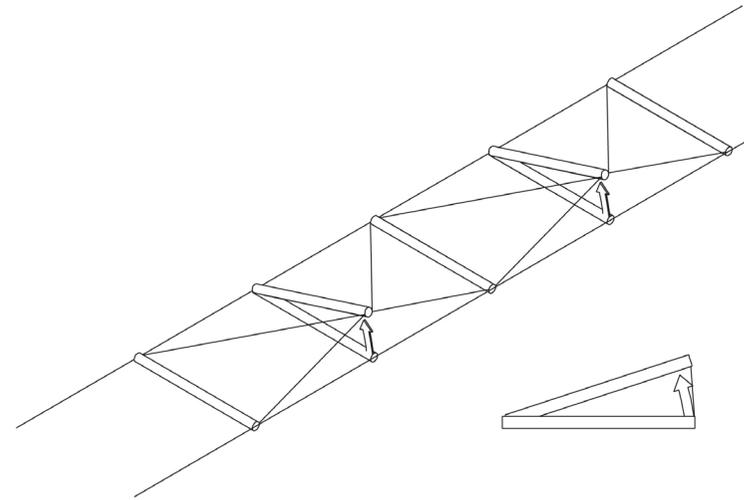


Abb. 95: Jeder zweite Druckstab einseitig gekippt

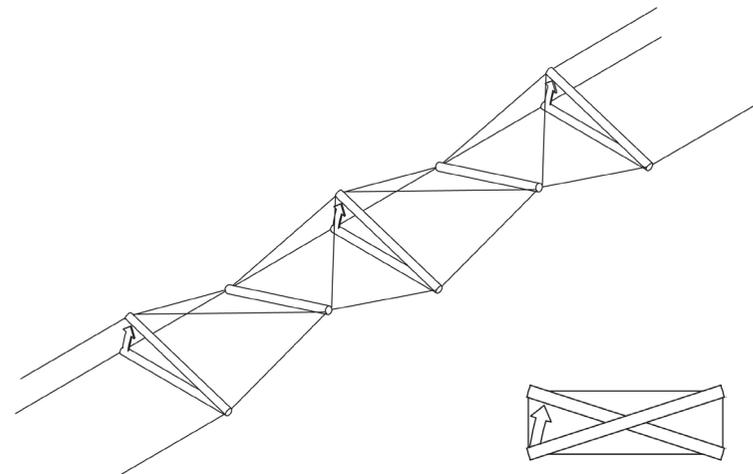


Abb. 96: Entgegengesetzt gekippte Druckstäbe

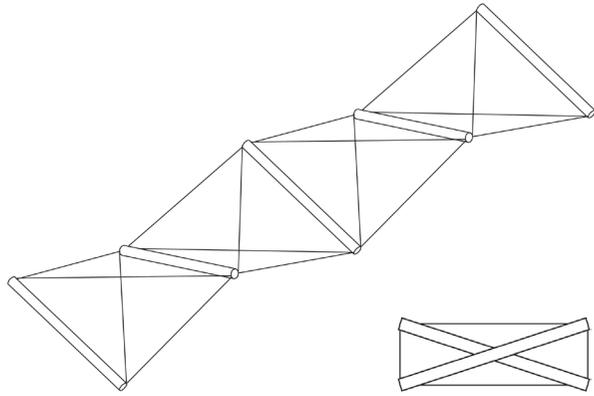


Abb. 97: Hinzufügen eines zweiten Diagonalseils

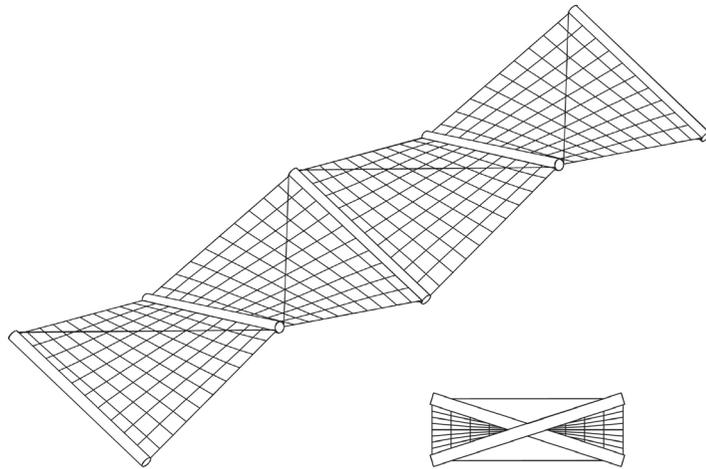


Abb. 98: Flächige Verbindung der Druckstäbe

Um das System stabil zu halten, muß nun ein zweites Band von Diagonalseilen hinzugefügt werden. Dieses verbindet die unteren Stabenden und läuft entgegengesetzt diagonal.

Der Fachwerkträger hat sich zu einem räumlich offenen Tensegrity-System entwickelt, welches horizontal nach außen vorgespannt werden muss. Die zwischen zwei Druckstäben entstehende Fläche ergibt ein hyperbolisches Paraboloid, eine zweisinnig gekrümmte Fläche.

Je stärker die Krümmung der einzelnen Membranflächen ist, desto geringer sind unter Last die auftretenden Spannungen. Ebenso das Verformungsverhalten wird dadurch verbessert.

Der räumliche Körper, der jeweils durch zwei der Druckstäbe und ihre verbindenden Zugseile entsteht, ist ein Tetraeder, die gesamte Bahn daher ein System von aneinander gereihten Tetraedern, bei denen jeweils ein Druckstab die Kante für zwei Tetraeder bildet.

2.4 Geometrische Eigenschaften eines Tetraeders

Bei einem doppelt ausgekreuzten Rechteck oder Parallelogramm bleiben die vier Eckpunkte so lange in einer Ebene, wie die Summe ihrer Winkel zueinander 360° ergibt.

Hat die Winkelsumme jedoch weniger als 360° , so bricht das Viereck in den dreidimensionalen Raum auf und bildet ein Tetraeder (Abb. 100).

Der Tetraeder hat vier dreieckige Seitenflächen und vier Ecken, an denen jeweils drei der Flächen zusammentreffen. Da er für einen Körper im Raum die kleinste mögliche Zahl von Ecken und Seiten hat, wird er auch als dreidimensionaler Simplex bezeichnet. Der zweidimensionale Simplex ist das Dreieck.

Schwerpunkt

Für uns ist der Schwerpunkt des Tetraeders dahingehend von Bedeutung, als er den Mittelpunkt der Minimalfläche darstellt, die zwischen vier der sechs Tetraederkanten aufgespannt wird.

Die resultierende Fläche einer in diesem System gespannten Membran ist ein hyperbolisches Paraboloid - eine gegenseitig gekrümmte Fläche.

Ist die eingebrachte Vorspannung der Membran in allen Richtungen gleich groß, so entsteht eine Minimalfläche, die für das Tragverhalten ideale Form.¹⁶

Der Kreuzungspunkt ihrer Hauptkrümmungen fällt mit dem Schwerpunkt des Tetraeders zusammen.

Bei einem Tetraeder kann der Schwerpunkt auf verschiedene Wege berechnet werden (Abb. 99):

Der **Kantenschwerpunkt** des Tetraeders ergibt sich als Schnitt der Verbindungsgeraden (Abb. 99, grüne Linien) von je zwei gegenüberliegenden Schwerpunkten der Tetraederkanten (Abb. 99, graue Linien). Der Schwerpunkt der Tetraederkante ist ihr Mittelpunkt.

Der **Eckenschwerpunkt** des Tetraeders ergibt sich als Schnitt der Verbindungsgeraden (Abb. 99, gelbe Linien) von je einer Tetraederecke und dem Schwerpunkt der ihr gegenüberliegenden Tetraederfläche. Der Schwerpunkt der Tetraederfläche liegt im Schnittpunkt der Schwerlinien (Abb. 99, blaue Linien). Diese sind die Kantenhalbierenden des Dreiecks, d. h. die Strecken vom Mittelpunkt einer Dreiecksseite bis zum ihr gegenüberliegenden Eckpunkt.¹⁷

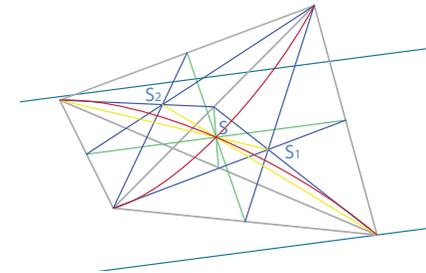


Abb. 99: Ermittlung des Schwerpunktes

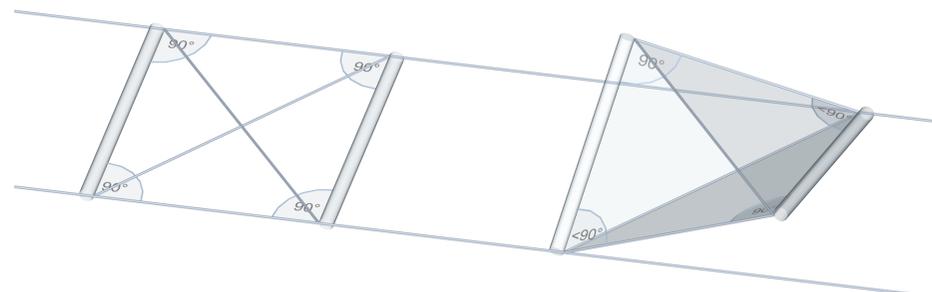


Abb. 100: Ist die Winkelsumme kleiner als 360° , wird aus dem Rechteck ein Tetraeder

¹⁶ vgl. m5 - membrankonstruktionen, S. 1.11

¹⁷ vgl. www.ims.tuwien.ac.at

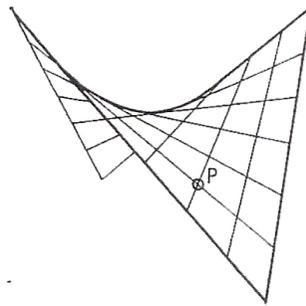


Abb. 101: Regelfläche, wird durch die Bewegung einer Geraden überstrichen

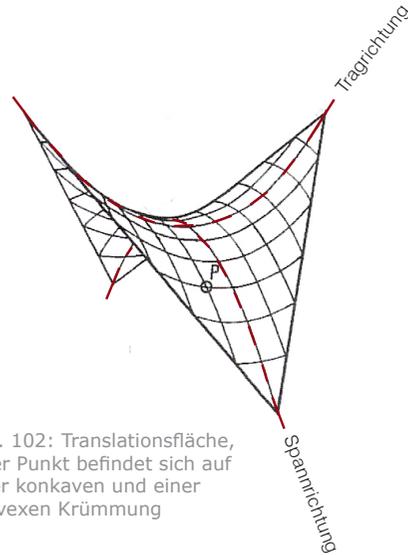


Abb. 102: Translationsfläche, jeder Punkt befindet sich auf einer konkaven und einer konvexen Krümmung

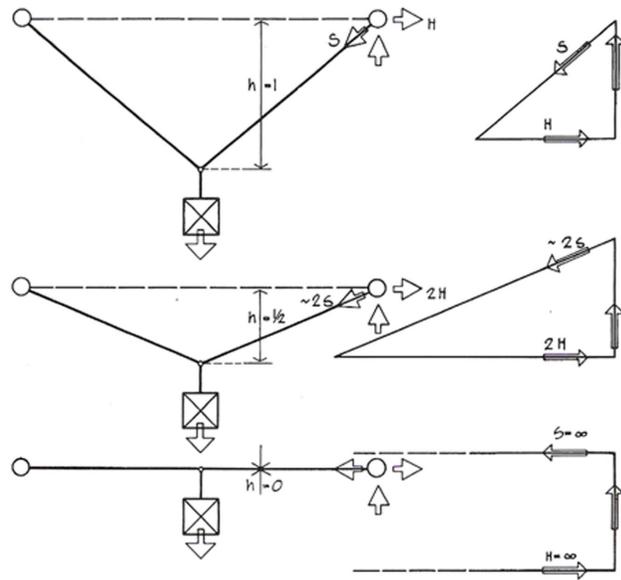


Abb. 103: Einfluß der Pfeilhöhe h auf die Kraftverteilung

2.5 Tragverhalten und Kraftverteilung der Membrankonstruktion

Spannt man zwischen den Druckstäben des räumlich offenen Tensegrity-Systems eine Fläche auf, entsteht eine **hyperbolisch-parabolische Sattelfläche**. Sie ist eine **Regelfläche**, die durch die Bewegung einer Geraden überstrichen werden kann. Da die Mittelpunkte der beiden Hauptradien auf unterschiedlichen Seiten der Fläche liegen, ist die Gaußsche Krümmung der doppeltgekrümmten Fläche in jedem Punkt negativ. Demzufolge lässt sich ihre Oberfläche **nicht verzerrungsfrei abwickeln**. Auf der Sattelfläche befindet sich jeder Punkt der Fläche auf einer konkaven und auf einer konvexen Krümmung (Translationsfläche). Diese beiden Krümmungen gelten als Wirkrichtungen der vorgespannten Membranfläche. „Der Richtung mit der negativen Krümmung (durchhängend) wird dabei die *Tragfunktion*, der positiv gekrümmten die *Spannfunktion* zugeordnet. Im Gleichgewichtszustand der Fläche sind bei einer gleichmäßigen Spannungsverteilung die Krümmungen dieser Wirkrichtungen gleich groß und heben sich durch unterschiedliche Vorzeichen gegeneinander auf. Je stärker die Flächen gekrümmt sind, umso geringer fallen die Membranspannungen und damit die Reaktionskräfte am Auflager aus. [] Besondere Bedeutung bei der mechanischen Vorspannung hat die **Minimalfläche**. Die Minimalfläche ist die Fläche mit der geringsten Oberfläche zwischen beliebig geformten, geschlossenen Linienzügen. [] Membrane, deren Spannungen in allen Richtungen gleich groß sind, nehmen stets die Form der

Minimalfläche ein. Die Minimalfläche bildet unter der Voraussetzung, dass Spannungsgleichheit in allen Richtungen herrscht, die für das Tragverhalten ideale Form.“¹⁸

Betrachtet man die **Kraftverteilung eines Tragseils** bei unterschiedlichem Durchhang (Abb. 103: Pfeilhöhe h), so wird die Bedeutung der Pfeilhöhe für die auftretenden Kräfte sichtbar. Dazu in der Publikation „Tragsysteme“: „Seilkraft S und Horizontalkraft H des Tragseils sind umgekehrt proportional zu seiner Pfeilhöhe h. Ist Pfeilhöhe h gleich null, so werden Seilkraft und Horizontalschub unendlich groß, d.h. das Tragseil kann die Last nicht aufnehmen.“¹⁹

Der **Stich** (Abb. 104: f) der Membranfläche ist gleichzusetzen mit der Pfeilhöhe h und steht daher in direktem Zusammenhang mit den Auflagerkräften. Er sollte ca. bei 1/10 der Sehnenlänge (Verbindung der Hochpunkte) liegen.

Die Beziehung der Stichhöhe zur Sehnenlänge gilt sowohl für ein einzelnes Modul und die Lage seiner Membranfläche als auch für die Gesamtstruktur einer aus mehreren Modulen zusammengesetzten Bahn. Je mehr Module aneinander gereiht werden, desto höher müssen die Zugkräfte an den Auflagern sein, um eine zu große Verformung unter Last zu verhindern.

In formaktiven Tragwerken entstehen weitgehend nur **Normalspannungen**, also **Druck- oder Zugspannungen**. In Abb. 105 ist der Kräfteverlauf der entwickelten Tensegrity-Struktur dargestellt. Die verinselten Druckelemente wirken ausspreizend zwischen den durchlaufenden Zugelementen.

Die Fläche kann belastet werden:

vertikal:

g F = ständige Flächenlast aus der Eigenmasse

g R = ständige Randlast aus der Eigenmasse

s = Schneelast

W_v = Windlast vertikal

horizontal:

W_h = Windlast horizontal

Bemessung unter Gleichlast:

Seilkraft: $S = H / \cos \alpha$

$$\text{Vertikalkraft: } V = \frac{p \cdot l}{2}$$

$$\text{Horizontalkraft: } H = \frac{p \cdot l^2}{8 \cdot f}$$

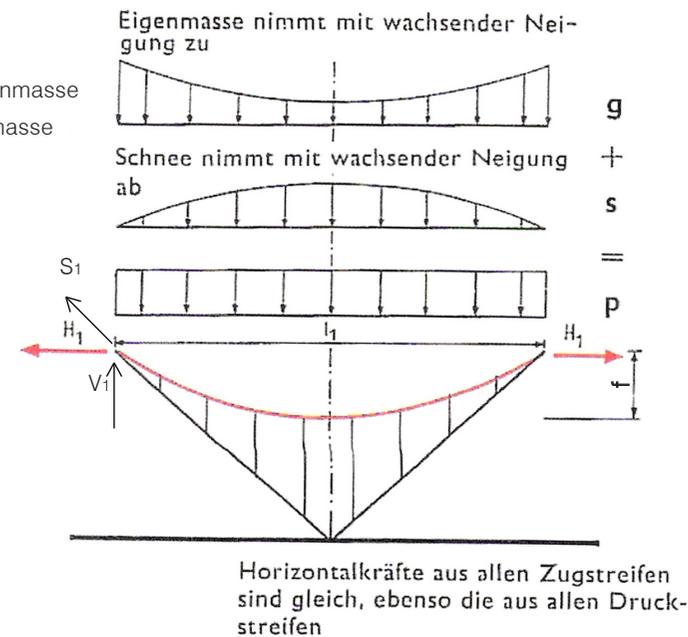


Abb. 104: Auftretende Lasten und Berechnung der Horizontal- und Vertikalkräfte

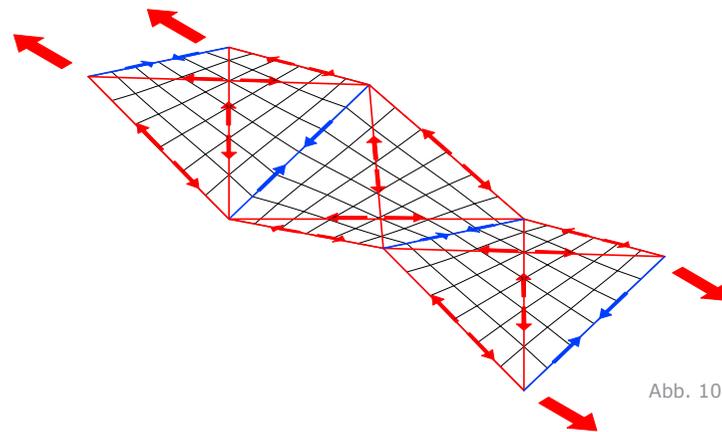


Abb. 105: Kräfteverlauf in der räumlich offenen Tensegrity-Struktur
rot: Zugkräfte, blau: Druckkräfte

¹⁸ vgl. m5 - membrankonstruktionen, S. 1.10 f.

¹⁹ vgl. Tragsysteme, S. 64

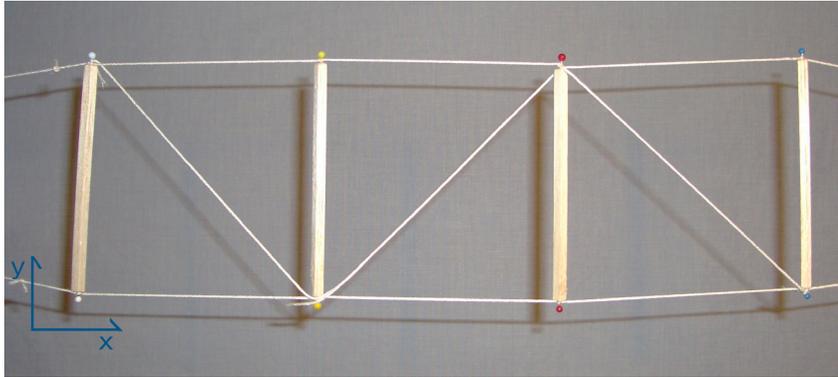


Abb. 106: Ebener Seilfachwerkträger, Grundriss

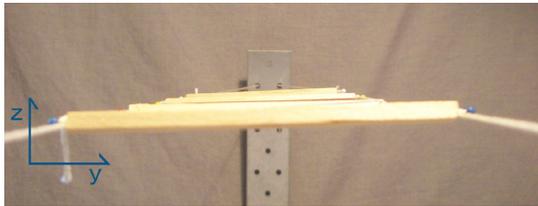


Abb. 107: Ebener Seilfachwerkträger, Seitenansicht

2.6 Analyse zum Einfluss der Seillängen auf die Lage der Druckstäbe im dreidimensionalen Raum

Eine Versuchsreihe diente zur näheren Untersuchung des Verhaltens eines räumlich offenen Tensegrity-Systems im dreidimensionalen Raum bei unterschiedlichen Seillängen.

