

Technische Universität München - Lehrstuhl für Tragwerksplanung

Univ.- Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

# Mobile Membrankonstruktionen

**Christoph Gengnagel**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität  
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dietrich Fink

Prüfer der Dissertation:

1. Univ. Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel
2. Univ. Prof. Dr.(Univ.Rom) Thomas Herzog

Die Dissertation wurde am 10.03.2005 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 15.07.2005 angenommen.

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Tragwerksplanung

Band 12

ISBN 3-938660-07-4

Technische Universität München

Fakultät für Architektur  
Institut für Entwerfen und Baukonstruktion  
Univ. Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

Arcisstr.21  
80333 München

Telefon: (089) 289-23151  
Telefax: (089) 289-23153

ls.barthel@lrz.tum.de  
www.lt.arch.tu-muenchen.de

München September 2005



# Vorwort

Mobile Konstruktionen sind, obwohl sie innerhalb des gesamten Bauvolumens nur einen kleinen Teil ausmachen, ein wesentliches Thema der modernen Architektur. Bedeutende Architekten wie Buckminster Fuller, Frei Otto oder Shigeru Ban haben sich damit befasst. Mobile Bauten und Konstruktionen sind ein Experimentierfeld für extrem leichte Konstruktionen und hoch entwickelte Technologien. Sie besitzen einen hohen Symbolwert für eine sich immer schneller verändernden und zunehmend mobilen Gesellschaft. Trotzdem fällt auf, dass es auf dem Markt der mobilen Hallen für Sport-, Ausstellungs- und sonstigen Eventveranstaltungen erstaunlich wenig technisch und architektonisch anspruchsvolle Bauten gibt. Dies war Anlass und Ansporn, die vorhandenen und prinzipiell möglichen mobilen Konstruktionen wissenschaftlich zu untersuchen und wenn möglich weiter zu entwickeln. Herr Gengnagel nennt als Ziel seiner Dissertation, ein Teilgebiet der mobilen Konstruktionen, nämlich die mobilen Membrankonstruktionen, in ihrer Entwicklung und dem jetzigen Stand systematisch zu erfassen und anhand einer Morphologie und zwei Konstruktionsbeispielen Entwicklungspotentiale aufzuzeigen. Er beschränkt sich dabei auf Überdachungen mittlerer bis großer Spannweite. Nicht behandelt wird der Regenschirm oder das Campingzelt, sondern vielmehr der Veranstaltungsraum, die Sporthalle oder der Flugzeughangar. Dies sind Konstruktionen, bei denen das Tragwerk eine dominante Rolle spielt.

Die Arbeit besteht hinsichtlich der Methodik aus drei Teilen. Die geschichtliche Entwicklung und die Bestandsaufnahme der mobilen Membrankonstruktionen bilden den ersten Teil. Hier stehen die Literaturrecherche und die Nachforschungen bei den Herstellern und am Objekt im Vordergrund. Der zweite Teil, die Morphologie, erfordert eine weitgehende Abstraktion der Einzelphänomene. Der dritte Teil besteht aus Berechnungen und Parameterstudien an zwei Beispielen. In der Kombination der drei sich ergänzenden Teile besteht eine besondere Chance für einen Zugewinn an wissenschaftlicher Erkenntnis.



Herr Gengnagel hat Architektur und Bauingenieurwesen studiert. Er hat eine langjährige praktische Berufserfahrung als Tragwerksplaner im Stahl- und Membranbau. Damit ist der Hintergrund für eine breite Bearbeitung des Themas, welche die geschichtlichen, architektonisch-strukturellen und die statisch-konstruktiven Aspekte umfasst, gegeben. Dieser Hintergrund wird für die Arbeit genutzt und gewinnbringend eingesetzt. In allen Teilen steht der Zusammenhang von Form, Konstruktion, statischer Wirkungsweise und Montage im Mittelpunkt. Dies gilt für die ersten wie auch für die letzten Kapiteln, in denen die numerischen Analysen durchgeführt werden.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

München, September 2005



Die vorliegende Promotionsarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent von Professor Dr.-Ing. Rainer Barthel am Lehrstuhl für Tragwerksplanung der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Barthel, der mich in meiner Forschungsarbeit stets unterstützte und bestärkte. Die mit ihm geführten intensiven Gespräche und Diskussionen trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Professor Dr.(Univ.Rom) Thomas Herzog danke ich sehr herzlich für die Durchführung des Koreferats und seine konstruktiven Anregungen.

Dem Team der LSU der University of Dundee, insbesondere Dr.-Ing. Neil Burford, möchte ich für die fünfjährige intensive Zusammenarbeit bei der Entwicklung mobiler und wandelbarer Membrankonstruktionen danken, die eine der Grundlagen dieser Arbeit bildet.

Den Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls danke ich für die fachliche Unterstützung, das freundliche Arbeitsumfeld und die stetige Hilfsbereitschaft.

Christoph Gengnagel

München, September 2005



# Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten textiler Baustoffe und wandelbarer Tragwerke für mobile Konstruktionen untersucht. Auf der Grundlage einer Darstellung der geschichtlichen Entwicklung und der Analyse aktueller Beispiele mobiler Membrankonstruktionen wird eine Morphologie erarbeitet, die einen Überblick über die grundlegenden konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten gibt und mobile Konstruktionen aus wandelbaren Stütztragwerken und Membranen als Untersuchungsgebiet der Arbeit definiert. Anhand von zwei eigenen Projekten werden die Entwicklungsmöglichkeiten von Mechanismen und Tragwerken aus sehr elastischen und sehr steifen Primärtragwerken in Interaktion mit textilen Hüllen dargestellt. Durch die Berücksichtigung der Wechselwirkung von Hülle und Skelett bei Berechnung und Konstruktion werden Anregungen für die weitere Entwicklung von mobilen Konstruktionen dieses Typs gegeben.

*This work analyses the fundamental applications of textile fabric and transformable structures for mobile constructions. On the basis of a historical evolution and an analysis of contemporary mobile membrane constructions a morphology will be developed. The morphology elicits the design principles and defines further aspects of this work, namely: the design and development of mobile constructions which using transformable supporting structures and membranes. Using two case studies the potential of structures containing transformable mechanism combined with primary load bearing structural elements of high elasticity and stiffness in interaction with the textile fabric will be shown. The significance of the interaction between skeleton and surface for the numerical analysis and the design will provide new stimuli for further development of mobile membrane structures.*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Thema	1
1.2 Methode	2
1.3 Begriffe	3
1.3.1 Mobile Konstruktionen	3
1.3.2 Wandelbare Konstruktionen	3
1.3.3 Mobile Überdachungen	3
1.3.4 Mobile Membrankonstruktionen	4
1.4 Unterscheidungsmerkmale von Membrankonstruktionen	5
1.4.1 Hauptgeometrien von Membranflächen	6
1.4.2 Art der Vorspannung	6
1.4.3 Lagerung und Stützung	6
1.4.4 Ausbildung der Membran	7
<b>2 Membrankonstruktionen- Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Tragverhalten von Membranen	9
2.1.1 Mechanisch vorgespannte Membrane	10
2.1.2 Pneumatisch vorgespannte Membrane	12
2.2 Formfindung	12
2.2.1 Experimentelle Formfindung	13
2.2.2 Numerische Formfindung	15
2.2.2.1 Kraft-Dichte-Methode	16
2.2.2.2 Dynamische Relaxation	16
2.2.2.3 Formfindungsansatz des Programmes Sofistik	18
2.3 Zuschnitt	20
2.3.1 Abwicklung einer Fläche	21
2.3.2 Verebnung	22
2.3.3 Kompensation	23
2.4 Membranmaterial	24
2.4.1 Gewebemembran	25
2.4.1.1 Fasern, Garne, Zwirne	26
2.4.1.2 Gewebe	29
2.4.1.3 Beschichtungen	30
2.4.1.4 Werkstoffe	32
2.4.1.5 Materialverhalten	34
2.4.1.6 Werkstoffmodell	36
2.4.2 Geflechte	37
2.4.3 Folien	37
2.5 Detailkonstruktionen	38
2.5.1 Teilflächenverbindung	38
2.5.1.1 Nichtlösbare Membranverbindungen	38
2.5.1.2 Lösbare Membranverbindungen	39
2.5.2 Randausbildung	43

2.5.2.1	Weicher Rand .....	43
2.5.2.2	Steifer Rand .....	43
2.5.3	Räumliche Anordnung der Membran im Primärtragwerk .....	45
<b>3</b>	<b>Geschichtliche Entwicklung</b>	<b>47</b>
3.1	Traditionelle Zelte .....	47
3.2	Schirme .....	49
3.3	Weitgespannte Konstruktionen .....	51
3.3.1	Sängerhallen .....	53
3.3.2	Leihhallen und Luftschiffhangars .....	53
3.3.3	Zirkusbauten .....	55
3.3.3.1	Gestellzelte .....	55
3.3.3.2	Chapiteau .....	57
3.3.4	Flugzeughangars .....	63
3.3.5	Mechanisch vorgespannte Systeme .....	65
3.3.5.1	Fliegende Kirche und Flugzeughangars .....	69
3.3.5.2	Parasolzelt .....	71
3.3.5.3	Missionszelt .....	71
3.3.5.4	Stromeyer Membranhallen .....	73
3.3.5.5	Carlos Moseley Musikpavillon .....	75
3.3.5.6	Buddy Holly - Mobiles Theater .....	77
3.3.5.7	Cirque Phenix .....	80
3.3.5.8	RSSB (Radha Soamy Sastsang Beas) Shelter .....	81
3.3.6	Pneumatisch vorgespannte Systeme .....	85
3.3.6.1	Pentadome .....	87
3.3.6.2	Atomes for Peace .....	87
3.3.6.3	M-51, MUST .....	87
3.3.6.4	TME - LANMaS .....	89
3.4	Zusammenfassung .....	91
<b>4</b>	<b>Aktuelle Beispiele</b>	<b>95</b>
4.1	Mast- und Seilkonstruktionen .....	97
4.1.1	Rasch Versammlungszelt .....	99
4.1.2	De Boer GmbH - „Olympia“ .....	101
4.1.3	Valhalla -Tensile 1 .....	103
4.2	Rahmen- und Bogenkonstruktionen .....	107
4.2.1	Profilsysteme .....	109
4.2.2	Gerüstsysteme .....	113
4.2.3	Fachwerksysteme .....	115
4.2.3.1	BIGTOP Manufacturing .....	115
4.2.3.2	Sprung Instant Structures Ltd. .....	117
4.2.3.3	Cover All Building Systems Inc. .....	119
4.2.4	Schnellbausysteme .....	125
4.2.4.1	ABLY Shelters .....	125
4.2.4.2	Weatherhaven - WideSpan .....	127
4.2.4.3	Spannbau GmbH - Behrend Halle .....	131



4.2.4.4	TVI, DRASH - Pantographen Systeme	132
4.3	Luftgestützte Systeme	137
4.3.1	Festo-Airquarium	137
4.3.2	Les Arts Sauts - Kayassine	138
4.4	Luftgefüllte Systeme	139
4.4.1	Lindstrand Technologies	141
4.4.2	Vertigo Inc.	141
4.4.3	Zusammenfassung	145
<b>5</b>	<b>Morphologie</b>	<b>147</b>
5.1	Methodik und Gliederung	147
5.2	Form	149
5.2.1	Grundformen mobiler Überdachungen	151
5.3	Konstruktion	153
5.3.1	Tragwerk	155
5.3.1.1	Tragsysteme	155
5.3.1.2	Primärtragwerke	157
5.3.1.3	Primärtragwerke für mobile Überdachungen	158
5.3.2	Wandelbare Tragwerke	163
5.3.2.1	Grundtypen Wandelbarer Systeme	164
5.3.2.2	Arten wandelbarer Tragwerke	169
5.3.3	Hülle	175
5.3.3.1	Weiche Hüllen	177
5.3.3.2	Steife Hüllen	179
5.4	Montage	181
5.4.1	Vorfertigungsgrad der Konstruktion	181
5.4.2	Montage Primärtragwerk	183
5.4.3	Montage der Hülle	185
5.4.3.1	Montage von weichen Hüllen	185
5.4.3.2	Montage steifer Hüllen	187
5.4.4	Montagearten mobiler Überdachungen	188
5.4.4.1	Konstruktionen mit nicht-wandelbaren Tragwerken	188
5.4.4.2	Konstruktionen mit wandelbaren Tragwerken	189
5.5	Zusammenfassung	194
<b>6</b>	<b>Konzept für ein mobiles Hallensystem</b>	<b>197</b>
6.1	Kontext	197
6.2	Konzept	200
6.2.1	Form und Geometrie	200
6.2.2	Aufbauprozess und Wandelbarkeit	201
6.2.2.1	Analyse bestehender Systeme	201
6.2.2.2	Ein neues wandelbares Bogentragwerk	205
6.2.2.3	Membranmontage	209
6.2.3	Statisches System	211
6.3	Interaktion Membran und Bogentragwerk	213
6.3.1	Untersuchte Tragsysteme	213

6.3.2	Numerische Modellierung	213
6.3.3	Materialkennwerte	215
6.3.4	Lastannahmen	217
6.3.5	Parameter der Untersuchung	219
6.3.6	Ergebnisse System A - Kreisbogen	221
6.3.7	System B - Kreisbogen	223
6.3.8	System C - Korbbogen	225
6.3.9	Modifizierung des Systems A - Kreisbogen mit Kehlseil	225
6.3.10	Tragverhalten von Gesamtsystemen	229
6.3.11	Zusammenfassung	231
6.4	Konstruktive Überlegungen	233
6.5	Schlussfolgerung	234
<b>7</b>	<b>Entwicklung und Analyse einer mobilen Tribünenüberdachung</b>	<b>237</b>
7.1	Kontext	237
7.2	Konzept	239
7.2.1	Form und Geometrie	239
7.2.2	Aufbauprozess und Wandelbarkeit	239
7.2.2.1	Analyse bestehender Systeme	241
7.2.2.2	Ein neuer wandelbarer Kragträger	243
7.2.3	Statisches System	244
7.2.4	Konzeptmodell	244
7.2.5	Prototyp	245
7.2.5.1	Geometrie und Materialwechsel	245
7.2.5.2	Aufbauprozess	247
7.2.5.3	Konstruktion	247
7.3	Untersuchung des Tragverhaltens	249
7.3.1	Der wandelbare Kragträger	249
7.3.1.1	Numerische Modellierung	251
7.3.1.2	Materialkennwerte und Querschnitte	251
7.3.1.3	Lastannahmen	251
7.3.1.4	Effekt der Vorbiegung der Untergurte	253
7.3.1.5	Ausfall der Zugdiagonalen	258
7.3.1.6	Geometrische Optimierung	263
7.3.1.7	Tragverhalten unter Windlast	265
7.3.1.8	Zusammenfassung	269
7.3.2	Interaktion zwischen Membran und Stützkonstruktion	271
7.3.2.1	Untersuchte Tragsysteme	271
7.3.2.2	Numerische Modellierung	273
7.3.2.3	Materialkennwerte	273
7.3.2.4	Lastannahmen	274
7.3.2.5	Analyse alternativer Membranformen für den Prototypen	275
7.3.2.6	Geometrische Optimierung von Membran und Kragarmen	283
7.3.3	Zusammenfassung	287
7.4	Schlussfolgerung	289
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>291</b>

8.1 Schlussfolgerung.....	291
8.2 Ausblick .....	293
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>295</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>303</b>
<b>Abbildungsnachweis</b>	<b>313</b>
<b>Anhang A</b>	<b>317</b>
<b>Anhang B</b>	<b>353</b>
<b>Anhang C</b>	<b>379</b>

---

# 1 Einführung

## 1.1 Thema

In der vorliegenden Arbeit werden die grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten von textilen Membranen und wandelbarer Tragwerke für mobile Konstruktionen untersucht. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt dabei auf Konstruktionen, in denen wandelbare Stützkonstruktionen mit mechanisch vorgespannten Membranen kombiniert werden. Diese Systeme zeichnen sich durch eine einfache und schnelle Montage, eine weitgehende Modularität, sehr flexible Einsatzmöglichkeiten und eine Eignung für eine serielle Herstellung aus. Durch Parameterstudien an zwei eigenen Projekten werden die Möglichkeiten untersucht, die sich durch die Berücksichtigung der Interaktion von Membran und Stütztragwerk bei Berechnung und Konstruktion ergeben. Daraus werden für die weitere Entwicklung mobiler Membrankonstruktionen neue Anregungen abgeleitet.

Die immer stärkere Forderung nach Mobilität in der Gesellschaft, die Entwicklung neuer hochfester Baustoffe und die neuen Möglichkeiten der Ingenieurwissenschaften haben im 20. und beginnenden 21. Jahrhundert eine Vielzahl mobiler Bauten unterschiedlichster Zweckbestimmungen, Ansprüche und Materialitäten hervorgebracht. Insbesondere für die Nutzung als Veranstaltungs- und Ausstellungsraum, Sportstätte, aber auch als Lager, temporäre Werkstatt oder einfacher Wetterschutz entstanden eine große Anzahl mobiler Bauten mittlerer und großer Spannweite.

Diese mobilen Überdachungen nutzen oft die einfachen Konstruktionsweisen konventioneller Rahmen- oder Bogenhallen. Der Transport der zum Teil sehr großen Konstruktionselemente erfordert gut ausgebaute Verkehrswege und große Transportmittel. Für den Aufbau der Überdachungen sind meist Gerüste, Hebebühnen und der Einsatz schwerer mechanischer Hilfsmittel, wie Mobilkräne, Teleskopplader etc. notwendig. Damit ist der Einsatz dieser Systeme stark eingeschränkt. Für schwer erreichbare Standorte und Gebiete, in denen diese Hilfsmittel nicht verfügbar sind, können derartige Systeme nicht eingesetzt werden. Ein höheres Maß an Flexibilität bieten mobile Strukturen, die als wandelbare Konstruktionen geplant und ausgeführt werden. Sie haben ein geringes Transportvolumen und erlauben eine Montage mit Hilfe von selbstaufrichtenden Mechanismen ohne schwere Werkzeuge. Bei beiden Konstruktionsweisen finden textile Membranen eine breite Anwendung. Ihr geringes Eigengewicht und ihre reversible Verformbarkeit zeichnen sie gegenüber anderen Baustof-

fen als Konstruktionselement aus. Die Aufgaben, die Membranen innerhalb der Konstruktion mobiler Bauten übernehmen können, sind sehr verschieden. Sie können ausschließlich als Hülle und Teil der Sekundärstruktur dienen, oder aber als ein Teil des Primärtragwerks für die Gesamtstabilität der Konstruktion mit verantwortlich sein.

Membranen können durch Falten, Raffen oder Rollen ihre Form und das Tragverhalten ändern. In der Regel handelt es sich um zugbeanspruchte Konstruktionen aus biegeweichen Materialien wie faserverstärkte Membranen, Folien und Seile. Der Vorteil der Anwendung weicher Hüllen für mobile Bauten liegt in ihrer einfachen Wandelbarkeit, in der Möglichkeit, ihr Packmaß auf ein sehr geringes Volumen zu reduzieren, und in ihrem relativ geringen Gewicht.

### 1.2 Methode

Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die Grundlagen des Entwerfens und Konstruierens mit Membranen im Hinblick auf Anwendungen für mobile Konstruktionen erläutert. Auf der Basis einer kurzen Darstellung der geschichtlichen Entwicklung und der Analyse aktueller Beispiele mobiler Membrankonstruktionen wird eine morphologische Studie erarbeitet. Diese gibt einen Überblick über die grundlegenden konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten und definiert das Untersuchungsgebiet des zweiten Teils der Arbeit, die Anwendungsmöglichkeiten wandelbarer Stützkonstruktionen im Zusammenhang mit mechanisch vorgespannten Membranen. In der Folge werden anhand zweier eigener Entwicklungen die Möglichkeiten diskutiert, die der Einsatz wandelbarer Stützkonstruktionen für mobile Membranbauten bietet und zwei neuartige Mechanismen vorgestellt. Durch Parameterstudien mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode wird zudem untersucht, inwieweit die Membran als ein aktives Element des Primärtragwerks für die Optimierung von wandelbaren Stützkonstruktionen eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse der statischen Analyse und die grundlegenden Überlegungen zur konstruktiven Gestaltung mobiler wandelbarer Membrankonstruktionen werden zu allgemeinen Ansätzen für die weitere mögliche Entwicklungen auf diesem Gebiet zusammengefasst.

## 1.3 Begriffe

### 1.3.1 Mobile Konstruktionen

Nach einer Definition von Frei Otto in [30] sind mobile Konstruktionen dadurch gekennzeichnet, dass sie ihren Standort oder ihre Lage wechseln können, d.h. bewegt werden können, ohne selbst notwendigerweise ihre Form zu verändern. Die Veränderung des Standortes erfolgt einfach durch Aufbau, Abbau und Transport. Die Veränderung der Lage erfolgt beispielsweise durch Drehen oder Kippen. In dieser Arbeit werden unter dem Begriff der mobilen Konstruktionen nur Konstruktionen verstanden, die für einen mehrfachen Standortwechsel geplant und entwickelt werden. In der Regel ist dieser Standortwechsel, bedingt durch die Auf- bzw. Abbauprozesse, in den meisten Fällen auch mit einer Änderung der Form verbunden - das Volumen wird für die Nutzung oder den Transport maximiert bzw. minimiert.

### 1.3.2 Wandelbare Konstruktionen

Die Wandelbarkeit einer Konstruktion bedeutet im Gegensatz zur Mobilität immer eine Veränderung der Form bzw. der Funktion einer Struktur. In der Regel sind diese Änderungen der Konstruktion oder ihrer Elemente reversibel. Sie können einmalig, z.B. im Rahmen eines Montagevorganges, mehrfach oder kontinuierlich erfolgen. Bei Gebäuden kann zwischen einer inneren und äußeren Wandelbarkeit unterschieden werden. Die äußere Wandelbarkeit betrifft die Veränderung der Außenhülle durch Ein- oder Ausfahren, Verkleinern und Vergrößern, Heben und Senken von Dächern oder Wänden. Die innere Wandelbarkeit umfasst das Verfahren, Versetzen und Heben von Wänden oder Ebenen im Inneren von Gebäuden. [30] Wandelbare Tragkonstruktionen können sowohl kinematische, als auch statische Systeme sein - man spricht in diesem Zusammenhang auch von beweglichen Tragwerken (siehe Kapitel 5 S.163).

### 1.3.3 Mobile Überdachungen

Mobile Überdachungen sind mobile Bauten, die als ortsunabhängiger Wetterschutz dienen. Ihre Konstruktion besteht im Wesentlichen aus einem Tragwerk und einer Hülle, die offene, halboffene oder geschlossene Räume für unterschiedlichste Nutzungen erzeugt. Ihre Spannweite variiert zwischen weniger als 2 und mehr als 60 Metern. Form und Konstruktionsweise können in vielen Punkten permanenten Gebäuden ähneln, sind aber im Allgemeinen durch die Optimierung der Konstruktion auf wiederholten Auf- und Abbau, ein geringes Transportvolumen und den fehlenden Ortsbezug geprägt.

Grundlegende Eigenschaft aller mobilen Überdachungen ist ihr temporärer Charakter in Bezug auf den Standort. Dabei variieren die Standzeiten enorm, von wenigen Stunden bis hin zu mehreren Jahren. Bei den Aufstellorten kann es sich um schwer erreichbare Bauplätze mit geringen Einschränkungen an die räumliche Ausdehnung in Gebieten ohne jegliche Infrastruktur handeln, oder um räumlich stark begrenzte und in Bezug auf die Gründung limitierte Standplätze in Großstädten bzw. Industriezonen. Die Anforderungen an die Gestalt schwanken zwischen dem nüchternen und funktionsbestimmten Äußeren eines Industriegebäudes und dem identitätsstiftenden Erscheinungsbild einer Fest- oder Ausstellungshalle.

Aus den unterschiedlichen Anforderungen an mobile Überdachungen ergibt sich ein sehr unterschiedlicher Grad der Mobilität der Konstruktionen in Bezug auf Transportgrößen und Montageprozesse. Während beim Großteil der Lösungen der Aufbau über einen Zeitraum von mehreren Tagen bzw. Wochen unter Verwendung von Mobilkränen, Hebebühnen und anderen Hilfsmittel erfolgt, existieren ebenso Systeme, deren Errichtung über verschiedene Wandlungsprozesse der Konstruktion nur wenige Stunden und nur einfache mechanische Hilfsmittel erfordert.

### 1.3.4 Mobile Membrankonstruktionen

Als Mobile Membrankonstruktionen werden im Folgenden Mobile Überdachungen bezeichnet, die Membranen als flächige, vorwiegend zugbeanspruchte Konstruktionselemente einsetzen. Dabei können Membranen entweder nur als Hülle und damit sekundäres Tragelement verwendet werden, oder auch als ein Teil des Primärtragwerks<sup>1</sup> für die Gesamtstabilität der Konstruktion mit verantwortlich sein. Die Hauptgeometrie<sup>2</sup> der Membranflächen kann eben, einfach oder doppelt gekrümmt sein.

Neben ihrem geringen Konstruktionsgewicht eignen sich Membranen insbesondere für mobile Konstruktionen, da sie sich durch Falten, Raffen oder Rollen auf einfache Weise von einem weit gespannten flächigen Konstruktionselement zu einem transportfähigen Volumen geringer Abmessungen verändern können.

---

1. Das Tragwerk einer Konstruktion kann in Primär- und Sekundärtragwerk unterschieden werden. Dabei umfasst das Primärtragwerk alle Tragelemente, die notwendig sind, um die Stabilität einer Konstruktion unter Lasteinwirkung zu gewährleisten. Alle weiteren Tragelemente der Konstruktion, die ebenfalls durch Lasten beansprucht werden, aber keine entscheidende Bedeutung für die Gesamtstabilität der Konstruktion haben, werden als Sekundärtragwerk bezeichnet.

2. Die Geometrie von Tragelementen kann nach [13] entsprechend der Bedeutung für die Tragwirkung in Haupt- und Querschnittsgeometrie unterschieden werden. Die Hauptgeometrie bestimmt die Form der Elemente.



Mobile Membrankonstruktionen werden umgangssprachlich oft auch als Zelte bezeichnet. Der Begriff des Zeltes kommt aus der traditionellen Architektur als eine Bezeichnung für ein Schutzdach oder eine Behausung einfacher Konstruktion, deren Hülle aus weichen Baustoffen wie Textilien, Tierhäuten, Pflanzenmatten oder ähnlichem besteht. Frei Otto definierte generell das Planen und Bauen mit Membranen als „Zeltbau“, der das Konstruieren von Campingzelten, Großzelten, Lufthalen und Schattendächern etc. umfasst. [31] Die entstehenden Konstruktionen können mobil, wandelbar, permanent oder temporär sein. Eine ähnliche Beschreibung des Begriffs verwendet B.Burkhardt in seiner Darstellung der Geschichte des Zeltbaus.[11]

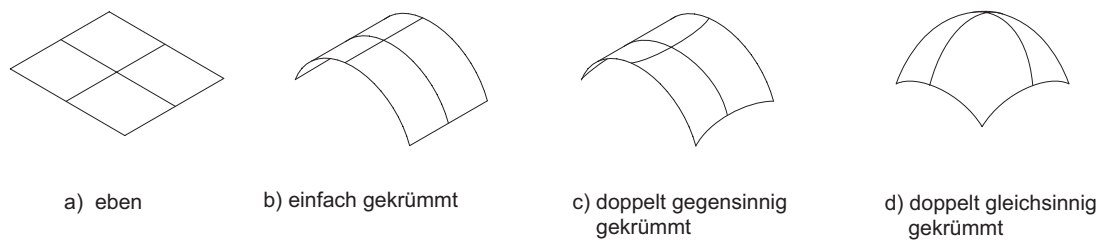
#### 1.4 Unterscheidungsmerkmale von Membrankonstruktionen

Eine Besonderheit des Membranbaus ist die Vielzahl der möglichen Formen und konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten. Die Bestimmung grundlegender Merkmale soll einen ersten Überblick über die Möglichkeiten dieser Bauweise geben und eine Klassifikation der verschiedenen Systeme erlauben. Im Hinblick auf die Darstellung insbesondere mobiler Membranbauten werden folgende Unterscheidungsmerkmale gewählt:

- Art der Krümmung (Hauptgeometrie)
- Art der Vorspannung
- Lagerung und Stützung
- Ausbildung der Membran - einlagige oder mehrlagige Konstruktionen
- Räumliche Anordnung der Membran im Primärtragwerk

### 1.4.1 Hauptgeometrien von Membranflächen

Die Formen von Membranflächen können nach ihren Hauptgeometrien in ebene, einfach gekrümmte oder doppelt gekrümmte Flächen unterschieden werden. Die Formen der doppelt gekrümmten Flächen werden dabei nicht planerisch vorgegeben, sondern ergeben sich aus dem Gleichgewicht der Vorspannkraft in der Membranfläche und deren Rändern. Für jede doppelt gekrümmte vorgespannte Membranfläche ist eine Formfindung durch experimentelle oder numerische Methoden notwendig (siehe Kapitel 2 S.16).



**Abb. 1-1.** Formen von weichen Hüllen

### 1.4.2 Art der Vorspannung

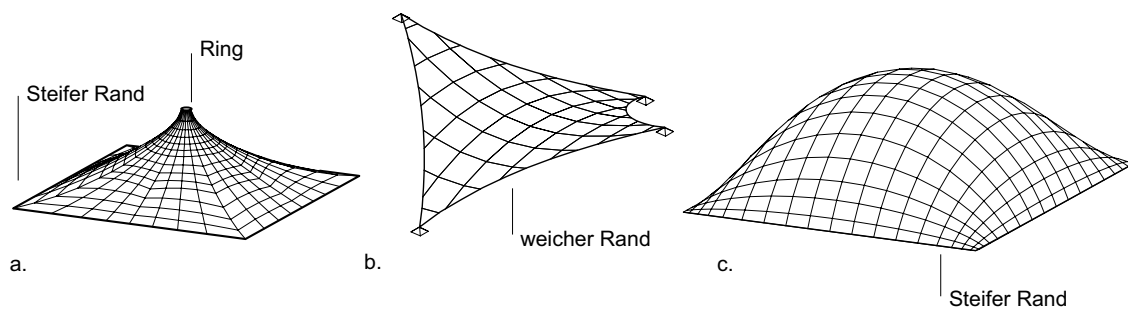
Generell lassen sich zwei Arten der Vorspannung unterscheiden: mechanische und pneumatische Vorspannung. Die Art der Vorspannung bestimmt die Art der Krümmung der Membranfläche. Alle mechanisch vorgespannten Flächen weisen eine antiklastische, die meisten pneumatisch vorgespannten Flächen weisen im Wesentlichen eine synklastische Krümmung auf (siehe Kapitel 2 S.10).

### 1.4.3 Lagerung und Stützung

Alle Membranflächen benötigen eine kontinuierliche Lagerung am Rand, welche die Zugkräfte aus der Fläche aufnimmt und weiterleitet. Es können zwei prinzipielle Arten der Lagerung unterschieden werden: weich und steif. Weiche Lager verformen sich entsprechend der in der Fläche auftretenden Zugkräfte, steife Lager sind z.B. biegesteife Elemente, die gerade oder gekrümmt ausgebildet werden können.

Im Membranbau kann zwischen punkt-, linien-, oder flächenförmiger Stützung unterschieden werden (Abb. 1-2). Allerdings ist eine wirkliche Punktstützung einer Membranfläche theoretisch nicht möglich, da die Kraft pro Längeneinheit in der Breite (Kraftdichte) gegen unendlich streben und so unendlich große Spannungen erzeugen würde. Daher besteht eine punktförmige Stützung immer aus ringförmigen Linienauflagern mit geringer Länge oder flächenförmigen Auflagern geringer Ausdeh-

nung. Linienförmige Stützungen können als weiche (Seile etc.) oder steife Lagerung (Bögen etc.) ausgeführt werden. Die einfachste und am häufigsten angewendete flächenförmige Stützung ist die pneumatische Stabilisierung von Membranflächen. Für die nur selten verwendete flächenförmige Stützung von mechanisch vorgespannten Membranen werden zumeist pilzartige Schirmmützen eingesetzt. Dies können entweder halbkugelförmige oder ellipsoide Stützkörper sein oder bei kleineren Spannweiten auch ebene Teller.



**Abb. 1-2.** Beispiele für punktförmige (a), linienförmige und flächige (c) Stützungen von Membranen

#### 1.4.4 Ausbildung der Membran

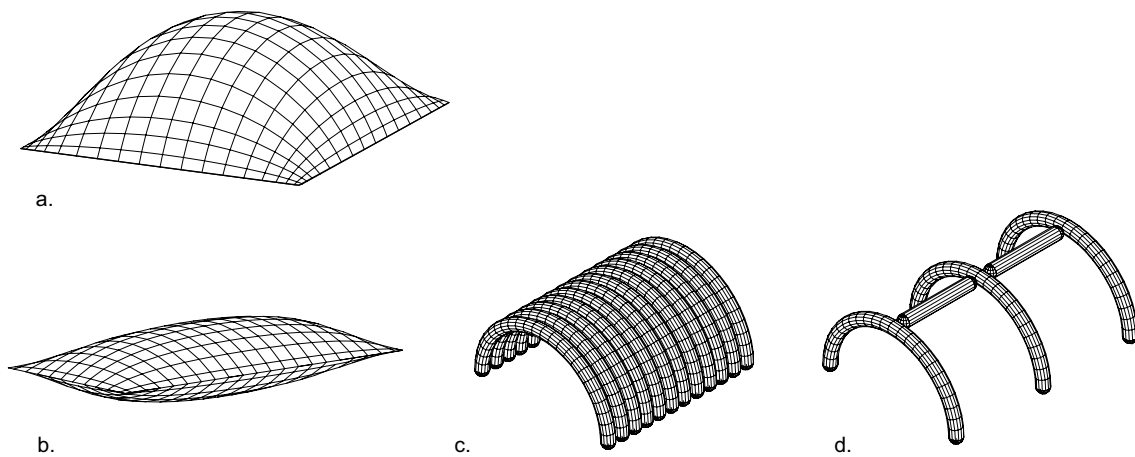
Membrankonstruktionen können entsprechend der Anzahl der Membranlagen zwischen Nutz- und Außenraum in Einfach- und Mehrfachmembrantragwerke unterschieden werden [27]. Die meisten der mechanisch vorgespannten Membrantragwerke sind einlagige Konstruktionen. Mehrlagige Membrankonstruktionen mit mechanisch vorgespannten Membranen erfordern aufgrund der großen Verformungen der Membranflächen aufwendige konstruktive Lösungen. Die wenigen bisher realisierten Beispiele sind fast immer permanente Bauwerke. Mobile, mechanisch vorgespannte Membrankonstruktionen werden fast ausschließlich als einlagige Konstruktionen ausgeführt.

Membrankonstruktionen, die durch Luftdruck pneumatisch stabilisiert werden, können entsprechend ihrer Ausbildung als Einfach- oder Mehrfachmembran in zwei Gruppen eingeteilt werden (Abb. 1-3):

- luftgestützte Systeme
- luftgefüllte Systeme

Luftgestützte System sind Einfachmembrankonstruktionen, bei denen ein unter Über- oder Unterdruck stehender begehbare Raum durch eine Membran gebildet und gegenüber dem Außenraum kontinuierlich abgeschlossen wird.

Luftgefüllte Systeme sind Doppel- bzw. Mehrfachmembrankonstruktionen, bei denen der durch die Konstruktion umschlossene Nutzraum nicht unter Über- oder Unterdruck steht. Die Konstruktion besteht aus geschlossenen Elementen, die in der Regel durch Überdruck stabilisiert werden.



**Abb. 1-3.** luftgestütztes System (a), luftgefüllte Systeme (b), (c) und (d)

## 2 Membrankonstruktionen-Grundlagen

Das Konstruieren mit Membranen unterscheidet sich stark vom Konstruieren mit Stahl, Aluminium oder Holz. Die grundlegenden Unterschiede sind die Einbeziehung großer Verformungen in den Entwurf des Tragwerks, die Anforderungen an die statische Berechnung und die Konstruktions- und Detailentwicklung. Kenntnisse über das Tragverhalten, die Möglichkeiten der Formfindung und die Materialeigenschaften der Werkstoffe sind wichtige Voraussetzungen für ein membrangerechtes Konstruieren.

### 2.1 Tragverhalten von Membranen

Membranen besitzen keinerlei Druck- und Biegesteifigkeit, sondern tragen Lasten fast ausschließlich über Zugkräfte ab. Druckkräften weichen Membranen durch Beulen bzw. Faltenbildung aus. In geringem Maße besitzen Membrane auch eine Schubsteifigkeit, die aber in den meisten Fällen bei der Untersuchung des Tragverhaltens einer Membrankonstruktionen vernachlässigbar ist. (siehe 2.4.1.6 Seite 36) Die ausschließlich in der Fläche wirkenden Kräfte erzeugen eine gleichmäßige Beanspruchung über die Dicke der Membran und damit eine optimale Ausnutzung des Materials.

Membranen können als wandelbare Tragelemente ihre Geometrie verändern, ohne dass elastische Dehnungen auftreten. Nicht-geometrieaffine Lasten verursachen eine Änderung der Form der Membranfläche. Zusätzlich werden durch dynamische Lasten, wie z.B. Wind, Schwingungen und schlagartiges Durchschlagen verursacht, was häufig zu einer starken Geräuschbildung führt. Die Gebrauchsfähigkeit von nichtstabilisierten Membrankonstruktionen wird dadurch stark eingeschränkt. Zur Vermeidung großer Verformungen ist eine Stabilisierung der Membranen notwendig. Neben der Erhöhung der geometrischen Steifigkeit durch höhere Rückstellkräfte wird durch die in der Fläche wirkenden Zugkräfte auch die Eigenfrequenz des Systems verändert. Ebene vorgespannte Systeme erzeugen unter nicht in der Fläche wirkenden Beanspruchungen sehr hohe innere Kräfte und Auflagerlasten, deshalb wird eine ausreichende Krümmung der Membranfläche notwendig.

Stabile Formen entstehen durch doppelt gekrümmte vorgespannte Flächen. Dabei wird die Ausbildung der Form durch die Vorspannung geprägt, eine ungleiche Änderung der Vorspannung bewirkt

auch eine Änderung der Form. Das heißt, dass die Formen doppelt gekrümmter Membranflächen sich entsprechend physikalischer Gesetzmäßigkeiten ergeben. Man unterscheidet zwei grundlegenden Arten der Vorspannung: mechanische oder pneumatische Vorspannung.

### 2.1.1 Mechanisch vorgespannte Membrane

Die mechanische Vorspannung wird über die Ränder der Membranfläche eingebracht. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand der inneren Zugspannungen ein. Liegen die Ränder der Fläche nicht in einer Ebene entsteht eine Fläche mit gegensinniger Krümmung, d.h. an jedem Punkt der Fläche liegen die Hauptkrümmungsradien auf verschiedenen Seiten der Tangentialebene des Punktes. Diese Flächen haben eine negative Gaußsche Krümmung und werden auch als antiklastisch gekrümmte Flächen bezeichnet. Zwei Grundformen antiklastischer Flächen sind die Sattel- und die Radialfläche.

#### *Gaußsche Krümmung*

Für jeden Punkt einer Fläche lassen sich zwei Hauptkrümmungsradien  $r_1$  und  $r_2$  definieren. Die Krümmungsebene, in denen die Hauptkrümmungsradien liegen, stehen stets senkrecht aufeinander. Die Kehrwerte der Hauptkrümmungsradien sind die Hauptkrümmungen der Fläche.

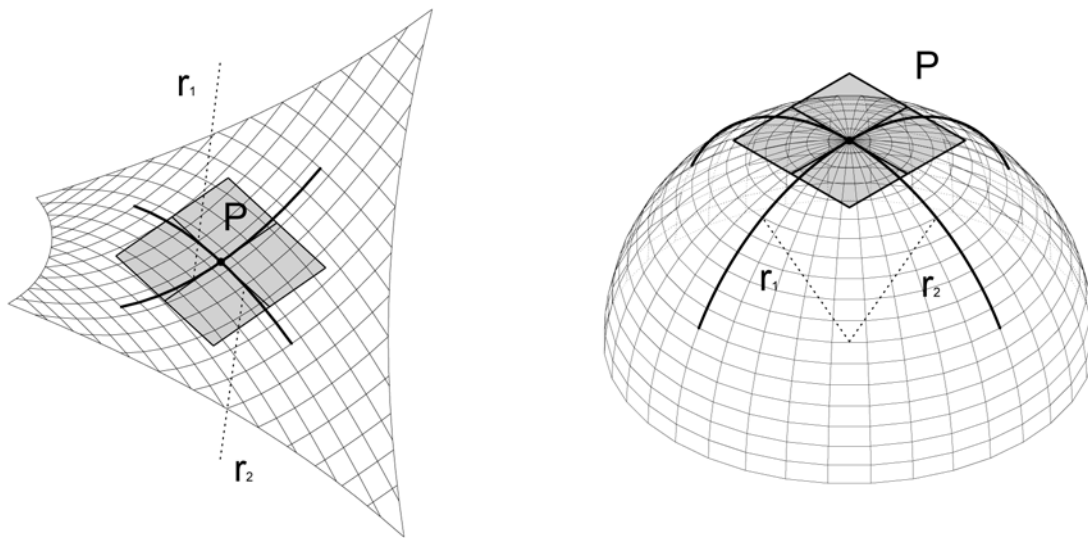
$$k_1 = \frac{1}{r_1} \quad \text{und} \quad k_2 = \frac{1}{r_2}$$

Das Produkt der beiden Hauptkrümmungen nennt man Gaußsche Krümmung oder Gaußsches Krümmungsmaß.

$$k = k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{r_1 \cdot r_2}$$

Doppelt gekrümmte Flächen lassen sich entsprechend negativer bzw. positiver Gaußscher Krümmung in antiklastische bzw. synklastisch Flächen einteilen.

Es können unterschiedliche Vorspannungen in die verschiedenen Richtungen der Hauptkrümmungen gewählt werden, um die anisotropen Materialeigenschaften textiler Membranen (siehe 2.4 Seite 24) oder unterschiedliche Belastungen zu berücksichtigen. Die Wahl anisotroper Vorspannungen kann aber auch angewandt werden, um die Form einer Fläche aus gestalterischen Gründen zu verändern.

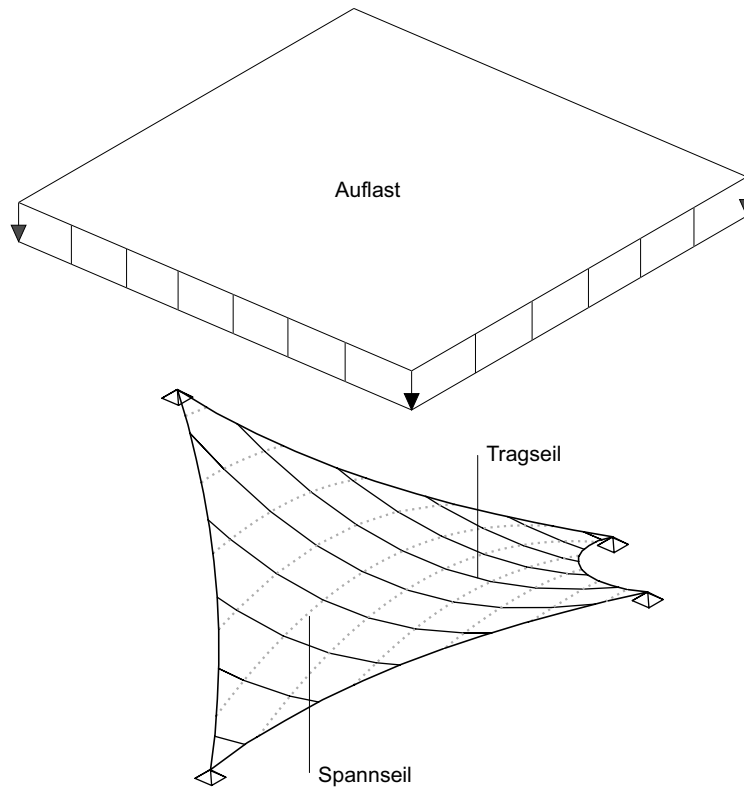


**Abb. 2-1.** antiklastische und synklastische Fläche

Generell gilt, dass für eine gegebene Belastung eine große Membrankrümmung eine geringere Spannung erzeugt, als eine kleine Membrankrümmung. Dies bedeutet, dass annähernd ebene Bereiche der Membran unter Lasten sehr hohe Beanspruchungen erfahren. Zudem besteht bei ebenen Bereichen die Gefahr einer Wasser- oder Schneesackbildung.

Die Suche nach einer Geometrie, bei der sich die Membran im gewählten Vorspannungszustand befindet, wird als Formfindung bezeichnet. Der „formgefundene“ Zustand wird als Eigenspannungszustand bezeichnet. Die Vorkrümmungen bewirken dann, dass äußere Lasten infolge der Flächenkrümmung in zwei Richtungen abgetragen werden können.

Zur Veranschaulichung der Lastabtragung in einer doppelt gekrümmten vorgespannten Membran wird eine sattelförmige Membranfläche als Seilnetz betrachtet, das durch eine gleichmäßige Auflast belastet wird. (Abb. 2-2) Die Seile, die unter dieser Last durch zusätzliche Zugkräfte beansprucht werden, können als Tragseile bezeichnet werden. Eine Änderung der Belastungsverteilung oder Belastungsrichtung verursacht eine Änderung der Form der Seilschar. Durch das Hinzufügen einer orthogonal dazu angeordneten vorgespannten Seilschar kann dies verhindert werden. Die Zugkraft in diesen Seilen wird durch die Auflast reduziert. Sie stabilisieren die Fläche und werden Spannseile genannt. Durch eine Umkehrung der Belastungsrichtung (Windsog) werden Trag- und Spannseilwirkung der sich kreuzenden Seilscharen vertauscht. Die Größenordnung der Vorspannung richtet sich nach den verschiedenen auftretenden Belastungsfällen, zur Vermeidung von spannungslosen Seilen.



**Abb. 2-2.** Sattelförmige Membran dargestellt als Seilnetzmodell

### 2.1.2 Pneumatisch vorgespannte Membrane

Die pneumatische Vorspannung wird als Flächenlast aufgebracht. Die Druckdifferenz eines eingeschlossenen Mediums, z.B. eines Gases oder einer Flüssigkeit gegenüber dem umgebenden Medium, spannt die biegeweiche Membran vor. Im Gleichgewichtszustand heben sich die Zugkräfte in der Membran mit dem Über- oder Unterdruck des Mediums auf. Bei Überdruck weist die Membranfläche dabei fast ausschließlich eine gleichsinnige Krümmung auf. Die Gaußsche Krümmung ist positiv und die Fläche wird als synklastisch bezeichnet. (siehe Abb. 2-1 Seite 11)

### 2.2 Formfindung

Die Form aller vorgespannter Membranflächen ergibt sich aus einem Kräftegleichgewicht. Bis auf wenige Ausnahmen kann diese Form nicht nach geometrisch einfachen Regeln bestimmt werden. Solche einfach geometrisch ermittelte Formen führen zu Falten, inhomogenen Spannungszuständen und Überbeanspruchung an lokalen Bereichen. Ziel der Formfindung ist es, für Membranflächen bestimmter Größe unter Berücksichtigung ihrer Lagerung, Stützungsart (siehe Kapitel 1 S.6) und Vorspannung die zugehörige Gleichgewichtsform zu ermitteln.



### *Minimalflächen*

Minimalflächen sind mathematisch eindeutig definiert. Sie sind Flächen, die innerhalb eines vorgegebenen Randes den kleinsten Flächeninhalt aufweisen. Die mathematische Lösung dieses Problems ist seit Jahrhunderten Thema der Wissenschaft.[7] Im mechanischen Sinne sind Minimalflächen durch konstante Spannungen in der Fläche definiert, d.h. die Spannungen sind in jedem Punkt und in jeder Richtung der Fläche gleich. Die Form einer Minimalfläche hängt somit nicht vom Betrag der Vorspannung ab, weist aber einer doppelte Krümmung auf und ist deshalb als Grundlage für den Entwurf eines Membrantragwerks geeignet. Experimentell lassen sich Minimalflächen durch Seifenhäute sehr präzise simulieren. Die Formfindung über Seifenhautmodelle wurde am Institut für leichte Flächentragwerke unter Leitung von Frei Otto vielfach eingesetzt und perfektioniert.

Für den Membranbau sind Minimalflächen jedoch nur beschränkt als Form einsetzbar. Die anisotropen Materialeigenschaften der textilen Membranmaterialien und die durch Nähte verursachten unterschiedliche Steifigkeiten in der Fläche stehen im Gegensatz zu der Modellannahme eines isotropen Spannungszustands der gefundenen Form. Zusätzlich besitzen Minimalflächen die Tendenz, nahezu ebene Bereiche auszubilden, die in vielen Belastungssituationen keine ausreichende Formstabilität der Membran gewährleisten.

#### 2.2.1 Experimentelle Formfindung

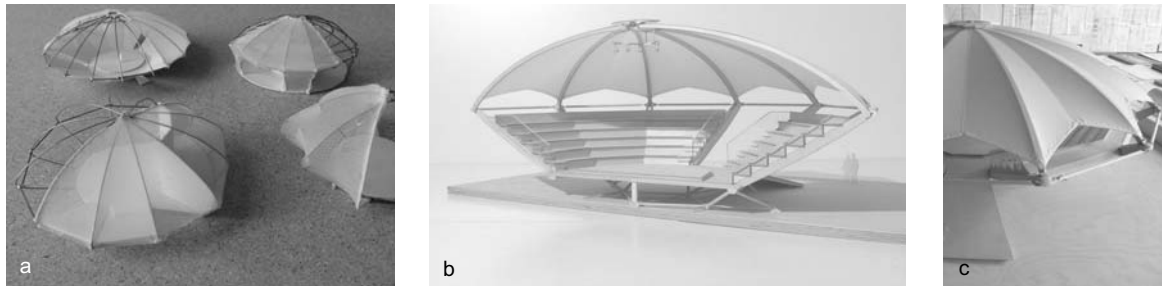
Die experimentelle Formfindung war über einen langen Zeitraum die einzige Methode, um die Form doppelt gekrümmter Membranflächen zu ermitteln und Aussagen über ihr Tragverhalten zu machen. Die verwendeten Modelle lassen sich entsprechend ihrer Stellung im Entwicklungsprozess eines Membrantragwerks in drei Gruppen unterscheiden:

- Entwurfsmodelle
- Messmodelle
- Sondermodelle

#### *Entwurfsmodelle*

Entwurfsmodelle als einfache Stoff-, Draht- oder Seifenhautmodelle stellen nach wie vor ein unverzichtbares Werkzeug bei der Entwicklung von Membrantragwerken dar. Sie dienen der schnellen Darstellung erster Ideen, der Überprüfung der räumlichen Wirkung, der Form und der qualitativen Analyse des Tragverhaltens. Dementsprechend kann es sich sowohl um sehr einfache, grobe Modelle handeln, die nur als Ausgangsbasis für eine Weiterentwicklung von Form und Konstruktion dienen,

als auch um Modelle, die eine gute qualitative Einschätzung der Raum- und Tragwirkung einer Membranform erlauben.



**Abb. 2-3.** Entwurfsmodelle: (a) Arbeitsmodelle zur Formfindung, (b) und (c) Präsentationsmodell

### *Messmodelle*

Messmodelle ermöglichen die geometrische Definition der Form und stellen vor der Entwicklung der numerischen Formfindungsmethoden das Kernstück des Formfindungsprozesses dar. Extrem präzise hergestellt, bilden sie die Grundlage für die Ausführungsplanung des Membrantragwerks. Entsprechend den Gesetzen der Modellstatik kann anhand dieser Modelle die endgültige Geometrie bestimmt werden, sie dienen als Grundlage für statische Berechnung, Bemessung und Zuschnitt.

### *Sondermodelle*

Sondermodelle werden verwendet, um bestimmte Bereiche des Membrantragwerks oder einzelne Aspekte des Tragverhaltens zu untersuchen. Windkanalmodelle, Bewegungsmodelle zur Analyse wandelbarer Tragwerke und die detaillierte Darstellung einzelner Rand- und Lagerungspunkte der Membran sind Beispiele für Sondermodelle.

Die rasche Entwicklung der numerischen Formfindung hat dazu geführt, dass sich die experimentelle Formfindung heutzutage auf die Entwurfsphase bzw. auf die Erstellung von Sondermodellen beschränkt. Für die Ausführungsplanung sind die erforderlichen experimentellen Methoden zu aufwendig und zeitintensiv. Im Entwurfsprozess stellen sie aber nach wie vor eine unverzichtbare Ergänzung der numerischen Methode dar, da sie eine schnelle Erzeugung von Formen und die Prüfung ihrer räumlichen Wirkung ermöglichen.

## 2.2.2 Numerische Formfindung

Die numerische Formfindung hat durch die Entwicklung der Rechentechnik stark an Bedeutung gewonnen. Während sie im Entwurf in der Regel zusammen mit experimentellen Methoden verwendet wird, hat sie diese in der Ausführungsplanung vollkommen ersetzt. Sie ist Voraussetzung für die computergestützte Ermittlung des Zuschnitts, die zum alltäglichen Werkzeug des modernen Membranbaus gehört. Numerische Methoden erlauben eine sehr präzise Beeinflussung von Randbedingungen, die experimentell nicht oder nur mit großem Aufwand realisiert werden können. Die mit numerischen Verfahren mögliche Genauigkeit bei der Ermittlung von Geometrie- und Spannungswerten ist im Experiment nicht erreichbar und erlaubt aufgrund des relativ geringen zeitlichen Aufwands neue Optimierungsmöglichkeiten für Membrantragwerke. Die numerische Bestimmung von Gleichgewichtsformen für doppelt gekrümmte Flächen mit einem vorgegebenen Spannungszustand stellt im Gegensatz zu den üblichen Problemen der Baustatik ein inverses Problem dar, das mathematisch aufwendige Lösungswege verursacht. Die im Laufe der Jahre entwickelten unterschiedlichen und in diversen Softwarepaketen implementierten Methoden unterscheiden sich deshalb hauptsächlich in der Art des mathematischen Lösungswegs. Grundsätzlich handelt es sich bei allen Methoden um numerische Näherungsverfahren, bei denen die gesuchte Strukturform in ein idealisiertes Modell aus kleinen Elementen (Stäbe, Dreieck- oder Vierecksflächen, Tetraeder etc.) diskretisiert wird. Die einzelnen Elemente und ihr Verhalten sind durch die Annahme genäherter Funktionsverläufe mathematisch eindeutig formulierbar. Durch ihre Analyse und ihre Verknüpfung kann das globale Verhalten der Gesamtstruktur ermittelt werden. Die am häufigsten angewendeten Verfahren sind die Kraft-Dichte-Methode, die Methode der dynamischen Relaxation, Methoden mit unvollständiger Linearisierung im Sinne einer Newton Raphson Iteration und die Methode der verbesserten Referenzgeometrie.[7]

Verfahren, die auf einer Anwendung der FEM<sup>1</sup> beruhen, stellen den häufigsten Ansatz numerischer Formfindungsmethoden dar. Im Folgenden sollen zwei der in kommerziellen Softwareprogrammen

---

1. Die Finite-Elemente-Methode ( FEM ) ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung von partiellen Differentialgleichungen mit Randbedingungen. Bei Anwendungen auf Probleme der Strukturmechanik besteht der Grundgedanke der FEM darin, die gesamte Struktur (Tragwerk) in eine Vielzahl kleiner Elemente einfacher Geometrien zu zerlegen, deren Strukturverhalten sich numerisch besser approximieren lässt, als das der Gesamtstruktur. Bei bekanntem Verhalten der Teilstrukturen erhält man über Kopplungs- und Randbedingungen die numerische Lösung für das Gesamtsystem. Dabei wird letztlich ein sehr großes Gleichungssystem aufgestellt, das aus einer Gesamtsteifigkeitsmatrix, einem Verschiebungsvektor und einem Kraftvektor besteht. Es muss anschließend gelöst werden, und man erhält die gesuchten Verformungen und die Spannungen.

am häufigsten verwendeten Verfahren und das in dieser Arbeit angewendete Verfahren der Firma SOFISTIK kurz erläutert werden.

### 2.2.2.1 Kraft-Dichte-Methode

Die Kraft-Dichte-Methode wurde in den 70er Jahren am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen an der Universität Stuttgart durch Linkwitz und Schek zur Formfindung von Seilnetzen entwickelt [41] und später durch Gründig erweitert.[21] Der Grundgedanke der Methode basiert, wie bei allen Verfahren der Finiten-Elemente-Methode, auf einer Diskretisierung der Gesamtstruktur in einzelne Elemente, die durch Knoten verbunden sind. Der Lösungsansatz der Kraft-Dichte-Methode unterscheidet sich jedoch grundsätzlich von den üblichen Verfahren der FEM durch den zur Ermittlung der Gleichgewichtsform verwendeten Lösungsweg. Durch die Verwendung einer neuen Variablen, der Kraft-Dichte, einem Quotient aus dem Betrag der Kraft und der Wirkungslänge der Kraft (Raumabstand zweier benachbarter Knotenpunkte), wird das zur Lösung aufgestellte Gleichungssystem linear und erlaubt eine schnelle und numerisch stabile Ermittlung der Gleichgewichtsform. Neben der Ermittlung der Gleichgewichtsform durch die Lösung eines linearen Gleichungssystems besteht ein großer Vorteil der Kraft-Dichte-Methode darin, dass keine Größe zur Beschreibung der Materialeigenschaften der eingesetzten Elemente verwendet wird. Dadurch ist eine Trennung der numerischen Formfindung von der Materialisierung und Analyse des Tragverhaltens möglich. Die daraus resultierende numerische Stabilität der Formfindung führt zu einer breiten Verwendung des Verfahrens bei kommerziellen Softwarepaketen.

Die Kraft-Dichte-Methode lässt sich nicht nur für Seilnetze, sondern auch zur Generierung von Membranen verwenden. Aufgrund der netzähnlichen Struktur der Gewebemembranen und ihrer geringen Schubsteifigkeit kann die Methode der Seilnetzberechnung der Formfindung von Membranen angepasst werden.

### 2.2.2.2 Dynamische Relaxation

Die Dynamische Relaxation ist ein allgemein verwendetes Verfahren zur Stabilisierung von mathematisch schlecht gestellten Problemen (ill- posed problem), um eine eindeutige Lösbarkeit zu garantieren. Es wird häufig bei der Anwendung der FEM zur Formfindung von zugbeanspruchten Strukturen eingesetzt. Der Ansatz wurde 1965 ursprünglich zur Untersuchung eines ebenen Seilnetzes unter Einwirkung einer Einzellast von Day und Otter vorgeschlagen und später von Barnes [5] für die Formfindung von Seilnetzen oder Membranen weiterentwickelt. Ziel der Methode ist es, die

Bewegung einer durch eine kurzzeitig wirksame Belastung künstlich in Schwingungen versetzten Struktur in kleinen Zeitintervallen  $\Delta t$  zu verfolgen, bis sich durch aufgebrachte Dämpfungen ein stabiler Gleichgewichtszustand einstellt. Damit wird das zunächst statische Problem in ein künstlich dynamisches Problem überführt.

Der Lösungsansatz erfordert eine Diskretisierung der Membranfläche in finite Elemente. Es wird angenommen, dass sich die Masse der Struktur in den verbindenden Knoten der Elemente konzentriert. Wird die Struktur durch eine äußere Kraft  $P$  belastet, beginnen die einzelnen Knoten zu schwingen und versetzen die gesamte Struktur in Bewegung.

Das Abklingen der Schwingung kann auf zwei unterschiedliche Arten erreicht werden. Bei der viskosen Dämpfung wird die Gleichgewichtslage durch eine künstliche Dämpfung erreicht. Für die kinetische Dämpfung wird die kinetische Energie für jeden einzelnen Knoten berechnet und beim Erreichen eines lokalen Maximums werden die Geschwindigkeitskomponenten zu null zurückgesetzt. So nimmt die kinetische Energie des Gesamtsystems im Allgemeinen ab und das statische Gleichgewicht wird erreicht.

Für die spezielle Anwendung des Verfahrens auf Membrantragwerke hat das Materialverhalten der Membran einen großen Einfluss. Im Gegensatz zur Kraft-Dichte-Methode erfordert die dynamische Relaxation die Vorgabe von Materialkennwerten. Das unterschiedliche Tragverhalten beschichteter Gewebe wird durch die Angabe unterschiedlicher Spannungskomponenten  $\sigma_k$  und  $\sigma_s$  in Kett- und Schussrichtung berücksichtigt. Das numerische Modell verwendet in Kettrichtung „fiktive Vorspannkabel“, die über die Strukturfläche gelegt werden [66]. Die Vorspannseile verlaufen auf geodätischen Linien und werden durch Spannungskoeffizienten in den Elementverbindungen so kontrolliert, dass ein Kräftefluss ausschließlich in Kettrichtung, nicht aber senkrecht zur Elementfläche möglich ist.

## 2.2.2.3 Formfindungsansatz des Programmes Sofistik

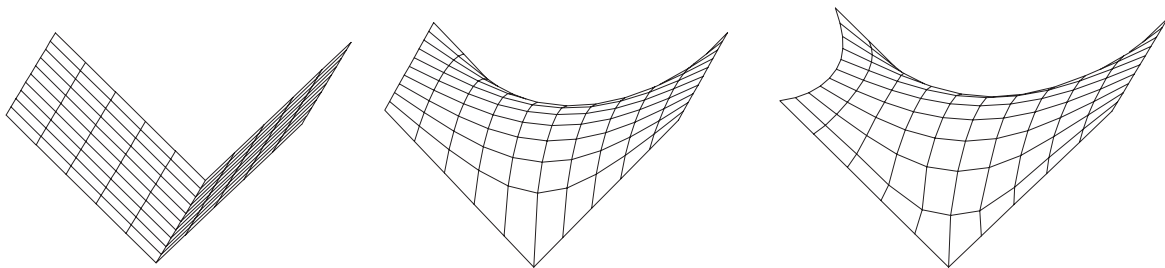
Das in dieser Arbeit verwendete FE-Programm der Firma „Sofistik“ bedient sich keiner speziell für die Formfindung entwickelten numerischen Methode. Die Strukturen werden in Stab- und Flächenelemente diskretisiert. Für die Flächenelemente der Membran werden speziell für die Formfindung entwickelte Membranelemente verwendet.

Die Formfindung lässt sich als Berechnung eines Gleichgewichtszustandes definieren, der die Randgeometrie und die vorgegebenen Vorspannungen als Randbedingungen berücksichtigt. Das Membranelement kann als drei- oder vierknotiges Element definiert werden, welches nur die Membranschnittkräfte  $n_x, n_y, n_{xy}$  aufnimmt. Die Steifigkeit des Membranelements setzt sich aus der normalen Dehnsteifigkeit  $K_0$  in der Ebene des Elements und einer Initialspannungssteifigkeit  $K_\sigma$  aus der Vorspannung des Elements zusammen:

$$K = K_0 + K_\sigma \quad (2-1.)$$

Im Formfindungsprozess können sich so sehr große Knotenverschiebungen einstellen, was im mathematischen Modell mit dem Verschwinden der Dehnsteifigkeit ermöglicht wird. Das räumliche Gleichgewicht wird dabei nur über die Initialspannungssteifigkeit  $K_\sigma$  erreicht, die senkrecht zur Membranfläche wirkt. In der Ebene sind die Punkte frei verschieblich. Anschaulich wird dies an einer echten Seifenhaut, auf der sich Bläschen frei bewegen, ohne eine Änderung der Geometrie hervorzurufen. Die beliebige Änderung der Knotenkoordinaten würde allerdings numerisch zu einem labilen Gleichgewichtssystem führen. Deswegen wird der Prozess der Formfindung in zwei Stufen zerlegt. Im ersten Schritt werden die x- und y-Koordinaten aller Membranelementknoten festgehalten und nur eine Verschiebung in Richtung der z-Achse ist möglich. Die Dehnsteifigkeit der Membranelemente wird auf Null gesetzt und alleine die Initialspannungssteifigkeit  $K_\sigma$  stabilisiert die Membranelemente. Der unter diesen Bedingungen gefundene Gleichgewichtszustand kommt dem letztendlichen Formfindungszustand sehr nahe. So können in einem zweiten Schritt die Festhaltungen der Knoten aufgehoben werden und die Knoten werden frei verschieblich. Um die oben beschriebene freie Verschieblichkeit der Knoten zu kontrollieren, erhalten die Membranelemente eine geringe Dehnsteifigkeit. Mit diesen Bedingungen wird nun der zweite Formfindungslauf gestartet. Da in diesem die tatsächlichen räumlichen Festhaltungen angesetzt werden, ist mit dem Einstellen des vorgegebenen Spannungszustandes die endgültige Form erreicht. Für den Formfindungsprozess kann sowohl eine isotrope konstante als auch eine orthotrope (orthogonal und isotrop) Vorspannung definiert werden.

Die Berechnung des Gleichgewichtszustandes erfolgt in beiden Formfindungsschritten mit der Methode der Finiten Elemente. Die großen Verschiebungen und die daraus resultierende geometrische Nichtlinearität wird durch die Berechnung nach Theorie III. Ordnung (vollständig geometrisch nichtlinear) berücksichtigt. Das sich hieraus ergebende nichtlineare Gleichungssystem wird mit dem modifizierten Newton-Verfahren iterativ gelöst. Ein nichtlineares Materialverhalten der Membran wird im Programm nicht berücksichtigt. Das für die Membranelemente implementierte Werkstoffverhalten ist linear-elastisch und orientiert sich am Werkstoffmodell von Münsch und Reinhardt (siehe S.36). Der Ausfall der Membranelemente bei Druckbeanspruchung wird gewährleistet.



**Abb. 2-4.** Formfindungsschritte in SOFISTIK (34)

Der zweistufige Formfindungsprozess lässt sich gut an einem Beispiel aus zwei ebenen, randgelagerten Flächen, die sich in einem Rand berühren, veranschaulichen. Die Geometrie der Flächen wird über Punkte und Linien erzeugt. Zwischen diesen wird eine Strukturfläche erzeugt, die in einer beliebig feinen Elementierung in Finite Elemente unterteilt wird. Im vorliegenden Beispiel wird der obere linke Rand als frei gelagertes Seil modelliert, die übrigen Ränder werden kontinuierlich in alle Richtungen festgehalten. Im ersten Formfindungsschritt werden alle Membranknoten in x- und y-Richtung festgehalten. Die sich einstellende Form verletzt im Allgemeinen die horizontalen Gleichgewichtsbedingungen, so verschiebt sich die freie Seilkante nur nach unten und kann offensichtlich keine horizontalen Spannungen aus der Membran aufnehmen. Dennoch ist die gefundene Form der endgültigen Geometrie bereits sehr nahe. Im zweiten Formfindungsschritt werden die realen Knotenlagerungen angesetzt. Die Membranknoten sind über eine geringe Dehnsteifigkeit miteinander gekoppelt und verschieben sich frei im Raum, bis der vorgegebene Spannungszustand erreicht ist. Die Seilknoten verschieben sich nun auch in x- und y-Richtung, bis die Umlenkraft des

Seiles mit den Membrankräften im Gleichgewicht steht. Für das Randseil mit Radius  $r$  und gegebener Umlenkraft  $n$  ergibt sich die Seilkraft  $P$  einer in einer Ebene liegenden Kurve zu:

$$P = n \cdot r \quad (2-2.)$$

Für die Randseile kann entweder die Seilkraft oder der Radius fest vorgegeben werden. Wird die Seilkraft  $P$  vorgegeben, so stellt sich in Abhängigkeit von der Membranvorspannung der Krümmungsradius ein. Damit die Länge des Seiles beliebig variieren kann, wird die Dehnsteifigkeit des Seiles stark herabgesetzt. Die aufgrund der verbleibenden Dehnsteifigkeit auftretenden Dehnungen im Seil verursachen nahezu keine Spannungsänderungen. Im umgekehrten Fall mit vorgegebenem Radius liefert das Seil bei voller Dehnsteifigkeit die Seilkraft als Ergebnis.

In gleicher Weise wie für mechanisch vorgespannte Membranen lässt sich der Formfindungsprozess auch für pneumatisch vorgespannte Systeme anwenden. Als Parameter werden die Vorspannung und der Innendruck vorgegeben. Der Formfindungsprozess erfolgt dann in zwei Stufen analog zum Formfindungsprozess für mechanisch vorgespannte Membranen.

Der Vorteil der Einbettung des Formfindungsprozesses in die FEM-Berechnung liegt darin, dass die aus der Vorspannung resultierenden Schnittgrößen und Verschiebungen der Randelemente bereits während des Formfindungsprozesses kalkuliert werden. Auch Lasten wie z. B. Eigengewicht oder im Innenbereich der Membran liegende Druckstäbe oder Seile können bereits mit berücksichtigt werden. Die gleichzeitige Berechnung der Membran und der Nicht-Membran-Elemente ergibt somit ein der Praxis sehr nahes Modell.

### 2.3 Zuschnitt

Das Resultat der Formfindung ist eine kontinuierliche, meist zweifach gekrümmte Fläche. Um diese gefundene dreidimensionale Form praktisch herstellbar zu machen, ist eine Einteilung in einzelne Streifen notwendig. Diese Streifen werden als zweidimensionale Membranbahnen bestimmter Fertigungsbreiten unter Berücksichtigung der elastischen Dehnung der vorgespannten Membran zugeschnitten und ergeben zusammengefügt eine möglichst genaue Annäherung an das theoretische Modell der Membranfläche. Die Einteilung der ebenen ungedehnten Zuschnittsbahnen ist von verschiedenen Faktoren wie der Minimierung des Materialverschnitts, statischen und montagetechni-



---

schen Fragen, sowie den spezifischen Materialeigenschaften des verwendeten Membranwerkstoffs abhängig. Die Vielzahl der Faktoren verdeutlichen den Stellenwert des Zuschnitts im Membranbau, als anspruchsvolles Bindeglied zwischen Formfindung und Realisierung.

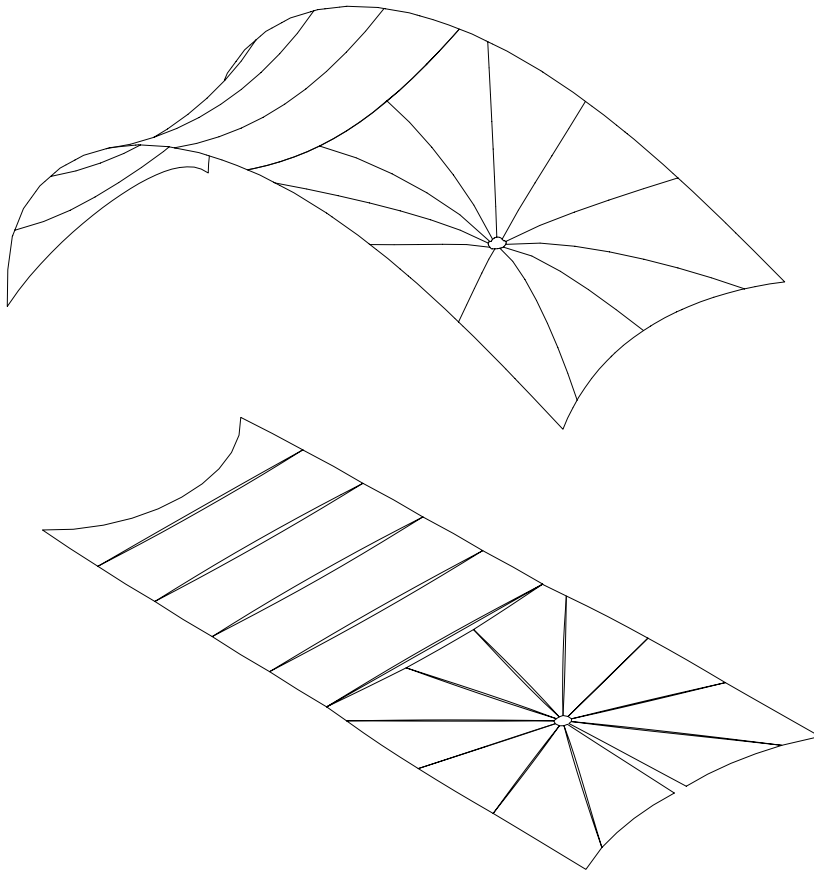
### 2.3.1 Abwicklung einer Fläche

Eine Fläche ist nur dann in die Ebene abwickelbar, wenn die Gaußsche Krümmung in jedem Punkt der Fläche gleich null ist. Somit muss eine der beiden Krümmungen  $1/r_1$  und  $1/r_2$  gleich null und einer der zwei Hauptkrümmungsradien  $r_1$  und  $r_2$  unendlich groß sein. Dadurch ergibt sich eine nur einfach gekrümmte Fläche, wie z. B. beim Zylinder oder Kegel.

Die in der Praxis realisierten Membrantragwerke weisen jedoch fast immer eine doppelte Krümmung auf. Bei der Abbildung der doppelt gekrümmten Fläche in eine Ebene ergeben sich zwangsläufig Verzerrungen der Längen und Winkel. Das Ziel der Verebnung muss es dabei sein, den Genauigkeitsverlust so gering wie möglich zu halten.

Eine anschauliche Einteilung der Membrane in Streifen kann mit der Papierstreifenmethode erfolgen. Dazu ist ein Maßstabsmodell erforderlich, auf das Papierstreifen gelegt werden. Die Breite der Papierstreifen sollte im Maßstab die maximale Breite der Membranbahnen nicht übersteigen. Die Papierstreifen werden so auf die Fläche gelegt, dass sie sich gegenseitig überlappen. Die Überlappung kann dann mit einer Messlupe oder indirekt auf fotografischen Weg aufgenommen werden. In der Praxis ist diese Methode nicht anwendbar, da sie eine große Fehleranfälligkeit aufweist, die sich durch den Maßstab noch vervielfältigt. Sie verdeutlicht aber auf einfache Weise das Problem der Verebnung, zudem leiten sich einige numerische Methoden aus ihr ab.

Das Problem, eine doppelt gekrümmte Fläche ganz oder in Teilen in einer Ebene abzubilden, tauchte erstmals bei der Berechnung von Kartenprojektionen auf. Dabei galt es, die Forderungen nach Winkeltreue, Flächentreue und Längen- bzw. Abstandstreue zu erfüllen. Eine Karte ist winkeltreu, wenn die Strahlen zwischen verschiedenen Punkten auf der Karte die gleichen Winkel einschließen wie auf der Erdoberfläche. Wenn das Flächenverhältnis bewahrt bzw. die Flächenverzerrung gleich Null ist, und so die Fläche eines Geländeteils auf der Karte mit dem auf der Erde übereinstimmt, spricht man von einer flächentreuen Karte. Eine Karte ist längen- bzw. abstandstreu, wenn alle Strecken in beliebigen Richtungen im selben Verhältnis abgebildet werden. Die Längentreue kann nur annäherungsweise erreicht werden. Von diesen drei grundsätzlichen mathematischen Forderungen lässt sich nur



**Abb. 2-5.** Numerisch ermittelte Zuschnittsbahnen einer Membranfläche

jeweils eine erfüllen. Als eine verbreitete Abbildung haben sich die geodätischen Abbildungen durchgesetzt, die eine möglichst verzerrungsfreie Darstellung anstreben und dazu als Grundlage ein rechtwinklig-ebenes Koordinatensystem benutzen. Die Grundidee dieser Methode besteht in einem Zylinder, der in einem Punkt die Erdoberfläche berührt und auf dessen abwickelbare Fläche die Topographie projiziert wird.

### 2.3.2 Verebnung

Für die Zuschnittsgenerierung von doppelt gekrümmten Membranflächen werden vorzugsweise geodätische Linien<sup>1</sup> zur Einteilung der Fläche in Zuschnittsbahnen verwendet. Durch ihre Eigenschaft, im Raum nur einfach gekrümmt zu sein, lassen sich geodätische Linien in die Ebene abwickeln, ohne Verzerrungen zu erhalten. Die Membran wird in Streifen eingeteilt, deren Breite sich aus der maxi-

malen Rollenbreite des Werkstoffes sowie aus der jeweiligen Krümmung ergeben. Die geodätische Linie kann dann entweder in der Mitte oder am Rand des Streifens verlaufen. Dabei ist zu beachten, dass die Verzerrungen auf der geodätischen Linie gleich null sind, sich dann jedoch mit zunehmendem Abstand vergrößern. Aufgrund der höheren Genauigkeit wird die Verebnung von der Mitte ausgehend häufiger verwendet. Generell wird in Bereichen mit großer Krümmung (kleiner Krümmungsradius) eine kleinere Streifenbreite gewählt, um eine ausreichende Näherung an die erforderliche Form zu gewährleisten.

Bei einer Gewebemembran sind idealerweise Kett- und Schussfäden orthogonal ausgerichtet. Die Ausrichtung des Gewebes richtet sich nach den Richtungen der Hauptspannungen. Die Streifeneinteilung richtet sich im Allgemeinen ebenfalls nach den Richtungen der Hauptspannungen. Da die Kettfäden eine höhere Steifigkeit als die Schussfäden besitzen und in der Regel auch höhere Membrankräfte aufnehmen können, wird eine Streifeneinteilung parallel zu den Kettfäden angestrebt. Durch die Verebnung kann diese Forderung nie für alle Bereiche erfüllt werden. Dennoch ist zu beachten, dass mit zunehmendem Winkel zwischen Kettfäden und Streifen die Tangentialkräfte ansteigen und so zu einer zunehmend verzerrten Struktur führen.