Ausgangsform für diese Untersuchung war ein in der XY-Ebene liegender, einfach diagonal verspannter, ebener Seilfachwerkträger.

Vier Druckstäbe der gleichen Länge (l_{STAB}) sind mit einem Obergurtseil (l_{OSEIL}) und einem Untergurtseil (l_{USEIL}) sowie einem Diagonalseil (l_{DSEIL}) verbunden. Der Abstand der Stabenden zueinander ist gleich ihrer Länge.

Dadurch ergibt sich:

$$l_{\text{STAB}} = l_{\text{OSEIL}} = l_{\text{USEIL}}$$

Die Ausgangsform war daher ein ebener Seilfachwerkträger aus drei quadratischen Feldern.

In den folgenden Modellversuchen wird die Lageänderung der Druckstäbe durch Längenänderung der Seile und das zweifache Auskreuzen der Fachwerksfelder dokumentiert.

Modell 1

Einfach diagonal verspannter Seilfachwerkträger mit verkürzten Diagonalseilen

Durch das Verkürzen der Diagonalseile verändert sich die Form der Quadrate zu Rauten, drei ebenen Vierecken mit jeweils gleich langen Seiten, die paarweise parallel sind.

Die veränderten Winkelmaße sind mit dem Kosinussatz zu errechnen, ebenso können die Verschiebungswerte der Druckstäbe in Y- und X-Richtung mathematisch ermittelt werden.

Kosinussatz:

$$\cos \alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

$$\cos \beta = \frac{c^2 + a^2 - b^2}{2ca}$$

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

$$y = b' \sin \gamma'$$

$$\gamma' = 90 - \alpha$$

$$x = \sqrt{c'^2 - y^2}$$

$$c'^2 = a'^2 + b'^2 - 2a'b' \cos \gamma'$$

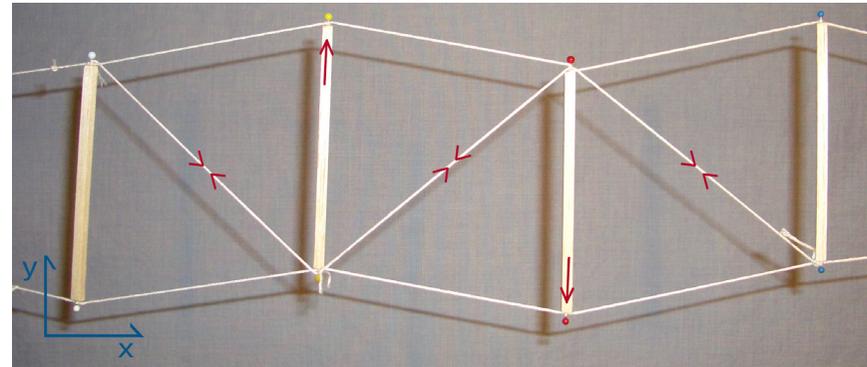


Abb. 108: Verkürzte Diagonalseile, Grundriss

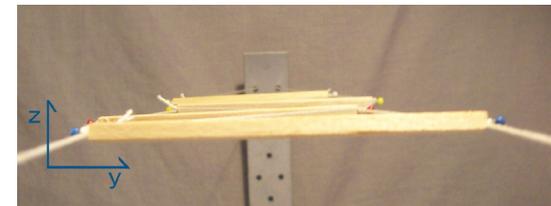


Abb. 109: Verkürzte Diagonalseile, Seitenansicht

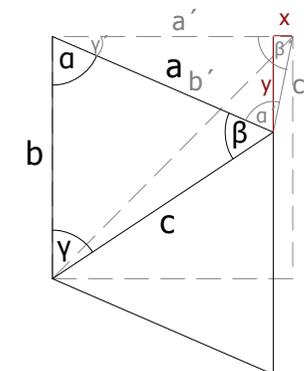


Abb. 110: Berechnung der Veränderung der Winkel

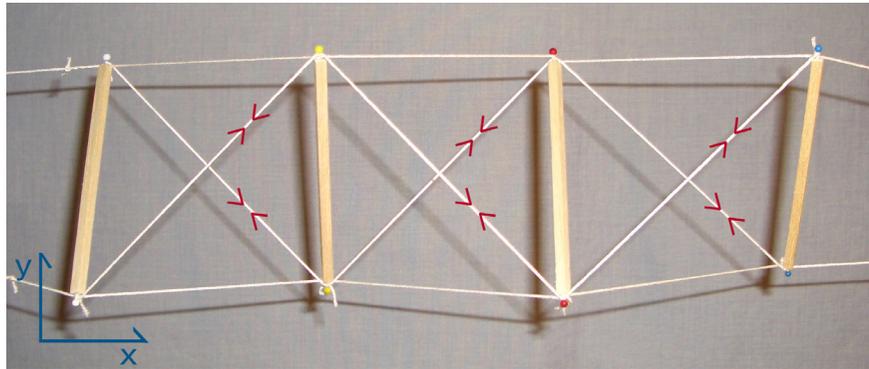


Abb. 111: Verkürzte Diagonalseile, Grundriss

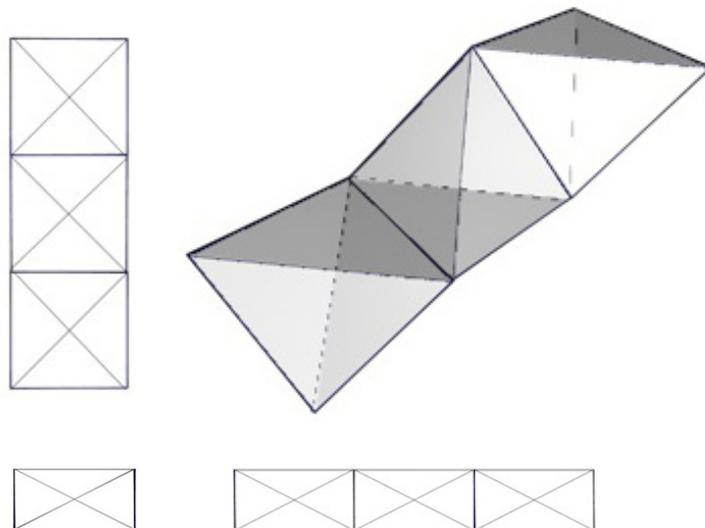


Abb. 112: Verkürzte Diagonalseile, drei Ansichten, Axonometrie

Modell 2

Zweifach diagonal verspanntes Seilfachwerk mit verkürzten, gleich langen Diagonalseilen

Fügt man dem Modell 1 in jedem Fachwerksfeld ein zweites, gleich langes Diagonalseil hinzu, sodass jedes Feld ausgekreuzt ist, wird aus dem ebenen offenen System ein räumlich offenes, da die Summe der Innenwinkel weniger als 360° beträgt.

Der entstandene Tetraeder besteht aus vier kongruenten Dreiecken, deren Winkel zueinander wieder mit dem Kosinussatz errechnet werden können.

Der Verschiebung der Stäbe entlang ihrer Achse in Y-Richtung wird durch das zweite Seil entgegen gewirkt, sodass in der XY-Ebene jedes Fachwerksfeld wieder als Quadrat abgebildet wird.

Sind die Diagonalseillängen gleich den Stablängen und allen übrigen Seillängen ($l_{DSEIL} = l_{STAB} = l_{OSEIL} = l_{USEIL}$), so entsteht in allen drei Ansichtsebenen ein quadratisches Bild.

Bei $l_{DSEIL} > l_{STAB}$ entsteht in der ZY-Ebene sowie in der ZX-Ebene ein Rechteck.

Modell 3

Zweifach diagonal verspanntes Seilfachwerk mit zwei verschiedenen Seillängen

Bei zwei unterschiedlich langen Diagonalseilen erscheinen die räumlichen Fachwerksfelder in der XY-Ebene als Rauten. Vertauscht man die zwei Diagonalseile in ihrer Höhenlage auf der Z-Achse miteinander, so bleibt der Grundriss zwar gleich, jedoch wird das jeweils andere Stabende nach oben gedreht. Das Abbild, welches sich in der ZX-Ebene ergibt, entspricht dem eines Rechtecks, in der ZY-Ebene jedoch zeigt sich die Figur eines gleichschenkelig symmetrischen Trapezes.

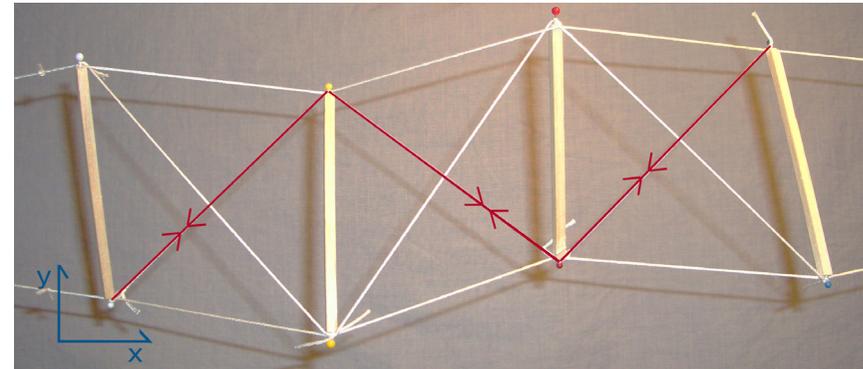


Abb. 113: Zwei verschiedene Seillängen, Grundriss

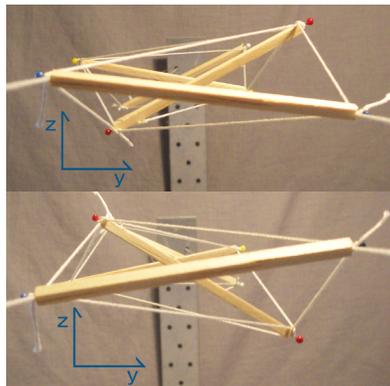


Abb. 114: Veränderung der Stablage durch Vertauschen der zwei Diagonalseile

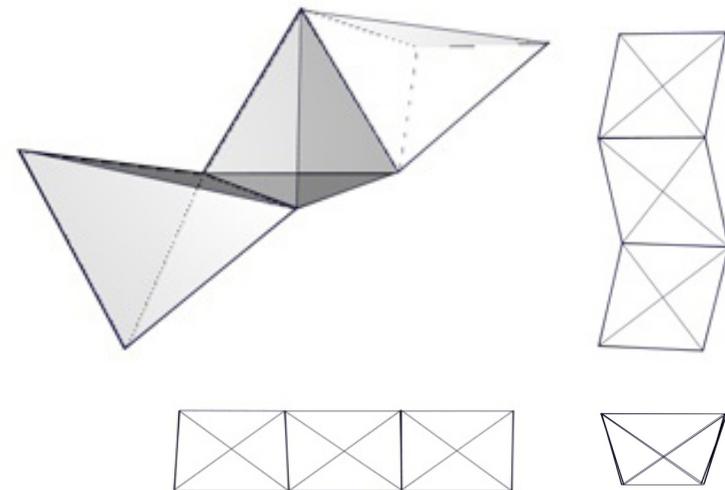


Abb. 115: Zwei verschiedene Seillängen, drei Ansichten, Axonometrie

Modell 4

Zweifach diagonal verspanntes Seilfachwerk mit nicht durchlaufenden Seilen

Wenn die Diagonalseile, welche auf der Z-Achse höher oben liegen, windschief sind, also einander in keinem Punkt treffen und jene Diagonalseile, die auf der Z-Achse weiter unten liegen ebenso, so verdreht sich das gesamte System spiralförmig.

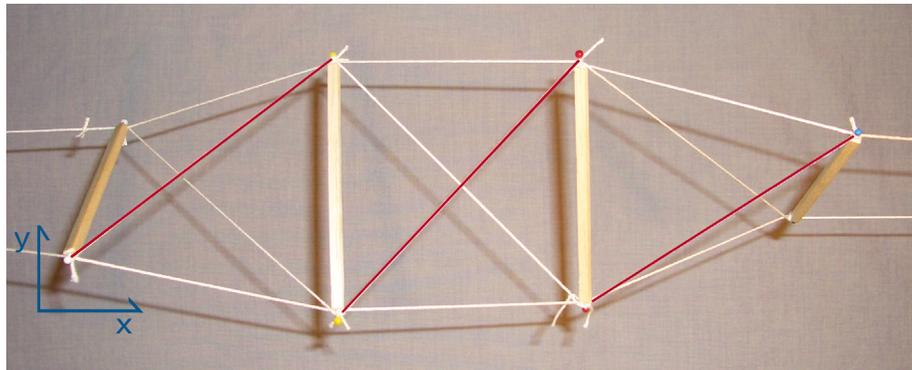


Abb. 116: Spiralförmig verdrehtes System, Grundriss

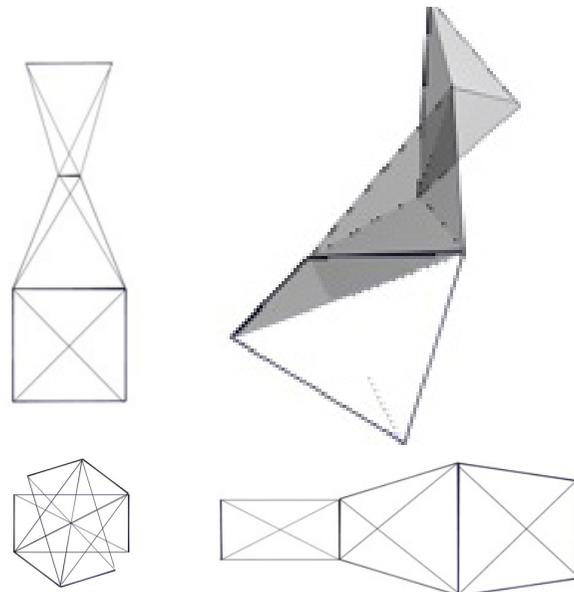


Abb. 117: Spiralförmig verdrehtes System, drei Ansichten, Axonometrie

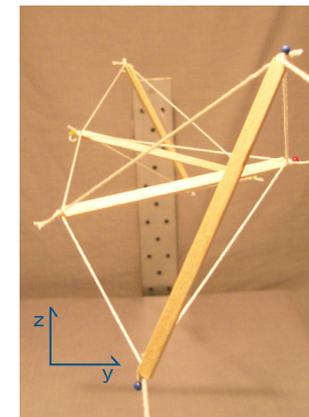


Abb. 118: Spiralförmig verdrehtes System, Seitenansicht

Modell 5

Zweifach diagonal verspanntes Seilfachwerk mit unterschiedlichen Ober- oder Untergurtlängen

Die in der XY-Ebene parallel erscheinende Lage der Druckstäbe ändert sich erst durch das Verkürzen eines Ober- oder Untergurtes.

Die Länge der Diagonalseile wirkt sich lediglich auf die vertikale Verdrehung der Stäbe aus. Dies kann so weit führen, dass die Länge eines der Diagonalseile gleich null ist, in diesem Fall würden die oberen Stabenden einander berühren, ihr Abbild in der XY-Ebene wäre aber weiterhin parallel.

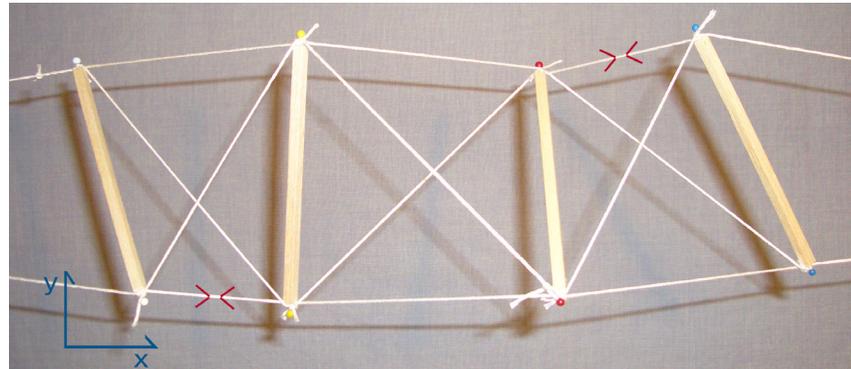


Abb. 119: Unterschiedliche Gurtlängen, Grundriss

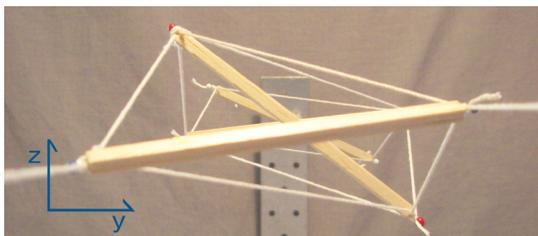


Abb. 120: Unterschiedliche Gurtlängen, Seitenansicht

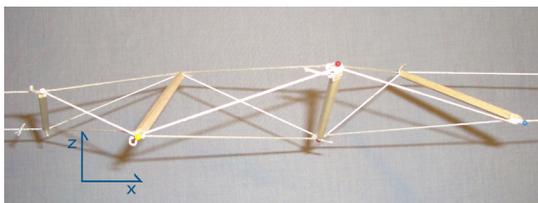


Abb. 121: Unterschiedliche Gurtlängen, Vorderansicht

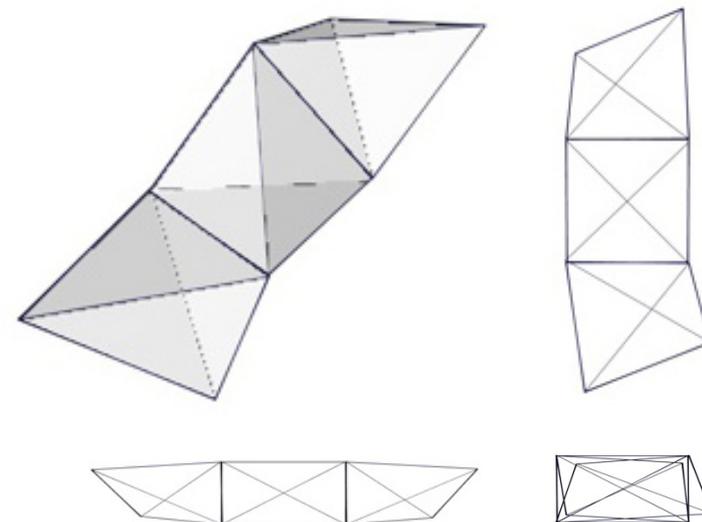


Abb. 122: Unterschiedliche Gurtlängen, drei Ansichten, Axonometrie

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Modellversuchen

Ein doppelt ausgekreuzter Seilfachwerkträger, dessen Summe der Innenwinkel eines jeden Fachwerkfeldes **weniger als 360°** beträgt, ist ein **räumliches Seilfachwerk**.

Die **Diagonalseillänge** beeinflusst die **Verdrehung** der Druckstäbe um die **X-Achse**. Je größer diese Verdrehung ist, desto stabiler ist das System. Im Zuge des Modellbaus hat sich bei quadratischen Feldern eine Neigung der Druckstäbe um jeweils 15° als sinnvoll erwiesen. Bei dieser Neigung ist das System stabil und hat dabei eine zur gesamten Konstruktion angemessene Höhe.

Bei zwei unterschiedlich langen Diagonalseilen bewirken diese zusätzlich zur Verdrehung eine **Verschiebung** der Stäbe **in Y-Richtung**.

Ober- und Untergurtlängen sind für die **Verdrehung** der Druckstäbe um die **Z-Achse** von Bedeutung.

Das **Vertauschen** der Diagonalseile in Z-Richtung lässt die Druckstäbe in die **Gegenrichtung** kippen, verändert jedoch die Form nicht.

Ändern die zwei Diagonalseile in jedem Fachwerkfeld abwechselnd ihre Lage in Z-Richtung, verdreht sich das System spiralförmig.

2.7 Varianten der Flächenbildung aus einem räumlichen Seilfachwerk mit gegengleich gekippten Druckstäben

Im folgenden Kapitel werden einige **Formvarianten** beschrieben, die aus einem räumlichen Seilfachwerk mit gegengleich gekippten Druckstäben gebildet werden können.

Konstante Parameter dieser Konstruktionen sind gleich lange Druckstäbe mit jeweils einem Neigungswinkel von 15° , zwischen denen eine Membranfläche eingespannt wird. Weiters werden die Stäbe an ihren Enden durch Diagonalseile miteinander verbunden. Durch das Einbringen einer Horizontalkraft in die beiden Druckstäbe kann die nötige Vorspannkraft eingebracht werden.

Die Zeichnungen sind schematische Darstellungen und haben daher keinen Maßstab.

Eine Erweiterung der Systeme in ihrer Länge ist möglich.

Druckstablänge: l_{Stab}

Neigungswinkel um die X-Achse: 15°

Diagonalseillänge: l_{s1} , l_{s2}

Membrankantenlänge zwischen zwei Druckstäben:

l_{M1} , l_{M2}

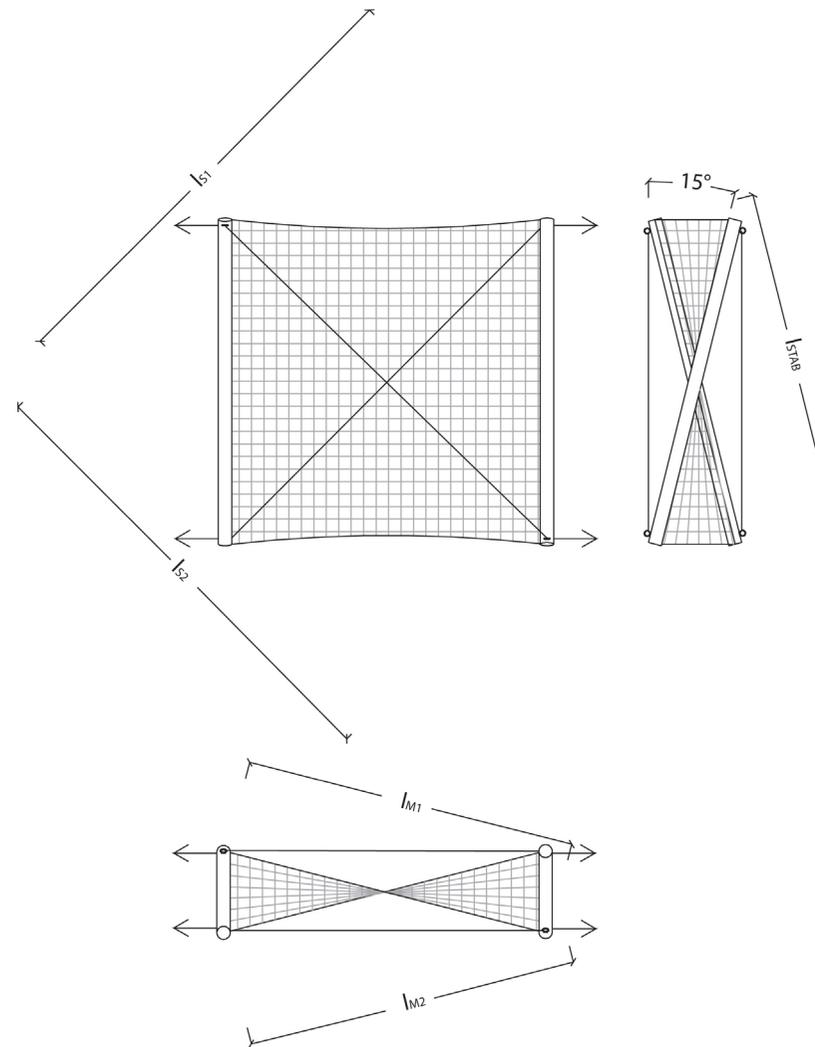


Abb. 123: Einzelnes Fachwerksfeld mit gegengleich gekippten Druckstäben
links: Grundriss, rechts: Seitenansicht, unten: Frontalansicht

2.7.1 Bahnen

Bahn: Variante 1

Bahn mit gleich langen Diagonalseilen
 System aus gleich großen Fachwerksfeldern, deren
 Membrankante gleich der Druckstablänge ist

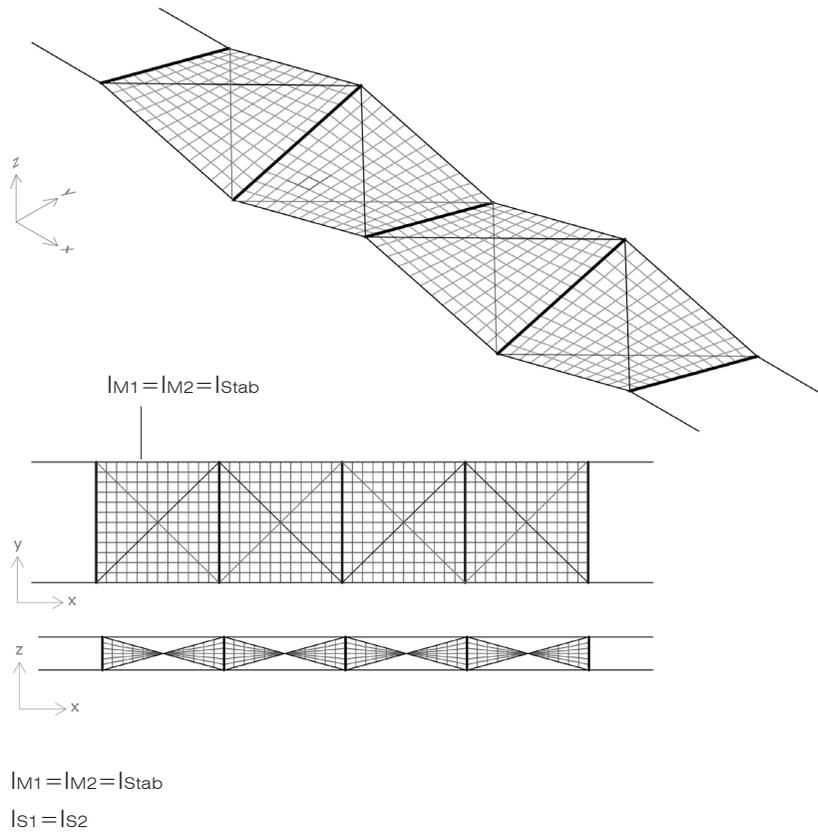


Abb. 124

Bahn: Variante 2

Bahn mit gleich langen Diagonalseilen
System aus ungleich großen Fachwerksfeldern

Vergrößert man das Membranfeld bei gleicher Stabneigung ($l_{M1}=l_{M2}>l_{Stab}$), so vergrößert sich auch der Radius der Hauptkrümmungsachsen der paraboloiden Fläche. Bei einer zu flachen Krümmung droht das System instabil zu werden, daher sollte die Stabneigung erhöht werden.

Bei $l_{M1}=l_{M2}<l_{Stab}$ besteht die Gefahr nicht. In diesem Fall wird das System stabiler.

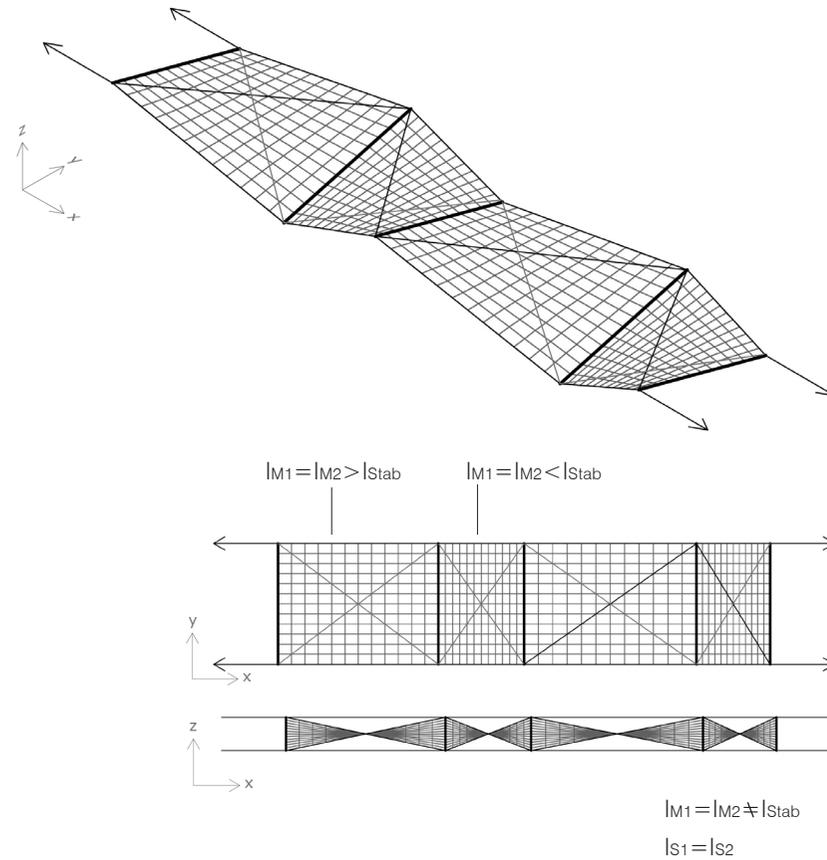


Abb. 125

Bahn: Variante 3

**Bahn mit ungleich langen Diagonalseilen
System aus gleich großen Fachwerksfeldern**

Wie sich schon in den Modellversuchen gezeigt hat, verändern die Druckstäbe bei Verkürzung eines Diagonalseiles ihre Lage auf der Y-Achse. Die Membrankante der gesamten Bahn zeigt sich im Grundriss somit nicht mehr als Gerade, jedoch weiterhin paarweise parallel pro Fachwerksfeld.

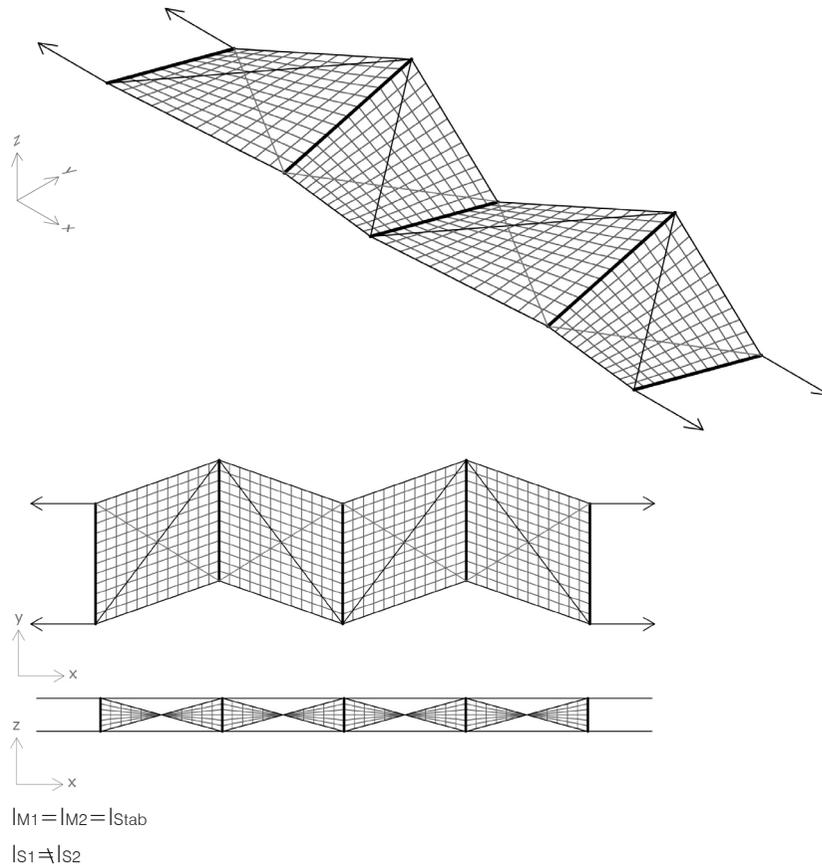
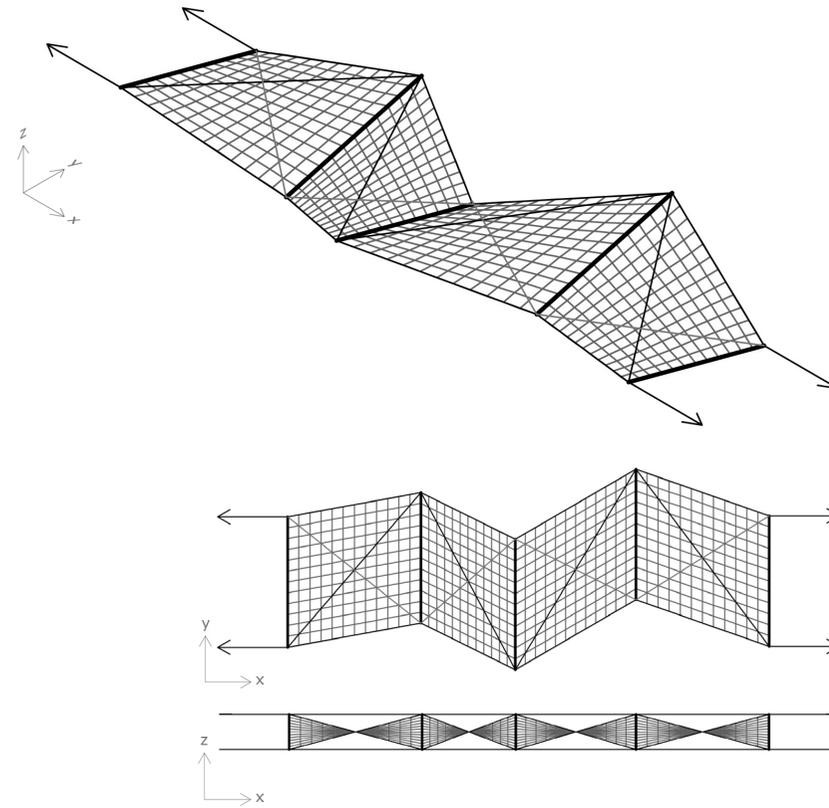


Abb. 126

Bahn: Variante 4

Bahn mit ungleich langen Diagonalseilen

System aus ungleich großen Fachwerksfeldern



$$|M_1| = |M_2| \neq |S_{stab}|$$

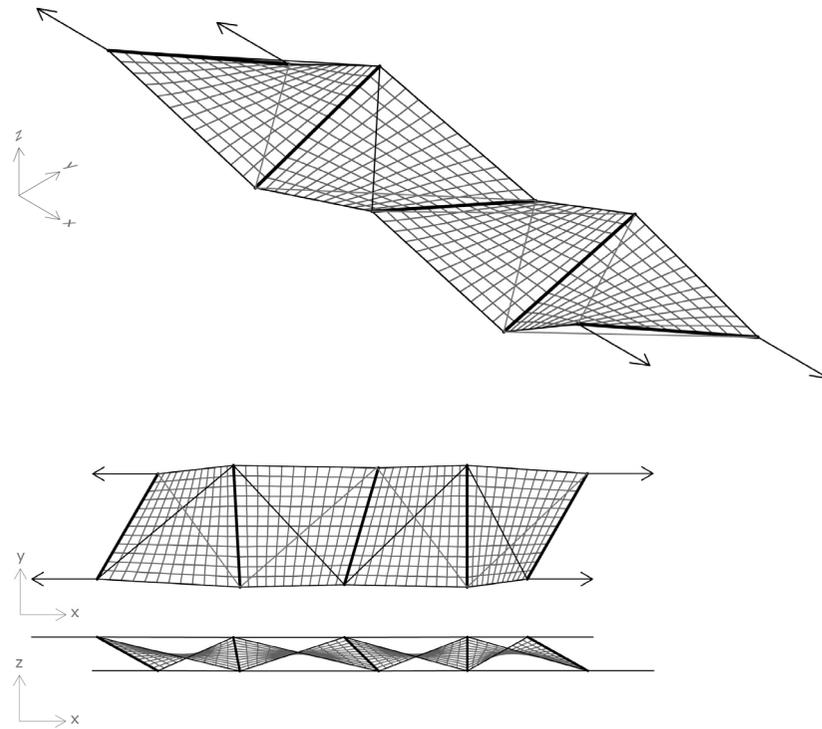
$$|S_1| \neq |S_2|$$

Abb. 127

Bahn: Variante 5

Bahn mit ungleich langen Membrankanten

Ist l_{M1} nicht gleich lang wie l_{M2} , so drehen sich die Druckstäbe um die Z-Achse. Im Grundriss werden die Membrankanten nicht mehr parallel abgebildet.



$$l_{M1} \neq l_{M2} \neq l_{Stab}$$

$$l_{S1} \neq l_{S2}$$

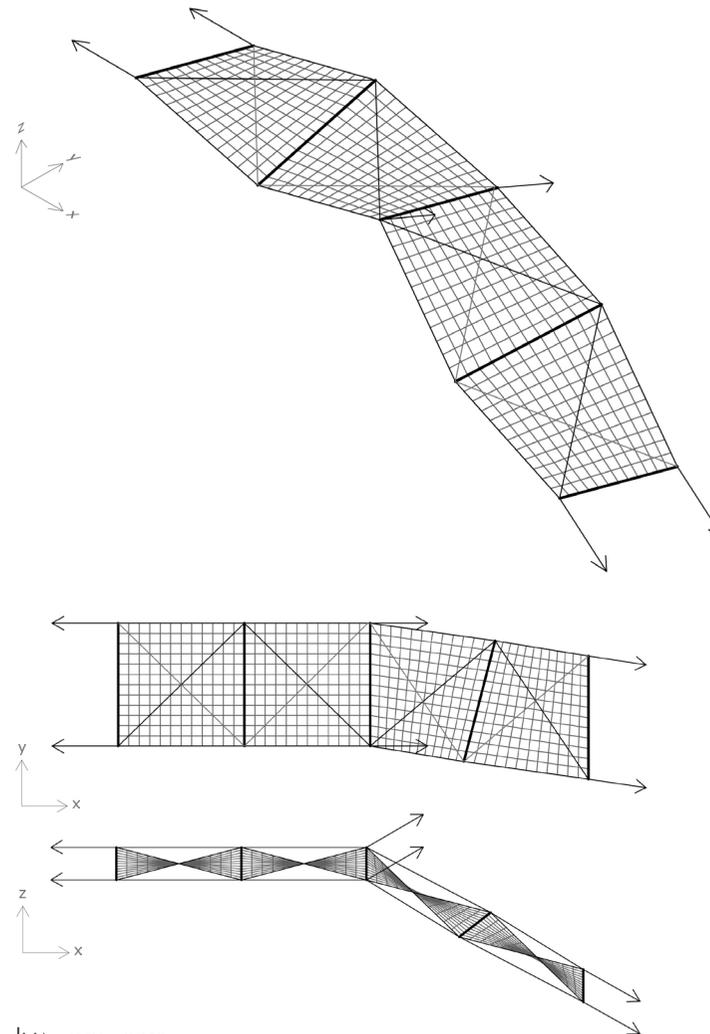
Abb. 128

Bahn: Variante 6

Geknickte Bahn bei Rotation um zwei Achsen

Wird zusätzlich zu den zwei äußersten Druckstäben ein dritter Stab abgespannt, so kann ein Teil des bahnförmigen Systems um die Stabachse dieses Druckstabs rotiert werden.

Die Neigung des abgespannten Druckstabs bewirkt eine Drehung der Membranfläche um zwei Achsen, sowohl um die Y- als auch um die X-Achse.



$|M_1 - |M_2 - |s_{stab}$
 $|s_1 = |s_2$

Abb. 129

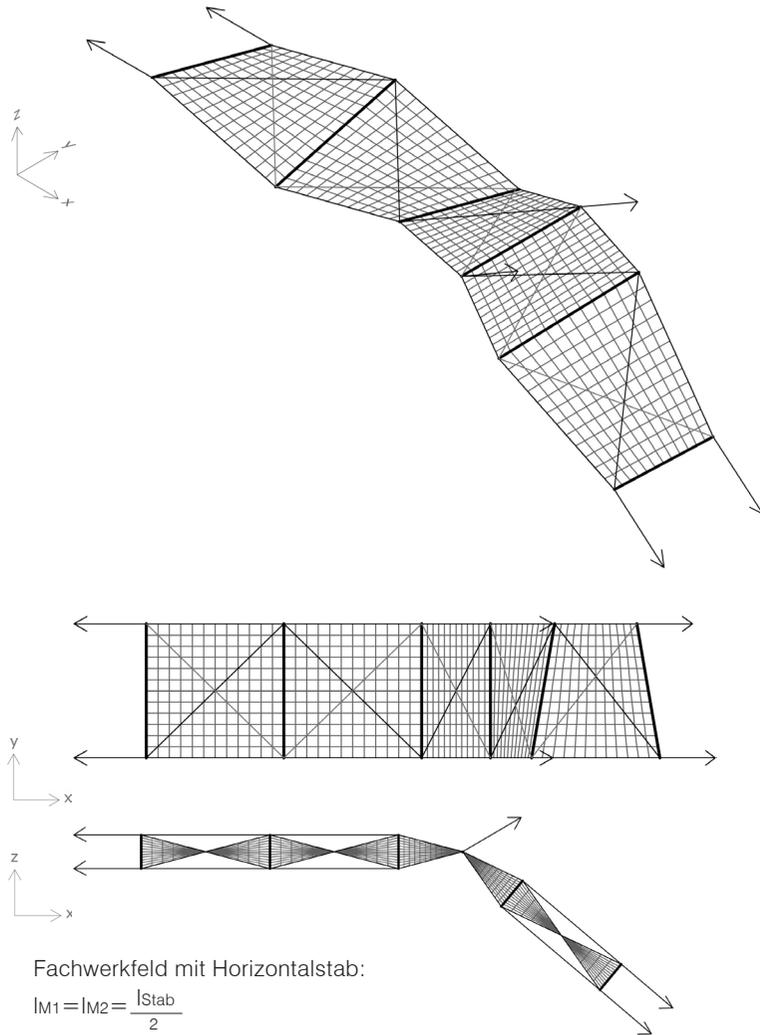


Abb. 130

Bahn: Variante 7

Geknickte Bahn bei Rotation um eine Achse

Soll die Rotation ausschließlich um eine Achse - in diesem Beispiel die Y-Achse - erfolgen, so ist dafür ein **horizontaler Druckstab** als Rotationsachse notwendig.