An den Schnittstellen der Streifen wird die Membran durch Überlappung zusammengefügt. Dies führt in diesem Bereich zu einer Verdoppelung der Steifigkeit, die bei der Verformungsberechnung und der Bemessung mit angesetzt werden kann. In flachen Bereichen wird die erhöhte Steifigkeit der Nähte auch bewusst zur Versteifung herangezogen.

Durch die Verebnung erhalten die einzelnen Streifen an den Rändern unterschiedliche Verzerrungen. Die Saumlängen sind somit nicht einheitlich und eine gemeinsame Naht würde nicht zur Deckungsgleichheit der angrenzenden Bahn führen. Deswegen wird ein Randausgleich durchgeführt, der zur Übereinstimmung der Nahtlängen und damit zu einer weiteren Veränderung der Geometrie führt.

### 2.3.3 Kompensation

Die aus der Formfindung generierte Membran befindet sich immer in einem Vorspannungszustand. Die Vorspannung wird dadurch erreicht, dass die Membran zu klein zugeschnitten wird und dann in

---

1. Eine Geodätische Linie ist die kürzeste Verbindung zweier Punkte in einem gegebenen geometrischen Raum, meist auf einer Fläche. Im Sinne der Differentialgeometrie stellt sie die Kurve auf einer beliebig stetigen Fläche dar, bei der überall die Hauptnormale mit der Flächennormalen zusammenfällt.

die Ausgangslage gedehnt werden muss. Maßgebend für die Reduzierung der Größe der Streifen ist die Dehnsteifigkeit der Membran sowie die gewünschte Vorspannung. Die Korrektur der verebneten Geometrie wird als Kompensation bezeichnet. Die Kompensationswerte bezeichnen den Wert der Dehnung und werden üblicherweise in Prozent angegeben.

Durch das Kriechverhalten des textilen Gewebes kommt es mit der Zeit zum Abbau der Vorspannung. Um diesen Abbau auszugleichen, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder wird die Membran im Ausgangszustand mit einer höheren Vorspannung als der Sollspannung versehen, oder es werden an den Randeinfassung der Membran konstruktive Möglichkeiten für ein späteres Nachspannen vorgesehen.

Durch die orthotrope Vorspannung und die äußere Belastung kommt es zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Kett- und Schussfäden. Dabei nimmt die Steifigkeit eines Fadens aufgrund der Vorspannung des orthogonalen Fadens zu [48]. Dies kann zu unterschiedlichen Steifigkeiten in der Membran führen. Ebenso besitzen die Überlappungen an den Montagestößen eine höhere Steifigkeit. Um dennoch eine insgesamt konstante Vorspannung in der Membran zu erreichen, muss in Bereichen mit einer höheren Steifigkeit das Material weniger gedehnt werden. Die daraus folgende Änderung der Kompensationswerte wird als Dekompensation bezeichnet.

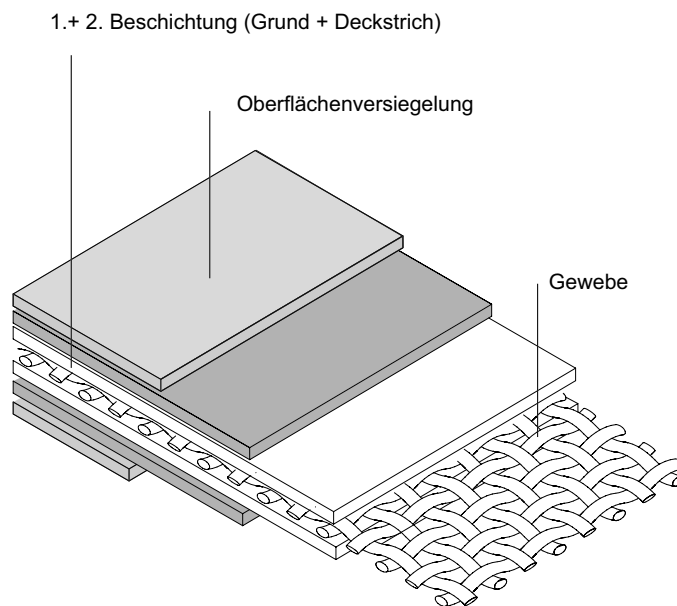
Verebnung, Randausgleich und Kompensation können als die aufeinanderfolgenden Schritte zwischen Formfindung und fertigem Zuschnitt bezeichnet werden. Dabei haben Untersuchungen [69] gezeigt, dass die Verebnung die mit Abstand größte Geometrieänderung verursacht. Die gesamte Geometrieänderung ist für Bereiche mit einer höheren Krümmung stärker ausgeprägt und kann durch eine geringere Bahnenbreite verringert werden.

### 2.4 Membranmaterial

Membranwerkstoffe können grundsätzlich in isotrope und in anisotrope Materialien eingeteilt werden. Isotrope Materialien weisen im Gegensatz zu den anisotropen Materialien in alle Richtungen annähernd die gleichen mechanischen Eigenschaften auf. Isotrope Werkstoffe für vorgespannte Membrane sind in Regel Folien aus thermoplastischen Kunststoffen oder Metallen.

### 2.4.1 Gewebemembran

Im Bereich mobiler Membrankonstruktionen finden vorwiegend Membranwerkstoffe aus technischen Textilien mit anisotropen mechanischen Eigenschaften Anwendung. Diese Werkstoffe sind in der Regel Verbundwerkstoffe aus einem flächigen textilen Gebilde und verschiedenen Beschichtungen, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Die flächigen technischen Textilien können entsprechend der Art der Herstellung in Webware (Gewebe, Nähgewebe), Maschenware (Gewirke, Gestricke, Geflechte) und Non-Wovens (Vliese, Filze, Fadenegelege) unterschieden werden. Aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften eignen sich insbesondere die Gewebe als lastabtragendes Trägermaterial in textilen Membranen. Die Beschichtungen haben die erforderliche Dichtigkeit gegenüber Feuchtigkeit und Luft zu leisten, bestimmen den Grad der Lichtdurchlässigkeit und schützen insbesondere das Gewebe vor mechanischen Beschädigungen, Feuchtigkeit, UV-Strahlung, chemischen Angriffen etc. Die Verbundwerkstoffe aus Gewebe und Beschichtungen werden im Folgenden als Gewebemembranen bezeichnet.



**Abb. 2-6.** Schichtenaufbau einer Gewebemembran (beidseitig PVC beschichtetes Polyestergewebe)

### 2.4.1.1 Fasern, Garne, Zwirne

Der kleinste Baustein aller textilen Baustoffe ist die Faser<sup>1</sup>. Im Bauwesen werden Fasern nach ihrer stofflichen Beschaffenheit in Naturfasern, organische Synthefasern und anorganische Synthefasern unterschieden. Naturfasern sind z.B. Baumwolle, Seide, Hanf oder Leinen und entstehen aus natürlichen Wachstums- und Faserbildungsprozessen. Deswegen sind sie in ihrer Länge beschränkt und werden mit fadenbildenden Technologien zu beliebig langen Fäden versponnen. Bis Mitte der 40er Jahre dienten fast ausschließlich Naturfasern als Grundlage für Membranwerkstoffe, danach wurden sie in kurzer Zeit weitgehend von künstlich hergestellten Fasern ersetzt. Synthefasern können in beliebiger Länge hergestellt werden. Sie werden deshalb in Filamente (Endlofasern) und Spinnfasern (Stapelfasern begrenzter Länge) unterschieden.

Die Querschnittsfläche von Fasern (Naturfasern  $d > 0.1$  mm; Synthefasern  $d < 0.1$  mm) lässt sich aufgrund der geringen Abmessungen nur schwer messen. Man behilft sich deshalb mit der Angabe des Gewichts bezogen auf eine definierte Länge. Mit Hilfe des spezifischen Gewichts des Faserwerkstoffes kann so bei Bedarf die mittlere Faserquerschnittsfläche ermittelt werden. Das übliche Vergleichsmass für Fasern ist die längenbezogene Masse, auch als „Feinheit“ oder „Titer“ bezeichnet, die in der Einheit „tex“ oder „dtex“ angegeben wird [59].

- 1 tex = Gewicht in Gramm / 1000 m Länge
- 1 dtex = Gewicht in Gramm / 10 000 m Länge

Die sehr feinen synthetischen Fasern werden zu Garnen weiter zusammengefasst. Ein Garn kann dabei aus mehreren hundert Einzelfasern bestehen. Garne aus Spinnfasern werden als Spinnfasergarne bezeichnet, Garne aus Endlofasern dagegen als Filamente oder Filamentgarn. Ein Garn aus einer einzigen Endlofaser wird Monofil genannt.

Einige flächige Textilien werden direkt aus Garnen hergestellt, die meisten werden jedoch zu Zwirnen weiterverarbeitet. Ein Zwirn entsteht dabei aus dem Zusammendrehen von mindestens zwei Garnen. Abhängig von der Anzahl der Garne wird er dann als zweifach (zwei Garne), dreifach, usw. bezeichnet. Die Garne können in einem oder mehreren Vorgängen miteinander verdreht werden und werden dementsprechend als ein- oder mehrstufig bezeichnet. Das Zwirnen hat dabei die Aufgabe,

---

1. Unter einer textilen Faser wird ein linienförmiges Gebilde verstanden, das sich mit den Methoden der Textiltechnik weiterverarbeiten lässt. Die Länge einer Faser ist groß im Vergleich zum Faserquerschnitt.(ILEK)

die Festigkeit zu erhöhen, das Dehnungsverhalten einzustellen, Ungleichmäßigkeiten zu vermindern und bestimmte Oberflächenstrukturen zu erzeugen.

Die Kennzeichnung der im textilen Bauen verwendeten Filamentgarne erfolgt durch die Angabe von „tex“ und der Anzahl der Drehungen. Ein Garn mit der Bezeichnung 1100 dtex f200 z60 wiegt 1100 Gramm auf 10000 m Länge, besteht aus 200 Filamenten, die 60 mal pro Meter rechtssinnig um die Granachse (z- Richtung) miteinander verdreht sind. [45] Filamente, Garne und Zwirne werden im allgemeinen auch mit dem Begriff „Faden“ bezeichnet, der alle linienförmigen Gebilde umfasst.

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die mechanischen Eigenschaften der im textilen Membranbau vorwiegend verwendeten Fasern. Dabei bietet vorallem das Merkmal der freien Reißlänge<sup>1</sup> eine gute Vergleichbarkeit der möglichen Eignung unterschiedlicher Fasermaterialien für die Verwendung für weitgespannte lastabtragende Membrantragwerke.

Material (Handelsname)	Spezifisches Gewicht [g/m <sup>3</sup> ]	Bruchfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruch- dehnung [%]	Reißlänge [km]
Baumwolle	1,5 - 1,54	350 - 700	6 - 15	48,0
Polyamid 6.6 (Nylon®)	1,14	bis 1000	15 - 20	89,0
Aramide <sup>1</sup> (Kevlar®, Twaron®)	1,45	bis 2700	2 - 4	190,0
Polyesterfasern (Trevira®, Dacron®, Diolen®)	1,38 - 1,41	1000 - 1300	10 - 18	94,0
Glasfasern	2,55	bis 3500	2 - 3,5	140,0
Polytetrafluortethylen (Teflon®, Hostaflon®)	2,1 - 2,3	160 - 380	13 - 32	16,8
Kohlenstofffasern	1,7 - 2,0	2000 - 3000	< 1	153,0

**Tabelle 2-1.** Übersicht über die im textilen Membranbau üblichen Fasern, nach [59]

1. Aramide sind Polyamide, bei denen die Monomere aus aromatischen Verbindungen bestehen

*Baumwolle*

Gewebe aus Baumwollfasern werden noch immer im Membranbau eingesetzt. Baumwollfasern sind sehr flexibel und stellen deshalb vorallem für wandelbare bzw. mobile Membrankonstruktionen über einen langen Zeitraum die ideale Lösung dar. Heute werden sie fast nur noch für temporäre Überda-

1. Die freie Reißlänge beschreibt auf anschauliche Weise das Verhältnis zwischen Gewicht und Zugfestigkeit eines Fasermaterials. Sie gibt die (ungedehnte) Länge eines fiktiv an einem Ende aufgehängten prismatischen Stabes in Kilometern an, bei der er unter seinem Eigengewicht abreißt.[45]

chungen geringer Spannweite oder für einfache mobile Bauten verwendet. Die Fasern schrumpfen bei der Aufnahme von Feuchtigkeit und besitzen im Vergleich zu den meisten Synthesefasern nur eine geringe Bruchfestigkeit. Ihr größter Nachteil ist die drastische Abnahme der Festigkeit unter langfristiger Beanspruchung durch Sonnenlicht und Nässe (0 -20% der Anfangsfestigkeit).

### *Polyamid 6.6 (Nylon)*

Gewebe aus Polyamidfasern wurden vor allem in der Anfangszeit des Bauens mit vorgespannten Membranen häufig auch für größere Spannweiten eingesetzt. Heute finden sie aufgrund ihres geringen Gewichts, ihrer großen Flexibilität und ihrer relativ hohen Festigkeit breite Anwendung bei Sport- und Campingzelten, bzw. als typisches Material für Spinnaker im Segelbau. Die Fasern dehnen sich bei der Aufnahme von Feuchtigkeit und schrumpfen bei großer Erwärmung. Ihre UV-Beständigkeit ist gering.

### *Aramidfasern*

Aramidfasern haben eine hohe Bruchfestigkeit und einen hohen Dehnungswiderstand. Nachteilig wirken sich die sehr geringe UV-Beständigkeit und ein schneller Festigkeitsverlust durch Knicken aus. Für mobile und wandelbare Membrandächer sind sie deshalb ungeeignet. Auch für permanente Membrandächer wurden nur selten Aramidfasergewebe verwendet. Breite Anwendung finden die Fasern unter dem Produktnamen Kevlar® bei der Herstellung von Hochleistungsseilen. Aufgrund ihrer größeren Flexibilität und den dadurch geringeren Packmaßen gegenüber vergleichbaren Stahlseilen werden sie teilweise als Randseile oder Abspannungen für mobile Membrankonstruktionen eingesetzt.

### *Polyesterfasern*

Polyesterfasern sind aufgrund ihres guten Verhältnisses von Gewicht und Druckfestigkeit verbunden mit einer hohen Flexibilität die derzeit am meisten verwendeten Fasern im Membranbau, insbesondere für mobile Membrankonstruktionen. Sie finden nicht nur als Baustein für Gewebe Anwendung, sondern werden auch als Gurtmaterial für Abspannung und Membranränder verwendet. Ungeschützt verlieren aber auch Polyesterfasern unter UV-Einstrahlung und Bewitterung deutlich an Festigkeit.

### *Glasfasern*

Glasfasern werden aufgrund ihrer hohen Festigkeit und thermischen Beständigkeit vielfach für Membranbauwerke eingesetzt. Sie sind beständig gegenüber UV-Bestrahlung und nicht brennbar, aber extrem empfindlich gegenüber Feuchtigkeit. Aufgrund des starken Festigkeitsverlustes durch Knicken werden Gewebe aus Glasfasern nicht für wandelbare oder mobile Bauten eingesetzt.



### *Polytetrafluorethen(PTFE)-Fasern*

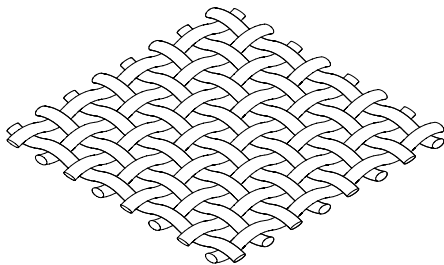
PTFE-Fasern besitzen zwar nur eine geringe Bruchfestigkeit, sind aber sehr flexibel, UV-beständig und nicht brennbar. Sie sind außerdem außerordentlich antiadhäsiv. PTFE wird deshalb bisher vorwiegend als Beschichtung eingesetzt. Unter dem Produktnamen Tenara® steht aber mittlerweile auch eine Gewebemembran zur Verfügung, die für den Einsatz wandelbarer bzw. mobiler Membrankonstruktionen sehr geeignet wäre.

### *Kohlestofffasern*

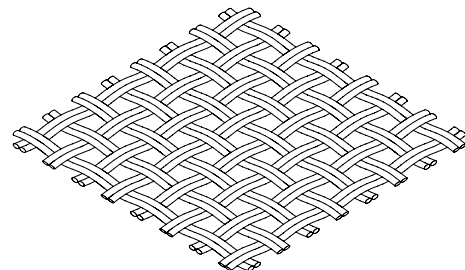
Kohlefasern besitzen zwar eine extreme Bruchfestigkeit, eignen sich aber aufgrund ihrer geringen Dehnbarkeit und ihrer Sprödigkeit nicht für den Membranbau. Im Bereich des Segelbaus werden sie in der sogenannten 3DL Technik eingesetzt, bei der Fäden aus Kohlefasern auf der Membrane exakt entlang der berechneten Spannungstrajektoren verlegt und nicht verwebt werden.

#### 2.4.1.2 Gewebe

Gewebe werden aus den vorgestellten linearen textilen Werkstoffe hergestellt und bilden die Grundlage der textilen Membranwerkstoffe. Gewebe sind flächige Gebilde, die normalerweise aus zwei sich kreuzenden und miteinander gekoppelten Fadensystemen, dem Kett- und dem Schussfaden, bestehen. Der Kettfaden verläuft über die gesamte Länge einer Gewebbahn, der Schussfaden liegt senkrecht zum Kettfaden und wird mit Schiffchen oder Düsenwebung eingetragen.



**Abb. 2-7.** Leinwandbindung



**Abb. 2-8.** Panamabindung

Dieser Herstellungsprozess führt zu der charakteristischen Welligkeit, wobei durch die Vorspannung des Kettfadens bei der Herstellung dieser meist weniger gewellt ist als der Schussfaden. Die Steifigkeit der Fäden nimmt mit zunehmender Welligkeit ab. So lassen sich durch das Verhältnis der Vorspannungen die mechanischen Eigenschaften in den beiden Hauptrichtungen beeinflussen und je nach Erfordernis nahezu gleiche bzw. extrem unterschiedliche Werte in Kett- und Schussrichtung herstellen.[45] Neben dem verwendeten Fadenmaterial und der Fadendichte hat die Art der Verwe-

bung, die sogenannte Bindung, einen weiteren großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Gewebes. Es werden drei Grundbindungen unterschieden: Leinwandbindung, Körperbindung und Atlasbindung. Für textile Membranen wird überwiegend die Leinwandbindung oder die davon leicht abgewandelte Panamabindung mit paarweisen Fäden verwendet.

Ein zentrales Problem bei der Verwendung von Geweben für Membrankonstruktionen ist das Weiterreißverhalten. Sobald eine Gewebe durch einen kleinen Anriss beschädigt wurde, lassen sich selbst hochfeste Materialien, die unter Zugspannung stehen, sehr leicht mit einem geradlinigen Riss weiter auftrennen. Der Einsatz sogenannter Rip-stop Gewebe<sup>1</sup> löst dieses Problem nur innerhalb bestimmter Beanspruchungsgrenzen und nicht prinzipiell.

### 2.4.1.3 Beschichtungen

Die meisten Gewebe werden mit Beschichtungen (Coating) auf beiden Seiten des Textiles versehen. Ursprünglich hauptsächlich zur Verbesserung der Wasser- bzw. Luftdichtigkeit verwendet, leisten sie heute vor allem den Schutz des Gewebes vor physikalischen, chemischen und biologischen Beanspruchungen. Dabei spielen die UV-Beständigkeit, die Feuerbeständigkeit und die Resistenz gegen Mikroben eine zentrale Rolle. Die Beschichtungen beeinflussen das Anschmutzverhalten, die Lebensdauer, aber auch die mechanischen Eigenschaften der Gewebemembran, wie z.B. die Schubfestigkeit. Das Problem des Weiterreißverhalten wird auch durch das Aufbringen einer Beschichtung nicht grundsätzlich gelöst. Mit Ausnahme der PTFE-Gewebe sind Beschichtungen für Gewebemembranen die Voraussetzung für die Fügung von Teilflächen durch Schweißen bzw. Kleben. (siehe 2.5.1 Seite 38)

Die Beschichtungen werden nach einer Vorbehandlung in verschiedenen Verfahren aufgebracht. Für Gewebe aus synthetischen Fasern bestehen die Beschichtungssysteme aus Plastomeren (PVC, PTFE, Silikon) oder Elastomeren (Gummierung, Polyurethane).

#### *PVC(Polyvinylchlorid)-Beschichtungen*

PVC-Beschichtungen sind preisgünstige, technologisch hochwertige Beschichtungen, die in unterschiedlichen Farben realisierbar sind. Sie werden vorwiegend für Polyestergewebe verwendet und im

---

1. Rip-Stop Gewebe besitzen unterschiedliche Fadenstärken. In kurzen Abständen zieht sich ein kräftigerer Kett- bzw. Schussfaden durchs Gewebe. Bei einem Anriss läuft der Riss nicht ungebremst durch die gesamte Fläche, sondern stoppt am stärkeren (Rip Stop-) Faden. Damit können leichtere Gewebe mit höherer Reißfestigkeit erzeugt werden. Das Problem des Weiterreißverhalten wird jedoch nicht grundsätzlich geändert.

Streich- oder Kalanderverfahren bei Temperaturen von ca. 120 - 200 °C aufgetragen. Anwendungen für Aramidgewebe sind keine Standardprodukte. Die Beschichtung besteht aus einer vorgemischten Paste aus PVC-Pulver und Plastisolen (Weichmachern), Hitze- und Lichtstabilisatoren, Fungiziden, Bakteriziden, und Pigmenten etc. Der Nachteil der PVC-Beschichtung ist ihre Empfindlichkeit gegen Bewitterung. Durch das Entweichen von Weichmachern, UV- und Hitzestabilisatoren kam es in der Vergangenheit zu einer schnellen Versprödung des Materials, das zu starkem Anschmutzen bzw. Mikrobenangriff führte. Deshalb ist für PVC-Beschichtungen eine Versiegelung (Topcoating) aus Acrylat- und PVDF-Lacken oder PVF-Laminaten erforderlich. Die gasdiffusionsdichte Versiegelung verhindert die Weichmachermigration in ausreichendem Maße, vermindert die auf die Beschichtung auftreffende UV-Strahlung und schafft eine glatte, antiadhäsive Oberfläche. Die Versiegelungen besitzen einen anderen Schmelzpunkt als die Beschichtung und können nicht mit ihr zusammen verschweißt werden. Zur Vorbereitung einer Schweißnaht ist das Abschleifen der Versiegelung notwendig.

#### *PTFE- Beschichtung*

Für PTFE Beschichtungen wird das Rohgewebe durch eine Dispersion aus feinsten PTFE-Teilchen in einer wässrigen Phase gezogen. Anschließend wird das Wasser bei 100°C verdampft, das Netzmittel bei 250°C zersetzt und die PTFE-Partikel bei 327°C gesintert. Zum Erreichen der erforderlichen Schichtdicken wird der Vorgang mehrfach wiederholt. Aufgrund der hohen Prozesstemperaturen können nur Gewebe mit einem Schmelzpunkt größer als 327°C beschichtet werden. So ist die PTFE-Beschichtung von Polyestergewebe nicht möglich. PTFE-Beschichtungen sind hochgradig antiadhäsiv, UV- und feuerbeständig. Sie werden ebenfalls mit einem Topcoat versehen, um die Antiadhäsivität und die Schweißbarkeit zu verbessern.

#### *Silikonbeschichtungen*

Silikonbeschichtungen besitzen eine sehr gute UV- und Witterungsbeständigkeit. Weitere Vorteile sind ihre hohe Flexibilität und Transparenz. Ebenso wie PVC-Beschichtungen sind sie einfach einfärbbar. Nachteilig wirkt sich das kritische Brandverhalten und die Nichtschweißbarkeit silikonbeschichteter Gewebe aus, da die geklebten Verbindungen weitaus geringere Kräfte übertragen können.

### 2.4.1.4 Werkstoffe

Die Auswahl der heute auf dem Markt angebotenen Materialien ist sehr groß. Die im Folgenden kurz diskutierten Werkstoffgruppen umfassen nur die am häufigsten eingesetzten bzw. für mobile Membrankonstruktion geeigneten Materialien. Eine Darstellung der derzeit vorhandenen gesamten Vielfalt an Membranmaterialien einschließlich Folien und Metallgeweben bietet [45]

#### *Baumwollgewebe*

Imprägnierte Baumwollgewebe und Baumwollmischgewebe werden mittlerweile nur noch in geringem Umfang eingesetzt. Die Imprägnierung verleiht dem Gewebe eine wasserabweisende, feuerhemmende und fungizide Oberfläche. Die zeitliche Begrenzung dieses Schutzes und die im Vergleich zu den meisten Geweben aus synthetischen Fasern geringe Leistungsfähigkeit des Baumwollgewebes hat den Werkstoff aus dem Membranbau weitgehend verdrängt. Aufgrund seiner hohen Flexibilität und der geringen Material- und Fertigungskosten wird er noch immer für kleinere mobile oder temporäre Bauten verwendet.

#### *Fluorpolymergewebe (PTFE-Gewebe)*

Im Membranbau wird eine Vielzahl von Fluorpolymeren verwendet (PTFE, ETFE, PVDF etc.). Im Bereich der Gewebe ist PTFE einer der wichtigsten Vertreter. PTFE-Gewebe kann ohne Beschichtung verschweißt werden und besitzt eine hohe Flexibilität, Abriebfestigkeit und UV-Beständigkeit. Reine PTFE-Gewebe wurden in der Vergangenheit aufgrund des hohen Materialpreises und ihres ausgeprägten Kriech- und Relaxationsverhaltens sehr selten verwendet. Lange Zeit stellten die Großschirme F.Ottos und B.Raschs die einzige nennenswerte Anwendung des Materials dar. Es eignet sich grundsätzlich sehr gut für wandelbare und mobile Konstruktionen, besitzt ohne Beschichtung jedoch keine ausreichende Wasserdichtigkeit.

#### *Beschichtete Fluorpolymergewebe (PTFE-Gewebe)*

Das für den Membranbau derzeit interessanteste beschichtete Fluorpolymergewebe ist TENARA®, ein fünflagiger Werkstoff, der aus einem hochfesten sogenannten ePTFE-Gewebe besteht, das auf beiden Seiten mit einer Beschichtung und Versiegelung aus Fluorpolymeren versehen ist. Aufgrund neuer hochfester Garne weist das Gewebe im Vergleich zu den bisher verwendeten PTFE-Geweben deutlich verbesserte mechanische Eigenschaften auf. Die Mindestwerte der Zugfestigkeit des Werkstoffs liegen bei bzw. über den Werten vergleichbarer PVC-Polyester oder PTFE-Glasgewebe. Das Material ist UV-beständig, weitgehend unempfindlich gegenüber chemischen und biologischen Angriffen und stark schmutzabweisend. Aufgrund seiner hohen Knickbeständigkeit ist es sehr gut für

wandelbare bzw. mobile Membrankonstruktionen geeignet. Ebenso wie für PVC-Polyestergewebe ist für das momentan erhältliche TENARA® Material ein Abschleifen der Versiegelung zum Verschweißen von Teilflächen notwendig. Das sich derzeit in der Entwicklung befindliche Nachfolgeprodukt soll laut Aussage des Herstellers diesen Nachteil vermeiden.

Material (Handelsname)	Spezifisches Gewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit Gewebe <sup>1</sup> Kette/Schuss [N/mm <sup>2</sup> ]	Weiterreißfestigkeit Gewebe <sup>2</sup> Kette/ Schuss [N/mm <sup>2</sup> ]	UV- Beständigkeit	Feuerbeständigkeit <sup>3</sup>	Lebenserwartung [Jahr]
Baumwollgewebe	320 520	1700/1000 2500/2000	60 80	ausreichend	B2	< 5
PTFE- Gewebe	300 520 710	2390/2210 3290/3370 4470/4510	500/500	sehr gut	A2	> 25
PTFE- Gewebe beschichtet						
(TENARA®) Typ I Typ II		3200/2900 4200/4200	818/854 925/925	sehr gut	A2	> 25
PVC- beschichtetes Polyestergewebe						
Typ I	800	3000/3000	350/310	gut	B1	> 20
Typ II	900	4400/3950	580/520			
Typ III	1050	5750/5100	950/800			
Typ IV	1300	7450/6400	1400/1100			
Typ V	1450	9800/8300	1800/1600			

**Tabelle 2-2.** Übersicht über geeignete Gewebematerialien für mobile Membrankonstruktionen

1. nach DIN 53 354
2. nach DIN 53 363
3. nach DIN 4102

#### *PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe*

PTFE-beschichtete Glasfasergewebe sind aufgrund ihrer hohen Lebenserwartung, ihrer guten mechanischen Eigenschaften und ihrer Feuerbeständigkeit zu einem Standardwerkstoff insbesondere für permanente weitgespannte Membrankonstruktionen gereift. Nachteilig ist die relativ geringe Knickbeständigkeit des Werkstoffs, die eine sehr hohe Sorgfalt bei Transport und Montage verlangt. Damit erweisen sich PTFE-beschichtete Glasfasergewebe auch als ungeeignet für wandelbare oder mobile

Konstruktionen. Dies gilt ebenso für die bisher kaum verwendeten silikonbeschichteten Glasfasergewebe.

### *PVC-beschichtete Polyestergewebe (PVC/PES-Gewebe)*

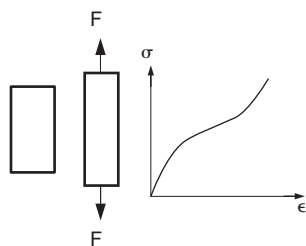
PVC-beschichtete Polyestergewebe sind aufgrund ihrer günstigen Materialeigenschaften und ihres günstigen Preisniveaus im gesamten Membranbau die am häufigsten eingesetzten Werkstoffe. Die Zugfestigkeit verschiedener PVC-Polyestergewebe liegt über den leistungsstarken PTFE-Glasgeweben. Aufgrund ihrer guten Knickbeständigkeit eignen sie sich insbesondere für wandelbare und mobile Membrankonstruktionen. Die im Vergleich zu PTFE-beschichteten Geweben nicht optimale UV-Beständigkeit und das Anschmutzverhalten stellen aufgrund der wesentlich kürzeren Lebensdauer mobiler Bauten keinen wesentlichen Mangel dar. Bis auf wenige Ausnahmen verwenden alle mobilen Konstruktionen mittlerer und großer Spannweite diesen Werkstoff.

#### 2.4.1.5 Materialverhalten

Das Materialverhalten der Gewebemembranen ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- nichtlineares Spannungs-Dehnungsverhalten
- Anisotropie
- nichtelastisches Verhalten

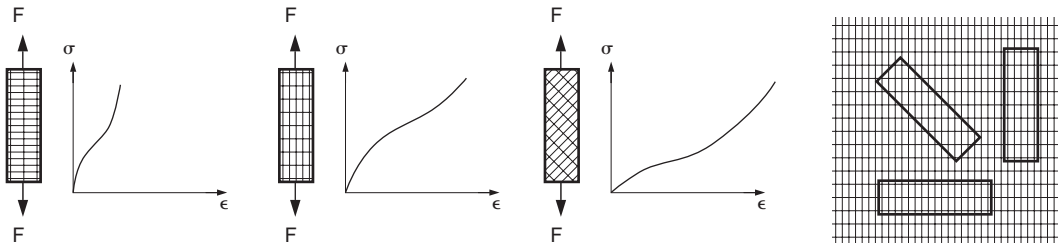
Die Dehnungen von Gewebemembranen steigen bei einer Erhöhung der Belastung nicht proportional an. Das Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Membranstreifens im einachsigen Zugversuch zeigt einen deutlichen nicht linearen Zusammenhang, der sich nur langsam einer Geraden annähert.



**Abb. 2-9.** Nichtlineares Kraft- Dehnungsverhalten von Gewebemembranen nach [8]

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Gewebemembrane ist ihre ausgeprägte Anisotropie. Die beiden Fadenrichtungen des Gewebes, Kette und Schuss, besitzen jeweils unterschiedliche Steifigkeiten. Während die Steifigkeit in Kettrichtung sich weitgehend linear-elastisch verhält, stellt sich in Schussrichtung bei Belastung eine Versteifung infolge des Geradeziehens der Fäden ein. Die resul-

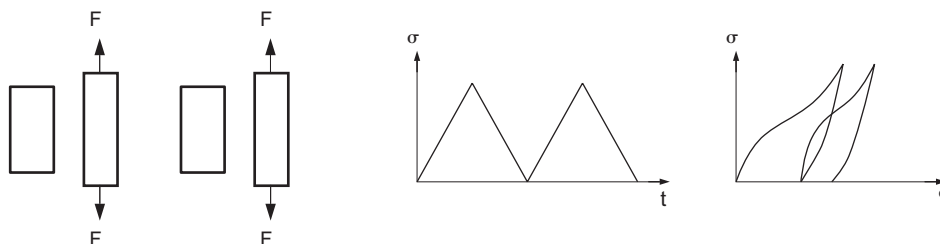
tierende Spannungs-Dehnungslinie eines Membranstreifens ist somit abhängig von der Orientierung des Streifens zur Geweberichtung. Je nach Ausrichtung des Materials entstehen unterschiedliche Gleichgewichtsformen. Einer der führenden Hersteller von Gewebemembranen, die Firma Ferrari,



**Abb. 2-10.** Anisotropes Verhalten einer Gewebemembran nach [8]

hat ein Verfahren entwickelt, das nahezu ausgeglichene Dehnungseigenschaften in beide Richtungen des Materials und eine deutliche Minimierung der Kriechverhaltens ermöglicht. Die Technik Preconstraint Ferrari® besteht darin, dass den textilen Trägern vor und nach der Beschichtung eine Vorspannung verliehen wird. Die biaxiale Spannung gewährleistet eine genaue Kontrolle der Schußfäden, um einen geraden Fadenverlauf zu erhalten. Die Einhaltung dieses geraden Fadenverlaufs in Verbindung mit einem geringen Unterschied der Fadenlänge in Längs- und Querrichtung des Gewebes ermöglicht die Herstellung beschichteter Gewebemembranen mit annähernd isotropem Dehnverhalten.

Das nichtelastische Verhalten beschichteter Gewebemembranen wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Eine Ursache ist das viskoelastische Materialverhalten der Beschichtungen. Hinzu kommen in Abhängigkeit des eingesetzten Gewebematerials ein mehr oder weniger starkes Kriechen unter Dauerlast und eine Dämpfung unter Kurzzeitbelastungen. Im Zugversuch zeigt sich eine deutliche Unterscheidung von Be- und Entlastungskurve. Aufeinanderfolgende Belastungen verursachen eine Versteifung des Werkstoffs. Die Dehnungen gehen nach Be- und Entlastung nicht auf Null zurück. Zusätzlich sind bei einigen Werkstoffen die oben dargestellten Eigenschaften stark temperaturabhängig.



**Abb. 2-11.** Nichtelastisches Verhalten einer Gewebemembran bei wiederholter Belastung, nach [8]

## 2.4.1.6 Werkstoffmodell

Für die Berechnungen von Gewebemembranen im Rahmen dieser Arbeit wird ein Werkstoffgesetz für einen näherungsweise linear elastischen, orthotropen Ersatzwerkstoff für fadenparallele und nichtfadenparallele Zugbeanspruchungen verwendet, das am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart von Münsch und Reinhard entwickelt wurde und in der Praxis weitgehend Anwendung findet [48]. Dieses Werkstoffgesetz geht von einem linear elastischen orthotropen Ansatz mit vier Elastizitätsparametern aus. Die Anisotropiehauptachsen verlaufen dabei parallel zur Kett- bzw. Schussrichtung. Das homogenisierte Werkstoffmodell kann in Abhängigkeit von den Spannungen und Dehnungen wie folgt ausgedrückt werden:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_K \\ \varepsilon_S \\ \gamma_{KS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_K} & -\frac{\mu_{KS}}{E_S} & 0 \\ -\frac{\mu_{SK}}{E_K} & \frac{1}{E_S} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_K \\ \sigma_S \\ \sigma_{KS} \end{bmatrix} \quad (2-3.)$$

$\mu_{KS}$  Querdehnzahl für Dehnung in Kettrichtung infolge Zug in Schussrichtung

$\mu_{SK}$  Querdehnzahl für Dehnung in Schussrichtung infolge Zug in Kettrichtung

$E_K$  E-Modul in Kettrichtung

$E_S$  E-Modul in Schussrichtung

$\varepsilon_K$  Dehnung in Kettrichtung

$\varepsilon_S$  Dehnung in Schussrichtung

$\sigma_K$  Spannung in Kettrichtung

$\sigma_S$  Spannungen in Schussrichtung

$\sigma_{KS}$  Schubspannung

$\gamma_{KS}$  Winkeländerung zwischen Kett- und Schussrichtung

$G$  Schubmodul

Grundlage für die Formulierung dieses Werkstoffgesetz sind die Einhaltung einer Querkontraktionszahl von  $0 \leq \mu \leq 0,5$  und die Symmetriebedingung für die Elastizität:

$$\frac{\mu_{KS}}{E_S} = \frac{\mu_{SK}}{E_K} \quad (2-4.)$$



Geometrisch nichtlineare Effekte der Mikrostruktur und viskose Deformationen aus Langzeitbelastungen werden durch das Werkstoffmodell nicht dargestellt. Für die statische Berechnung hat sich das Modell als hinreichend genau erwiesen, zur Ermittlung der einzelnen Materialparameter sind jedoch zweiachsige Materialversuche notwendig.

#### 2.4.2 Geflechte

Geflechte<sup>1</sup> sind flächige oder räumliche textile Gebilde. Die industriell hergestellten Geflechte können in zwei- und dreidimensionale Strukturen eingeteilt werden. Die zweidimensionalen Strukturen sind klassische textile Anwendungen, die nach dem mechanischen Herstellungsprinzip bzw. der dafür erforderlichen Maschine unterschieden werden (Litzenflechtmaschine, Spitzenflechtmaschine, Packungsflechtmaschine). Dreidimensionale Flechtverfahren wurden zu Beginn der 70er Jahre in den USA entwickelt. Die 3D-Flechttechnik bietet die Möglichkeit, erforderliche Bauteilgeometrien in einem Arbeitsschritt ohne Zuschnitt und Fügung zu erzeugen. Dadurch können hochfeste textile Halbzeuge hergestellt werden, die zur Verstärkung von Faserverbundwerkstoffen dienen. Die erzeugbaren 3d-Gebilde sind jedoch in ihrer Größe durch die Maschinenabmessungen begrenzt. Nahtlose hochfeste Schlauchgewebe, die durch Rundflechten bzw. Umflechten entstehen, haben im Bereich der luftgefüllten Membranbauten neue Spannweiten ermöglicht (siehe Vertigo Inc., Seite 139). Dabei handelt es sich nicht wirklich um dreidimensionalen Strukturen, da nur räumlich gekrümmte flächige Gebilde erzeugt werden. Bei den wirklich dreidimensionalen Geflechten handelt es sich um Volumenelemente, die aus drei Fadensystemen gebildet werden, bei denen mindestens eine Fadenachse senkrecht zu den übrigen steht.

#### 2.4.3 Folien

Folien erreichen nicht die Festigkeiten von Geweben und werden hauptsächlich für pneumatisch vorgespannte Konstruktionen verwendet. Dabei kann die isotrope Struktur der Folien mit einem in alle Richtungen gleichen Spannungs-Dehnungsverhalten sinnvoll ausgenutzt werden. Für kleinere Spannweiten werden sie aber auch in zunehmenden Maße für mechanisch vorgespannte Flächentragwerke eingesetzt. Die derzeit am häufigsten eingesetzten ETFE-Folien besitzen eine Dicke von 0,05 mm bis 0,20 mm. Aufgrund fehlender Knickbeständigkeit und Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen werden ETFE-Folien derzeit kaum im Bereich der mobilen Membranbauten verwendet.

---

1. „Flächen- oder Körpergebilde mit regelmäßigen Fadendichte und geschlossenem Warenbild, deren Flecht- (Klöppel-) Fäden sich in schräger Richtung zu den Warenkanten kreuzen“ DIN 60 000

### 2.5 Detailkonstruktionen

Das Konstruieren mit Membranen erfordert in hohem Maße die Beachtung der Materialeigenschaften der Werkstoffe und der Besonderheit der Bauweise, auf Belastungen mit starken Verformungen zu reagieren. Membrangerechte Verbindungen von Teilflächen, die Randausbildung und Anschlüsse an wesentlich steifere Traglemente wie Seile oder starre Stützkonstruktionen wie Randträger und Bögen, haben eine große Auswirkung auf die Tragfähigkeit der Konstruktion, ihre Montierbarkeit und auch ihre gestalterischen Qualitäten. Im Gegensatz zum Stahl- oder Holzbau existieren hierfür keine geprüften Standarddetails. In der Regel entstehen die meisten Konstruktionen noch immer auf Grundlage langjähriger Erfahrungen der ausführenden Firmen. Die nachfolgende Darstellung von Teilflächenverbindungen, Rand- und Eckausbildungen und Anschlüssen an Stützkonstruktionen stellt somit auch nur eine Übersicht dar, die grundsätzliche Aspekte erläutern soll. Eine umfassendere Darstellung bietet [10]. Für pneumatische Konstruktionen, insbesondere luftgestützte Konstruktionen, sei auf [27] und [33] verwiesen.

#### 2.5.1 Teilflächenverbindung

Die Teilflächenverbindungen von Membranen lassen sich grundsätzlich in lösbare und nichtlösbare Verbindungen unterscheiden. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit sind Werkstatt- und Baustellenverbindungen. [50] Die herstellungsbedingte Bahnenbreite von Membranwerkstoffen zwischen 1.65 und 6 m erfordert grundsätzlich die nichtlösbare Verbindung einzelner Teilflächen zu größeren Einheiten. Für permanente Membranbauten wird so zumeist die gesamte Fläche im Werk vorgefertigt (bis zu 5 000 m<sup>2</sup>). Zu den nichtlösbaren Verbindungen zählen Nähnähte, Schweißnähte und die Kombination beider Verfahren, die sogenannten Kombinähte. Im Bereich der mobilen Bauten werden je nach Größe der Gesamtfläche und der Transport- und Montagemöglichkeiten beide Verbindungsarten angewandt. Als lösbare Verbindung für Flächenstöße werden Klemmplatten-, Schlaufen- und Schnürstöße eingesetzt. Die traditionellen Schlaufen- und Schnürstöße eignen sich lediglich für relativ geringe Belastungen, werden jedoch im Bereich mobiler Bauten sehr häufig verwendet.

##### 2.5.1.1 Nichtlösbare Membranverbindungen

###### *Genähte Membranverbindungen*

Nähnähte sind eine traditionelle Verbindungsart. Sie perforieren die Membran und müssen nachträglich abgedichtet werden. Ihre Herstellung ist relativ kostenaufwendig, so dass sie heute nur noch für

unbeschichtete Gewebe (Bauwolle, Nylon) oder in Kombination mit Schweißnähten für hoch beanspruchte Bereiche oder zum Aufnähen von Gurtverstärkungen verwendet werden.

#### *Geschweißte Membranverbindungen*

Das Schweißen ist die im modernen Membranbau am häufigsten verwendete Verbindungsmethode. Neben dem Herstellen der Gesamtfläche aus den einzelnen Zuschnittsbahnen werden Schweißnähte dazu verwendet, Rantaschen und Verstärkungen herzustellen oder Gurte bzw. Keder einzuarbeiten. Der Vorteil der Schweißverbindung ist ihre einfache Herstellbarkeit und die mittlerweile verbesserte Festigkeit, die annähernd der des Gewebes entspricht. Schweißnähte erhöhen die Steifigkeit im Nahtbereich deutlich. Sie sind wasserdicht und UV-beständig. Die Art des Schweißverfahrens ist werkstoffabhängig. PVC-beschichtete Polyestergewebe werden durch Hochfrequenzschweißen (HF) verbunden. Die zum Verschweißen der Beschichtung erforderliche Temperatur liegt in der Regel über der Schmelztemperatur der Oberflächenversiegelung (Topcoating), sie muss deshalb vor dem Schweißvorgang im Bereich der Naht abgeschliffen werden. Die Schweißnahtbreite beträgt zwischen 30 und 100 mm.

PTFE-beschichtete Glasfasergewebe, PTFE-Gewebe mit oder ohne Beschichtung werden durch Heizelementschweißen verbunden. Generell ist ein Zusatzwerkstoff als Schweißmasse oder Katalysator erforderlich. Die Schweißnahtbreite beträgt in der Regel 60 mm. Baustellenschweißungen werden in der Regel nur als Reparatur kleiner Beschädigungen der Membran oder zum Befestigen von nichttragenden Membranflächen wie Abdeckstreifen vorgenommen. Für PVC-Polyester-membranen wird hierfür das Warmgasschweißen, für PTFE-beschichtete Gewebe Heizelementschweißen eingesetzt.

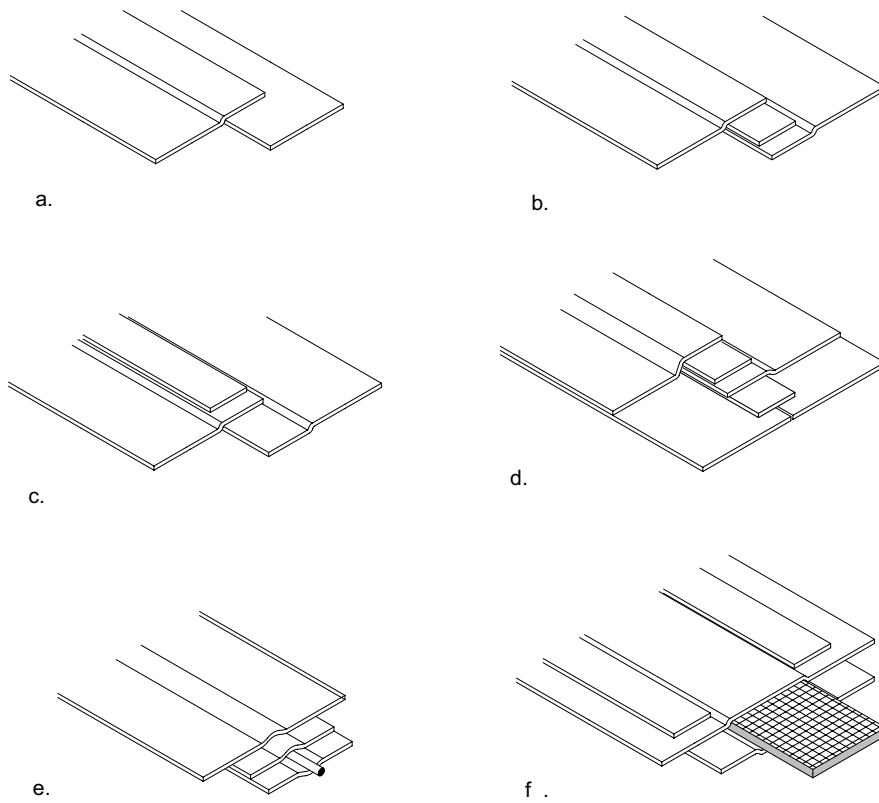
#### *Geklebte Membranverbindungen*

Das Kleben (Vulkanisieren) ist nur bei silikonbeschichteten Gewebemembranen möglich. Die Verbindungen weisen eine hohe Dichtigkeit, aber geringere Tragfähigkeit als Schweißverbindungen auf. Die Verbindungsart wird deshalb vor allem bei pneumatisch stabilisierten Membranbauten verwendet.

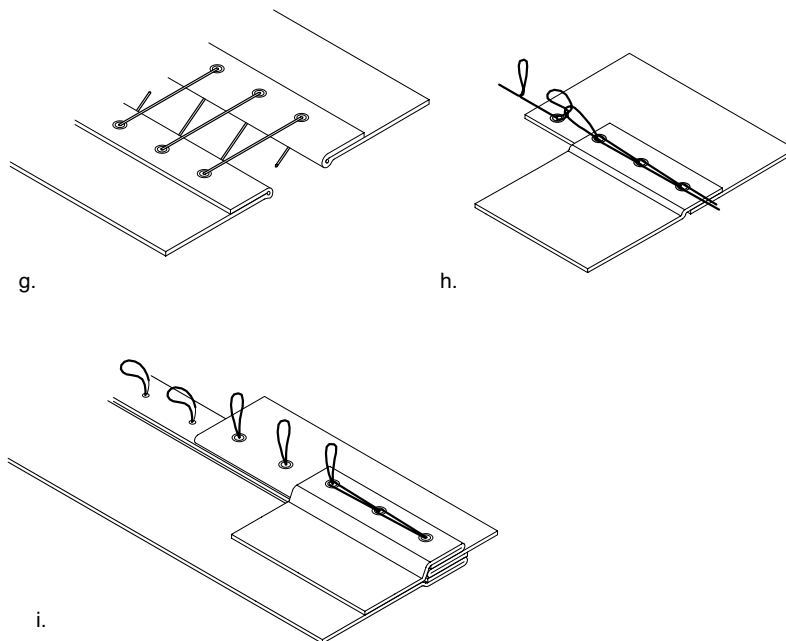
### 2.5.1.2 Lösbare Membranverbindungen

#### *Geschraubte Membranverbindungen*

Geschraubte oder auch Klemmplattenverbindungen genannte Flächenstöße werden vorwiegend als Baustellenverbindung verwendet. Da das Schweißen oder Nähen vorgespannter Membranen im



**Abb. 2-12.** (a) HF- Naht PVC- Polyester Gewebe; (b) Schweißnaht PTFE- PTFE Gewebe mit Zusatzstreifen; (c) Nähnaht mit Abdichtstreifen, (d) Verstärkung für hohe Beanspruchung; (e) Seil in Membrantasche; (f) Gurt in Membrantasche



**Abb. 2-13.** (g) Zickzackstoß; (h) Kettschnürstoß mit laufendem Seil; (i) Kettschnürstoß mit fester Schlaufe

Montagezustand nicht möglich ist, stellen sie die Standardlösung für eine hochbeanspruchte Bauteil-  
lenverbindung dar.

#### *Schnürstoß*

Der Schnürstoß ist nur für die Verbindung niedrig beanspruchter Flächen verwendbar. Auch wegen seiner einfachen Handhabung während der Montage findet er deshalb vielfach Anwendung bei mobilen bzw. temporären Bauten. Der Stoß besitzt durch seine Verschiebbarkeit in Längsrichtung eine hohe Flexibilität, mit der Ungenauigkeiten im Zuschnitt, aber auch lokale Überbeanspruchungen ausgeglichen werden können.

#### *Einfacher Schnürstoß*

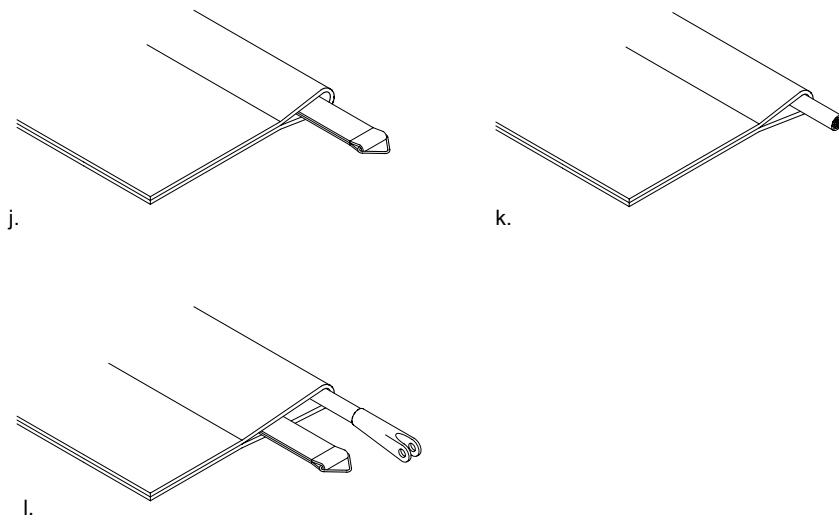
Der einfache Schnür- oder Zickzackstoß verbindet zwei Teilflächen, deren Ränder durch ein Umschlagen, eventuell auch mit einem eingenähten Keder, verstärkt sind. In den doppellagigen Streifen werden die Ösen eingeschlagen, durch die in der Regel Polyesterschnüre kreuzweise gezogen werden. Neben der eingeschränkten Tragfähigkeit begrenzt vor allem die fehlende Dichtigkeit die Einsatzmöglichkeit der Verbindung.

#### *Kettschnürstoß*

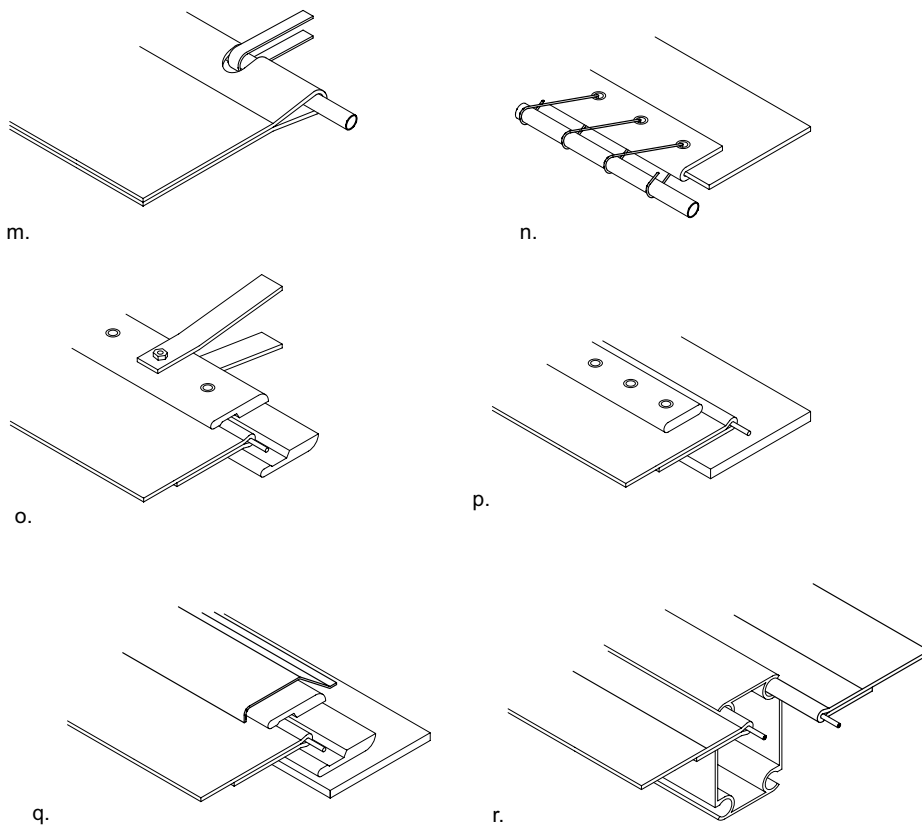
Der Kettschnürstoß ist eine der am häufigsten verwendeten lösbaren Teilflächenverbindungen im mobilen Membranbau. Die Verbindung wird traditionell zum Herstellen dichter und tragfähiger Verbindungen verwendet, ein bekanntes Beispiel sind die zum Teil großen Membrandächer der Chapiteaus (siehe Kapitel 3 S.57). Abbildung 2-13 zeigt zwei mögliche Varianten (i) mit einem durchlaufenden Seil, dessen Schlaufen wiederum miteinander verbunden werden. Diese einfache Technik erlaubt ein Anspannen, aber auch ein sehr schnelles Lösen des Stoßes. Die zweite Variante verwendet auf der verstärkten Stoßkante aufgenähte Seilschlaufen, die beim Schließen fortlaufend ineinander geschlungen werden. Beide Stöße erhalten Abdeckstreifen, um eine ausreichende Dichtigkeit herzustellen.

#### *Reißverschluss/Klettverschluss*

Beide Verbindungsarten werden aufgrund ihrer geringen Tragfähigkeit nur für nichttragende Membranelemente eingesetzt. Der Reißverschluss findet meist zum Öffnen und Schließen von Eingängen kleiner Membranbauten Anwendung. Klettverschlüsse werden im Bereich mobiler Bauten vielfach zum Befestigen von Abdeckstreifen etc. eingesetzt.



**Abb. 2-14.** (j) Gurtrand; (k) Seil in Tasche; (l) Seil in Tasche und eingenähter Gurt



**Abb. 2-15.** (m) Rohr in Tasche; (n) Zickzackrand; (p) Klemmplattenrand; (q) Klemmplatte mit Keder ohne Perforation der Membran; (r) Strangpressprofil mit Kedernuten

## 2.5.2 Randausbildung

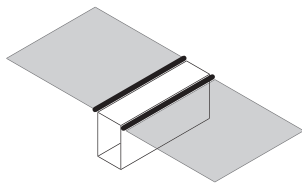
Generell werden zwischen Membran und Rand Kräfte übertragen, die sowohl rechtwinklig als auch tangential zum Rand wirken. Bei der Randausbildung von Membranen wird zwischen weichen und steifen Rändern unterschieden.

### 2.5.2.1 Weicher Rand

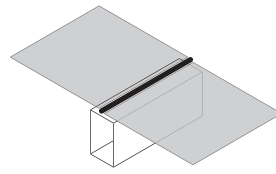
Weiche Ränder werden auch als freie Ränder bezeichnet und weisen immer eine Krümmung auf. Sie erfordern aufgrund der vorwiegenden Zugbeanspruchung den geringsten materiellen Aufwand. Im Gegensatz zu den biegebeanspruchten steifen Rändern erlauben sie sehr filigrane Konstruktionen. Ihr Nachteil ist der sich oft schwer an die übrige Konstruktion anpassbare Verlauf der Randkurve, der durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst wird: Art der Randkonstruktion, Lage der Endpunkte, Länge bzw. Stich der Krümmung, vorgegebener Membranspannungszustand, Membranmaterial und Ausrichtung, Zuschnitt und Nahtverläufe, Höhe der Vorspannung und eventuelle Reibung zwischen Seil und Membrantasche. Die Vielzahl der Parameter verdeutlicht, dass ein endgültiger Randverlauf nur schwer vorgegeben werden kann. Deshalb ist immer eine Möglichkeit zum Nachspannen des Randes vorzusehen, um durch Änderung der Vorspannung Korrekturen der Form vornehmen zu können. Weiche Ränder werden meist als Gurtrand, Seil in Tasche oder Seil in Tasche mit aufgenähtem bzw. eingenähtem Gurt realisiert. Insbesondere Gurtränder finden im mobilen Membranbau Anwendung, da die zu übertragenden Kräfte geringer und Gurte für die häufige Montage und Demontage weitaus besser geeignet sind. Weitere Möglichkeiten einer weichen Randausbildung sind frei laufende Seile, an denen die mit Klemmplatten gefasste Membran durch Metallaschen befestigt wird, oder ein Zickzackrand.

### 2.5.2.2 Steifer Rand

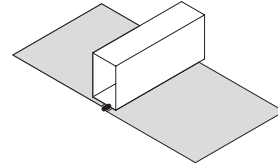
Steife Ränder von Membranflächen können gerade oder gekrümmt sein. Sie sind zug-, druck und teilweise hoch biegebeansprucht und damit sehr materialintensive Tragelemente. Ihre Biegebeanspruchung schränkt im Gegensatz zu den weichen Rändern ihre Spannweite erheblich ein. Für die Verbindung der Membran an steife Elemente, wie z.B. Balken oder Bögen aus Stahl, wird meist ein Kederanschluß mit Klemmleiste verwendet. Durch die Klemmwirkung der Profile wird eine Beweglichkeit der Membran in Längsrichtung verhindert. Das hat zur Folge, dass bei Dehnungen aus Lasten tangential zum Rand Faltenwürfe bzw. die Gefahr des Versagens der Membran entstehen können.



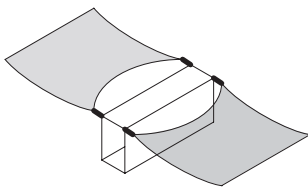
a. Steifer Rand zwischen Stützkonstruktion



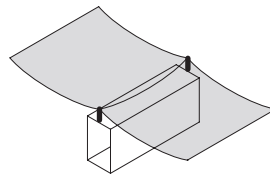
b. Steifer Rand über Stützkonstruktion



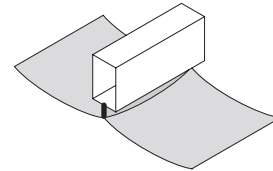
c. Steifer Rand unter Stützkonstruktion



d. Weicher Rand zwicher der Stützkonstruktion



e. Weicher Rand über der Stützkonstruktion



f. weicher Rand unter der Stützkonstruktion

**Abb. 2-16.** Geometrische Beziehung zwischen Membran und Stützkonstruktion



### 2.5.3 Räumliche Anordnung der Membran im Primärtragwerk

Die räumliche Anordnung der weichen Membranelemente in Bezug auf das in der Regel starre Primärtragwerk ist ein weiterer Faktor, der die Montage von Hülle und Tragwerk bzw. der Gesamtkonstruktion beeinflusst. Entsprechend der Hauptgeometrie und der Randausbildung der Membran sind verschiedene Varianten möglich, die sich in drei Gruppen zusammenfassen lassen: Hülle zwischen der Tragstruktur, Hülle über der Tragstruktur und Hülle unter der Tragstruktur. Befindet sich die Hülle zwischen dem Primärtragwerk, sind die Elemente und Anschlüsse des Tragwerks nicht durch die Hülle vor Witterungseinflüssen geschützt. Das Herstellen dichter Anschlüsse insbesondere für mobile Konstruktionen ist sehr aufwendig und störungsanfällig. Die Hülle ergibt sich aus der Montage einzelner Membranmodule. Im Zusammenhang mit wandelbaren Tragwerken kann die Montage der Hülle entweder vor oder nach dem Aufrichten des Tragwerks erfolgen. Befindet sich die Hülle über dem Tragwerk, sind alle Elemente des Tragwerks vor Witterungseinflüssen geschützt. Die Hülle kann als eine Gesamtfläche montiert werden. Damit wird die Anzahl der Randanschlüsse minimiert und aufwendige Details vermieden. Bei wandelbaren Tragwerken ist eine Montage der Hülle vor dem Aufrichten des Tragwerkes sinnvoll und erlaubt ein schnelles und effektives Arbeiten am Boden. Ist die Hülle unterhalb des Primärtragwerks angeordnet, entfällt der Witterungsschutz für das Tragwerk. Dafür kann die Hülle als eine Fläche montiert werden und die Anschlussdetails zwischen Membran und Primärtragwerk vereinfachen sich, insbesondere bei einer freien Randausbildung. In der Regel wird das Tragwerk zuerst errichtet und kann zur Montage der Hülle als Hilfskonstruktion verwendet werden.



## 3 Geschichtliche Entwicklung

Mobile Membrankonstruktionen sind seit dem Paläolithikum ein fester Bestandteil der traditionellen Architektur. Die ersten selbst gestalteten menschlichen Behausungen waren in der Regel mobile Bauten, die dem Nomadenleben der Jäger, Sammler und Viehzüchter entsprachen. Weiche Materialien wie z.B. Tierhäute werden hierbei als Hülle für ein Skelett bestehend aus geraden oder gekrümmten Stäben verwendet. Die einfache Architektur dieser frühen Bauwerke war den unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und Arten des Nomadentums angepasst.

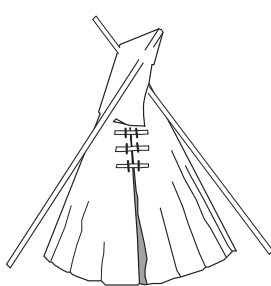


Abb. 3-1. Tipi

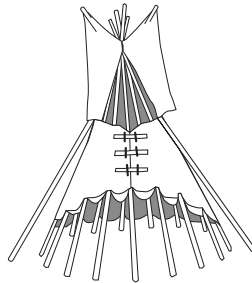
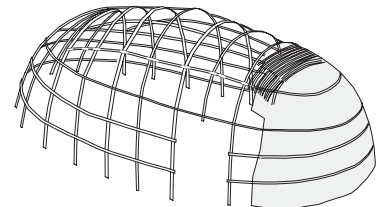


Abb. 3-2. Kutuk



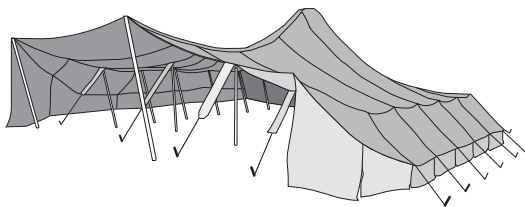
### 3.1 Traditionelle Zelte

Der Begriff Zelt wird für eine Vielzahl sehr unterschiedlicher mobiler Bauten der traditionellen Architektur verwendet. Ein Urtyp ist das kegelförmige Stangenzelt, das in vielfältiger Form bis heute Verwendung findet. Bekannt geworden als das Tipi der nordamerikanischen Prärieindianer wird es noch heute von den Rentierzüchtern Lapplands bzw. Sibiriens benutzt. Das Tipi ist nicht nur eine der bekanntesten mobilen Membrankonstruktionen, sondern auch eines der ältesten Beispiele für die Anwendung einer wandelbaren Außenhülle überhaupt. Die auf den Stangen aufliegende Zelthaut wird an einer Seite durch Knebel zusammengehalten, durch die die Größe des Eingangs und des Rauchabzugs geregelt wird.

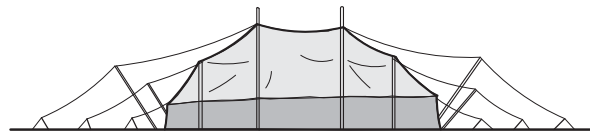
Ein weiterer Grundtyp sind die tonnen- oder kuppelartig geformten Behausungen der Nomaden Zentralasiens wie z.B. das Kutuk oder die Jurte. Auch bei diesem Typ bedeckt eine weiche Hülle, beste-

hend z.B. aus Filzdecken (Jurte), Pflanzenmatten (Kutuk) oder Rutenbündeln ein darunterliegendes, in sich stabiles Stabwerk aus Holz.

Die durch die Knappheit des Baustoffs Holz geprägten Zeltkonstruktionen der nordafrikanischen oder tibetischen Nomaden (Abb. 3-3) unterscheidet sich wesentlich von den Konstruktionsweisen von Tipi und Tonnen- bzw. Kuppelzelt. Stützstangen, Abspannungen und eine textile Membran bilden hier ein Gesamtsystem, bei dem die Hülle als ein Teil des Primärtragwerks zur Gesamtstabilität beiträgt. Die einfache Hochpunkt konstruktion des nordafrikanischen Beduinenzeltes erlaubt als wandelbare Konstruktion auch eine schnelle Anpassung der Form an eine hohe Windbelastung. Bei Sturm kann durch das Herausnehmen der Stützstangen und der Änderung des Abspannwinkels der Luvseite eine strömungsgünstigere Form erreicht werden.



**Abb. 3-3.** Nordafrikanisches Beduinenzelt



**Abb. 3-4.** Tibetisches Nomadenzelt

Von der Antike bis zum 19. Jahrhundert verlagerte sich die Nutzung der Zeltbauten auf den Gebrauch als Veranstaltungs- und Versammlungsraum oder Unterkunft für militärische Zwecke. Die Grundtypen der Konstruktionen änderten sich dabei kaum. Es wurden hauptsächlich Gestell- und Gerüstzelte [11] oder einfache abgespannte Konstruktionen eingesetzt. Die Stabwerke der Gestelle waren in sich stabil oder wurden durch zusätzlich Abspannungen versteift, die Membran bestand aus gewebten Tuchbahnen ohne Zuschnitt. Die abgespannten Konstruktionen nutzten das Prinzip des Beduinenzeltes für punktgestützte Membranflächen kleiner Spannweite. Die geometrisch einfach bestimmbar en Formen der Bauten - Quader, Prisma, Kegel und Pyramide - wurden aus ebenen Flächen gebildet.

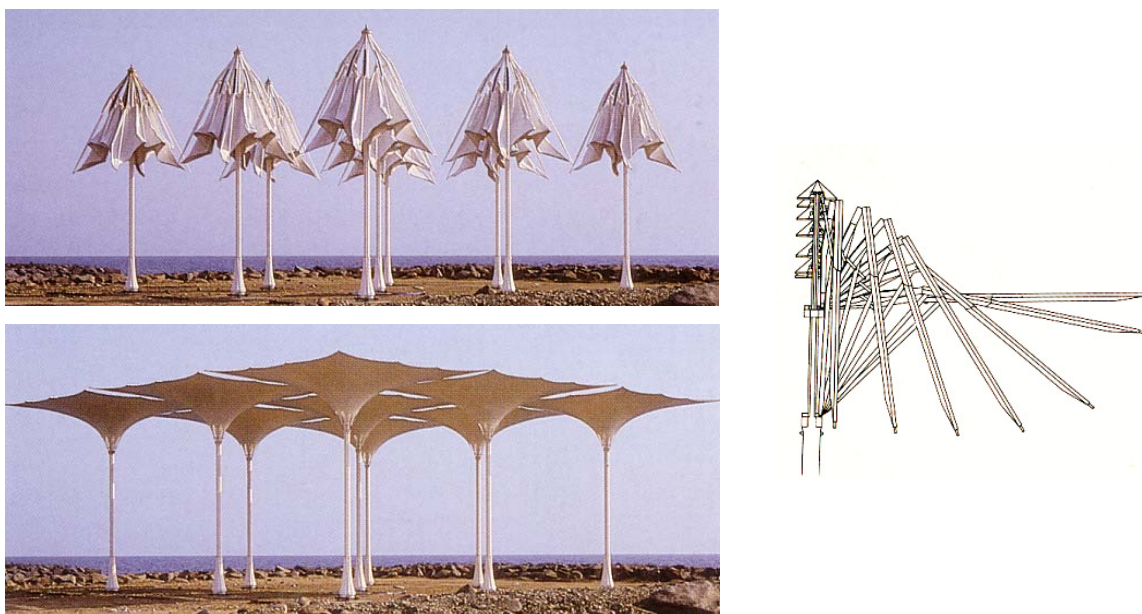
Trotz der einfachen Konstruktionsweise hatten einige dieser Bauten erstaunliche Dimensionen. So hatte zum Beispiel das Bankettzelt Heinrich des VIII., das 1520 in Calais anlässlich eines diplomatischen Treffens errichtet wurde, einen Durchmesser von 17m. Sein zweilagiges textiles Dach wurde

von einem Zentralmast mit 40m Höhe gestützt. [36] Das Gebäude, Teil einer Zeltstadt mit insgesamt 400 Bauten [11], wurde jedoch noch vor seiner Eröffnung durch einen Sturm zerstört.

### 3.2 Schirme

Der Schirm ist wahrscheinlich die älteste Form einer wandelbaren und mobilen Überdachung kleiner Spannweite. Die älteste bekannte Darstellung eines Schirmes stammt bereits aus dem 13. Jhd. v. Chr., die älteste Darstellung eines zusammenklappbaren Schirms aus dem 5. Jhd. v. Chr. [30]. Sein Konstruktionsprinzip blieb über die Jahrhunderte fast unverändert. Druckbeanspruchte Stäbe, die an einem Mittelstab starr oder gelenkig befestigt werden, spannen eine zugbeanspruchte Membran aus verschiedensten Materialien auf.

Ende der 80er Jahren wurde durch das Büro SL Rasch in Zusammenarbeit mit Frei Otto eine ganze Serie von Großschirmen mit Spannweiten bis zu 23 m entwickelt und realisiert [58]. Mit Hilfe der neuen Ingenieurwerkzeuge zur numerischen Formfindung, Simulation von Bewegungsabläufen und neuer entwickelter Membranwerkstoffe wurden dabei die technischen Möglichkeiten des Systems einer Schirmkonstruktion weitgehend ausgenutzt. Allgemein bleiben die Einsatzmöglichkeiten von Schirmlösungen begrenzt, da das System einer frei auskragenden vorgespannten Membran über einer eingespannten Stütze aufgrund seiner Anfälligkeit gegen Windbelastungen keine unbegrenzte Steigerung der Spannweiten zulässt und die erforderliche Ausbildung des Mechanismus bzw. des Tragwerks generell wirtschaftlich aufwendige Lösungen verursacht.



**Abb. 3-5.** Schirme 5x5 m, SL Rasch GmbH 1989

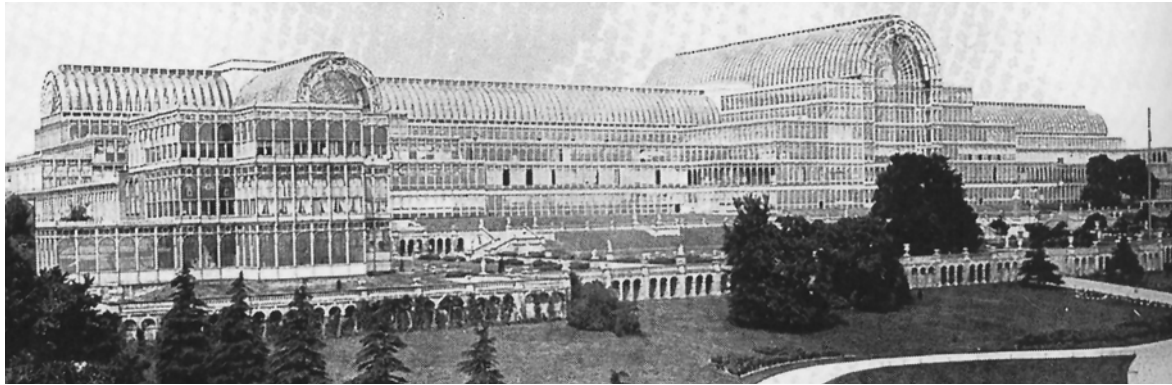


Abb. 3-6. Crystal Palais 1851 Aussenansicht (24)

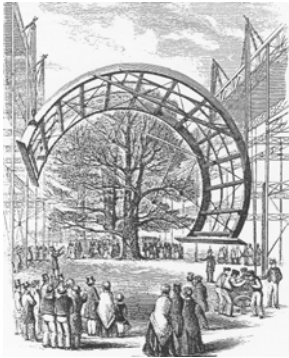


Abb. 3-7. Montage Crystal Palace (18)

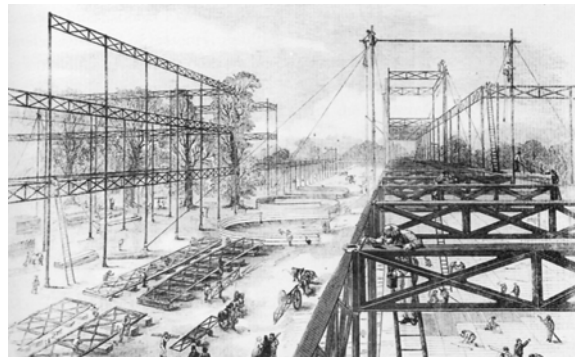


Abb. 3-8. Montage Crystal Palace (10)

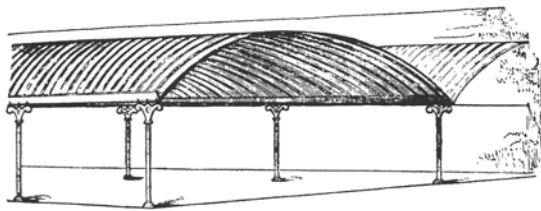


Abb. 3-9. Mobile Halle mit Wellblechdach 1832 (25)

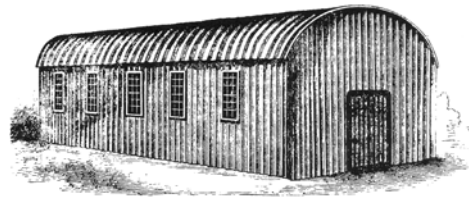


Abb. 3-10. „Portable Cottage“, 1850 (25)

**FULTON WALL TENTS.**  
HIGHEST QUALITY.

We give you on 8-ounce for one-quarter a half more than very slightly, a A 9 1/2 x 12-foot summer kitchen. We are the brated Fulton.

We es feet to prompt allow th the ten Warn in our it rope up tent's in

Labels in drawing: DAMAGED CORNER, ROPES AT TRY SEAM, WALLS GUARANTEED FULL HEIGHT, ROPES SENT WITH BEST COTTON TWINE, FITTED HEAVY CABLE, FITTED DOUBLE RIBBINGS, GUARANTEED FULL HEIGHT, DOOR HAS FULL SIZE, STURDY LAPS.

Abb. 3-11. Zelt aus einem Versandkatalog Ende 19.Jhd. (26)

**Tente Conique à Mât Central**  
dite "Marabout"

Modèle de l'Armée française

Entièrement en Toile à Tente N° 668.

	Diamètre 5 <sup>m</sup> .	Diamètre 4 <sup>m</sup> .	Diamètre 6 <sup>m</sup> .
Non Doublée.	130 fr.	180 fr.	220 fr.
Double Toile.	185 fr.	245 fr.	295 fr.

Prix, absolument complètes, conformes aux livraisons à l'État.