Bei Fachwerkfeldern mit gleich langen Membrankanten kann dieser durch die Halbierung der Fläche erreicht werden, sofern eine gleich bleibende Flächenkrümmung erwünscht ist. Denn wie sich in den vorangegangenen Beispielen gezeigt hat, fallen in den Ansichten der ZX-Ebene die beiden Mittelpunkte der Membrankanten mit dem Kreuzungspunkt der beiden Hauptkrümmungsachsen der paraboloiden Fläche zusammen. Wird der Druckstab an dieser Stelle der Membranfläche positioniert, so liegt er parallel zur Y-Achse und ist somit ein horizontaler Druckstab.

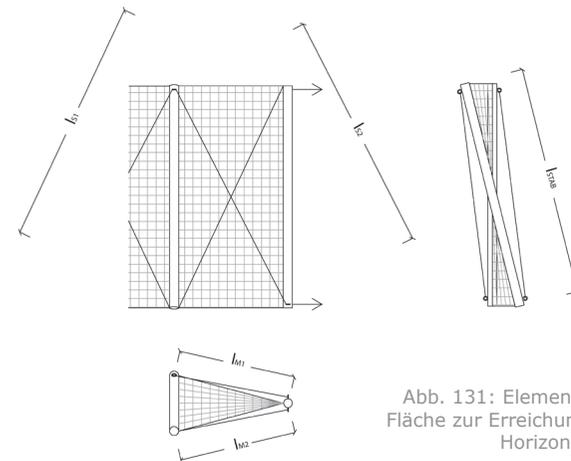


Abb. 131: Element halber Fläche zur Erreichung eines horizontalen Druckstabs

2.7.2 Flächen

Aus dem System des räumlichen Seilfachwerks mit gekippten Druckstäben kann auch eine Membranfläche erzeugt werden.

Die Erweiterung in Y-Richtung erfolgt durch Spiegelung des konstruktiven Systems um die X-Achse. Aus statischer Sicht ist es dabei möglich, jeden zweiten Druckstab einzusparen.

Hier gibt es zwei alternative Lösungen:

- Auf jeden zweiten Druckstab in X-Richtung wird verzichtet, sodass alle verbleibenden Stäbe die **gleiche Neigungsrichtung** haben.
- Zwei **bahnförmige Systeme** aus gegengleich geneigten Druckstäben werden mit einer Membranfläche verbunden, die keine weiteren Druckstäbe benötigt.

Die diagonale Aussteifung kann mit zwei **Seilnetzen** erreicht werden, von denen eines alle oberen, das zweite alle unteren Stabenden verbindet.

Auch hier ist es möglich, die Hälfte aller Diagonalseile einzusparen. Eine **streifenweise Auskreuzung** der Konstruktion ist ausreichend.

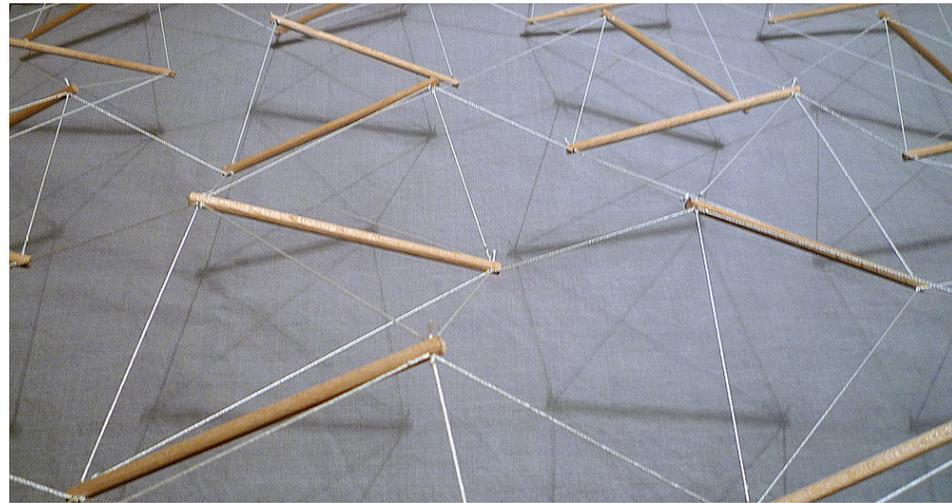


Abb. 132

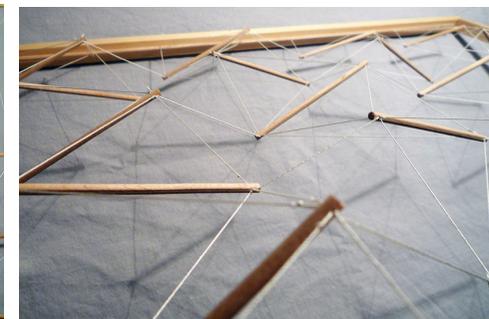
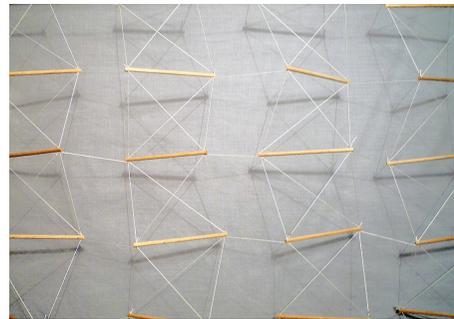
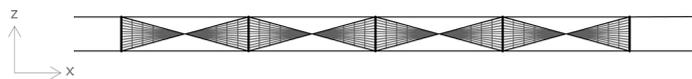
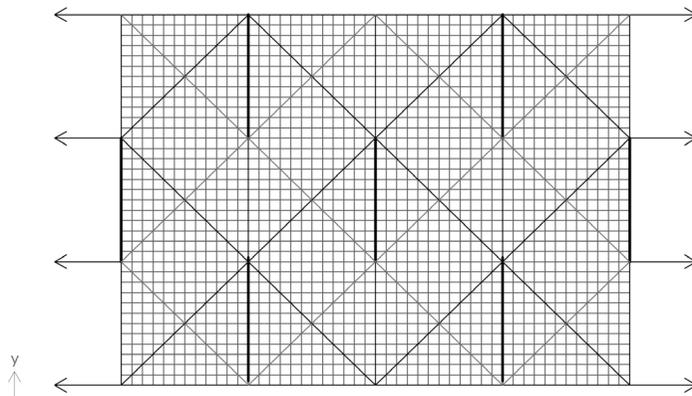
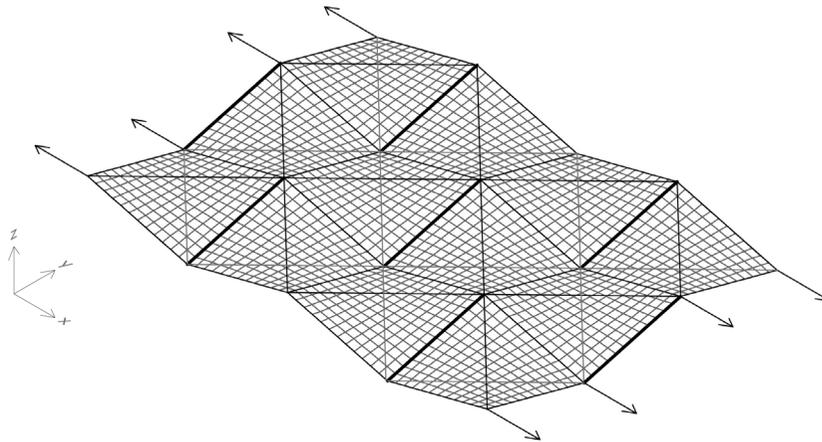


Abb. 132 - Abb. 134: Tensegrity-Netz aus gegengleich gekippten, verspannten Druckstäben

Fläche: Variante 1

Fläche mit Druckstäben der gleichen Neigungsrichtung und zwei regelmäßigen Diagonalseilnetzen



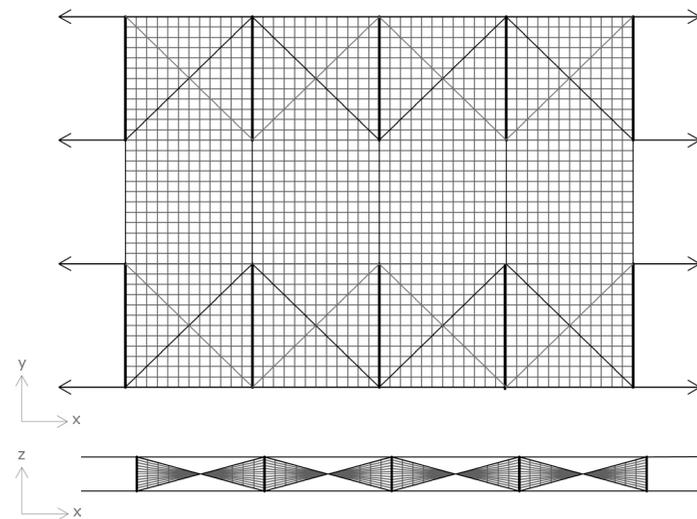
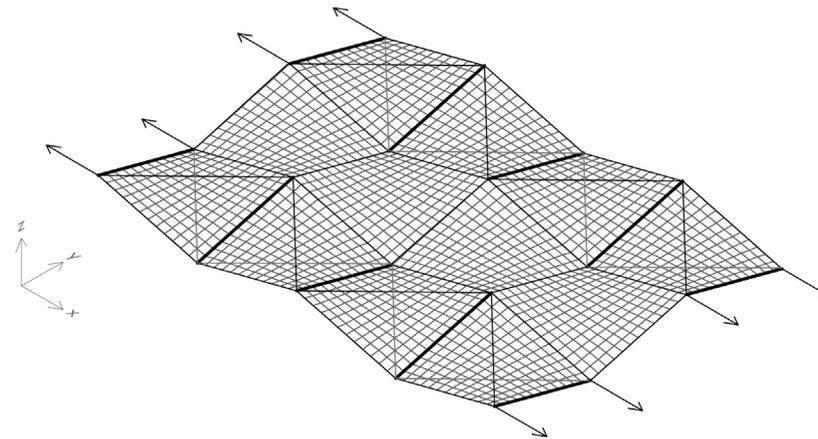
$$|M_1| = |M_2| = |S_{\text{stab}}|$$

$$|S_1| = |S_2|$$

Abb. 135

Fläche: Variante 2

Fläche aus zwei diagonal verspannten Bahnen, verbunden mit einer Membranfläche ohne Druckstäben



$$I_{M1} = I_{M2} = I_{Stab}$$

$$I_{S1} = I_{S2}$$

Abb. 136

Fläche: Variante 3

Fläche aus zwei diagonal verspannten Bahnen mit ungleich langen Diagonalseilen, verbunden mit einer Membranfläche ohne Druckstäben

Wie bei den Bahnenkonstruktionen, kann auch bei den Flächen durch unterschiedlich lange Diagonalseile die Form stark verändert werden.
Die verbindende Membranfläche ist in der Größe variabel.

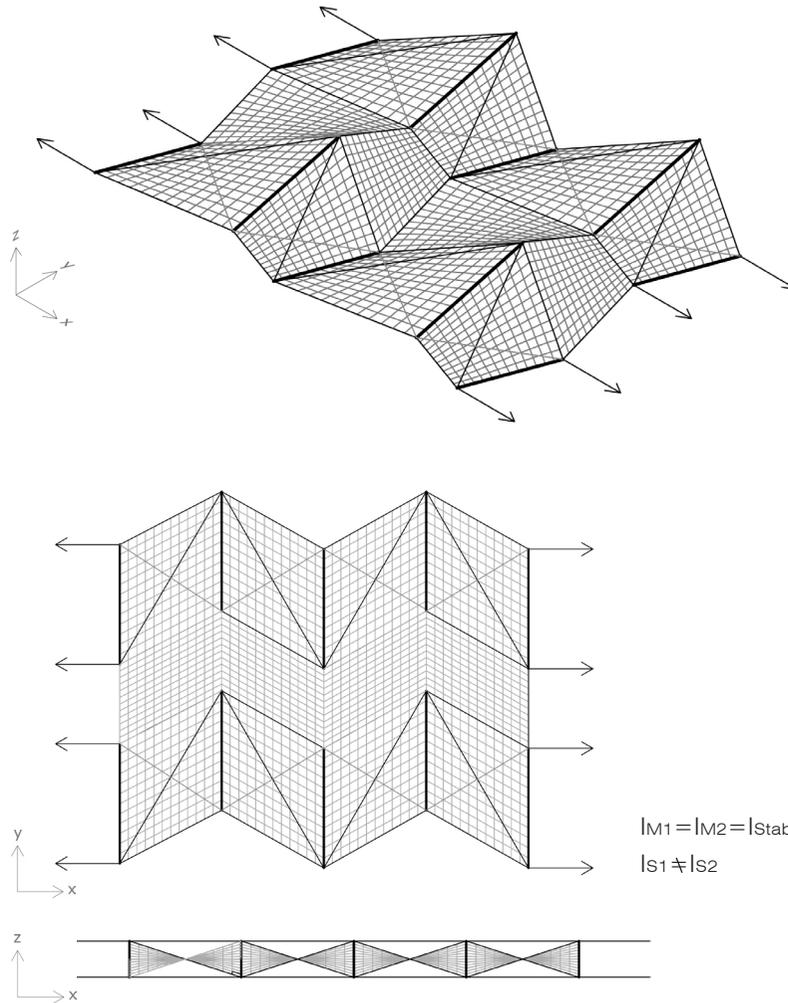


Abb. 137

Fläche: Variante 4

Fläche aus zwei Bahnen, verbunden mit einer diagonal verspannten Membranfläche ohne Druckstäben mit ungleich langen Diagonalseilen

Die Diagonalverspannung kann auch über die verbindende Membranfläche geführt werden, den seitlichen Abschluss der gesamten Fläche müssen jedoch wieder verspannte Bahnen mit Druckstäben bilden. Durch Kombination mit halben Fachwerkfeldern kann eine horizontale Kante der Fläche erreicht werden.

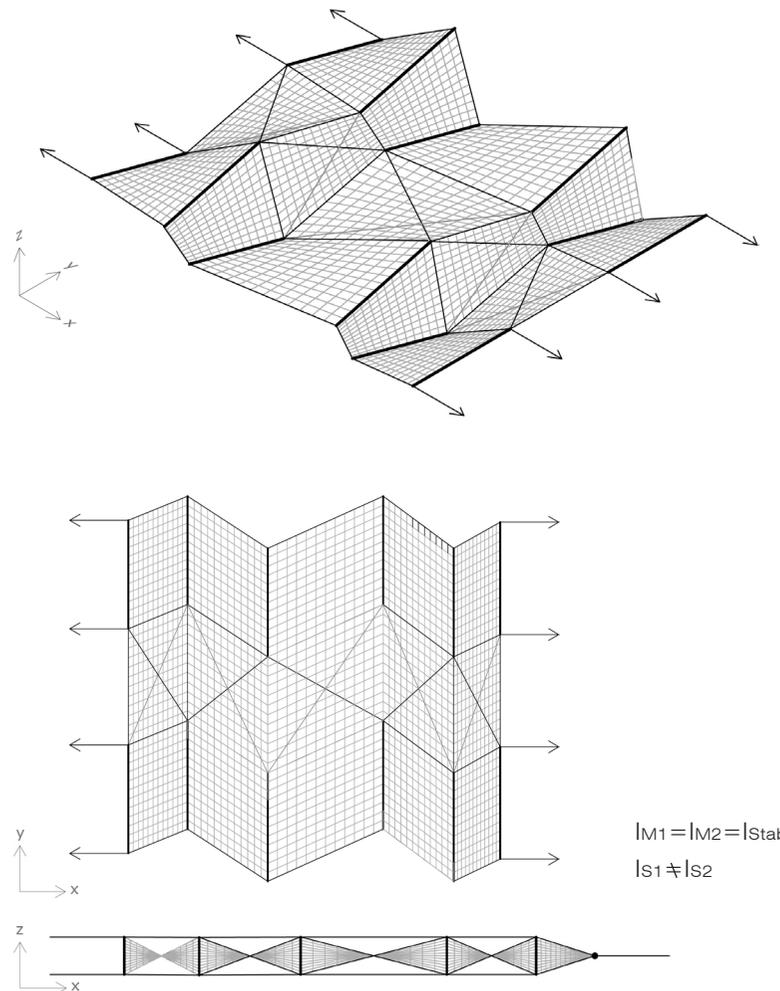
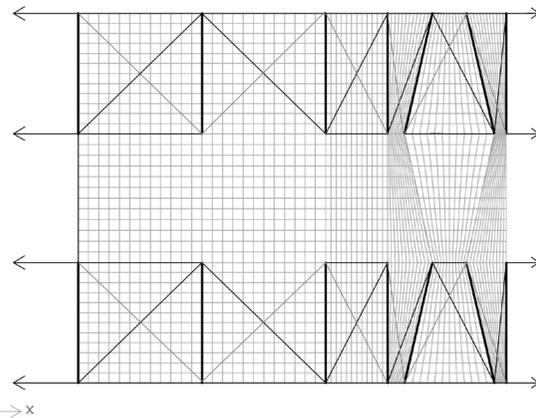
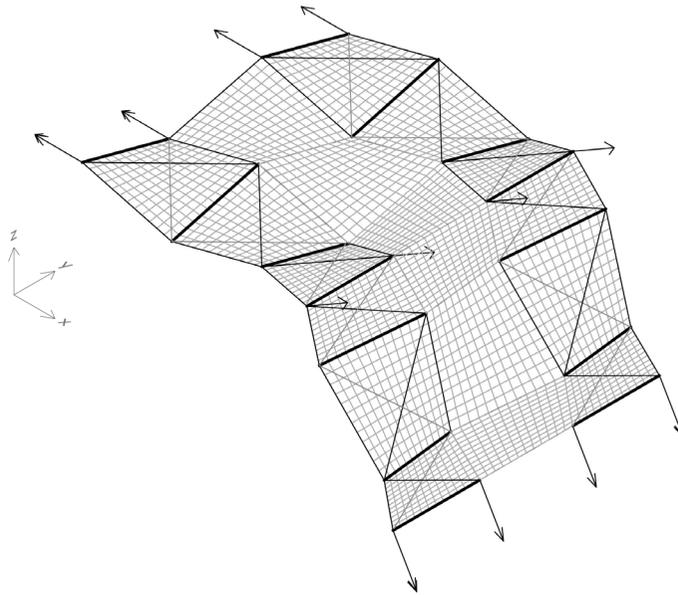


Abb. 138

Fläche: Variante 5

Geknickte Fläche

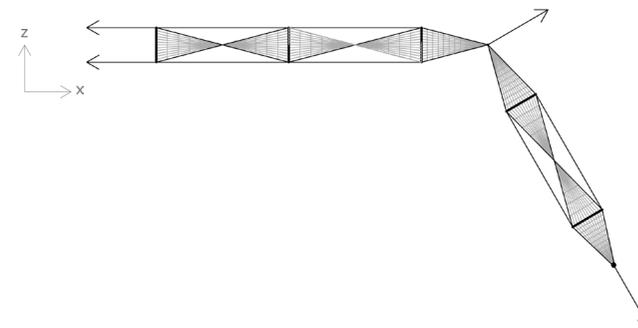
Eine Fläche, die mit halben Fachwerkfeldern kombiniert wird, kann um die horizontalen Druckstäbe dieser Felder rotiert werden. Ein weiteres halbes Feld als Abschluss der Fläche erleichtert durch eine gerade Kante die Montage.



$$I_{M1} = I_{M2} = I_{Stab}$$

$$I_{S1} = I_{S2}$$

Abb. 139



2.8 Montagevarianten von Bahnen- und Flächenkonstruktionen

Im Kapitel der Flächenbildung hat sich gezeigt, dass die gestalterische Bandbreite innerhalb dieses Systems sehr groß ist. Eine weitere Möglichkeit, das Erscheinungsbild der Konstruktion wesentlich zu beeinflussen, stellt die Anordnung der Flächen im dreidimensionalen Raum bei der Montage dar.

Die Anordnung der Konstruktion hat vor allem entscheidende Auswirkungen auf die **Ableitung des Regenwassers**, ist aber auch für die **Raum- und Schattenbildung** der Dachkonstruktion von Bedeutung. Unbedingte Voraussetzung bei allen Varianten ist das Einbringen **entgegengesetzter Horizontalkräfte** durch Abspannung der beiden äußersten Druckstäbe.

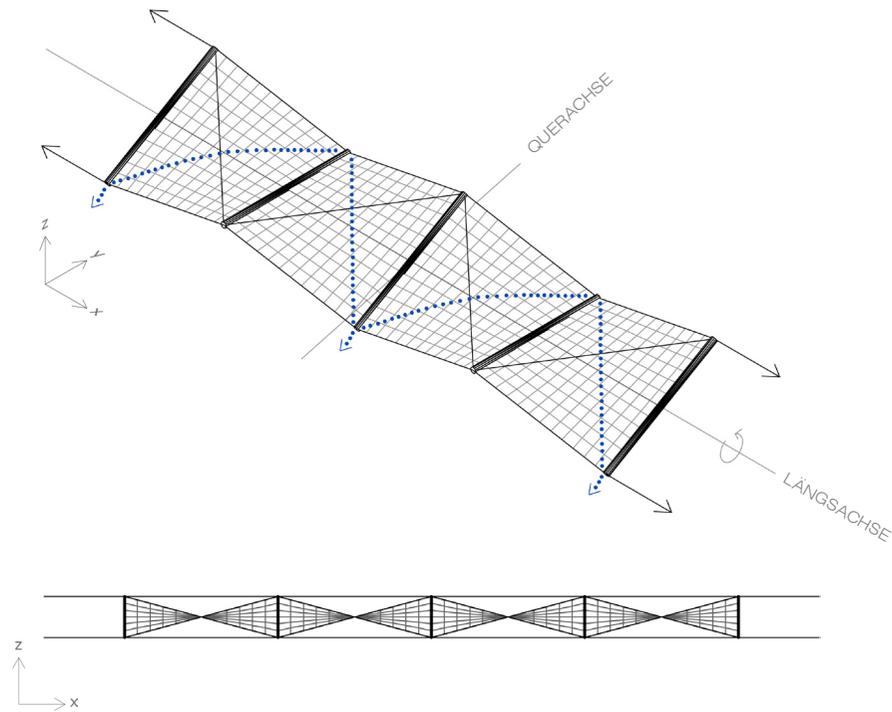
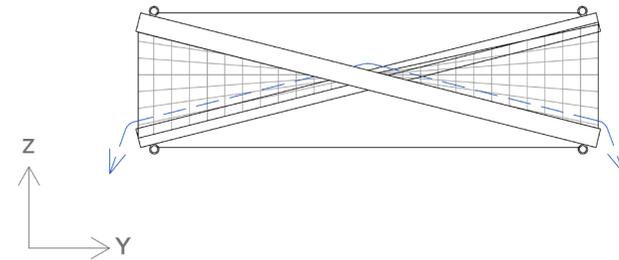


Abb. 140

2.8.1 Anordnung von Bahnen im dreidimensionalen Raum

Anordnung von Bahnen: Variante 1

Montiert man eine Membranbahn so im Raum, dass sowohl die Längs- als auch die Querachse parallel zur XY-Ebene liegen, so wird das Regenwasser zu den Tiefpunkten jedes Druckstabs geleitet und fließt an beiden Längsseiten der Konstruktion ab.



Anordnung von Bahnen: Variante 2

Bei einer Rotation der Bahn um ihre Längsachse um mehr als 15° läuft das Wasser am Tiefpunkt jedes zweiten Druckstabs und daher nur an einer Längsseite der Konstruktion ab.

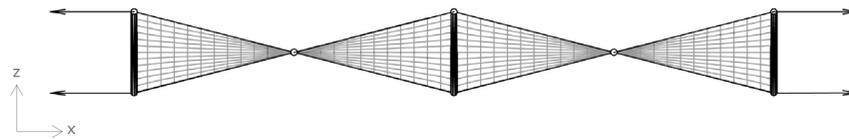
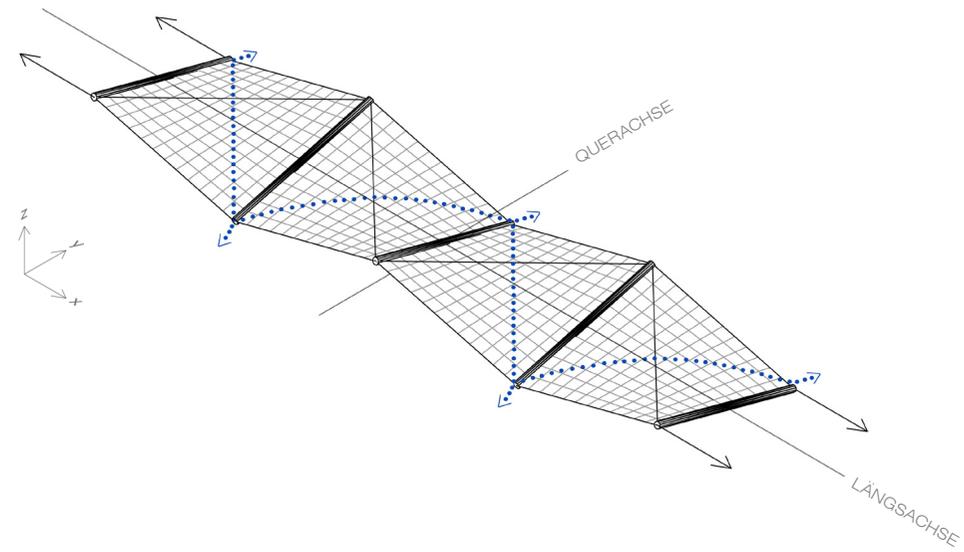
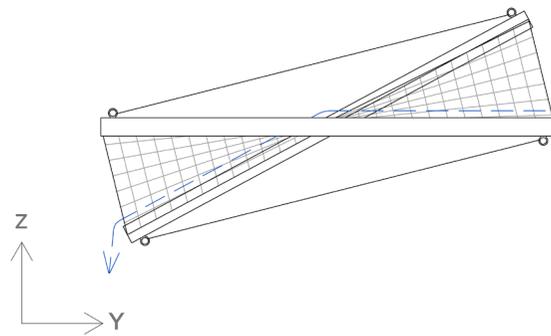


Abb. 141

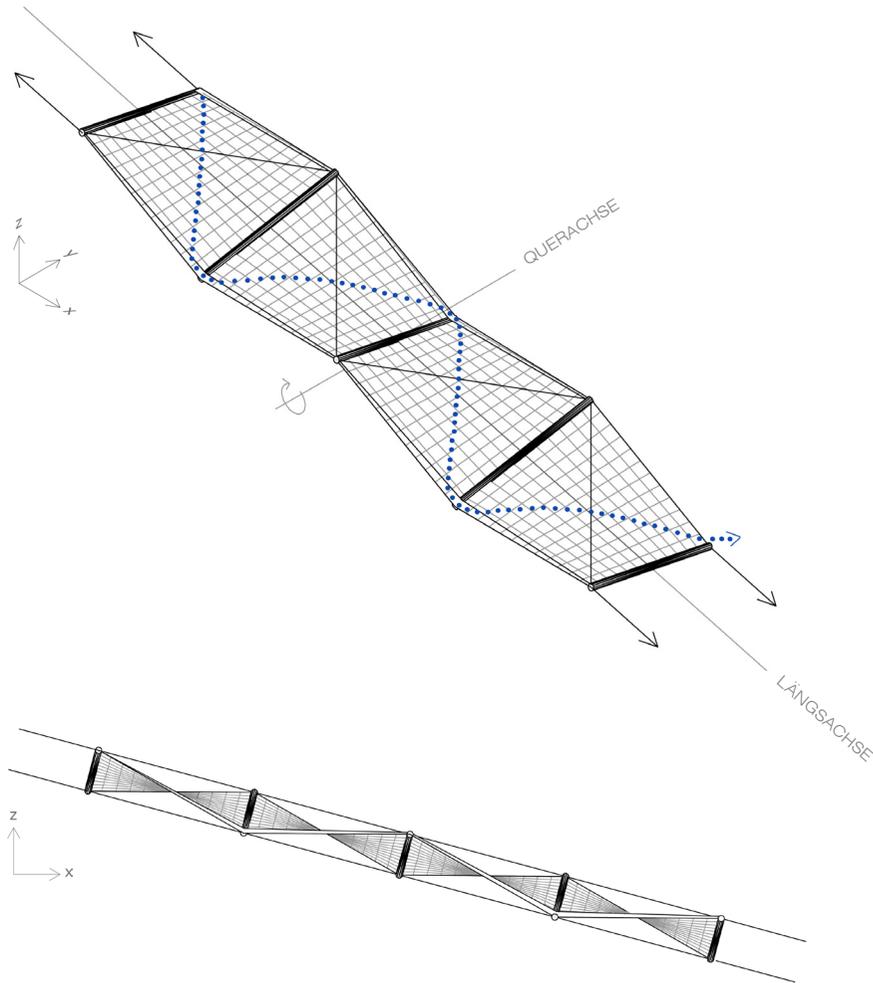
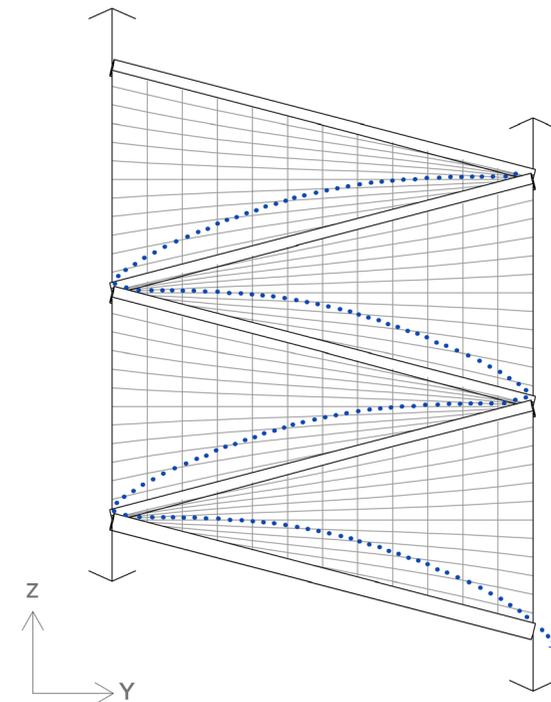


Abb. 142: Seitenansicht, gekippte Membranbahn

Anordnung von Bahnen: Variante 3

Rotiert man eine Bahn um ihre Querachse um mehr als 15° und verhindert das Abfließen des Wassers an der Längsseite der Membranbahn, so kann das Regenwasser bis zu einer Ecke geführt und dort abgeleitet werden. Das Abfließen des Wassers an den Tiefpunkten kann mit Membrantaschen unterbunden werden. Das umgeschlagene Membranmaterial funktioniert ähnlich einer Regenrinne und leitet das Wasser von einem Tiefpunkt zum nächsten und erst an der Bahnecke ab.



2.8.2 Kombination mehrerer Bahnen

Zur Vergrößerung der überdachten Fläche können mehrere Bahnen miteinander kombiniert werden. Die Anordnung der Flächen ist für die Belichtung des darunterliegenden Raums sowie für die Ableitung des Regenwassers über mehrere Bahnen entscheidend. Aus den zuvor erläuterten Varianten der Wasserableitung ergeben sich drei sinnvolle Kombinationsmöglichkeiten:

Kombination mehrerer Bahnen: Variante 1

Eine in Längs- und Querachse parallel zur XY-Ebene liegende Bahn leitet das Wasser auf zwei an der Z-Achse tiefer gelegene Membranbahnen. Beide sind um ihre Längsachse rotiert, jedoch in entgegengesetzte Richtung.

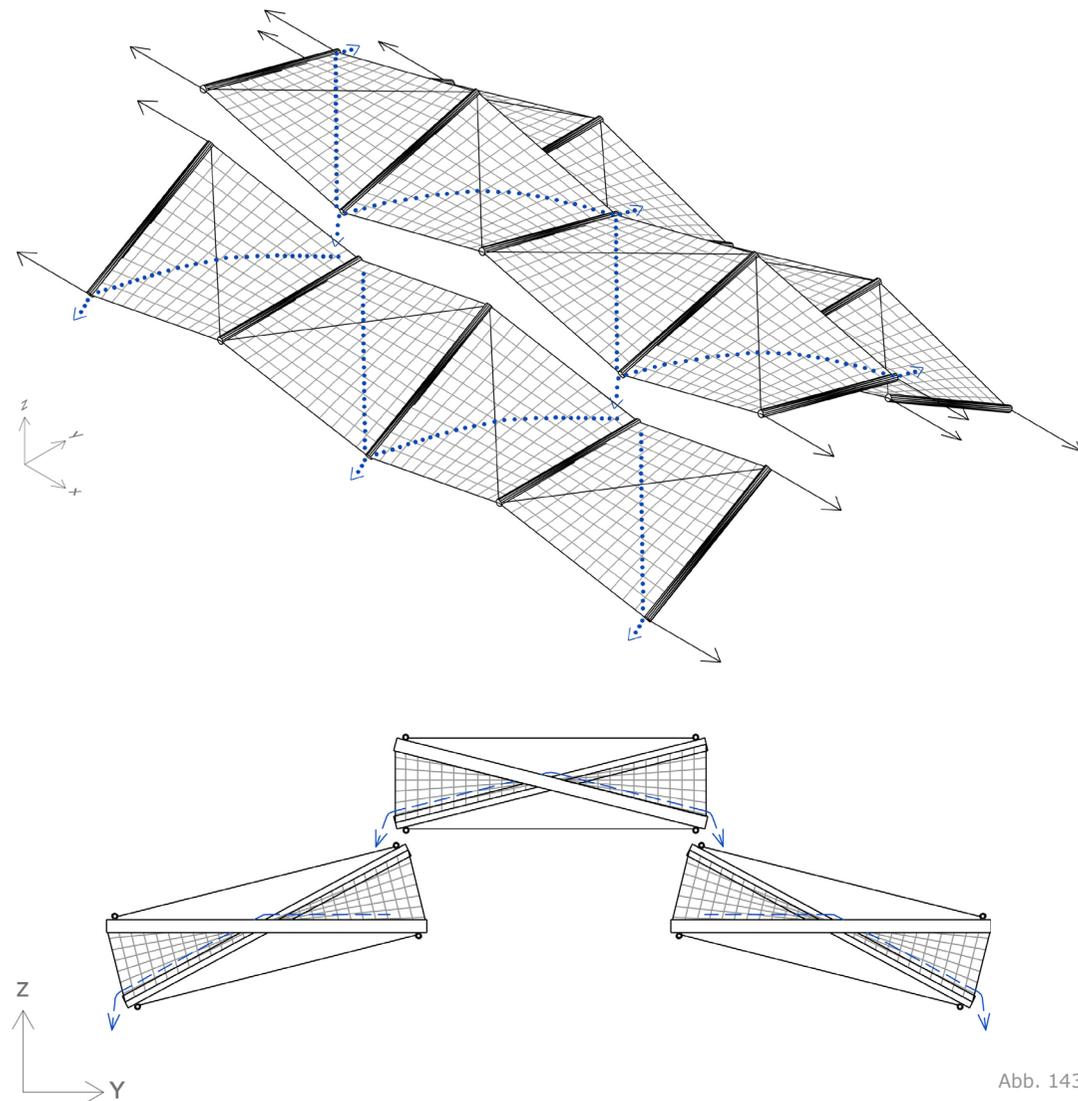


Abb. 143

Kombination mehrerer Bahnen: Variante 2

Mehrere um ihre Längsachse rotierte Bahnen werden höhenversetzt und überlappend montiert, sodass das Wasser stufenartig in eine Richtung abfließt.

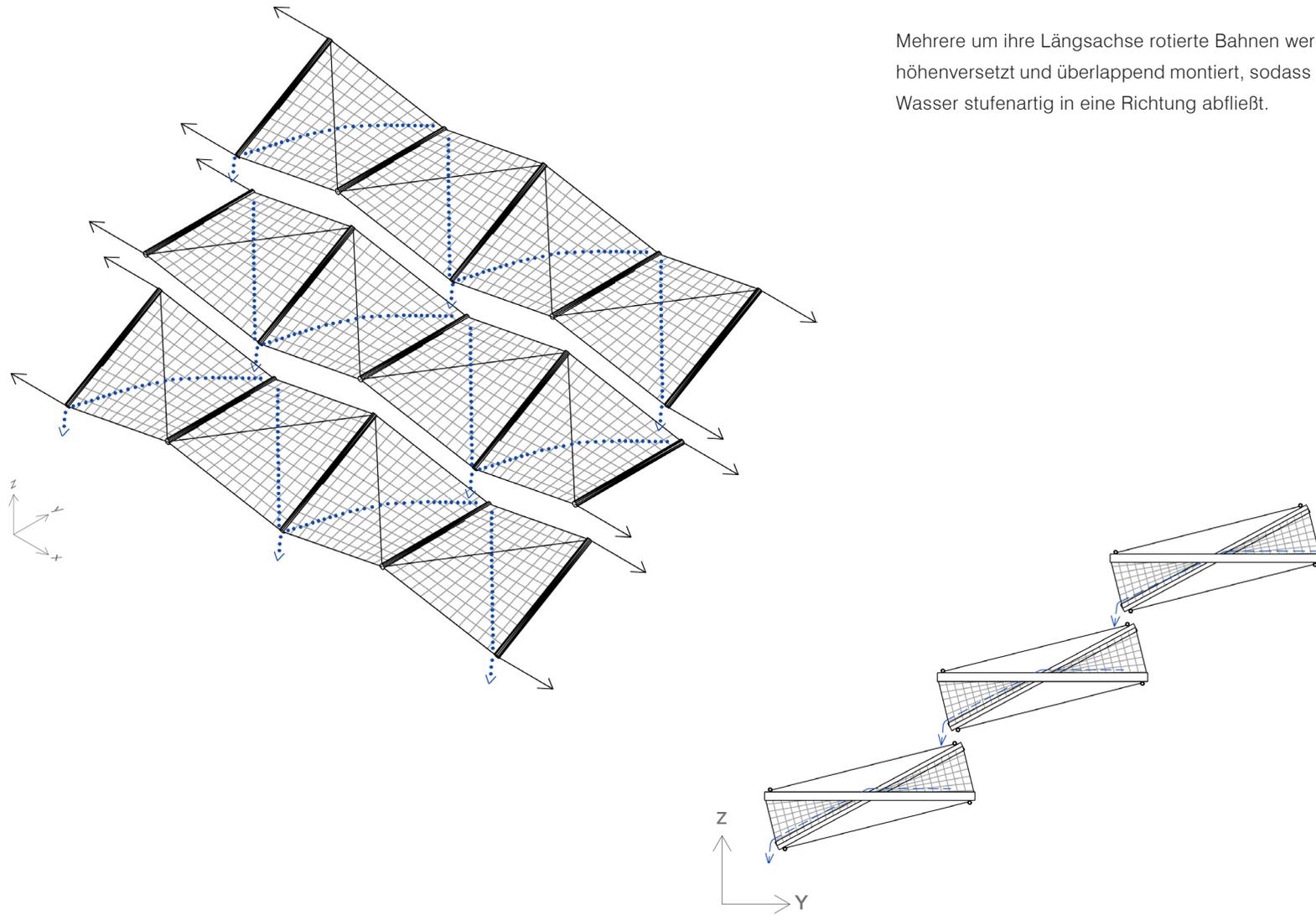


Abb. 144

Kombination mehrerer Bahnen: Variante 3

Mehrere um ihre Querachse rotierte Bahnen werden höhenversetzt und überlappend montiert. Jene Bahnen, die auf der Z-Achse tiefer liegen, müssen mit Membrantaschen ausgeführt sein. Sie nehmen das Wasser der darüberliegenden Bahnen auf und führen es bis zu einer Ecke der Membranbahn, wo es abfließen kann.