Abb. 3-12. Französisches Militärlzelt 19.Jhd.(9)

### 3.3 Weitgespannte Konstruktionen

Mit der industriellen Revolution zu Beginn des 19. Jhd. und den Veränderungen der wirtschaftlichen und politischen Verhältnisse entstanden vollkommen neue Aufgaben und Möglichkeiten im Bauwesen. Neue Gebäudetypen wie Fabrik- und Ausstellungshallen oder große Versammlungs- und Veranstaltungsräume für die öffentlichen Aktivitäten des neuen Bürgertums wurden aufgrund der schnellen Entwicklung der Industriezentren oft als temporäre bzw. mobile Konstruktionen geplant und realisiert. Die starke koloniale Expansionspolitik verursachte einen großen Bedarf an mobilen Bauten unterschiedlichster Nutzung.

Neu entwickelte Baustoffe, wie das z.B. das Gusseisen, und die Industrialisierung des Bauens ermöglichten das Planen und Bauen mit normierten, seriell hergestellten Elementen. Durch die Entwicklung und Anwendung statischer Berechnungsmethoden, wie z.B. die Fachwerktheorie, wurde die Realisierung kühner und filigraner Konstruktionen möglich, denen ein Wissen über Kraftfluss und Materialverhalten zugrunde lag.

Eines der eindrucksvollsten Beispiele für eine temporäre und mobile Konstruktion dieser Zeit ist Joseph Paxtons Crystal Palace für die Weltausstellung von 1851. Das 563 m lange, 124 m breite und 33 m hohe Gebäude wurde in einer Rekordzeit von nur 4 Monaten montiert. Das konsequent modular aufgebaute Tragsystem und der Einsatz lösbarer Verbindungsdetails ermöglichte die Demontage der kompletten Konstruktion und einen Wiederaufbau an einem anderen Standort. Die Vorteile der industriellen Vorfertigung von Eisenelementen führte dazu, dass insbesondere in England in der Mitte des 19. Jhd. Fenster, Stützen, Bögen, Träger und später sogar ganze Gebäude aus Gusseisen in großen Stückzahlen hergestellt wurden. 1844 wurde der erste Leuchtturm aus Eisen in London vorgefertigt und montiert, demontiert und auf die Bermudas verschifft um dort erneut errichtet zu werden. Im gleichen Jahr entwickelt John Spencer die maschinelle Herstellung von Wellblech, das sich rasch zu einem der wichtigsten Konstruktionselemente für mobile Bauten entwickeln sollte.

Durch die industrielle Herstellung von Baumwollgeweben konnte dieser Werkstoff bald in großer Menge für die serielle Herstellung kleiner Zelte, aber auch als leichte und kostengünstige Hülle temporärer und mobiler Bauten großer Spannweite verwendet werden.



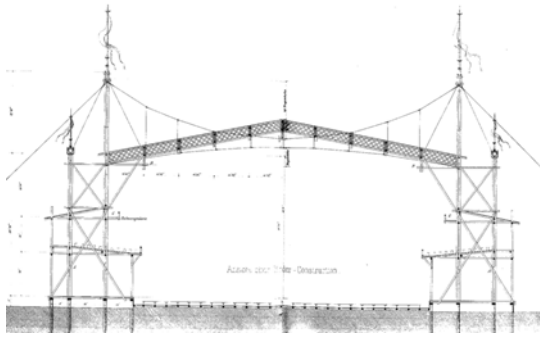


Abb. 3-13. Sängersaal Dresden 1865 (11)

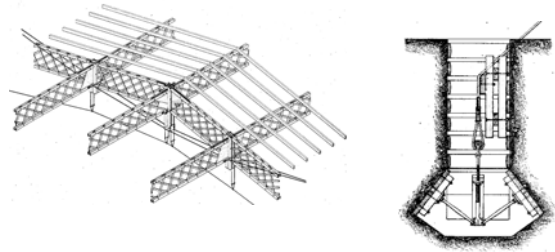


Abb. 3-14. Axonometrie Dachtragwerk, Bodenanker (11)

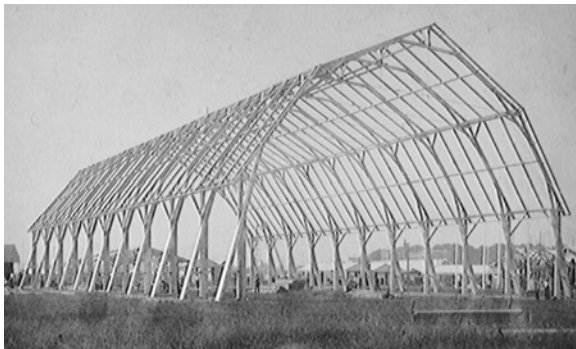


Abb. 3-15. Leihalle L.StromeyerStromeyer & Co, Holzkonstruktion ca.1911 (1)

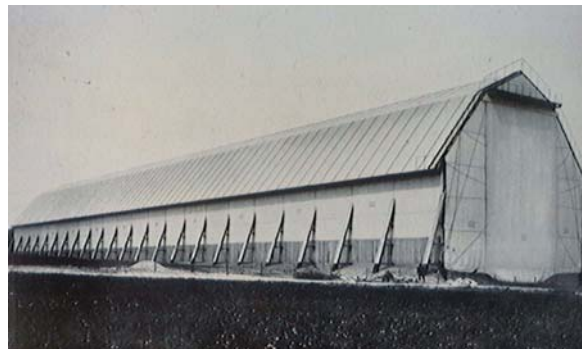


Abb. 3-16. Leihalle L.Stromeyer & Co, Holzkonstruktion ca.1911 (1)

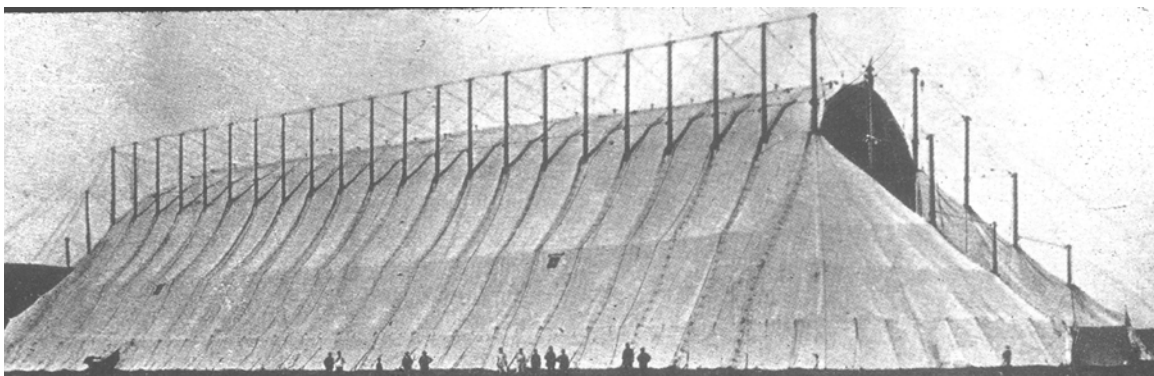


Abb. 3-17. Luftschiffhangar, Behrens & Kühne, Stahlkonstruktion 1911 (1)

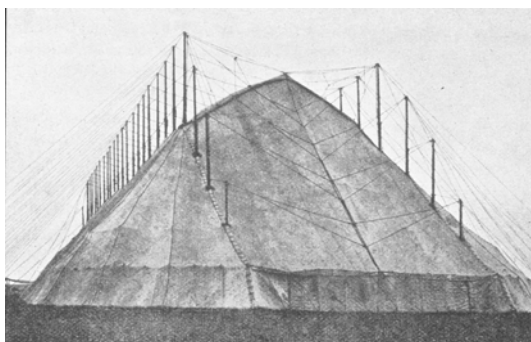


Abb. 3-18. Luftschiffhangar, Behrens & Kühne 1911 (1)

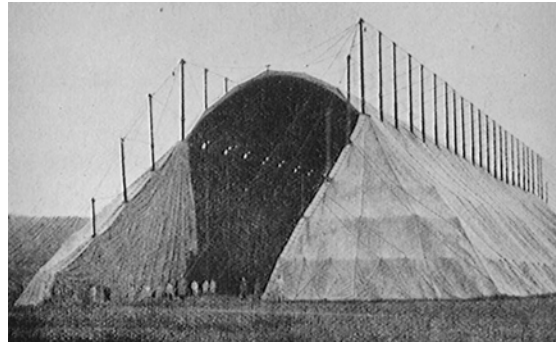


Abb. 3-19. Luftschiffhangar, Behrens & Kühne 1911 (1)



### 3.3.1 Sängerhallen

Die Dresdner Sangerfesthalle von 1865 ist ein erstes Beispiel einer ganzen Reihe von temporären Festhallen, die bis Anfang des 20. Jahrhunderts vorwiegend als Holzkonstruktionen entstanden. Die oft erstaunlich filigranen Konstruktionen mit bis zu 60m Spannweite waren meist mit Bretterschalungen oder Segeltuchbahnen gedeckt. Die begrenzten Standzeiten erlauben die Annahme reduzierter Belastungen und die Akzeptanz großer Verformungen. In der Regel wurden diese Bauwerke nicht als mobile Konstruktionen geplant.[15] Für das Sangerfest in Nürnberg 1911 wurde erstmals ein mobiles Leihzelt errichtet, das über 30 000 Sängern für eine Woche Platz bot.

### 3.3.2 Leihhallen und Luftschiffhangars

Diese vorgefertigten Leihzelte oder -hallen entstanden Ende des 19.Jhd. bzw. zu Beginn des 20.Jhd. für Gewerbe- und Industrieausstellungen als transportable, wiederverwendbare Konstruktionen. In der Regel handelte es sich auch hier um Holzkonstruktionen mit Segeltuchbespannungen. Einer der bekanntesten Hersteller solcher Leihhallen war die Konstanzer Zeltbaufirma L.Stromeyer & Co, die auch die Sangerhalle in Nürnberg realisierte. In den ersten Jahren des Luftschiffbaus von 1889 bis 1908 wurde weitgehend nur die kurzfristig verfügbaren Leihhallen als Hangars verwendet [12]. Mit einem 1908 ausgelobten Wettbewerb begann dann eine rege Entwurfs- und Bautätigkeit von Luftschiffhangars an der sich neben den Herstellern von Leihhallen auch Betriebe und Spezialabteilungen großer Firmen beteiligten, die eigens für diese Bauaufgabe gegründet worden waren. Aus dieser Zeit stammt auch das erste Beispiel einer versetzbare Luftschiffhalle der Firma Behrens und A.Kühne von 1911 [12]. Die Konstruktion mit einer Länge von 100 m bei einer Breite von 20 m und Höhe von 24 m bestand aus einem Primärtragwerk aus Stahl und einer Hülle aus Segeltuch (Baumwollgewebe).

Die Konstruktionen der Luftschiffhangars weisen einen starken Einfluss der Ingenieurtechnik der Luftschiffahrt auf. Ausdruck dafür sind ihre konsequente Leichtbauweise, der Einsatz von Bewegungsmechanismen für wandelbare Dach- und Wandelemente, sowie die Anwendung neuester Berechnungs- und Versuchsmethoden zur Lastermittlung und Materialprüfung. So wurden z.B. in Deutschland 1914 für verschiedene Querschnitts- und Grundrissformen von Luftschiffhangars Windkanalversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der ebenfalls in dieser Zeit unternommenen ersten biaxialen Zugversuche für das gummierte Baumwollgewebe der Luftschiffhaut, fand jedoch noch keinen Niederschlag im Bau von Leihhallen, Hangars oder weiteren Membranbauten [12].

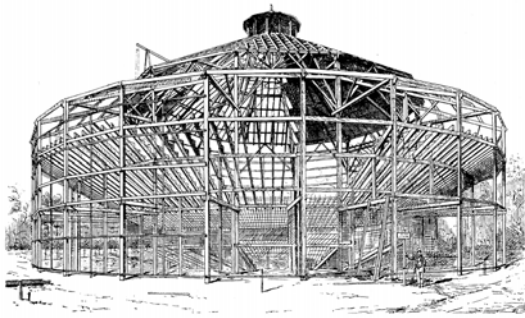


Abb. 3-21. Zirkus Marseille 1893 (13)

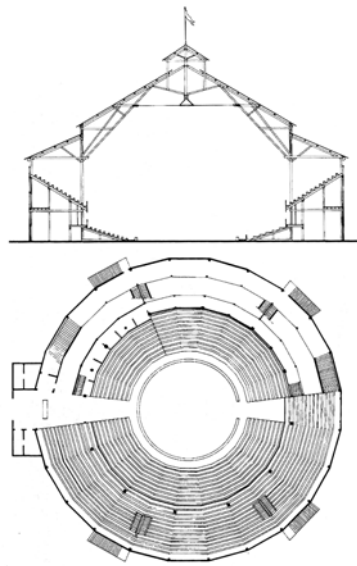


Abb. 3-20. Zirkus Marseille Schnitt, Grundriss (13)

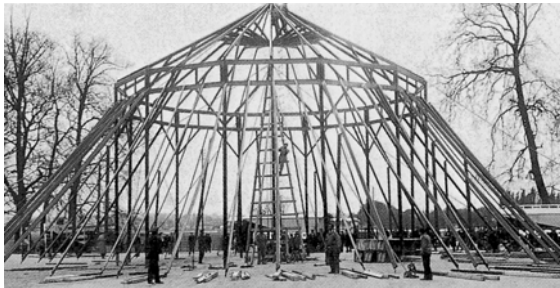


Abb. 3-22. Zirkus Medrano, Caen (9)



Abb. 3-23. Zirkus Mikkenie 1953 (9)



Zirkus Napoleon Rancy 1946 (9)



Abb. 3-24. Spiegelzelt Innenansicht 2003 (48);

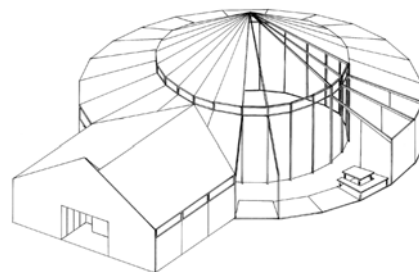


Abb. 3-25. Konstruktionsprinzip (12)

### 3.3.3 Zirkusbauten

Neben den Leihhallen sind Zirkusbauten die ersten weitgespannten Membranbauwerke, die für einen mobilen Einsatz geplant und konstruiert wurden. Sie lassen sich je nach Art des Primärtragwerks in zwei Grundtypen unterscheiden: das in sich stabile Gestellzelt und das abgespannte Chapiteau.

#### 3.3.3.1 Gestellzelte

Das in [55] sorgfältig dokumentierte Projekt „eines versetzbaren Zirkus zu Marseille“ von 1896 ist eines der ersten Beispiele für den Typ des Gestellzeltes. Die Holzkonstruktion erlaubte einen stützenfreien Innenraum von ca. 40 m bei einer Raumhöhe von fast 27 m. Bolzenverbindungen sicherten einen schnellen und einfachen Aufbau, die Aussteifung wurde mit schmiedeeisernen Zugstangen realisiert. Dachhaut und Fassade bestanden aus Segeltuch. Zur gleichen Zeit wurden aber auch schon Gestellzelte mit eisernen Stabwerken verwendet.[24]

Der Zirkus Mikkenie von 1948 ist eine der ersten belegten Aluminiumkonstruktionen. 122 Aluminiumstützen ordneten sich in drei konzentrischen Kreisen mit Durchmesser von 7, 14.50 und 22 m an. Die Dachhaut bestand aus Baumwollgewebe, die Fassade aus Holzpaneelen. Das Zelt faßte bis zu 4000 Zuschauer. Die Montage war sehr kompliziert und nur mit Hilfe eines provisorischen Zentralmastes möglich, der nach Fertigstellung der Gesamtkonstruktion wieder entfernt wurde. Der Zirkus Napoleon Rancy von 1946 hatte einen Durchmesser von 41 m. Die Zeltkuppel mit einem Durchmesser von 15.6 m wurde von acht Stahlrohrstützen mit einer Höhe von 11.50 m gehalten. Der Zirkus konnte bis zu 3000 Zuschauer aufnehmen. Sein Konstruktionsgewicht betrug 120 t, die Montagezeit 4 Tage.

Eine besondere Form der Gestellzelte entwickelte sich mit dem Spiegelzelt als „Danssalon“ im belgisch-flämischen Raum gegen Ende des 19. Jhd. Diese mobilen Ballsäle bestanden wie die Gestellzelte der Zirkusbauten aus einer in sich steifen Holzkonstruktion mit einer Dachhaut aus Segeltuch und einer Fassade aus festen Holzpaneelen. Der Zentralraum mit runder Tanzfläche, umgeben von einem Säulengang mit dahinterliegenden Sitznischen, war stark mit Holzschnitzereien, ornamentaler Bemalung und Spiegeln dekoriert, um die Illusion eines Tanzsaales zu erzeugen. Neben der runden Grundform wurden auch rechteckige längsgerichtete Varianten mit einem Basilikaquerschnitt realisiert, die als die Vorläufer der heute genutzten Rahmenhallen für Bier- und Festzelte gelten können.[23] Einzelne historische Spiegelzelte sind auch heute noch in Gebrauch

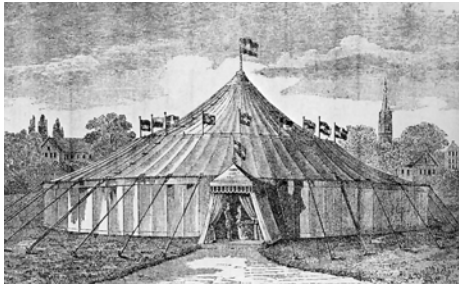


Abb. 3-26. Chapiteau 1893 (1)

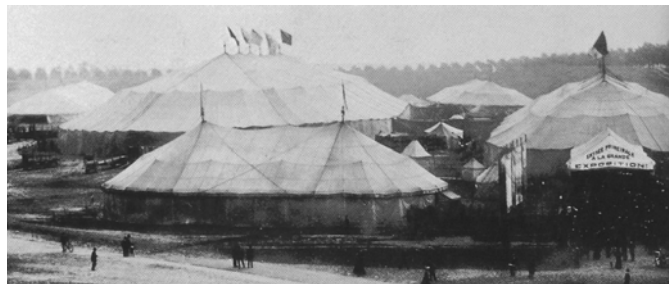


Abb. 3-27. Chapiteaus Barnum & Bailey (9)



Abb. 3-28. Innenansicht Barnum & Bailey (9)

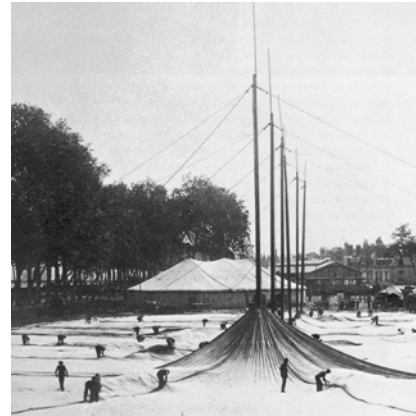


Abb. 3-29. Aufbau eines Chapiteau (9)



Abb. 3-30. Chapiteau Zirkus Zanfretta (9)



Abb. 3-31. Chapiteau Zirkus Apollo (17)

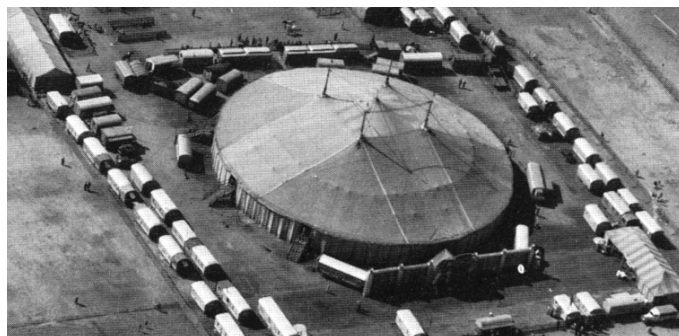


Abb. 3-32. Chapiteau Zirkus Krone (17)

### 3.3.3.2 Chapiteau

Das Chapiteau ist sicherlich das erfolgreichste Konstruktionsprinzip einer mobilen weitgespannten Membrankonstruktion und wird seit fast 150 Jahren nahezu unverändert verwendet. Das Primärtragwerk besteht aus den zwei oder mehr Hauptmasten, die durch Seilverspannungen untereinander und durch Abspannungen gesichert sind. Sie dienen als Stützung einer punkt- bzw. linienförmig gelagerten Membran, die mit Hilfe von einfachen lösbaren Verbindungen aus Teilflächen zusammengefügt wird. Die Membran wird an den Hauptstützen emporgezogen und nach außen über Sturm- und Rondellstangen abgespannt. Die Flächen der Dachmembrane ist in mehrere Bereiche mit antiklastischer Krümmung geteilt. Die Seitenwände sind ebene bzw. leicht einfach gekrümmte Membranflächen.

Die größten und kompliziertesten Membranbauten dieser Bauart verwendete der US-amerikanische Zirkus „Barnum and Bailey“. Auf seinen Tournéeen in Europa 1897-1902 reiste das Unternehmen mit 14 Zelten von Aufstellort zu Aufstellort. Die minimale Nutzfläche pro Zelt betrug 600 m<sup>2</sup>. Das größte Zelt mit einer Grundfläche von 130 m auf 54 m bot 10.000 Zuschauern, 3 Manegen und zwei Bühnen Platz.[36] Als Membranbaumaterial wurde Baumwollgewebe verwendet. Die Formfindung für die Dachmembran beruhte auf der praktischen Erfahrung der Sattlermeister, die geschickt die elastische Anpassungsfähigkeit des Materials und eine einfache „Hohlschnitttechnik“ nutzten, um weitgehend faltenfreie Flächen mit einer doppelte Krümmung herzustellen. Dazu wurde aus der Kegelfläche der Gesamtgeometrie des Daches das überflüssige Material in den Teilflächen zwischen den Masten herausgeschnitten. Kleine Fehler und Ungenauigkeiten konnten durch die meist in einem vierjährigen Rhythmus stattfindende Erneuerung schrittweise verbessert werden. [32]

Die Konstruktion des zeitgenössischen Chapiteaus hat sich seitdem grundsätzlich nur in den verwendeten Baustoffen verändert. Die Stahlmasten werden heutzutage aus Rundrohr- oder Viergurträgersegmenten zusammengefügt, die Membran besteht aus PVC-Polyester. Die Ränder der Teilflächen sind mit Polyestergurten verstärkt, werden aber weiterhin mit der traditionellen Schnürstosstechnik verbunden. Als Abspannung werden Stahl- und Hanfseile sowie Polyestergurte verwendet. Der Zuschnitt der Membran erfolgte bis die 80er Jahre nach der traditionellen Hohlschnittmethode. Mittlerweile werden aber auch hier numerischer Formfindungsmethoden und eine computergestützte Ermittlung des Zuschnitts verwendet. Der Versuch einer weiteren Optimierung der Form führte beispielweise zu der Entwicklung eines Chapiteaus für den Zirkus Knie, bei dem die sekundären Sturmstangen durch nach außen ziehende Seile ersetzt wurden, um die Sicht im Innenraum nicht zu behindern.



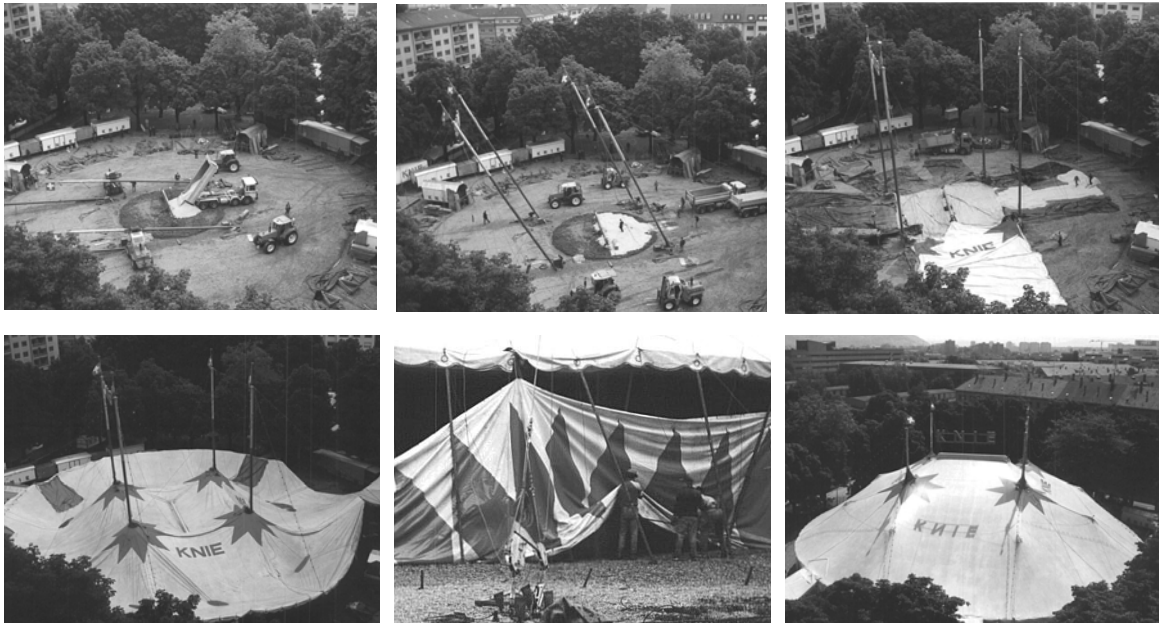


Abb. 3-33. Aufbausequenzen Chapiteau Zirkus Knie 1995, (45)

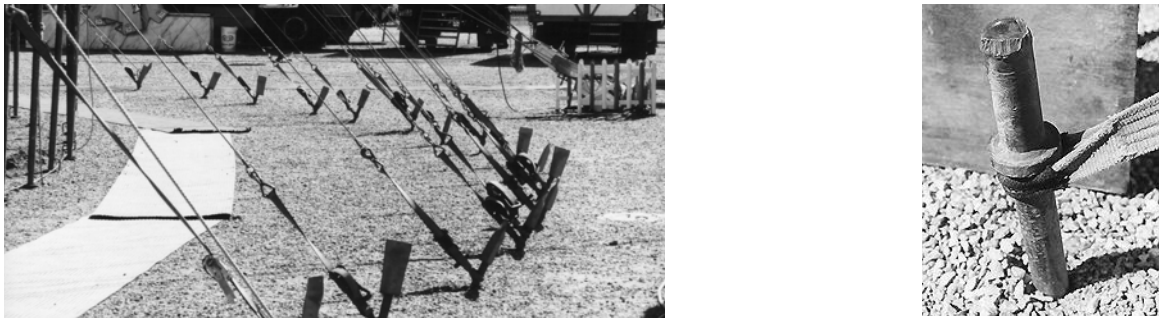


Abb. 3-34. Abspannungen der Rondellstangen und Dachmembran (45)



Abb. 3-35. Aufbausequenzen Chapiteau Zirkus Nock 1994 (45)

Der Aufbau eines Chapiteaus beginnt mit der Errichtung der Hauptmasten. Nach dem Positionieren und der Lagesicherung der Fußplatten mit Erdnägeln werden die Mastsegmente zusammengefügt und gelenkig auf den Fußplatten befestigt. Das Aufrichten der bis zu 24 m hohen Masten erfolgt mit Hilfe von A-Böcken als Hilfsstützen und Flaschenzügen. Dabei werden zum Teil bis zu vier mit Seilen gekoppelten Masten in einer Bewegung aufgerichtet (Zirkus Knie). Die Hauptmasten werden durch Abspannungen in ihrer Lage gesichert. Die Abspannungen sind ebenfalls an mit Erdnägeln gesicherten Fußplatten verankert. Danach werden meist die Randstützen ausgelegt. Die Montage der Membran erfolgt je nach Zeltgröße und Bauart in leicht abgewandelter Form. Bei der „klassischen“ Methode werden die Teilflächen ausgelegt und die an den Masten zusammenlaufenden Ränder durch Schnürstöße verbunden. Die Ecken der am Mastfuß liegenden Teilflächen werden an einem am Mast zentrisch hängenden Mastring befestigt. In der Mitte laufen je nach Bauart die Teilflächen zu einem Firsträger oder einem weiteren Ring zusammen, der ebenfalls über Seile mit den Mastköpfen verbunden ist. Noch bevor die Membran an den Masten emporgezogen wird, werden die Köpfe der Randstützen der sogenannten Rondellstangen und die Abspannungen am Traufband der Dachmembran befestigt. Die Abspannseile sind im ungespannten Zustand schon mit den radial gesetzten Erdankern verbunden, um die kritische Phase der Bewegung der Membran so kurz wie möglich zu halten. Mit dem Hochziehen der Mastringe mit Hilfe von Seilrollen und -winden beginnt die wichtigste Phase der Membranmontage. Während die Dachmembran in der Mitte nach oben gezogen wird, werden gleichzeitig die Randstützen aufgerichtet. Nachdem die Mastringe ihre Endposition erreicht haben und alle Randstützen aufgestellt und gesichert sind, wird die Dachfläche durch die ungefähr im halben Durchmesser angeordneten leicht geneigten Sturmstangen unterstützt und gespannt. Die Sturmstangen stützen die Dachmembran an punktförmig verstärkten Auflagern und werden zugfest mit der Membran verbunden. Ihr Fußpunkt ist frei beweglich. Bei einer Windsogbelastung der Dachmembran werden die Sturmstangen mit dieser zusammen angehoben und verändern dadurch ihre Neigung. Bei Entlastung der Membran sorgt dann die neue Stützhöhe der Sturmstangen weiterhin für eine ausreichende Vorspannung der Membran.[39]

Für die Aufstellung eines Viermast-Chapiteaus ist ungefähr ein Arbeitstag notwendig. Die Zahl der erforderlichen Monteure variiert je nach der Größe der überdachten Fläche, dem Aufwand für Ausbau und Installation und der Aufstellmethode. Habermann gibt in [24] für das Chapiteau des bekannten Cirque du Soleil mit einer überdachten Fläche von ca. 2000 m<sup>2</sup> eine Aufbauzeit von ein- einhalb Tagen mit 10 Monteuren in den ersten 8 Stunden, und bis zu 100 Personen in den folgenden Stunden an. Der zweite Arbeitstag dient dabei vor allem dem Ausbau und der Installation. Die aus 8

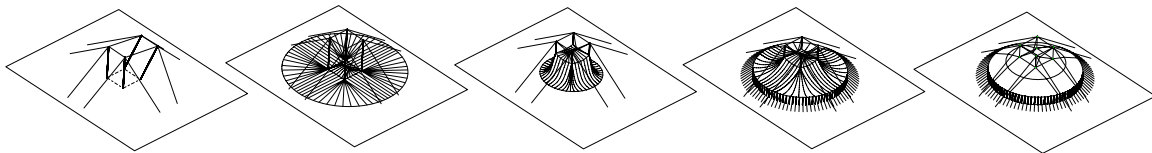
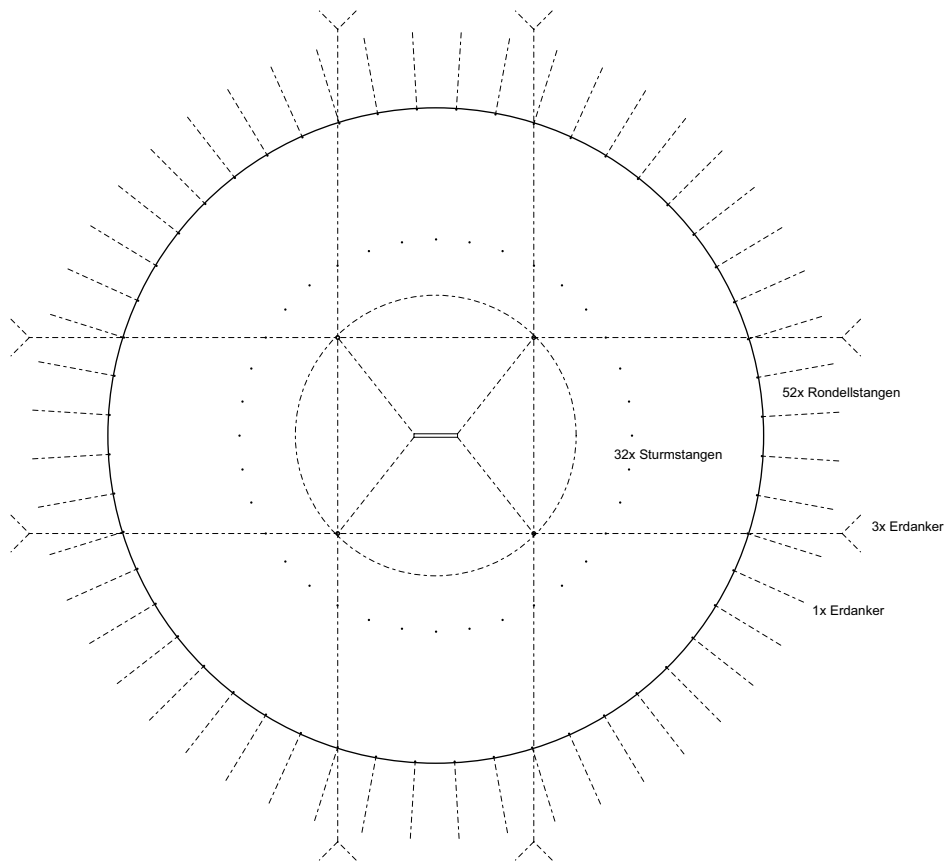
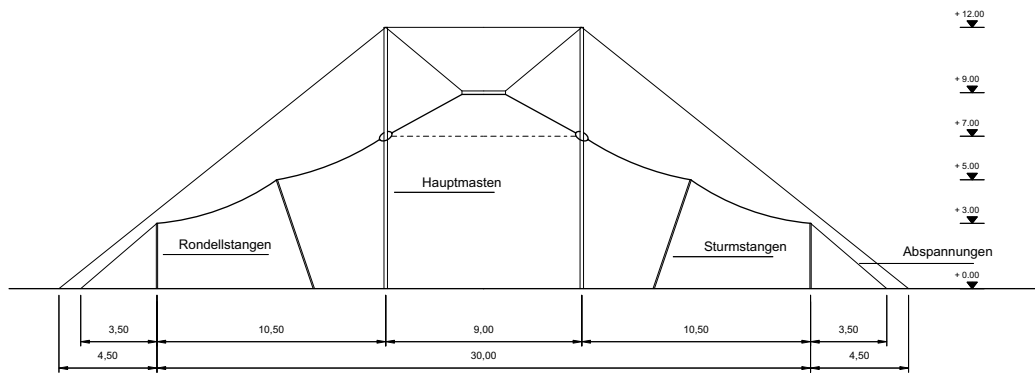


Abb. 3-36. Chapiteau, Schnitt Grundriss, Aufbausritte



Teilflächen bestehende Dachhaut wird von vier Hauptmasten mit einer Höhe von 24m gestützt und über 120 Rondellstangen abgespannt. Der Circus Knie benötigt für sein Chapiteau vergleichbarer Größe 5-6 Stunden mit 28 Monteuren. Hier werden die vier untereinander gekoppelten Masten mit Hilfe eines Hubstblers am Mastkopf angehoben und dann in einer Bewegung aufgerichtet. Für die Sicherung der Mastfüße, der Ankerplatten der Mastseile und der Abspannungen der Rondellstangen sind zwischen 140 und 160 Erdnägel einzuschlagen.[85] Das deutlich größere Chapiteau des Circus Krone mit einer überdachten Fläche von 3000 m<sup>2</sup> wird mit ca. 60 Monteuren innerhalb eines Arbeitstages errichtet.[76] Hier beträgt die Anzahl der erforderlichen Erdnägel ca. 250. Zur Beschleunigung des Montageprozesses wird zum Teil mit zwei Sätzen von Hauptmasten gearbeitet, die ein Aufstellen der Masten am neuen Standort noch vor dem Abbau der Konstruktion am alten Aufstellort erlauben.

Trotz seiner über viele Jahre hinweg erprobten und perfektionierten Konstruktion weist das System des Chapiteaus zwei grundsätzliche Nachteile auf. Zum Einen ist der Innenraum immer durch die Hauptmasten und Sturmstangen beeinträchtigt, zum Anderen ist für die Abspannung der Konstruktion eine große Anzahl von Erdankern erforderlich. Das von dem Niederländer A. Maring mit der Firma L. Stromeyer entwickelte Prinzip des Parasolzeltes kann durch die Einführung eines Druckrings, der die Zugkräfte aus der Membran kurzschließt, zumindest diesen Nachteil vermeiden. (siehe 3.3.5.2 Seite 71)



Abb. 3-37. Deutsche Flugzeughangar Typ ML 3, 1938 (17)

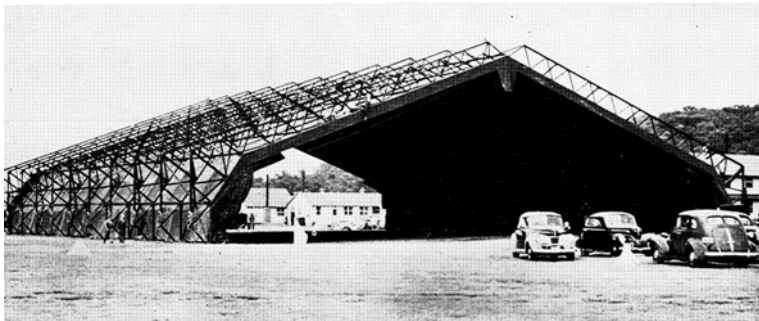


Abb. 3-38. USAAF Hangar, 1943 (23)

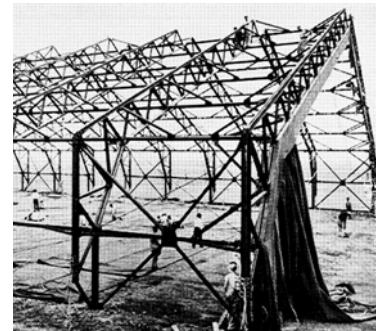


Abb. 3-39. Bewegliche Giebelmembran (23)



Abb. 3-40. Primärtragwerk (23)



Abb. 3-41. Membranmontage (23)



Abb. 3-42. Catenary (25)



Abb. 3-43. Helikopter Hangar (42)



Abb. 3-44. Transport (42)

### 3.3.4 Flugzeughangars

Die Entwicklung der militärischen Luftfahrt förderte Planung und Bau mobiler Überdachungen mittlerer und großer Spannweite. Im Verlaufe des 2. Weltkrieges setzten die Luftwaffen Deutschlands und der USA leichte, schnell auf- und abbaubare Wartungshallen ein. Die Konstruktionsweise der Hallensysteme war sich sehr ähnlich. Ein in sich steifes Gerippe aus Dreigelenkrahmen, Pfetten und Auskreuzungen diente als Auflager für eine punkt- bzw. linienförmig gestützte Membran aus Segeltuch. Zur Minimierung des Konstruktionsgewichts wurden die Rahmen als Fachwerkträger ausgeführt. Der deutsche Flugzeughangar Typ ML 3 (Abb. 3-37) von 1938 besaß eine Spannweite von 45.5 m und eine Länge von 77.3 m. Trauf- und Firsthöhe betragen 6.5 m bzw. 12.5 m. [31]

Die Firma Butler Manufacturing Co entwickelte im Auftrag von USAAF einen Hangar mit einer Spannweite von 39.6 m Breite und 48.8 m Länge. (Abb. 3-38) Die lichte Höhe beträgt am Firstpunkt 11.9 m.[40] Das Primärtragwerk besteht wie bei dem deutschen Modell aus Dreigelenkrahmen. (Abb. 3-40) Der Binderabstand beträgt ca. 5 bis 6 m. Für die Verwendung von Dreigelenkrahmen gab es mehrere Gründe, zum Einen wurde durch die mögliche Teilung der Rahmen eine Verringerung des Transportvolumens und der Montagezeit erreicht, zum Anderen konnten so Biegebeanspruchungen der Rahmen bei einer einseitigen Stützensenkung vermieden werden. Gewicht und Transportvolumen der Gesamtkonstruktion ist für einen Lufttransport optimiert. Die Fachwerke der Dreigelenkrahmen werden aus vorgefertigten Grundelemente zusammengesetzt, die aus kaltverformten Flachstahlprofilen bestehen.

Die Membran aus Baumwollgewebe wird vor Ort aus Teilflächen mit Hilfe von Schnürstößen zusammengefügt. Ebenso wie die Membrandächer der Chapiteaus sind auch hier die Ränder mit Gurten verstärkt, die an den Enden in Ringen zusammenlaufen. Diese sogenannten „Pickup points“ sind über Flaschenzüge mit den Untergurten der Rahmen verbunden. An den Untergurten der Rahmen über Rollen laufende Seile ermöglichen das Emporziehen der Membran vom Erdboden. Die Giebfelder des Hangars können durch ebene Membranflächen, die wie Vorhänge durch ein lineares Raffens entlang der Untergurte bewegt werden, geöffnet oder geschlossen werden. Das Öffnen kann durch das Eigengewicht der mit Laufwagen am Untergurt des Giebelrahmens befestigten Membran automatisch und sehr schnell bewerkstelligt werden. (Abb. 3-39)

Der Aufbau des Hangars erfolgt ohne Kran mit Hilfe von Hilfstützen und Seilzügen. Bis auf wenige Handgriffe werden alle Arbeiten am Boden ausgeführt. Die Montage der Rahmen erfolgt in Einheiten

aus jeweils zwei Halbrahmen, die in sich steife Komponenten bilden. Zuerst werden Rahmenriegel und Rahmenstiel als einzelne Elemente vormontiert und die drehbar gelagerten Fußpunkte eines Paares von Rahmenstielen auf Fussplatten positioniert. Nach dem Anbringen von Pfetten und Aussteifungen zwischen den Elementen erfolgt das Anheben der Rahmenstiele als eine Einheit durch die Rotation um ihre Fusspunkte, bis ihre Position das Anbringen der Rahmenriegel erlaubt. Diese werden ebenfalls als eine Einheit mit Hilfe von Hebestützen, sogenannten „Gin Poles“, auf die Höhe der Anschlusspunkte der Rahmenstiele gehoben. Nach der biegesteifen Verbindung von Rahmenriegel und Rahmenstiel wird die gesamte Einheit aus beiden Rahmenhälften, Pfette und Aussteifungen in der Rahmenebene gedreht, bis der Firstpunkt seine Endposition erreicht hat. Die Einheit wird durch eine Stütze unter dem Firstpunkt gesichert. Anschließend erfolgt die Aufrichtung der gegenüberliegenden Einheit von Halbrahmen. Das Einfädeln und Fixieren des Firstpunktes ist die einzige Tätigkeit, die in der Höhe von 12 m ausgeführt werden muss.

Zur Montage der Membran werden die Teilflächen am Boden ausgelegt und verbunden. Die Pickup Points werden mit den herabhängenden Zugseilen der Flaschenzüge verbunden und das gesamte Dach wird in einem Bewegungsvorgang emporgezogen. (Abb. 3-41) Dafür sind pro Rahmenstiel zwei bis drei Monteure notwendig. Während der Erstmontage benötigte das Emporziehen der gesamten Membran ca. 8 Minuten [40]. Der Hangar wurde als Serienprodukt entwickelt und sowohl als mobile Lösung mit Membranhaut, als auch als permanentes bzw. semipermanentes Bauwerk mit einer Wellblech- bzw. Holzverschalung eingesetzt.

Ein weiteres Beispiel für eine sehr leichte, vielseitig einsetzbare und robuste Konstruktion sind die sogenannten „Radomes“ R.B.Fullers. Neben den ersten geodätischen Kuppeln aus glasfaserverstärkten Kunststoffplatten wurde auch Stabwerkskuppeln entwickelt und eingesetzt, die als Auflager für eine punktgestützte nach innen gespannte Membran dienten. Das System wurde als Mannschaftsunterkunft „Catenary“ [42], Lagerraum „Warehouse Preliminary“ und Hubschrauberhangar genutzt. (Abb. 3-42), (Abb. 3-43)

Die Entwicklung und Realisierung mobiler Membranbauten als Wartungshallen für die Luftfahrt, insbesondere für die Luftwaffe, führt bis heute zu den interessantesten und innovativsten Lösungen. Die Minimierung des Eigengewichts der Konstruktion, geringe Anforderungen an den Aufstellort, schnelle Aufbau- und Abbauzeiten und eine Montage ohne nennenswerte Hilfsmittel sind auf diesem Gebiet die entwurfbestimmenden Faktoren.

### 3.3.5 Mechanisch vorgespannte Systeme

Bis zum Ende des 2. Weltkrieges wurden Membrankonstruktionen meist als nicht vorgespannte, ebene oder einfach gekrümmte Flächen realisiert. Die dadurch nicht ausreichend stabilisierten Flächen erlaubten keine großen Spannweiten der Membrane bzw. schränkten durch Flattern im Wind und Schneesackbildung die Nutzung stark ein. Eine Ausnahme bilden die Chapiteaus, deren Dachflächen eine geringe, aber ausreichende antiklastische Krümmung und Vorspannung aufweisen. Generell war die Anwendung des Membranbaus durch den bis dahin zur Verfügung stehenden textilen Baustoff - das Baumwollgewebe mit seiner relativ geringen Steifigkeit - beschränkt.

Bis zu diesem Zeitpunkt war der Membranbau oder sogenannte „Zeltbau“ kaum Gegenstand ingenieurwissenschaftlicher Forschung und Entwicklung. Fertigung und Konstruktion waren stark handwerklich geprägt und beruhten auf der Erfahrung von Segelmachern und Sattlermeistern. Die notwendigen statischen Berechnungen erfolgten aufgrund einfacher Annahmen und dienten nur der groben Vordimensionierung von Stützelementen, Abspannungen oder Verankerungen. Einzelne Konstrukteure wie der Russe Suchow erkannten zwar das Potential vorwiegend zugbeanspruchter Tragwerke und planten und bauten auf dieser Grundlage Hallenkonstruktionen großer Kühnheit, aber der eigentliche Durchbruch des Bauens mit Seilnetz- und Membrantragwerken fand erst in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts statt.

Das erste Projekt, dessen Dachkonstruktion auf der Anwendung eines doppelt gekrümmten Seilnetzes als Primärtragwerk beruht, ist die 1953 fertiggestellte Raleigh-Arena in North Carolina, USA. Die Idee des Architekten M. Nowicki für das hängende Dach von 1950 wurde durch den Ingenieur F. N. Severud weiterentwickelt und 1953/54 als Überdachung des 92 m x 97 m großen Bauwerks realisiert. Durch einen Bericht Frei Ottos über den Entwurf Severuds in der „Bautechnik“ von 1951 wurde der Schweizer Architekt Settbacher inspiriert, den Schweizer Pavillon der Berliner Industrieausstellung mit einer ähnlichen Dachkonstruktion zu versehen.[32] Das Dach des schon 1952 realisierten Projektes besteht aus einem doppelt gekrümmten Seilnetz, das von einer Baumwollmembran bedeckt wird. Die Dachkonstruktion wurde zum Innenraum durch eine zweite abgehängte Membran verdeckt. (Abb. 3-45)

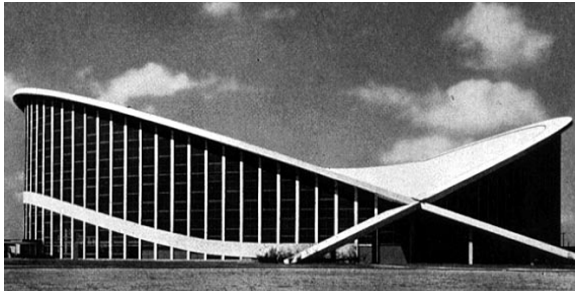


Abb. 3-45. Raleigh-Arena in North Carolina, USA, (27)

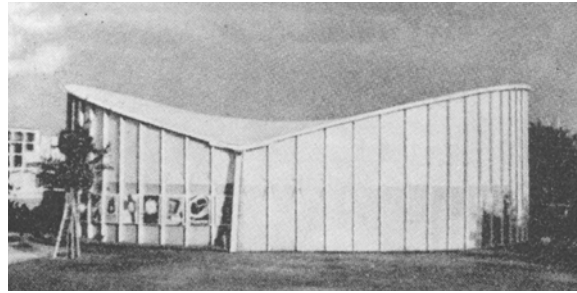


Abb. 3-46. Temporärer Schweizer Pavillon der Berliner Industrieausstellung (27)

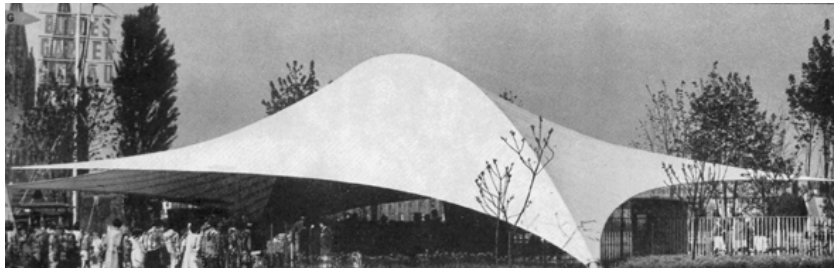


Abb. 3-47. Eingangsbogen Bundesgartenschau, Köln 1957(32) (nicht mobil)

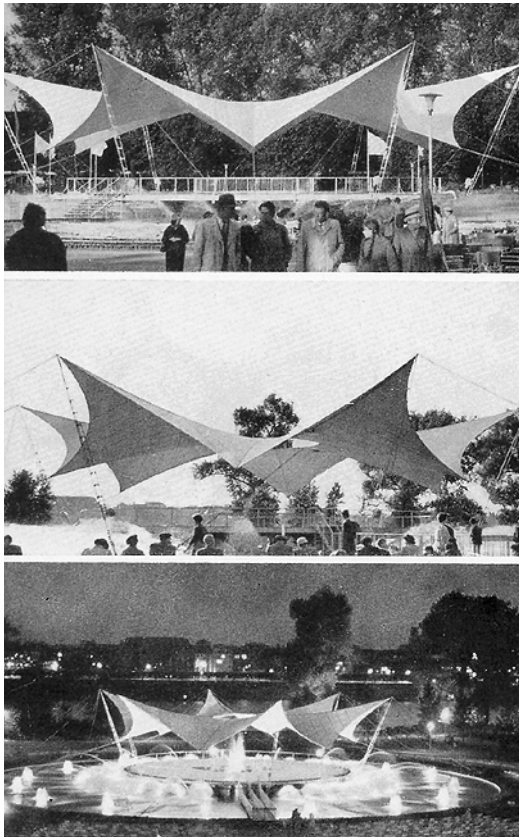


Abb. 3-48. Tanzbrunnen, Köln 1957 (32)

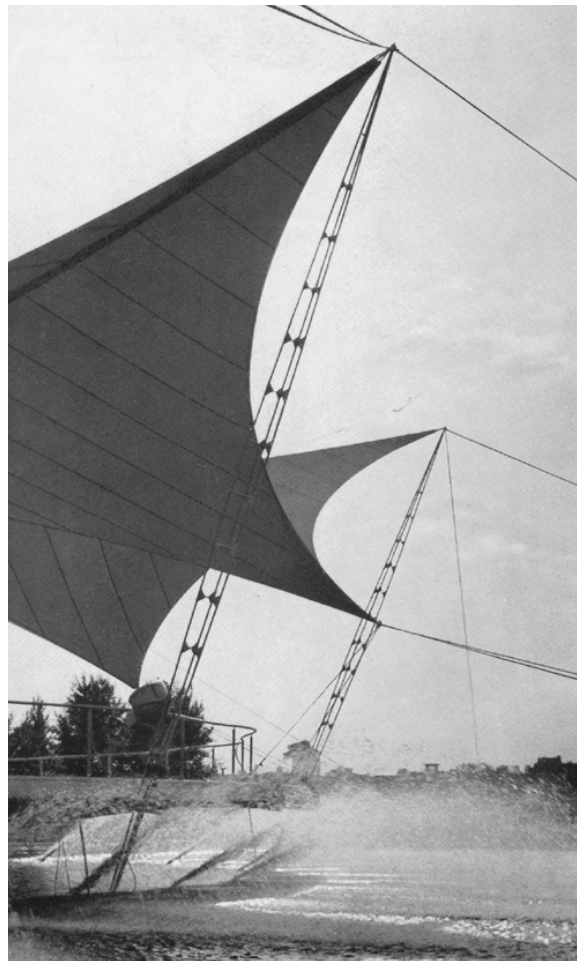


Abb. 3-49. Tanzbrunnen, Köln 1957 (32)

In der Folgezeit wandelte sich insbesondere durch die konsequente Forschungs- und Entwicklungstätigkeit F.Ottos in Zusammenarbeit mit der Firma L.Stromeyer&Co. unter der Leitung von P.Stromeyer der Membranbau von einem intuitiven und handwerklichen bestimmten Arbeitsfeld zu einem Aufgabengebiet der Architektur und des Bauingenieurwesens. Die ersten Ergebnisse dieser sehr erfolgreichen Zusammenarbeit waren temporäre bzw. mobile Bauten, die konsequent doppelt gekrümmte mechanisch vorgespannte textiler Membrane als konstruktionsbestimmendes Element verwendeten.

1955 realisierte Frei Otto in Zusammenarbeit mit Peter Stromeyer die ersten Wetterdächer für die Bundesgartenschauen in Kassel und Köln. Insbesondere das sehr gelungene sternförmige Dach des sogenannten Tanzbrunnen in Köln von 1957 löste eine große Begeisterung für die neue Bauweise aus. Die Membrane wird durch Randseile linear gestützt, die durch wechselnde Hoch- und Tiefpunkte Flächen mit ausreichender Krümmung erzeugen. Die Form der sogenannten Sternwelle wurde mit Hilfe verschiedener experimenteller Formfindungsmethoden ermittelt. Das ursprünglich verwendete Baumwollsegeltuch wurde später gegen ein Polyestergewebe ausgetauscht. (Abb. 3-48)

Der sogenannte Eingangsbogen der Bundesgartenschau von 1957 ist die erste bogengestützte Membranüberdachung, die gezielt die Membran als stabilisierendes Element für einen vorwiegend druckbeanspruchten Bogen einsetzt.(Abb. 3-47) Damit wurde eine enorme Schlankheit des Bogens mit einer Spannweite von 34 m möglich. Der Rohrdurchmesser des Bogens beträgt 170 mm, die Wandstärke 14 mm. Der Entwurf von F.Otto wurde in Zusammenarbeit mit P.Stromeyer und A.Leonhard realisiert. Erstmals wurde hierbei ein mit Polyurethan beschichtetes Glasfasergewebe eingesetzt.

Neben der Erarbeitung von analytischem und konstruktiven Wissen war die Anwendung der neuen synthetischen Membranwerkstoffe eine weitere wichtige Voraussetzung für die Entwicklung des Membranbaus. Statt des bisher fast ausschließlich verwendeten Baumwollgewebes wurden nun verstärkt Verbundmaterialien aus extrem leistungsfähigen synthetischen Fasern und Beschichtungen als Membranwerkstoffe eingesetzt. Die ersten synthetischen Fasern, die in Gewebemembranen Anwendung fanden, waren Polyamidfasern, die unter den Produktnamen Nylon und Perlon® bekannt wurden. Sie wurden im Bereich der mittleren und großen Membranbauten bald durch Gewebe aus Polyesterfasern ersetzt. Glasfasergewebe wurden aufgrund seiner Knickempfindlichkeit und fehlender wirtschaftlicher Verbindungstechniken in der Anfangsphase des Bauens mit vorgespannten Membranen eher selten verwendet.

Trotz fehlender theoretischer Grundlagen und praktischer Erfahrungen fand die neue Bauweise in den 60er und 70er Jahren schnell eine breite Anwendung. In der Folge kam es zu einer ganzen Reihe von Bauschäden, obwohl das Institut für leichte Flächentragwerke unter der Leitung von F.Otto, T. Happold an der University of Bath und später der SFB64 der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit Herstellern wie der Firma L.Stromeyer&Co versuchten, dies durch eine systematische Grundlagenforschung zu vermeiden. Zusammen mit der Textilkrise Mitte der 70er Jahre führte dies insbesondere für kleinere permanente oder mobile Bauten zu einer Stagnation der Anwendung des Membranbaus.

Die Erfolge der Grundlagenforschung vor allem im Bereich der numerischen Formfindung, Analyse und Zuschnittsermittlung in den 70er und 80er Jahren und die explosionsartige Entwicklung der Rechentechnik ermöglichte einen neuen Aufschwung mit Beginn der 90er Jahre. Erstmals war es auch kleineren Konstruktionsbüros und Herstellern möglich, Formfindung und Zuschnitt doppelt gekrümmter Membranflächen mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand zu ermitteln. Gleichzeitig hatten die vielfältigen Erfahrungen bei der Realisierung von Großprojekten und die kontinuierliche Forschungstätigkeit das Bauen mit doppelt gekrümmten mechanisch bzw. pneumatisch vorgespannten Membranen zu einer in allen Maßstäben beherrschbaren Bauweise gemacht.

Der Bereich seriell hergestellter mobiler Membrankonstruktionen wurde über einen langen Zeitraum vor allem durch die Firma L.Stromeyer&Co bestimmt. Sie entwickelte verschiedene sehr innovative modulare Systeme (siehe S.71) mit doppelt gekrümmten vorgespannten Dachflächen großer Spannweite. Durch den Konkurs der Firma in den 70er Jahren erlitt diese Entwicklung einen Rückschlag. Für lange Zeit prägten im Bereich mittlerer und grosser Spannweiten das traditionelle Chapiteau und die sogenannten Fest- bzw. Industriezelte das Bild des mobilen Membranbaus (siehe Kapitel 4 S.109).

Ende der 70er Jahre entstanden in den USA durch die Zusammenarbeit von FTL (Future Tents Limited) mit dem Hersteller und Verleiher von Mietzelten wie Anchor Industries Inc., Eureka! und Cover All Building Systems Inc. neue innovative Überdachungssysteme, die vorgespannte Membranflächen nutzten. In den folgenden Jahren entwickelte FTL in Zusammenarbeit mit dem Büro Happold verschiedene weitere technologisch und ästhetisch anspruchsvolle Einzellösungen für mobile Membranbauten und war ebenfalls an der Entwicklung neuer luftgefüllter Systeme für mobile Überdachungen beteiligt (siehe TME - LANMaS, Seite 89).



Mitte der 90er Jahre wurden in Europa ebenfalls einige technologisch anspruchsvolle mobile Membrankonstruktionen, wie z.B. das Buddy Holly Mobiltheater, als Einzellösungen für Veranstaltungen entwickelt (siehe S.77).

#### 3.3.5.1 Fliegende Kirche und Flugzeughangars

Das Projekt des mobilen Flugzeughangars und der mobilen Kirche für den „fliegenden Priester“ Pater Schulte [32] von 1954 sind die ersten wirklich mobilen vorgespanntem Membranbauten des Teams F.Otto und P.Stromeyer. Die entwickelten Typen WN10, WN12, WN13.4 besitzen Längen von 17 m bis 26 m und Breiten von 16.5 m bis 26 m. Die einfachen Konstruktionen aus Stahlrohrmasten, Stahlseilen und Baumwolltuch überdachen Flächen von 280 bis 672 m<sup>2</sup>. Das System wurde in Folge auch von der Kanadische Luftwaffe verwendet und bildet die Grundlage für den fünf Jahre später entwickelten Hubschrauberhangar WN16 der Bundeswehr. Das sechsmastige Wellenzelt überdacht eine Fläche von 34 m x 36 m. [52]. Das Primärtragwerk besteht aus Masten mit einer Höhe von 10.5 m im Abstand von 8.87 bzw. 16.20 m und Seilabspannungen. Die doppelt gekrümmte Membran aus mit Polyurethan beschichtetem Polyamidfasergewebe [32] ist durch in Membrantaschen geführte Grat- und Kehlseile linear gestützt. In den Masten eingebaute Federn sorgen für eine automatische Regulierung der Vorspannung der Membran. Alle Abspannungen werden mit Hilfe von Schaufelankern im Baugrund verankert. Die geschwungene Bodenlinie auf den Giebelseiten ermöglicht die Ausbildung einer ausreichenden doppelten Krümmung auch in diesem Bereich. Durch einen fast horizontal angeordneten Seilbinder werden die Einfahrtsöffnungen mit 15 m und 5.5 m Höhe realisiert. Die Konstruktion der seriell hergestellten Überdachungen ist für eine Schneelast von 0.375 KN/m<sup>2</sup> und eine Windbeanspruchung von 0.50 KN/m<sup>2</sup> dimensioniert.

Zur Montage werden die Teilflächen der Membrane ausgelegt und mit einfachen Schnürstößen verbunden. Der Stoß wird mit einem aufgenähten Abdeckstreifen, der mit Knebeln gesichert wird, geschlossen. Nach dem Setzen der Anker beginnt das Aufrichten der Masten und Membrane in einem Bewegungsvorgang. Je nach Größe des Hangars sind dafür 10 bis 30 Minuten notwendig. Die Gesamtmontagezeit wird mit 8 Stunden für ein Team von 10 Personen angegeben. Die Demontage kann innerhalb von 3 Stunden erfolgen. Das Gesamtgewicht der Konstruktion beträgt 4.2 t, das Transportvolumen 20 - 22 m<sup>3</sup>.



Abb. 3-50. WN12 Mobiler Hangar bzw. Kirche Flughafen Bonn 1955 (17)

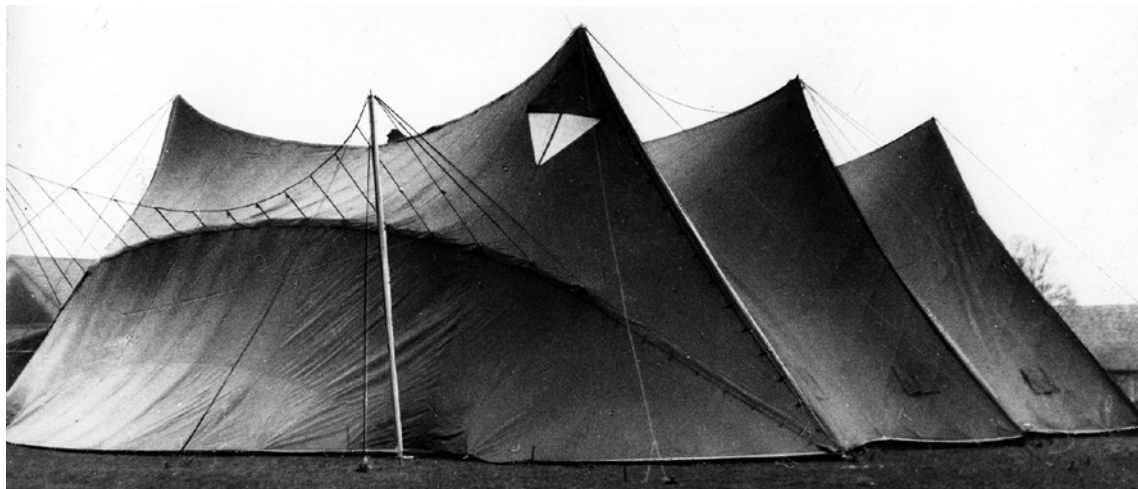


Abb. 3-51. Flugzeughangars WN16 der Bundeswehr 1959 (17)



Abb. 3-53. Parasolzelt, Innenansicht (17)



Abb. 3-52. Aufbauvorgang (17)



Abb. 3-54. Außenansicht (17)

### 3.3.5.2 Parasolzelt

Der Niederländer A.Maring entwickelte mit Hilfe der Firma L.Stromeyer&Co. 1957 seine sogenannten Parasolzelte, die in Folge als Leihzelte hergestellt und angeboten wurden. Das Grundprinzip der Konstruktion ähnelt dem des bekannten Wichita House von R.B.Fuller und verwendet den Gedanken des horizontalen Speichenrades für eine sehr leichte, schnell aufbaubare und hoch effiziente Konstruktion. Die zentral gestützte und mit dünnen Stahlseilen verstärkte Membran wird nach außen auf einen Druckring abgespannt, der wiederum durch radial angeordnete Zugstützen gehalten wird. Durch Diagonalen in der vertikalen Fassade wird so ein torsionssteifer Ring erzeugt, der zusammen mit der seilverstärkten Membran und dem Zentralmast ein in sich geschlossenes stabiles Tragwerk bildet, das keiner weiteren Abspannungen bedarf. Für den zentralen Mast wurden verschiedene Varianten entwickelt. Als vertikale Teleskopstütze kann er mit Hilfe einer einfachen Hydraulik zur Aufrichtung des Zeltes dienen, als Dreibock aus Gittermasten ermöglicht er einen stützenfreien Innenraum. Mit Hilfe dieses Konstruktionsprinzips wurden eine ganze Serie von Leihzelten mit Durchmessern von 6 m bis 25 m und Höhen von 3.5 bis 7.5 m hergestellt und erfolgreich verkauft bzw. vermietet. Die größten Zelte dieser Art hatten einen Durchmesser von 40 m.

### 3.3.5.3 Missionszelt

Auf der Grundlage der Erfahrungen mit den sogenannten Buckeldächern für ein Ausstellungsgebäude und das Café der Interbau 1957 entwickelten F.Otto und P. Stromeyer 1958 eine der größten mobilen Membrankonstruktionen zu dieser Zeit, das sogenannte Missionszelt.[32] Das Bauwerk für Veranstaltungen des amerikanischen Missionars Billy Graham besteht aus zwei Hallen, die jeweils eine Fläche von 30 m x 160 m überdachen und durch eine Tuchrinne verbunden sind. Die Dächer bestehen aus doppelt gekrümmten Membranflächen, die Seitenwände werden durch ebene Membranflächen gebildet. Die Dachmembran ist punkt- bzw. linienförmig gestützt. Die Hochpunkte werden durch Teleskopstützen aus Stahl mit einem Durchmesser von 120 mm im Abstand von 7.50 m gebildet. Auf den Stützenköpfen ist eine gewölbte Stahlplatte angeordnet, die eine flächige Stützung der Membran in diesem Bereich erlaubt. Die Stützenfüsse sind gelenkig auf durch Erdnägel gesicherten Fussplatten gelagert. Durch die Verstellbarkeit der Stützen können Unebenheiten im Boden einfach ausgeglichen werden. Die gurtverstärkten Längsränder der 30 m langen und 7.5 m breiten Teilflächen des Membrandaches werden mit Schäkeln verbunden. Die Abdeckung der Stöße erfolgt wie bei den oben beschriebenen Hangars durch mit Knebeln gesicherte Abdeckklappen.



Abb. 3-55. Missionszelt (16)



Abb. 3-57. Stromeier Leihhalle Innenraum, 1976 (16)



Abb. 3-56. Pilgerzelt Dyce Schottland (16)



Abb. 3-58. Stromeier Leihhalle (16)



Abb. 3-59. Stromeier Leihhalle (16)

Die Hochpunkte der Membran sind mit zusätzlichen angeklebten Membranstreifen verstärkt. Zur Stabilisierung der Dachmembran sind in den Kehlen Spannseile angeordnet, die an den Seiten im Baugrund verankert werden.

Die gesamte Montage der Überdachung kann vom Boden aus und mit einem Minimum an handlichem Hilfsgerät erfolgen. Es werden Mastaufstellstangen, Ankerausziehgeräte und Spannschlösser verwendet. Der Aufbau beginnt an der Querseite: die ersten beiden Teilflächen der Dachmembran werden miteinander verschäkelt und das Spannseil des zweiten Querjochs in die dafür vorgesehenen Schlaufen auf der Tuchbahn gefädelt. Die gleichlangen Randstützen werden untergeschoben, aufgerichtet und mittels Bolzen an Fußplatten justiert. Nach dem Sichern der Fußplatten erfolgt das Aufrichten der nächsten Stützenreihe unterschiedlicher Länge. Das Gratseil wird zu beiden Seiten abgespannt und die Masten in ihrer Position gesichert. An dem von den Stützenköpfen herabhängenden Teilstück der Membran wird das folgende Element befestigt, die Spannseile in die Taschen eingeführt und die nächste Stützenreihe untergeschoben. Dieser Vorgang wird wiederholt bis die gewünschte Länge der Überdachung erreicht ist. Abschließend werden die ebenen Seitenwände befestigt und die Seile nachgespannt. Als Montagezeit wurde von der Firma L.Stromeyer&Co für ein Team von 9 Personen ein Zeitraum von 9 bis 10 Tage angegeben. Das Transportvolumen beträgt ca. 160 m<sup>3</sup>.

#### 3.3.5.4 Stromeyer Membranhallen

Das System des Missionszeltes wurde in der Folgezeit durch die Firma L.Stromeyer für eine serielle Herstellung optimiert und sehr erfolgreich als Mietzelt vermarktet.[32] Es entstand ein sehr robustes, preiswertes, modulares System, das als Festhalle, aber auch als landwirtschaftliches Nutzgebäude vielfach eingesetzt wurde. Eine wichtige Änderung in Bezug auf die Konstruktion des Missionszeltes war die Aufteilung der Dachmembran in quadratischen Teilflächen mit 7.50 m Kantenlänge und die dadurch mögliche Modularität und Anpassungsfähigkeit des Systems. Die Dichtigkeit der lösbaren Teilflächenverbindungen wurden optimiert und bei Bedarf Innenstützen durch sogenannte Luftstützen ersetzt. Bis 1976 wurden insgesamt 80 000 m<sup>2</sup> Überdachungen dieses Typs produziert.[32] Man kann annehmen, daß es als Vorbild für das System des RSSB Shelter diente, den das Ingenieur Hapold in den 90er Jahren entwickelte (siehe 3.3.5.8 Seite 81).



Abb. 3-61. Vorderansicht (22)



Abb. 3-60. Masthydraulik(22)

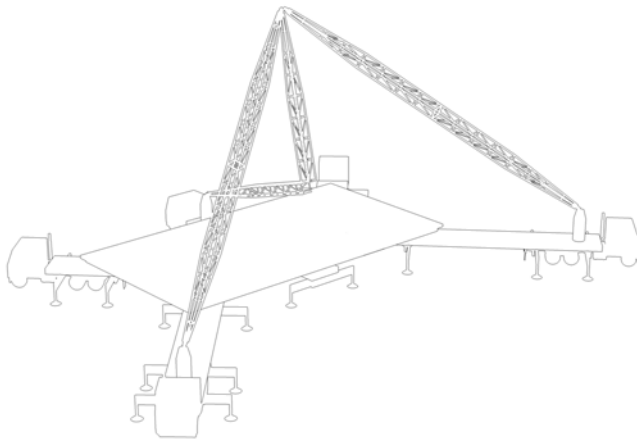


Abb. 3-63. Axonometrie der Stützkonstruktion, Entfalten des Dreibocks



Abb. 3-62. Eckausbildung (22)



Abb. 3-64. Randseilfassung (22)

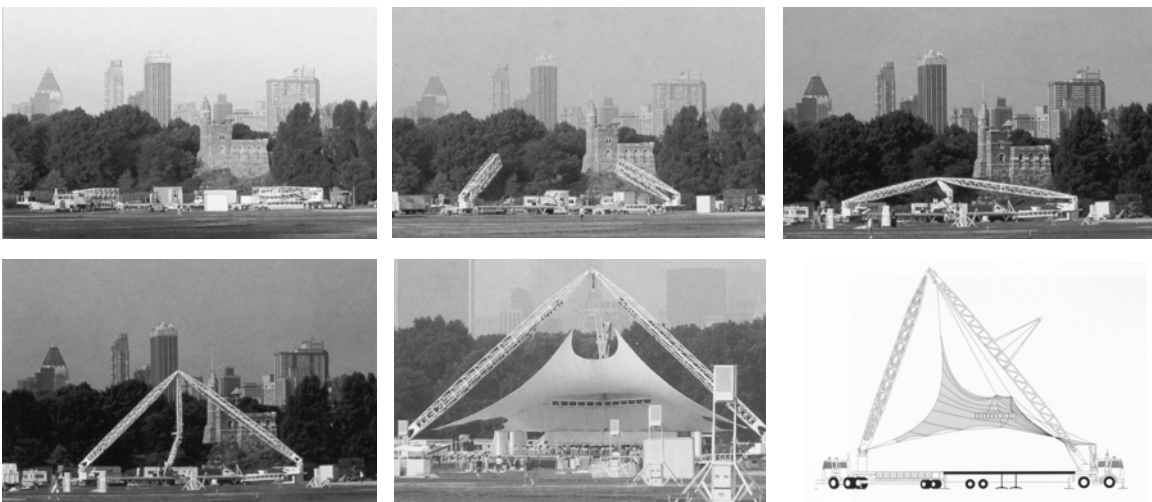


Abb. 3-65. Montagesequenzen (22)

Abb. 3-66. Querschnitt (22)



### 3.3.5.5 Carlos Moseley Musikpavillon

Der Carlos Moseley Musikpavillon, den FTL 1991 in Zusammenarbeit mit dem Büro Happold entwickelte und realisierte, ist ein Beispiel für eine mobile Anwendung mit hohen ästhetischen und technologischen Ansprüchen. Die Aufgabe bestand in der Entwicklung einer überdachten mobilen Bühne für Konzerte und andere Freiluftveranstaltungen, die allein innerhalb eines Sommer für 30 Veranstaltungen in 16 verschiedenen Parks von New York nutzbar sein sollte.

Der Schwerpunkt der Entwicklung der Konstruktion beruhte auf dem Gedanken, ein sehr leichtes, in sich stabiles Tragwerk zu schaffen, das in extrem kurzer Zeit auf- und abgebaut werden kann. Für die Montage bzw. Demontage der Bühne, des Membrandachs und der gesamte Installation war ein Zeitraum von nur 6 Stunden vorgesehen. Als Standortvoraussetzung wurde ein fester und weitgehend ebener Baugrund und eine gute Zufahrtsmöglichkeit für schwere Transportfahrzeuge angenommen.

Das Primärtragwerk besteht aus der faltbaren Bühne und dem sich selbstaufrichtenden Dreibock, der als Auflager für das Membrandach und die umfangreiche Licht- und Audioinstallation dient. Die Bühne setzt sich aus vier großen Platten zusammen, die gefaltet transportiert und am Aufstellort mit Hilfe von hydraulischen Pressen entfaltet und positioniert werden. Die Viergurt-Fachwerkträger des Dreibocks werden ebenfalls als in der Mitte gefaltete Elemente transportiert und erst am Aufstellort auf ihre volle Länge entfaltet.

Die Membran besteht aus PVC-Polyester. Die Form der Dachhaut setzt sich aus sechs Teilflächen unterschiedlicher doppelter Krümmung zusammen. Die Fläche ist vorwiegend lineargestützt. In Membrantaschen eingenähte Polyestergurte bilden leichte Grate in der Fläche und erlauben so eine optimale Anpassung der Form an die Nutzung, bei gleichzeitiger Gewährleistung einer ausreichenden doppelten Krümmung. Als Randseile wurden Aramidfaserseile (Kevlar®) mit 19 mm Durchmesser verwendet. Sie besitzen eine extrem hohe Festigkeit und Flexibilität, die wesentlich geringere Packmaße als die sonst üblichen Stahlseile erlauben. Somit ist es möglich, die Seile in den Randseiltaschen zu belassen, wenn die Membran demontiert und verpackt wird, wodurch die Aufbauzeit um 45 Minuten reduziert werden kann.[35] Die Membran hat eine Fläche von 339 m<sup>2</sup> und wird je nach Aufstellort mit einer Vorspannung von 3.5 bis 11.5 KN/m stabilisiert



Abb. 3-67. Cadillac Exceleation Center (22)



Abb. 3-68. Montagesequenzen (22)

Der Aufbau beginnt mit der Montage der Bühne. Dazu wird der LKW, der die gefalteten Elemente transportiert, positioniert und mit Hilfe von hydraulischen Füßen exakt in der Höhe ausgerichtet. Im Anschluss werden die Aluminiumträger der Unterkonstruktion ausgefahren und zusammen mit vier weiteren Anhängern, auf denen die zwei vorderen Stützen bzw. ein Teil der technischen Ausrüstung fest montiert sind, positioniert. Dann werden die vorderen Fachwerkträger und die Bühnenplatten entfaltet. Nach dem vollständigen Entfalten der vorderen Träger und ihrer Befestigung am dritten Träger beginnt das automatische Aufrichten des Dreibecks. Nach Erreichen der vollständigen Höhe werden die drehbar gelagerten Füße und das Mittelgelenk arretiert. Die Membran wird auf der Bühne ausgerollt und mit Hilfe einer Seilwinde emporgezogen und über die seitlichen Abspannpunkte abgespannt und fixiert. Für den Transport der gesamten Konstruktion werden 5 Sattelschlepper und zwei LKWs benötigt.

Das Grundprinzip der Konstruktion wurde von FTL 1995 für das Cadillac Exceleation Center weiterentwickelt. Obwohl aufgrund des deutlich geringeren Kostenrahmens der Aufbauvorgang des Dreibeins als Primärtragwerk wesentlich vereinfacht wurde, stellten die Detailausbildung der Kon-



struktion und die Realisierung der rundum geschlossenen doppelt gekrümmten Membranhülle eine neue Herausforderung dar.[37] Der Innenraum mit 280 m<sup>2</sup> Grundfläche bietet 125 Zuschauern Platz. Die drei Gittermasten können auf die Hälfte ihrer wahren Länge gefaltet transportiert werden.