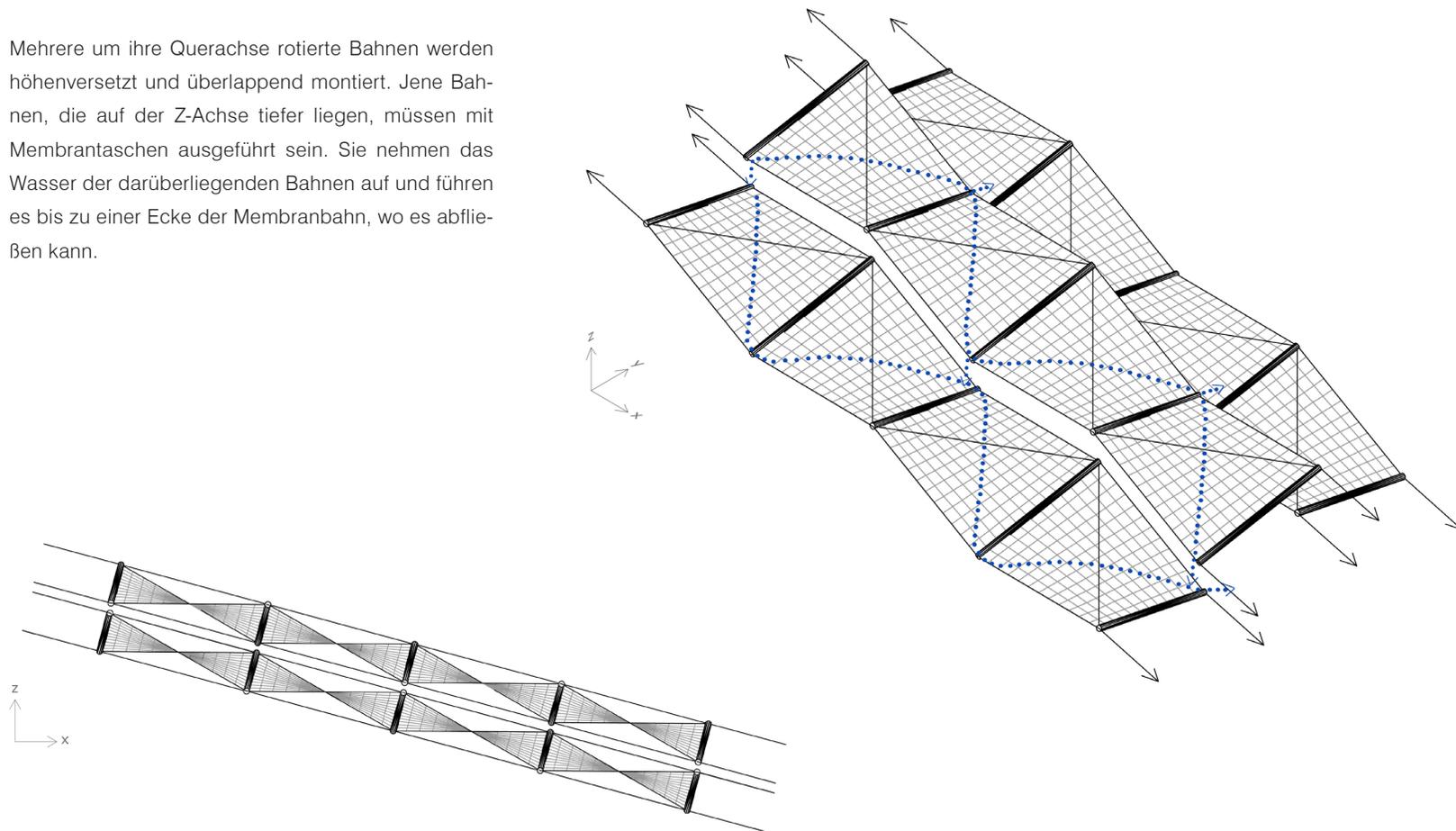


Abb. 145

2.8.3 Anordnung von Flächen im dreidimensionalen Raum

Im Gegensatz zu den Bahnen müssen die Flächen um mehr als 15° geneigt sein. Andernfalls kommt es zur Bildung von Wassersäcken in den Tiefpunkten der Fläche, welche die Stabilität der gesamten Konstruktion gefährden. Um welche Achse die Fläche rotiert wird, ist für die Ableitung des Niederschlags irrelevant, hat jedoch Auswirkungen auf die Montage an der Fassade bestehender Konstruktionen.

Anordnung von Flächen: Variante 1

Rotation der Fläche um die Längsachse

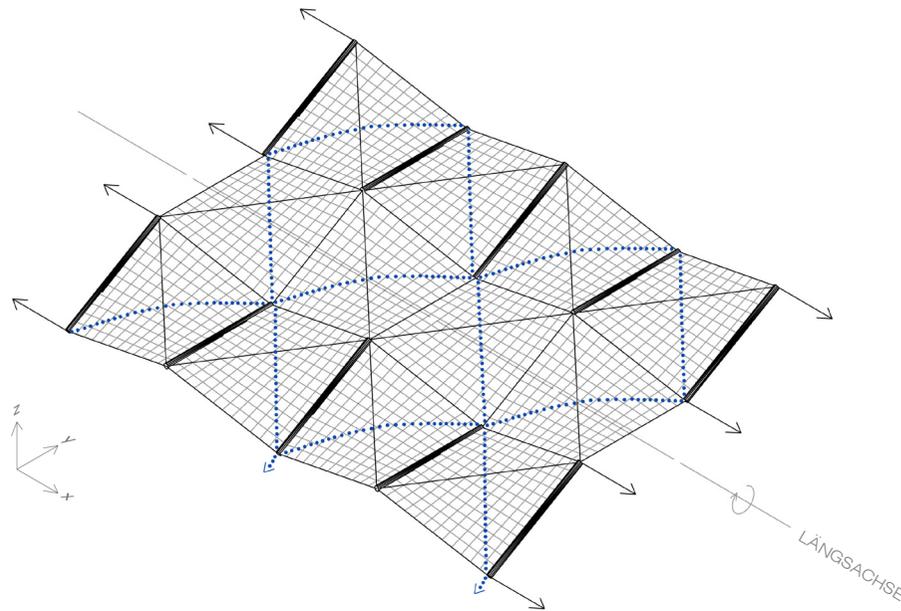


Abb. 146

Anordnung von Flächen: Variante 2

Rotation der Fläche um die Querachse

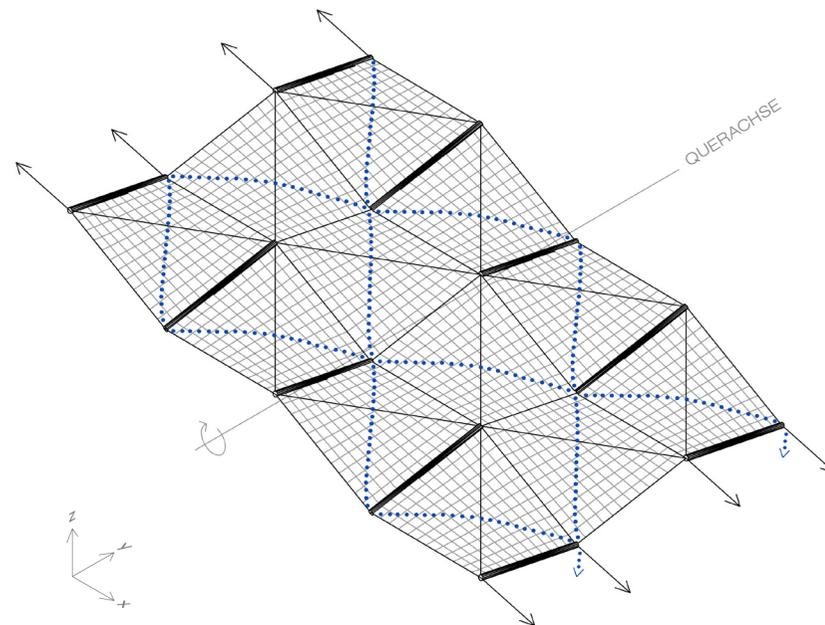


Abb. 147

1 KONTEXT

2 ENTWICKLUNG & ANALYSE

3 ANWENDUNG DES SYSTEMS

3.1 Konstruktive Beschreibung der Bauteile

Das folgende Kapitel liefert Lösungen zu den konstruktiven Fragen des entwickelten Tensegrity-Systems.

Hierfür wurden die einzelnen Bauteile der Konstruktion nach **Flächen-, Linien- und Verbindungselementen** geordnet. Diese wurden nach den an sie gestellten Anforderungen gesondert analysiert und **Material- wie Detailvorschläge** gebracht. Der Inhalt der Studie soll, so weit wie möglich, maßstabsunabhängig gesehen werden. Die Dimensionierung der konstruktiven Details setzte jedoch eine Festlegung der Bauteilmaße voraus - diese ist exemplarisch zu verstehen. Bei größer oder kleiner dimensionierten Dachkonstruktionen ist eine Anpassung der Detaillösungen notwendig. Für die anschließenden Details wurde eine Druckstablänge von vier Metern und eine Membrankantenlänge von vier mal vier Metern gewählt.

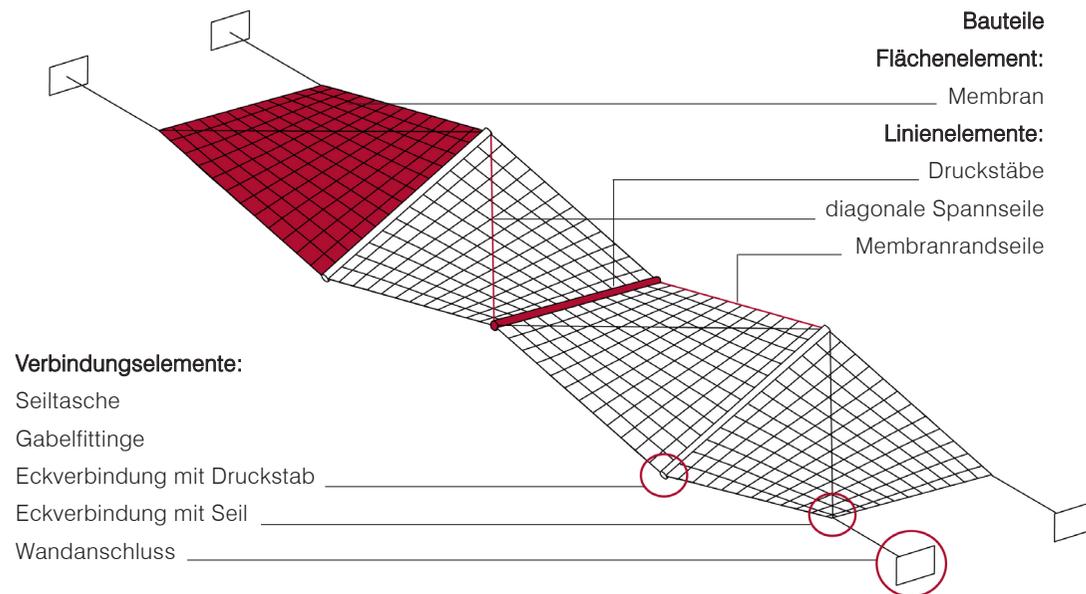


Abb. 148: Bauteilbeschreibung

3.1.1 Flächenelement

3.1.1.1 Membran

Die zwischen den Druckstäben aufgespannte Membranfläche ist ein **hyperbolisches Paraboloid**. Die gegensinnig gekrümmte - also antiklastische - Fläche kann durch Bewegung einer Geraden überstrichen werden. Eine solche Fläche bezeichnet man als **Regelfläche**. Zwei der vier Membrankanten sind biegesteife Randelemente, die zwei übrigen Kanten sind gekrümmt und biegeweich ausgeführt. Alle vier Kanten haben eine Kantenlänge von ca. vier Metern. Zur Vermeidung schlaffer Bereiche und zu großer Verformungen muss die Membran vorgespannt werden. Die **Vorspannung** bewirkt, dass in der Membran auch im unbelasteten Zustand in allen Richtungen Zugkräfte auftreten, die unter Lasteinwirkung gegebenenfalls bis auf null abgebaut werden können.²⁰

Anforderungen an die Membran

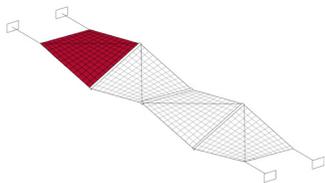
Die Ansprüche, die an die Membranfläche gestellt werden, können unterschieden werden in:

Nutzungsanforderungen

- Regenschutz
- Sonnenschutz
- geringe Verschmutzung

Konstruktive Anforderungen

- hohe Zugfestigkeit
- Temperatur-unabhängiges Dehnungsverhalten



²⁰ vgl. m5 membrankonstruktionen, S. 1.8

Membranmaterial

Die Wahl des Materials für die Membranfläche kann die optische Erscheinung der Gesamtkonstruktion stark beeinflussen. Prinzipiell sind unbeschichtete und beschichtete Gewebe sowie Folien für den Einsatz bei dieser Konstruktion geeignet.

Da die **unbeschichteten Gewebe** auf Grund ihrer Offenporigkeit jedoch keinen Regenschutz bieten, wird auf diese Produktgruppe hier nicht weiter eingegangen.

Unter den **beschichteten Geweben** gibt es mehrere Materialien, die den Anforderungen der Konstruktion gerecht werden:

Polyestergewebe mit PVC-Beschichtung

- hohe Materialdehnung möglich
- formbeständig bei physikalischer und chemischer Belastung
- resistent gegen Verschmutzung
- altersbeständig
- Transluzenz beträgt ca. 0,8% bis 4%
- Beschichtungsstärken 0,08 mm - 0,25 mm

Glasfasergewebe mit PTFE-Beschichtung

- witterungs-, temperatur- und lichtbeständig
- geringere Festigkeiten und Materialdehnungen als bei PVC-beschichteten Geweben
- hohe Knickempfindlichkeit der Glasfasern
- Transluzenz bis ca. 13% möglich

ETFE-Gewebe mit Fluorpolymerbeschichtung

- geringe Bruch- und Schweißnahtfestigkeit
- geringe Spannweiten
- Transluzenz bis zu 90% möglich

Isotrope **Folien** weisen im Gegensatz zu anisotropen Geweben ein Spannungs-Dehnungsverhalten auf, das in allen Richtungen näherungsweise gleich ist.

ETFE-Folien

- ausgezeichnete mechanische Eigenschaften
- Farbigkeit durch einmischen von Pigmenten
- mit Fluorkunststoffen bedruckbar
- Transluzenz ca. 95%
- geringe Reiß- und Bruchfestigkeit
- geringe Spannweite ²¹

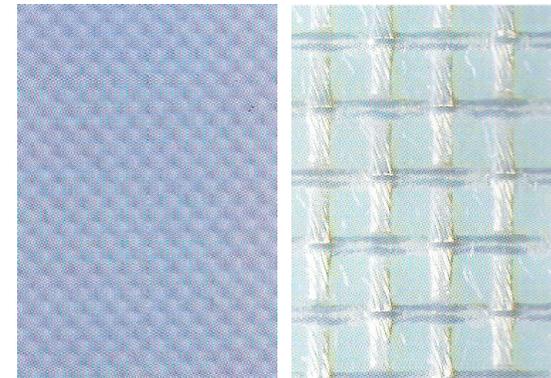


Abb. 149: links: PVC-beschichtetes Polyestergewebe
Abb. 150: rechts: PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe

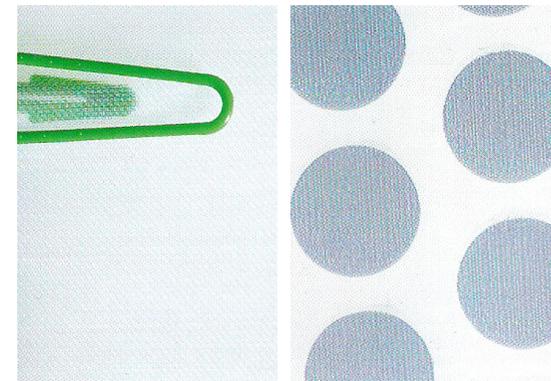
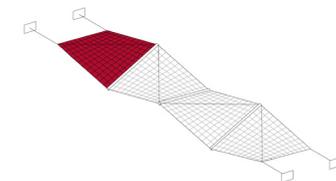
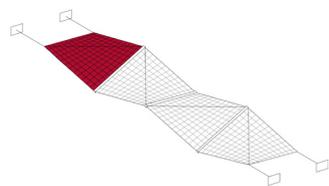
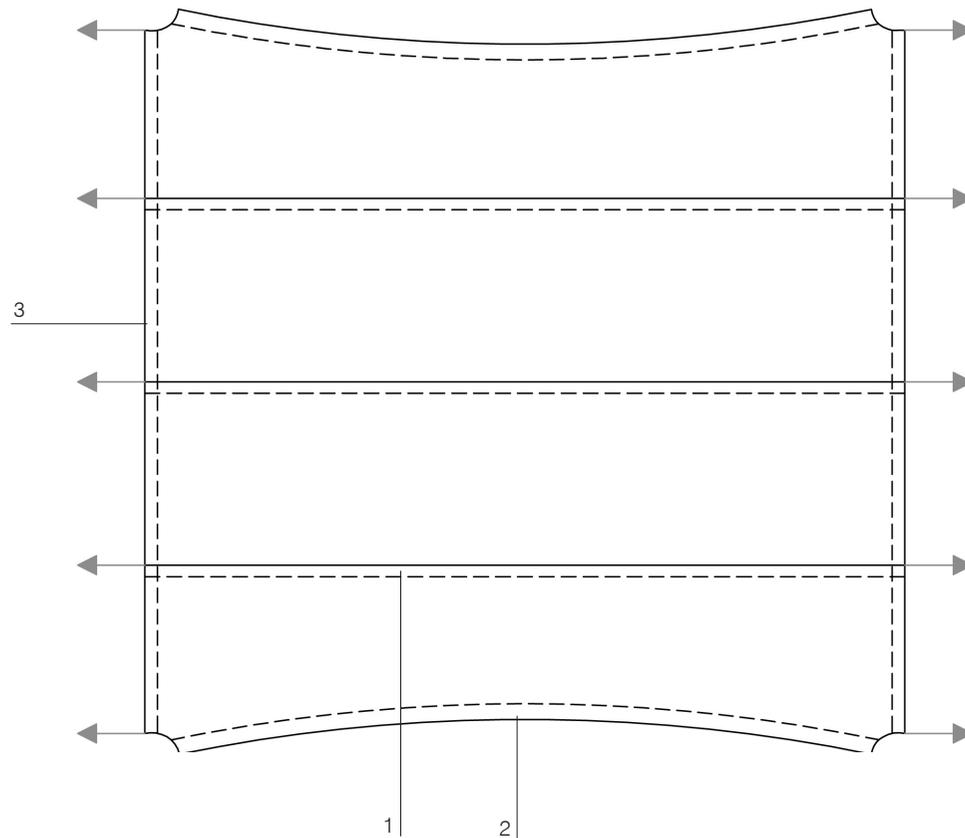


Abb. 151: links: fluoropolymerbeschichtetes ETFE-Gewebe
Abb. 152: rechts: bedruckte ETFE-Folie



²¹ vgl. Detail - Bauen mit Membranen, 6/2000, S. 1056-1058



- 1 Schweißnähte, Nahtbreite 6 cm
- 2 Biegeweicher Rand mit Seiltasche für Membranrandseile
- 3 Biegesteifer Rand mit Kedertasche für PVC-Keder

Abb. 153: Membranfläche mit zwei biegesteifen und zwei biegeweichen Rändern aus vier Teilflächen zusammengesetzt, Nahtbreite 6 cm

Konfektion

Um eine gekrümmte Membranfläche zu erhalten, muss diese vorerst in mehrere ebene Streifenflächen unterteilt werden. Diese Abwicklung der dreidimensionalen Fläche ist Voraussetzung für den Zuschnitt der Teilflächen. Wichtige Entscheidungen wie die Lage der Nähte, das Bahnenlayout und die Orientierung des Gewebes müssen vor der Abwicklung getroffen werden.

Für die vorliegende Konstruktion wurde jedes Membranfeld in vier Streifen unterteilt. Die Kettrichtung des Gewebes sowie die Nähte verlaufen senkrecht zu den biegesteifen Rändern. Hierbei muss die Steifigkeitszunahme durch die Verdoppelung des Materials sowie der Schweißschrumpf berücksichtigt werden. Alle zuvor genannten Materialien können mit Hochfrequenzschweißnähten verbunden werden. PTFE-beschichtete Glasfasergewebe benötigen für eine schlüssige Verbindung einen zusätzlichen PTFE-Streifen zwischen den Membranlagen. Die gewählte Nahtbreite beträgt 6 cm.

3.1.2 Linienelemente

3.1.2.1 Druckstäbe

Die Stäbe sind jene Bauteile der Konstruktion, die die gesamten Druckkräfte aufnehmen müssen, da alle übrigen Bauteile ausschließlich auf Zug beansprucht werden. Außerdem sind sie das kraftübertragende Bindeglied zwischen den Zugseilen und der Membranfläche.

Anforderungen

- hohe Druckfestigkeit
- geringes Eigengewicht
- Knick- und Torsionsbeständigkeit
- Korrosionsbeständigkeit

Material

Im Membranbau werden üblicherweise für das Gestänge die Materialien Aluminium, Stahl, Holz oder faserverstärkter Kunststoff eingesetzt. Auf Grund der hohen zu erwartenden Druckkräfte und der Gefahr des Ausknickens kommt für die vorliegende Konstruktion jedoch nur Stahl in Frage. Dieser Werkstoff hat zwar im Vergleich zu Aluminium ca. das dreifache Gewicht, dafür aber auch die dreifache Stabilität. Für den beidseitigen Anschluss der Membranflächen benötigt man eine Keder-Doppelschiene. Um das Einfügen der Keder zu erleichtern, besteht die Schiene aus zwei miteinander verschraubbaren Teilen.