Die PVC-Polyester Membran besteht aus drei Teilflächen, die mit Schnürstößen am Boden zusammengefügt werden. Die Stöße sind mit einem doppelten Abdeckstreifen abgedichtet.[35]

Der Aufbau beginnt mit dem Auseinanderklappen der Masten. Alle drei Masten werden am Kopf miteinander verbunden. Die Fussplatten zweier Masten werden horizontal unverschieblich durch die Fixierung mit Erdnägeln gelagert. Der Fusspunkt des dritten Mastes wird in der Ladeschaufel des Frontladers positioniert, dann beginnt das Anheben des zentralen Knotenpunktes mit Hilfe eines Mobilkrans. Der horizontal bewegliche Fusspunkt des dritten Mastes beginnt sich unterstützt vom Frontlader zum Lotpunkt des zentralen Knoten hin zu bewegen, bis er seine endgültige Position und damit das Dreibein seine richtige Höhe erreicht hat. Nach der Sicherung des dritten Fußpunktes werden die Membranteilflächen ausgelegt und zusammengefügt. Die Membran wird mit Hilfe eines Seils, das über Seilrollen in einem der Träger läuft, von einer Winde angetrieben in der Mitte emporgezogen. Nach Zurücklegen von ca. dreiviertel des Weges werden die Randstützen aus Aluminiumrohren am Dachrand befestigt und positioniert. Erreicht der zentrale Hochpunkt der Membran seine Endposition wird er durch eine Hydraulik in seine Endlage gezogen und mit einem Bolzen automatisch gesichert. Das Vorspannen der Membran erfolgt durch den letzten hydraulisch gesteuerten Vertikalhub.

Die gesamte Montage benötigt ca. 12 Stunden. Die gesamte Konstruktion inklusive Klimaanlage und Installationstechnik kann mit zwei Sattelschleppern transportiert werden.

#### 3.3.5.6 Buddy Holly - Mobiles Theater

Ein weiteres Beispiel für eine technologisch sehr anspruchsvolle Lösung für eine mobile Membrankonstruktion großer Spannweite ist das sogenannte Buddy Holly Mobiltheater, das für die Premiere des Musicals „Die Buddy Holly Story“ 1994 in Hamburg errichtet wurde. Der Veranstaltungsbau sollte nach Ablauf von zwei Jahren an einem anderen Standort wieder aufgebaut werden. Durch die Verlängerung des Gastspiels wurde jedoch aus dem ursprünglich mobil geplanten ein stationäres Bauwerk, das bis heute als Musicaltheater genutzt wird.



Abb. 3-69. Buddy Holly Musical Theater

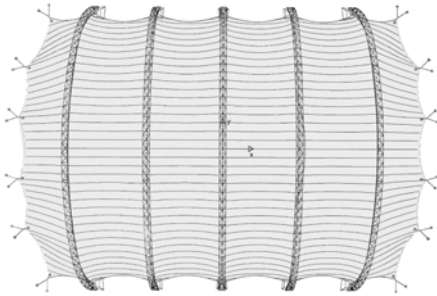


Abb. 3-70. Aufsicht (19)

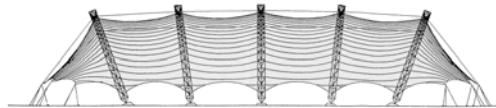


Abb. 3-71. Seitenansicht (19)



Abb. 3-72. Montagesequenzen (19)



Abb. 3-73. Cirque Phenix (52)

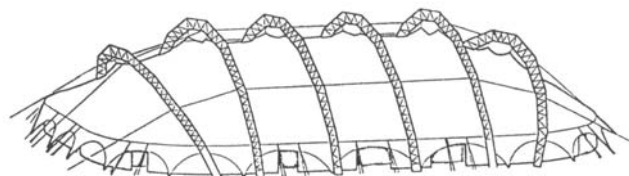


Abb. 3-74. Axonometrie Gesamtkonstruktion (9)

Die Halle mit einer Breite von ca. 50 m und einer Länge von ca. 80 m bietet 1400 Zuschauern und einer aufwendigen Bühnentechnik Platz. Das Primärtragwerk besteht aus fünf Zweigelenkbögen, die als Dreigurt-Fachwerke ausgeführt sind und an vier Punkten über Seile in Längsrichtung der Halle stabilisiert werden. Die Trägerhöhe beträgt 1.50 m, die Spannweite 55 m und der Bogenstich 18 m. Während der mittlere Bogen vertikal steht, sind die übrigen Bögen jeweils nach außen zunehmend zu den Stirnseiten gekippt. Um ein optimales Lichtraumprofil zu erreichen, wurde als Bogenform ein Korbbogen gewählt. Aus transporttechnischen Gründen besteht jeder Bogen aus 5 Segmenten, die bei der Montage mit biegesteifen Anschlüssen verbunden werden. [34] Die Seile, die die Bögen senkrecht zur Bogenebene stabilisieren, sind an den Untergurten der Bögen befestigt und an den Stirnseiten der Halle über Dreiböcke zum Boden hin abgespannt.

Die Hülle mit einer Fläche von ca. 6000 m<sup>2</sup> besteht aus einer Außen- und einer Innenmembran. Für beide Membranen wurde als Werkstoff PVC-Polyester verwendet. Die äußere Membran ist über einen Girlandenrand im Abstand von 2 m am Untergurt der Bögen befestigt. Die Kettrichtung der Membrane verläuft senkrecht zur Bogenebene und die Vorspannung in diese Richtung beträgt in den Mittelfeldern ca. 6.0 KN/m, in den Endfeldern ca. 3.5 KN/m. An den Längsseiten wird die Membrane durch Randseile gefasst, die an den Bögen verankert sind. In den Endfelder wird der mit Randseilen gefasste Membranrand über Dreiböcke abgespannt. Der Girlandenrand der inneren Membran ist im Abstand von 4 m am Untergurt der Bögen mittels einer Abhängung befestigt. Der Abstand zwischen Außen- und Innenmembran differiert zwischen 400 und 800 mm. Die Verbindung zwischen Dachkonstruktion und Boden erfolgt über vertikale feste Wandelemente.

Die gesamte Konstruktion wurde für eine Windbelastung mit einem Staudruck von 0.80 KN/m<sup>2</sup> und einer Schneelast von 0.75 KN/m<sup>2</sup> dimensioniert. Auf eine Reduzierung der Lastannahmen aufgrund einer Beschränkung der Standzeit wurde bewußt verzichtet, um sowohl eine wiederholte Nutzung, als auch die Wandlung in ein stationäres Gebäude zu ermöglichen.

Die Montage der Halle beginnt nach der Fertigstellung der Fundamente mit dem Zusammenfügen der Bögen am Boden. Danach werden die eingerollten Teilflächen der Außenmembran einseitig an den Untergurten der Binder befestigt und die oberen Randseile eingezogen. Nach dem Befestigen der Stabilisierungseile an den Bögen beginnt das Aufrichten der Bögen mit Hilfe von zwei Mobilkränen. Haben die Bögen ihre Endposition erreicht, werden sie temporär gesichert. Danach werden Spannarme als Montagehilfen zwischen den Bögen befestigt, mit deren Hilfe die Membranteilflächen von

Bogen zu Bogen montiert werden. Das endgültige Justieren und Vorspannen der Membran erfolgt erst, nachdem alle vier Mittel- und die Endfelder der Aussenmembran und die drei Teilflächen der Innenmembran positioniert wurden. Die Montagezeit des Gesamtbauwerks betrug ca. 6 Monate. Das Gewicht der reinen Stahlkonstruktion beträgt 125 t, das der Seile 7 t und das der Außen- und Innenmembran ca. 5.3 t.

#### 3.3.5.7 Cirque Phenix

Die Konstruktion des seit 2000 im Einsatz befindlichen Baus des Cirque Phenix ähnelt in der Grundkonzeption des Tragwerks dem Buddy Holly Mobiltheater. Die Konstruktionsdetails entsprechen aufgrund der wesentlich höheren Anforderungen an die Mobilität jedoch mehr dem des traditionellen Chapiteaus. Der Bau mit einer Länge von 78 m und einer Breite von 58 m wird für Zirkus- und Konzertveranstaltungen genutzt und kann je nach Veranstaltungsart 5.500 oder 9.000 Zuschauer fassen.[80]

Das Primärtragwerk wird durch sechs Fachwerkbögen, die in Längsrichtung der Halle durch Seilabspannungen stabilisiert werden, gebildet. Die polygonalen Bögen sind Dreigurtbinder aus Aluminiumrohren mit einer Spannweite von ca. 67 m, einem Stich von ca. 18 m und einer Bauhöhe von ca. 1.30 m. Zur Verbesserung ihrer Transportfähigkeit werden sie aus jeweils 10 geraden Segmenten zusammengefügt. Die Verankerung der Bögen und Abspannungen erfolgt über Fußplatten und Erdnägel. Die einlagige, aus sieben Teilflächen bestehende Membran aus PVC-Polyester ist linear gestützt. Die Gratseile sind durch Hänger an den Untergurten der Fachwerkbinder befestigt. Zur Seite und in den Endfeldern wird die Membran über Randstützen abgespannt. Die vertikalen Seitenwände werden aus ebenen Membranflächen gebildet.

Der Aufbau beginnt mit dem Vormontage und dem Aufrichten der Bögen. Danach werden die Teilflächen der Dachmembran am Boden zusammengefügt, die Randstützen mit dem Dachrand verbunden und die Abspannungen vorbereitet. Mit Hilfe von 26 Seilwinden wird die Dachhaut emporgezogen und über die Randstützen abgespannt. Danach werden die vertikalen Seitenelemente montiert. Für den Aufbau der Konstruktion werden ca. 60 Personen benötigt, die die Montage innerhalb eines Tages bewerkstelligen können

Das Gesamtgewicht der Konstruktion beträgt 100 t, davon entfallen 85 t auf das Primärtragwerk und 10 t auf die Membranhülle.

### 3.3.5.8 RSSB (Radha Soamy Sastsang Beas) Shelter

Das Büro Happold ist eines der bekanntesten Ingenieurbüros in Großbritannien, das sich insbesondere auf die Planung und Realisierung von Leichtbauten spezialisiert hat. Es war unter anderem an den meisten Projekten des Büros FTL Architects als Tragwerksplaner beteiligt. Neben der Entwicklung einer Vielzahl von innovativen Einzellösungen für mobile Membranbauten beschäftigt es sich als ein Mitglied der MUTA (Made Up Textiles Association) auch mit den Anforderungen der Miet- und Festzeltindustrie.[35] Ein Projekt, das 1993 aus dieser Verbindung entstand, ist der RSSB Shelter, eine temporäre Überdachung für eine alljährlich stattfindende religiöse Veranstaltung in Bedfordshire, UK. Obwohl die Konstruktion jedes Jahr am selben Standort für einen Zeitraum von nur zwei Wochen errichtet wird, wäre auch eine Nutzung als mobiles System möglich.

Die Zielsetzung war die Entwicklung einer extrem kostengünstigen Konstruktion, die eine Fläche von ca. 20 000 m<sup>2</sup> für kurze Zeit vor Witterungseinflüssen schützt. Der Innenraum des Bauwerks, dessen Höhe aus baurechtlichen Gründen auf 8 m begrenzt war, sollte so wenig wie möglich durch Stützen beeinträchtigt werden. Gleichzeitig sollte das Regenwasser über die äußeren Dachränder abgeleitet werden. Die gesamte Konstruktion sollte schnell auf- und abbaubar sein und keine nennenswerten Spuren am Standort hinterlassen. [35]

Die Lösung besteht in einer sehr einfachen Seil-Mastkonstruktion, die das Membrandach aus 10 Teilflächen mit 60 m Länge und 15 m Breite linien- und punktförmig stützt. Die Membranflächen besitzen nur eine sehr geringe doppelte Krümmung. Die Tragfähigkeit des Daches ist deshalb in erster Linie von den quer zur Halle laufenden Stahlseilen abhängig, die über Randstützen zur Seite abge-spannt und im Boden verankert werden. Für starke Windsogbelastungen wird die gesamte Dachfläche ähnlich wie das Dach des traditionellen Chapiteaus angehoben und die Masten auf Zug beansprucht. Es werden drei verschiedene Masttypen verwendet: schmale Stahlrohrstützen als Rand- bzw. Eckstützen, Stahlrohrstützen für die Innenstützen geringer Höhe und Gittermasten als Innenstützen im Mittelbereich der Halle. Zur Reduktion der Anzahl der Innenstützen wird der höchste Punkt des Daches in der Mittelachse durch Luftstützen gebildet, die in Längsrichtung durch die Membran stabilisiert werden. Die Fußpunkte aller Stützen sind gelenkig mit Fußplatten verbunden. Da der Aufbau jedes Jahr am selben Standort erfolgt, lagern die Fußplatten auf Einzelfundamenten. Bei einem Standortwechsel und fehlenden Fundamenten müssten die Fußplatten entsprechend größer ausgeführt und durch Erdnägel gesichert werden.



Abb. 3-75. Innenansicht (20)

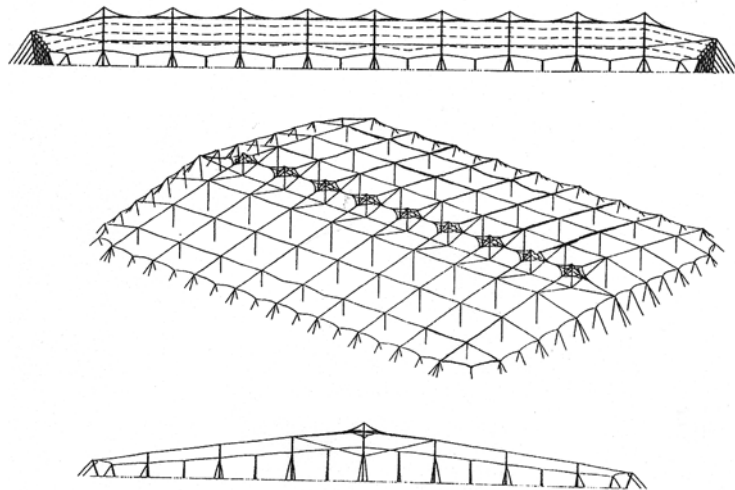


Abb. 3-76. Längsschnitt, Axonometrie und Querschnitt (20)



Abb. 3-77. Aufbau (20)

Die Teilflächen der Dachmembran werden über eine Klemmverbindungen gekoppelt, die mit einem Abdeckstreifen abgedichtet wird. Im Firstbereich besitzt die Membran um die Druckstäbe herum eine Öffnung, um eine bessere Entlüftung des Innenraum zu ermöglichen. Die Öffnung ist durch eine separate punktförmig gestützte Membranhaube geschützt. Die vertikalen Seitenwände werden durch ebene Membranflächen verschlossen.

Der Aufbau beginnt mit dem Zusammenfügen der Teilflächen der Dachmembran. Nach dem Positionieren der seitlichen Abspannungen beginnt das Aufrichten der Stützen. Dazu wird eine Ecke der Dachhaut angehoben und ein kleiner Frontlader unter die Dachhaut gefahren, in dessen Ladeschaufel die Fußplatte der Stütze, deren Kopf mit dem Querseil verbunden ist, gesetzt wird. Durch Vorwärtsschieben und Anheben wird so die Stütze in die Endposition gebracht und gleichzeitig die Membran emporgehoben. Dieser Vorgang wird mit allen weiteren Stützen wiederholt. Nach dem Aufrichten aller Stützen wird die Dachhaut durch das Anspannen der Querseile und des umlaufenden Randseils stabilisiert und die Membrane der vertikalen Seitenwände hinzugefügt. Der Aufbau der Überdachung kann innerhalb von drei Tagen unter Aufsicht einiger Instrukturen durch ungeschultes Personal erfolgen.



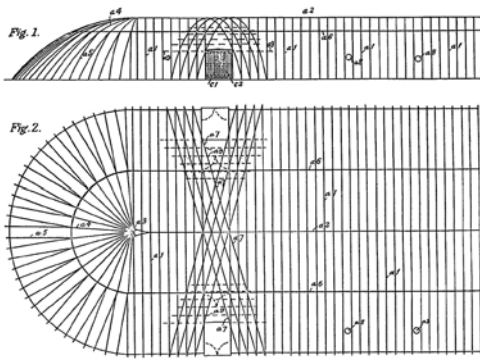


Abb. 3-78. Lanchester Patent 1917 (69)

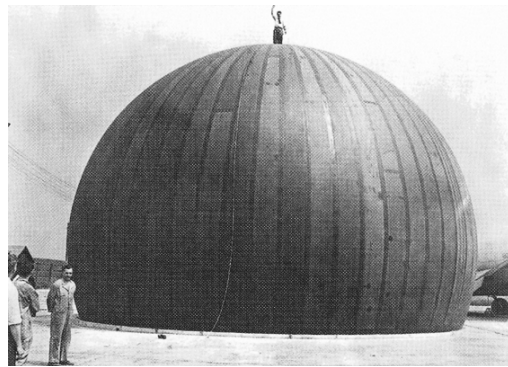


Abb. 3-79. Radomes (26)



Abb. 3-80. Pentadomes (14)

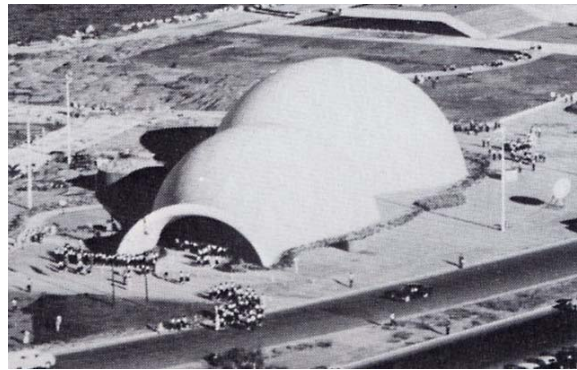


Abb. 3-81. Atomes for Peace (14)

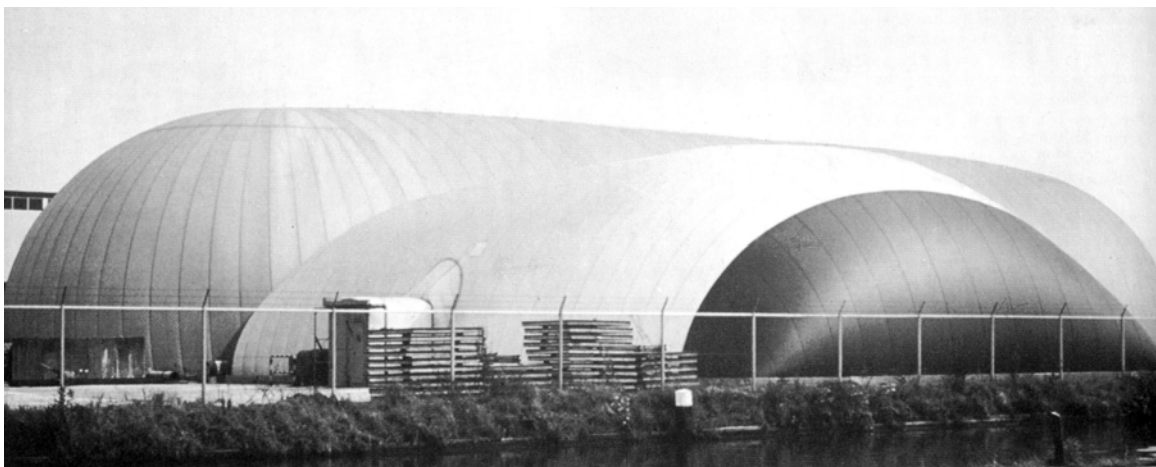


Abb. 3-82. Krupp Traglufthalle (14)



Abb. 3-83. Fuji Pavillon, Osaka (14)



Abb. 3-84. Electric Power, Osaka (14)



Abb. 3-85. Pneumatische Schirme, Osaka (14)



### 3.3.6 Pneumatisch vorgespannte Systeme

Die Stabilisierung von Membranen durch Druckunterschiede gehört zu den ältesten technischen Erfahrungen der Menschen. Die bekannteste Nutzung ist das Segel, das unter einer gleichmäßigen Windbelastung eine stabile Form erhält. Die im 17. Jahrhundert durch verschiedene Forscher und Konstrukteure entwickelten Frei- und Fesselballone gelten im allgemeinen als die Vorläufer heutiger pneumatischer Konstruktionen.[27] Der englische Ingenieur F.W.Lanchester entwickelte als erster die Idee, das pneumatische Prinzip auch für Bauwerke anzuwenden. Im Jahr 1918 lies er sich diese Idee patentieren, eine Realisierung seiner zahlreichen Entwürfe mit Spannweiten bis zu 650 m war ihm jedoch nicht möglich.

Erst 1948 wurde das erste pneumatisch gestützte Bauwerk nach zweijähriger Entwicklungsarbeit realisiert. Der 15 m breite und 12 m hohe Radome (Kunstwort aus Radar und Dome) war das Ergebnis eines Forschungsauftrags der USAF (U.S.Airforce) an das Cornell Aeronautical Laboratory (CAL) für die Entwicklung einer nichtmetallischen Schutzhülle für mobile Radaranlagen. Die Entwicklungsarbeit wurde im Wesentlichen von Walther Bird, der in dieser Zeit am CAL tätig war, geleistet. Als geometrische Form wurde ein Kugelsegment gewählt, das verwendete Material war ein mit synthetischem Kautschuk beschichtetes Glasfasergewebe.[9] Der Innendruck der luftgestützten Membran lag bei ca. 0.002 bar = 0.2 KN/m<sup>2</sup>.

In den folgenden zehn Jahren wurden die meisten der pneumatisch stabilisierten Membrankonstruktionen für militärische Anwendungen entwickelt. Ursache waren, neben dem Fehlen von Bauvorschriften und langwierigen Genehmigungsprozessen für zivile Anwendungen, die für die militärischen Nutzungen idealen Eigenschaften der pneumatisch stabilisierten Konstruktionen. Gleichzeitig verhalf aber der große Erfolg der militärischen Anwendungen der Bauweise auch zu einer starken Popularität und wachsenden Akzeptanz in zivilen Bereichen.

In den USA begann W.Bird mit seiner Firma Birdair Structures Inc. Anfang der 50er Jahre mit wachsendem Erfolg, pneumatisch gestützte Membranbauten auch als Ausstellungshallen, Schwimmbadüberdachungen und Lagerhallen etc. zu planen und zu bauen. In Deutschland wurde von der Firma Krupp die sogenannte Traglufthalle entwickelt, seriell hergestellt und sehr erfolgreich vermarktet. Die Firma Krupp entwickelte in der Folge auch verschiedene luftgefüllte Systeme. Mitte der 60er Jahre erreichte das Bauen mit pneumatisch stabilisierten Membranen eine ungeheure Popularität. Die

Vielzahl der innovativen luftgestützten und luftgefüllten Bauwerke der Expo 1970 in Osaka sind ein Beleg für die schnelle Entwicklung dieser Bauweise innerhalb von 10 Jahren.

Die starke Nachfrage bewirkte jedoch, daß von vielen Herstellern die notwendige Sorgfalt bei der Planung und Herstellung von Lufthallen vernachlässigt wurde. Gleichzeitig fehlten vielen Anwendern die notwendigen theoretischen Grundlagen, die erst mit der Veröffentlichung des Lufthallenhandbuchs des Instituts für leichte Flächentragwerke oder der Studie „Air Structures“ der britischen Regierung umfassend Verbreitung fanden. 1972 führte eine schwere Sturmkatastrophe in Europa zum Einsturz von fast 20% der bestehenden Lufthallen.[32]

Aber auch nach der Festlegung verbindlicher Normen und Richtlinien erwiesen sich Lufthallen als für extreme Umweltbedingungen anfällige Systeme. Eine Untersuchung des Versagens großer Lufthallen in den USA und Kanada zeigt die Anfälligkeit gegenüber Witterungseinflüssen und Problemen mit der Regelungstechnik zur Steuerung des Innendrucks. (Tabelle 3-1)

Facility	Year Inflated	History Deflation	Date
Silverdome, Pontiac; MI	1975	Rain <sup>1</sup> , Snow <sup>2</sup>	1975, 1976
UNiDome, CedarFaJis, IA	1975	Power Failure <sup>3</sup> , Rain	1975, 1976
Leavey Ctr, Santa Clara, CA	1976	None reported	
Dakota Dome, Vermillion, SD	1978	Control System Failure <sup>3</sup> , Snow	1978, 1982
Sundome, Tampa, FL	1979	Rain or Lightning <sup>4</sup>	1983, 1987, 1988
O'Connell Ctr, Gainesville, FL	1979	None reported	
Carrierdome, Syracuse, NY	1980	Snow <sup>5</sup>	1982, 1992
Metrodome, Minneapolis	1981	Snow <sup>6</sup>	1981 (Twice), 1982
B.C.Place, Vancouver, BC	1982	None reported	
Hoosierdome, Indianapolis	1983	Snow	

**Tabelle 3-1.** Versagen von Lufthallen großer Spannweite in Nordamerika [44]

1. Attributed to failure of metal cladding due to wind suction
2. About one-half of snow-melt systems not functional at time of storm
3. Occurred during construction
4. Attributed to operator error, in failure to observe decreasing pressures and take appropriate action, System has been replaced by computer management and problems have not occurred
5. Both were deliberate measures by stadium operators as means of combatting severe snow accumulations and did not result in any damage to the roof, re-inflation followed quickly
6. Occurred during Construction, snow-melt system not functional

Zusätzlich schränkte die erforderliche Schleusentechnik die Nutzung der Konstruktionen stark ein. Dies war schon in den 60er Jahren der Anlass, für mobile pneumatisch gestützte Konstruktionen weitgehend luftgefüllte statt luftgestützte Systeme einzusetzen. Bis in die 90er Jahre waren die Anwendungsmöglichkeiten dieser Bauweise für größere Spannweiten durch die vorhandenen Membranmaterialien und die Verbindungstechniken, die die Realisierung von Hochdrucksystemen begrenzten, eingeschränkt. Dies änderte sich durch die Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Rahmen des TME und LANMaS Projektes. (siehe S.89)

#### 3.3.6.1 Pentadome

Der von Birdair Structures Inc. 1958 geplante und realisierte sogenannte Pentadome war das erste luftgestützte Bauwerk großer Spannweite. Es wurde von der US-Armee als Ausstellungsgebäude genutzt. Die Mittelkuppel besaß einen Durchmesser von 49 m, die kleineren Kuppeln einen Durchmesser von 33 m. Der zur Stabilisierung erzeugte Innendruck betrug  $0.002 \text{ bar} = 0.2 \text{ KN/m}^2$ . Mit einer Gesamtnutzfläche von  $4650 \text{ m}^2$  stellte der Pentadome für lange Zeit eines der größten luftgestützten Bauwerke dar.

#### 3.3.6.2 Atomes for Peace

1960 entstand mit dem Pavillon „Atome für den Frieden“ ein erstes mobiles Bauwerk großer Spannweite, das als ein Mischsystem aus luftgestütztem und luftgefülltem System realisiert wurde. Das 100 m lange, 40 m breite und 18 m hohe Gebäude überdachte eine Fläche von  $2000 \text{ m}^2$ . Die Hülle bestand aus zwei Membranen aus PVC-beschichtetem Polyamidgewebe, die ca. 1.20 m tiefe Luftkammern bildeten. Der Innendruck in den Kammern betrug  $0.004 \text{ bar} = 0.4 \text{ KN/m}^2$  und  $0.005 \text{ bar} = 0.5 \text{ KN/m}^2$  im Inneraum. Der Pavillon wurde für eine Wanderausstellung in Mittel- und Südamerika genutzt. Die Montage nahm 3 bis 4 Tage in Anspruch und konnte von 12 Personen ausgeführt werden. (Hersteller Birdair Structures Inc.)

#### 3.3.6.3 M-51, MUST

Seit den 60er Jahren wurden verschiedene Anwendungen luftgefüllter Systeme vorallem im militärischen Bereich realisiert. Eines der ersten Modelle war die luftgefüllte Halle M-51, die sowohl als Kommandozentrale als auch als Krankenstation genutzt wurde. Mit einer Länge von 4.3 m, einer Breite von 4.6 m und einer lichten Höhe von 2.3 m, bestand sie aus mehreren aneinandergereihten luftgefüllten Schläuchen mit einem für luftgefüllte Systeme relativ geringen Druck von  $0.1 \text{ bar} = 10 \text{ KN/m}^2$ . Für die Montage benötigen 5 Personen ca. 30 bis 60 Minuten; das Gewicht betrug ca. 250 kg



Abb. 3-86. M-51 (36)



Abb. 3-87. MUST (14)



Abb. 3-88. Krupp Erste Hilfe Zelt (14)



Aufbausequenzen des Konzeptmodells von TME (20)

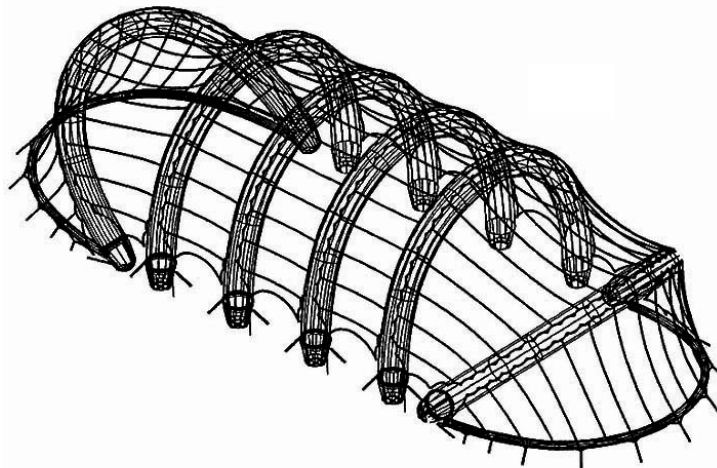


Abb. 3-90. TME Axonometrie (47)



Abb. 3-89. Aussenansicht (47)



Abb. 3-91. Innenansicht (47)

bei einem Packmaß von 23 m<sup>3</sup>. Als nachteilig wurden die langen Aufbauzeiten und die Größe der Luftschläuche im Verhältnis zum Raumvolumen empfunden.

MUST (Medical Unit, Self-contained, Transportable) wurde als ein System von aneinandergereihten luftgefüllten Schläuchen entwickelt, mit denen tonnenförmige Räume beliebiger Länge gebildet werden konnten. Ein Gebäude bestehend aus 4 Sektionen von jeweils 12 Schläuchen mit einem Querschnitt von 30 x 50 cm konnte von 8 Personen in ca. 30 Minuten aufgebaut werden.

#### 3.3.6.4 TME - LANMaS

Das TME (Transportable Maintenance Enclosure) und LANMaS (Large Area Night Maintenance Shelter) sind die ersten luftgestützten mobilen Membrankonstruktionen größerer Spannweite. Die Systeme wurden durch das Büro FTL-Happold (Future Tents Limited) im Auftrag der US-Army entwickelt.[81] Die Überdachungen wurden als schnell errichtbare Hangars für Flugzeuge bzw. Helikopter geplant. Die erforderlichen großen Öffnungen für die Fluggeräte machten eine konventionelle Tragflughallenlösung unmöglich. Eine weitere Anforderung war ein maximales Gewicht von 900 kg für eine Gesamtkonstruktion mit den Abmessungen von 30 x 9.0 x 6.7 m. [35] Aufgrund der stark eingeschränkten Entwicklungszeit konnten für das TME nicht alle Vorgaben erfüllt werden. Der Prototyp des TME aus dem Jahr 1993 wog 1150 kg und war in der Länge auf 24.5 m reduziert. Die Halle besteht aus 6 Bögen mit einer Spannweite von 9 m bei einer Stichhöhe von 6 m. Die Schlauchquerschnitte der Bögen betragen 1075 mm, die der beiden am Boden liegenden Randbögen 300 mm. Sowohl die Bögen als auch die Membran der Hülle bestanden aus PVC-Polyestergewebe, das einen maximalen Innendruck von 0.34 bar = 34.4 KN/m<sup>2</sup> erlaubte. Eine entscheidende Anforderung an die weiterentwickelte Version dieses Prototyps war die deutliche Reduzierung des Durchmessers der luftgefüllten Elemente. Die Bögen des 1995 entwickelten LANMaS haben nur noch einen Durchmesser von 300 mm und werden durch einen Innendruck von 4.1 bar = 413 KN/m<sup>2</sup> stabilisiert. Das Material der Stützschräume ist ein beschichtetes Gewebe aus Aramid-Faser (Kevlar). Diese ersten Anwendungen von luftgefüllten Elementen unter extremem Hochdruck sind seitdem durch die Firma Vertigo Inc. (siehe Kapitel 4 S.141) weiterentwickelt und perfektioniert worden. Beide Systeme benötigen eine Montagezeit von weniger als eine Stunde. [81]

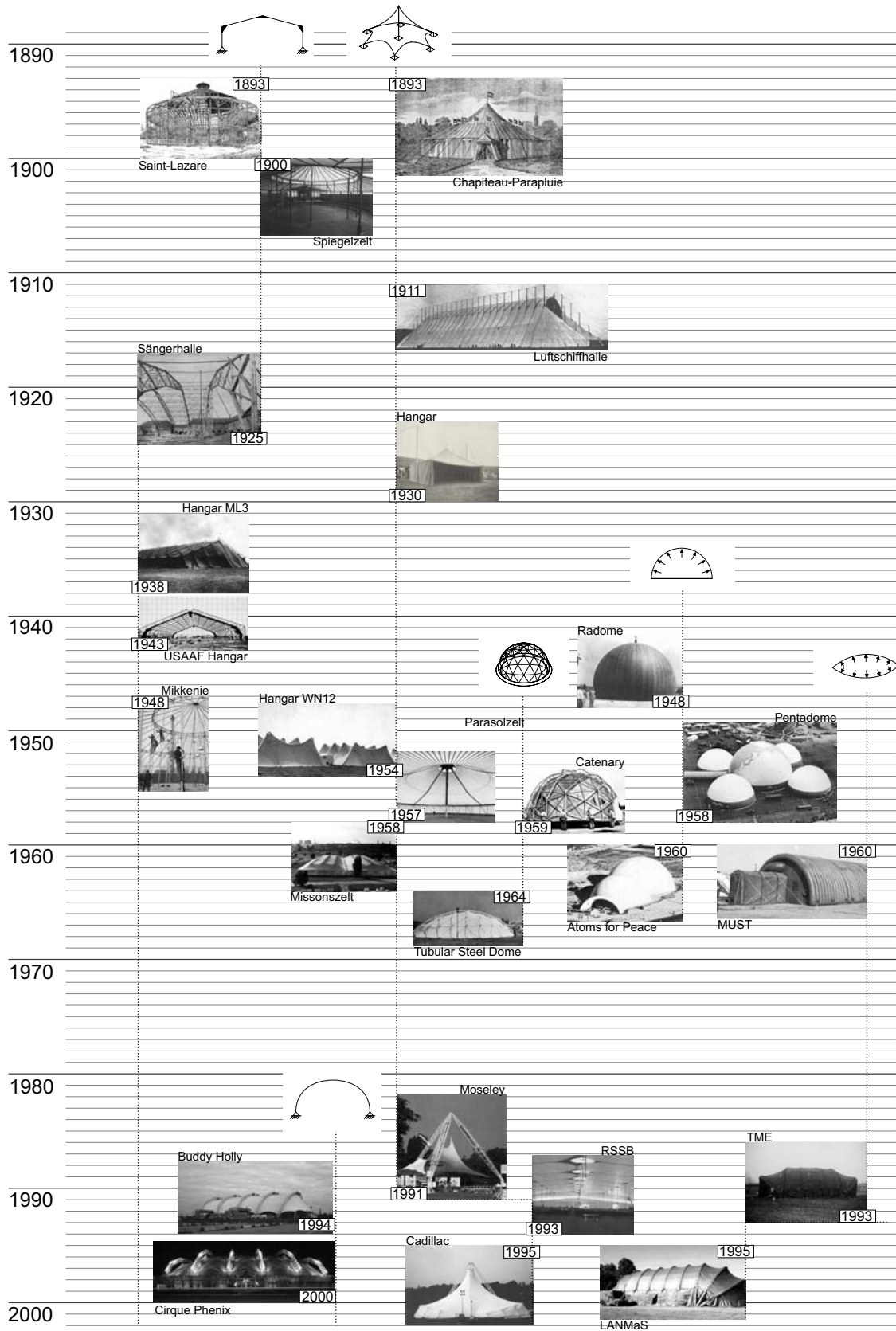


Abb. 3-92. Entwicklung mobiler Membrankonstruktionen mittlerer und großer Spannweite im 20. Jahrhundert

### 3.4 Zusammenfassung

Die Entwicklung mobiler Membrankonstruktionen mittlerer und großer Spannweite im 20. Jahrhundert lässt sich grob in drei Phasen einteilen. Die erste Phase umfasste das Entstehen temporärer und mobiler Veranstaltungsbauten und Leihhallen Ende des 19. Jahrhunderts. Vorallem die Konstruktionen von Zirkusbauten wurden hierbei für einen langfristigen mobilen Einsatz entwickelt und optimiert. Bei beiden Grundtypen, dem Gestellzelt und dem Chapiteau, wurde Baumwollgewebe als Hüllmaterial eingesetzt. Durch die Anwendung des Hohlschnittes erhielten die Membranflächen des Chapiteaus eine empirisch ermittelte doppelt gekrümmte Form, die durch eine gewisse Vorspannung stabilisiert wurde. Die Membran konnte damit zum Teil eine stabilisierende Funktion für Tragelemente des Stütztragwerkes übernehmen und wurde zum unverzichtbaren Element einer vorwiegend zugbeanspruchten Gesamtkonstruktion. Für die Gestellzelte, Leih- und Sängerhallen wurden Membranen aus Baumwollgewebe als ein preiswertes Hüllmaterial für ein in sich stabiles Holz- bzw. Stahltragwerk verwendet. Die Membranflächen waren in der Regel eben oder einfach gekrümmt und wurden kaum vorgespannt.

Mit dem Beginn der Luftfahrt Anfang des 20. Jahrhunderts entstand ein neuer Bedarf an sehr leichten, weitgespannten mobilen Bauten. Ein erstes Beispiel waren die großen, mit Baumwolltuch bespannten Luftschiffhangars, denen im zweiten Weltkrieg die ersten seriell hergestellten Flugzeughangars folgten. Die Beeinflussung der Konstruktionen durch die Luftfahrttechnik führte zur konsequenten Anwendung der Leichtbauweise, dem ersten Einsatz von Bewegungsmechanismen für wandelbare Konstruktionselemente, der Anwendung neuer Werkstoffe, sowie neuer Berechnungs- und Versuchsmethoden.

Die zweite Phase der Entwicklung mobiler Membrankonstruktionen begann nach dem 2. Weltkrieg mit der Pionierarbeit von Frei Otto, Peter Stromeyer, Walther Bird und anderen Konstrukteuren auf dem Gebiet der mechanisch und pneumatisch vorgespannten Membranbauten. Die ersten Projekte, die in der neuen Bauweise realisiert werden, waren fast ausnahmslos temporäre und mobile Bauten. In der darauffolgenden Zeit erfuhr das Bauen mit Membranen eine große Popularität und es wurden mobile, wandelbare und permanente Membranbauten in großer Zahl und mit immer größeren Spannweiten errichtet. Die schnelle quantitative Entwicklung verursachte aber auch einen Qualitätsverlust bei einer Vielzahl von Projekten, in dessen Folge vielfach konstruktive Mängel und Standsicherheitsprobleme auftraten. Die dadurch sinkende allgemeine Akzeptanz des Membranbaus führte zusammen mit der zu Beginn der 70er Jahre einsetzenden Textilkrise zu einer Stagnation der Anwendungen

für kleinere Spannweiten. Durch den Konkurs der Traditionsfirma L.Stromeyer&Co. verlor der mobile Membranbau eines der erfolgreichsten und innovativsten Unternehmen in diesem Bereich.

Die dritte Phase der Entwicklung mobiler Membrankonstruktionen begann in den 80er Jahren. Durch die langfristigen Forschungsarbeit des Sonderforschungsbereichs 64 der Universität Stuttgart und anderer internationaler Forschungsgruppen waren bis zu diesem Zeitpunkt die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen des Bauens mit mechanisch und pneumatisch vorgespannten Membranen abgeschlossen. Die entwickelten numerischen Berechnungs- und Zuschnittsmethoden konnten aufgrund der schnellen Entwicklung der Rechentechnik durch eine immer größere Anzahl von Konstrukteuren genutzt werden. Zusammen mit verbesserten Materialprüfmethoden, weiterentwickelten Membranwerkstoffen, neuen Fügetechniken und den gewachsenen Erfahrungen in der konstruktiven Umsetzung konnten somit zu Beginn der 90er Jahre eine ganze Reihe technisch sehr anspruchsvoller Projekte realisiert werden.

In den USA begann das Büro FTL Happold Ende der 80er Jahre in Zusammenarbeit mit Herstellern und Verleihern von Mietzelten die neuen technischen Möglichkeiten und das gesammelte Grundlagenwissen für die Entwicklung von neuen Serienprodukten mobiler Membranbauten anzuwenden. Zu Beginn der 90er Jahre realisierte FTL Happold dann eine ganze Reihe von innovativen Einzelprojekten mit wandelbaren Stütztragwerken. In Europa entstand mit dem Buddy Holly Musicaltheater der erste mobile Bau, der für eine mechanisch vorgespannte zweilagige Membrankonstruktion Bögen als Stütztragwerk einsetzte. Die technisch anspruchsvolle Konstruktion wird auch heute noch erfolgreich als Veranstaltungsort genutzt. Trotz der neuen konstruktiven und planerischen Möglichkeiten blieben die meisten innovativen Projekte, insbesondere mobile Bauten mit wandelbaren Stützkonstruktionen, Einzelanwendungen für spezielle Nutzungen vorbehalten. Die große Menge der mobilen Membrankonstruktionen, vor allem die vielfach eingesetzten und seriell hergestellten sogenannten Industriezelte oder Zelthallen, verwenden eine sehr einfache Konstruktion, deren Grundkonzept sich kaum von den ersten Leihhallen aus den 20er Jahren unterscheiden. Über einem in sich stabilen Rahmen- oder Bogentragwerk wird eine meist ebene Membran als Hülle angebracht. Der wesentliche Unterschied besteht in der breiten Anwendung des Werkstoffes Aluminium für die Stützkonstruktionen und im Einsatz von Strangpressprofilen mit Kedernuten zur einfachen und effizienten Befestigung der Membran an der Stützkonstruktion.



Im Bereich der luftgefüllten Konstruktionen entstand innerhalb eines durch das US-amerikanische Militär geförderten Forschungsprogramms die ersten weitgespannten mobilen Membrankonstruktionen größerer Spannweite. Die innerhalb dieses Projektes den in den 90er Jahren entwickelten Prototypen TME und LANMaS führten zur seriellen Herstellung mobiler Hallensysteme mit Stütztragwerke aus luftgefüllten Elementen und mechanisch vorgespannte Membranen als Hülle.

---

## 4 Aktuelle Beispiele

Membrankonstruktionen finden bei Mobilbauten für unterschiedlichste Nutzungen, Standzeiten und Aufstellorte heutzutage eine breite Anwendung. Dabei werden textile Baustoffe sowohl als einfache Hülle eines steifen Tragwerks, als auch als mechanisch bzw. pneumatisch vorgespannte Tragelemente eingesetzt. Die Vielfalt der vorhandenen Lösungen reicht von membranbedeckten einfachen Stabwerken mit Spannweiten von nur wenigen Metern bis hin zu weitgespannten Rahmen- oder Bogenhallen von bis zu 80 Meter Spannweite (siehe Anhang A). Anhand der Darstellung einzelner Beispiele soll ein Überblick über die derzeit am häufigsten verwendeten Konstruktionsweisen für mobile Membranbauten gegeben werden. Die im folgenden dargestellten Systeme stellen vorwiegend keine Einzelanwendungen dar, sondern sind gekennzeichnet durch ihre (welt-)weite Verbreitung, ihren permanenten Einsatz und eine weitgehende serielle Herstellung.

### *Unterscheidungsmerkmale*

Um eine möglichst klare und einfache Darstellung zu ermöglichen und gleichzeitig eine Vergleichbarkeit in Bezug auf Konstruktionsweise und Anwendbarkeit als mobile Struktur zu gewährleisten, sind die Beispiele entsprechend der Lagerungs- und Stützungsart der Membran und der Art des Haupttragwerks in vier Gruppen geordnet:

- Mast - und Seilkonstruktionen
- Bogen- und Rahmenkonstruktionen
- Luftgestützte Konstruktionen<sup>1</sup>
- Luftgefüllte Konstruktionen

Für die genaue Klassifikation von Membrankonstruktionen sind über diese Grobeinteilung hinaus eine ganze Reihe von weiteren Unterscheidungsmerkmalen nutzbar (siehe Kapitel 1 S.5), deren Anzahl durch die für mobile Konstruktionen maßgeblichen Kriterien wie z.B. den Grad der Wandlungsfähigkeit, das Transportvolumen, die Montagemethode etc. noch erhöht wird. Die Analyse der einzelnen Merkmale, die Formulierung von Parametern und ihre Anwendung zur Klassifikation

---

1. Generell werden nur durch Überdruck stabilisierte Systeme betrachtet, da für durch Unterdruck stabilisierte Konstruktionen, oder Rotationspneus keine baupraktische Anwendung für mobile Bauten gefunden wurde

mobiler Membrankonstruktionen ist jedoch Thema der morphologischen Studie (siehe Kapitel 5 S.93) und soll an dieser Stelle noch nicht diskutiert werden.

Für die folgende Darstellung werden die Rahmen- und Bogenkonstruktionen aufgrund der Vielfalt der Beispiele dieser Konstruktionsart in weitere Untergruppen unterteilt, die sich aus dem Konstruktionsart der Rahmen und Bögen (z.B. Profil bzw. Fachwerkrahmen) und der Montagezeit (Schnellbausysteme) ergeben:

- Profilsysteme
- Gerüstsysteme
- Fachwerksysteme
- Schnellbausysteme

#### 4.1 Mast- und Seilkonstruktionen

Das Prinzip von Mast- und Seilkonstruktionen wird seit Jahrhunderten erfolgreich im Bereich mobiler Membranbauten angewendet. Heutzutage werden damit Campingzelte mit 6 m<sup>2</sup> ebenso wie weitgespannte Überdachungen für mehr als 20 000 m<sup>2</sup> Grundfläche realisiert.

Mast- und Seilkonstruktionen sind Systeme, deren Masten sowohl direkt als Auflager für die punktförmige Stützung einer Membran dienen können, als auch indirekt als Element eines Seiltragwerks, das eine lineare Stützung der Membran ermöglicht (siehe Kapitel 1 S.6). Für mittlere und große Spannweiten werden in beiden Fällen die Masten unabhängig von der Membran durch Abspannseile in Ihrer Lage gesichert. So bilden Masten, Seile und Fundamente ein in sich stabiles Primärtragwerk, zu dem die Membran als doppelt gekrümmtes sekundäres Element hinzugefügt wird. Traditionelle Membranbauten kleiner Spannweite, wie z.B. das Beduinenzelt oder einfache Campingzelte, verwenden dagegen oft nahezu ebene oder einfach gekrümmte Membranflächen, die zwischen mit Gurten oder Seilen verstärkten Rändern gespannt werden. Die Membran ist ein Teil des Primärtragwerks und wird zur Lagesicherung der Masten eingesetzt.

Das traditionelle Chapiteau als eines der bekanntesten Beispiele dieser Konstruktionsart stellt in gewisser Weise eine Mischform aus beiden Systemen dar (siehe Kapitel 3 S.57). Die Hauptmasten stützen die Membran über Mastringe oder Traversen indirekt und werden unabhängig von ihr durch Seile abgespannt und gesichert. Die Rondell- und Sturmstangen dagegen stützen die Membran direkt und werden gleichzeitig durch die Membran bzw. Abspannungen gehalten.

Der Vorteil der Konstruktionsart für mobile Bauten ist der große Anteil weicher und damit beweglicher Tragelemente gegenüber einigen wenigen linearen steifen Tragelementen. Dadurch lässt sich das Transportvolumen und Gewicht auf ein Minimum beschränken und ein effizientes Verhältnis zwischen Konstruktions- und Transportgewicht und möglicher Spannweite erreichen. Die Montage kann grundsätzlich ohne schwere Hilfsmittel erfolgen, in der Regel sind Seilwinden, Flaschenzüge und Montagemasten ausreichend. Teilweise werden jedoch zum Positionieren der Masten Frontlader eingesetzt.

Die hohe Anzahl von nötigen Verankerungen und die zum Teil großen Abspannkräften des Seil- bzw. Membrantragwerks schränken die Anwendbarkeit durch entsprechende Standortvoraussetzung jedoch ein.



Abb. 4-1. Aufsicht Versammlungszelt (15)

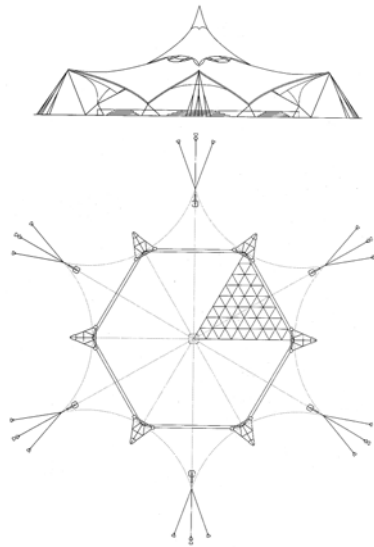


Abb. 4-2. Schnitt, Grundriss (15)

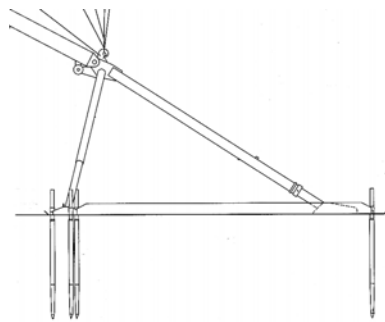


Abb. 4-3. Dreibein (15)

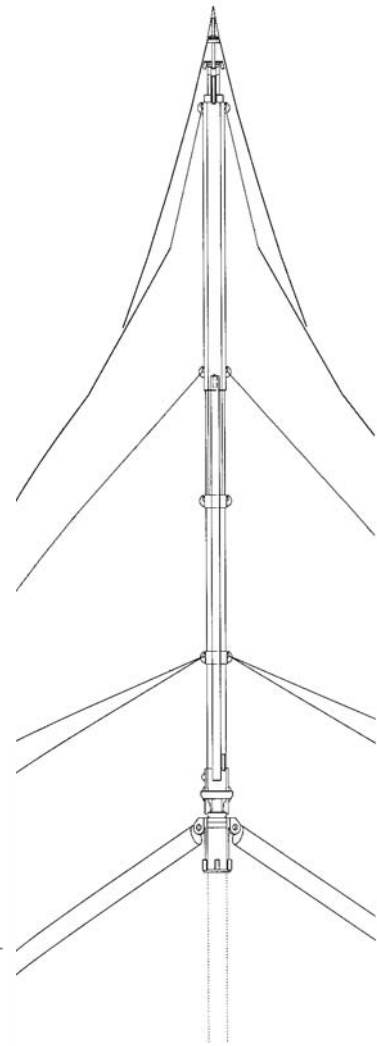


Abb. 4-4. Wandelbarer Zentralmast



Abb. 4-5. Montagemast (15)



Abb. 4-6. Untersicht Membran (15)



Abb. 4-7. Zentralmast (15)

#### 4.1.1 Rasch Versammlungszelt

Das Versammlungszelt wurde durch das Büro SL Rasch GmbH in Zusammenarbeit mit Frei Otto 1997 als ein addierbares Konstruktionssystem für den Einsatz im tropischen Klima entwickelt. Die Offenheit der Konstruktion in Bodennähe und die Öffnungen im mittleren und oberen Bereich der Membranfläche ermöglichen eine thermische Ventilation der überdachten Fläche von 500 m<sup>2</sup> bei jeder äußeren Luftbewegung. [86] Damit wird die Konstruktion den besonderen Anforderungen des tropischen Klimas mit hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie starken Niederschlägen gerecht.

Das Tragwerk besteht aus einem räumlichen Stabwerk, das sowohl eine zentrale Stützung der Membran als auch einen stützenfreien Inneraum mit 12.50 m Durchmesser erlaubt, und sechs Masten, über die die Membran nach außen abgespannt wird. Federelemente an den Abspannungen ermöglichen eine Dämpfung schnell wechselnder Zugkräfte aus dynamischen Windbelastungen. Die Verankerung der Abspannungen erfolgt über mit jeweils drei Erdnägeln gesicherten Fußplatten. Das Stabwerk besteht aus 6 höhenverstellbaren, durch Erdnägel horizontal gesicherten Dreiecksböcken, von denen aus über 6 Druckstäbe ein kurzer Zentralmast in ca. 7 m Höhe gehalten wird.

Die doppelt gekrümmte Membran ist als mehrlagige Konstruktion ausgeführt. Eine Außenmembran aus aluminiumbeschichtetem Netzgewebe schützt die 300 mm darunter gespannte Hauptmembran aus PVC-Polyestergewebe. Der über dem Zentralmast angeordnete Membranhut aus PVC-Polyestergewebe ist an die Hauptmembran gekoppelt. Damit bilden alle drei Membranflächen eine interaktive statische Einheit.

Die Montage der Konstruktion kann ohne Mobilkran erfolgen. Zentralmast, Abstreben und Dreiecksböcke werden zusammengefügt und am Boden vormontiert. Die Außenmasten werden in Position gebracht und die Membranen sowie die Abspannungen befestigt und vorgespannt. Danach erfolgt das Anheben der gesamten Dachkonstruktion in einer vertikalen Bewegung. Dazu wird ein im Mittelpunkt angeordneter Montagemast verwendet, der mit Hilfe einer Seilwinde den Mittelknoten der Konstruktion in seine Endposition anhebt. Die sechs gelenkig mit dem Mastfuss verbundenen und auf den Dreiecksböcken aufgelagerten Druckstreben werden zusammen mit dem Zentralmast angehoben. Nach Erreichen der Endposition erhält das Stabwerk durch das horizontale Fixieren der Dreiecksböcke seine Stabilität und der Montagemast wird entfernt. Die endgültige Vorspannung der Membran erfolgt über die Polyestergurte der äußeren Abspannungen.



Abb. 4-8. Century Series Anchor (22)



Abb. 4-9. Leihzelt "Olympia" (49)

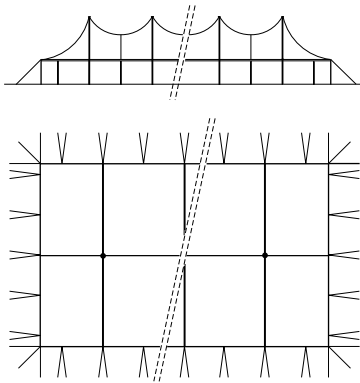


Abb. 4-10. Leihzelt "Olympia" (49)

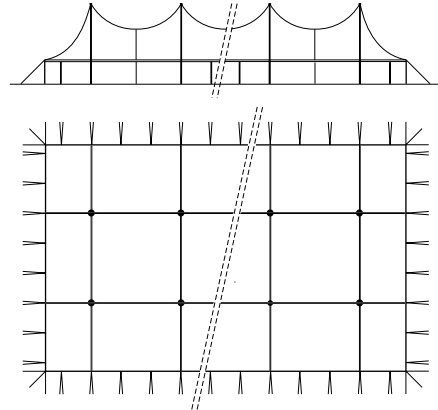


Abb. 4-11. Leihzelt "Olympia" (49)



Abb. 4-12. Leihzelt "Olympia" (49)



#### 4.1.2 De Boer GmbH - „Olympia“

Die Firmengruppe De Boer ist ein traditionsreiches europäisches Unternehmen, das seit 1924 im Bereich mobiler Membranbauten tätig ist. Die Produktpalette umfasst neben einer Vielzahl von Konstruktionen kleinerer Spannweiten auch weitgespannte Rahmenhallen und Mast-Seilkonstruktionen. [75] Die Modelle der Serie „Olympia“ (Abb. 4-9) sind klassische Beispiele für diesen weitverbreiteten Typ einer längsorientierten Membranüberdachung, die vor allem als Fest- und Veranstaltungszelt verwendet wird. Ähnliche Modelle werden von der Firma Anchor Industries Inc. (Abb. 4-8) aus den USA und dem Unternehmen Warner Shelter Systems Limited aus Kanada hergestellt und vertrieben.

Das einfache modulare System einer linear gestützten Membranfläche wird in zwei Standardversionen angeboten. Die erste Variante spannt mit einer Reihe von 8.45 m hohen Hauptstützen in der Mittelachse über 20.3 m in Querrichtung. Die zweite Variante spannt mit einer zur Mittelachse spiegelsymmetrischen Doppelreihe von Hauptmasten mit einer Höhe von 10.80 m über 30.3 m in Querrichtung. Die Rohrdurchmesser der Hauptmasten beträgt 160 mm bzw. 168 mm. Beide Varianten können in Längsrichtung um eine beliebige Anzahl von Mittelfelder verlängert werden.

Die Hauptmasten, Randstützen und Abspannungen bilden zusammen mit den doppelt gekrümmten Membranflächen ein interaktives Tragwerk. De Boer sichert die Hauptmasten unabhängig von der Membran durch Abspannungen. Die Randstützen stehen in einem Abstand von ca. 4 m und gewährleisten mit einer Höhe von 3 m eine ausreichende Kopfhöhe im Randbereich. Als Widerlager für die Abspannungen werden Ankerschienen bzw. -platten verwendet, die die Auflagerkräfte über Erdnägel in den Baugrund abtragen.

Sowohl die doppelt gekrümmte Fläche der Dachmembran als auch die ebenen Flächen der Seitenwände sind aus PVC-Polyester hergestellt. Wahlweise werden für die Seitenwände auch feste Fassadenelemente eingesetzt. Die Fläche der Dachmembran setzt sich aus einer entsprechend der erforderlichen Länge anpassbaren geraden Anzahl von Teilflächen zusammen. End- und Mittelfelder unterscheiden sich in ihren Dimensionen und Zuschnittsformen. Das Endfeld setzt sich aus drei Teilflächen mit einer Grundrisslänge von 6.22 m und die Mittelfelder aus drei Teilflächen mit einer Grundrisslänge von 12.0 m und einer Breite von 9.15m bzw 12.0 m zusammen.



Abb. 4-13. Valhalla - Aussen (56)



Abb. 4-14. seitliche Abspannung (56)

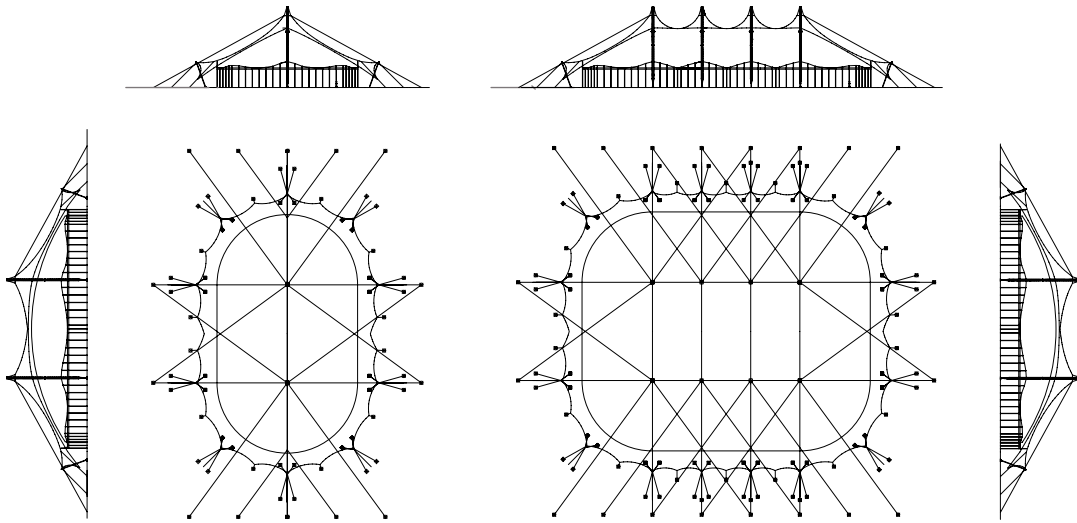


Abb. 4-15. 2 und 8 Mast Variante des „Vahalla“ - System (56)



Abb. 4-16. Maststoss (44)



Abb. 4-17. Mastfuss (44)



Abb. 4-18. Stützring (44)



Abb. 4-19. Membranstoss



Abb. 4-20. Montagesequenzen (44),(56)

Die Montage beginnt mit dem Positionieren der Ankerplatten und Masten. Die Hauptmasten werden mit Seilzügen aufgerichtet und gesichert, danach werden die Membranelemente ausgelegt und verbunden. Die Verbindung erfolgt über Schnürstöße der durch Polyestergurte verstärkten Ränder der Teilflächen. Die Stoßfuge wird mit entlang dem Rand aufgenähten Membranstreifen abgedeckt. Die Masten werden aufgerichtet und gesichert, anschließend wird die Membran an den Hauptmasten emporgezogen, die Randstützen hinzugefügt und die gesamte Konstruktion durch das Vorspannen der Abspannungen gesichert und stabilisiert. Die weichen bzw. steifen Seitenwände sind nicht Teil des Primärtragwerks und können nach dem Auslegen der Bodenkonstruktion hinzugefügt werden.

Das Konstruktionssystem ist für eine Windlast von 28.3 m/s dimensioniert. Eine Schneebelastung ist nicht vorgesehen.

Zur Montagezeit und den benötigten Hilfsmitteln werden von De Boer keine weiteren Angaben gemacht. Die Firma Anchor Industries Inc. gibt für ihr Modell „Century“ nahezu identischer Bauart bei einer Länge von 30 m eine Montagezeit von 6 Stunden für ein Team von sechs erfahrenen Arbeitern an. Als Hilfsmittel werden neben einfachem Werkzeug ein Presslufthammer für das Setzen der Erdnägel und ein kleiner Frontlader empfohlen.

#### 4.1.3 Valhalla -Tensile 1

Das Grundprinzip des Konstruktionssystems „Valhalla“ (Abb. 4-13) ist nahezu identisch mit den zuvor beschriebenen einfachen Membranhallen. Auch hier handelt es sich um linear gestützte Systeme, bei denen die weichen Linienlager von einer Seil-Mastkonstruktion getragen werden. Der Unterschied besteht lediglich in den Dimensionen des Überdachungssystem, mit dem Grundflächen bis 15 600 m<sup>2</sup> überdacht werden können. Der erste Prototyp der Überdachung wurde von Rudi Enos in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro SSL 1998 als Tensile 1 entwickelt. [87] Grundlage bildeten die Erfahrungen aus Entwicklung und langjährigem Gebrauch des mobilen Membranhallensystems „Kayam“, „Siam“ und „Concert Tent“ [83]. Ebenso wie diese Systeme wurde die „Valhalla“-Überdachung nach einem Baukastenprinzip entwickelt, das die Realisierung von 8 Grundformen verschiedener Dimension aus den gleichen Grundelementen erlaubt. Die kleinste mögliche Variante mit zwei Hauptmasten überdeckt eine Grundfläche von ca. 2 800 m<sup>2</sup>, die größte Variante mit 16 Hauptstützen eine Grundfläche von 15 600 m<sup>2</sup>. (Abb. 4-15)

Die relativ hohe Traufhöhe ermöglicht den Einbau von Standard-Tribünensystemen. Die Gittermasten des Haupttragwerks sind für eine zusätzliche Belastung von 200 kN je Mast ausgelegt. Damit bietet die mobile Halle ausreichend Möglichkeiten für die Installation schwerer Bühnen-, Belichtungs-, Audio- und Videotechnik. Die kleineren Varianten des Systems werden für Konzertveranstaltungen, Ausstellungen etc. genutzt. Die Großform bietet bei einer Nutzung als Theater ca. 8 800, bei Konzertveranstaltungen ca. 12 000 und für reine Tanzveranstaltungen bis zu 22 500 Personen Platz. Standardmäßig ist eine vollständige innere Verdunklung vorgesehen, Klima- und Heizgeräte können das Gebäude bei Bedarf kühlen oder beheizen. Das komplette System wird in ISO-Containern gelagert und transportiert.

Das Haupttragwerk der Halle besteht aus den 24,5 m hohen Gittermasten mit ihren Abspannungen, die je nach Variante die 2 bis 16 Hochpunkte der Dachmembranfläche bilden. Jeder Mast besteht aus drei Segmenten, die vor dem Aufstellen kraftschlüssig miteinander verbunden werden. (Abb. 4-16) Nach dem Errichten der Hauptstützen werden diese durch Seilverspannungen gesichert. Die Vertikalkräfte werden von einfachen Bodenplatten (Abb. 4-17) aufgenommen, deren Auflagefläche je nach Bodenbeschaffenheit durch zusätzliche Elemente vergrößert werden kann.

Die Kraftübertragung aus der Membranfläche in die Stützenköpfe erfolgt über einen sogenannten Membranring (Abb. 4-18), der an den Stützen hochgezogen wird. Um eine ausreichende doppelte Krümmung der Membranfläche zu erreichen, besteht der äußere Rand der Membran aus sich abwechselnden Hoch- und Tiefpunkten, die Hochpunkte werden dabei durch A-förmige Rahmen in den Achsen der Hauptstützen gebildet (Abb. 4-14). Sämtliche Abspannungen werden im Boden durch Erdanker befestigt. Die ebenen Seitenwände werden an der Unterseite der Membran eingehängt und am Boden fixiert. Zur Vermeidung eines Flatterns dieser Elemente sind in die Membran Rohre mit einer Länge von 6 - 8 m im Abstand von 2,25 m eingenäht. Bei starken Windbelastungen werden diese Stäbe als Zugstangen genutzt, die den auftretenden Sogkräften entgegenwirken. Sowohl die Dach- als auch die Wandmembran besteht aus PVC- Polyesterweben.

Für die Aufrichtung der Halle sind keine mechanische Hilfsmittel wie Mobilkräne etc. notwendig, Arbeitsbühnen oder Gerüste sind ebenfalls nicht erforderlich. Zuerst werden Bodenanker, Pfähle und Stützensegmente an den vorgesehenen Positionen ausgelegt. Anschließend werden die Grundplatten verankert, die Stützensegmente zusammengefügt und die Membranringe positioniert. Die Hauptstützen werden über Seile verbunden und die Hilfsstützen an ihren Stützenfüßen angebracht. Die Hilfs-

stützen erlauben das Aufrichten der Masten unter einem günstigeren Zugwinkel und dadurch deutlich reduziertem Kraftaufwand (Abb. 4-20). Nach der Montage der Mastköpfe mit den Membrankappen werden die Hauptstützen vollständig aufgerichtet. Anschließend werden die Abspannseile fixiert und vorgespannt. Die Masten können entweder abschnittsweise oder zusammen in einem Bewegungsablauf errichtet werden, bei einer einzelnen Aufrichtung sind jedoch temporäre Sicherungen notwendig. Nach dem Aufrichten und Sichern der Hauptmasten werden die Hilfsstützen entfernt und die Membranringe um die Stützen am Boden verschraubt.

Das Ausbreiten der Membran kann entweder vor oder nach dem Aufrichten der Hauptmasten erfolgen. Die einzelnen Membranteilflächen werden mit den Membranringen und untereinander durch Polyestergurte verbunden. Die A-Frames werden in Position gebracht und ebenfalls mit der Membran gekoppelt. Dann werden über Motorwinden alle Membranringe gleichzeitig auf ca. 4 m Höhe gezogen. Jetzt werden die A-Frames aufgerichtet, beginnend mit zwei gegenüberliegenden Rahmen und dann fortlaufend im Uhrzeigersinn, bis die Rahmenspitzen alle in einer Flucht liegen. Anschließend werden alle A-Frames über den Scheitelpunkt nach hinten gezogen und in ihre spätere Position gebracht. Dieses aufwenige Vorgehen ist nötig um sicherzustellen, dass keine lokalen Überbeanspruchungen der Membran auftreten. Danach wird die Membran in eine Höhe von ca. 14 - 16 m gezogen und die A-Frames sowie deren Abspannungen endgültig justiert und fixiert. Die Membran wird in ihre Endposition von ca. 22 m Höhe gehoben, der Membranring fixiert und die Membran mit Hilfe der Abspannungen am Rand gespannt. Danach werden die Seitenpfosten aufgestellt und ausgerichtet, gegebenenfalls die Membranringe nachjustiert.

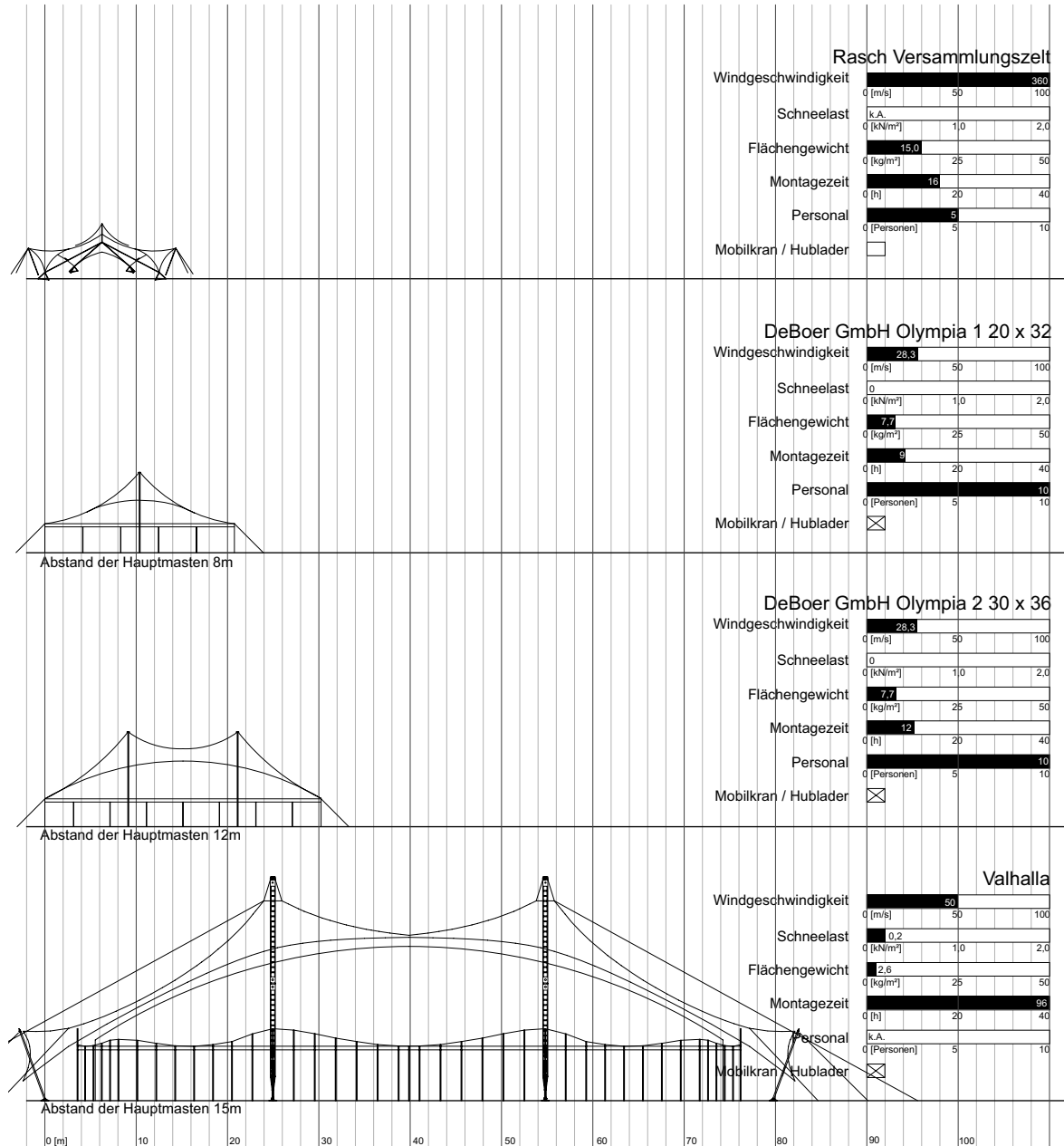


Abb. 4-21. Vergleichende Übersicht der betrachteten Mast- Seilkonstruktionen

## 4.2 Rahmen- und Bogenkonstruktionen

Steife Bögen,- Rahmen- und Gerüstkonstruktionen, die als Stütztragwerk für ebene, einfach oder doppelt gekrümmte Membranflächen dienen, sind eine weit verbreitete Konstruktionsweise mobiler Membranbauten. Sie wird für kleine, kompakte, schnell aufbaubare Systeme mit Spannweiten von wenigen Metern ebenso verwendet wie für Hallenkonstruktionen von bis zu 80 m. Für mittlere und große Spannweiten werden die Bauten vor allem als Veranstaltungsräume oder als Überdachungen für industrielle und militärische Anwendungen genutzt. Die Konstruktionsweise wird aufgrund der guten Anpassungsmöglichkeiten an verschiedene Standortbedingungen, der relativ einfachen Montage und der hohen Modularität am häufigsten verwendet.

Das Primärtragwerk besteht aus Rahmen, Bögen oder Stabwerken mit einem relativ geringen Achsabstand, die über Pfetten und Auskreuzungen stabilisiert werden und ein in sich steifes System bilden, das mit einer Membran als Hülle gedeckt wird. Die Rahmen und Bögen bestehen aus Aluminium-Strangpressprofilen oder aus Aluminium- bzw. Stahlfachwerken. Rahmenkonstruktionen bieten aufgrund ihres optimalen Lichtraumprofils eine optimale Nutzungsmöglichkeit des Innenraums, führen jedoch aufgrund der höheren Biegebeanspruchung zu einem deutlich größeren Konstruktionsgewicht als vergleichbare Bogentragwerke. Um die Biegebeanspruchung und damit die erforderliche Querschnittgröße zu reduzieren, werden deshalb bei Rahmenkonstruktionen großer Spannweite häufig horizontale Zugbänder zwischen den Rahmenecken oder Abstreben eingesetzt.

Das Primärtragwerk wird in der Regel als direkte, steife, linienförmige Stützung für die Membranflächen verwendet. Die Membranflächen sind eben, einfach oder doppelt gekrümmt. Bogenkonstruktionen sind vorteilhaft, da durch die Bogengeometrie die Stützung der Membranfläche automatisch eine Krümmung erzeugt. Für Bauten mit geringer Spannweite wie Berg- oder Campingzelte wird die Membran auch als aktives Element des Primärtragwerks verwendet, das die Bögen in ihrer Lage hält und sowohl in Bogenebene als auch orthogonal zur Bogenebene stabilisiert. Für mittlere und große Spannweiten wird aufgrund der fehlender Redundanz des Gesamtsystems hierauf meist verzichtet.

Die Montage ist entsprechend der Spannweite der Systeme sehr unterschiedlich. Für Systeme mit größeren Spannweiten werden fast immer Mobilkräne oder ähnliche mechanische Hilfsmittel eingesetzt. Das im Vergleich zu Seil-Mastkonstruktionen ähnlicher Spannweiten größere Transportgewicht erfordert einen größeren Transportaufwand und schränkt die Anwendungsmöglichkeiten für





Abb. 4-22. De Boer Aluhalle „Jumbo“(8)

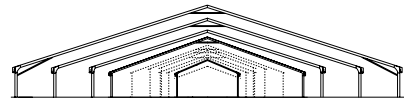


Abb. 4-23. Spannweiten (7)



Abb. 4-24. Walu Tennishalle Aussen- Innenansicht (46)

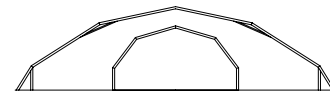


Abb. 4-25. Rahmenvarianten

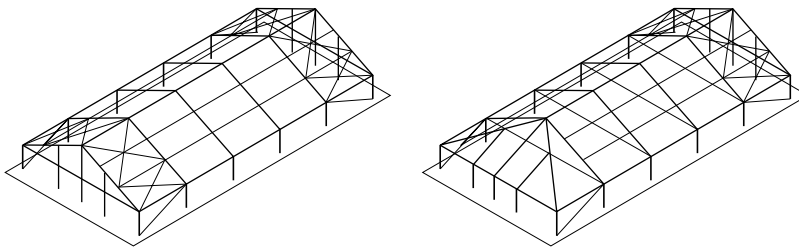


Abb. 4-26. Varianten Primärtragwerk



Abb. 4-27. Varianten der Rahmenecke



Abb. 4-28. Beispiel Firstpunkt



Abb. 4-29. Montagesequenzen System Herchenbach (68)

Abb. 4-30. Membranmontage



schwer erreichbare Standorte ein.

Um eine bessere Übersicht zu ermöglichen, werden die Rahmen- bzw. Bogenkonstruktionen nach den verwendeten Querschnitten der Haupttragelemente, Nutzungsarten und Montage in folgenden Gruppen zusammengefasst: Profilsysteme, Gerüstsysteme, Fachwerksysteme, Schnellbausysteme.

#### 4.2.1 Profilsysteme

Unter dem Begriff Aluhallen [4], Groß- oder Industriezelt werden vor allem in Mitteleuropa eine Vielzahl von nahezu identischen Miethallen mit einem Primärtragwerk aus Aluminium-Strangpressprofilen und einer textiler Hülle mit Spannweiten von 5 - bis 50 m angeboten. Die Systeme der Hersteller und Verleiher De Boer GmbH (Abb. 4-22), Eschenbach Zeltbau GmbH, Haltec Hallensysteme GmbH, Herchenbach Industrie und Zeltbau GmbH, Höcker GmbH, J&J Carter Ltd., Losberger Inter-tent GmbH oder Walter UK Ltd.(Abb. 4-24) unterscheiden sich in ihrer Konstruktionsweise nur unwesentlich. Alle Lösungen verwenden Strangpressprofile mit seitlichen Kedernuten für die Hauptbinder, die eine einfache kontinuierliche Linienlagerung der Membran ermöglichen. Die Binder, Pfetten und Aussteifungsverbände bilden ein in sich stabiles Primärtragwerk, zu dem die in der Regel einlagige Membran als sekundäres Element hinzugefügt wird.

Aus den nutzungsbedingten Anforderungen an das Lichtraumprofil der Hallen haben sich das Satteldach und das Polygondach als die zwei gebräuchlichsten Querschnittstypen bzw. Dachformen entwickelt. In der Regel haben beide Dachformen ein ebenes Giebfeld. Einige Satteldachkonstruktionen kleinerer Spannweiten, wie z.B. das Modell Nävi-Trecke des US-amerikanischen Herstellers Anchor Industrie Inc., werden aber auch als Walmdach angeboten. (Abb. 4-26) Die Binder der Hallen bestehen aus einfachen Rahmenkonstruktionen. Die Rahmenecken werden mit auf die Aluminiumprofile aufgesetzte Stahlplatten, Einschubelementen oder Kopfbändern realisiert. (Abb. 4-27) Um die Biegebelastung der Rahmen zu minimieren bzw. um höhere Belastungen bei gleichbleibenden Querschnitten zu ermöglichen, verwendet ein Teil der Hersteller Zugbänder zwischen den Traufpunkten bzw. bildet die Riegel als Polonceauträger aus (z.B. Losberger). In Ausnahmefällen werden auch seitliche Abspannungen verwendet (z.B. Anchor). Der Abstand der Binder beträgt bei fast allen Systemen 5 m bzw. 2.50 m. Die Pfetten sind in der Regel einfache Rechteckquerschnitte, die an den Rahmenprofilen eingehängt werden. Die Auskreuzungen werden je nach Hersteller aus Seilen, Flach- oder Rundstählen ausgeführt. Die Dachfläche besteht aus PVC-Polyestergewebebahnen, die von Binder zu Binder spannen. Der Kederrand der Membranen wird in die Nut des Binderprofils ein-

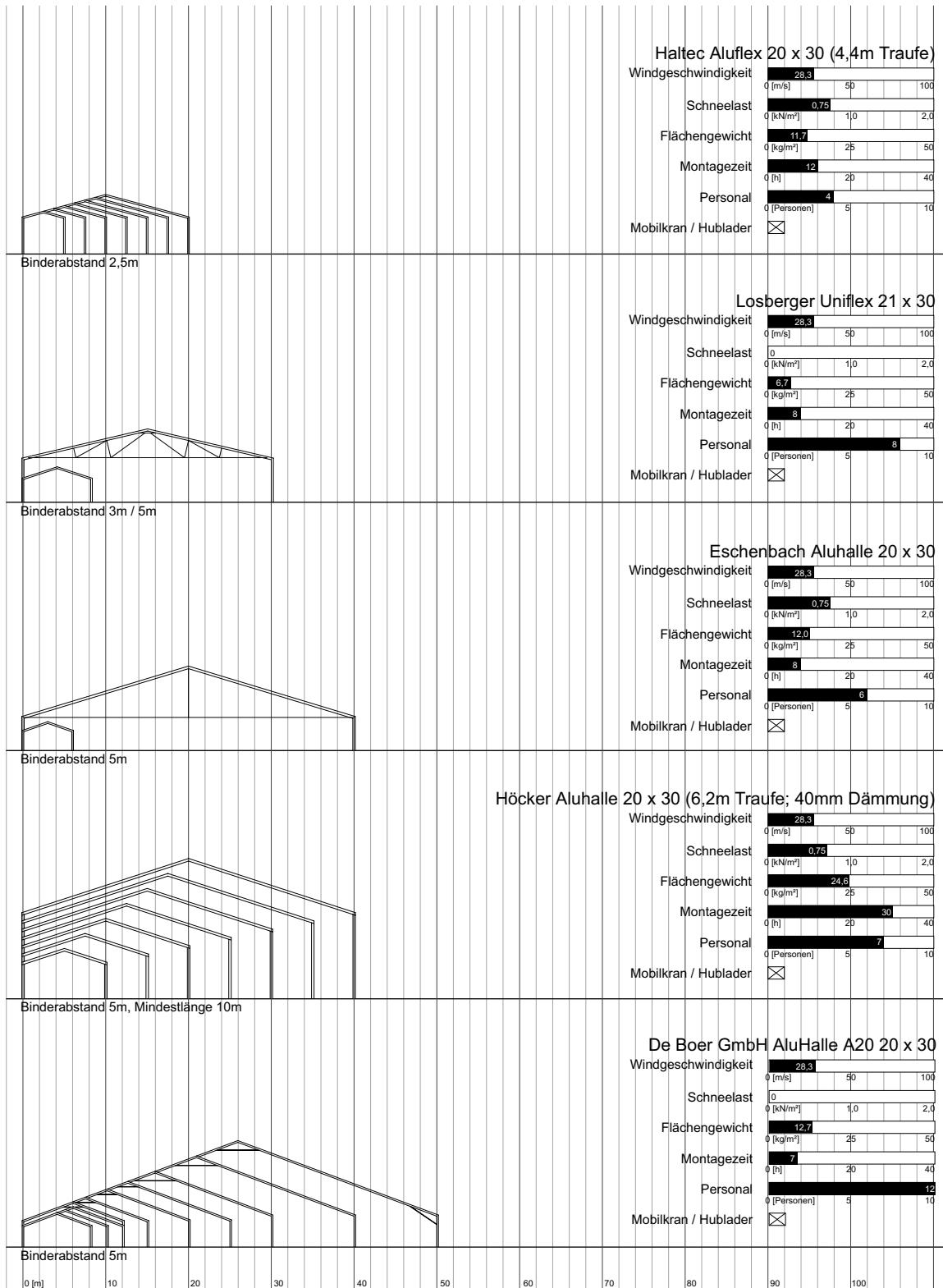


Abb. 4-31. Übersicht europäischer Profil- Rahmenhallen (Aluhallen)

geschobenen, wodurch Binder und Membranfläche kontinuierlich miteinander verbunden sind. Die ebenen Membranflächen werden in Hallenquerrichtung zur Traufe hin vorgespannt. Für langfristige Lösungen werden auch Systeme mit mehrlagigen Dachmembranen angeboten. Die Seitenwände bestehen je nach Nutzungsart ebenfalls aus ebenen PVC-Polyesterflächen oder steifen Sandwichelementen.

Die Montage beginnt mit dem Auslegen der Elemente, der Vormontage der Binder und der Befestigen der Fußplatten. Je nach Standort werden die Fußplatten mit Erdnägeln oder Dübeln befestigt.(Abb. 4-29) Erlaubt der Untergrund keine der beiden Möglichkeiten, werden die Fußpunkte mit Zugbändern kurzgeschlossen und ausreichend ballastiert. Für langfristige Nutzungen werden als Gründung auch Streifenfundamente hergestellt, die durch Zerrbalken verbunden werden. Das Aufrichten der Rahmen erfolgt einzeln. In Abhängigkeit von der Spannweite werden Mobilkräne oder Teleskoplader als Hilfsmittel eingesetzt. Die ersten beiden Binder werden mit Pfetten und Auskreuzungen stabilisiert und alle weiteren Binder zu diesem ersten stabilen Abschnitt hinzugefügt. Für Firsthöhen unter 6 m werden die Pfetten vom Boden aus mit Hilfe von Montagestangen eingefügt. Das Befestigen der unteren Anschlüsse der Auskreuzungen und das Einfädeln wird mit Leitern realisiert. Für größere Firsthöhen sind fahrbare Arbeitsbühnen, Gerüste und Sicherungssysteme notwendig. Der Kederrand der Dachmembran wird an der Traufe in die Kedernut des Riegelprofils eingefädelt und mit Seilen über den First zur gegenüberliegenden Traufe gezogen.(Abb. 4-30) Zum Einfädeln werden zum Teil Einlaufrollen [82] und zum synchronen Einziehen der Membran Seilwinden verwendet.

Die Transportmaße werden vorallem durch die Länge der Rahmenriegel bestimmt. Je nach Hersteller sind die Standardkonstruktionen der Hallen für unterschiedliche Belastungen dimensioniert. De Boer bzw. Losberger geben für alle Hallensysteme eine mögliche Windbelastung von 28.3 m/s (0.5 KN/m<sup>2</sup>) an. In der Regel sind die Hallenkonstruktionen nicht für Schneelasten ausgelegt, die Systeme von Haltec oder Herchenbach sind jedoch sowohl für Windlasten als auch für Schneelasten von 0.25 bis 0.75 KN/m<sup>2</sup> dimensioniert. Die erhöhten Belastungen erfordern jedoch ein horizontales Zugband zwischen den Traufpunkten und zusätzliche Kopfbänder in den Rahmenecken.



Abb. 4-32. LIBRA- Hallensystem (39)

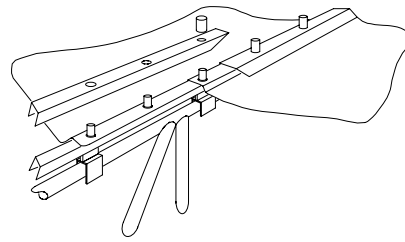


Abb. 4-33. LIBRA- Befestigungssystem Membran (39)



Abb. 4-34. Layher Kederhallen- System (38)

<p>Binderabstand 2,57m</p>	<p><b>Layher Kederdach 18,7 x 31</b></p> <p>Windgeschwindigkeit <input type="checkbox"/> Windstärke 6 <input type="checkbox"/> 50 <input type="checkbox"/> 100 0 [m/s]</p> <p>Schneelast <input type="checkbox"/> 0,25 <input type="checkbox"/> 1,0 <input type="checkbox"/> 2,0 0 [kN/m<sup>2</sup>]</p> <p>Flächengewicht <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> 25 <input type="checkbox"/> 50 0 [kg/m<sup>2</sup>]</p> <p>Montagezeit <input type="checkbox"/> 16 <input type="checkbox"/> 20 <input type="checkbox"/> 40 0 [h]</p> <p>Personal <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 10 0 [Personen]</p> <p>Mobilkran / Hublader <input type="checkbox"/></p>
<p>Binderabstand k.A.</p>	<p><b>Aply LIBRA 20 x 30 (5 m Traufe)</b></p> <p>Windgeschwindigkeit <input checked="" type="checkbox"/> 24 <input type="checkbox"/> 50 <input type="checkbox"/> 100 0 [m/s]</p> <p>Schneelast <input type="checkbox"/> 0,50 <input type="checkbox"/> 1,0 <input type="checkbox"/> 2,0 0 [kN/m<sup>2</sup>]</p> <p>Flächengewicht <input type="checkbox"/> 24,3 <input type="checkbox"/> 25 <input type="checkbox"/> 50 0 [kg/m<sup>2</sup>]</p> <p>Montagezeit <input type="checkbox"/> 24 <input type="checkbox"/> 20 <input type="checkbox"/> 40 0 [h]</p> <p>Personal <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 10 0 [Personen]</p> <p>Mobilkran / Hublader <input checked="" type="checkbox"/></p>

Abb. 4-35. Übersicht Gerüstsystemen

#### 4.2.2 Gerüstsysteme

Der Begriff Gerüstzelte wird umgangssprachlich für Konstruktionssysteme verwendet, bei denen das Primärtragwerk aus einem Stabwerk besteht, das aus standardisierten Fachwerkelementen gebildet wird. Gerüstzelte sind in Europa neben den sogenannten Aluhallen eine der am häufigsten eingesetzten Lösungen für mobile Überdachungen im industriellen Bereich. Sie werden insbesondere als temporäre Überdachung von Baustellen und als mobile Werkstätten eingesetzt.

##### *LIBRA*

Das Hallensystem LIBRA (Abb. 4-32) der Firma ABLY Shelter aus Großbritannien [71] ist ein typisches Beispiel für diese Konstruktionsweise. Das Primärtragwerk besteht aus Fachwerkrahmen und Trägern, die aus einfachen Grundmodulen durch Steckverbindungen zusammengefügt werden können. Der Achsabstand der Rahmen ist mit ca. 2 m sehr eng. Das System kann für Überdachungen mit Spannweiten bis zu 30 m, verschiedenen Dachneigungen und einer maximalen Seitenwandhöhe von 6 m genutzt werden. Das Gerippe wird mit einzelnen Membranbahnen aus PVC-Polyester eingedeckt, die mit Hilfe einer Klemmleiste auf dem Obergurt der Fachwerkträger befestigt werden (Abb. 4-33).

##### *Layher*

Das Layher Kederhallen-System der Firma Wilhelm Layher GmbH & Co. KG aus Deutschland verwendet Serienelemente der Gerüstsysteme der Firma für Überdachungen mit einer Spannweite bis zu 18.7 m [68]. Größere Spannweiten sind ebenfalls möglich, erfordern aber zusätzliche Aussteifungselemente. Der Abstand der Binder beträgt 2.57 m. Die Elemente werden mit Steckverbindungen zusammengefügt und durch Bolzen gesichert. Die Aussteifungsdiagonalen sind mit Einrastklauen versehen, die ein schnelles Arbeiten ermöglichen. Die Rahmenstiele besitzen am Kopf ein Auflager mit drei Drehachsen, das verschiedene Dachgeometrien ermöglicht. Die PVC-Polyestermembran wird in 2.75 m breiten Bahnen durch eine Kederverbindung befestigt, bildet eine ebene Fläche und wird nicht vorgespannt.

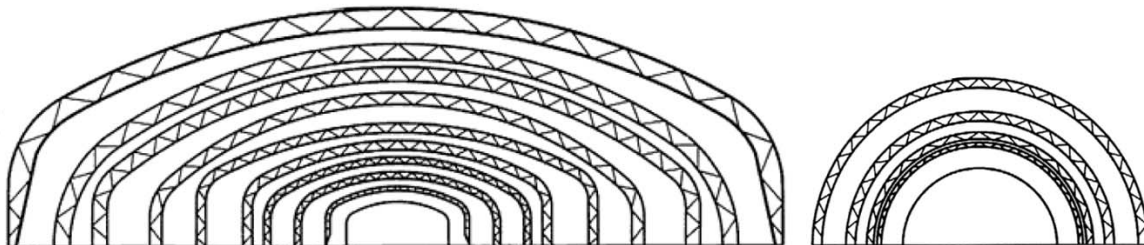
Zur Montage werden die Binder zuerst am Boden vormontiert und dann in die Auflager der schon errichteten Seitenwände gelegt, aufgerichtet und fixiert. Danach wird die Membran über das Einziehen des Kederrandes in die Nut des Aluminiumprofils montiert.



**Abb. 4-36.** Sonnenschutz Spannweite 46 m (41)



**Abb. 4-37.** Flugzeughangar 36 m, Docküberdachung 18 m, Notunterkünfte (41)



**Abb. 4-38.** Varianten der Fachwerkrahmen und Bögen M 1:200, (41)



**Abb. 4-39.** Fundamente (41)



**Abb. 4-40.** Membranmontage (41)



### 4.2.3 Fachwerksysteme

#### 4.2.3.1 BIGTOP Manufacturing

Die Firma BIGTOP ist einer der führenden US-amerikanischer Hersteller und Verleiher von Mobilien Schutzdächern bzw. Hallen. Die in Florida ansässige Firma produziert und vertreibt weltweit seit über 20 Jahren leichte Schutzdächer für verschiedenste Anwendungen.[72] Die einfachen robusten Konstruktionen bestehen aus Fachwerkrahmen oder Bögen, die in relativ kurzen Abständen aneinandergereiht werden und durch Pfetten verbunden sind. Über dieses steife Primärtragwerk wird eine Membran aus PVC-Polyestergewebe gespannt. Die häufigsten Anwendungen der Membrankonstruktionen sind Wetter- bzw. Sonnenschutzdächer für Flugzeuge, bewegliche Überdachungen von Werftanlagen oder Baustellen und Deponieabdeckungen. Versehen mit Rollläden und Fenstern, festen Türelementen und Klimaanlage dienen sie aber auch als mobile Werkstätten, Veranstaltungs- und Ausstellungsräume.

Das Tragwerk ist modular aufgebaut. Hauptelemente sind aus Stahlrohren hergestellte vollverzinkte Fachwerkrahmen oder -bögen. Der Rohrdurchmesser der Fachwerke variiert zwischen 42 und 88,9 mm. Entsprechend der Nutzung und der Belastung werden verschiedene Grundformen mit Spannweiten von 9 bis 46 m verwendet, die zum Teil auch als Dreigurtbinder ausgeführt werden (Abb. 4-38). Für kleinere Spannweiten als 9 m werden einfache Rohrprofile eingesetzt. Die Binder sind in einem relativ dichten Abstand von ca. 2 bis 4 m angeordnet, durch Pfetten aus Rundrohren verbunden und mit diagonalen Auskreuzungen ausgesteift. Die Konstruktion kann für Windgeschwindigkeiten von bis zu 53,6 m/s und Schneelasten von bis zu 1,9 kN/m<sup>2</sup> bemessen werden. In Längsrichtung wird das Primärtragwerk durch Druckstreben und Zugdiagonalen ausgesteift. Die Gründung der Konstruktion erfolgt entsprechend den Bedingungen des Standortes auf verschiedene Art und Weise. Für nachgiebigen Baugrund werden die Fußpunkte der Rahmen oder Bögen auf einen Stahlträger in Längsrichtung gestellt, wodurch eine Lastverteilung und ein einfacher Höhenausgleich möglich ist. Zur Aufnahme der Horizontalkräfte werden Erdnägel verwendet. Bei großen Spannweiten ist ein Kurzschluss der Fußpunkte der Rahmen oder Bögen durch ein Zugband erforderlich.

Als Hülle wird eine Membran aus PVC-Polyestergewebe mit unterschiedlicher Materialstärke entsprechend der Belastung und Einsatzdauer verwendet. Der relativ dichte Abstand der Binder ermöglicht die Verwendung einer nahezu einfach gekrümmte Membran bei zum Teil hohen Belastungen. Die Krümmung der Membran resultiert nicht aus dem Zuschnitt, sondern wird allein über das





Abb. 4-41. Sprung Lagerhalle, Radial öffnbarer Giebel einer Lagerhalle, Inneraum Bürogebäude (60)

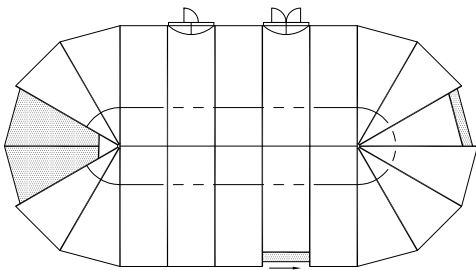


Abb. 4-42. Aufsicht Rahmenhalle mit Vollwandträgern

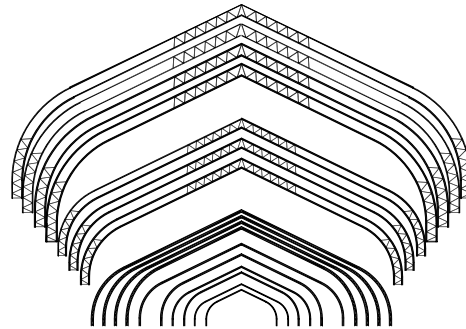


Abb. 4-43. Rahmenvarianten 9.4 m - 61.0 m M 1:1000



Abb. 4-44. North Side Baptist Church (60)



Abb. 4-45. Innenansicht Sporthalle (60)



Abb. 4-46. Klemmprofil, Rahmenhalle im Aufbau, Montage Dämmung (60)



Anspannen der unteren Ränder und der daraufhin eintretenden Dehnung des Membranmaterials erzeugt. Aufgrund ihrer einfachen Konstruktionsweise können die Überdachungen in kurzer Zeit mit einem geringen personellen Aufwand errichtet werden. Die Firma rechnet mit der Aufstellzeit von einem Tag für eine überdachte Fläche von 185 m<sup>2</sup>. Mit einem firmeneigenen Team von Spezialisten kann dieselbe Fläche in nur 5 Stunden überdacht werden. Bei entsprechenden Dimensionen ist ein Versetzen der gesamten Konstruktion mit Mobilkränen nach der Montage möglich. Generell ist der Einsatz von Mobilkränen und anderen mechanischen Hilfsmitteln für die Montage notwendig.

#### 4.2.3.2 Sprung Instant Structures Ltd.

Das kanadische Unternehmen Sprung Instant Structures Ltd. ist eines der traditionsreichsten Unternehmen auf dem Gebiet temporärer bzw. mobiler Bauten in Nordamerika. Das Standardprodukt der Firma sind Rahmenhallen mit einer ebenen vorgespannten Membran als Hülle. Für die verschiedenen Nutzungen werden sowohl Systeme mit ungedämmter einlagiger Membran als auch gedämmte mehrlagige Varianten angeboten. Die Giebelseiten können bei Bedarf radial öffnbar gestaltet werden, wodurch Zugangsöffnungen in allen Größen ermöglicht werden. Sprung Instant Structures bietet auf der Basis dieses Konstruktionssystems mobile Bauten für verschiedenste Nutzungen von der einfachen Werk- oder Lagerhalle, über Casino, Ballsaal bis hin zur Kirche an. [89]

Haupttragelement des Konstruktionssystems sind Rahmen mit einer ausgeprägten Giebelform mit Spannweiten von 9.4 bis 61 m und Firsthöhen von 4.8 m bis 25.9 m. (Abb. 4-43) Die Traufhöhe variiert zwischen 2.76 m und 13 m. Das System ist in Längsrichtung beliebig erweiterbar und wird in der Regel mit einem halbkreisförmigen Abschluss versehen (Abb. 4-42). Das Achsmaß beträgt im Allgemeinen 3 m, in Sonderfällen 4.57 m. Die Rahmen sind bis zu einer Spannweite von ca. 40 m Vollwandträger, die aus Aluminium-Strangpressprofilen hergestellt werden (Abb. 4-46). Für größere Spannweiten werden Fachwerkkonstruktionen mit Bauhöhen zwischen 1.20 m und 1.50 m verwendet. Die Rahmen bilden zusammen mit Pfetten und Auskreuzungen ein in sich stabiles Primärtragwerk.

Die Hülle besteht aus PVC-beschichteter Polyester membran, die auf den Rahmen kontinuierlich mit einem Klemmprofil befestigt wird. (Abb. 4-46) Die Membran wird als ebene Fläche vorgespannt. Je nach Nutzung des Gebäudes werden Dämmung und Abdichtung zum Rauminnen hinzugefügt. Die Montage erfolgt auf konventionelle Weise unter Zuhilfenahme von Mobilkränen, Teleskopladern, fahrbaren Arbeitstribünen etc.



Abb. 4-47. Konzerthalle Innenansicht (61)



Abb. 4-48. Aussenansicht (61)



Abb. 4-49. Flugzeughangars (61)



Abb. 4-50. Vertikales Klapptor<sup>1</sup> (61)



Abb. 4-51. Notunterkunft (61)

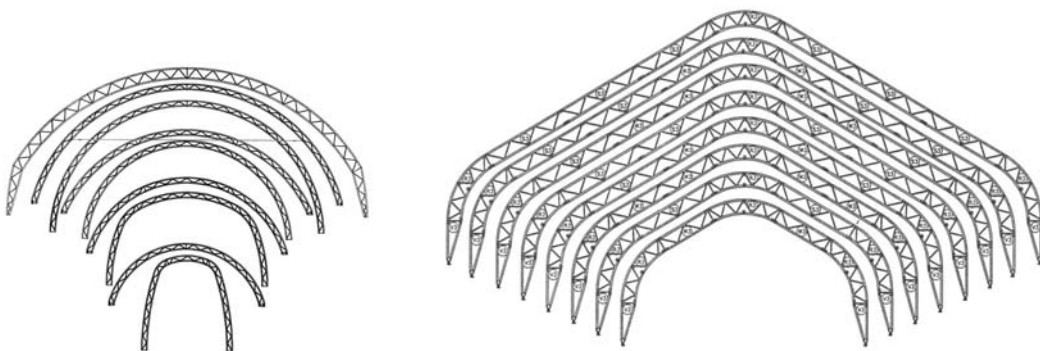


Abb. 4-52. Beispiele für Bogen (TAS)- und Rahmenformen (TBS) von Cover All Building System Inc. (61)



Abb. 4-53. Primärtragwerk (61)



Abb. 4-54. Montage (61)



Abb. 4-55. Lagerhalle (61)

1. System Clamshell [101]

#### 4.2.3.3 Cover All Building Systems Inc.

Das Unternehmen Cover All Building Systems Inc. ist einer der Marktführer in Nordamerika für die Entwicklung und Produktion mobiler und temporärer Membrankonstruktionen. Die Firma mit Hauptsitz in Kanada ist aber auch international tätig. In den USA und Kanada werden Cover All Produkte vor allem durch die Tochterfirma Summit Structures vertrieben, die als Generalplaner und -unternehmer Komplettlösungen für Notunterkünfte, Werkstätten, Lagerhäuser, Flugzeughangars, Sport- und Veranstaltungshallen anbietet. [91]

Das Konstruktionssystem besteht aus Rahmen- bzw. Bogenhallen, die durch Pfetten und Verbände ausgesteift ein in sich stabiles Primärtragwerk bilden, das mit einer einfach gekrümmten oder ebenen Membran als Hülle versehen wird. Das System gliedert sich in verschiedene Produktreihen, die sich hauptsächlich in Form und Konstruktionsweise der Bögen bzw. Rahmen und deren möglicher Spannweiten unterscheiden: TAS (Truss Arch Series), SAS (Single Arch Series), TBS (TITAN Building Series), LBS (Legend Building Series) und IBS (Icon Building Series) [78]

##### *TAS (Truss Arch Series)*

Die Fachwerkbögen dieses Überdachungssystems haben Spannweite von 5.5 m bis 22 m. Die Scheitelhöhe variiert dabei zwischen 4.88 und 18.90 m. Bis zu einer Spannweite von 18.90 beträgt die Trägerhöhe ca. 305 mm. Die Ober- und Untergurte haben einen Durchmesser von 60.3 mm, die Diagonalen einen Durchmesser von 25.4 mm. Für die Spannweite von 21.95 m beträgt die Trägerhöhe 610 mm und der Durchmesser von Ober- und Untergurt 73.0 mm. Die Bögen stehen in einem Achsabstand von 3.05 m und werden durch Pfetten in Längsrichtung gehalten. Die patentierten Stahl-Gitterbögen [107] wurden in Zusammenarbeit mit FTL Happold entwickelt. Sie bestehen aus geschweißten vorgefertigten Elementen, die am Aufstellort durch biegesteife Stöße (a) verbunden werden. (Abb. 4-56). Zur Stabilisierung der Bögen aus der Bogenebene heraus werden die druckbeanspruchten Ober- und Untergurte an den biegesteifen Stößen durch gekreuzte Druckstäbe in Richtung der Pfetten gehalten (Abb. 4-50).

Die PVC-Polyestermembran wird als eine Fläche über das Primärtragwerk gezogen und verspannt. Die Kettrichtung des Gewebes ist in Hallenlängsrichtung angeordnet. Die Vorspannung von 0.6 KN/m wird durch mechanische Verlängerung der Pfetten aufgebracht. In Hallenquerrichtung wird die Membran mit 0.6 bis zu 5.0 KN/m durch einen einfachen Ratschenmechanismus vorgespannt [14] [108].

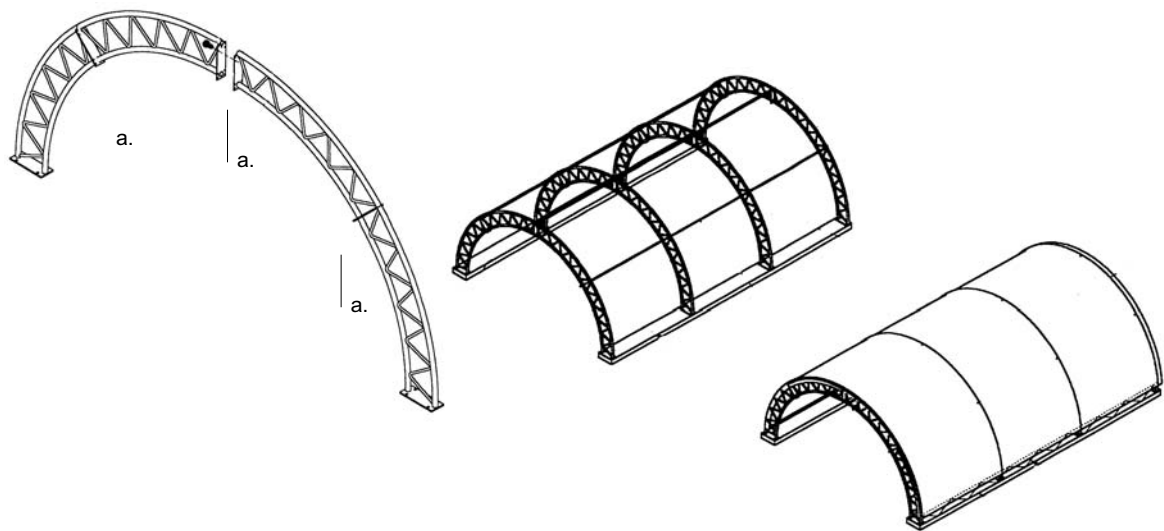


Abb. 4-56. TAS System: Bogen, Konstruktionsprinzip, nach (72)

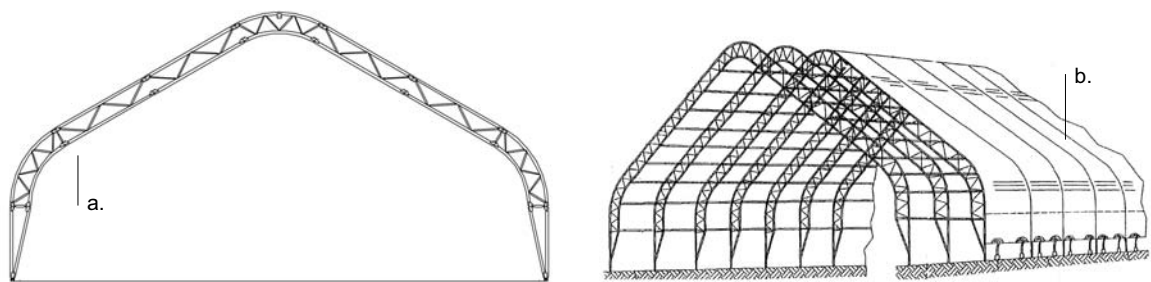


Abb. 4-57. Rahmen der TITAN Serie (61), Axonometrie des Konstruktionsprinzips (74)

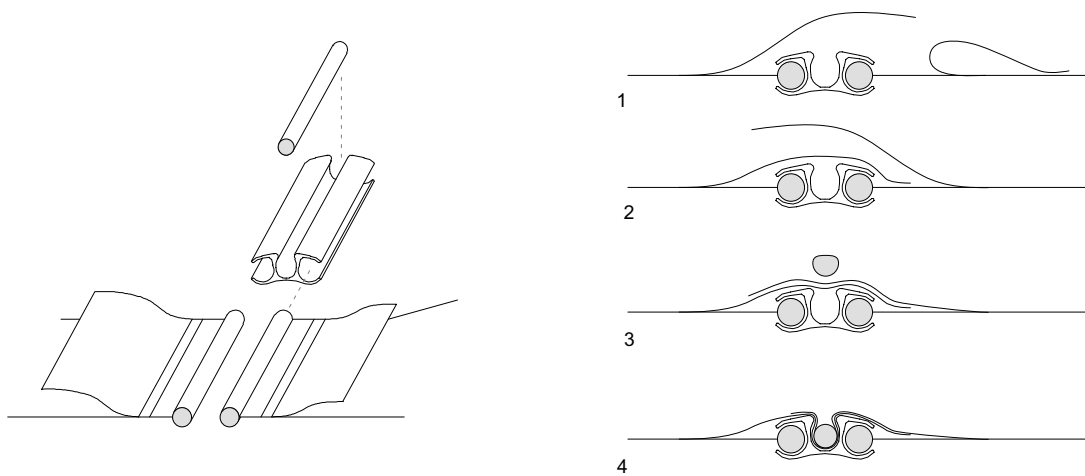


Abb. 4-58. patentiertes TBS Kederprofil System, nach (74)

*TBS (TITAN Building Series)*

Für das Konstruktionssystem TBS werden Fachwerkrahmen aus Stahlrohrprofilen verwendet (Abb. 4-57). Die standardisierten Rahmen sind entsprechend den Spannweiten in drei Serien geordnet: Serie 1 von 9.1 bis 24.4 m, Serie 2 von 24.4 m bis 36.6 m und Serie 3 von 36.6 bis 48.8 m Spannweite. Die Trägerhöhen der Rahmen variieren zwischen 600 mm, 813 mm und 1067 mm, die Querschnitte der Ober- und Untergurte zwischen 88.9 mm, 106.6 mm und 127 mm. Der Achsabstand der Rahmen beträgt maximal 6.10 m. Ebenso wie die Bögen des TAS Systems werden die Rahmen vor Ort mit Hilfe biegesteifer Stöße aus einzelnen vorgefertigten Segmenten zusammengefügt (a). In Längsrichtung werden die Rahmen durch Pfetten gehalten.

Die PVC-Polyestermembran wird in Bahnen von maximal 6.10 m Breite mit Hilfe von Kederprofilen auf den Rahmen befestigt (b). Die Bahnen werden als kontinuierliche Teilflächen von Oberkante Fundament bzw. vom Wandanschluß bis zur Firstpunkt vorgefertigt. Die Teilflächenverbindung erfolgt über ein Aluminium Kederprofil (c), das durch einen aufgenähten Membranlappen abgedichtet wird (d). (Abb. 4-58) Die Membran wird wie beim TAS System mit 0.6 kN/m in Kette und Schußrichtung vorgespannt.

Die Montage aller Überdachungssysteme von Cover All erfolgt auf konventionelle Weise. Entsprechend der Spannweite und First- bzw. Scheitelhöhe der Primärtragwerke werden Mobilkräne, fahrbare Arbeitsbühnen und ähnliche Hilfsmittel eingesetzt. Die Konstruktionssysteme sind für hohe Windlasten und Schneelasten von bis 3.50 kN/m<sup>2</sup> dimensioniert.

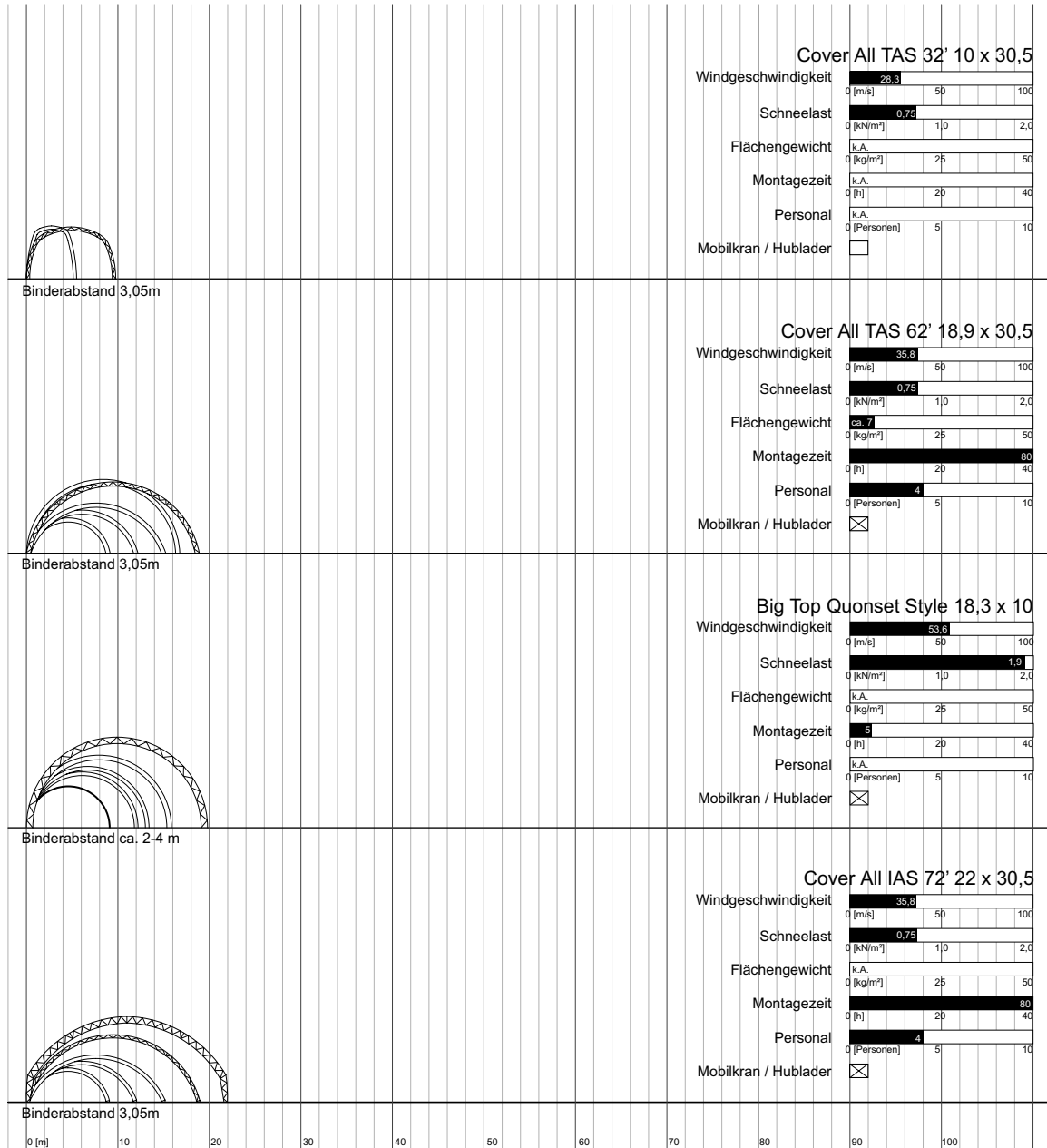


Abb. 4-59. Übersicht Fachwerksysteme

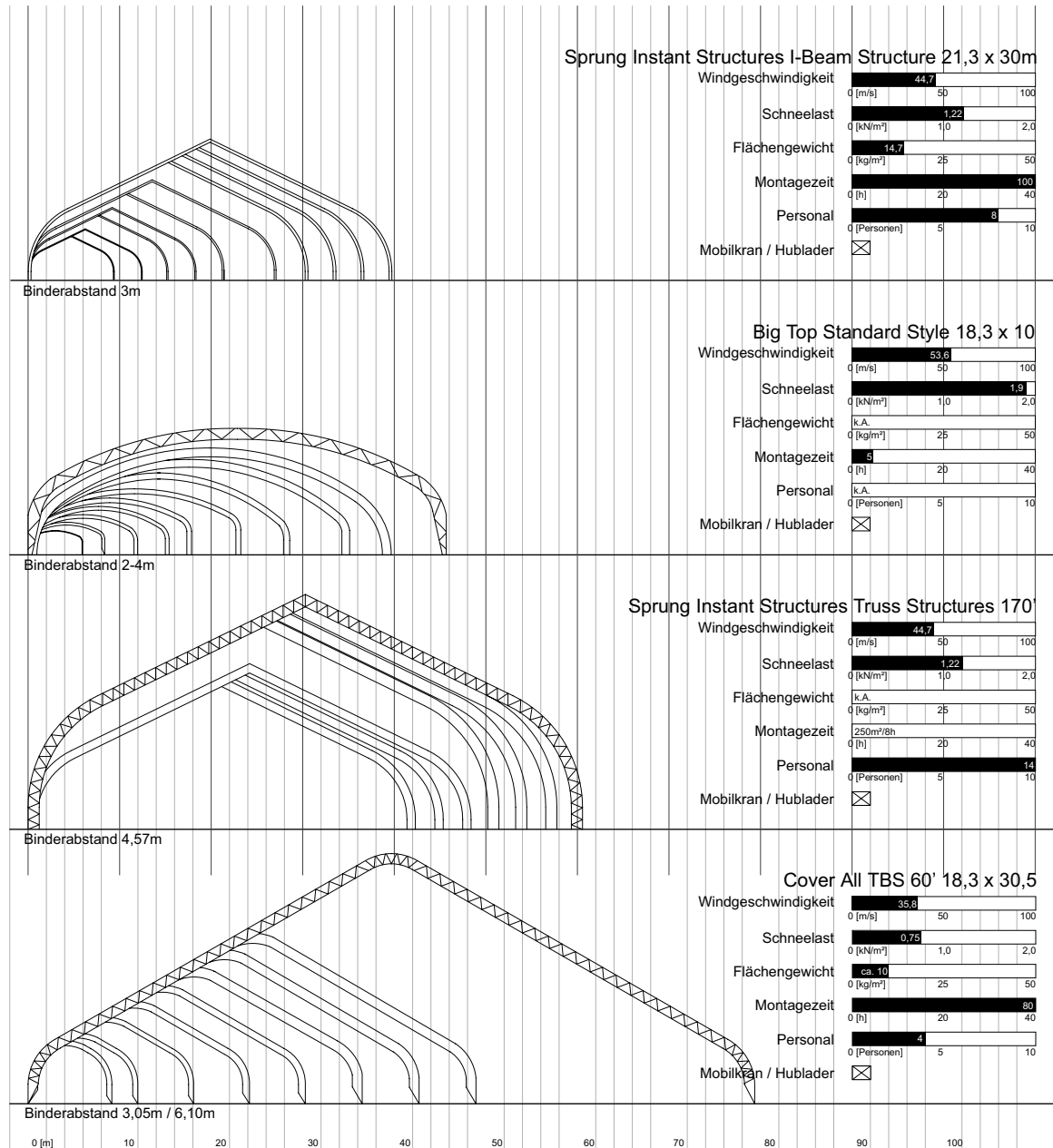


Abb. 4-60. Übersicht Fachwerksysteme



Abb. 4-61. LVRE (57)



Abb. 4-62. LVRE (57)

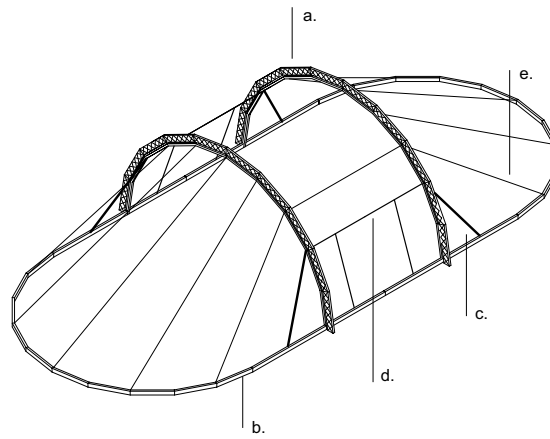


Abb. 4-63. Primärtragwerk

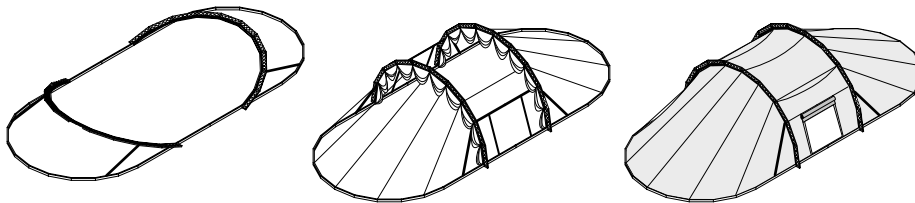


Abb. 4-64. Aufbausequenzen



Abb. 4-65. ARMADILLO- Grundriss Aussenansichten (63)



#### 4.2.4 Schnellbausysteme

##### 4.2.4.1 ABLY Shelters

Die Firma ABLY Shelter bietet neben dem System LIBRA (siehe 4.2.2 Seite 113) auch speziell für das Militär bzw. die Katastrophenhilfe entwickelte Systeme an, die für eine Montage ohne schwere Hilfsmittel, ein möglichst geringes Packvolumen und ein minimales Eigengewicht optimiert wurden. [71]

##### *LVRE (Lightweight Very Rapid Erect)*

Das System LVRE wurde speziell für die Nutzung als mobiler Hangar für Helikopter entwickelt. Wichtige Anforderungen waren die Reduzierung des Eigengewichts und des Packvolumens der Konstruktion auf ein Minimum sowie ein einfaches und robustes Verankerungssystem und eine schnelle Montage mit wenig Personal und ohne schwere Hilfsmittel. Die Konstruktion mit einer Breite von 15.3 m und 35.6 m Länge überdacht eine Fläche von 480.5 m<sup>2</sup>. Das Tragwerk besteht aus zwei polygonalen Fachwerkbögen mit einer Spannweite von 15.3 und einer Scheitelhöhe von ca. 7.5 m (a.), die aus jeweils 10 Segmenten zusammengesetzt werden. (Abb. 4-63)

Die Bögen stehen im Abstand von 9 m auf einem umlaufenden Fundamentbalken (b), der vor der Montage der Bögen ausgelegt wird. Die Verwendung eines Biegeträgers als Fundament erlaubt die Aufstellung ohne aufwendige Vorbereitung des Untergrundes und eine Montage ohne Verankerung bei Windgeschwindigkeiten unter 9 m/s. [92] Zusätzlich wird eine Beschädigung des Aufstellortes weitgehend vermieden und geringfügige Unebenheiten können einfach ausgeglichen werden. Ein Bewegen der Gesamtkonstruktion auf Rollen nach dem Aufbau ist ebenfalls möglich. Zur Herstellung der Standsicherheit nach der Montage ist eine Verankerung bzw. Ballastierung des Fundamentbalkens notwendig. Die Bögen sind jeweils in den unteren Drittelpunkten durch Abstreben (c.) und Pfetten (d.) gesichert bzw. zusammen mit Zugseilen stabilisiert. (e.)

Die PVC-Polyestermembran ist in drei Teilflächen aufgeteilt, die über Kederschien mit den Bögen kontinuierlich verbunden sind. Die Membran der Endfelder kann entlang der Abspannseile zu den Bögen hin gerafft werden um ein Einfahren des Helikopters zu ermöglichen.

Die Montage kann in 4.5 Stunden mit einem kleinen Team von mindestens vier Personen ohne schwere Hilfsmittel wie Mobilkran oder Telekopstabler erfolgen. Alle Arbeiten werden am Boden ausgeführt. Zuerst werden die Fundamentbalken ausgelegt und die Bögen zusammengefügt und in

Position gebracht. Dann werden die Zugseile und Membrane an den Bögen befestigt und diese mit Hilfe der Stabilisierungsstäbe leicht angehoben. Das weitere Aufrichten der Bögen erfolgt mit Hilfe der Abspannseile und einfachen Seilwinden. Nachdem die Bögen ihre Endposition erreicht haben wird die Membran entfaltet und gespannt. Mit dem Sichern des Fundamentbalkens durch Bodenanker oder Ballastierung ist der Aufbauvorgang abgeschlossen. Das Eigengewicht aller Einzelelemente des Stütztragwerks wurde auf eine Handhabbarkeit für zwei Personen optimiert, die Teilflächen der Membran können von vier Personen transportiert und montiert werden.

Das Konstruktionssystem ist für Windgeschwindigkeiten von 29 m/s und Schneelasten von 0.5 KN/m<sup>2</sup> dimensioniert. Das Gewicht der Gesamtkonstruktion beträgt 6.8 t. Es kann in zwei 6 m- oder einem 12 m ISO Container transportiert werden.

#### *VLAS (Very Large Area Shelter) - ARMADILLO*

Das VLAS System ist die für den mobilen Einsatz optimierte Variante des Systems LIBRA. Das Haupttragwerk besteht aus Fachwerkrahmen, die aus Grundkomponenten zu Rahmen mit einer Spannweite bis zu 35 m kombiniert werden können (Abb. 4-65). Vorteil der Rahmenhallen mit Membrandeckung ist das robuste Konstruktionssystem aus Aluminiumfachwerkelementen, das eine Vielfalt von Varianten erlaubt. Die in einem engen Achsabstand stehenden Rahmen bilden mit Pfetten und Auskreuzungen ein in sich stabiles Primärtragwerk, auf dem die eine ebene Membran als Hülle befestigt wird. Ein speziell für die Nutzung als mobilen Hangar optimierter Typ dieses System ist das Modell ARMADILLO (Abb. 4-65), das in 2 Versionen mit einer Breite von jeweils 8.8 bzw. 10 m und einer Länge von 21 m bzw. 22.7 m eine Fläche von ca. 183 bzw. 224 m<sup>2</sup> überdacht. [92] Das Tragwerk besteht aus vier Zweigelenrahmen, die durch Pfetten ausgesteift ein in sich stabiles Primärtragwerk bilden, und zwei Falttören nach dem Clamshell-Prinzip, die eine vollständige Öffnung der Vorder- und Rückseite erlauben. Die PVC-Polyestermembran spannt von Rahmen zu Rahmen und wird durch ein einfaches Klemmplattensystem befestigt. Alle Elemente des Systems sind von einer Person transportierbar. Die Montagezeit beträgt für ein Team von 8 Personen ohne Hebwerkzeuge ungefähr 8 Stunden.

Das Konstruktionssystem ist für eine max. Windgeschwindigkeit von bis zu 50 m/s und eine Schneelast von 1.0 KN/m<sup>2</sup> dimensioniert. Das Packgewicht beträgt 2.5 bzw. 2.8 t.

#### 4.2.4.2 Weatherhaven - WideSpan

Die kanadische Firma Weatherhaven hat sich auf die Herstellung und den Vertrieb von Überdachungssystemen für den extremen Einsatz in schwer erreichbaren Gebieten spezialisiert.[95] Neben einem faltbaren Wohncontainer und zwei verschiedenen Systemen von Tunnelzelten mit Spannweiten bis zu 10 m entwickelte Weatherhaven eine patentierte Lösung [110] für eine Membranhalle mit einem wandelbaren Bogentragwerk von 15 bis 46 m Spannweite. Die Konstruktion wird mittlerweile vom britischen Partnerunternehmen ABLY Shelters angeboten und vertrieben.

##### *Widespan*

Das System ist streng modular aufgebaut, was eine wahlweise Erweiterung der Halle in Längsrichtung im Grundraster von 3.7 m ermöglicht. Die Einzelelemente des Systems haben jeweils ein maximales Eigengewicht von 68 kg eine maximale Länge von 3.66 m. Die Halle wird als Lagerraum und mobile Werkstatt oder Flugzeughangar genutzt. Die Konstruktion besteht aus einem in sich stabilen Primärtragwerk aus Bögen, Pfetten und Auskreuzungen, das mit einer Hülle aus einzelnen Membranbahnen versehen wird.

Hauptelement des Tragwerks sind die wandelbaren Fachwerkbögen (Abb. 4-69), die sich jeweils aus sechs Segmenten zusammensetzen (a.). Die Segmente sind an den Obergurten in einem Gelenk (b.) und an den Untergurten über ein Führungselement (c.) gekoppelt. Das Aufrichten der Bögen erfolgt durch das Anspannen eines Kabels zwischen den Fußpunkten. (d.) Während des Aufrichtvorgangs gleitet im Führungselement ein Bolzen entlang des Schlitzes bis die Segmente ihre Endposition erreicht haben. Nach Beendigung des Aufrichtvorgangs wird der Verbindungspunkt der Untergurte der Bögen fixiert. An den Enden der Bögen sind höhenverstellbare Endstücke montiert, die auf Bodenplatten befestigt werden. Nach Abschluss des Aufrichtens werden die Endpunkte der Bögen auf durch Erdnägel gesicherten Fußplatten verankert und das Spannkabel entfernt.

In Längsrichtung sind die Ober- und Untergurte der Bögen mit Rundrohren (e.) verbunden und in beiden Ebenen durch Zugseile (f.) ausgekreuzt.(Abb. 4-71). Die Hülle besteht aus Membranstreifen mit 3.7 m Breite, die mit Hilfe von Polyestergurten im Abstand von ca. 1 m entlang der Bögen befestigt sind. Es gibt unterschiedliche Arten von Membranelementen für Standard- (g.) bzw. Endstücke (h.). Die Membranelemente sind an Ihren Längsrändern mit einer Art „Zahnleiste“ von Membrantaschen versehen die nach dem Zusammenfügen durch einen flexiblen Rundstab mit 13 mm Durchmesser und 3.50 m Länge „vernäht“ werden.



Abb. 4-66. Geologisches Camp mit verschiedenen Überdachungssystemen (66)



Abb. 4-67. Innenansicht einer Lagerhalle, (66)

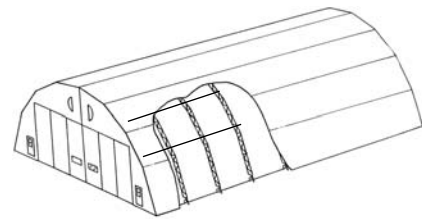


Abb. 4-68. Isometrie des Systems (75)

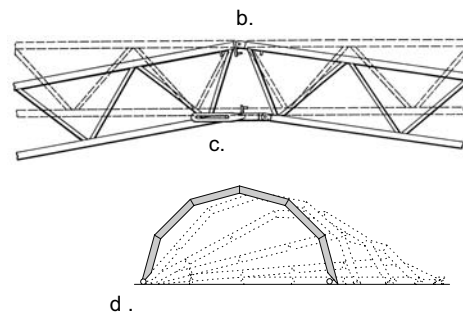
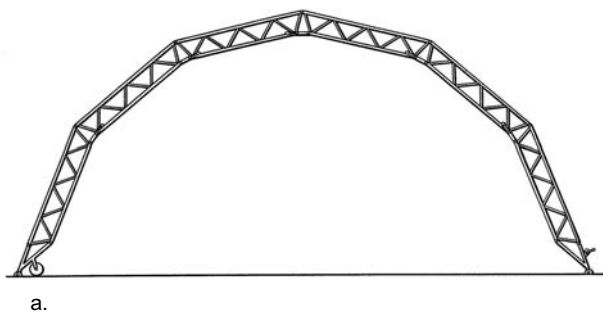


Abb. 4-69. Wandelbarer Bogen (75)

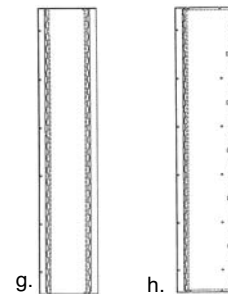
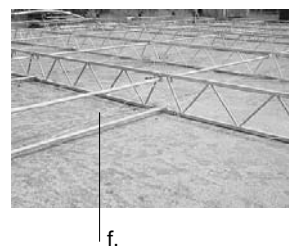
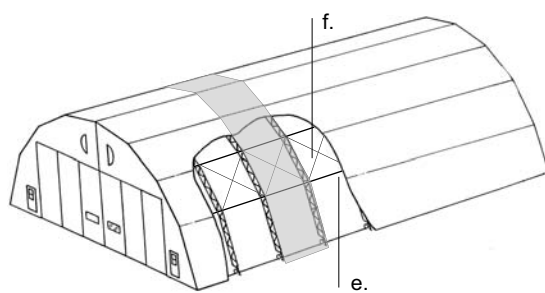


Abb. 4-70. Membranbahnen und Aussteifung

Abb. 4-71. Verbände (f)(66)

Abb. 4-72. Membranbahnen

Anschließend wird der Stoß durch einen jeweils auf einer Seite jedes Elements aufgenähten Membranstreifen abgedeckt. Dieser Abdeckstreifen wird mit Druckknöpfen auf dem jeweils folgenden Element befestigt und durch ein in einer Membrantasche laufendes Seil nach beiden Seiten gespannt und an den Fußpunkten der Bögen gesichert. Die kurzen Seiten der Membranelemente besitzen ebenfalls eine Randtasche, durch die ein Vollstab mit angeschweißten Ringen gezogen wird. Mittels eines durch diese Ringe gezogenen Seils wird das Membranelement gegen die Fußpunkte der Bögen gespannt. Das sehr aufwendige Verbindungsprinzip der einzelnen Membranelemente untereinander wurde ursprünglich für mehrlagige Paneele mit Wärmedämmung entwickelt. Die Aufteilung der Hülle in relativ kleine Membranmodule erlaubt die Herstellung einer Hülle für Hallen mit gleicher Spannweite und unterschiedlicher Länge aus den gleichen Elementen. Gleichzeitig sind dadurch auch die Membranelemente durch zwei Personen transportierbar. Der Nachteil dieses Konzeptes sind die vielen und langen lösbaren Teilflächenverbindungen.

Das Zusammenfügen aller Elemente der Konstruktion erfolgt ebenerdig. Nach der Vormontage der Bogenträger, Pfetten und Auskreuzungen werden die Membranbahnen an den Bögen befestigt und untereinander verbunden. (Abb. 4-73) Die eine Seite der Bögen wird horizontal unverschieblich in den mit Erdnägeln gesicherten Fußpunkten befestigt. Dann werden die Zugseile, die die Fußpunkte der Bögen verbinden angespannt, und die bewegliche Seite der Bögen beginnt sich in Richtung der festen Fußpunkte zu bewegen und aufzurichten. (Abb. 4-73) Mit Hilfe einfacher Handwinden kann so die gesamte Konstruktion am Boden montiert werden.



Abb. 4-73. Aufrichtvorgang (66)





Abb. 4-74. Überdachung einer Leichtathletikanlage (59)

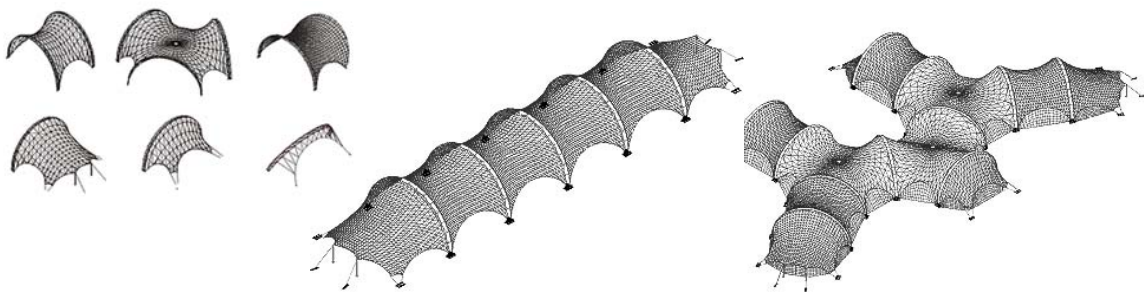


Abb. 4-75. Grundmodule und Kombinationsmöglichkeiten (59)



Abb. 4-76. Showroom (59)



Abb. 4-77. Bühnenüberdachung (59)



Abb. 4-78. Setzen der Erdnägel und Bogenmontage (59)



Abb. 4-79. Aufrichten der Bögen (59)

#### 4.2.4.3 Spannbau GmbH - Behrend Halle

Die Firma Spannbau GmbH ist seit 1979 als Hersteller und Verleiher mobile Überdachungen tätig. Der Gründer der Firma, Rüdiger Behrend, entwickelte ein innovatives, robustes und flexibles System aus Dreigurtbögen, die zusammen mit doppelt gekrümmten Membranflächen ein interaktives Tragsystem bilden, bei dem die Membran sowohl Hülle als auch Teil des Primärtragwerks ist. Das Konstruktionssystem ist in erster Linie als offener Wetterschutz für Veranstaltungen unterschiedlichster Art konzipiert, wird aber auch im Sport- und Industriebereich eingesetzt. Durch das Hinzufügen vertikaler Membranelemente und fester Eingangstüren können auch geschlossene, klimatisierte Räume erzeugt werden.

Das System ist streng modular aufgebaut. Mit jeweils drei Grundmodulen von Mittel- und Endform können von einer längsorientierten Halle über einen Zentralraum bis hin zu einer Freiluftbühne verschiedene Grundrissvarianten erzeugt werden. (Abb. 4-75) Die polygonalen Bögen werden mit einer Spannweite von 18 m bzw. 24 m und einem Stich von 9.3 m bzw. 12 m angeboten. Für Sonderkonstruktionen können weitere Varianten angefertigt werden.

Die Aluminiumkonstruktion der Bögen besteht aus 8 Segmenten von jeweils 3.42 m Länge, die vor Ort miteinander verschraubt werden. Die Obergurte werden durch zwei Quadratrohre gebildet, die biegesteif verbunden horizontal als ein Vierendeelträger wirken. In Bogenebene ist in der Mitte jedes Segmentes ein Vertikalstab angeordnet, der durch Diagonalstäbe mit dem Koppelpunkt der Obergurte verbunden ist. Der Untergurt wird durch zwei Flachprofile als Zuggurte gebildet, mit denen der Bogen vorgespannt wird und eine ausreichende Steifigkeit gegen asymmetrische Lasten erhält. Der Abstand der Bögen beträgt bei linearer Anordnung 12.8 m.

Der mit einem Gurt verstärkte Rand der PVC-beschichteten Polyester membran wird über Ösen kontinuierlich mit den Bögen verbunden und durch die Randseile vorgespannt. Die Membran stabilisiert die Bögen senkrecht zur Bogenebene und bildet somit ein aktives Element des Primärtragwerks. Die Endfelder des Systems werden mit Hilfe von Bodenankern abgespannt.

Die Montage kann in kurzer Zeit mit einem kleinen Team ohne schwere Hilfsmittel wie Mobilkräne oder Gabelstapler erfolgen. Für eine Halle mit drei Bögen benötigen 9 Personen ca. 12 Stunden. Alle Arbeiten werden am Boden ausgeführt. Zuerst werden die Verankerungsplatten eingemessen und mit Erdnägeln gesichert. Danach werden die Bögen zusammengefügt und die Membran an den Bögen

befestigt. Mit Hilfe eines sogenannten "Bogenhebers" werden die Bögen mitsamt der Dachhaut aus dem toten Winkel gehoben und die Bögen anschließend mittels Seilzügen aufgerichtet. Die Dachhaut wird über die Randseile an den entsprechenden Abspannplatten befestigt. Durch das Vorspannen der Membran wird die Standsicherheit der Überdachung hergestellt.

Das Konstruktionssystem ist für Windgeschwindigkeiten von 28.3 m/s bzw. 35.8 m/s dimensioniert, jedoch standardmäßig nicht für Schneebelastungen ausgelegt. Die Bögen haben ein Packvolumen von ca. 6.5 m<sup>3</sup>, die Dachhaut und die Verankerungselemente eines Bogens jeweils ca. 2.5 m<sup>3</sup>. Eine geschlossene Überdachung mit drei Bögen (760 m<sup>2</sup>) hat ein Transportvolumen von 2.4 x 16.6 x 2 m und ein Transportgewicht von 10 t einschließlich der Montagewerkzeuge.

#### 4.2.4.4 TVI, DRASH - Pantographen Systeme

Pantographen oder Scherensysteme werden für verschiedene Konstruktionen kleinerer Spannweite von 3 bis ca. 10 m als Stützkonstruktion für eine ebene, nicht vorgespannte, ein- oder mehrlagige Membranhülle verwendet. Der Grundgedanke, durch Scherengelenke faltbare Stabwerke für mobile Konstruktionen zu verwenden, führte seit dem Entwurf des spanischen Architekten E. P. Pinero für eine mobile Theaterüberdachung zu einer Vielzahl von Konstruktionsvorschlägen, von denen in [53] und [17] die wichtigsten vorgestellt und ausführlich besprochen werden. Fast alle der Systeme beruhen auf einem orthogonalen Scherenstabwerk, das durch orthogonale und in einigen Fällen auch diagonale Seilzüge bewegt und versteift wird. (Abb. 4-80) Das Grundproblem dieser Systeme ist die Biegebeanspruchung der Scherenstäbe im versteiften Endzustand bei einer Belastung durch externe Lasten. Dadurch ist die Tragfähigkeit der Systeme stark begrenzt. Hinzu kommen aufwendige Verbindungsknoten, die mindestens fünf Elemente gelenkig mit minimalen Toleranzen und möglichst geringen Exzentrizitäten der Stabachsen verbinden müssen. Die für seriell hergestellte Überdachungen verwendeten Systeme beruhen im wesentlichen auf Patenten der US-amerikanischen Konstrukteure Zeigler, Nodskov und Thelander.

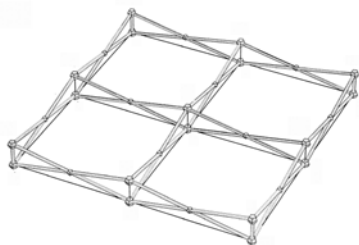


Abb. 4-80. Grundprinzip (29)

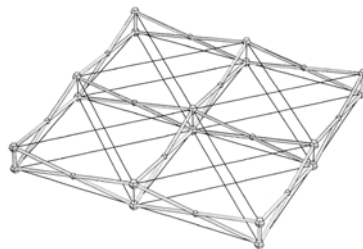


Abb. 4-81. System nach Zeigler (29)

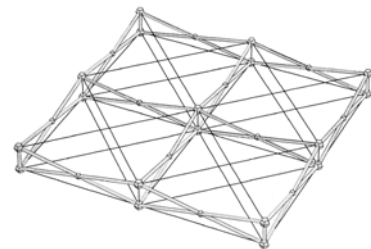


Abb. 4-82. System nach Nodskov, Thelander (29)



### TVI

Das Prinzip des US-amerikanischen Unternehmens TVI Corporation beruht im Wesentlichen auf dem System von Zeigler. Ein tonnenförmiges orthogonales Scherengitter dient als Stützkonstruktion für eine ein- bzw. mehrlagigen Membranhülle. Die Firma entwickelte ein eigenes patentiertes Knotensystem aus Kunststoff [105] mit einem Schließmechanismus, der sowohl eine Kontrolle der Verformung bis zum Endzustand als auch die anschließende Versteifung erlaubt. Die Konstruktionen werden vorrangig im militärischen Bereich als Unterkunft, Feldlazarett etc. genutzt.



**Abb. 4-83.** Überdachungssystem von TVI Corporation

Die Konstruktion aus Aluminiumstabwerk, innerer und äußerer Membran wird als eine Einheit transportiert und errichtet. Ein Regeltyp besteht aus 254 Stäben und 144 Verbindungselementen. Die Vorteile der Konstruktionen liegt zum Einen in den extrem kurzen Aufbauzeiten von nur 2 bis 5 Minuten für zwei Personen, zum Anderen in ihrem geringen Transportvolumen und -gewicht. Die Spannweiten mit 4.6 m, 5.6 m und 7.6 m und die Tragfähigkeit des Systems sind jedoch aus den oben genannten Gründen stark eingeschränkt.

### DRASH<sup>TM</sup> - Deployable Rapid Assembly Shelter

Die gleichnamige US-amerikanische Firma entwickelte aus einem weiteren Patent von Zeigler [99] ein modulares Überdachungssystem, das auf einem ähnlichen Grundgedanken wie das System von TVI beruht. Die Geometrie ergibt sich aus mindestens zwei sich kreuzenden Bogenscharen aus Scherenstäben. Auch hier wird das Stabwerk durch selbstschließende Knoten versteift, wenn die Scheren ihre Endposition erreicht haben. Aus den gleichen Grundelementen von Scherenstäben und Knoten können verschiedene Geometrievarianten mit Spannweiten zwischen 3.5 m und 10 m realisiert werden. Die Anwendung des Systems beschränkt sich vorwiegend auf militärische Nutzungen als Kommando- oder Erste Hilfe-Station.

Das Stabwerk besteht aus Titanite®-Rohren, die gegenüber üblichen Hochleistungsaluminium-Rohren die dreifache Festigkeit aufweisen. [79] Die innere und äußere Membran besteht aus Xytex®,

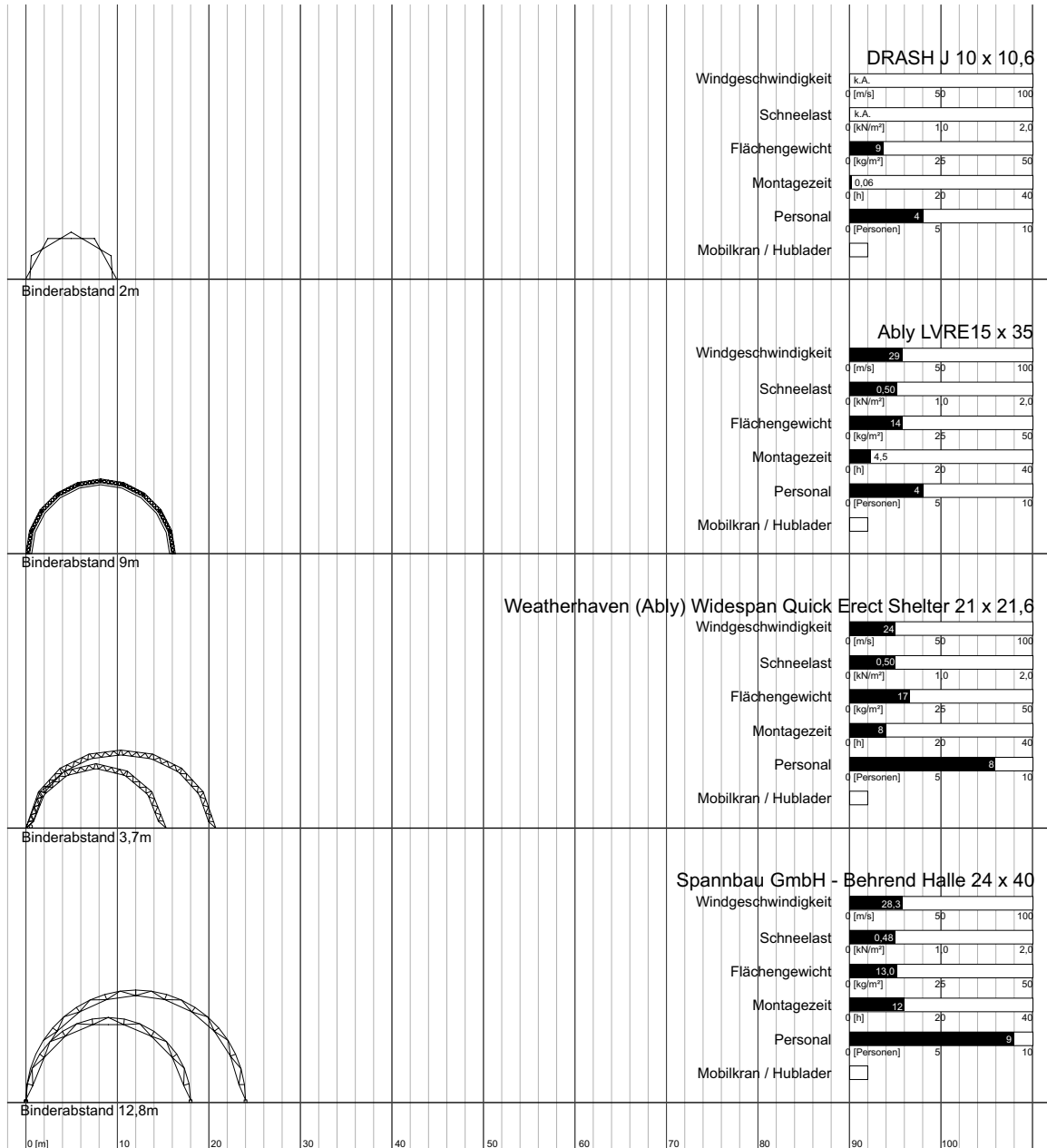


Abb. 4-84. Übersicht Schnellbausysteme

einem beschichtetem Nylongewebe, und ist permanent an der Stützkonstruktion befestigt. Der Abstand zwischen den beiden Membranlagen beträgt 0.12 m. Der U-Wert der Hülle wird vom Hersteller mit 2.2 angegeben.

Die Systeme können in Abhängigkeit von ihrer Größe von zwei bis vier Personen in zwei bis vier Minuten errichtet werden. Die Modularität, das geringe Konstruktionsgewicht, Schnelligkeit und Robustheit im Aufbau hat dem Konstruktionssystem zu einer großen Popularität im militärischen Bereich als Überdachung kleiner Spannweite verholfen.



Abb. 4-85.

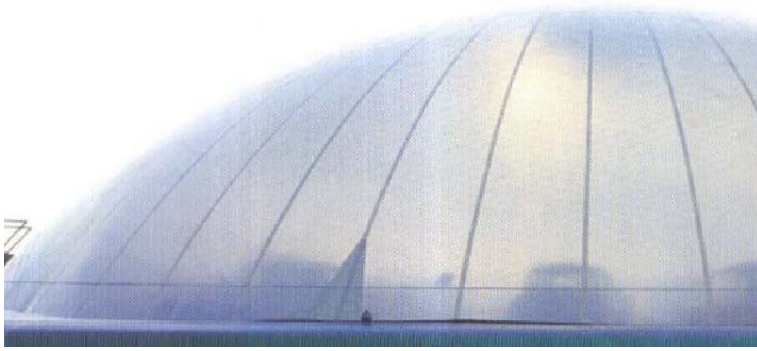


Abb. 4-86. Airquarium - Aussenansicht



Abb. 4-87. Innenansicht



Abb. 4-88. Les Arts Sauts (9), (58)

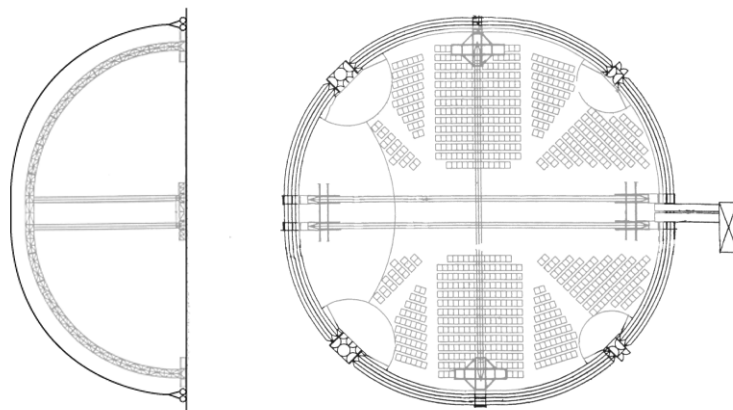


Abb. 4-89. Querschnitt, Grundriss (9)

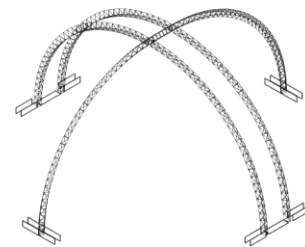


Abb. 4-90. Einbauten (9)



Abb. 4-91. Aufblasen der Membran (58)



Abb. 4-92. Ringschläuche

### 4.3 Luftgestützte Systeme

Die weitverbreiteten Traglufthallen sind luftgestützte Membrankonstruktionen. Ihre Form und damit ihre Tragfähigkeit wird durch einen Innendruck bewirkt, der größer ist als die äußeren Belastungen aus Wind oder Schnee. Da der im Inneren der Halle herrschende notwendige Überdruck relativ gering ist (ca. 0,0025 - 0,005 bar oder 0,25 - 0,5 kN/m<sup>2</sup>), werden diese Systeme auch als Niederdrucksysteme bezeichnet. Um einen plötzlichen Druckabfall zu verhindern sind Schleusen für die Eingänge und Öffnungen notwendig.

Der Vorteil dieser Bauweise liegt in der Möglichkeit, sehr große Spannweiten mit einem minimalen Material- und geringen Energieaufwand zu überspannen. Nachteilig ist die fehlende Modularität und die aufwendige Schleusenkonstruktion. Hinzu kommt die notwendige Steuer- und Regelungstechnik, die die schnelle Anpassbarkeit des Innendrucks des großen Luftvolumens an starke Schwankungen des Luftdrucks in der Atmosphäre erfordert. Die Schwankungen des Umgebungsdrucks liegen in Mitteleuropa ungefähr bei 20 mbar = 2,0 kN/m<sup>2</sup>. Dies ist um einiges höher als der Überdruck, mit dem die Membranen von Traglufthallen vorgespannt werden. [64] Diese Gründe haben dazu geführt, dass nur wenige Einzellösungen mobiler Bauten als luftgestützte Membrankonstruktionen entwickelt und genutzt werden.

#### 4.3.1 Festo-Airquarium

Die Firma Festo AG & CO aus Deutschland ist ein bekannter Hersteller von Druckluftprodukten und innovativer Entwickler neuer Anwendungen von pneumatischen Konstruktionselementen. Für eine Nutzung als firmeneigene transportable Ausstellungshalle entwickelte Festo das sogenannte Airquarium. Zielvorgaben waren eine einfach zu transportierende, schnell montierbare Konstruktion und ein Inneraum mit hoher Lichtqualität.