Vor Ort können die Membranflächen in den unteren Teil der Kederschiene gelegt und anschließend mit der oberen Schienenhälfte fixiert werden. Weiters sind aufgeschweißte Stahllaschen erforderlich, an die die Gabelfittings angeschlossen werden.

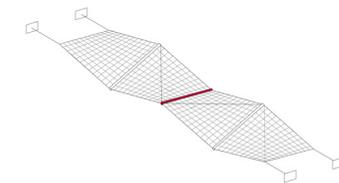
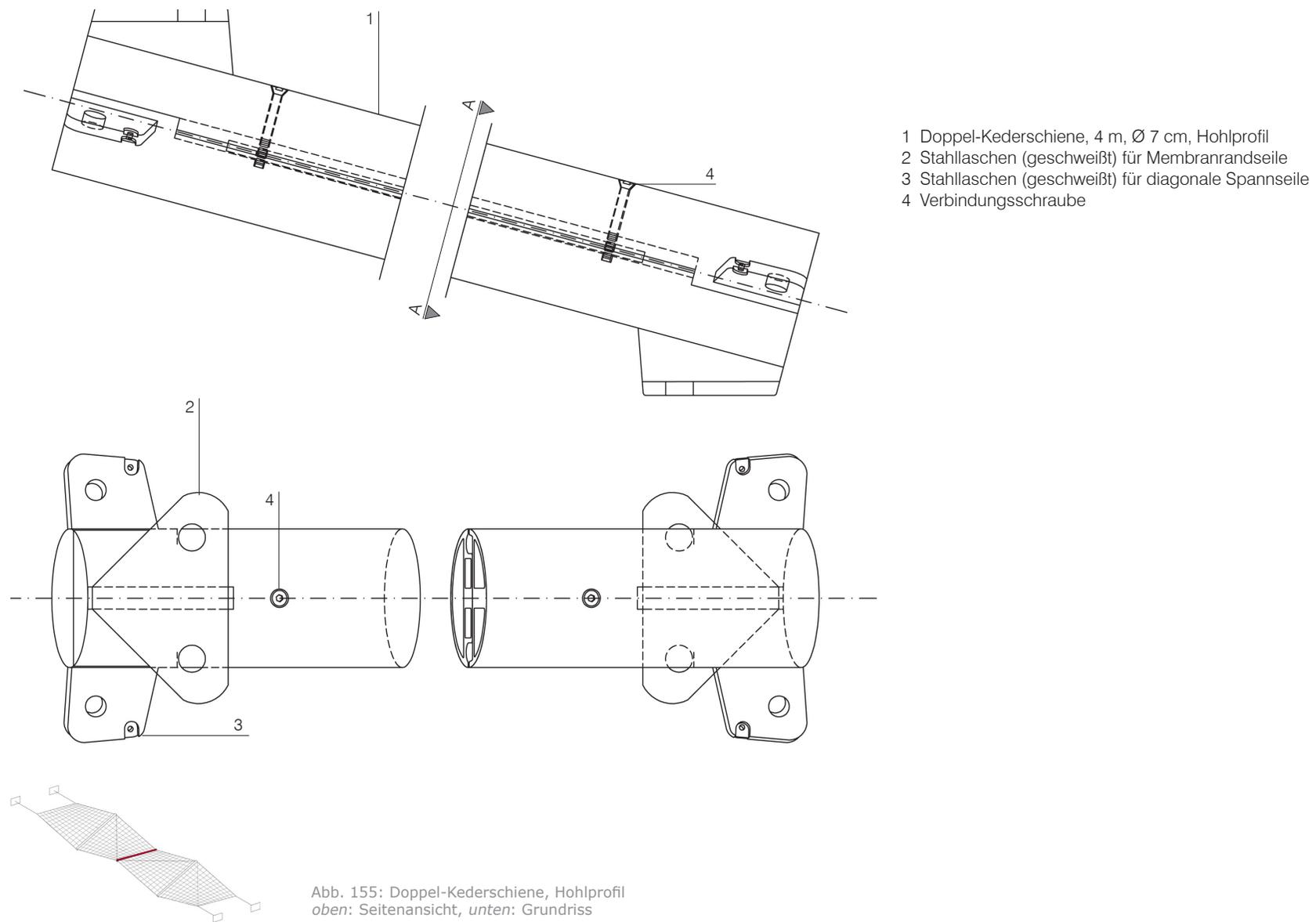


Abb. 154: Aufbau der Kederschiene mit angeschweißten Stahllaschen



- 1 Doppel-Kederschiene, 4 m, \varnothing 7 cm, Hohlprofil
- 2 Stahllaschen (geschweißt) für Membranrandseile
- 3 Stahllaschen (geschweißt) für diagonale Spannseile
- 4 Verbindungsschraube
- 5 PVC-beschichtetes Polyestergewebe mit Keder (\varnothing 7 mm)
- 6 Schweißnaht

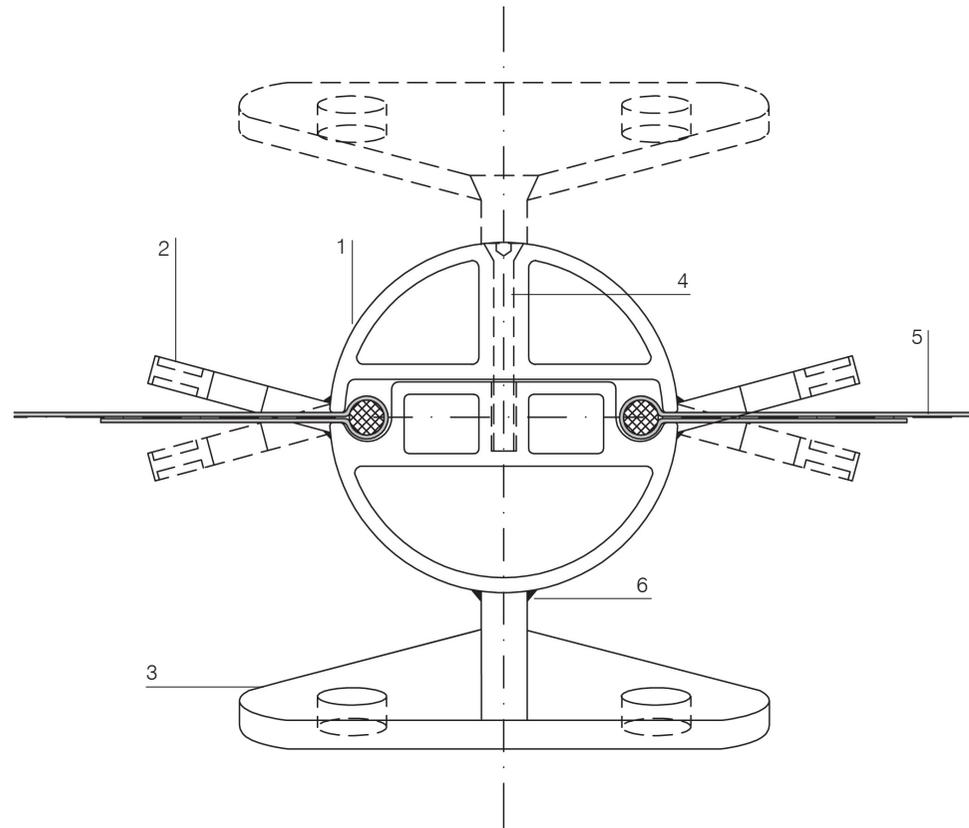
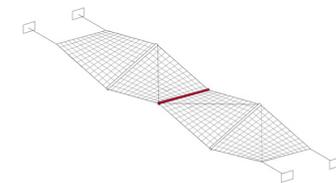


Abb. 156: Doppel-Kederschiene,
Hohlprofil, Querschnitt A-A



3.1.2.2 Zugseile

Die Zugseile sind bei dieser Konstruktion nicht nur für das Aufspannen der Membranfläche verantwortlich, sondern positionieren durch die eingebrachte Vorspannung auch die Druckstäbe im Raum. Es sind zwei Arten von Zugseilen nötig, die unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden müssen.

Anforderungen an die diagonal verspannten Zugseile

Die diagonal verspannten Zugseile müssen die **hohen Zugkräfte** von den Auflagern an die Druckstäbe weiterleiten. Sie sind der direkten Witterung ausgesetzt, wodurch hohe Anforderungen an den **Korrosionsschutz** gestellt werden.

Anforderungen an die Membranrandseile

Seile, welche durch die Saumtasche der Membranfläche geführt werden, müssen die **Tangentialkräfte** der Fläche aufnehmen. Außerdem stellt eine eventuelle **Abnützung der Membranbeschichtung** durch Reibung des Seils an der Sauminnenseite eine Gefahr für die Membranfläche dar, die ihre Lebensdauer herabsetzt.

Material

Sowohl für die diagonal verspannten Zugseile als auch für die Membranrandseile werden **offene Spiralseile** (OSS) aus gleichgeschlagenen Edelstahllitzen verwendet. Da in den diagonal laufenden Spannseilen höhere Zugkräfte zu erwarten sind, wurden hierfür stärkere Seile gewählt.

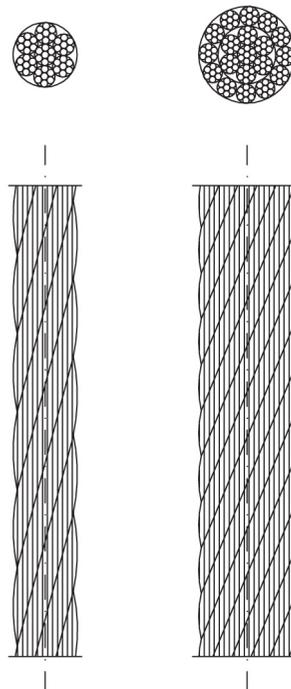
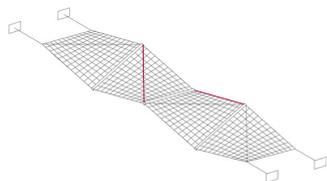


Abb. 157: Offene Spiralseile
links: Membranrandseil \varnothing 8 mm
rechts: diagonales Spannseil \varnothing 12 mm

3.1.3 Verbindungselemente

3.1.3.1 Seiltaschen

Der biegeweiche Rand der Membranfläche ist als Tasche ausgebildet, durch die ein Seil geführt wird. An der Tascheninnenseite ist eine FEP-Folie als Scheuerschutz eingelegt. Da bei dieser Konstruktion hohe Tangentialkräfte zu erwarten sind, wird entlang des Seils noch ein zusätzlicher Gurt aus Polyester eingenäht.

- 1 Tangentiaalseil (OSS \varnothing 8 mm)
- 2 PVC-beschichtetes Polyestergewebe, 2 mm
- 3 FEP-Folie
- 4 Gurt, Polyester, 17 mm
- 5 Keder \varnothing 7 mm

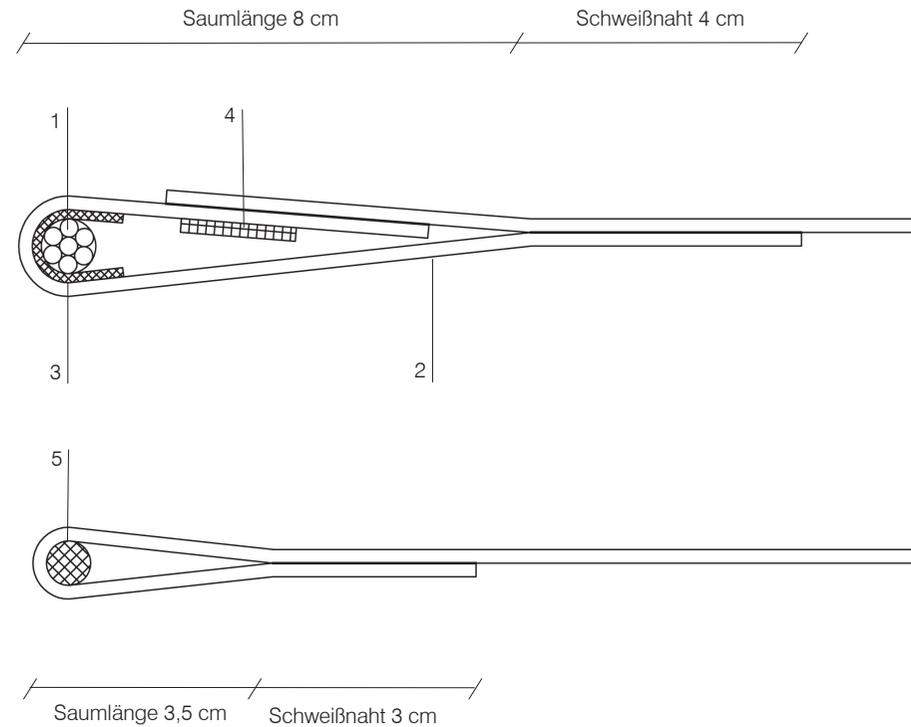
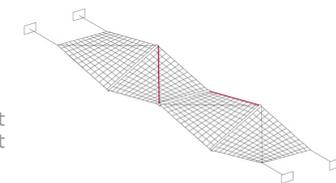


Abb. 158: oben: Seiltasche des Membranrandseils, Schnitt
unten: Kedertasche, Schnitt



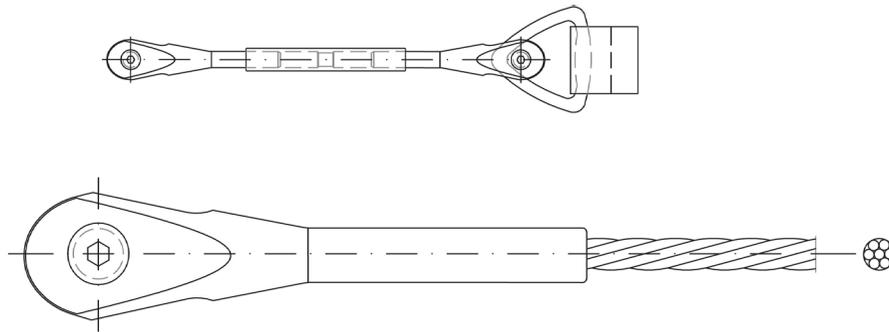
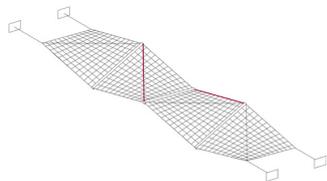


Abb. 159: *unten*: Gabelfitting des Membranrandseils
oben: Gabelspannschloss mit Triangel



3.1.3.2 Seil-Endverbindungen

Für die Verbindung der Membranrandseile mit den Stahllaschen der Kederschiene müssen deren Enden mit **Gabelfittingen** aus Stahl verpresst werden. Der Gurt wird über einen Flachtriangel mit einem **Gabelspannschloss** verbunden, welches ebenfalls an der Stahllasche montiert wird. Der Gurtspanner ermöglicht ein besser dosiertes Spannen und Nachspannen der Membranfläche.



Auch die **diagonalen Spannseile** werden an ihren Enden mit Gabelfittingen verpresst. Für die Verbindung der jeweils äußersten Membranfläche mit dem Wandbeschlag wurde ebenso ein Gabelspannschloss gewählt.

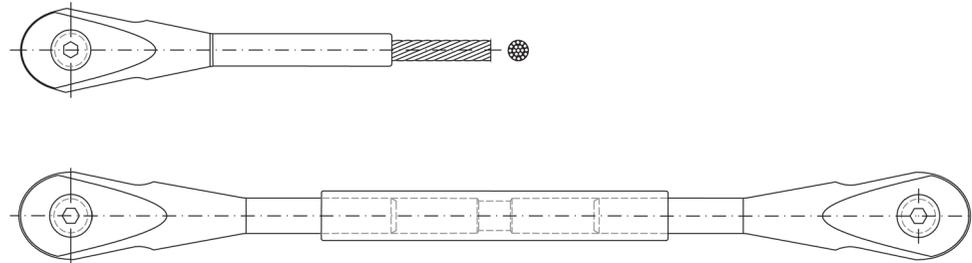
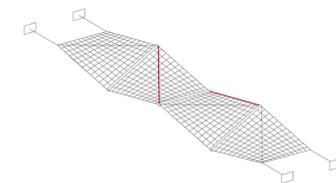
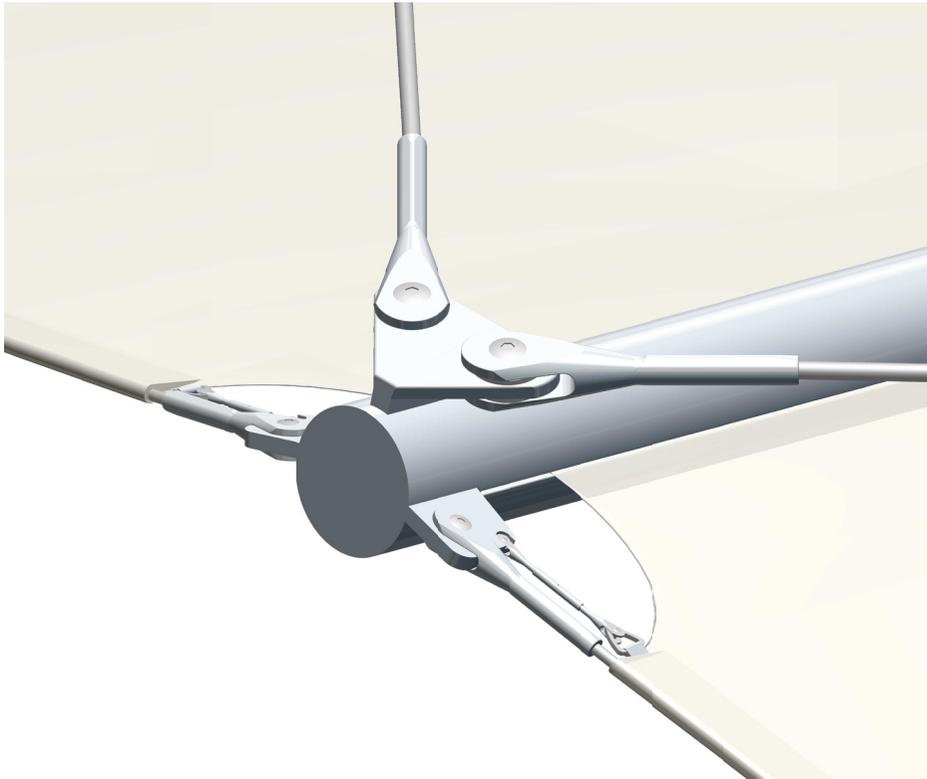


Abb. 160: *oben*: Gabelfitting für diagonale Spannseile
unten: Gabelspannschloß für Wandanschluss





3.1.3.3 Eckverbindung mit Druckstab

Bei der Montage wird die Membranfläche in die Kederschiene gelegt und anschließend beide Schienenhälften miteinander verschraubt. An beiden Stabenden sind Stahllaschen angeschweißt, an denen die Fittings der Seilenden montiert werden. Die Lasche an der Oberseite der Kederschiene ist für die zwei diagonalen Spannseile vorgesehen. An die beiden seitlich liegenden Laschen werden die Gabelfittinge der Membranrandseile und die Gabelspannschlösser der Membrangurte angebracht.