Das Bauwerk hat eine Kuppelform mit kreisrundem Grundriss. Die Kuppel mit einem Durchmesser von 32 m und einer Stichhöhe von 8 m umschließt ein Raumvolumen von 2 250 m<sup>3</sup>. Die Membran aus einem mit künstlichem Kautschuk beschichteten Gewebe (ContiVitroflex®) wird durch einen für ein luftgestütztes System relativ hohen Innendruck zwischen 0,025 bar und 0,035 bar stabilisiert und in Form gehalten. Die Steuerung des Innendrucks erfolgt automatisch in Abhängigkeit von der Windlast, die kontinuierlich durch äußere Sensoren gemessen wird. Als Fundament fungiert ein wassergefüllter Schlauch mit einem Gesamtgewicht von 120 t, der einfach auf einem ebenen Untergrund platziert werden kann. Er bildet eine einfache und effiziente Abdichtung und Verankerung der luft-

gestützten Kuppel. Um eine Verlagerung des Wassers bei leichtem Gefälle des Baugrundes zu verhindern, ist der Schlauch in einzelne Kammern unterteilt. Die Halle wird durch einen Eingangstunnel mit Drehtür betreten, die als Luftschleuse funktioniert und damit den notwendigen Innendruck erhält. Die Hülle mit einer Fläche von 800 m<sup>2</sup> kann zu einem Ballen von 6.2 x 1.5 x 2.1m zusammengefaltet werden.[77] Das Gewicht beträgt 1.600 kg. Alle Elemente der Kuppel füllen einen ISO Container mit 6 m Länge. In einem zweiten Container ist die gesamte technische Versorgung wie Luftaufbereitung, Heizung, Wassertauscher für die Kühlung, Notstromaggregat für 48 Stunden, Wetterstation, Thermostatsteuerung und windlastabhängige Luftdruckregelung untergebracht.

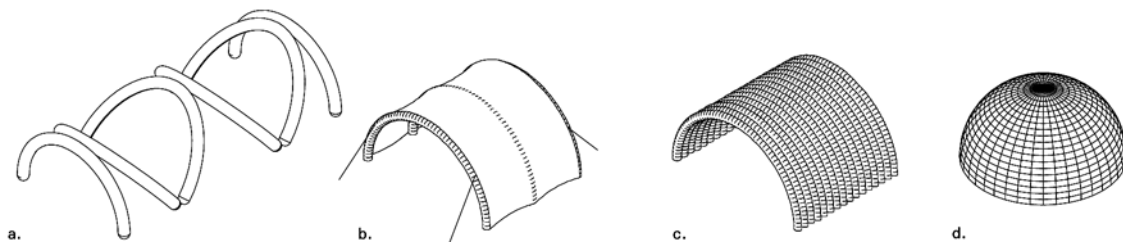
#### 4.3.2 Les Arts Sauts - Kayassine

Der luftgestützte Zirkusbau wurde 1998 von dem Architekten H. W. Müller für die französische Trapezkünstlergruppe „Les Arts Sauts“ entworfen. Der Durchmesser des kugelförmigen Baus beträgt 41 m, die Höhe 19.8 m. (Abb. 4-89) Der Innenraum mit 18 000 m<sup>3</sup> fasst 900 Zuschauer und ermöglicht unterschiedliche Bühnenanordnungen. Um das Anbringen der Trapeze, der Beleuchtungs- und Ton-technik zu ermöglichen, werden unabhängig von der Membran drei Viergurtbögen mit einer Spannweite von jeweils 40 m errichtet.(Abb. 4-90) Der Zentralraum kann durch mehrere Luftschleusen betreten werden.

Die Verankerung der luftgestützten Hülle erfolgt durch zwei wassergefüllte Ringschläuche (Abb. 4-92). Das PVC-beschichtete Polyestergewebe hat ein Gesamtgewicht von 6 t und benötigt einen Sattelzug als Transportmittel. Der Aufbau der pneumatischen Konstruktion benötigt einen Tag, für die Montage der Gesamtkonstruktion sind 3 Tage und bis zu 25 Arbeitskräfte notwendig. Die Viergurtbögen werden nach dem Errichten der pneumatischen Konstruktion als Segmente in den Inneraum transportiert und dort zusammengesetzt und aufgerichtet. Als mechanische Hilfsmittel werden Gabelstapler, Teleskopklader und Flaschenzüge bei der Montage verwendet. Bis 2003 wurde die Konstruktion weltweit eingesetzt, seit 2004 tourt die Künstlergruppe mit einem neuen mobilen Bau, der für die aktuelle Inszenierung entwickelt wurde.

#### 4.4 Luftgefüllte Systeme

Luftgefüllte Membrankonstruktionen eignen sich zur Überdachung kleiner und mittlerer Spannweiten. Die alltäglichen Anwendungen wie Autoreifen, Luftmatratze oder Schlauchboot zeigen die typischen Eigenschaften, die alle pneumatischen Konstruktionen auszeichnet: geringes Eigengewicht, einfache Wandelbarkeit durch Aufrollen oder Zusammenfallen, geringe Transport- und Lagerabmessungen, schnelle Montage und Demontage. Gegenüber den luftgestützten Systemen sind luftgefüllte Systeme in ihrer Anwendung wesentlich flexibler. Die in der Regel aus mehreren luftgefüllten Elementen bestehenden Konstruktionen besitzen geringere, leichter steuerbare Luftvolumen, einen nicht unter Überdruck stehenden Innenraum, eine hohe Redundanz und können als modulare Systeme konzipiert werden. Die luftgefüllten Elemente werden je nach Volumen und Belastung durch extrem unterschiedliche Innendrucke stabilisiert. Man unterscheidet deshalb Niederdrucksysteme (ca. 0,0025 - 0,005 bar oder 0,25 - 0,5 KN/m<sup>2</sup>) und Hochdrucksysteme (ca. 0,2 - 5,5 bar oder 20 - 550 KN/m<sup>2</sup>). Hochdrucksysteme unterscheiden sich von den Niederdrucksystemen neben dem Maß der Druckdifferenz auch durch die verwendeten Materialien, ihre Konstruktionsweise und den verwendeten Tragsystemen.



**Abb. 4-93.** Beispiele luftgefüllter Tragwerke

Die dreidimensionale Form der luftgefüllten Elemente kann röhrenartig, kissen- oder kugelförmig sein. Als lineare Elemente, die an einzelnen Punkten zusammengefügt sind, können sie ein in sich stabiles Primärtragwerk (a) (Abb. 4-61) oder zusammen mit weiteren Tragelementen wie mechanisch vorgespannte Membranen oder Zugstäbe hybride Systeme (b) bilden. Ebenso ist die indirekte oder direkte kontinuierliche Verbindung einzelner luftgefüllter Elemente zu einem Flächentragwerk möglich (c).

Die Entwicklung neuer textilen Materialien und die Herstellmöglichkeit nahtlose Luftkammern hat auf dem Gebiet der Hochdrucksysteme Ende der 90er Jahre zu einer raschen Entwicklung neuer mobiler Konstruktionen mit Primärtragwerken aus einzelnen weitspannenden Hochdruckelementen geführt. Während über einen langen Zeitraum nur Tragwerke aus Elementen mit Innendrücken von





Abb. 4-94. Bogenschalensegment 1999, (54)



Abb. 4-95. Flugzeughangar 2003, (53)



Abb. 4-96. Belastungstest (65)



Abb. 4-97. Nahaufnahme des Hülschlauchs (65)

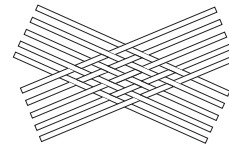


Abb. 4-98. STAT, Aussenansicht (65)



Abb. 4-99. SAFS Aussen- und Innenansicht (65)



Abb. 4-100. MASTER Aussenansicht, Aufsicht, Axonometrie, Seiten- und Vorderansicht (65)

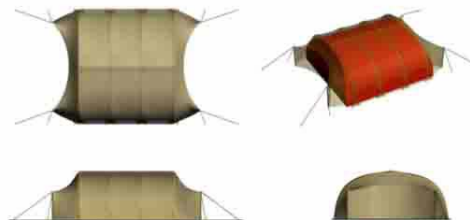
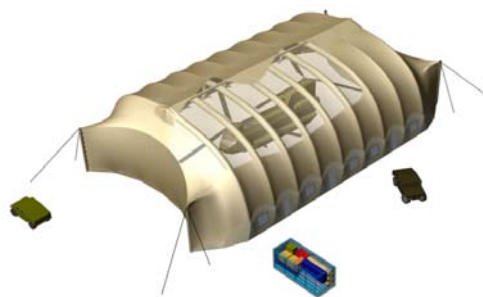


Abb. 4-101. AIMS Aussenansicht, Axonometrie (65)





max. 0.1- 0.5 bar realisiert wurden arbeiten diese neuen Systeme mit bis zu 5.5 bar. Die im Folgenden vorgestellten Systeme zweier Anbieter stellen nur eine kleine Auswahl der existierenden Systeme dar. Gleichzeitig zeigen sie beispielhaft die beiden Grundrichtungen der Entwicklung von luftgefüllten Systemen.

#### 4.4.1 Lindstrand Technologies

Lindstrand Technologies ist eine Firma, die in den USA und Großbritannien tätig ist.[62] Sie entwickelte verschiedene Anwendungen für luftgefüllte Konstruktionen unterschiedlichster Spannweite und Nutzung, die auf dem Prinzip kontinuierlich indirekt verbundener Luftschläuche beruhen. (Abb. 4-94) Ein Beispiel ist ein Bogentragwerk mit 18 m Spannweite und einer Scheitelhöhe von 17 m (Abb. 4-94). Die einzelnen röhrenförmigen Elemente haben Durchmesser zwischen 500 bis 1000 mm. Das Gewicht eines Bogensegmentes von 12 m Länge beträgt 135 kg. Eine weitere erfolgreiche Anwendung des Grundprinzips ist ein mobiler Flugzeughangar mit einer Länge von 16 m (Abb. 4-95). Die bogenförmigen Elemente überspannen 12 m bei einer Stichhöhe von 9 m. Die Konstruktion ist für Windgeschwindigkeiten bis 26 m/s und Schneelasten von ca. 0.45 KN/m<sup>2</sup> standsicher. Der Aufbau kann innerhalb von 30 Minuten mit 4 Personen bei einer maximalen Windgeschwindigkeit von 10 m/s erfolgen. Das Gewicht der Membrankonstruktion aus PVC-Polyester beträgt 500 kg.

#### 4.4.2 Vertigo Inc.

Die Firma Vertigo Engineering Incorporated [94] produziert vier verschiedene mobile Überdachungssysteme, die Hochdruck-Bogenelemente als Primärtragwerk nutzen. Die Systeme sind das Resultat der Weiterentwicklung der Projekte TME und LANMaS Mitte der 90er Jahre (siehe 3.3.6.4 Seite 88). Die verwendeten luftgefüllten Elemente arbeiten mit einem bis zu 10mal so hohen Druck wie herkömmliche Systeme. Dadurch können mit Bogenelementen mit einem Durchmesser von 800 mm Spannweiten von bis zu 25 m für hohe Belastungen realisiert werden. (Abb. 4-96) Voraussetzung für diese Bauart ist eine neue Verbundbauweise der luftgefüllten Elemente und die Verwendung geflochtener anstatt gewebter textiler Baustoffe. Die Bogenelemente bestehen aus einem geflochtenen Hüllschlauch aus hochfesten Vectran®-Fasern (Abb. 4-97), der den Luftschlauch aus einem gummiartigen Kunststoff (Urethan) umgibt. Der Neigungswinkel der kontinuierlichen Vectran®-Fasern erlaubt eine gleichmäßige Belastung aller Fasern durch Zugkräfte aus Innendruck und aus der Biegebeanspruchung des Gesamtelements. Die Fertigung des Hüllschlauches durch Flechten erlaubt die Herstellung nahtloser röhrenartiger Elemente beliebiger Länge. Diese Innovationen ermöglichen die Anwendung eines extrem hohen Innendrucks, wie er bis dahin aufgrund des verwendeten Mem-

branmaterials nicht möglich war. Die Hochdruckelemente wurden durch eine ganze Reihe experimenteller Test und analytischen Berechnungen optimiert. Unter anderem wurde auch das Verhalten eines Elements nach einer Beschädigung durch einen Messerschnitt getestet. Der geflochtene Hüllschlauch zeigte eine hohe Weiterreißfestigkeit, die einen explosionsartigen Druckverlust verhinderte. [62]

##### *STAT (Small Tactical AirBeam Tent)*

Das Modell STAT (Abb. 4-98) wurde für eine Nutzung als Lager oder Kommandoposten entwickelt. Das System ist 6.1 m breit und 9.1 m lang und überdacht eine Fläche von 44 m<sup>2</sup>. Das Primärtragwerk wird durch drei bzw. vier Kreisbögen mit einem Stich von ca. 3.4 m gebildet. Die Bogenelemente haben einen Durchmesser von 255 mm und werden durch einen Innendruck von 2.75 bar = 275 KN/m<sup>2</sup> stabilisiert. Der Achsabstand der Bögen beträgt 4.55 m. Sie sind durch AirBeams in Längsrichtung gehalten. Durch die Abspannung der Endbögen entsteht so ein in sich stabiles Primärtragwerk, über das eine einfach gekrümmte PVC-Polyestermembran gespannt wird. Das System ist für eine Windlast von 29 m/s und Schneelasten bis 0.48 KN/m<sup>2</sup> dimensioniert. Die Konstruktion kann in zwei Paketen mit einem Volumen von 2.1 m<sup>3</sup> transportiert werden. Das Gesamtgewicht der Konstruktion beträgt 193 kg. Für die Errichtung benötigen vier Personen ca. 30 Minuten.

##### *SAFS (Small Air Force Shelter)*

Das SAFS (Abb. 4-99) unterscheidet sich vom Modell STAT im Wesentlichen durch die unterschiedliche Hauptgeometrie der Bögen und durch die Verwendung der mechanisch vorgespannten Membran als aussteifendes Element in Längsrichtung. Durchmesser der Bögen und Innendruck sind identisch. Die Korbbögen haben eine Spannweite von 6.7 m, einen Stich von ca. 3 m und sind im Abstand von 3.65 m angeordnet. Die überdachte Fläche beträgt bei einer Länge von 14.6 m ca. 59 m<sup>2</sup>. Die Konstruktion ist für gleiche Belastungen wie das System STAT dimensioniert. Der Aufbau kann durch zwei Personen innerhalb einer Stunde erfolgen. Das Gesamtgewicht des Systems beträgt 272 kg.

##### *MASTER (Medium Airbeam Shelter)*

Das Modell MASTER (Abb. 4-100) ist eine mobile Überdachung mittlerer Spannweite, die ursprünglich für eine Anwendung als Hubschrauberhangar entwickelt wurde, aber auch als Krankenstation oder Kommandozentrale genutzt wird. Die Korbbögen mit einer Spannweite von 12 m und einem Stich von ca. 4.30 m besitzen einen Durchmesser von 355 mm und werden durch einen Innendruck von 4.4 bar = 414 KN/m<sup>2</sup> stabilisiert. Bei einer Länge des Systems von 15.5 m beträgt die über-

dachte Fläche 163 m<sup>2</sup>. Die luftgefüllten Elemente sind im Achsabstand von 5.2 m angeordnet und werden durch eine doppelt gekrümmte und mechanisch vorgespannte PVC-Polyestermembran in Längsrichtung stabilisiert. Die Membran besteht aus drei einzelnen Feldern und zwei Endpanelen. Die Endfelder werden zwischen zwei Pfosten aufgespannt, die die erforderliche Eingangsweite für einen Helikopter gewährleisten. Die Konstruktion ist für gleiche Belastungen wie die Systeme STAT und SAFS dimensioniert und besitzt ein Gesamtgewicht von 1.9 t.

*AIMS (Aviation Inflatable Maintenance Shelter)*

Das Modell AIMS (Abb. 4-101) ist die derzeit größte mobile Überdachung, die luftgefüllte Elemente als Primärtragwerk nutzt. Die Bogenhalle wird als Flugzeug- oder Hubschrauberhangar genutzt. Die Spannweite der 9 Korbbögen beträgt 25 m und die Stichhöhe ca. 9.5 m. Die Röhren haben einen Durchmesser von 762 mm und werden durch einen Innendruck von 5.5 bar = 550 kN/m<sup>2</sup> stabilisiert. Die Gesamtkonstruktion ist dem Modell MASTER ähnlich. In Längsrichtung werden die luftgefüllten Bögen durch eine mechanisch vorgespannte und doppelt gekrümmte PVC-Polyestermembran stabilisiert, die damit sowohl Hülle als auch Teil des Primärtragwerk ist. Die Konstruktion ist für Windgeschwindigkeiten von 40 - 50 m/s und eine Schneelast von 0.8 kN/m<sup>2</sup> dimensioniert. Das Gesamtgewicht der des Systems beträgt 8.4 t.

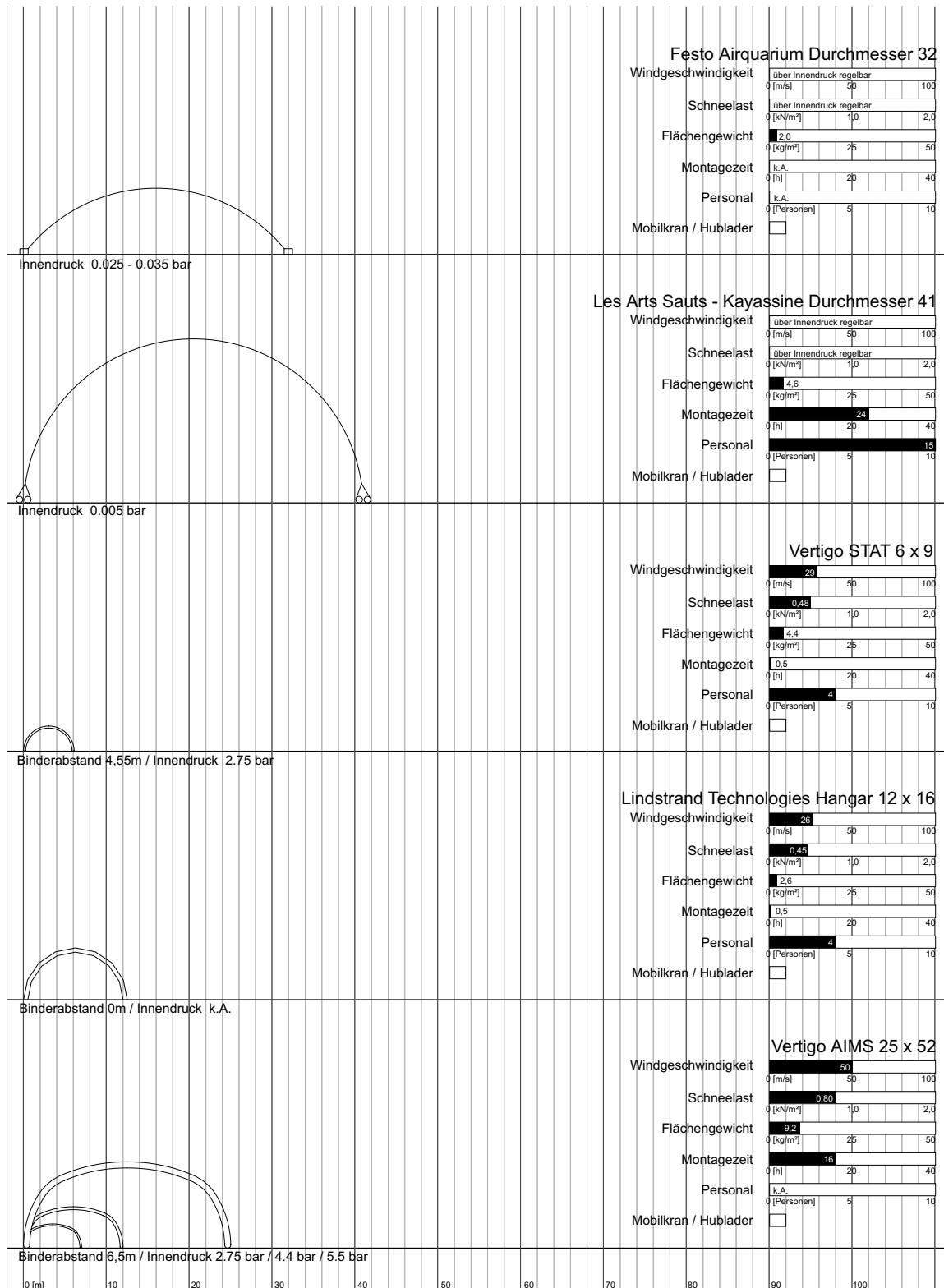


Abb. 4-102. Übersicht luftgestützte und luftgefüllte Systeme

#### 4.4.3 Zusammenfassung

Die aufgeführten Beispiele mobiler Membranbauten zeigen, dass insbesondere im Bereich der mobilen Konstruktionen mit mechanisch vorgespannten Membranen vorwiegend sehr einfache Systeme verwendet werden, deren Formen und Konstruktionen sich über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten kaum grundlegend verändert haben.

Die breiteste Anwendung erfahren Rahmen- und Bogenskelettkonstruktionen mit ebenen, einfach oder doppelt gekrümmten Membranen als Hülle. Dabei werden in Europa fast ausschließlich Rahmenhallen aus Aluminiumstrangpressprofilen bzw. Gerüstsysteme und in Nordamerika vorwiegend Fachwerkrahmen bzw. -bögen aus Stahl und Aluminium verwendet. Die Nordamerikanischen Systeme sind im Allgemeinen für höhere Belastungen als die vergleichbaren europäischen Systeme dimensioniert und werden meist für längere Standzeiten und ein weitaus größeres Nutzungsspektrum eingesetzt (z.B. Kirche, Casino, Sport- und Veranstaltungshalle, Hangar etc.). Die Teilflächenverbindung bzw. die Randausbildung der Membranflächen erfolgt bei den meisten dieser Konstruktionen durch Kederverbindungen. Der Kederrand der Membran wird dabei entweder in Längsrichtung der Kedernuten eines Aluminiumstrangpressprofils eingezogen oder mit Pressleisten befestigt. Für einfache kleine Bauwerke wird die Membranfläche auch einfach über das Skelett das Primärtragwerks der Bogen- oder Rahmenkonstruktion gezogen, zu den Seiten hin abgespannt und an den Giebeln durch einen Zickzackrand am Endbogen oder -rahmen befestigt.

Wandelbare Stütztragwerke werden für die Montage dieser Konstruktionen nur selten eingesetzt. Die häufigste Anwendung wandelbarer Stütztragwerke für kleine Spannweiten stellen Scherensysteme dar. Im Bereich der mittleren und großen Spannweiten konnte mit dem System WideSpan der Firma Weatherhaven (siehe S.127) nur ein Beispiel eines wandelbaren Bogentragwerks ermittelt werden, das auch realisiert und angewendet wird. Andere Systeme die ebenfalls für eine Montage ohne schwere Hebemittel bzw. Hilfskonstruktionen wie fahrbare Arbeitsbühnen und Gerüste geplant wurden, verwenden das traditionelle Aufrichten der Bögen über Seilwinden bzw. Hilfstützen. Hierbei wird der Bogen um die gedachte Drehachse seiner Fußpunkte aus der Ebene in die Senkrechte gedreht. Der überwiegenden Teil der Rahmen- und Bogenkonstruktionen wird aber mit Hilfe von Mobilkränen, fahrbaren Hebebühnen und weiteren Hilfsmitteln errichtet.

Im Bereich der Mast- und Seilkonstruktionen hat die Entwicklung des Membranbaus bis Ende der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts dazu geführt, dass die Membranform nicht mehr mit dem traditionel-

len Hohl schnittverfahren, sondern über numerische Formfindungsmethoden ermittelt und durch entsprechende automatische Zuschnittswerkzeuge hergestellt wird. Lös bare Teilflächenverbindungen erfolgen durch die traditionellen Schnürstöße. Das Versammlungszelt des Büros SL Rasch ist eines der wenige Beispiele, das Teleskopstützen als wandelbare Tragelemente zur Montage verwendet. Der größte Teil der Systeme errichtet jedoch die Masten mit Hilfe von Seilzügen und Hilfsmasten. Das entstehende in sich stabile Tragwerk aus Masten und Abspannungen wird dann zur Montage der Membran verwendet.

Luftgestützte Membrankonstruktionen werden nur noch in sehr geringem Umfang als mobile Konstruktionen eingesetzt, die beiden dargestellten Beispiele sind Einzellösungen. Seriell hergestellten Systeme, die für eine mobile Anwendung entwickelt wurden, konnten nicht ermittelt werden.

Mobile Membrankonstruktionen mit luftgefüllten Tragwerken haben in den letzten Jahren durch neue Werkstoffe, weiterentwickelte Fügungsmethoden und neue Möglichkeiten der numerischen Analyse eine sprunghafte Entwicklung erfahren. Neben der breiten Anwendung von Niederdrucksystemen für kleine Spannweiten ermöglichen Hochdrucksysteme zum ersten Mal die Möglichkeit, auch Spannweiten über 20m mit luftgefüllten Elementen mit relativ geringen Durchmessern zu realisieren. Die Systeme werden jedoch ausschließlich für militärische Anwendungen genutzt, für die schnelle Aufbauzeiten, eine Montage ohne Hebemittel, minimale Anforderungen an die Gründung und relativ kurze Standzeiten kennzeichnend sind.

## 5 Morphologie<sup>1</sup>

Im vorangegangenen Kapitel werden die sich heute im Gebrauch befindlichen mobilen Membranbauten in einer Grobeinteilung geordnet nach der Art ihres Haupttragwerks dargestellt. In der nun folgenden morphologischen Studie werden - sowohl auf Grundlage allgemeingültiger Kriterien zur Analyse von Bauwerken, als auch spezieller Merkmale und Eigenschaften der in Kapitel 4 dargestellten Beispiele - geeignete Parameter für die Einteilung mobiler Membrantragwerke identifiziert. Die Systeme mobiler Membrantragwerke werden in der Wechselwirkung ihrer Parameter im morphologischen Überblick strukturiert dargestellt. Diese Darstellungsweise ermöglicht die Klassifizierung der Systeme, das Erkennen logischer Zusammenhänge zwischen ihnen und ihren Parametern, und dient dadurch vorallem als Werkzeug zur Entscheidungsfindung im Entwurfsprozess und als Ansatz für mögliche neue Entwicklungen. Um die Vielfalt der Verwendungsmöglichkeiten von Membranen für mobile Konstruktionen zu erfassen, beschränkt sich die Übersicht nicht auf reine Membrankonstruktionen, sondern umfasst die Gesamtheit mobiler Überdachungen.

### 5.1 Methodik und Gliederung

Im Allgemeinen werden für die Analyse von Bauwerken die drei Parameter Nutzung, Konstruktion und Form herangezogen. Sie sind miteinander verknüpft und erfordern eine gleichberechtigte Herangehensweise. Für die Beurteilung mobiler Überdachungen erweist sich allerdings der Parameter der Nutzung als nur bedingt tauglich, da diese Konstruktionen selten im Hinblick auf eine spezielle Nutzung entwickelt werden, sondern ihre Nutzungen in der Regel austauschbar sind. Die typischen Nutzungen der mobilen Überdachungen mittlerer und größeren Spannweite, die vorwiegend Gegenstand dieser Arbeit sind, wie z.B. Werkstatt- und Industriehallen, Flugzeughangars, Sport- und Veranstaltungsbauten oder Anwendungen im militärischen Bereich, besitzen kaum Einfluss auf die Konstruktionsweise oder die Form. Ihnen gemeinsam ist die Anforderung, einen weitgehend stützenfreien Raum mit einem optimalen Lichtraumprofil zu schaffen, der Schutz gegen Witterungseinflüsse bietet.

---

1. Die Morphologie ist die Lehre von den Gestalten oder Formen eines gegenständlichen oder abstrakten Bereichs. Einführung als eine ganzheitliche Betrachtungsmethode für naturwissenschaftlich- technische Fragestellungen in die Wissenschaftstheorie durch F.Zwicky

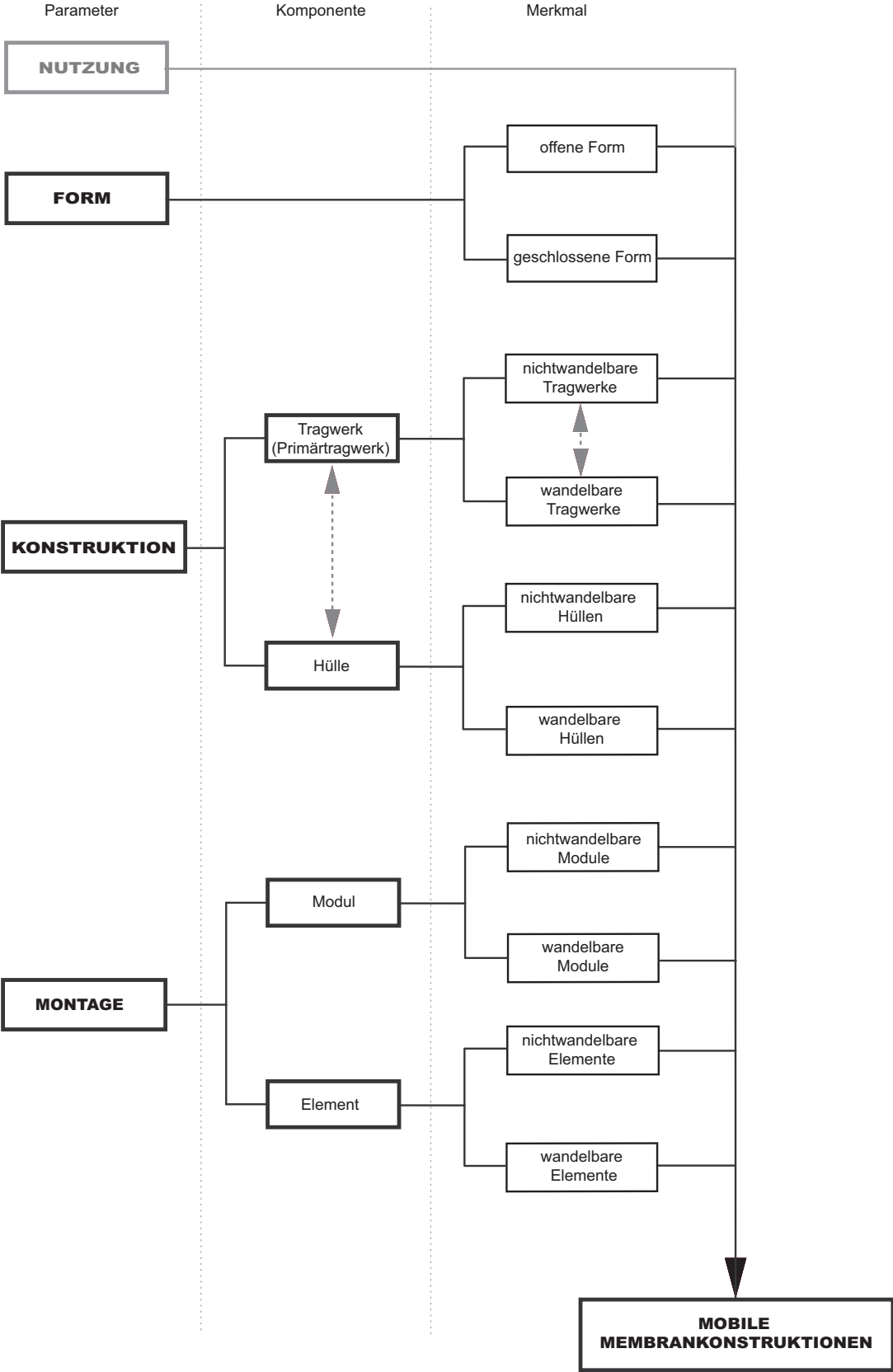


Abb. 5-1. Parameter und Komponenten der Morphologie



Im Gegensatz zu permanenten Bauwerken ist bei mobilen Überdachungen jedoch zusätzlich die Betrachtung der Transport- und Aufbauprozesse ein wesentliches Unterscheidungskriterium, da die sich ständig wiederholenden Auf- und Abbauprozesse den Entwurf der Konstruktion sehr stark bestimmen. Es wird deshalb in der weiteren Betrachtung der Parameter der Nutzung zugunsten des Parameters der Montage vernachlässigt. Damit ergeben sich drei Grundparameter zur Klassifizierung mobiler Überdachungen:

- Form
- Konstruktion
- Montage

Diese Grundparameter werden anhand ihrer Komponenten untersucht, die verschiedene Merkmale aufweisen können. So werden für den Parameter Konstruktion die Komponenten Tragwerk und Hülle verwendet (siehe 5.3 Seite 153), für den Parameter Montage die Komponenten Modulbauweise und Elementbauweise (siehe 5.4 Seite 181). Durch die überlagernde Darstellung unterschiedlicher Parameter mit ihren Komponenten und Grundmerkmalen sollen verschiedene Lösungswege für Entwurf und Entwicklung mobiler Membrankonstruktionen aufgezeigt werden. Insbesondere den Einsatzmöglichkeiten wandelbarer Elemente und Module für Tragwerk und Hülle zur Vereinfachung und Beschleunigung von Montageprozessen kommt auf diesem Gebiet eine besondere Bedeutung zu. Die Merkmale der Parameter Konstruktion und Montage werden daher nach den Grundmerkmalen wandelbar oder nichtwandelbar geordnet dargestellt.

## 5.2 Form

Festlegungen für die Form einer mobilen Überdachung ergeben sich aus den notwendigen Grundrissabmessungen und dem erforderliche Lichtraumprofil, bedingt durch Aspekte der Nutzung. Die Parameter Konstruktion und Montage beeinflussen die Form weiter, ebenso die Frage nach einer möglichen Erweiterbarkeit des Bauwerks, der insbesondere bei mobilen Konstruktionen eine große Bedeutung zukommt. Der Vielzahl gebauter und geplanter Beispiele liegt dabei eine überschaubare Anzahl von Grundformen zugrunde, die sich nach ähnlichen Querschnitts- und Grundrissgeometrien ordnen lassen.

Abbildung 5-2 zeigt eine Übersicht über die am häufigsten angewendeten Querschnitts- und Grundrissgeometrien. Grundrisse und Querschnitte stellen zweidimensionale Gebilde dar, die anhand der Anzahl und der geometrischen Ausbildung ihrer Ränder - gerade oder gekrümmt - unterschieden

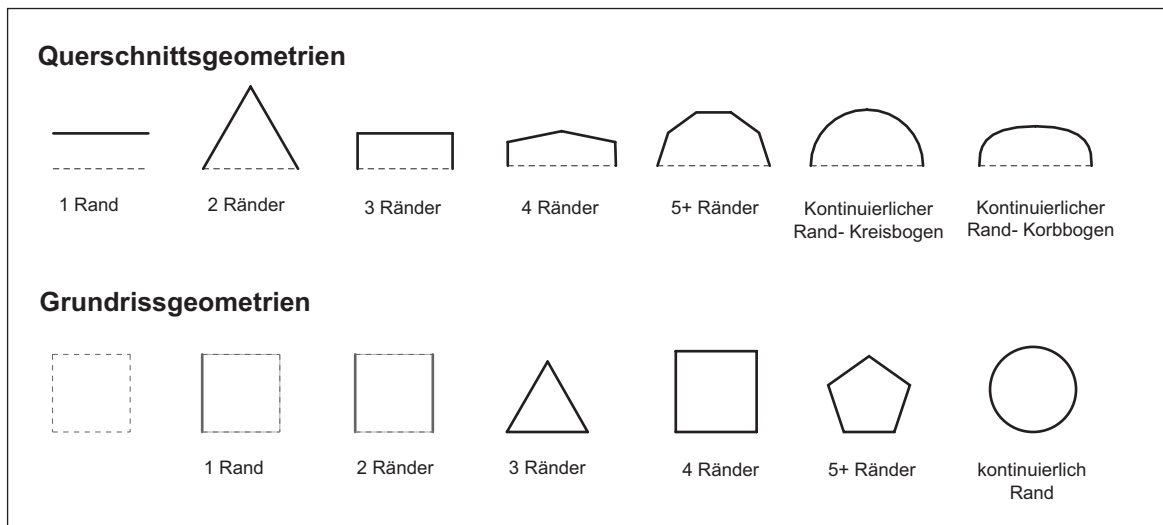


Abb. 5-2. Typische Querschnitts- und Grundrissgeometrien mobiler Überdachungen

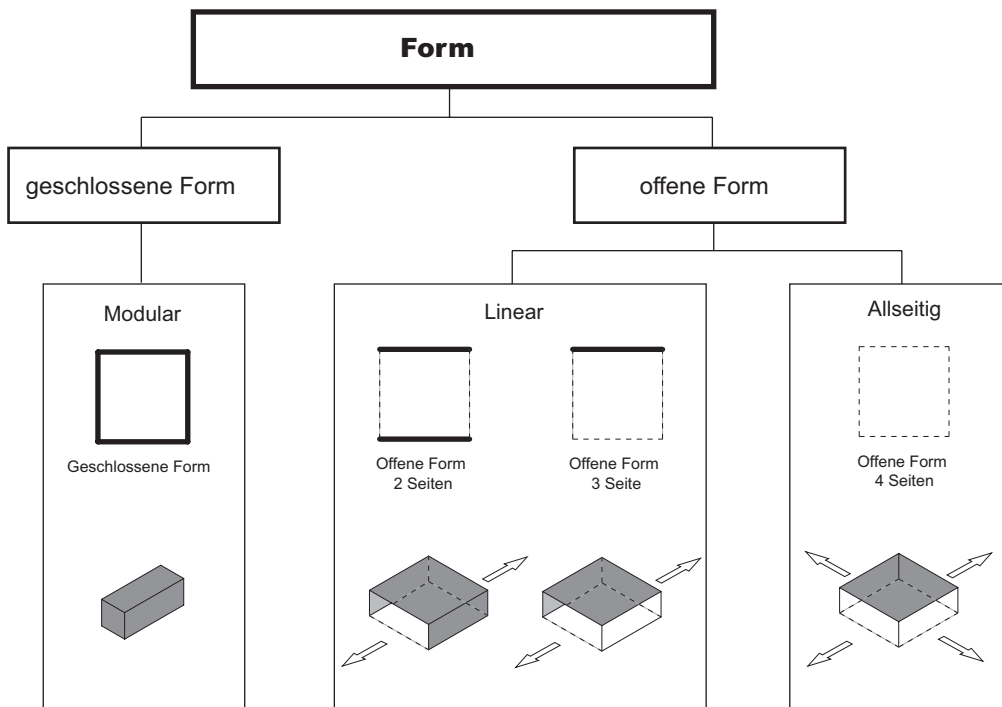


Abb. 5-3. Klassifizierung der Formen nach dem Merkmal der Erweiterbarkeit

---

werden können. Mit der Annahme der Ränder als Konstruktionselemente wie Wand oder Dach können verschiedene Querschnitts- und Grundrisstypen im Hinblick auf ihre Erweiterbarkeit unterschieden werden. So entsteht z.B. aus dem allseitig offenen Grundriss durch das Hinzufügen zweier Randelemente ein zweiseitig offener Grundrisstyp. Geschlossene Flächen benötigen mindestens drei miteinander verbundene Randelemente. Die dargestellten Geometrien stellen nur vereinfachte Grundtypen dar. Zur Darstellung der Vielfalt möglicher Varianten können Kombinationen aus geraden oder gekrümmte Elementen gebildet werden.

Die Betrachtung vorhandener mobiler Überdachungen zeigt, dass für die Mehrzahl die Möglichkeit der Erweiterbarkeit des Raumvolumens ein stark formbestimmender Aspekt ist. Unter diesem Gesichtspunkt der Modularität lassen sich die aus den verschiedenen Grundrissen und Querschnitten entwickelbaren dreidimensionalen Grundformen in zwei Gruppen unterscheiden: geschlossene und offene Formen.

#### *Geschlossene Form*

Geschlossene Formen erlauben keine Erweiterung des von der Konstruktion umschlossenen Raumes ohne eine Störung des Systems. Eine Vergrößerung des Raumangebots kann nur durch Hinzufügen einer weiteren in sich geschlossenen Einheit erfolgen. Sowohl Grundriss als auch Querschnitt sind allseitig geschlossen.

#### *Offene Form*

Offene Formen erlauben die Erweiterung des Raums durch die Addition einzelner Elemente oder Module in mindestens einer Richtung. In ihren Grundrissen fehlt mindestens ein Randelement. In Abhängigkeit von der Richtung der Erweiterung kann zwischen linearer und allseitiger Erweiterbarkeit unterschieden werden.

### 5.2.1 Grundformen mobiler Überdachungen

Wie beschrieben werden die Formen mobiler Überdachungen neben den Anforderungen aus dem notwendigen Raumvolumen und der Konstruktion vorallem durch den für diesen Bautyp wichtigen Gesichtspunkt der Erweiterbarkeit beeinflusst. Dementsprechend lassen sich in Abhängigkeit von grundlegenden Grundrisstypen offene und geschlossene Formen unterscheiden, die verschiedenen Querschnittsgeometrien zugeordnet werden können.(Abb. 5-4) Das Ziel dieser Übersicht ist nicht die Darstellung aller möglichen Formen, sondern der Entwicklungsmöglichkeiten von Formvarianten unter Beachtung der beschriebenen Abhängigkeiten.

		Formen							
		Grundrissgeometrien							
		offen				geschlossen			
Querschnittsgeometrien									

Abb. 5-4. Beispiele allgemeiner Formen mobiler Überdachungen

---

### 5.3 Konstruktion

Unter dem Begriff Konstruktion wird im Allgemeinen die Gesamtheit aller Elemente des Tragwerks, der Hülle und der haustechnischen Ausstattung eines Gebäudes verstanden.[1] In der Regel spielt die technische Gebäudeausrüstung bei Mobilien Überdachungen nur eine untergeordnete Rolle. Somit sind Tragwerk und Hülle die entscheidenden Komponenten, die eine Differenzierung der Vielzahl von Konstruktionsformen erlauben. Betrachtet man beide Komponenten hinsichtlich einer vorhandenen Hierarchie ihrer Elemente, so ergibt sich für das Tragwerk die Unterscheidungsmöglichkeit in Primär- und Sekundärtragwerk (siehe Kapitel 1 S.4). Demnach werden alle Tragelemente, die notwendig sind, um die Stabilität einer Konstruktion unter Lasteinwirkung zu gewährleisten, als Primärtragwerk bezeichnet. Alle weiteren Tragelemente der Konstruktion, die ebenfalls durch Lasten beansprucht werden, aber keine entscheidende Bedeutung für die Gesamtstabilität der Konstruktion haben, werden als Sekundärtragwerk bezeichnet. Die Hülle kann sowohl einen Teil des Primärtragwerks bilden, als auch das Primärtragwerk selbst sein. In der Mehrzahl der sich in Gebrauch befindlichen mobilen Überdachungen ist sie jedoch ein Teil des Sekundärtragwerk (Abb. 5-5).

Der Zusammenhang zwischen den Parametern Form und Konstruktion bzw. den Komponenten Tragwerk und Hülle wird im Folgenden anhand zweier Beispiele erläutert. Dabei wird eine Konstruktionseinheit als das kleinste in sich stabile wiederholbare Modul einer Konstruktion betrachtet.

Als Beispiel für eine offene linear erweiterbare Form wird eine Konstruktionseinheit aus zwei Bögen, den zur Aussteifung notwendigen Elementen und der dazugehörigen Hülle gewählt (Abb. 5-6). Die Bögen bilden zusammen mit weiteren aussteifenden Elementen eine Primärstruktur, zu der die Hülle als sekundäres Element hinzugefügt wird. Die Konstruktion ist hierarchisch geordnet. Die einzelnen Elemente werden entsprechend ihrer Beanspruchung unterschiedlich ausgebildet. Der hierarchische Aufbau der Konstruktion erlaubt eine Erweiterung durch die Addition einzelner Elemente. Bei höheren Beanspruchungen können einzelne Elemente verstärkt werden.

Ein Beispiel für eine geschlossene Form stellt die Konstruktion einer Traglufthalle dar. Tragwerk und Hülle sind identisch. Die Traglufthalle ist auch ein Beispiel für eine nichthierarchische Konstruktion. Die Hülle als Tragwerk weist trotz vielfältiger Beanspruchung über die gesamte Hüllfläche nahezu den gleichen Querschnitt auf, der möglichst gleichmäßig beansprucht werden sollte. Eine Erweiterung ist ohne eine Veränderung der Form und der Konstruktion nicht möglich.

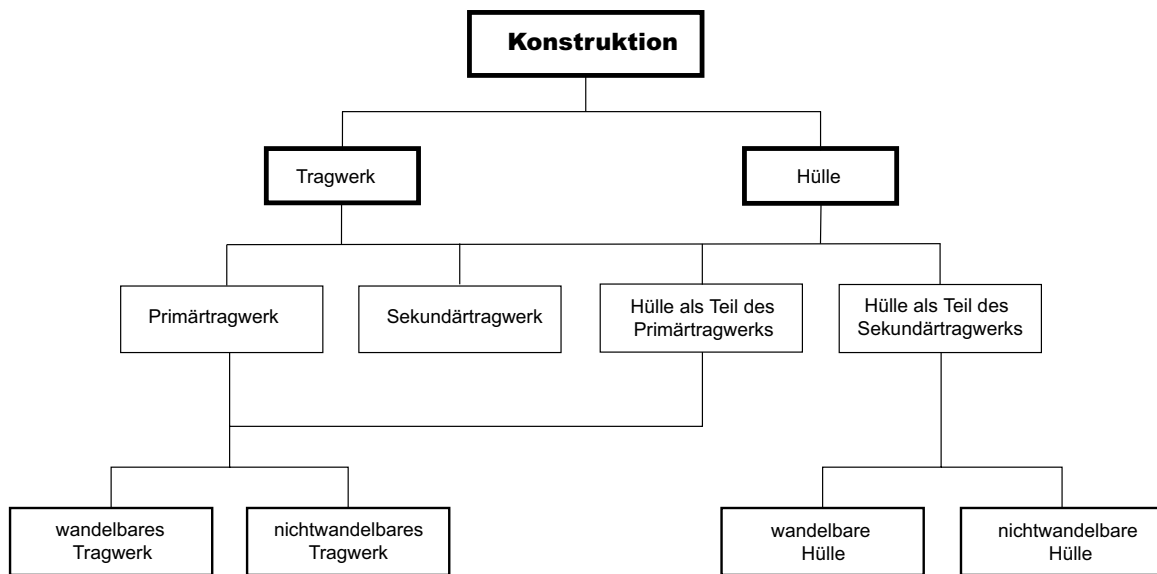


Abb. 5-5. Beziehungen zwischen Tragwerk und Hülle

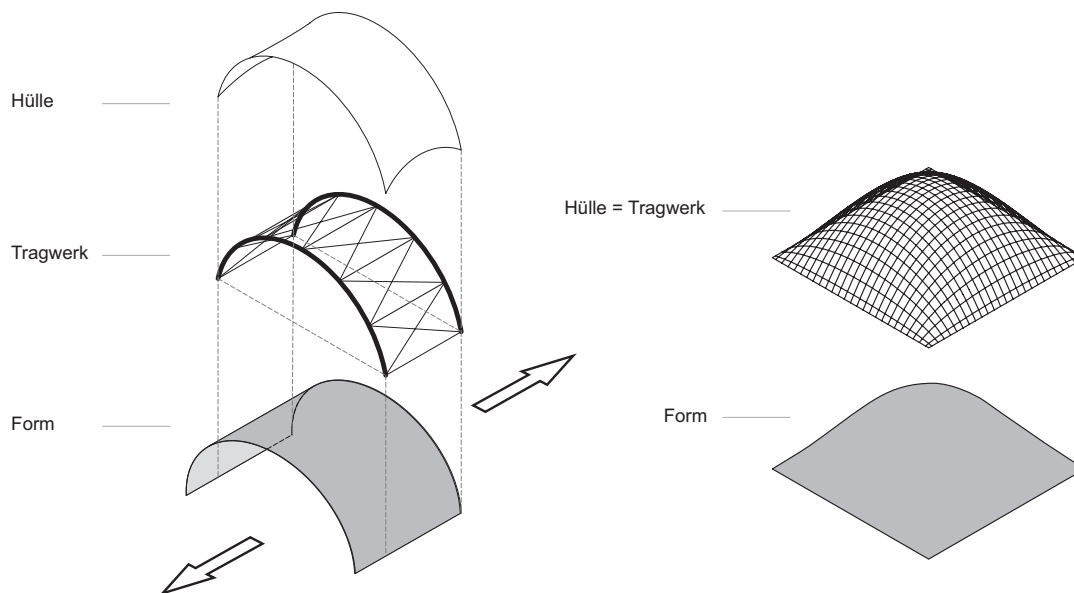


Abb. 5-6. Konstruktionseinheit aus Tragwerk und Hülle einer offenen und einer geschlossenen Form

### 5.3.1 Tragwerk

Das Tragwerk einer Konstruktion wird gebildet durch die Gesamtheit aller Elemente, die unter der Einwirkung von Eigengewicht und äußeren Lasten die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion gewährleisten. Es hat die Aufgabe, alle auf eine Konstruktion einwirkenden Lasten aufzunehmen und in den Baugrund weiterzuleiten. Die Art des Tragwerks beeinflusst im hohen Maße die Möglichkeiten der Erweiterung oder der Anpassbarkeit einer Konstruktion an verschiedene Standorte, ihre Transportmöglichkeiten und die Art und Weise ihrer Montage. Zur Klassifizierung der unterschiedlichen Konstruktionen werden daher im Folgenden die verschiedenen Tragwerksarten mobiler Überdachungen nach Grundmerkmalen untersucht und differenziert.

#### 5.3.1.1 Tragsysteme

Zur qualitativen Beurteilung von Tragwerken erfolgt werkstoffunabhängig eine Abstrahierung der Tragwerke in Tragsysteme. Dabei sind die Belastung, die Art der Randausbildung und die Auflagersituation zu berücksichtigen. Tragsysteme können aus einzelnen Tragelementen oder Additionen von Tragelementen bestehen. Die Form des Einzelements wird durch seine Hauptgeometrie (siehe Kapitel 1 S.4) bestimmt. Diese erlaubt eine Unterteilung in linienförmige, flächenförmige oder räumliche Elemente. Linien- und Flächenelemente können weiterhin bezüglich der Krümmung ihrer Achse bzw. ihrer Mittelfläche in gerade bzw. ebene und gekrümmte Elemente unterschieden werden. Alle Elemente besitzen mechanische Steifigkeiten, die durch die Querschnittsgeometrie und durch die Materialeigenschaften bestimmt werden.

Eine Möglichkeit der Klassifizierung von Tragsystemen ist die Einteilung der Systeme nach O.Büttner und E.Hampe [13] (Abb. 5-7). Die Systeme werden entsprechend der Hauptgeometrie, Steifigkeit und räumlichen Anordnung ihrer Elemente eingeteilt. Zur Vereinfachung werden für biegeeweiche Elemente der Begriff „weich“ und für biegesteife Elemente der Begriff „steif“ verwendet. Durch die Überlagerung der so geordneten Elemente mit Möglichkeiten ihrer räumlichen Ausdehnung bzw. Anordnung entstehen verschiedene grundlegende Tragsysteme, die aus einzelnen Elementen oder Additionen von Elementen bestehen können:

- lineare, weiche und gerade Systeme, wie Zugstäbe, Seilbinder
- lineare, weiche und gekrümmte Systeme, wie Grat- oder Kehlseile, Seilnetze
- lineare steife gerade Systeme, wie Druckstäbe, Biegebalken, Rahmen, Stabwerke
- lineare steife gekrümmte Systeme, wie Bogen, Gitterschalen























Einfache Tragsysteme								
		Tragwerkselemente						
		linear			flächig			
		weich		steif	weich		steif	
								
Geometrie	1D							
	2D							
	3D							

Abb. 5-7. Einteilung von Tragsystemen

- flächige weiche ebene bzw. gekrümmte Systeme, wie zugbeanspruchte Membranen
- flächige steife ebene Systeme, wie Platten oder Wandscheiben
- flächige steife gekrümmte Systeme, wie Schalen

Diese Darstellung erlaubt eine klare Ordnung von Systemen aus gleichartigen Elementen. Die Mehrzahl der Tragsysteme mobiler Überdachungen besteht jedoch aus Elementen verschiedener Steifigkeit und Hauptgeometrien. So ist für ihre Erfassung eine Addition bzw. die Überlagerung der verschiedenartigen Elemente notwendig. Mischtragwerke, wie zum Beispiel unter- oder überspannte Systeme oder das Tragwerk eines abgespannten doppelt gekrümmten Vierpunktsegels, entstehen erst aus der Kombination von linearen „weichen“ und „steifen“ Elementen. Grundsätzlich lassen sich somit alle Systeme abbilden. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die breite Darstellung sämtlicher möglicher Systeme verzichtet und nur die für mobile Überdachungen typischen Systeme betrachtet. Zudem werden zur Klassifizierung im Folgenden nur die Primärtragwerke der Konstruktionen betrachtet.



### 5.3.1.2 Primärtragwerke

Um eine strukturierte Darstellung für Primärtragwerke mobiler Überdachungen zu ermöglichen werden folgende Merkmale untersucht:

- Art der Systeme in Bezug auf die verwendeten Tragelemente
- Art der Lagerung

Primärtragwerke mobiler Überdachungen können durch ein oder mehrere Tragsysteme gebildet werden. Besteht ein Primärtragwerk aus einem Tragsystem, handelt es sich meist um ein nicht-hierarchisches System, bei dem alle Elemente ähnlich belastet und dementsprechend ausgebildet sind, und das eine Zuordnung entsprechend Abbildung 5-7 erlaubt. Ein typisches Beispiel für nicht-hierarchische Tragsysteme sind Schalentragwerke aus flächigen gekrümmten steifen Elementen oder pneumatisch gestützte Tragwerke. Primärtragwerk und Hülle sind bei diesen Konstruktionen identisch. Stabwerksschalen aus linearen geraden oder gekrümmten steifen Elementen sind ebenfalls nicht-hierarchische Systeme, jedoch ist bei diesen Konstruktionen in der Regel die Hülle Teil des Sekundärtragwerks.

Die Mehrzahl der Primärtragwerke mobiler Überdachungen besteht jedoch aus hierarchisch angeordneten Mischsystemen verschiedener Tragelemente bzw. einfacher Tragsysteme. Die einzelnen Elemente werden auf unterschiedliche Art und Weise beansprucht und können dementsprechend verschiedene Hauptgeometrien und Steifigkeiten aufweisen. Die Hierarchie der Systeme erlaubt eine weitere Differenzierung des Primärtragwerks in Haupt- und Nebentragelemente und damit die Bestimmung von Grundtypen entsprechend der Haupttragelemente.(Abb. 5-9) Bei den meisten Mischsystemen ist die Hülle Teil des Sekundärtragwerks.

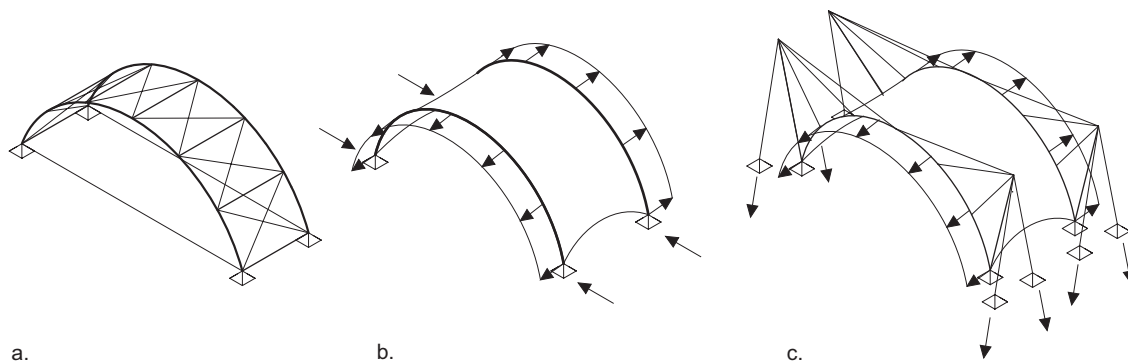
Nach der Art ihrer Lagerung können Primärtragwerke und ihre Tragsysteme in offene und geschlossene statische Systeme eingeteilt werden.

#### *Offene statische System*

Offene Systeme müssen, um stabil zu sein, Kräfte an ihre Auflager abgeben, die über die resultierenden Kräfte aus ihrem Eigengewicht und äußeren Lasten hinausgehen. Beispiele hierfür sind vorwiegend zugbeanspruchte Tragwerke wie Seiltragwerke oder Membrankonstruktionen, bei denen die zur Stabilisierung erforderliche Vorspannung und alle äußeren Belastungen zusätzliche Auflagerkräfte erzeugen.

*Geschlossene statische Systeme*

Geschlossene Systeme sind unabhängig von ihrer Lagerung in sich selbst stabil. Sie geben an ihre Auflager nur die resultierende Kräfte aus Eigengewicht und äußeren Lasten ab. Rahmen oder Bogen-tragwerke, bei denen die entstehenden Horizontalkräfte aus Eigengewicht oder Vertikalbelastungen durch ein Zugband kurzgeschlossen werden, sind typische Beispiele für diese Systeme. (Abb. 5-8)



**Abb. 5-8.** geschlossene (a) und offene Tragsysteme (b, c)

Das Merkmal der offenen und geschlossenen Systeme ist zur Gesamtbeurteilung der Effizienz mobiler Überdachung von großer Wichtigkeit, da es die Flexibilität der Konstruktionen in Bezug auf eine Anwendbarkeit für wechselnde Standortbedingungen stark beeinflusst. Zur strukturierten Darstellung von Primärtragwerken eignet es sich jedoch nur bedingt, da verschiedene Tragwerke sowohl als statisch in sich geschlossene als auch als offene Systeme ausgeführt werden können.

### 5.3.1.3 Primärtragwerke für mobile Überdachungen

Primärtragwerke vorhandener mobiler Überdachungen lassen sich bestimmten Grundtypen von Tragsystemen zuordnen, die sich aus einfachen Tragsystemen bzw. deren Addition ergeben. Zur weiteren Differenzierung der so gebildeten Tragwerksgruppen wird der Zusammenhang zwischen Tragwerk und dem Parameter Form untersucht. Abbildung 5-9 zeigt eine Übersicht über die Tragwerksarten existierender mobiler Überdachungen, geordnet nach ihrer Einsatzmöglichkeit für Konstruktionen mit offenen und geschlossenen Formen.

### *Mast- Seiltragwerke mit ebenen Membranen*

Diese Gruppe von Primärtragwerken umfasst einfache Tragsysteme aus linearen weichen und steifen Tragelementen kleiner Spannweite. Ebene Membranflächen können Teil des Primärtragwerk sein und zur Stabilisierung des Gesamtsystems mit herangezogen werden. Die Tragelemente werden vorwiegend nur durch Druck- und Zugkräfte beansprucht.

### *Mast- Seiltragwerke mit gekrümmten Membranen*

Die Tragwerke dieser Gruppen umfassen sowohl Systeme für kleine Spannweiten mit wenigen Metern Spannweite, als auch Systeme für die größten derzeit existierenden mobilen Überdachungen. Die Tragsysteme bestehen aus linearen weichen und steifen Tragelementen, die vorwiegend durch Zug- und Druckkräfte beansprucht werden. Für kleinere Spannweiten ist die Membran in der Regel immer Teil des Primärtragwerks. Bei großen Spannweiten bildet die Stützkonstruktion aus Druckstäben und Zugelementen ein Primärtragwerk, das in Interaktion mit der Membran steht, aber unabhängig von ihr standsicher ist. Konstruktionen mit geschlossenen Formen (siehe Parasolzelt, S. 71) erlauben auch die Ausbildung in sich geschlossener Tragsysteme.

### *Gelenkig verbundene Stabwerke*

Primärtragwerke aus linearen, steifen, geraden und gelenkig verbundenen Tragelementen bilden einen Teil der Tragsysteme der sogenannten Gerüst- oder Stangenzelte, bei denen die Tragelemente vorwiegend durch Druck- und Zugkräfte beansprucht werden. Nachteilig ist die in der Regel relativ hohe Anzahl von Tragelementen auch für kleine Spannweiten. Eine Ausnahme bildet der einfache Dreibock als Stützkonstruktion einer punktgestützten Membranfläche als Sekundärtragwerk (siehe Carlos Moseley Musikpavillion, S. 75). Die Systeme erlauben die Ausbildung in sich geschlossener Tragsysteme für Konstruktionen mit offenen und geschlossenen Formen.

### *Scherentragwerke*

Die Tragsysteme der sogenannten Scherentragwerke oder Pantographen bestehen aus linearen weichen und steifen geraden Tragelementen, die durch Druck- und Zugkräfte, aber auch durch Biegemomente beansprucht werden. Die Vielzahl der Tragelemente, die aufwendigen Verbindungsknoten und die systembedingte Biegebeanspruchung aller steifen Elemente erlaubt lediglich die Realisierung von Konstruktionen begrenzter Spannweite. (siehe TVI, DRASH - Pantographen Systeme, S. 130) Eine Ausführung der Systeme als in sich geschlossene Tragsysteme ist generell möglich.


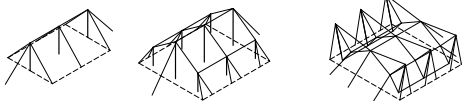
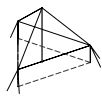
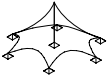
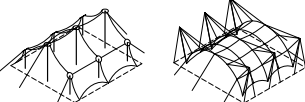
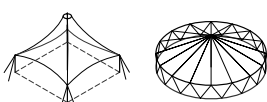

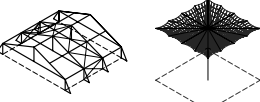
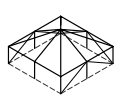

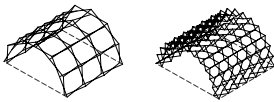
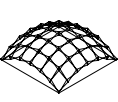

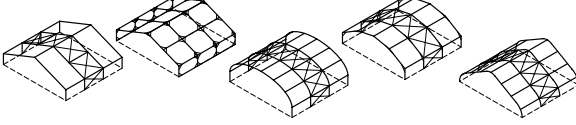
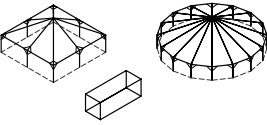


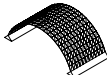
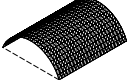




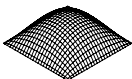

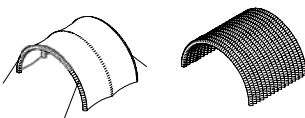

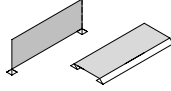

Primärtragwerke Mobiler Überdachungen			
		Form	
		offen	geschlossen
Tragsysteme			
	Mast- Seiltragwerke mit ebenen Membranen		
			
	Mast- Seiltragwerke mit gekrümmten Membranen		
			
	gelenkig verbundene Stabwerke		
			
	Scherentragwerke		
			
	Rahmen		
			
	Bogen		
			
	Stabwerkschale aus gekrümmten Stäben		
			
Stabwerkschale aus geraden Stäben			
			
Luftgestützte Tragwerke			
			
Luftgefüllte Tragwerke			
			
Scheiben und Platten			

Abb. 5-9. Primärtragwerke mobiler Überdachungen

### *Rahmen*

Rahmentragwerke stellen neben den Bogenkonstruktionen die meistverwendeten Tragsysteme mobiler Überdachungen dar. (siehe Rahmen- und Bogenkonstruktionen, S. 105) Sie bestehen aus linearen steifen Tragelementen, die normalkraft- und biegebeansprucht sind. Die Systeme besitzen in der Regel eine ausgeprägte Hierarchie, in der die Rahmen das Haupttragelement darstellen. Die Tragsysteme können unabhängig von der Form als offene oder in sich geschlossene Systeme ausgeführt werden.

### *Bogen*

Bogentragwerke bestehen aus linearen steifen und weichen Tragelementen, bei denen die Bögen als Haupttragelemente aus gekrümmten steifen Elementen bestehen. Alle Tragelemente sind vorwiegend normalkraftbeansprucht und erlauben somit die Bildung effizienter Tragwerke für alle Spannweiten. Bei der Verwendung von Membranen als Teil des Primärtragwerks bzw. der Hülle ist die Vorgabe einer Krümmung durch die Stützkonstruktion ein weiterer Vorteil. Es können somit auf einfache Art und Weise doppelt gekrümmte Membranflächen ausgebildet und die Membran zur Stabilisierung der druckbeanspruchten Bögen verwendet werden.

### *Stabwerkschalen aus gekrümmten Stäben*

Stabwerksschalen aus linearen steifen gekrümmten Tragelementen sind Tragwerke, die vor allem im traditionellen Zeltbau für kleine Spannweiten sehr häufig verwendet werden. Die Elemente dieser nicht-hierarchischen Systeme werden vorwiegend durch Druckkräfte beansprucht.

### *Stabwerkschalen aus geraden Stäben*

Ein vielfach verwendetes Schalentragwerk für mobile Überdachungen aus linearen steifen geraden Elementen sind geodätische Kuppeln, bei denen die Knoten der Stabwerksschale auf der Oberfläche eines Kugelsegmentes liegen. Aufgrund dieser geometrischen Besonderheit können Stäbe nahezu gleicher Länge verwendet werden, die sich unter nahezu gleichen Winkeln treffen. Alle Elemente sind vorwiegend druckbeansprucht. Die mit diesem Tragsystem ausführbaren Konstruktionen haben eine geschlossene Form und bilden ein in sich geschlossenes Tragsystem. (siehe 3.3.5.1 Seite 69) Grundsätzlich können mit linearen geraden Elementen noch weitere Arten von Stabwerkschalen gebildet werden, die jedoch im Bereich der mobilen Überdachungen bisher kaum Anwendung finden.

### *Luftgestützte Tragwerke*

Die Tragwerke bestehen aus flächigen weichen Elementen, die pneumatisch gestützt bzw. stabilisiert werden. Die Tragsysteme sind nicht-hierarchisch und in sich geschlossen. Primärtragwerk und Hülle

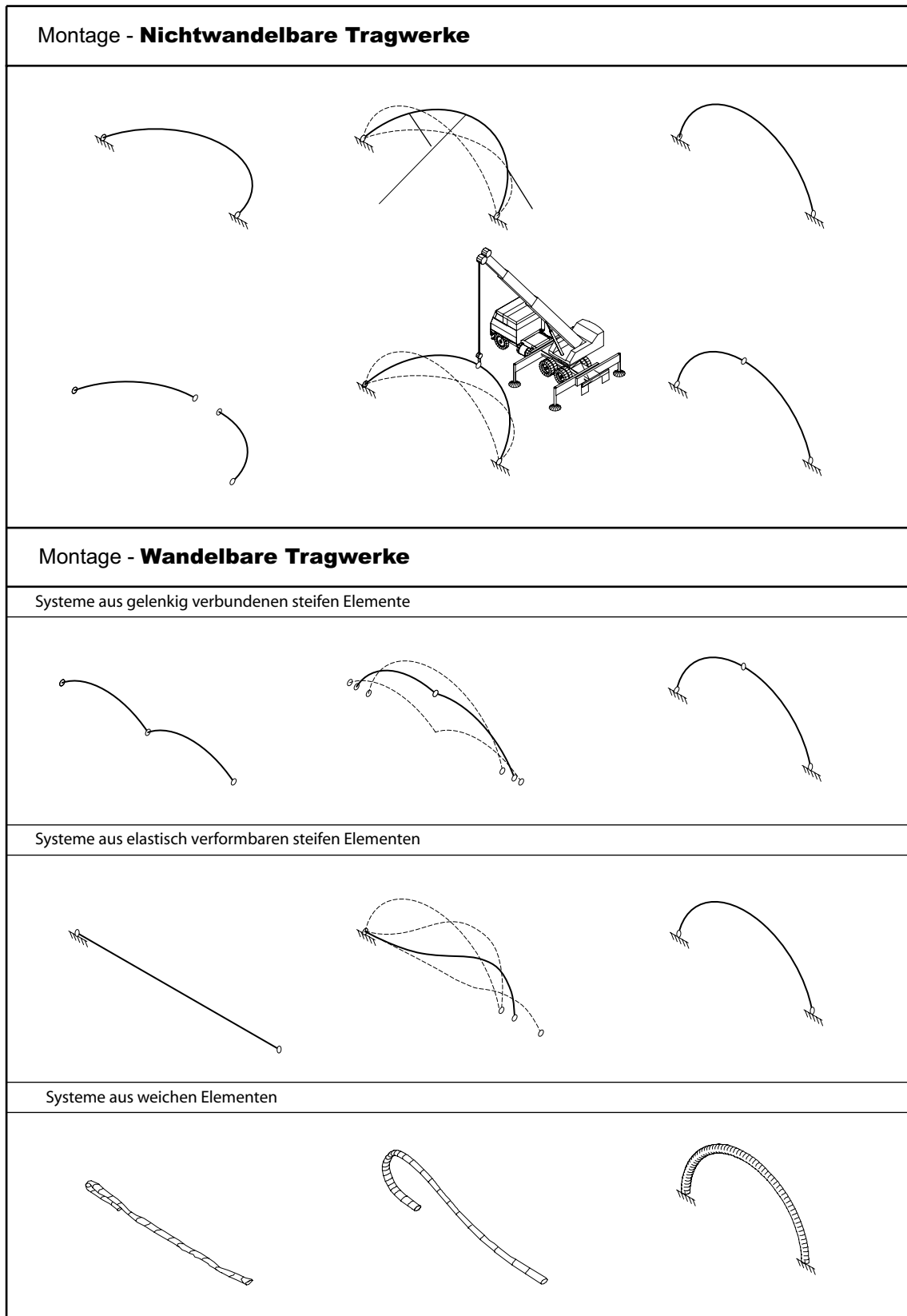


Abb. 5-10. Einsatz verschiedener wandelbarer Tragwerke zur Montage eines Bogentragwerks

sind identisch. Die rein zugbeanspruchten Tragsysteme erlauben die Überdachung sehr großer Spannweiten mit minimalem Konstruktionsaufwand.

#### *Luftgefüllte Tragwerke*

Luftgefüllte Tragwerke bestehen ebenfalls aus flächigen weichen Elementen, die pneumatisch stabilisiert werden. Die Tragwerke können entweder als hierarchische Systeme aus luftgefüllten Elementen als Haupttragelement und weiteren weichen flächigen und linearen Tragelementen als Nebentragelementen bestehen, oder als nicht-hierarchische Systeme aus immer gleichen luftgefüllten Elementen. Es können sowohl Konstruktionen mit offenen und geschlossenen Formen, als auch mit offenen und in sich geschlossenen Tragsystemen gebildet werden

#### *Scheiben und Platten*

Scheiben- und Plattentragwerke bestehen aus flächigen steifen ebenen Elementen, die normalkraft- und biegebeansprucht werden. Die daraus resultierenden Abmessungen, Transportvolumen und Gewichte erlauben die sinnvolle Anwendungen dieser Tragsysteme nur für mobile Überdachungen kleiner Spannweite.

### 5.3.2 Wandelbare Tragwerke

Wandelbare Tragwerke sind Tragwerke, die Funktionsweise und Form verändern können. Als statisches System dienen sie der Lastabtragung einer Konstruktion, als bewegliches System ermöglichen sie eine reversible Veränderung der Form einer Konstruktion. Nach Abschluss der Formgebung erfolgt durch die Versteifung der beweglichen Komponenten die Fixierung des Systems und der Übergang vom Mechanismus zum Tragwerk. Für mobile Überdachungen werden wandelbare Tragwerke vorwiegend bei der Montage der Konstruktion eingesetzt, um einen Aufbau ohne schwere Hebewerkzeuge, Hilfsgerüste etc. zu ermöglichen bzw. den Montagevorgang deutlich zu beschleunigen (Abb. 5-10). Beschränkt man sich bei der Betrachtung der Wandelbarkeit von Tragwerken auf die Art der Formänderung in Abhängigkeit von der elastischen Dehnung, können die existierenden wandelbaren Tragwerke drei Gruppen zugeordnet werden:

- Systeme aus gelenkig verbundenen steifen Elementen
- Systeme aus elastisch verformbaren steifen Elementen
- Systeme aus weichen Elementen

#### *Systeme aus gelenkig verbundenen steifen Elementen*

Wandelbare Systeme aus gelenkig verbundenen steifen Elementen erlauben eine Lageänderung der Elemente bzw. die Änderung der Form des Systems ohne eine elastischen Dehnung der Elemente. Ein einfaches Beispiel sind Dreigelenkrahmen - oder Bögen. Als Mechanismus können sie ihre Form durch die Verschiebung eines bzw. beider Auflager und des Scheitelgelenks verändern. Nach Abschluss der Bewegung wird durch die Herstellung der Unverschieblichkeit der Auflager aus dem kinematischen ein statisches System.

#### *Systeme aus elastisch verformbaren steifen Elementen*

Wandelbare Systeme aus hochelastischen steifen Elementen erlauben eine Formänderung der Elemente die mit einer elastischen Dehnung verbunden ist. Ein Anwendungsbeispiel sind die bogenförmigen Stützkonstruktionen von Zelten kleiner Spannweite, deren Form durch Biegen der hochelastischen Stäbe erzeugt wird. Auch hier wird nach Abschluss der Verformung durch die Veränderung der Auflagerbedingungen und einer Versteifung der Elemente ein statisches System erzeugt.

#### *Systeme aus weichen Elementen*

Wandelbare Systeme aus weichen Elementen erlauben eine Lageänderung der Elemente bzw. die Änderung der Form der Elemente und des Systems ohne eine elastischen Dehnung der Elemente. Ein einfaches Beispiel ist auch hier ein Bogentragwerk. Durch die Erzeugung eines Innendruckes läßt sich aus einem gefalteten oder gerollten Schlauch ein luftgefülltes Bogenelement erzeugen, das pneumatisch stabilisiert wird. Durch die Herstellung unverschieblicher Auflager entsteht ein stabiles statisches System.

Mischsysteme aus gelenkig verbundenen steifen, elastisch verformbaren oder weichen Elementen können als hybride wandelbare Systeme bezeichnet werden. Dehnunglose und dehnungsabhängige Geometrieänderungen werden in einem Formänderungsprozess angewendet.

### 5.3.2.1 Grundtypen Wandelbarer Systeme

Die meisten existierenden Systeme wandelbarer Tragwerke können der Gruppe der Systeme mit gelenkig verbundenen Elementen zugeordnet werden. Zur Differenzierung der Systeme in dieser Gruppe und zur geordneten Darstellung aller ermittelten Beispiele wandelbarer Tragwerke werden im Folgenden acht Grundtypen anhand der Eigenschaften der Systemelemente und der grundlegenden Bewegungsmechanismen definiert.



Typ1

Das System besteht aus mindestens zwei gelenkig verbundenen steifen Elementen, mit einem festen Auflager (C) und einem horizontal verschieblichen Auflager (A). Eine in B angreifende Vertikalkraft verursacht eine horizontale und vertikale Bewegung von Punkt B nach B'. Das System kann zur Errichtung von ebenen Tragwerken aus mehreren Elementen verwendet werden, wie Stabwerke, Dreigelenkrahmen und Bogentragwerke.

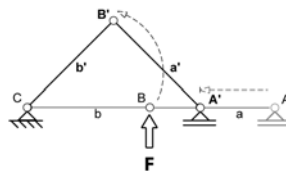


Abb. 5-11. Typ5 - Verformung einer Elementkette mit zwei Elementen durch eine Vertikalkraft

Typ2

Wie Typ 1 besteht das System aus mindestens zwei gelenkig verbundenen steifen Elementen, mit einem festen Auflager (C) und einem horizontal verschieblichen Auflager (A). Eine in Punkt A exzentrisch zu B angreifende Horizontalkraft F verursacht eine horizontale und vertikale Bewegung des Punktes B nach B'. Durch die Wandlung von Punkt A' in ein unverschiebliches Auflager wird das Mechanismus zum Tragwerk. Dieser Mechanismus findet dieselbe Anwendung wie Typ1.

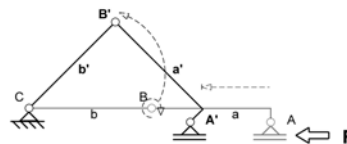


Abb. 5-12. Typ2 - Verformung einer Elementkette mit zwei Elementen durch eine Horizontalkraft

Typ3

Das System besteht aus mindestens zwei in B gelenkig verbundenen steifen Elementen, die über ein teleskopartig verlängerbares Element (a) verbunden und in einem Auflager unverschieblich (C) gelagert sind. Das zweite Auflager ist horizontal verschieblich (A). Durch eine Horizontalkraft F verlängert sich das Teleskopelement und verursacht eine horizontale Verschiebung des Punktes A nach A'. Der Mechanismus wird in Zusammenhang mit hydraulischen Antrieben eingesetzt.

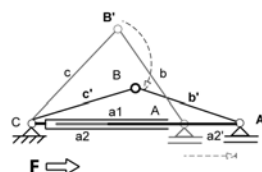


Abb. 5-13. Typ3- Horizontale Verschiebung durch eine hydraulische Presse

## Typ4

Das System besteht aus mindestens vier steifen Elementen. Element a und b sind von Punkt A nach B bzw. E nach D durchlaufende Elemente, die in Punkt B gelenkig gekoppelt sind. Stab a ist in A horizontal verschieblich gelagert. Durch die Spiegelung von Element a und b an der vertikalen Symmetrieachse erhält man das gesamte System, das ein Parallelogramm bildet. Die Vergrößerung des Abstandes der Fußpunkte von A nach A' durch eine horizontale Bewegung verursacht die Verringerung des Abstandes von Punkt B und E und ihre horizontale Bewegung zu den Punkten B' und E'. Gleichzeitig wird Punkt D horizontal und vertikal bewegt. Dieser Mechanismus kann zur Errichtung von linearen, ebenen und räumlichen Tragwerken verwendet werden. Durch die Addition weiterer weicher linearer oder flächiger Elemente ist eine spätere Versteifung und damit Wandlung zum Tragwerk möglich.

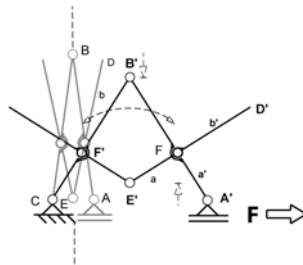


Abb. 5-14. Typ4 - Grundprinzip eines Pantographen, Mechanismus aus vier Elementen

## Typ5

Das System besteht aus einem unverschieblich gelagerten Element, das mit einem zweiten Element verschieblich verbunden ist. Durch die Kraft F wird das Element b entlang des Elements a bewegt. Durch die Fixierung von Element B' wird aus dem Mechanismus ein Tragwerk. Dieser Grundtyp kann auf verschiedene Weise mit weichen (Seilen) und steifen Elementen (Biegestäbe) variiert werden.

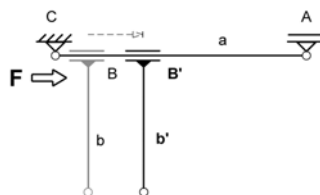


Abb. 5-15. Typ3 - Verschieben eines Elementes entlang eines steifen Elements

## Typ6

Das System besteht aus mindestens drei steifen Elementen. Ein Element (a) ist durch zwei Auflager (A, C) fixiert. Die anderen beiden Elemente sind gelenkig verbunden und fest in C und verschieblich in D gelagert. Eine Kraft in D parallel zu Element a verursacht eine Verschiebung zu Punkt D' und damit eine horizontale und vertikale Bewegung von Punkt B nach B'. Durch die Fixierung des Punktes D' wird der Mechanismus zum Tragwerk. Dieser Mechanismus ist das Grundprinzip aller Schirmkonstruktionen.

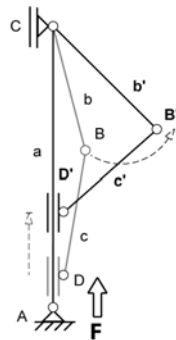


Abb. 5-16. Typ6 - Verschieben einer Elementkette mit zwei Elementen an einem dritten Element

## Typ7

Das System besteht aus einem hochelastischen steifen Element, das in Punkt A unverschieblich und in Punkt B verschieblich gelagert ist. Durch eine horizontale Verschiebung von Punkt B erfolgt die Verformung des Elements. Zur Wandlung des Systems in ein Tragwerk ist die Versteifung des elastischen Elements durch weitere steife oder weiche Elemente notwendig. Das Wandlungsprinzip kann für ebene Tragwerke eingesetzt werden.

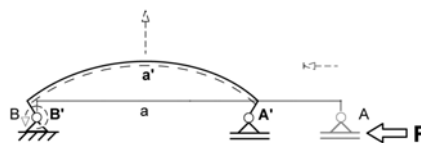
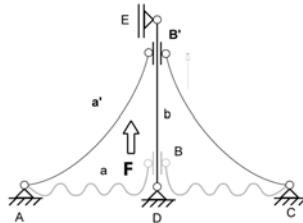


Abb. 5-17. Typ7 Elastisch verformtes System

## Typ8

Das System besteht aus mindestens einem steifen Element (b), das zwischen mehr als drei festen horizontal unverschieblichen Auflagern angeordnet ist. Das bewegliche System besteht aus einem weichen Flächenelement oder einem Netz aus weichen Linienelementen, das an den festen

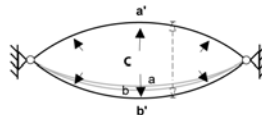
Auflagerpunkten unverschieblich und am Punkt B verschieblich gelagert ist. Durch eine Vertikalkraft F kann Punkt B nach B' verschoben und damit die Form des weichen beweglichen Systems verändert werden. Durch die Fixierung von Punkt B' und durch mechanisches Vorspannen wird aus dem Mechanismus ein Tragwerk. Dieses Grundprinzip findet seine Anwendung vorallem bei der Errichtung von Membrandächern.



**Abb. 5-18.** Typ8 - zentrales Entfalten/Raffen von weichen Hochpunktflächen

#### Typ9

Das System besteht aus einem weichen Flächenelement über einer festen Fläche oder zwei übereinanderliegenden weichen Flächenelementen, deren Ränder vertikal und horizontal unverschieblich gehalten sind. Die weichen Flächenelemente werden durch die Erhöhung des Innendrucks verformt. Es entsteht ein Körper mit überwiegend synklastischer Form, der durch den Luftdruck im Innern stabilisiert und damit zum Tragwerk wird.



**Abb. 5-19.** Typ9- pneumatisches Entfalten von luftgestützten oder luftgefüllten Systemen

### 5.3.2.2 Arten wandelbarer Tragwerke

Mit Hilfe der so definierten Grundtypen der wandelbaren Systeme und ihrer statischen Wirkungsweise als Primärtragwerk oder Teil des Primärtragwerks (siehe 5.3.1.3 Seite 158) lassen sich die vorhandenen Beispiele wandelbarer Tragwerke klassifizieren. (Abb. 5-20), (Abb. 5-21), (Abb. 5-22).

#### *Bogentragwerke*

Bogentragwerke erlauben die Anwendung verschiedener Mechanismen (Typ1 bis 4, Typ7 und 9) für eine Formänderung und stellen als statisches System effiziente Tragwerke dar. Der einfachste Mechanismus ist der Dreigelenkbogen, der über eine vertikale (Typ1) bzw. horizontale Kraft (Typ2) aufgerichtet werden kann. Durch die Anordnung eines weiteren Gelenks ist es möglich, das Tragsystem durch eine vertikale Kraft auch auf einer konstanten Grundrissfläche aufzustellen. Der Grundgedanke lässt sich sowohl auf ebene als auch auf räumliche Tragsysteme den sogenannten Pantadomes<sup>1</sup> anwenden. Durch das Hinzufügen weiterer Gelenke entstehen Elementketten die durch eine Horizontalkraft einfach und schnell in ihre Endform gebracht und dann versteift werden können (z.B. WIDESSPAN - Weatherhaven). Dabei nimmt das Tragwerk am Boden aber immer eine größere Grundfläche ein als im errichteten Zustand. Eine weitere Möglichkeit zur Aufrichtung von Bogentragwerken auf konstanter Grundfläche besteht in der Verwendung eines Mechanismus, der eine gesteuerte Verlängerung oder Verkürzung von Stabelementen erlaubt (Typ3). Ein Beispiel hierfür ist das System BINISTAR<sup>2</sup> des Konstrukteurs Bini. Der Scherenmechanismus (Typ4) kann zur Formänderung verschiedener sowohl ebener (Bogen, Rahmen) als auch räumlicher Tragsysteme (Stabwerkschale) verwendet werden. Die generelle Biegebeanspruchung der Stäbe und die erforderlichen aufwendigen und sehr präzisen Knotenkonstruktionen beschränken jedoch diese Möglichkeit auf die Anwendung für kleine Spannweiten. Bogenkonstruktionen dieser Größenordnung können auch über die elastische Verformung des Bogens errichtet werden (Typ7). Für größere Spannweiten ist die

1. Begriff des japanischen Ingenieurs M. Kawaguchi für das von ihm entwickelte Montage- und Konstruktionsprinzip zur Errichtung von weitgespannten Stabwerksschalen

2. Das System des italienischen Konstrukteurs Bini (BINISTAR) verwendet die Membran als wandelbares Tragwerk zur Errichtung des späteren Primärtragwerks einer Stabwerkschale. Die gesamte Konstruktion wird am Boden vormontiert. Die Membran ist allseitig kontinuierlich am Boden verankert und wird dann durch die Erhöhung des Innendrucks aufgerichtet. Das auf der Membran befindliche bewegliche Stabwerk wird dadurch ebenfalls in seine Endform gebracht und vorgespannt. Die Teleskopstäbe des Stabwerksmechanismus werden durch einen selbsttätigen Verschluss gesichert und damit das gesamte Stabwerk versteift. Damit wird die Membran als pneumatisch versteiftes Tragwerks nicht mehr benötigt. Sie dient im weiteren als mechanisch vorgespannte Hülle. Das System erlaubt sowohl die Ausbildung von Tonnen- als auch Kuppelschalen. Nachteilig ist die erforderliche manuelle Sicherung der Verschlussmechanismen nach dem Aufrichten und das ebenfalls manuelle Lösen bei der Demontage, die einen beträchtlichen Arbeitsaufwand verursachen, der die Anwendbarkeit deutlich einschränkt. Für die Errichtung der Gesamtkonstruktion werden bei einer Spannweite von ca. 30 m Aufbauzeiten von 120 bis 180 min angegeben. [73], [100]

<b>Wandelbare Tragsysteme</b>			
<b>01</b>	Wandelbares System		
	Typ 1	Typ 2	Typ 3
<b>Tragsysteme</b>			
	Bogentragwerke		
	2D Rahmentragwerke		
	3D Rahmentragwerke		
	gelenkig verbundene Stabwerke		
	Stabwerkschale aus geraden Stäben		
Stabwerkschale aus gekrümmten Stäben			
mechanisch vorgespannte Membran			
pneumatisch vorgespannte Membran			

Abb. 5-20. Arten Wandelbarer Tragwerke - aus gelenkig verbundenen steifen Elementen

---

Anwendung von hybriden Systemen notwendig, wie z.B. das System STRARCH<sup>1</sup>. Luftgefüllte Konstruktionen erlauben die Entwicklung sehr einfacher und effizienter wandelbarer Bogentragwerke kleiner und mittlerer Spannweite. (Typ9)

#### *Ebene Rahmentragwerke*

Die Möglichkeiten der Anwendung von wandelbaren Systemen zur Errichtung von Rahmentragwerk entsprechen denen der einfachen Mechanismen für Bogentragwerke. Durch das Einfügen von Gelenken und mit Hilfe einer vertikalen (Typ1) und horizontalen (Typ2) Kraft, wird eine Formänderung des Systems erzeugt. Die für die Optimierung der späteren Rahmentragwirkung sinnvolle Differenzierung von Rahmenriegel und Rahmenstiel und die planmäßig hohe Biegebelastung des Tragsystems schränkt die Realisierung von Rahmen als wandelbares System stark ein.

#### *Räumliche Rahmentragwerke/ Scheiben- und Plattentragwerke*

Räumliche Rahmentragwerke bzw. Scheiben- und Plattentragwerke können ihre Form durch das teleskopartige Auseinanderziehen von Modulen verändern (Typ5). Eine weitere Möglichkeit bietet das Entfalten in einer Bewegungsrichtung durch die Anordnung entsprechender Gelenke (Typ4). Das einfachste wandelbare System gelenkig verbundener Stabwerke entsteht aus der Anwendung des Systems Typ 1 und 2. Aufwendigere Lösungen wie das wandelbare System der Schirmkonstruktionen beruhen auf der Anwendung von Typ6.

#### *gelenkig verbundene Stabwerke*

Gelenkig verbundene Stabwerke können durch das Hinzufügen eines weiteren Freiheitsgrades der Auflager (horizontal verschieblich) auf sehr einfache Weise zu wandelbaren Tragwerken werden. (Typ1 bzw.2) Nach Abschluß der Bewegung wird durch das Fixieren der Fußpunkte aus dem kinematischen ein statisches System. Weitere Anwendung für wandelbare Stabtragwerke sind Scherenmechanismen. (Typ4) und Schirmmechanismen (Typ6).

#### *Stabwerkschalen aus geraden Stäben*

Stabwerkschalen aus geraden Stäben erlauben generell die Anwendung ähnlicher Mechanismen, die auch zur Formänderung von Bogentragwerken genutzt werden. Für Stabwerkschalen aus geraden

---

1. Die australische Firma STRARCH Pty.Ltd. verwendet seit Mitte der 80er Jahre ein patentiertes System, das die elastische Verformung eines Fachwerkbogens oder Rahmens, bestehend aus einem biegesteifen durchlaufenden Obergurt und gelenkig verbundenen Untergurt zur Komplettmontage von Flugzeughangars mit bis zu 100 m Spannweite verwendet. [90], [102]

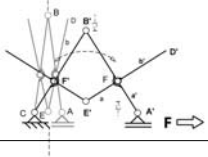
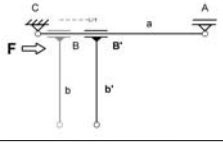

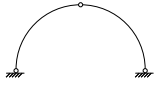
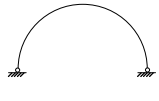
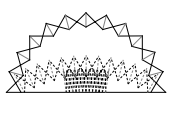
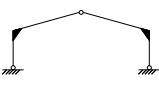

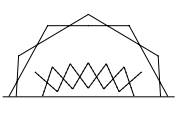
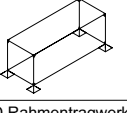



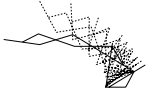
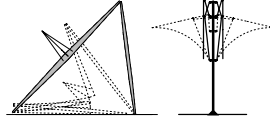

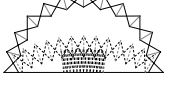
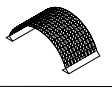

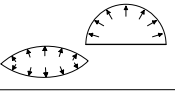
<b>Wandelbare Tragsysteme</b>				
<b>02</b>	Wandelbares System			
	Typ 4	Typ 5	Typ 6	
				
<b>Tragsystem</b>				
				
	Bogentragwerke			
				
				
	2D Rahmentragwerke			
				
	3D Rahmentragwerke			
				
	gelenkig verbundene Stabwerke			
				
Stabwerkschale aus geraden Stäben				
				
Stabwerkschale aus gekrümmten Stäben				
				
mechanisch vorgespannte Membran				
				
pneumatisch vorgespannte Membran				

Abb. 5-21. Arten wandelbarer Tragwerke -aus gelenkig verbundenen steifen Elementen



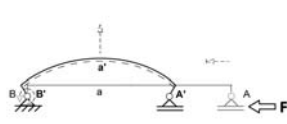
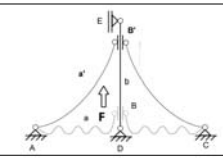
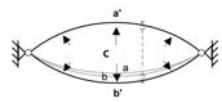



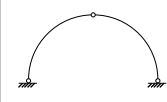
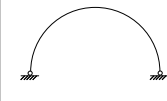
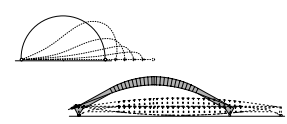
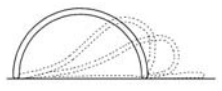
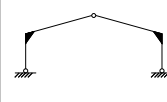
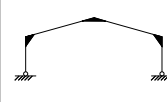
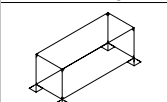
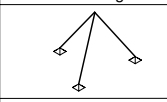

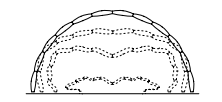

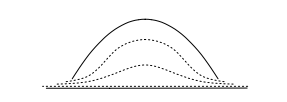
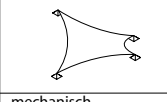
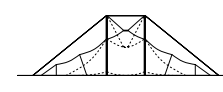
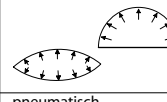
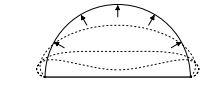
Wandelbare Tragsysteme			
03	Wandelbares System		
	Typ 7	Typ 8	Typ 9
			
			
Tragsystem			
			
	Bogentragwerke		
			
			
	2D Rahmentragwerke		
			
	3D Rahmentragwerke		
			
	gelenkig verbundene Stabwerke		
			
	Stabwerkschale aus geraden Stäben		
			
Stabwerkschale aus gekrümmten Stäben			
			
mechanisch vorgespannte Membran			
			
pneumatisch vorgespannte Membran			

Abb. 5-22. Wandelbare Tragwerke- aus elastisch verformbaren steifen und weichen Elementen

Elementen können Systeme entsprechend Typ 3 und 4 entwickelt werden. Die Nutzung luftgefüllter Elemente (Typ9) bietet die Möglichkeit, auch flächige, ebene Elemente zu verwenden.

*Stabwerkschalen aus gekrümmten Stäben*

Für Stabwerkschalen aus gekrümmten Stäben stellt die elastische Verformung der Stäbe einen möglichen Mechanismus zur Formänderung dar. Zum Erreichen eines tragfähigen Systems ist ein Hinzu-fügen von Diagonalen zum Viereckmaschennetz der Stäbe notwendig.

*Pneumatisch vorgespannte Tragwerk*

Pneumatisch stabilisierte Tragwerke sind auf verschiedene Art und Weise als wandelbare Tragwerke einsetzbar. Allen Systemen gemeinsam ist die Übereinstimmung von Primärtragwerk und Hülle. Unterschieden werden luftgefüllte und luftgestützte Systeme. Luftgefüllte Systeme erlauben die Aus-bildung von Tragsystemen wie Bögen und Schalen aus linearen oder flächigen Elementen (siehe Kapitel 4 S.137). Traglufthallen sind mit Abstand die einfachsten wandelbaren Tragwerke. Sie werden in der Regel für wandelbare Konstruktionen im Fall großer Spannweite eingesetzt (siehe Kapitel 4 S.135).

### 5.3.3 Hülle

Die Hülle eines Bauwerks ist die Schnittstelle zwischen Innenraum und Umwelt. Ihre wichtigste Aufgabe ist die Erfüllung des Schutzes des Innenraums vor Witterungseinflüssen. Als lastabtragendes Element ist die Hülle in der Regel Teil des Sekundärtragwerkes. Sie kann aber auch wie z.B. bei Traglufthallen ein Bestandteil des Primärtragwerkes sein. Die Anforderungen an die Hülle variieren entsprechend den verschiedenen Aufgaben innerhalb der Konstruktion und der Nutzung eines Bauwerks. Entsprechend ihrer Biegesteifigkeit können die Hüllen mobiler Überdachungen grundsätzlich in weiche und steife Hüllen unterschieden werden.

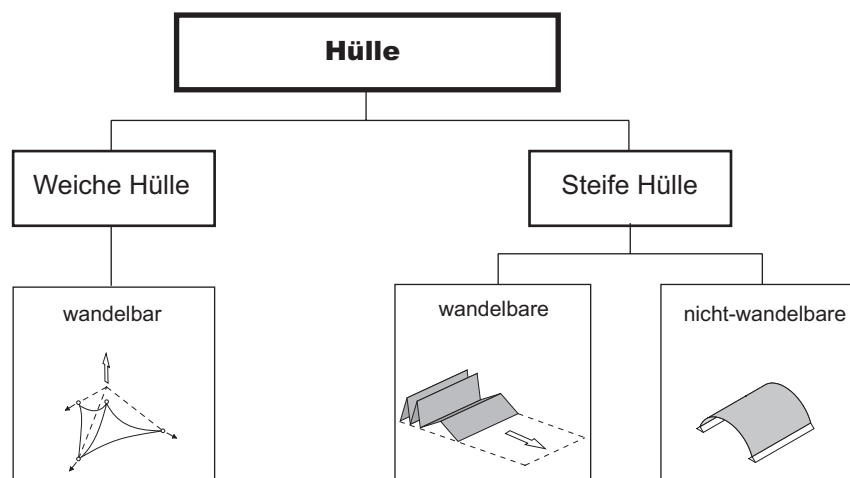


Abb. 5-23. Kategorien der Hüllen mobiler Überdachungen

Für die Mehrzahl mobiler Überdachungen bestehen die bauphysikalischen Anforderungen an die Hülle in einem einfachen Witterungsschutz. Der Innenraum soll vor Wind, Niederschlag und direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden, Wärme- und Schallschutz spielen nur eine untergeordnete Rolle. Für diese Anwendungen sind Membranen als einlagige weiche Hülle eine ideale Lösung. Sie sind preiswert, einfach zu verarbeiten, vielseitig einsetzbar, besitzen ein geringes Packvolumen, können schnell montiert werden und erlauben als Tragelement weitgespannte leichte Konstruktionen. Die weichen Flächenelemente können ihre Form dehnungsfrei nahezu beliebig verändern. Als transluzente oder transparente Materialien erlauben sie eine natürliche Belichtung des Innenraums. Nachteilig sind der schlechte Wärme- und Schallschutz. Einschränkungen bei der Verwendung von Membranen ergeben sich außerdem bei ebenen Membranflächen durch die entstehenden Flattergeräusche, bei doppelt gekrümmten vorgespannten Flächen dagegen durch die entstehenden Schallreflektionen. Aus diesen Gründen werden bei Nutzungen des Innenraums mit erhöhten Anforderungen an Wärme- und Schallschutz meist mehrlagige Hüllkonstruktionen verwendet. Für

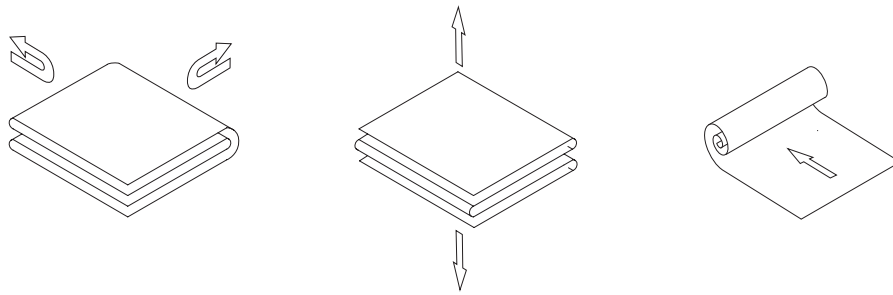


Abb. 5-24. Bewegungsvorgänge: Falten, Raffen, Rollen

		Bewegungsrichtung		
		linear	radial	zentral
Bewegungsvorgang	falten/ raffen			
	rollen			

Abb. 5-25. Wandelbarkeit mechanisch vorgespannter Membrane

diese Anwendungen können ebenfalls Membranwerkstoffe verwendet werden, allerdings verlieren solche Konstruktionen viele der zuvor genannten Vorteile und der Aufwand für Verarbeitung und Montage erhöht sich um ein Vielfaches. Dies führt zum Einsatz von steifen Hüllelementen, die als Paneele aus „Sandwichkonstruktionen“ montiert werden. Die Elemente beinhalten zwischen innerer und äußerer Deckschicht Dampfsperre, Wärmedämmung und Dichtung. Vor der Entwicklung von modernen leistungsfähigen Membranwerkstoffen wurden für mobile Bauten vielfach einlagige steife Hüllelemente aus Metall oder Holzwerkstoffen eingesetzt. Insbesondere die Anwendung profilierter Tafeln aus Metall hat eine lange Tradition. In Abhängigkeit von der Standzeit werden sie auch noch heute als einlagige Hüllen für Konstruktionen mittlerer und großer Spannweite eingesetzt. Generell ist aber die Verwendung von steifen Elementen weitaus aufwendiger als der Einsatz weicher Elemente, wie z.B. faserverstärkter Membranen oder Folien. Ihr Transportvolumen und Gewicht ist höher, sie erfordern eine weitaus größere Anzahl von einzelnen Elementen und damit einen erhöhten Aufwand für die Detaillierung und Montage der Konstruktion. Ihr Einsatz ist daher bis auf wenige Ausnahmen auf mobile Überdachungen mit geringer Spannweite und erhöhte bauphysikalische Anforderungen beschränkt. Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich daher insbesondere auf weiche Hüllen für mobile Überdachungen.

#### 5.3.3.1 Weiche Hüllen

Für mobile Überdachungen werden vorwiegend weiche Hüllen aus faserverstärkten Membranen verwendet. Im Unterschied zu anderen weichen Materialien wie Kunststoff- oder Metallfolien erlauben die meisten der beschichteten textilen Membranwerkstoffe eine mehrfache Formänderung ohne die Struktur des Materials und damit seine Leistungsfähigkeit zu schädigen. (siehe Kapitel 2 S.33).

##### *Wandelbarkeit*

Membranen sind immer wandelbare Elemente, die ihre Form und geometrische Ausdehnung auf relativ einfache Art und Weise reversibel ändern können. In Bezug auf das Zusammenspiel zwischen Vorspannung und Formänderung lassen sich zwei Arten der Wandelbarkeit von Membranen unterscheiden:

- die Membran verändert während der Wandlung Form und Spannungszustand, bleibt aber während des gesamten Vorgangs immer vorgespannt und damit begrenzt stabil
- die Membran verliert während des Vorgangs ihre Vorspannung und ändert ihre Geometrie von einem Flächen- zu einem Volumenelement

Die erste Art der Wandelbarkeit betrifft vorallem pneumatisch stabilisierte Membranen, bei denen sich durch Druckänderungen Form und Vorspannung der Membran ändern, jedoch ein durch einen Mindestdruck definiertes Mindestmaß an Vorspannung während des Vorgangs bestehen bleibt.

Die zweite Art der Wandelbarkeit betrifft sowohl mechanisch als auch pneumatisch vorgespannte Membranen und ist insbesondere für mobile Konstruktionen von großer Bedeutung, da sie die reversible Wandlung von flächigen Konstruktionselementen zu kompakten Volumen beschreibt. Sie kann durch verschiedene Bewegungsarten erfolgen, die sich durch den Bewegungsvorgang und die Bewegungsrichtung unterscheiden lassen. Mögliche Bewegungsvorgänge sind:

- Falten
- Raffen
- Rollen

#### *Falten*

Falten reduziert die Fläche einer Membran durch das Bewegen einer ihrer Kanten zu einer Linie der Fläche hin. Ein Wiederholung des Vorgangs (Mehrfachfaltung) erlaubt die Reduzierung der Fläche in beiden Dimensionen. Der Vorteil des Faltens besteht in der Möglichkeit der Erzeugung eines präzisen Faltbildes und der maximalen Reduktion der Fläche der Membran zu einem Volumen.

#### *Raffen*

Raffen kann als eine Variante des Falten angesehen werden, bei der sowohl eine Kante als auch ein Eckpunkt der Fläche zu einer Linie bzw. einem Punkt hin bewegt wird. Durch die Bewegung zu einem Punkt hin kann die Fläche der Membran innerhalb einer Bewegung reduziert werden.

#### *Rollen*

Rollen reduziert eine Dimension einer Fläche einer Membran nur in einer Richtung. Generell bietet das Rollen ebenfalls die Möglichkeit einer maximalen Reduktion der Fläche der Membran zu einem Volumen. Der Vorteil gegenüber dem Falten und Raffen besteht in der Vermeidung von eventuellen Beschädigungen der Fasern von Gewebemembranen durch Knicken.

Die Bewegungsrichtung beschreibt die Bewegung der Membran bezogen auf die Fläche, einen Bezugspunkt oder einer Bezugsachse. Sie kann in drei Möglichkeiten unterteilt werden:

- linear - die Bewegung erfolgt parallel oder senkrecht zur Fläche der Membran

- radial - in Richtung einer kreisförmigen Flächenkante
- zentral - von einem Bezugspunkt weg, der innerhalb oder außerhalb der Fläche liegt

Abbildung 5-25 gibt einen Überblick über die im Bereich der mobilen Überdachungen verwendeten Bewegungsarten. Die Wahl einer Bewegungsart für die Montage ergibt sich aus der Membranform, der Größe der Membranfläche, der Randausbildung und der Anbindung an das Primärtragwerk.

### 5.3.3.2 Steife Hüllen

Für steife Hüllen mobiler Überdachungen werden einlagige Elemente aus Metall, Kunststoff, Holz oder mehrlagige Verbundelemente aus verschiedenen Materialien verwendet. Einlagige steife Hüllen besitzen gegenüber den einlagigen weichen Hüllen keine wesentliche Vorteile in ihren bauphysikalischen Eigenschaften, haben jedoch wesentliche Nachteile in Bezug auf ihre Wandelbarkeit und ihr Flächengewicht. Sie werden deshalb deutlich seltener eingesetzt. Verbundelemente finden dagegen häufiger Verwendung, da sie höheren bauphysikalischen Anforderungen genügen und gegenüber mehrlagigen gedämmten weichen Hüllen einfacher hergestellt und montiert werden können.

#### *Wandelbarkeit*

Die Wandelbarkeit steifer Hüllen ist gegenüber den weichen Hüllen stark begrenzt. Die Art der Wandelbarkeit beschränkt sich im Wesentlichen auf eine Starrkörperbewegung. Bei der Verwendung hochelastischer Werkstoffe ist zwar eine Formänderung durch elastische Verformung denkbar, da steife Hüllen in der Regel jedoch aus mehrlagigen Verbundelementen mit sehr unterschiedlichen Elastizitätsmodulen bestehen, ist solches praktisch kaum umsetzbar.

Generell setzt die Formänderung steifer Hüllen immer die Auflösung in eine mehr oder weniger große Anzahl von in sich steifen Teilflächen bzw. Elementen voraus. Die Formänderung der Fläche erfolgt entweder durch eine Bewegung der Elemente gegeneinander oder durch die Bewegung einer gelenkig verbundenen Elementgruppe. Es können drei Bewegungsvorgänge unterschieden werden:

- Verschieben
- Falten
- Rollen

### *Verschieben*

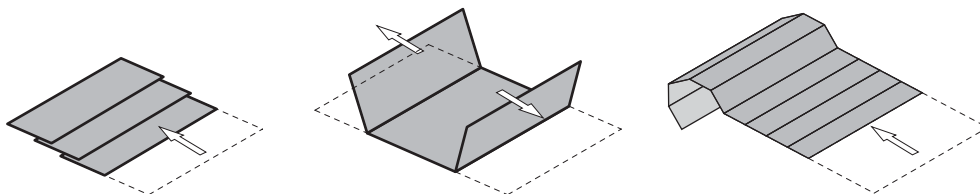
Verschieben erlaubt die Reduzierung einer Fläche durch die Lageänderung der Teilflächen untereinander. Die einzelnen Elemente können sich in einer Richtung teleskopartig über- oder untereinander bewegen.

### *Falten*

Falten bedeutet die Lageänderung von gelenkig gekoppelten Flächenelementen. Die Formänderung erfolgt durch eine Rotation um die Verbindungsachse der Elemente.

### *Rollen*

Rollen bedeutet ebenfalls eine Lageänderung gelenkig gekoppelter Elemente. Die Fläche verringert ihre Dimension nur in einer Richtung. Die Größe der Flächenelemente in die Bewegungsrichtung wird durch den minimalen Rollendurchmesser bestimmt. Die grundsätzlichen Bewegungsrichtungen für steife Hüllen entsprechen denen der weichen Hüllen. Allgemein lässt sich feststellen, dass die notwendige Aufteilung der Flächen in Teilflächen, die gelenkige Verbindung und die in der Regel notwendige Kombination von Bewegungsvorgängen und Richtungen die Anwendung steifer wandelbarer Hüllen im Bereich mobiler Überdachungen stark einschränkt.



**Abb. 5-26.** Bewegungsvorgänge steifer Hüllen: Schieben, Falten, Rollen



## 5.4 Montage

Die Optimierung der Montageprozesse besitzt für die Entwicklung mobiler Überdachungen einen sehr hohen Stellenwert. Der wichtigste Unterschied im Vergleich zu permanenten Bauwerken ist die erforderliche mehrfache Wiederholung von Montage und Demontage. Die Fügung aller Konstruktionselemente muss demnach reversibel erfolgen. Entsprechend der Häufigkeit der Montage muss die Anzahl der zusammenzufügenden Elemente begrenzt sein und ihre Verbindungen vereinfacht werden. Für viele der Objekte stehen für Auf- und Abbau nur relativ kurze Zeiträume zur Verfügung. Eine weitere Anforderung an die Konstruktion und Montage von Überdachungssystemen kann im Nichtvorhandensein von schweren mechanischen Hilfsmitteln wie Mobilkräne und Hublader für die Errichtung bestehen. Damit werden Größe und Gewicht der Konstruktionselemente beschränkt und zumeist die Verwendung wandelbarer Tragwerke für die Montage der Konstruktion notwendig.

Im Allgemeinen erhöht sich die Komplexität des Auf- oder Abbaus einer Konstruktion bei größer werdenden Spannweiten. Die Anzahl der Elemente, die Elementgröße und das Eigengewicht der Elemente nimmt zu. Kleinste mobile Überdachungen mit Spannweiten bis zu 10 m können meist von wenigen Personen ohne Schwierigkeiten errichtet werden. Die einzelnen Komponenten der Systeme besitzen geringe Dimensionen und ein geringes Eigengewicht. Die Abmessungen der Gesamtkonstruktion ermöglichen eine Montage vom Baugrund aus. Hilfs- und Sicherungskonstruktionen wie Gerüste, Fangnetze und der Einsatz schwerer Hebemittel bzw. Hebebühnen ist nicht notwendig. Im Folgenden werden verschiedene Parameter untersucht, die eine Gliederung möglicher Montagearten von mobilen Überdachungen erlauben.

### 5.4.1 Vorfertigungsgrad der Konstruktion

Entsprechend ihrem Vorfertigungsgrad lassen sich zwei verschiedene Montagearten oder Bauweisen mobiler Konstruktionen unterscheiden:

- Modulbauweise
- Elementbauweise

#### *Modulbauweise*

Bei der Modulbauweise erfolgt der Transport der Überdachung zum Aufstellort als eine komplett vormontierte dreidimensionale Einheit, wodurch der zeitliche Aufwand für das Aufstellen minimiert werden kann. Nachteilig für den Transport wirken sich das meist große Volumen und das hohe Gewicht der vormontierten Einheiten aus. Es kommen daher oft veränderbare Module zum Einsatz,

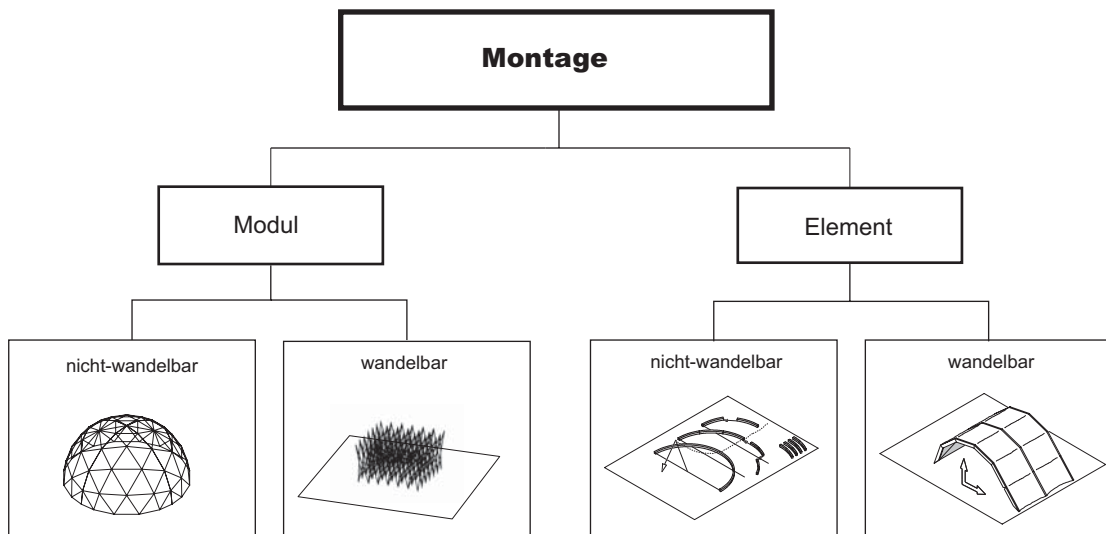


Abb. 5-27. Montage geordnet nach Modul- und Elementbauweise bzw. Wandelbarkeit

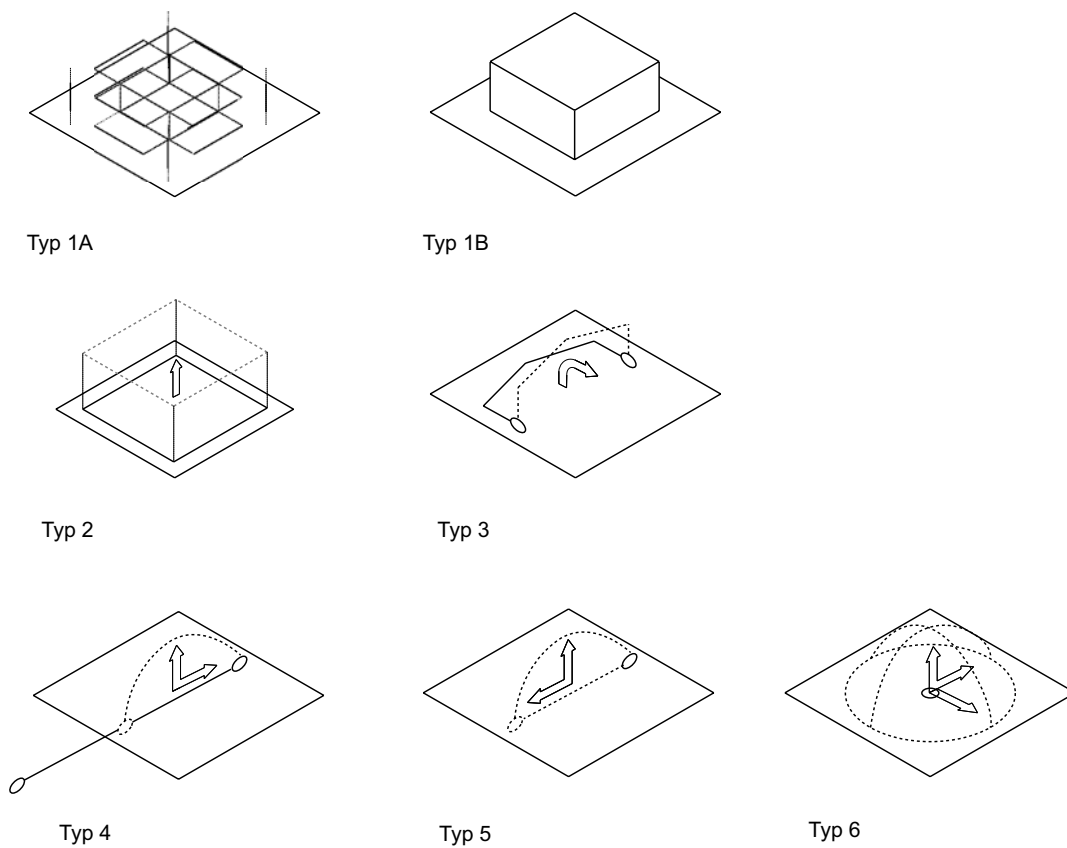


Abb. 5-28. Montagevorgänge geordnet nach Bewegungsrichtung und Einsatz wandelbarer Tragwerke

die das erforderliche Raumvolumen erst vor Ort durch einen oder mehrere Wandlungsprozesse erzeugen, wobei die Modulgröße durch die zur Verfügung stehenden Transportmöglichkeiten beschränkt wird. Der sinnvolle Einsatz vorgefertigter Module hängt weiterhin stark von der erforderlichen Spannweite der Überdachung ab. Eine Möglichkeit zur Erweiterbarkeit des Bauwerks ist bei der Modulbauweise immer nur durch die Addition eines kompletten zusätzlichen Moduls gegeben. Die genannten Einschränkungen tragen dazu bei, dass die Mehrzahl der Anwendungen in Elementbauweise ausgeführt wird.

#### *Elementbauweise*

Bei der Elementbauweise wird die Konstruktion in Einzelelemente oder Elementgruppen zerlegt, deren dritte Dimension gegenüber den beiden anderen Dimensionen wesentlich geringer ist. Der Transport erfolgt im zerlegten Zustand. Vor Ort werden die Elemente teilweise zusammengebaut und die Konstruktion in einzelnen Schritten oder innerhalb eines Wandlungsprozesses errichtet. Alternativ kann auch der Zusammenbau der Elemente identisch mit dem Errichtungsprozess des dreidimensionalen Bauwerks sein. Aufgrund der Minimierung des Transportvolumens und -gewichts, der möglichen Realisierung einer Vielzahl von Varianten mit nur wenigen standardisierten Elementen und der hohen Flexibilität gegenüber unterschiedlichen Standortbedingungen, wird die Mehrzahl mobiler Überdachungen auf diese Weise errichtet.

#### 5.4.2 Montage Primärtragwerk

Die Darstellung möglicher Montageweisen des Primärtragwerks kann entsprechend der Verwendung wandelbarer Tragwerke unterschieden werden. Zur weiteren Klassifizierung der unterschiedlichen Möglichkeiten werden die Richtungsvektoren der Errichtungsprozesse des Haupttragelemente des Primärtragwerks näher betrachtet. Daraus ergeben sich 6 Grundtypen von Montagevorgängen, die mit einem Wandlungsprozess des Tragwerks verbunden sein können (Abb. 5-28):

#### *Typ 1A/B - verschiedene Bewegungsrichtungen, additives Fügen des Haupttragwerks*

Der Montageprozess ist nicht mit einer Wandlung des Tragwerks verbunden. Das Primärtragwerk bzw. die gesamte Konstruktion wird durch das additive Zusammenfügen aller Elemente aus verschiedenen Richtungen (Typ 1A) oder das Hinzufügen eines ganzen Moduls (Typ 1B) errichtet.

*Typ2 - 1D vertikal, wandelbares Haupttragwerk*

Die Errichtung des Primärtragwerks ist mit einer Bewegung der Haupttragelemente in vertikaler Richtung verbunden. Der Montageprozess erlaubt das Zusammenfügen des Systems vor der Aufrichtung innerhalb der Grundrisslinien der Konstruktion.

*Typ3 - 2D in die Ebene des Haupttragwerks, nicht-wandelbares Haupttragwerk*

Die Errichtung des Primärtragwerks ist mit einer horizontalen und vertikalen Bewegung der Haupttragelemente aus der Grundrissebene in die Ebene des Tragwerks verbunden. Die für das Zusammenfügen des Tragwerks notwendige Fläche ist größer als die Grundrissfläche der fertiggestellten Konstruktion.

*Typ4/5 - 2D in die Ebene des Haupttragwerks, starres oder wandelbares Haupttragwerk*

Die Errichtung des Primärtragwerks ist mit einer horizontalen und vertikalen Bewegung der Haupttragelemente in die Ebene des Tragwerks verbunden. Das Tragwerk ändert seine Geometrie während des Wandlungsprozesses in Richtung der Ebene des Tragwerks, orthogonal dazu bleibt sie konstant. Die für das Zusammenfügen des Tragwerks notwendige Fläche kann in Richtung der Tragwerkebene größer oder kleiner sein als die Grundrissfläche der Konstruktion.

*Typ6 - 3D, wandelbares Haupttragwerk*

Die Errichtung des Primärtragwerks ist mit einer Bewegung der Haupttragelemente in drei senkrecht aufeinanderstehenden Richtungen verbunden. In der Regel bedeutet das die Errichtung des gesamten Primärtragwerks bzw. des Primärtragwerks und der Hülle in einem Schritt. Die Fläche, die das Tragwerk vor dem Wandlungsprozess einnimmt, kann größer oder kleiner sein als die Grundrissfläche der fertiggestellten Konstruktion.

### 5.4.3 Montage der Hülle

Für die Montage der Hülle steht eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung, die sich nach der Art der Hülle, ihrer Wandelbarkeit und der zur Montage notwendigen Hilfsmittel unterscheiden lassen. Entsprechend der Aufgabe der Hülle in der Gesamtkonstruktion und dem Zeitpunkt des Hinzufügens zur Konstruktion, können verschiedene Situationen für die Montage der Hülle entstehen:

- Hülle und Tragwerk bilden eine Einheit, die Hülle ist ein Teil des Primärtragwerks der Gesamtkonstruktion, beide Konstruktionskomponenten sind wandelbar und werden zusammen errichtet
- die Hülle ist Teil des Sekundärtragwerks, sie wird nach der Errichtung des Primärtragwerks als ein additives Element hinzugefügt.
- Die Hülle ist Teil des Sekundärtragwerks und wird vor der Errichtung des Primärtragwerks hinzugefügt. Die Hülle wird mit dem wandelbaren Primärtragwerk errichtet

Weiche Hüllen als einfache wandelbare Elemente ermöglichen dabei eine weitaus größere Anwendungsvielfalt als steife Hüllen.

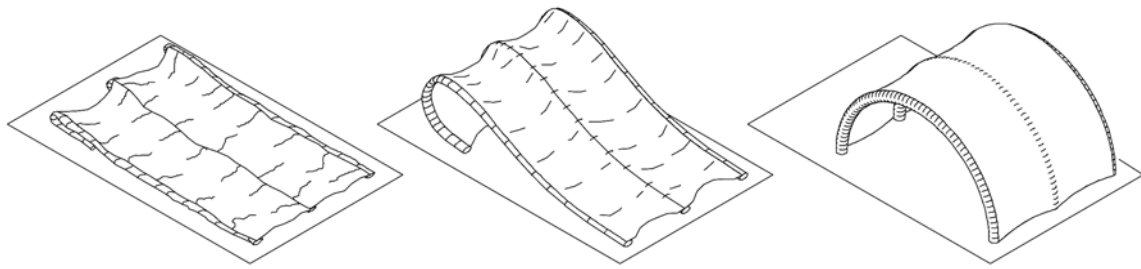
#### 5.4.3.1 Montage von weichen Hüllen

Weiche Hüllen sind immer wandelbare Konstruktionselemente. Sind sie Teil des Primärtragwerks, handelt es sich konsequenterweise um eine wandelbare Gesamtkonstruktion. Die Errichtung erfolgt in einem Prozess. Der Vorteil dieser Konstruktionsweise liegt in der Schnelligkeit des Aufbaus, der innerhalb eines einzigen Bewegungsablaufes realisiert werden kann. Es werden keine schweren Hilfsmittel benötigt und die gesamte Montage kann vom Boden aus erfolgen. Die Errichtung pneumatisch gestützter Konstruktionen ist ein typisches Beispiel für diese Montageweise.

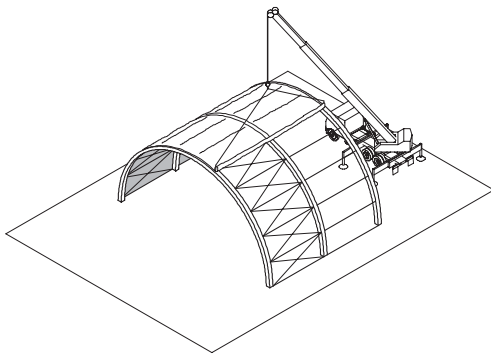
Ist die Hülle Teil des Sekundärtragwerks, ist ihre Montage nicht zwingend mit der Errichtung des Primärtragwerks verbunden. Unabhängig davon, ob es sich um ein wandelbares Primärtragwerk handelt, kann sie entweder vor oder nach dessen Errichtung hinzugefügt werden. Die unterschiedlichen Arten des Hinzufügens der Hülle werden hauptsächlich durch die Form des Primärtragwerks und die Lagerungsart der Membran bestimmt.

#### *Montage unabhängig vom Primärtragwerk*

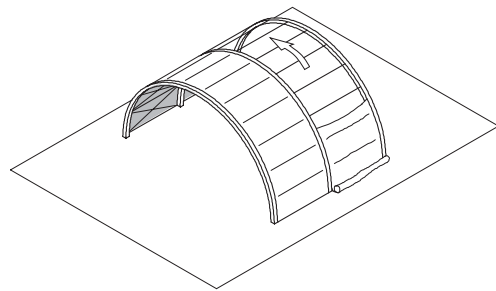
Die Hülle wird als Volumen auf dem Primärtragwerk abgelegt und erfährt dann eine Formänderung durch Rollen oder Falten zum Flächenelement. Die Formänderung kann mit verschiedenen Bewegungsarten verknüpft sein. Diese Methode wird für die Mehrzahl mobiler Membrankonstruktionen verwendet, da sie eine weitgehend unabhängige Montage von Primärtragwerk und Hülle erlaubt. Die



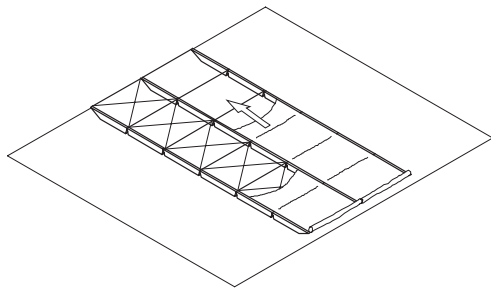
**Abb. 5-29.** Beispiel für die Errichtung einer wandelbaren Gesamtkonstruktion



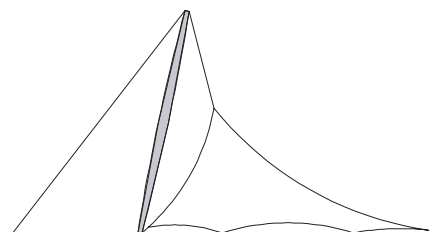
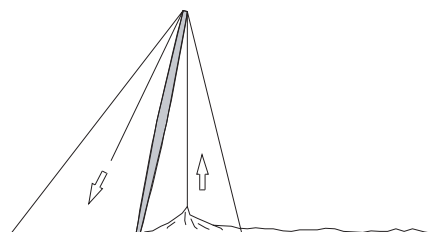
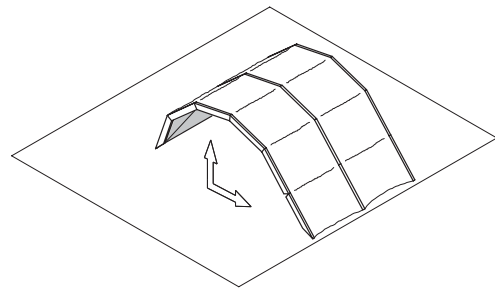
**Abb. 5-30.** Beispiel für die Montage der Hülle unabhängig vom Primärtragwerk



**Abb. 5-31.** Montage liniengelagerte Membranen, nach Errichtung des Stütztragwerks



**Abb. 5-32.** Montage liniengelagerte Membranen mit der Errichtung des Stütztragwerks



**Abb. 5-33.** Montage einer punktgestützte Membranen nach der Errichtung des Stütztragwerks

Lagerungsart der Membran, ihre Form und die Form des Primärtragwerks, sind nicht direkt mit der Art und Weise des Hinzufügens der Hülle verbunden. Für Überdachungen größerer Spannweite sind aufgrund des Eigengewichts der Membran und der Arbeitshöhe Hebewerkzeuge notwendig (Abb. 5-30).

#### *Montage mit Hilfe des Primärtragwerks*

Das Primärtragwerk kann als Hilfsmittel bei der Montage der Hülle verwendet werden. Entsprechend der Lagerungsart der Membran ergeben sich zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Bei liniengelagerten Membrankonstruktionen können Elemente des Primärtragwerks als Führungselemente bei der Formänderung dienen. Die Hülle wird entlang der weichen oder steifen Führungselementen in das Primärtragwerk eingefügt. Die Formänderung der Hülle vom Volumen zur Fläche erfolgt durch rollen und falten bzw. raffen. Die Bewegungsrichtung wird durch das Primärtragwerk definiert. (Abb. 5-32) Der Vorteil dieser Montageweise liegt in der Möglichkeit, auch große Membranflächen ohne Hebewerkzeuge zu montieren. Nachteilig ist der relativ hohe Konstruktionsaufwand und die häufig damit verbundene Störanfälligkeit der Systeme. Für liniengelagerte Membranflächen ergibt sich eine weitgehende Abhängigkeit der Membranform von der Form des Primärtragwerks. Für punktgestützte Membrankonstruktionen beschränkt sich der Montagevorgang der Hülle auf ein vertikales Anheben der Membran (Abb. 5-33). Für große Membranflächen können Masten zusammen mit einfachen Zugvorrichtungen als Hilfsmittel verwendet werden.

Die Verwendung wandelbarer Primärtragwerke hat grundsätzlich keinen Einfluss auf die Montagemöglichkeiten von Membranen. Sie kann den sinnvollen Zeitpunkt des Hinzufügens der Hülle bestimmen. Art und Form des Primärtragwerks, die Form und die Lagerungsart der Membran sind die bestimmenden Faktoren für die Wahl eines bestimmten Montageverfahrens.

#### 5.4.3.2 Montage steifer Hüllen

Steife Hüllen werden in der Regel als nicht-wandelbare Elemente für mobile Überdachungen eingesetzt. Die sich daraus ergebende Montagemöglichkeiten ähneln den Möglichkeiten der weichen Hüllen. Sie können entweder nach dem Errichten des Primärtragwerks als additives Element hinzugefügt werden oder aber auf ein wandelbares Primärtragwerk vor seiner Errichtung montiert werden.

Wandelbare steife Hüllen benötigen in der Regel das Primärtragwerk als Führungselement bei der Montage. Die Form des Primärtragwerks und die aufwendige Detaillierung dieser Konstruktionen schränkt die Anwendung der Montage aber stark ein.

#### 5.4.4 Montagearten mobiler Überdachungen

Die verschiedenen Konstruktion, die sich aus unterschiedlichen Formen, Tragwerken und Hüllen ergeben, können auf verschiedenste Art und Weise zusammengefügt und errichtet werden. Abbildung 5-34, 5-35 und 5-36 geben einen Überblick über die Vielfalt der Möglichkeiten, geordnet nach den Möglichkeiten der Errichtung des Primärtragwerks der Konstruktionen.

##### 5.4.4.1 Konstruktionen mit nicht-wandelbaren Tragwerken

Abbildung 5-34 zeigt Varianten der Errichtung von Konstruktionen mobiler Überdachungen mit nicht-wandelbaren Tragwerken, geordnet nach den Typen der Montagevorgänge des Primärtragwerks (siehe 5.4.2 Seite 183).

###### *Rahmen- und Bogenkonstruktionen*

Rahmen- und Bogentragwerke können in einem schrittweisen Prozess zusammengefügt werden der verschiedene Bewegungsrichtungen der Haupttragelemente beinhaltet (Typ1). Alternativ dazu können Rahmen und Bögen durch die Rotation um die Verbindungsachse ihrer Fußpunkte unter Zuhilfenahme von Seilzügen und Montagemasten errichtet werden (Typ3). Bei beiden Varianten erfolgt die Montage der Hülle unabhängig von der Errichtung des Primärtragwerks in einem zweiten Schritt. Dabei kann der Einsatz von wandelbaren Hüllen eine Montage ohne schwere Hilfsmittel ermöglichen.

###### *Mast- und Seilkonstruktionen*

Mast und Seilkonstruktionen erlauben generell eine einfache Montage mit Hilfe von Hilfsmasten und Seilzügen (Typ3). Diese jahrhundertalte Montagetechnik wird auch heute noch für die Mehrzahl mobiler Membrankonstruktionen mit Mast- und Seiltragwerken mittlerer und großer Spannweite verwendet (siehe Kapitel 4 S.101). Die Montage der Membran erfolgt in der Regel in einem zweiten Schritt nach dem Aufrichten der Masten durch eine Vertikalbewegung (Typ2).

###### *Stabwerkschalen*

Primärtragwerke von Stabwerksschalen können aufgrund der geringen Größe und des geringen Eigengewichts ihrer Einzelemente generell ohne Unterstützung durch einen Kran montiert werden. Neben der Montage von der temporär gestützten Mitte zum Rand hin, bietet vorallem der Einsatz eines pneumatischen Ballons oder Kissens als Montagehilfe eine einfache, schnelle und kostengünstige Alternative für die Errichtung einer Stabwerkschale. Kleinere Einheiten wie z.B. das Modell „Catenary“ (siehe Kapitel 3 S.69) können aufgrund des geringen Gewichts und der hohen Formsta-



---

bilität auch als ein Modul transportiert und errichtet werden. Das Hinzufügen der weichen oder steifen Hülle erfolgt unabhängig vom Primärtragwerk.

#### *Räumliche Rahmen / Platten- und Scheibenkonstruktionen*

Diese Konstruktionsart wird vor allem für mobile Überdachungen kleiner Spannweiten (Container) genutzt, die entweder als ein Modul oder als Einzelelemente transportiert und errichtet werden (Typ1). In der Regel verfügen diese Konstruktionen über eine feste Hülle, die bei Platten- und Scheibenkonstruktionen Bestandteil des Primärtragwerks ist.

#### 5.4.4.2 Konstruktionen mit wandelbaren Tragwerken

Die Abbildungen 5-35 und 5-36 zeigen Varianten der Errichtung von Konstruktionen mobiler Überdachungen mit wandelbaren Tragwerken.

#### *Räumliche Rahmen / Platten- und Scheibenkonstruktionen*

Ebenso wie dieselben Systeme mit nicht-wandelbarer Tragwerken sind diese Konstruktionen nur für kleine Spannweite geeignet. Gelenkig verbundene Rahmen, Platten und Scheiben können über einen Faltmechanismus eine Formveränderung der Konstruktion von einem „Flatpack“ zu einem dreidimensionalen Bauwerk erlauben, oder eine Vergrößerung eines dreidimensionalen Grundmoduls durch ein teleskopartiges Verschieben (Typ2). Eine weitere Möglichkeit für eine Vergrößerung eines Grundmoduls bietet das Ausklappen bzw. Entfalten durch den Einsatz weicher wandelbarer Elemente (Typ3).

#### *Mast- und Seilkonstruktionen*

Für Mast- und Seilkonstruktionen kann die Montage durch die Wandelbarkeit der gesamte Konstruktion, von Teilen der Konstruktion oder von einzelnen Komponenten beeinflusst werden. Die Membran als weiches Element ist einfach wandelbar. In der Regel erfolgt die Hauptbewegung der Membran während der Montage in vertikaler Richtung (Typ 2). Steife Elemente des Tragwerks können durch ein teleskopartiges Verlängern in vertikaler Richtung ebenfalls wandelbar gestaltet werden.

#### *Bogenkonstruktionen*

Bogenkonstruktionen weisen die größte Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten wandelbarer Tragwerke auf. Die einfachste Form ist der Dreigelenkbogen, der eine Montage gemäß Typ4 bzw. Typ6 erlaubt. Durch die Einführung eines weiteren Gelenks entsteht der „Pantadome- Mechanismus“ der die Montage von Bogentragwerken nach Typ2 ermöglicht. Bogentragwerke, deren Haupttragelemente aus

<b>Montagearten - nichtwandelbare Primärtragwerke</b>			
<b>01</b>	Montagevorgang		
	Typ 1	Typ 2	Typ 3
<b>Rahmentragwerke</b> 			
<b>Bogentragwerke</b> 			
<b>Mast- und Seiltragwerke</b> 			
<b>Stabwerkschalen aus geraden Staäben</b> 			
<b>Platten- Scheiben- tragwerke, 3D- Rahmen</b> 			

Abb. 5-34. Montageprozesse wandelbarer Konstruktionen

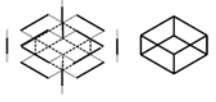
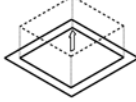

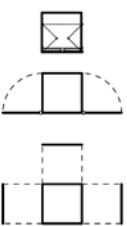
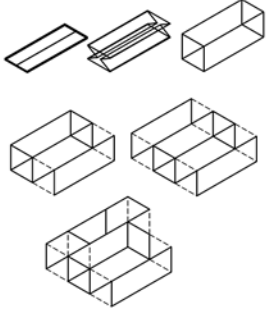
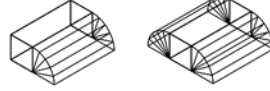

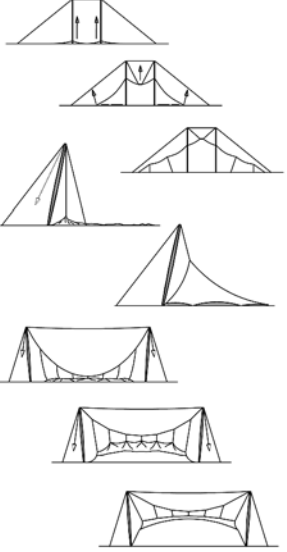
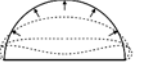
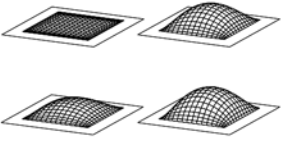

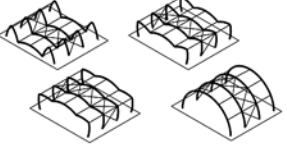
<b>Montagearten - wandelbare Primärtragwerke</b>			
<b>02</b>	Montagevorgang		
	Typ 1	Typ 2	Typ 3
			
			
<p>Platten- Scheiben- tragwerke, 3D- Rahmen</p>			
			
<p>Mast- und Seiltragwerke mit Membran</p>			
			
<p>Traglufthallen</p>			
			
<p>Bogentragwerke</p>			

Abb. 5-35. Montageprozesse wandelbarer Konstruktionen

<b>Montagearten - wandelbare Primärtragwerke</b>				
<b>03</b>	<b>Montagevorgang</b>			
	Typ 4	Typ 5	Typ 6	
 gelenkig verbundene Stabwerke				
 Rahmentragwerke				
Wandelbares Tragwerk      Bogentragwerke				
	 Luftgefüllte Tragwerke			
	 Stabwerksschalen			

Abb. 5-36. Montageprozesse wandelbarer Konstruktionen

einer gelenkig verbundenen Elementkette bestehen, die erst nach Abschluss der Formänderung versteift wird, erlauben eine sehr schnelle Montage. (siehe Kapitel 4 S.125) Eine weitere Variante ist die Verwendung von hochelastischen geraden Stäben, die ihre gekrümmte Endform durch das Verbiegen mit Hilfe des Anspannen eines Bodenkabels erhalten. Bei beiden Varianten ist die für die Montage notwendige Grundrissfläche größer als die des errichteten Bauwerks (Typ4). Durch den Einsatz von luftgefüllten Bogenelementen kann dies vermieden werden (Typ5). Die Montage der Hülle kann unabhängig vom oder mit Hilfe des Primärtragwerks erfolgen. Bei Konstruktionen mit luftgefüllten Bogenelementen ist sie in der Regel Teil des Primärtragwerks und wird zusammen mit diesem errichtet.

#### *Konstruktionen mit gelenkig verbundenen Stabwerken*

Stabwerke können durch die Einführung zusätzlicher Gelenke relativ einfach als wandelbare Tragwerke eingesetzt werden. Ein Beispiel für eine Montage mit einer räumlichen Bewegung (Typ6), durch die Verwendung eines wandelbaren Dreibocks als Stützkonstruktion für eine Membranüberdachung ist der „Moseley“ Musikpavilion (siehe Kapitel 3 S.75). Die Montage der Membran erfolgt unter Zuhilfenahme des Dreibocks durch ein vertikales Anheben (Typ 2). Eine weitere Anwendung sind Schirmkonstruktionen, deren Aufbau ebenfalls immer mit einer räumlichen Bewegung des Stabwerks und der Membran verbunden ist. Die wandelbare Stützkonstruktion eines Faltdaches (Cabriodach) erlaubt eine Formänderung der Konstruktion innerhalb einer vertikalen und horizontalen Bewegung (Typ5). Dieser Scherenmechanismus wurde für die Entwicklung einer mobilen Tribünenüberdachung, mit einer Auskragung von 7.0 m durch das Büro SL Rasch verwendet.

#### *Rahmenkonstruktionen*

Die einfachste Art der Errichtung einer Rahmenkonstruktion mit Hilfe eines wandelbaren Rahmentragwerks ist der Einsatz von Dreigelenkrahen. Das Aufrichten erfolgt gemäß Typ4 durch das Zusammenziehen der Fußpunkte und das Anheben des Scheitelgelenks und kann unter Zuhilfenahme von Hilfsmasten und Seilwinden auch ohne Hilfe von Mobilkränen erfolgen (siehe Kapitel 3 S.63). Eine weitere Alternative stellt das von Harding entwickelte System eines Aufrichtens eines Dreigelenkrahmens mit Unterspannung durch hydraulische Pressen dar. [103]

#### *Stabwerksschalen*

Für die Konstruktion von Stabwerksschalen können Scherentragwerke als wandelbare Tragelemente verwendet werden, die durch eine räumliche Bewegung errichtet werden (Typ6). Die erforderliche aufwendige Ausführung der Knoten und die eingeschränkte Tragfähigkeit der Systeme hat jedoch

bisher nur zu Realisierung geringer Spannweiten geführt. Die Montage der Hülle kann unabhängig vom Schalentragwerk erfolgen. Das System BINISTAR (siehe S.169) erlaubt auch die Realisierung großer Spannweiten mit relativ geringen Aufbauzeiten. Aber auch hier begrenzen die erforderliche Knotenausbildung und vergleichsweise aufwendige manuelle Arbeitsschritte zur Sichern bzw. Lösen der Knoten die Anwendung.

### *Traglufthallen*

Die Montage von Traglufthallen kann durch die vorwiegende vertikale Bewegung der Membran beim Aufblasen dem Typ2 zugeordnet werden. Primärtragwerk und Hülle sind identisch und werden in einem Vorgang errichtet. In Bezug auf Montage sind Traglufthallen die mit Abstand einfachsten wandelbaren Konstruktionen, die sowohl die Überdachung kleiner als auch sehr großer Spannweiten ermöglichen.

## 5.5 Zusammenfassung

Die Aufgabe der morphologischen Betrachtung besteht in einer Klassifizierung bestehender Systeme, die über die allgemein übliche Einteilung nach der Lagerungs- und Stützungsart der Membran bzw. der Art des Haupttragwerks mobiler Überdachungen hinausgeht. Dazu werden die drei zur Analyse von Bauwerken üblichen Parameter Form, Konstruktion und Nutzung um den Parameter Montage erweitert. Für den Parameter Konstruktion erfolgt eine Differenzierung in die Komponenten Tragwerk und Hülle, für den Parameter Montage in die Komponenten Modul und Element.

Die Untersuchung der einzelnen Parameter, ihrer Komponenten und möglichen Wechselbeziehungen untereinander, erfolgt anhand verschiedener Merkmale. Für die Form wird die Erweiterbarkeit als ein bestimmendes Merkmal identifiziert, das eine Zuordnung der bestehenden Beispiele mobiler Überdachungen zur Gruppe der geschlossenen oder der offenen Formen ermöglicht. Die Parameter Konstruktion und Montage sowie ihre Komponenten werden vorallem anhand des Merkmals der Wandelbarkeit analysiert. Für die wandelbaren Tragwerke wird durch die Betrachtung der Formänderung in Abhängigkeit von der elastischen Verformbarkeit eine neue Klassifizierungsmöglichkeit entwickelt und zur strukturierten Darstellung bestehender Systeme verwendet.

Ein Vergleich der verschiedenen Systeme mobiler Überdachungen anhand der Parameter und Merkmale zeigt, dass vorallem bogenförmige Konstruktionen gegenüber anderen Formen und Konstruktionen eine ganze Reihe von Vorteilen für die Entwicklung effizienter mobiler

Membrankonstruktionen bieten. Als offene Form erlauben sie eine lineare Erweiterung und Anpassung an verschiedene Nutzungen. Als Tragwerk stellen Bögen durch die überwiegende Normalkraftbeanspruchung effiziente Lösungen dar, die als statisch in sich geschlossene Systeme ausgeführt mit geringem Aufwand gegründet werden können. Bogentragwerke können sowohl für Konstruktionen mit wenigen Metern als auch für große Hallenbauwerke mit bis zu 60 m Spannweite verwendet werden. Bögen eignen sich insbesondere als Stützkonstruktionen für Membranen, da sie durch ihre Geometrie eine Krümmung der Membranfläche vorgeben und so auch auf einfache Weise die Ausbildung doppelt gekrümmter Membranen ermöglichen.

Weitere Vorteile von Bogentragwerken sind ihre vielfältigen Entwicklungsmöglichkeiten als wandelbare Tragwerke, die von einfachen Drei- oder Viereck-Mechanismen, gelenkig verbundenen Elementketten und Scherensystemen bis hin zu luftgefüllten Bögen reichen. Hinzu kommt die Anwendungsmöglichkeit einer elastischen Verformung zur Herstellung einer Bogenform. Damit bieten sie eine ganze Reihe von Möglichkeiten, die Montage der Gesamtkonstruktion zu beschleunigen und auf schwere Hilfsmittel wie Mobilkräne und Hilfskonstruktionen wie Arbeitsgerüste zu verzichten.

Die Anwendungsmöglichkeiten mechanisch vorgespannter Membranen in Zusammenhang mit Bogenkonstruktionen sind variabel und reichen von der Funktion einer Hülle als sekundäres Tragelement bis hin zu einem für die Gesamtstabilität der Konstruktion verantwortlichen Teil des Primärtragwerks. Die einfache Wandelbarkeit der Membranen kann auf vielfältige Weise zur Vereinfachung der Montage beitragen, aber auch zur Ausbildung wandelbarer Dach- oder Wandelemente verwendet werden.





## 6 Konzept für ein mobiles Hallensystem

Anhand eines Konzeptes für ein mobiles Hallensystem mit 20 bis 40 m Spannweite wird das Potential eines wandelbaren Stütztragwerkes für eine Bogenkonstruktion mit einer doppelt gekrümmten Membran analysiert. Das streng modular aufgebaute System soll eine schnelle Montage ohne schwere Hebemittel und eine möglichst flexible Nutzung ermöglichen. Weiterhin werden durch eine Parameterstudie mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode die Möglichkeit untersucht, die Membran als ein aktives Element des Primärtragwerks für die Optimierung von Bogenkonstruktionen einzusetzen. Die Ergebnisse werden durch konzeptuelle Überlegungen zur Konstruktion, der Verwendung der Membran als wandelbares Dach- oder Wandelement und dem Montageablauf des Hallensystems ergänzt.

### 6.1 Kontext

Das Projekt wurde durch eine Anfrage der LTA (Lawn Tennis Association) und Charles Lawrence Sportsground Ltd. an die LSU angeregt. Beide Unternehmen suchten nach einer neuen preiswerten Lösung für eine mobile Überdachung von Sport- und Tennisanlagen. Die Überdachung sollte streng modular aufgebaut sein, um für verschiedene Anwendungen unterschiedlichste Spannweiten aus den gleichen Grundkomponenten erstellen zu können. Der Einsatz war vorwiegend für bestehende Sportanlagen geplant. Daraus ergaben sich für die Montage die Anforderung, die Konstruktion ohne schwere Hilfsmittel wie Mobilkräne und auf engstem Raum erstellen zu können. Beide Unternehmen verwendeten bis dahin zwei Systeme: Lufthallen und Rahmenhallen aus Aluminium-Strangpressprofilen der Firma WALU UK Ltd. Lufthallen wurden besonders im Tennissport seit den 70er Jahren in großer Anzahl als saisonale oder temporäre Überdachungen eingesetzt. Neben den im geschichtlichen Überblick (siehe Kapitel 3, S.85) beschriebenen statischen Problemen, führten vor allem Nutzungsprobleme wie die erschwerte Zugänglichkeit durch Luftschleusen, der fehlende Außenbezug, Vandalismusschäden und der Wunsch nach einer gestalterisch ansprechenderen Lösung zur Suche nach alternativen Systemen. Die Firma WALU UK Ltd. entwickelte daraufhin im Auftrag der LTA ein System von Rahmenhallen, die grundsätzlich die Konstruktionsweise der sogenannten Aluhallen verwendeten (siehe Kapitel 4, S.107), deren polygonförmiger Querschnitt jedoch den geometrischen Anforderungen der Nutzung als Tennishalle angepasst ist. Die Herstellung und Montage



Abb. 6-1. Verschiedene Tennishallen der Firma Walther UK Ltd. (46)

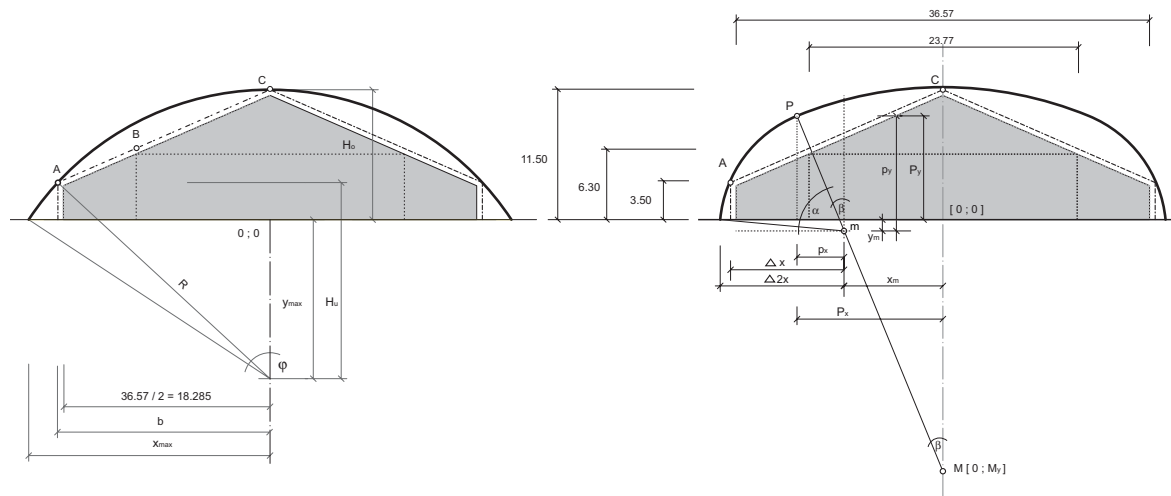


Abb. 6-2. Ermittlung von kreisbogen- und korbformen Hallenquerschnitten für das geforderte Lichtraumprofil einer Tennishalle - Punkt A, B und C

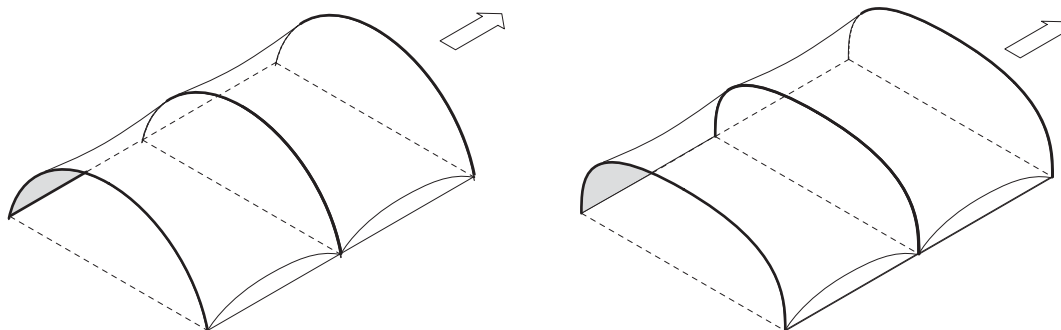


Abb. 6-3. Grundformen und Modularität des Hallensystems

dieser Rahmenhallen ist im Vergleich zu Lufthallen wesentlich aufwendiger. Die Montage des Primärtragwerks und das Anbringen der Membran erfordert schwere Hebewerkzeuge, Gerüste und Sicherungssysteme. Damit ist die Flexibilität der Anwendung des Systems stark eingeschränkt. Zudem begrenzt die erforderliche Gründung die Anwendbarkeit des Systems insbesondere für bestehende Anlagen. Das Erscheinungsbild der Hallen wird wie bei den Lufthallen als nicht befriedigend angesehen. Hinzu kommen auch hier Einschränkungen der Gebrauchseigenschaften durch die Geräuschentwicklung der bei starkem Wind flatternden Membran und die fehlende Möglichkeit, die Hallen durch ein Öffnen der Hülle unterschiedlichen klimatischen Bedingungen anzupassen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Anforderungen an das neue Hallensystem definieren:

- strenge Modularität des Gesamtsystems
- Realisierbarkeit von Hallen mit 20 bis 40 m Spannweite aus gleichen bzw. ähnlichen Grundkomponenten, die eine serielle Herstellung erlauben
- mögliche Standzeiten von wenigen Monaten bis zu einigen Jahren
- robustes Tragwerk, das den verschiedenen Standortbedingungen angepasst werden kann
- schneller und sicherer Montageprozess ohne schwere Hilfsmittel
- Montagemöglichkeit im Bestand, d.h. mit minimalem Platzbedarf
- deutliche Verbesserung des Erscheinungsbildes und der Gebrauchseigenschaften

### 6.2 Konzept

Das Konzept sieht eine Bogenkonstruktion vor, die aus Korb- oder Kreisbögen als Haupttragelemente und einer mechanisch vorgespannten doppelt gekrümmten Membran als Hülle und idealerweise als Teil des Primärtragwerks besteht. Das gesamte Tragwerk soll ein in sich geschlossenes statisches System bilden.

Die Wahl eines Bogentragwerks als Stützkonstruktion beruht auf seiner Effizienz als statisches System, den verschiedenen Möglichkeiten seiner Ausbildung als wandelbares Tragwerk und seinen guten konstruktiven und statischen Eigenschaften im Zusammenhang mit der Ausbildung doppelt gekrümmter Membranflächen.

#### 6.2.1 Form und Geometrie

Die Geometrie eines Bogentragwerks ergibt sich aus dem erforderlichen Lichtraumprofil und der weitgehenden Anpassung der Systemlinie des Bogens an die Stützlinie des dominanten Lastfalles, da bei einer Übereinstimmung von System- und Stützlinie eine reine Normalkraftbeanspruchung des Bogens gegeben ist. Für bestimmte Belastungsfälle ergeben sich verschiedene Stützlinien. Im Bereich der Leichtbaukonstruktionen spielt der Lastfall Eigengewicht keine dominierende Rolle. Maßgebend für den Entwurf und die Bemessung von leichten Bogenkonstruktionen sind in der Regel asymmetrische Lastkombinationen. Demnach entfällt der Vorteil, die Bogenform entsprechend der Stützlinie einer äußeren gleichmäßigen Belastung zu wählen.