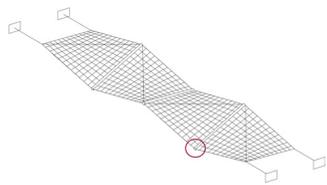
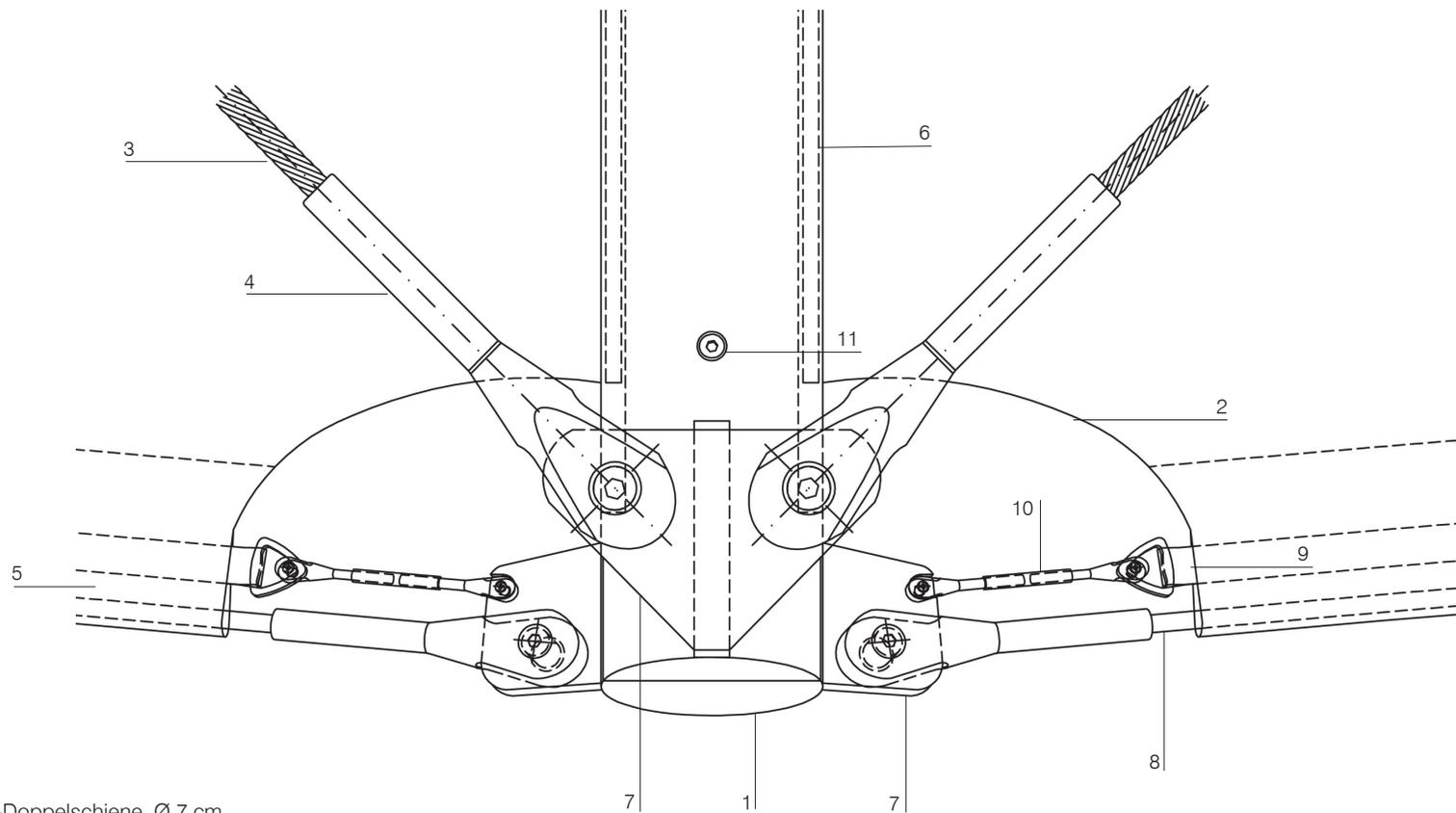
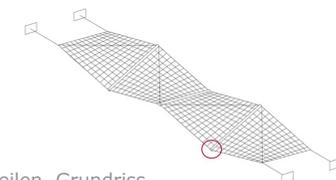


Abb. 161: Eckverbindung von Kederschiene, Membranflächen und Spannseilen



- 1 Keder-Doppelschiene, Ø 7 cm
- 2 PVC-beschichtetes Polyestergerewebe, 2 mm
- 3 Diagonales Spannseil (OSS Ø 12 mm)
- 4 Gabelfitting, verpresst
- 5 Seiltasche
- 6 PVC-Keder, Ø 7 mm
- 7 Stahllasche, geschweißt
- 8 Membranrandseil (OSS Ø 8 mm) mit Gabelfitting
- 9 Gewebegurt, 17 mm
- 10 Gabelspannschloss mit Triangel
- 11 Verbindungsschraube

Abb. 162: Eckverbindung von Kederschiene, Membranflächen und Spannseilen, Grundriss



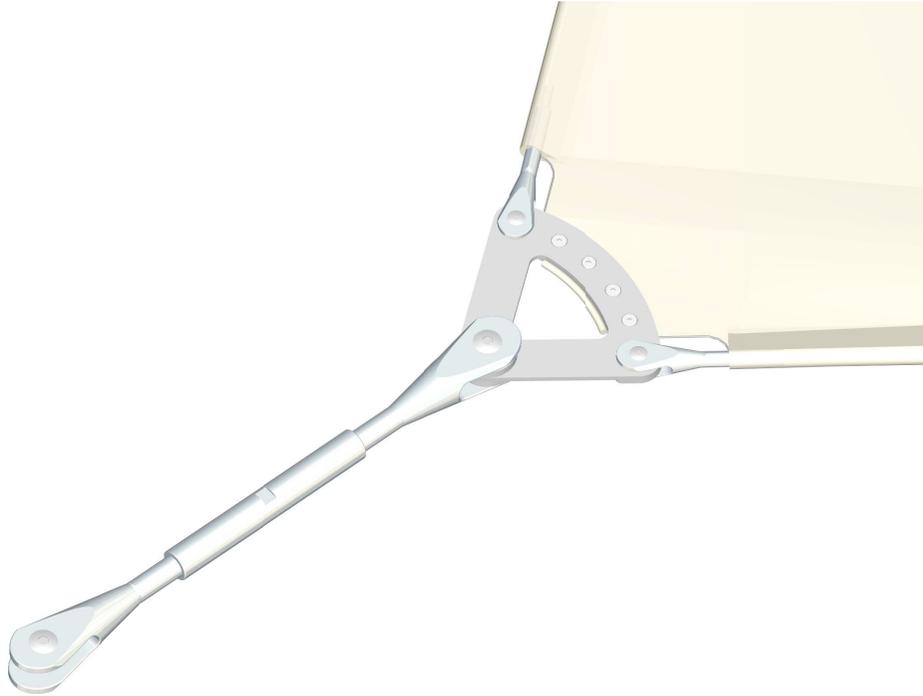
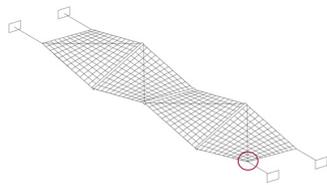
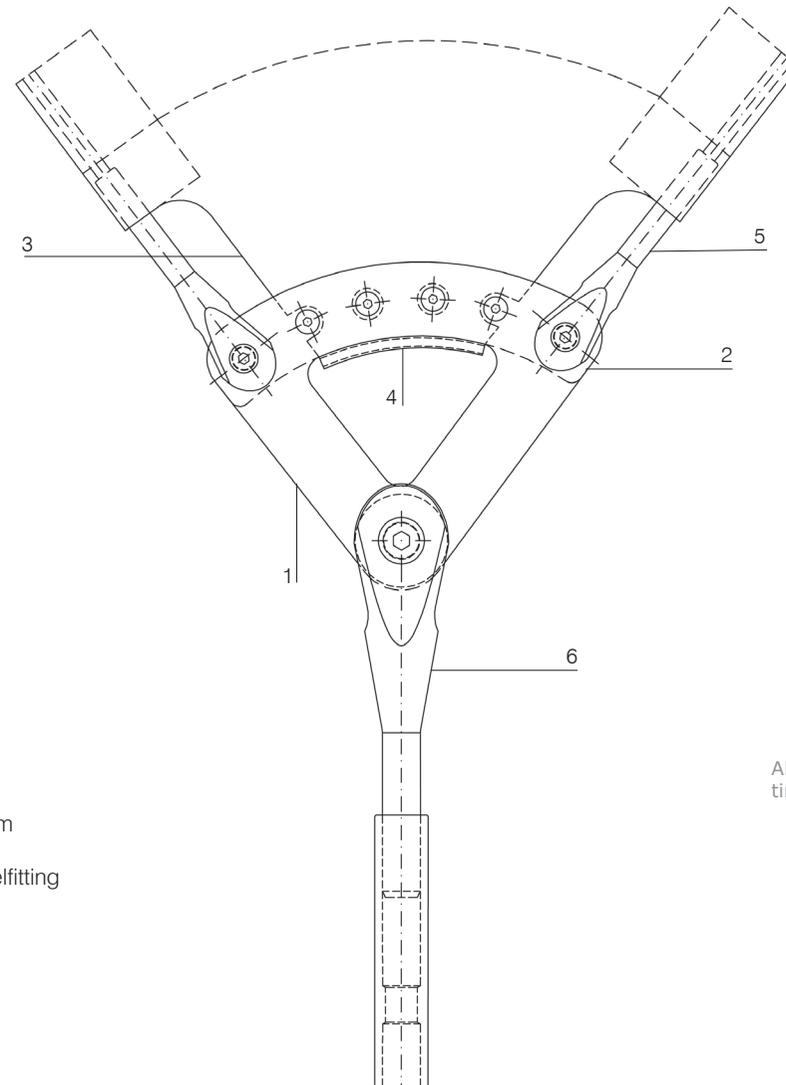


Abb. 163: Eckbeschlag der Membran mit Gabelfitting



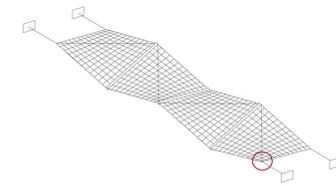
3.1.3.4 Eckverbindung mit Seil

Für die äußersten Flächen der Membranbahn - jene Flächen, die an der Fassade montiert werden - ist keine abschließende Kederschiene notwendig. Sie können mit drei biegeweichen Rändern ausgeführt werden. Die Ecken der Membranflächen benötigen jedoch einen Beschlag, der die Kräfte der Membran und der Spannseile an die Fassade weiterleitet. Die im Eckbereich mit einem Keder versehene Membran wird zwischen zwei Beschlagsplatten geklemmt. An diese werden die Tangentialseile und ein Gabelfitting montiert, welcher die Kräfte an den Wandbeschlag weiterleitet.



- 1 Eckbeschlag, Metallplatte, 5 mm
- 2 Klemmplatte, 5 mm
- 3 PVC-beschichtetes Polyestergewebe, 2 mm
- 4 PVC-Keder, Ø 7 mm
- 5 Membranrandseil (OSS Ø 8 mm) mit Gabelfitting
- 6 Gabelfitting, verpresst

Abb. 164: Eckbeschlag der Membran mit Gabelfitting, Grundriss



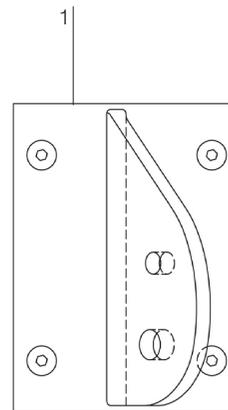
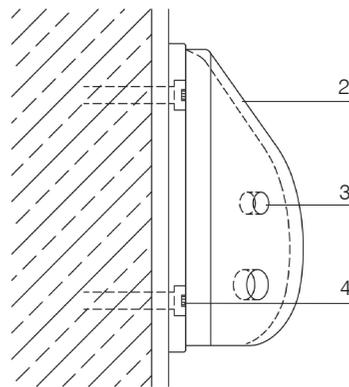
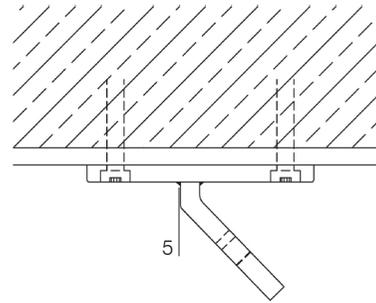
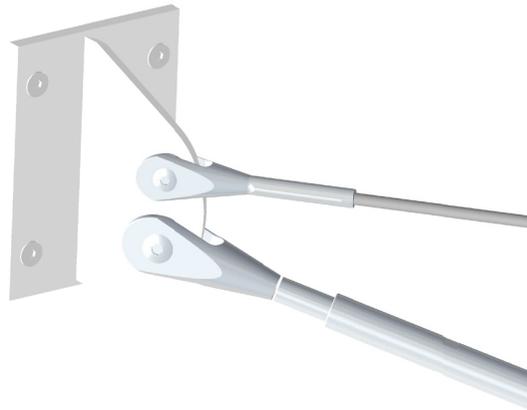
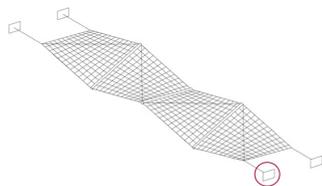


Abb. 165: Fassadenplatte mit angeschweißter Stahllasche
oben: Grundriss
links: Seitenansicht
rechts: Frontalansicht



- 1 Stahlplatte, 15 mm
- 2 Stahllasche, geschweißt, 15 mm
- 3 Montagelöcher
- 4 Fassadenanschluss, geschraubt, Ø 26 mm
- 5 Schweißnaht

3.1.3.5 Wandanschluss

Die vorliegende Konstruktion benötigt eine Primärkonstruktion, die im Stande ist, die auftretenden Kräfte aufzunehmen und abzuleiten. Eine Möglichkeit wäre, die Membranfläche zwischen zwei bestehenden Fassaden aufzuspannen.

Die Kraftübertragung an eine Fassade erfolgt über eine Stahlplatte, an der eine Stahllasche angeschweißt ist. Der Gabelfitting des diagonalen Spannschlosses und das Gabelspannschloss des Eckbeschlags der Membranfläche werden mit Bolzen an den Montagelöchern der Stahlplatte befestigt.

Schlussbemerkung

Mit der vorliegenden Arbeit wurde versucht, den textilen Leichtbau auf ein modulares Tragsystem anzuwenden, welches dem Tensegrity-Prinzip entspricht. Die Recherche zu Beginn der Arbeit umfasste typologische und historische Informationen, sowie aktuelle Beispiele aus dem Bereich textiler Dachkonstruktionen und eine Erklärung des konstruktiven Aufbaus von Tensegrity-Systemen. Mittels experimenteller Formfindung wurde anschließend eine modulare, räumlich offene Tensegrity-Konstruktion entwickelt. Dieses Tragsystem konnte in einer Formstudie und einer ausführlichen Untersuchung möglicher Formkombinationen genau analysiert werden. Die abschließenden Material- und Detailvorschläge zeigten die Übertragung der konstruktiven Idee in eine realisierbare Dachkonstruktion.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein modulares System für Membrandächer, welches problemlos an verschiedenste bauliche Situationen in seiner Form und Größe angepasst werden kann. Die Wirtschaftlichkeit des Systems könnte durch eine serielle Fertigung verschiedener Grundmodule gesteigert werden. So würden für eine Dachkonstruktion nur einzelne Module individuell gefertigt und mit serienmäßig produzierten kombiniert werden. Dadurch könnten der Zeit- und Arbeitsaufwand und damit auch die anfallenden Kosten reduziert werden.

Literaturverzeichnis

- Bubner, Ewald
 Membrankonstruktionen - Verbindungstechniken
 Druckerei Wehlmann, Essen 1997
 ISBN 3-9805790-7-7
- Büttner, Oskar, Hampe, Erhard
 Bauwerk. Tragwerk. Tragstruktur.
 - Klassifizierung, Tragqualität, Bauwerkbeispiele (Band 2)
 Ernst & Sohn, Berlin 1984
 ISBN 3-4330-1025-0
- Engel, Heino
 Tragsysteme
 Hatje Cantz, Ostfildern 1997
 ISBN 978-3-7757-1876-9
- Field, Marcus
 Future Systems
 Springer Verlag, Wien 1999
 ISBN 3-211-83314-5
- Fuller, Richard Buckminster
 Your Private Sky - Diskurs
 Lars Müller Verlag, Baden/Schweiz 2001
 ISBN 3-907044-95-9
- Gengnagel, Christoph
 Arbeitsblätter „Tensegrity“
 Institut für Hochbaustatik und Tragwerksplanung, TU München 2002
- Hoppe, Diether S.
 Freigespannte Textile Membrankonstruktionen - Geschichtliche,
 materialtechnische, konstruktive und gegenwärtige Entwicklungen
 Böhlau Verlag, Wien 2007
 ISBN 978-3-205-77328-3
- Horden, Richard
 light tech - towards a light architecture
 Birkhäuser Verlag, Basel 1995
 ISBN 3-7643-5220-5
- Institut für Leichtbau, Entwerfen & Konstruieren, Universität Stuttgart
 Strukturleichtbau IV: Tensegrity
 Vorlesungsskriptum
- Murphy, Diana (Hg.) / Architecture for Humanity
 Design Like You Give a Damn: Architectural Responses to Humanitarian Crises
 Metropolis Books, New York 2006
 ISBN 1-933045-25-6
- Otto, Frei
 IL 30 - Vela, Toldos, Sonnenzelte, Sun and Shade
 Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart 1984
 ISBN 3-7828-2030-4
- Seidel, Michael
 Textile Hüllen, Bauen mit biegeweichen Tragelementen
 Ernst & Sohn, Berlin 2008
 ISBN 978-3-433-01865-1
- Seidel, Michael
 m5 - membrankonstruktionen
 Schriftenreihe des Institutes für Hochbau 2, TU Wien 2002
- Siegel, Teresa
 folding tensegrity,
 Diplomarbeit Institut für Hochbau 2, TU Wien 2005
- Detail - Mobiles Bauen, 8/1998
 Detail - Bauen mit Membranen, 6/2000
 Detail - Dächer - flach und geneigt, 7/8/2002
- www.christojeanneclaude.net
www.gjl-architekten.de
www.haque.co.uk
www.ims.tuwien.ac.at/research/c3d_content/tetraeder.pdf
www.maki-and-associates.co.jp
www.narchitects.com
www.sl-rasch.de
www.tate.org.uk/modern
www.tw-arch.at

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Freigespannte textile Membrankonstruktionen (2007)
 Abb. 2: IL 30 Schattenzelte (1984)
 Abb. 3: Freigespannte textile Membrankonstruktionen (2007)
 zitiert aus Arch+ 107 - Textile Architektur, Aachen 1991
 Abb. 4: IL 30 Schattenzelte (1984)
 Abb. 5: Freigespannte textile Membrankonstruktionen (2007)
 zitiert aus DB - Deutsche Bauzeitung - Haut und Knochen, 1993/9
 Abb. 6: Freigespannte textile Membrankonstruktionen (2007)
 zitiert aus Rainer Graefe, Vela erunt, Mainz 1979
 Abb. 7: Detail - Bauen mit Membranen, 6/2000
 Abb. 8: Freigespannte textile Membrankonstruktionen (2007)
 zitiert aus Horst Berger, Light Structures. Structures of Light,
 Basel, Berlin, Boston 1996
 Abb. 9: Freigespannte textile Membrankonstruktionen (2007)
 zitiert aus DB - Deutsche Bauzeitung - Haut und Knochen, 1993/9
 Abb. 10: Natürliche Konstruktionen, Frei Otto, Stuttgart 1982
 Abb. 11: The Work of Frei Otto, Ludwig Glaeser, Katalog des
 Museum of Modern Art, New York 1972
 Abb. 12: Future Systems, Marcus Field, Springer Verlag 1999
 Abb. 13: Future Systems, Martin Pawley, Birkhäuser Verlag 1993
 Abb. 14: www.future-systems.com (Februar 2010)
 Abb. 15 - Abb. 17: www.gjl-architekten.de
 Abb. 18: Detail - Dächer - flach und geneigt, 7/8/2002
 Abb. 19: www.jp-architects.at (Februar 2010)
 Abb. 20 - Abb. 23: Design Like You Give a Damn (2006)
 Abb. 24 - Abb. 26: Detail - Bauen mit Membranen, 6/2000
 Abb. 27: www.hcla.co.uk (Februar 2010)
 Abb. 28, Abb. 29: light tech - towards a light architecture (1995)
 Abb. 30 - Abb. 32: www.sl-rasch.de
 Abb. 33 - Abb. 35: Institut für Hochbau 2
 Abb. 36 - Abb. 39: www.sl-rasch.de
 Abb. 40: www.tw-arch.at (Februar 2010)
 Abb. 41: Institut für Hochbau 2
 Abb. 42 - Abb. 45: www.tw-arch.at (Februar 2010)
 Abb. 46 - Abb. 49: www.tate.org.uk/modern (Februar 2010)
 Abb. 50 - Abb. 52: www.christojeanneclaude.net (Februar 2010)
 Abb. 53 - Abb. 56: www.narchitects.com (Februar 2010)
 Abb. 57 - Abb. 60: www.haque.co.uk (Februar 2010)
 Abb. 61, Abb. 62: Institut für Hochbau 2
 Abb. 63: www.grunch.net/snelson/images/WoodenXPiece.jpg (Februar 2010)
 Abb. 64, Abb. 65: www.kennethsnelson.net (Februar 2010)
 Abb. 66: Strukturleichtbau IV: Tensegrity
 Abb. 67: Arbeitsblätter „Tensegrity“ (2002)
 Abb. 68: Strukturleichtbau IV: Tensegrity
 Abb. 69, Abb. 70: Institut für Hochbau 2
 Abb. 71 - Abb. 76: Arbeitsblätter „Tensegrity“ (2002)
 Abb. 77: www.kennethsnelson.net (Februar 2010)
 Abb. 101, Abb. 102: Bauwerk. Tragwerk. Tragstruktur. (1984)
 Abb. 103: Tragsysteme (1997)
 Abb. 104: Bauwerk. Tragwerk. Tragstruktur. (1984)
 Abb. 149 - Abb. 152: Detail - Bauen mit Membranen, 6/2000
 Nicht angegebene Abb.: Photos, Skizzen und Zeichnungen der Autorin