Die Beanspruchung aus der Vorspannung eines versteifenden Seilsystems in Bogenebene bzw. durch die radial angreifende Komponente der Vorspannkkräfte der Membran bilden eine Möglichkeit der Definition eines solchen formbestimmenden Lastfalles. Aus der letzteren Belastung würde sich ein Kreisbogen als sinnvolle Bogengeometrie ergeben. In Bezug auf eine optimale Ausnutzung des Hallenquerschnitts ist dagegen die Geometrie eines Korbbogens günstiger. Abbildung 6-2 zeigt die geometrischen Randbedingungen und die Parameter (Seitenwand und Firsthöhe, Spielfeldbreite, Bewegungsraum) zur Erzeugung von Hallenquerschnitten, die sich z.B. aus einer Nutzung als Tennishalle ergeben. Der Kreisbogen besitzt wie schon erwähnt eine statisch günstigere Geometrie, erzeugt aber bei dem für die Firsthöhe erforderlichen großen Radius eine Spannweite, die über der notwendigen Hallenbreite liegt und durch den relativ flachen Verlauf kaum nutzbare Raumbereiche zum Auflager hin im Bereich der Fassade ausbildet. Beide Nachteile sind zwar bei einer Nutzung als Tennishalle vernachlässigbar, für andere mögliche Nutzungen einer mobilen Halle stellen aber ins-

besondere die nicht nutzbaren Seitenbereiche eine deutliche Einschränkung dar. Das zeigt die Vielzahl der aus statischer Sicht ungünstigeren Rahmen- bzw. Korbbogenkonstruktionen, die im Bereich seriell hergestellter mobiler Membranhallen im Einsatz sind (siehe Kapitel 4, S.105).

Um für das zu entwickelnde Hallensystem eine möglichst große Brandbreite an Nutzungen zu ermöglichen, werden im Folgenden zwei Bogengeometrien untersucht:

- Kreisbogensegment
- zweiteiliger Korbbogen<sup>1</sup>

Die sich aus diesen Querschnitten und den möglichen Grundrissen ergebenden Formen sind entsprechend der morphologischen Betrachtung offene Formen, die eine lineare Erweiterung erlauben.

### 6.2.2 Aufbauprozess und Wandelbarkeit

Aus den Anforderungen an das System ergeben sich für die Montage folgende entwurfsbestimmende Parameter:

- Verzicht auf eine Kranmontage und umfangreiche Hilfskonstruktionen wie Gerüste etc.
- Vormontage aller Elemente am Boden
- Minimierung des erforderlichen Montageplatzes
- Minimierung der notwendigen Arbeitskräfte und der erforderlichen Montagezeit

Zur Identifizierung potentieller Entwicklungsmöglichkeiten für den Aufbauprozess des Hallensystems werden die bestehenden Systeme von Bogenkonstruktionen entsprechend der in der Morphologie entwickelten Art und Weise dargestellt und verglichen (siehe Kapitel 5, S.188). Abbildung 6-4 auf Seite 202 zeigt die entsprechenden Darstellungen der existierenden Montagearten von Bogenkonstruktionen.

#### 6.2.2.1 Analyse bestehender Systeme

##### *Nichtwandelbare Bogentragwerke*

Der Aufbau der Mehrzahl der existierenden seriell hergestellten mobilen Bogenkonstruktionen erfordert eine Kranmontage. Der Aufbau erfolgt in einem schrittweisen additiven Prozess, der die dreidimensionale Konstruktion entstehen lässt (Typ1). Eine Errichtung durch die Rotation um die

---

1. Bogen der sich aus mehreren Kreissegmenten zusammensetzt

<b>Montagearten - Bogenkonstruktionen</b>			
	Montagevorgang		
	Type 1	Type 2	Type 3
<b>nichtwandelbare</b>			
<b>wandelbar</b>			
		<b>Type 4</b>	<b>Type 5</b>

Abb. 6-4. Varianten der Montage von Bogenkonstruktionen

---

Verbindungsachse der Fußpunkte mit Hilfe von Seilwinden, Hilfsstützen etc. ist ebenfalls eine häufig verwendete Methode für Konstruktionen mittlerer Spannweite bis ca. 20 m (Typ3). Für größere Spannweiten erfordert das wachsende Eigengewicht der Bögen wesentlich aufwendigere Hilfskonstruktionen, die die Montage deutlich verlangsamen. Ein grundsätzliches Problem beider Typen stellt die nachträgliche Montage erforderlicher weiterer Tragelemente wie Pfetten und Verbände dar, die erst nach dem Aufrichten der Bögen montiert werden können. Damit werden Arbeiten in großer Höhe erforderlich, die bei entsprechenden Elementgrößen erneut den Einsatz schwerer Hebewerkzeuge notwendig machen. Eine Lösung für dieses Problem stellt die Verwendung der Membran zur Stabilisierung der Bögen aus der Bogenebene heraus dar, die einen Verzicht auf Pfetten und Verbände ermöglicht. Ein Beispiel für diese Konstruktionsweise ist das System der Firma Spannbau (siehe Kapitel 4, S.129). Die dort erforderlichen Abspannungen lassen jedoch ein offenes statisches System entstehen, das in seiner Anwendbarkeit eingeschränkt ist. Das ähnliche Konstruktionssystem LVRE der Firma Abley (siehe Kapitel 4, S.123) vermeidet dies durch den Einsatz von liegenden Bögen als Fundamentbalken für die Endfelder. Für größere Spannweiten ist aber auch bei dieser Lösung zumindest eine zusätzliche Fixierung der Fundamentbalken durch Erdanker oder Ballastierung notwendig. Einen weiteren Nachteil stellt das verringerte Lichtraumprofil der Giebfelder dar, die z.B. im Falle einer Tennishalle kaum nutzbar sind. Für die gestellte Aufgabe erfüllt keine der Aufbaumöglichkeiten die notwendigen Anforderungen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes eines wandelbaren Tragwerks.

#### *Wandelbare Bogentragwerke*

Der Einsatz von wandelbaren Bogentragwerken erlaubt grundsätzlich die Errichtung der Stützkonstruktion in einem Schritt ohne den Einsatz schwerer Hebemittel. Die einzelnen Varianten wandelbarer Bogentragwerke unterscheiden sich jedoch stark in Montagezeit, Platzbedarf und den zur Errichtung notwendigen Hilfskonstruktionen.

Systeme, die Mechanismen ähnlich denen der sogenannten Pantadomes (siehe Kapitel 5, S.166) verwenden, erlauben eine Errichtung der Konstruktion auf ihrer späteren Grundfläche (Typ2). Die Bewegung des Systems während der Montage erfolgt durch ein vertikales Ziehen oder Drücken der inneren Gelenkpunkte. Der Nachteil dieser Konstruktionsweise ist der für größere Spannweiten steigende Aufwand an Hilfskonstruktionen, da nicht alle Elemente am Boden vormontiert werden können. Die Montage der Hülle kann erst nach dem Aufrichten erfolgen.

Das einfachste wandelbare Bogentragwerk, der Dreigelenkbogen, besitzt ähnliche Nachteile wie der Pantadome-Mechanismus. Gelenkig verbundene Elementketten dagegen können aufgrund ihrer Kleinteiligkeit komplett am Boden vormontiert werden, bevor sie durch eine Horizontalkraft, die die Fusspunkte zusammenzieht, aufgerichtet werden. Grundsätzlich erlaubt der Mechanismus eine schnelle Montage mit einfachen Hilfsmitteln. Das Zusammensetzen der Bögen aus kleinen Elementen ermöglicht die Realisierung verschiedener Spannweiten aus gleichen oder ähnlichen Grundelementen und bietet somit die Voraussetzung für eine serielle Herstellung der Elemente. Ein Nachteil dieser Systeme besteht in der Erfordernis relativ aufwendiger Knoten, die beim Erreichen der Endform der Elementkette ein Einrasten und Fixieren oder Selbstschließen, bzw. für die Demontage der Konstruktion ein möglichst selbsttätiges Öffnen erlauben.

Sowohl bei wandelbaren Bogenkonstruktionen mit Elementketten als auch bei elastisch verformten Bögen kann die Membran vor oder nach dem Errichten der Stützkonstruktion montiert werden. Entsprechend der morphologischen Darstellung sind beide Arten dem Montagetyp 4 zuzuordnen, d.h. die für die Montage erforderliche Fläche ist in Abhängigkeit von der Krümmung der Endform größer als die Grundfläche der errichteten Konstruktion.

Wandelbare Bogenkonstruktionen, die eine Längenveränderung der Elemente während der Errichtung erlauben, wie zum Beispiel das System BINISTAR (siehe Kapitel 5, S.169), vermeiden zwar dieses Problem, erfordern aber die Ausbildung aufwendiger selbstschließender Knoten, die manuell gesichert bzw. entsichert werden müssen. Grundsätzlich können diese System innerhalb der Grundfläche der Konstruktion aufgerichtet werden (Typ5).

Scherenmechanismen als wandelbare Bogenkonstruktionen bieten den Vorteil eines minimalen Platzbedarfs vor der Errichtung der Konstruktion (Typ6). Die Untersuchung der verschiedenen existierenden Systeme und Entwicklungen zeigt aber, dass Scherensysteme nur bei aufwendiger und sehr präziser Ausführung des Stabwerks und insbesondere der Knoten für weitgespannte Konstruktionen eingesetzt werden können. Sie bieten damit keine praxisnahe Lösung für die gestellte Aufgabe.

Luftgefüllte Bogenkonstruktionen erlauben eine Montage entsprechend Typ 4 und 5 und damit eine Reduzierung der erforderlichen Aufbaufläche. Auch in Hinblick auf Transportgewicht, Aufbauzeit und zum Aufbau notwendigen Hilfsmittel erfüllen sie die gestellten Anforderungen. Jedoch sind die Spannweiten dieser Systeme, selbst bei Anwendung der neuesten Hochdrucktechnologie, auf ca. 25



m begrenzt (siehe Kapitel 4, S.139). Zudem erfordern Hochdrucksysteme im Gegensatz zu den allgemein üblichen Niederdrucksystemen einen weitaus größeren permanente Energiebedarf für die Druckerzeugung, was für Standzeiten von mehreren Monaten oder Jahren nicht akzeptabel erscheint.

#### 6.2.2.2 Ein neues wandelbares Bogentragwerk

Die Analyse der bestehenden wandelbaren Bogenkonstruktionen zeigt, dass kein System die erforderlichen Bedingungen zufriedenstellend erfüllt. Insbesondere die Forderung nach einem sehr einfachen und robusten Mechanismus, der die Transformation einer möglichst flexibel einsetzbaren und leistungsfähigen Konstruktion erlaubt, führten zu der Grundidee eines neuen wandelbaren Bogentragwerks, welches die Möglichkeiten einer Elementkette nutzt, während des Aufrichtens elementweise biegesteif verbunden und dadurch versteift werden.

Der Einzelbogen besteht aus mehreren einzelnen Segmenten, deren Anzahl und geometrische Ausbildung sich aus der Spannweite und der Bogenform ergibt (Abb. 6-5). Die Krümmung des Bogens ergibt sich aus den Winkeln  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  der aufeinanderfolgenden Segmente. Während des Aufbauprozesses werden die einzelnen Segmente nacheinander verbunden und angehoben. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Ein neues Segment wird in Punkt A mit dem letzten Segment gelenkig verbunden. Dann werden die schon montierten Segmente in Punkt A vertikal angehoben, bis sich das neue Segment um den Winkel  $\beta + \gamma$  um Punkt A drehen kann und Punkt B die Position B' erreicht. Anschließend wird das neue Segment mit dem vorhergehenden Segment in Punkt B ebenfalls gelenkig verbunden. Die dadurch entstehende biegesteife Verbindung der Segmente erlaubt die Wiederholung des Prozesses, der mit dem Anfügen eines weiteren Segmentes in Punkt C' beginnt. Dieser sehr einfache Mechanismus zur Errichtung eines Bogens durch die Addition und Vertikalbewegung seiner Segmente weist folgende Vorteile auf:

- Bogenform, Segmentgröße und Ausbildung der Segmente sind weitgehend unabhängig vom Aufrichtungsvorgang
- das Aufrichten erfolgt durch eine Vertikalbewegung, die durch eine relativ geringe Kraft und über eine kurze Strecke erreicht werden kann
- die Montage kann innerhalb der Grundfläche der Konstruktion erfolgen (Typ5)
- alle Arbeiten können ebenerdig ausgeführt werden
- die Art und Weise der Membranmontage erfolgt weitgehend unabhängig von der Errichtung des wandelbaren Bogentragwerks

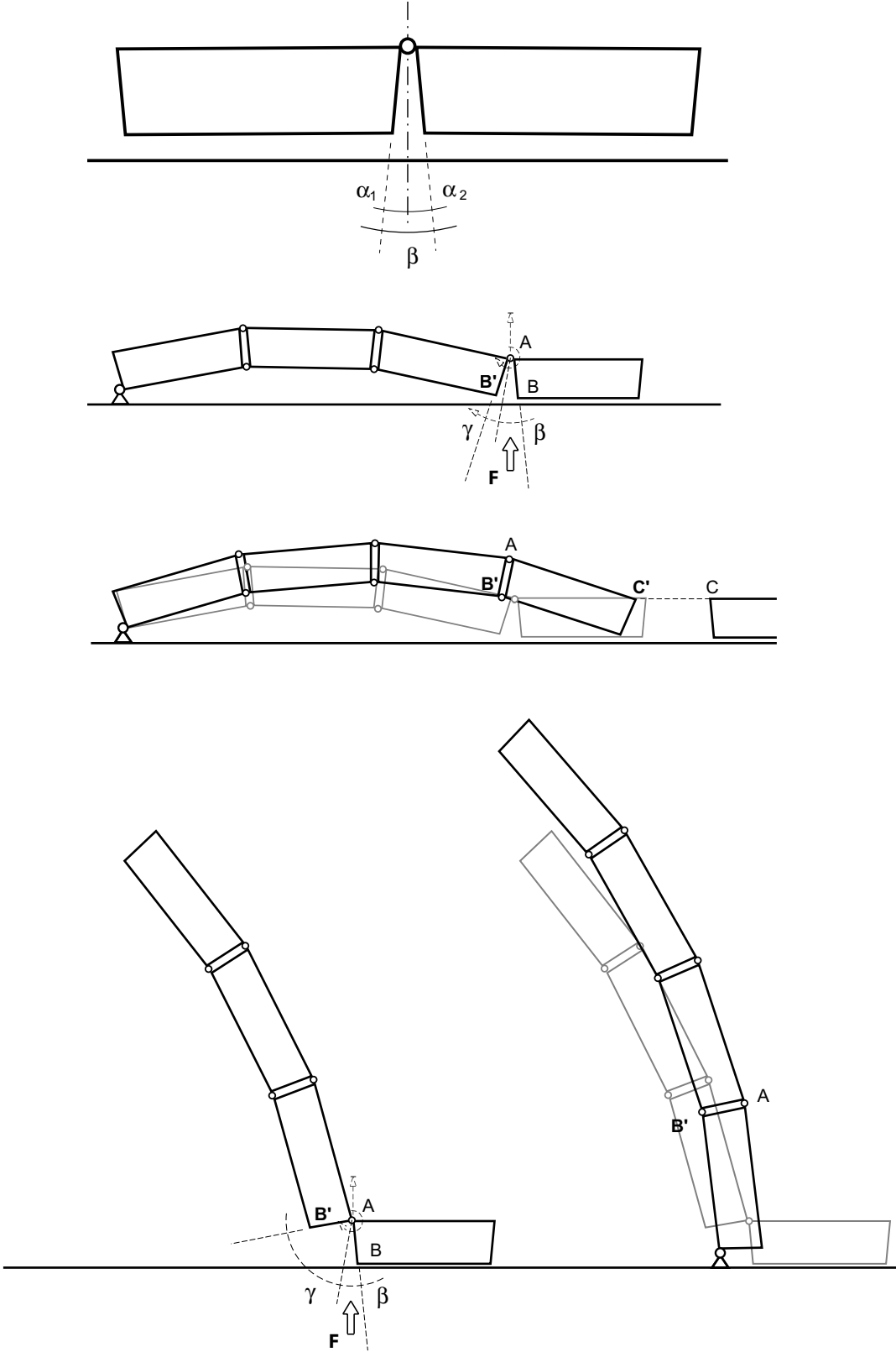
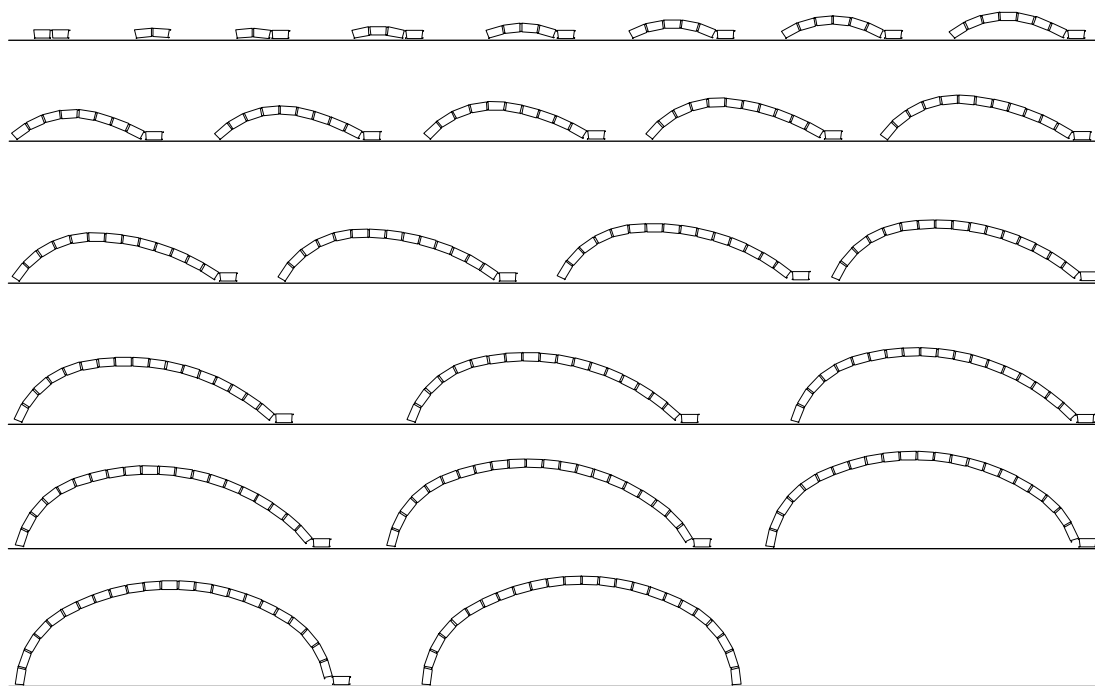
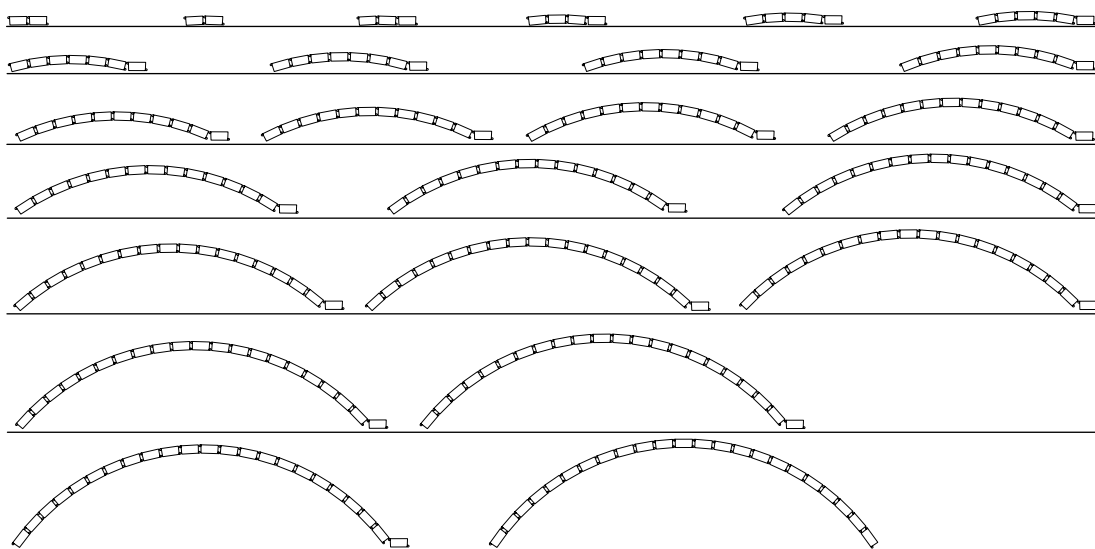


Abb. 6-5. Neuer Mechanismus zur Errichtung eines Bogentragwerks



Korbbogen



Kreisbogen

**Abb. 6-6.** Sequenzen der Errichtung eines Korb- und Kreisbogens mit Hilfe des neuen Mechanismus

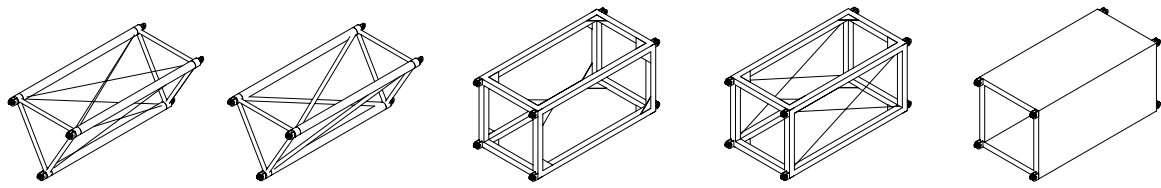


Abb. 6-7. Alternative Ausbildungsmöglichkeiten der Bogensegmente

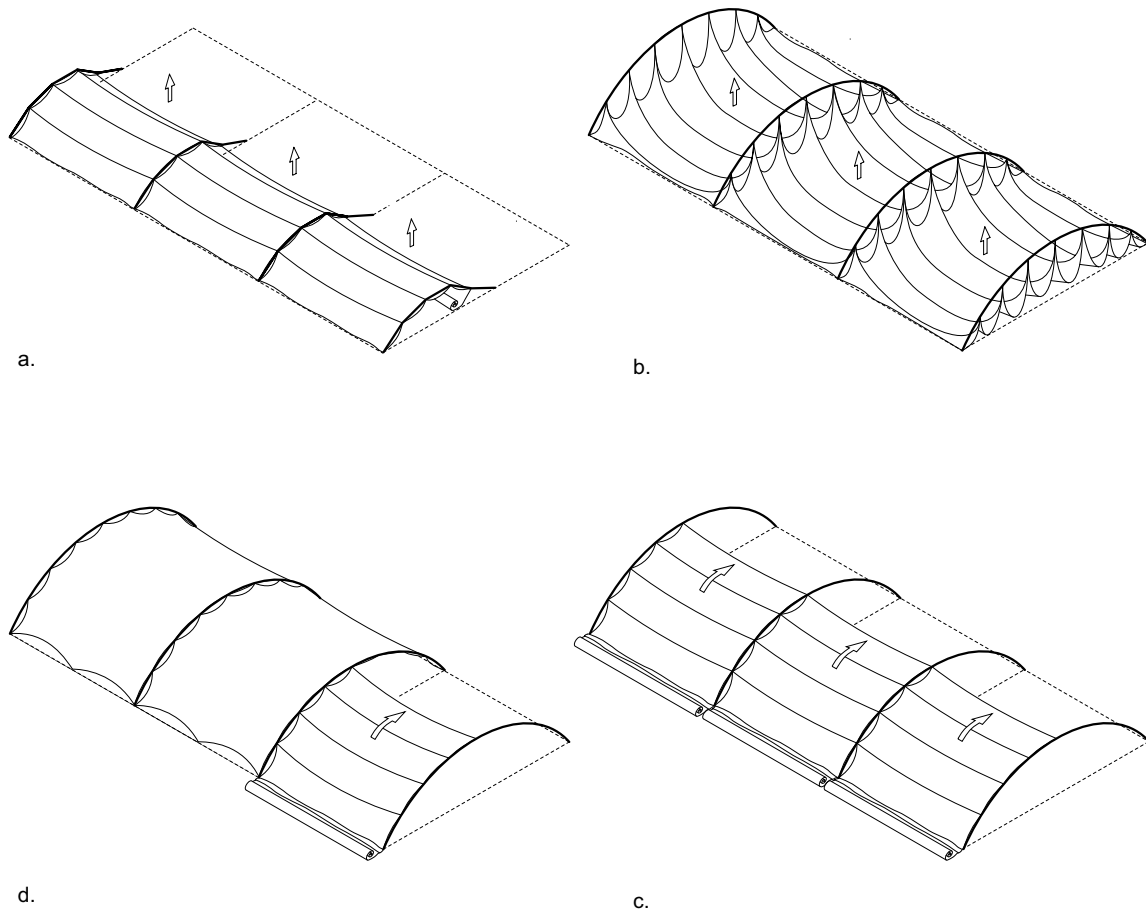


Abb. 6-8. Schematische Darstellung der Varianten der Membranmontage: a. gemeinsam mit dem wandelbaren Stütztragwerk, b. nach dem Errichten der Stützkonstruktion durch vertikales Hinaufziehen an einzelnen Punkten, c. nach dem Errichten der Stützkonstruktion durch ein Ziehen entlang der Bögen- feldweise, d. wie c. alle Felder gemeinsam

Die Abbildung 6-6 zeigt die Sequenzen der Errichtung eines Korb- und eines Kreisbogens mit Hilfe des neuen Mechanismus. Die verschiedenen Formen können durch die einfache Änderung der Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  erzeugt werden. Höhe, Länge und konstruktive Ausbildung der Segmente können entsprechend der Spannweite, der Belastung und der optimalen Herstellungsmöglichkeiten angepasst werden. Abbildung 6-7 zeigt einige mögliche Varianten.

Die Aufbauzeit des Systems unterscheidet sich aufgrund des elementweisen Anhebens wesentlich von Systemen, die durch die Bewegung einer ganzen Elementkette oder durch elastische Verformung die Formänderung des Bogens bewirken. Die längere Aufbauzeit ergibt jedoch in Relation zu den möglichen Spannweiten und den geplanten längeren Standzeiten keinen wesentlichen Nachteil.

Der Vorteil des neuen Mechanismus liegt in der weitgehenden Freiheit der weiteren Konstruktionsentwicklung von Bogensegmenten, der Fähigkeit, das gesamte System auf der späteren Grundfläche der Überdachung zu errichten und der Möglichkeit, auch Systeme mit höherem Eigengewicht durch eine relativ kleine Kraft zu bewegen.

#### 6.2.2.3 Membranmontage

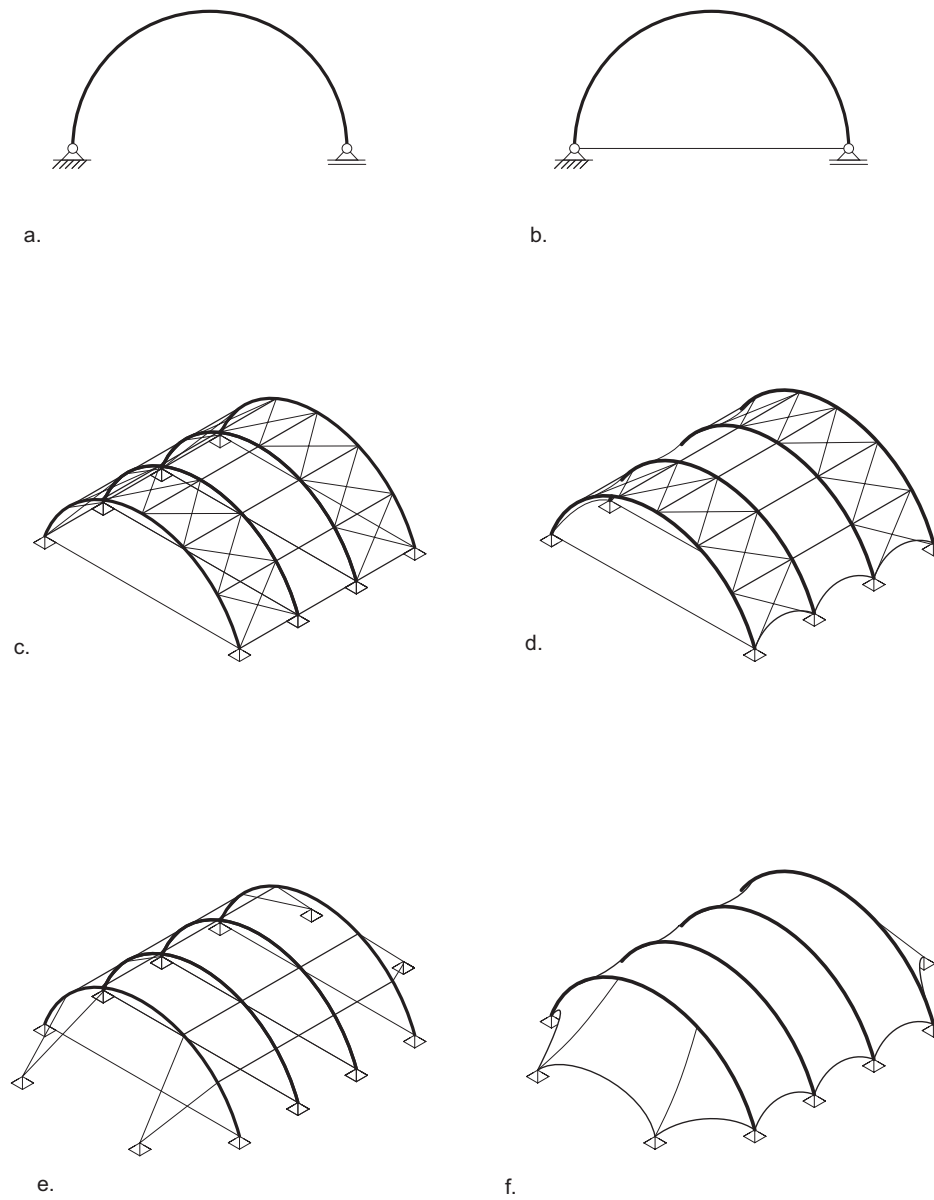
Das Aufbauprinzip der Bögen erlaubt ebenfalls verschiedene Alternativen der Montage der Membran, die sich in Bewegungsrichtung, Bewegungsvorgang und dem Montagezeitpunkt innerhalb der Montage der Gesamtkonstruktion unterscheiden. Abbildung 6-8 zeigt die vier grundlegenden Möglichkeiten:

##### *(a) Gemeinsame Montage mit der Stützkonstruktion - vertikale Bewegung*

Die Membran wird schrittweise entrollt und entfaltet, am gerade montierten Segment befestigt und im nächsten Aufbauschritt des Bogentragwerks gemeinsam mit diesem angehoben. Nach dem Aufrichten der Stützkonstruktion werden die Membranflächen über die kurzen Ränder vorgespannt und erhalten ihre doppelt gekrümmte Form. Diese Variante ermöglicht verschiedene Randausbildungen und räumliche Anordnung der Membranflächen zur Stützkonstruktion (siehe Kapitel 2, S.44).

##### *(b) Montage der Membran nach Errichtung der Stützkonstruktion - vertikale Bewegung*

Die Stützkonstruktion wird vollständig montiert und stabilisiert, die Teilflächen der Membran darunter ausgerollt und entfaltet und zu einer Membranfläche verbunden. Die Verbindungsränder der Teilflächen sind durch ein Gratseil verbunden, an dem die Gesamtfläche in einer vertikalen Bewegung durch Seilzüge angehoben und punktuell an den Bögen befestigt wird. Danach wird die Membran



**Abb. 6-9.** Statische Systeme: a. Stütztragwerk im Montagezustand, b. Stütztragwerk im Endzustand, c. Primärtragwerk ohne Membran, d. Primärtragwerk mit Membran, Stabilisierung der Bögen durch Seile, f. Stabilisierung der Bögen durch die Membran

---

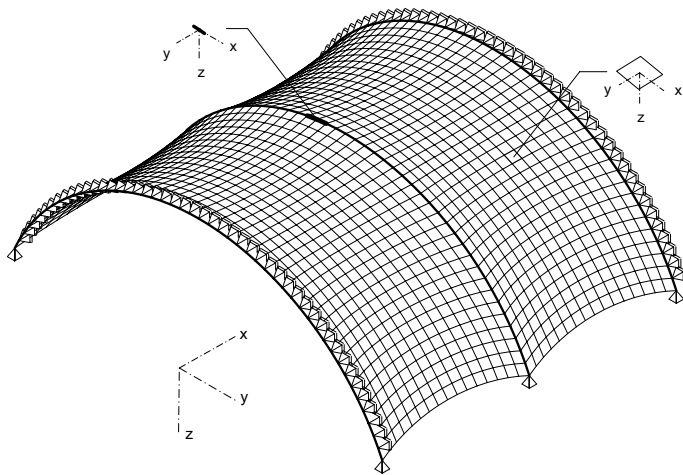
durch das Anspannen der kurzen Seitenränder vorgespannt. Diese Montagevariante erfordert einen weichen Rand der Membranfläche und ihre Anordnung unterhalb der Stützkonstruktion.

*(c) und (d) Montage der Membran nach Errichtung der Stützkonstruktion - zirkuläre Bewegung*

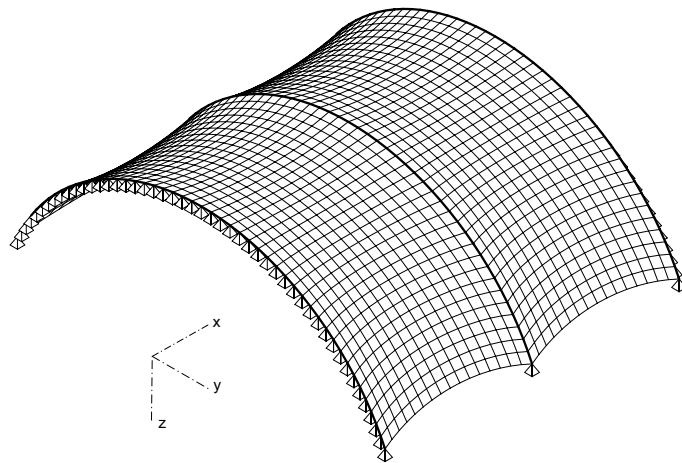
Die Stützkonstruktion wird ebenfalls vollständig montiert und stabilisiert. Danach erfolgt die Montage der Membran feldweise (c) oder als Gesamtfläche (d) durch eine zirkuläre Bewegung entlang der Stützkonstruktion. Der Bewegungsvorgang der Membran setzt sich aus Entrollen und Entfalten zusammen. Grundsätzlich sind für beide Varianten verschiedene Randausbildungen und Anordnungsmöglichkeiten der Membran gegenüber den Bögen denkbar.

### 6.2.3 Statisches System

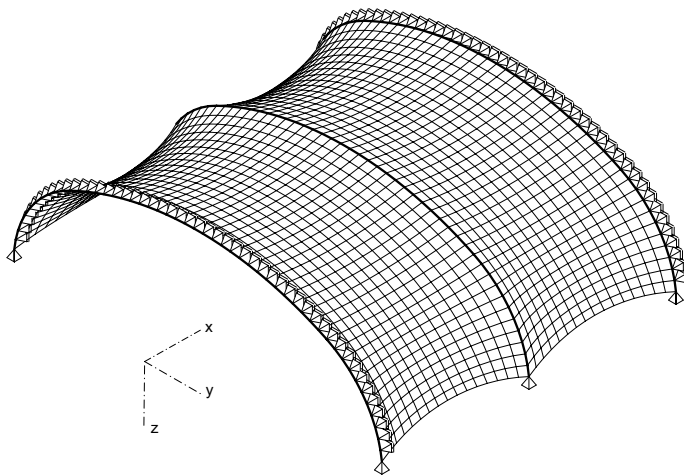
Während des Aufbauvorgangs besitzt das Tragwerk keine Bogentragwirkung. Das durch sein Eigengewicht belastete System entspricht dem eines gebogenen Einfeldträgers (a) (Abb. 6-9). Erst mit dem Abschluss der Formgebung und dem Hinzufügen eines zweiten vertikalen und horizontalen Auflagers wird aus dem System des Einfeldträgers das Tragsystem eines Zweigelenkbogens (b). Zur Stabilisierung der wandelbaren Tragelemente während der Formänderung sind Verbände (c) in Längsrichtung des Gesamtsystems notwendig. Sie werden während des Aufrichtens ebenfalls abschnittsweise hinzugefügt. Nach Abschluss der Formänderung bilden sie die Längsaussteifung des Bogentragwerks und ermöglichen zusammen mit der horizontalen Verbindung der Fußpunkte der Bögen die Ausbildung eines statisch in sich geschlossenen Primärtragwerks. Die Membran kann als sekundäres Tragsystem hinzugefügt bzw. aufgrund ihrer stabilisierenden Wirkung für die Bögen als Teil des Primärtragwerks verwendet werden (d). Falls die Standortbedingungen Abspannungen in Längsrichtung des Bauwerks erlauben, ist die Stabilisierung der wandelbaren Bögen während des Aufrichtens und der Membranmontage durch Seile möglich (e). Nach dem Vorspannen der Membran kann diese, bei Nachweis einer entsprechenden Redundanz des Gesamtsystems, als ein Teil des Primärtragwerks die Stabilisierung des Gesamtsystems übernehmen und damit den Verzicht auf Verbände ermöglichen (f).



**Abb. 6-10.** System A - Kreisbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert



**Abb. 6-11.** System B - Kreisbogen, Randbögen in x,y und z- Richtung fest gelagert



**Abb. 6-12.** System C - Korbbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert



### 6.3 Interaktion Membran und Bogentragwerk

Die Membran bietet die Möglichkeit, den Bogen sowohl in Bogenebene als auch senkrecht zur Bogenebene zu stabilisieren. Die Belastung, die ein Bogen durch die vorgespannte Membran erfährt, entspricht bei einem Kreisbogen annähernd einer Radiallast. Das bedeutet, dass diese annähernd geometrie-affine Belastung zwar eine Erhöhung der Normalbeanspruchung verursacht, jedoch keine nennenswerte Biegebeanspruchung. Dafür bietet die Membran die Möglichkeit, die Verformungen des Bogens in der Bogenebene zu reduzieren und ihn senkrecht zur Bogenebene federelastisch zu lagern. Die stabilisierende Wirkung einer Gewebemembran wird durch eine ganze Reihe von Parametern beeinflusst, wie z.B. Materialeigenschaften des Membranwerkstoffs, Randausbildung der Membran, Vorspannungsniveau der Membran und Membranform. Die Ergebnisse einer Vorstudie [2] bestätigten die Annahme der wirksamen Stabilisierung von Bögen durch eine mechanisch vorgespannte Membran senkrecht zur Bogenebene. Die Geometrie des Bogens (Kreissegment- oder Korbogen) oder die Form der Membran hat dabei nur einen geringfügigen Einfluss. Das Ziel der folgenden Untersuchung ist eine Prüfung der Auswirkung der Bogen- und Membranform auf die stabilisierende Wirkung für ein Bogentragwerk in Bogenebene.

#### 6.3.1 Untersuchte Tragsysteme

Für die Untersuchungen wird ein einfaches Bogentragwerk bestehend aus drei gelenkig gelagerten Bögen mit einer Spannweite von 20 m und einem Achsabstand von 8.0 m verwendet. Ziel der Vereinfachung ist, die Anzahl der Einflussgrößen auf die Systeme so gering wie möglich zu halten. Das erste System (System A) besteht aus Kreisbögen und zwei dazwischenliegenden Membranfeldern (Abb. 6-10). Der Radius der Kreisbögen beträgt 11.0 m, der Stich 6.42 m. Die Membran greift in der Schwerachse der Bögen an. Die äußeren Bögen werden senkrecht zur Bogenebene unverschieblich gehalten. Das zweite System (System B) ist identisch mit dem ersten System bis auf die in alle Richtungen unverschieblichen Lagerung der Randbögen (Abb. 6-11). Das dritte untersuchte System (System C) unterscheidet sich von System A nur in der Bogengeometrie (Abb. 6-12). Der gewählte Korbogen setzt sich aus zwei Radien von 5.4 m und 16 m zusammen (Abb. 6-13).

#### 6.3.2 Numerische Modellierung

Alle Berechnungen werden mit dem Modul ASE des FEM-Programms SOFISTIK durchgeführt. Die Berechnung erfolgt nach der nichtlinearen Theorie (Theorie III. Ordnung) und berücksichtigt nur geometrisch nichtlineare Effekte. Es wird ein lineares Materialverhalten angenommen. Das Gleichungssystem wird iterativ mit Hilfe des Newton-Verfahrens gelöst (siehe Kapitel 2, S.19). Nach

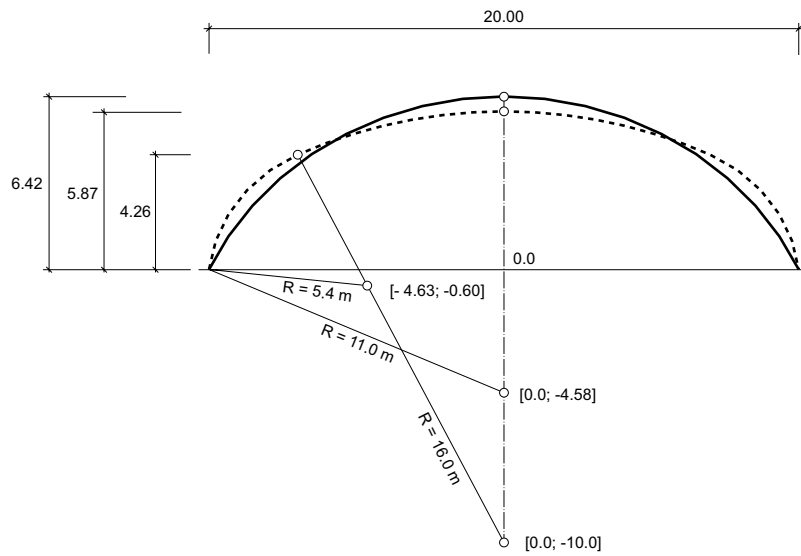


Abb. 6-13. Bogengeometrien: Kreissegment und Korbbogen

Querschnittsbezeichnung Querschnittswerte	E- Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	G- Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Geometrie
Bogen $A = 116\text{cm}^2$ $I_y = 24360\text{cm}^4$ $I_z = 8199\text{cm}^4$ $\gamma = 80\text{KN/m}^3$	200 000  40 000  8000	80 000  16 000  3200	
Randseil $A = 3,14\text{cm}^2$ $\gamma = 80\text{KN/m}^3$	170 000		
Membran $d = 1\text{ mm}$ $\gamma = 11\text{KN/m}^3$	$E_K = 1500$ $E_S = 1000$	$G = 50$	

Tabelle 6-1. Querschnitts- und Materialwerte für die Parameterstudie

jedem Iterationsschritt werden neue Verschiebungen und daraus resultierende Knotenlasten ermittelt. Diese Knotenlasten der Elemente müssen mit den sich aus den Lasten der äußeren Knotenkräfte im Gleichgewicht stehen. Im Falle eines nicht vorhandenen Gleichgewichts werden die Differenzkräfte (Restkräfte) berechnet und im nächsten Iterationsschritt als Zusatzbelastung aufgebracht.

Die Bögen werden mit Balkenelementen, die Membran mit Flächenelementen und die weichen Ränder als Seile, die nur Zugkräfte aufnehmen können, modelliert. Die Formfindung erfolgt unter der Berücksichtigung des Eigengewichts und der gewählten Vorspannwerte in der Membran und den Randseilen. Die Krümmung der Randseile bzw. ihre Länge wird für eine vorgegebene Vorspannkraft im Formfindungsprozess ermittelt. Die Vorspannkraft wird über den Krümmungsradius der Ausgangsgeometrie des Randseils und der orthogonal dazu angreifenden Vorspannung in der Membran  $V_y$  ermittelt:

$$V_{\text{Seil}} = V_x \cdot R_{\text{Seil}} \quad (6-1.)$$

Die Steifigkeiten aller Tragelemente werden im Lastfall Formfindung berücksichtigt und die resultierenden Spannungen für die weiteren Berechnungen als Primärlastfall angesetzt.

### 6.3.3 Materialkennwerte

Das in SOFISTIK implementierte Membranelement wird durch ein orthotropes, linear-elastisches Materialgesetz beschrieben, welches auf dem Werkstoffgesetz von Münsch und Reinhardt beruht (siehe Kapitel 2, S.37). Damit können die verschiedenen E-Moduli in Kett- und Schussrichtung berücksichtigt werden. Aufgrund der erforderlichen Symmetriebedingungen im Materialgesetz ist jedoch nur eine Querdehnzahl  $\mu_{KS}$  bezogen auf  $E_K$  wählbar. [60]

Für die Membran werden folgende Materialwerte verwendet: E-Modul in Kettrichtung  $E_K = 1500$  KN/m, E-Modul in Schussrichtung  $E_S = 1000$  KN/m, Schubmodul  $G = 50$  KN/m, Querdehnzahl  $\mu_{KS} = 0.25$ . Die Werte entsprechen in etwa den Steifigkeiten eines PTFE-beschichteten Glasfasergewebes. Obwohl dieser Werkstoff für mobile Membrankonstruktionen nicht geeignet ist, werden die Werte vor allem wegen des für die Stabilisierung der Bögen interessanten hohen Schubmoduls des Werkstoffes verwendet, um eine grundlegende Beurteilung der Effekte zu ermöglichen. Als Bogenquerschnitt wird ein Rechteckhohlprofil 400 mm x 200 mm mit einer Wanddicke von 10 mm und drei verschiedenen Kombinationen von E- und G-Modulen, bei konstanter Wichte gewählt. Um einen realistischen Bezug herzustellen, werden für die Werte der ersten Kombination Größen annähernd dem Material Stahl verwendet.

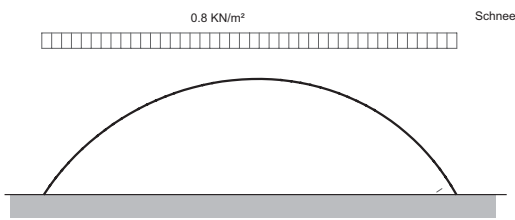


Abb. 6-14. symmetrische Schneelast - LF Vorstudie

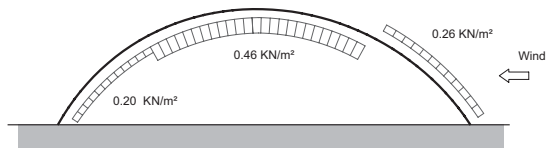


Abb. 6-15. Windlast - LF Vorstudie

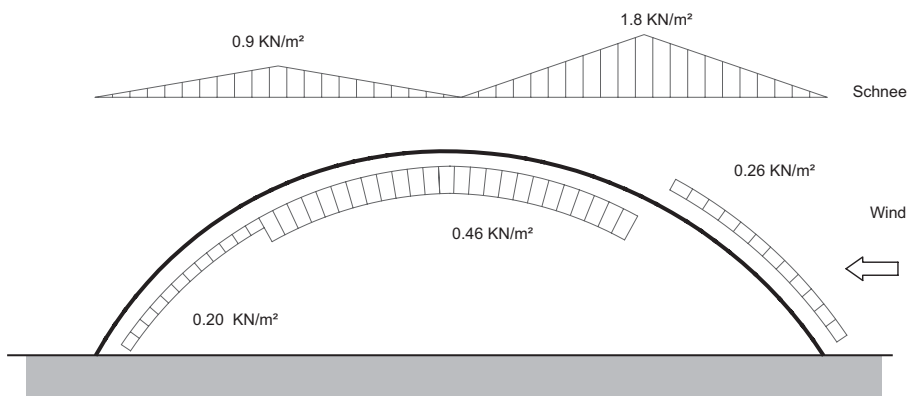


Abb. 6-16. Maßgebende Lastkombination für die Untersuchung (Programm intern wird die Schneelast auf die globale z-Richtung und die Windlast auf die lokale z-Richtung der Flächenelemente bezogen)

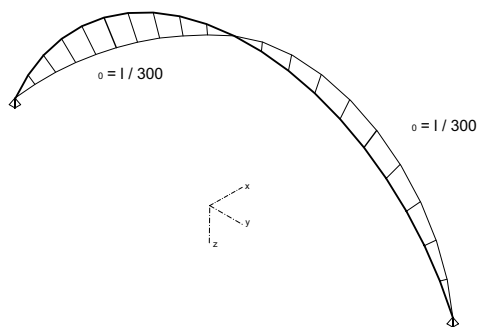


Abb. 6-17. geometrische Ersatzimperfectionen in der Bogenebene nach DIN 18800-2

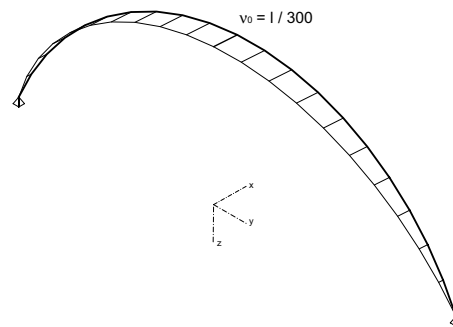


Abb. 6-18. geometrische Ersatzimperfectionen aus der Bogenebene nach DIN 18800-2

### 6.3.4 Lastannahmen

#### *Äußere Lasten*

Die Lastannahmen für Wind und Schnee sind dem Eurocode 1 entnommen. In der eingangs erwähnten Vorstudie wurden für ein vergleichbares System drei Lastfälle untersucht:

- eine symmetrische Schneelast (Abb. 6-14)
- Windlast - orthogonale Anströmung in globaler y- Richtung (Abb. 6-15)
- Überlagerung aus asymmetrischer Schneelast und Windlast (Abb. 6-16)

Der dritte Lastfall stellte sich gegenüber den beiden anderen Lastfällen als maßgebend für den Kreisbogen heraus. Er wird deshalb für die folgende Untersuchung verwendet. Auf die Betrachtung weiterer Lastfälle oder Lastfallgruppen aus äußeren Lasten wird verzichtet.

#### *Vorverformung*

Der Einfluss einer Vorverformung in Bogenebene bzw. senkrecht zur Bogenebene auf die Erhöhung der Schnittgrößen wurde ebenfalls in der oben genannten Vorstudie untersucht. Für die geometrischen Ersatzimperfektionen wurden die Werte der DIN Norm 18800-2 verwendet (Abb. 6-17), (Abb. 6-18). Traglastuntersuchungen für die oben beschriebenen Lastfälle zeigten, dass der Bogen immer in Bogenebene versagt. Dies ist damit zu erklären, dass der Bogen senkrecht zur Bogenebene nur durch die Imperfektion mit Biegung belastet wird (Mz). Zudem bewirkt die Vorspannung in der Membran, dass der Bogen zurück in eine nahezu „perfekte“ Ausgangslage gezogen wird. Vorverformungen in Bogenebene beeinflussen die Traglast, aber nicht das grundsätzliche Tragverhalten der Bögen bei asymmetrischen Belastungen.

Daraus ergibt sich, dass für die qualitative Betrachtung der aussteifenden Wirkung der Membran bzw. der Membranform für die asymmetrische gewählte Belastung die Berücksichtigung von Vorverformung nicht notwendig sind. Die Berechnungen werden deshalb am perfekten System durchgeführt.

#### *Untersuchte Lastkombination*

Die untersuchte Lastkombination besteht aus folgenden Lastfällen bzw. Lastgruppen:

- LF1 - Formfindung (Vorspannung und Eigengewicht)
- LF2 - asymmetrische Schneelast und Windlast

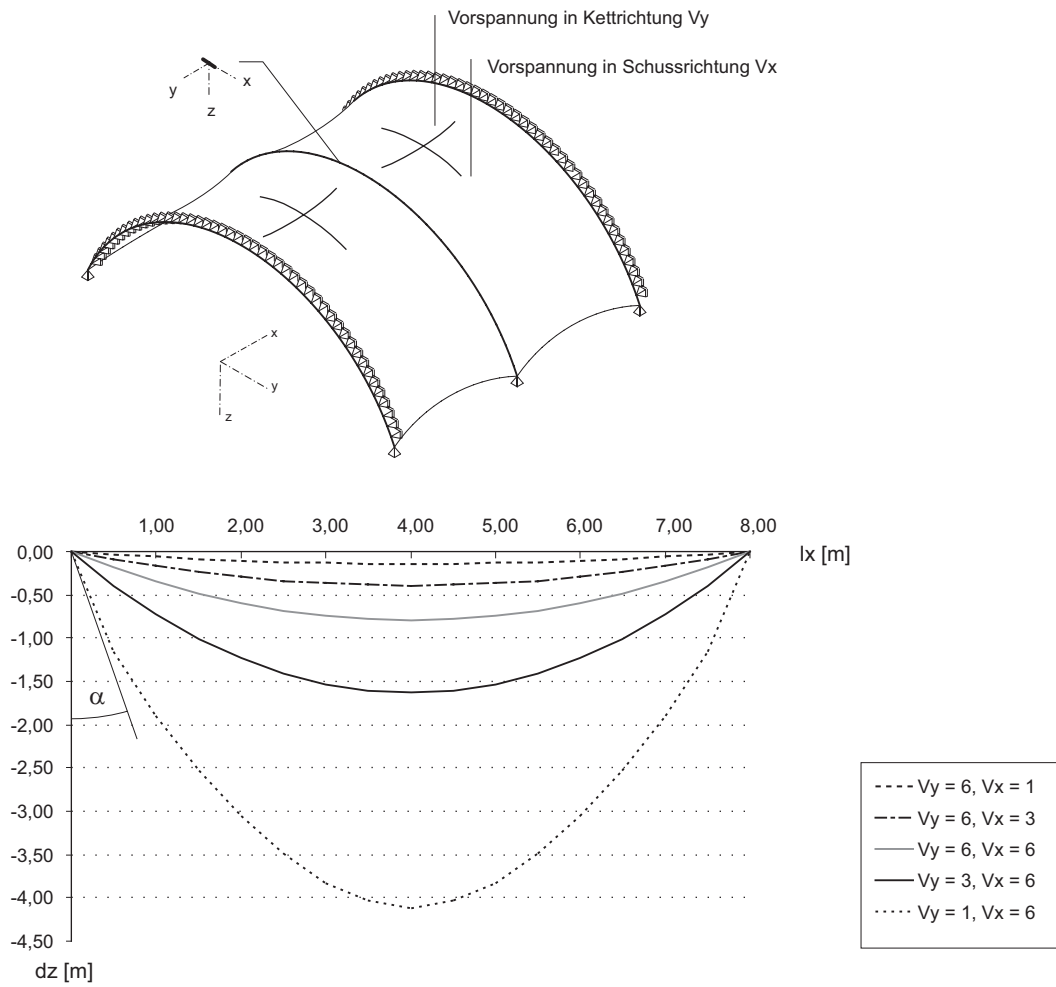


Abb. 6-19. Membranform in Kettrichtung in Abhängigkeit des Vorspannungsverhältnisses - System A

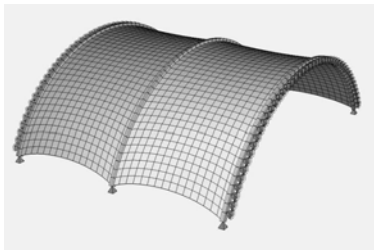


Abb. 6-20.  $V_y = 6, V_x = 1$

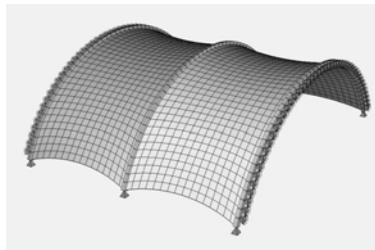


Abb. 6-21.  $V_y = 6, V_x = 3$

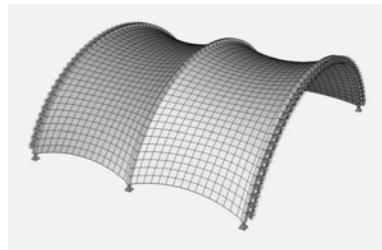


Abb. 6-22.  $V_y = 6, V_x = 6$

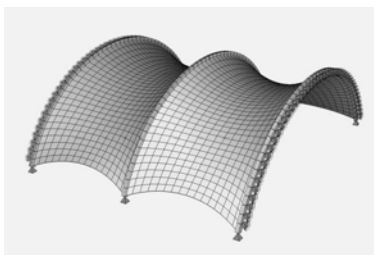


Abb. 6-23.  $V_y = 3, V_x = 6$

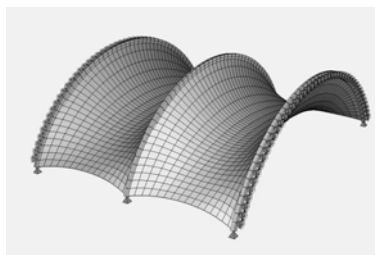


Abb. 6-24.  $V_y = 1, V_x = 6$

Die Überlagerung beider Lastfälle entsteht durch das Ansetzen des Lastfalles Formfindung als Primärlastfall für den Lastfall 2. Die veränderte Geometrie und die resultierenden Spannungen aus LF1 werden so übernommen.

### 6.3.5 Parameter der Untersuchung

#### *Steifigkeit*

Da das Modell ein statisch unbestimmtes System bildet, richtet sich der Kraftfluss nach den Steifigkeiten der einzelnen Elemente. Wird die Steifigkeit des Bogens verändert, so ändert sich auch der Kraftfluss im Tragsystem. Je geringer die Steifigkeit des Bogens ist, desto größer wird die stabilisierende Wirkung der Membran für den Bogen. Zur Abschätzung dieses Einflusses sollen in den folgenden Berechnungen die Steifigkeiten der Bögen variiert werden. Bei gleichbleibender Querschnittsgeometrie werden drei verschiedene fiktive Kombinationen von Elastizitäts- und Schubmodulen gewählt. (Tabelle 6-1)

#### *Vorspannung*

Der zweite veränderbare Parameter ist die Vorspannung in der Membran. Innerhalb der Formfindung stellt sich die Geometrie der Membran in Abhängigkeit von der vorgegebenen orthotropen Vorspannung ein. Für verschiedene Vorspannungsverhältnisse ergeben sich sowohl unterschiedliche Beanspruchungen für den Bogen als auch unterschiedliche Anschlusswinkel der Membran an die Bögen. Die Kettrichtung der Membran ist senkrecht zur Bogenebene gewählt (globale x- Richtung), die Schussrichtung entsprechend parallel zur Bogenebene (globale y-Richtung). Die Vorspannwerte variieren in beide Richtungen zwischen 1 KN/m und 6 KN/m.

#### *Auswertung*

Für die Einschätzung der aussteifenden Wirkung der Membran wurden als Kriterien die Schnittgrößen und Verformungen des mittleren Bogens für den Lastfall Vorspannung und den kritischen Lastfall mit 1.0-fachen Lasten beobachtet.

Eine Traglaststeigerung ist zur Beurteilung weniger aussagekräftig, da die Membran hohen Verformungen unterliegt und sich damit die Anschlusswinkel der Membran an den Bogen ändern. Zum Anderen ergeben sich bei der iterativen Gleichungslösung des Programms Probleme durch die in der Membran entstehenden Falten. Grundsätzlich besitzen alle Systeme in Bezug auf ein Spannungsversagen der Tragelemente ausreichende Tragreserven.

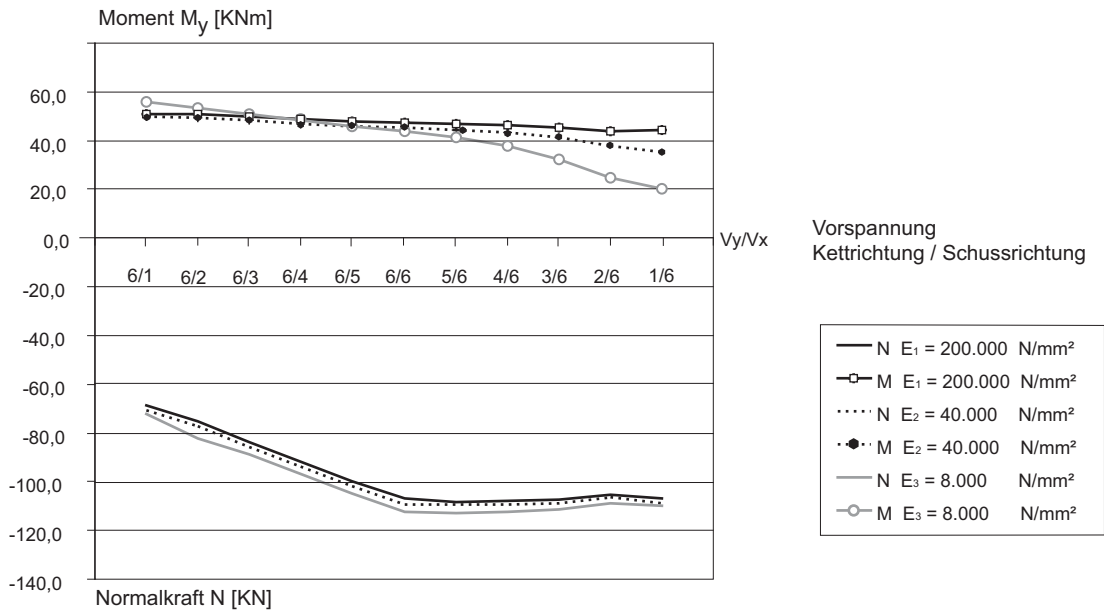


Abb. 6-25. System A - Änderung von max. Normalkraft - und Momentenbelastung in Abhängigkeit veränderter Vorspannungsverhältnisse für drei verschiedene Steifigkeiten des Kreisbogens, Darstellung der Schnittgrößenverläufe siehe Anhang B (siehe S.354)

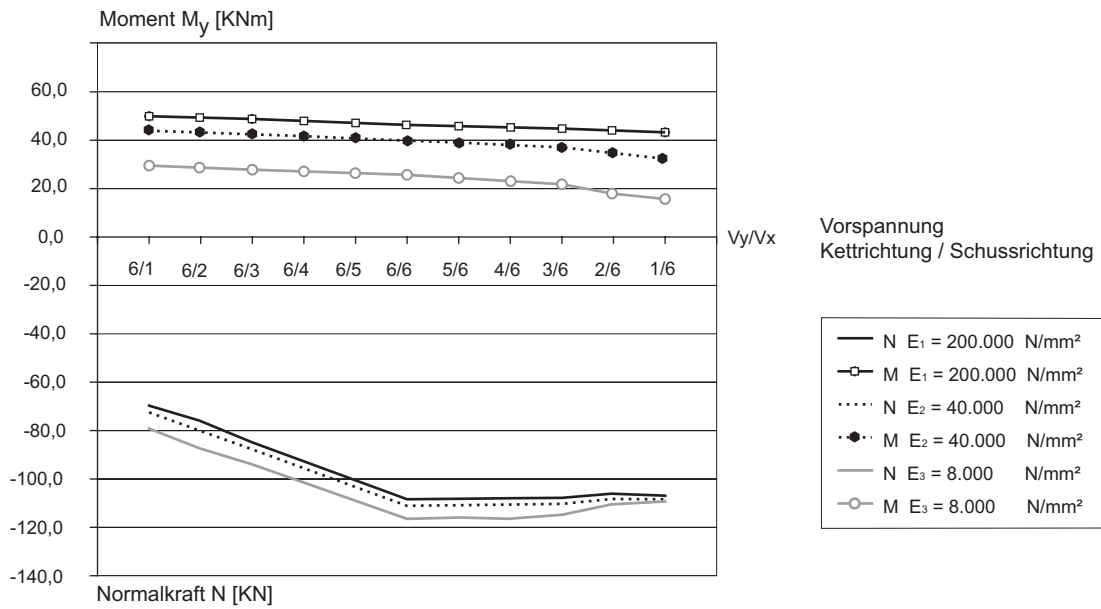


Abb. 6-26. System B - Änderung von max. Normalkraft - und Momentenbelastung in Abhängigkeit veränderter Vorspannungsverhältnisse für drei verschiedene Steifigkeiten des Kreisbogens, Darstellung der Schnittgrößenverläufe siehe Anhang B (siehe S.360)



### 6.3.6 Ergebnisse System A - Kreisbogen

Der horizontale Anteil der Vorspannung in Kettrichtung  $V_y$  wird bei dem System über die horizontalen Auflager an den beiden Endbögen abgetragen. Der relativ geringe vertikale Anteil der Vorspannung belastet die Bögen nur wenig. Demgegenüber verursacht die Vorspannung in Schussrichtung  $V_x$  eine wesentlich größere Belastung der Bögen. Wird die Vorspannung in Schussrichtung erhöht, so nehmen auch die Normalkräfte im Bogen deutlich zu. Mit abnehmendem Vorspannungsverhältnis  $V_y/V_x$  nimmt der Winkel  $\alpha$  zwischen Bogenebene und Membran ab (Abb. 6-19), so dass der Bogen zunehmend in Bogenebene beeinflusst wird. Die weitgehend gleichmäßige Belastung des Bogens durch die Vorspannung der Membran erzeugt fast ausschließlich eine Normalkraftbeanspruchung des Bogens.

Für die betrachtete Lastkombination ergibt sich bei allen Steifigkeiten eine starke Zunahme der Normalkräfte für ein verändertes Vorspannungsverhältnis im Bereich  $0,6 \leq V_y/V_x \leq 1$ . Ursache ist die Erhöhung der Vorspannung in Schussrichtung gegenüber der Vorspannung in Kettrichtung. Die Abnahme der Biegemomente  $M_y$  in diesem Bereich ist unabhängig von der Steifigkeit sehr gering. Für veränderte Vorspannungsverhältnisse im Bereich  $1 \geq V_y/V_x \geq 0,16$  verhalten sich die Normalkräfte nahezu konstant. Die Biegemomente  $M_y$  werden mit abnehmender Steifigkeit reduziert. Auffällig ist die starke Abnahme der Biegemomente für das System mit der geringsten Steifigkeit ( $E_3$ ). Das bedeutet, dass durch die Membran Rückstellkräfte wirksam werden, die mit kleiner werdendem Winkel  $\alpha$  zwischen Membran und Bogenebene ansteigen. Je geringer die Steifigkeit des Bogens, um so mehr können die Biegemomente im Bogen durch die Membran reduziert werden (Abb. 6-25). Die Beträge der Maximalwerte der Biegebelastung ergeben sich in allen untersuchten Fällen an annähernd derselben Stelle (Abb. 6-27).

Die Unterschiede der Maximalwerte der Normalkräfte im Mittelbogen erklären sich aus der Veränderung der Normalkraftverteilung bei abnehmender Steifigkeit infolge größerer Verformungen des Bogens. Die Normalkräfte nehmen auf der Seite mit der größeren Belastung zum Auflager hin zu (Abb. 6-27).

Insgesamt ist die Reduktion der Biegebelastung des Mittelbogens durch die Membran geringer als erwartet. Eine Ursache sind die Verformungen der Membran unter Last, eine zweite die gemeinsame Verschiebungen der Randbögen und des Mittelbogens in Bogenebene. Beide Effekte führen zu relativ geringen Rückstellkräften aus der Membran auf den Bogen.

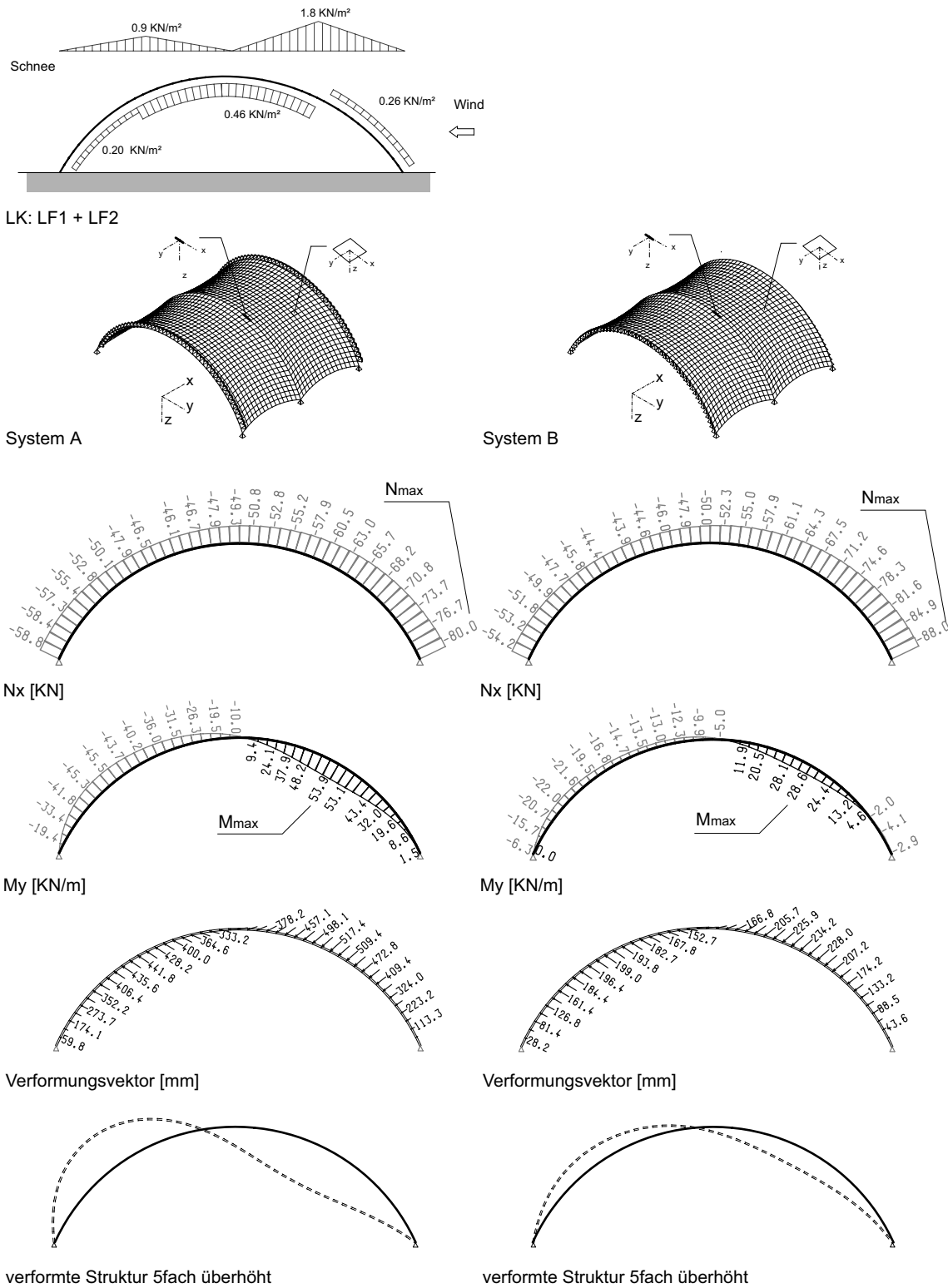


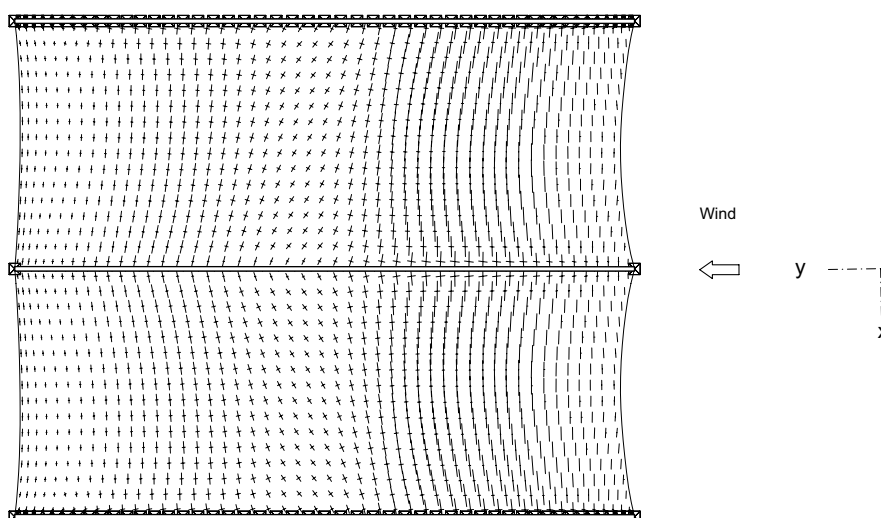
Abb. 6-27. Beispielhafte Darstellung von Normalkraft  $N_x$ , Biegemoment  $M_y$  und der Verformung des Mittelbogens für System A und System B, Vorspannungsverhältnis  $V_y/V_x = 6/2$ , E-Modul = 8 000 N//mm<sup>2</sup>

### 6.3.7 System B - Kreisbogen

Im System B wird der Effekt der gemeinsamen Verschiebung der Randbögen mit dem Mittelbogen unter Last vermieden. Die horizontalen Auflager der Randbögen werden durch in alle drei Richtungen unverschiebliche Auflager ersetzt. Die Analyse des Systems zeigt eine Verbesserung der Stabilisierung des mittleren Bogens für alle untersuchten Fälle (Abb. 6-26). Bei einer Steifigkeit von  $200.000 \text{ KN/m}^2$  reduziert sich der maximale Betrag des Biegemomentes  $M_y$  des Systems A gegenüber System B um etwa 2-3 %, bei einem E-Modul von  $40.000 \text{ KN/m}^2$  um 10-12 % und bei einem E-Modul von  $8.000 \text{ KN/m}^2$  um bis zu 47 %. Ursache hierfür ist die Wirkung der Membran als Zugband zwischen den festen Randauflagern, die das Ausweichen des Mittelbogens stärker verhindert (Abb. 6-28).

Im Gegensatz zu System A beeinflusst die Änderung der Steifigkeit die Reduktion der Biegebeanspruchung wesentlich stärker. So reduziert sich für das Vorspannungsverhältnis  $V_y/V_x = 6$  der maximale Betrag des Biegemomentes  $M_y$  für das System B mit einer Steifigkeit von  $200.000 \text{ N/mm}^2$  von  $49,7 \text{ KNm}$  um etwa 41 % auf  $29,5 \text{ KNm}$ . Für das System A lag der Wert für eine Steifigkeit von  $200.000 \text{ N/mm}^2$  mit  $49,7 \text{ KNm}$  etwa um 9 % niedriger als für das System mit einer Steifigkeit von  $8.000 \text{ N/mm}^2$  mit  $55,9 \text{ KNm}$ .

Baupraktisch kann die verbesserte Stabilisierung des Bogens durch die Membran jedoch für die zu entwickelnde Bogenhallen nicht genutzt werden. Durch die erforderliche Aneinanderreihung mehrerer Bögen, lassen sich keine unverschieblich gehaltenen Ränder für die Membranfelder realisieren.



**Abb. 6-28.** Spannungstrajektorien, System B Lastfall 1+2, Verformung 3fach überhöht, Aufsicht

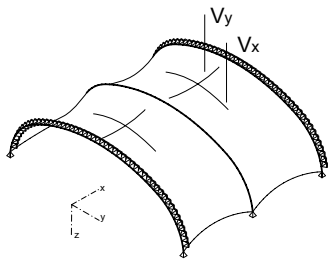


Abb. 6-29. System C

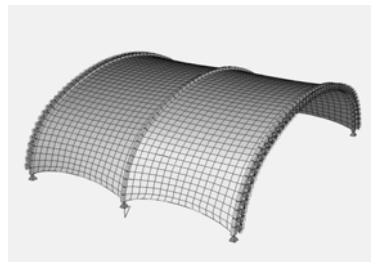


Abb. 6-30.  $V_y = 6, V_x = 1$

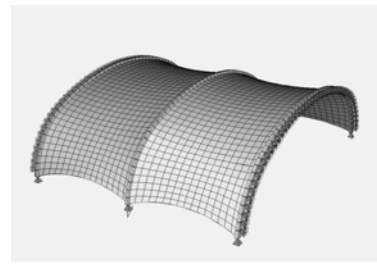


Abb. 6-31.  $V_y = 6, V_x = 3$

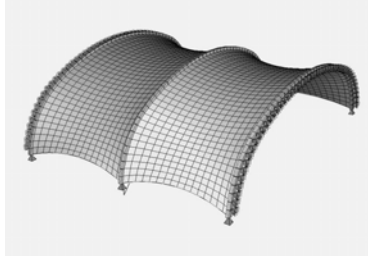


Abb. 6-32.  $V_y = 6, V_x = 6$

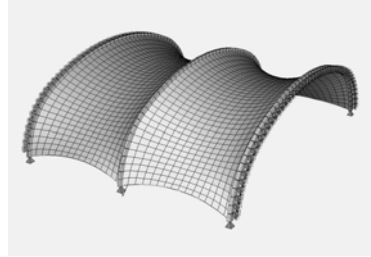


Abb. 6-33.  $V_y = 3, V_x = 6$

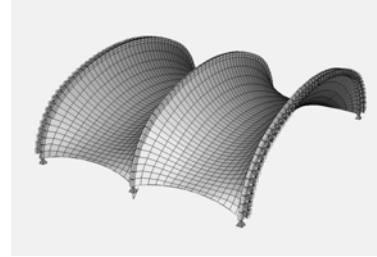


Abb. 6-34.  $V_y = 1, V_x = 6$

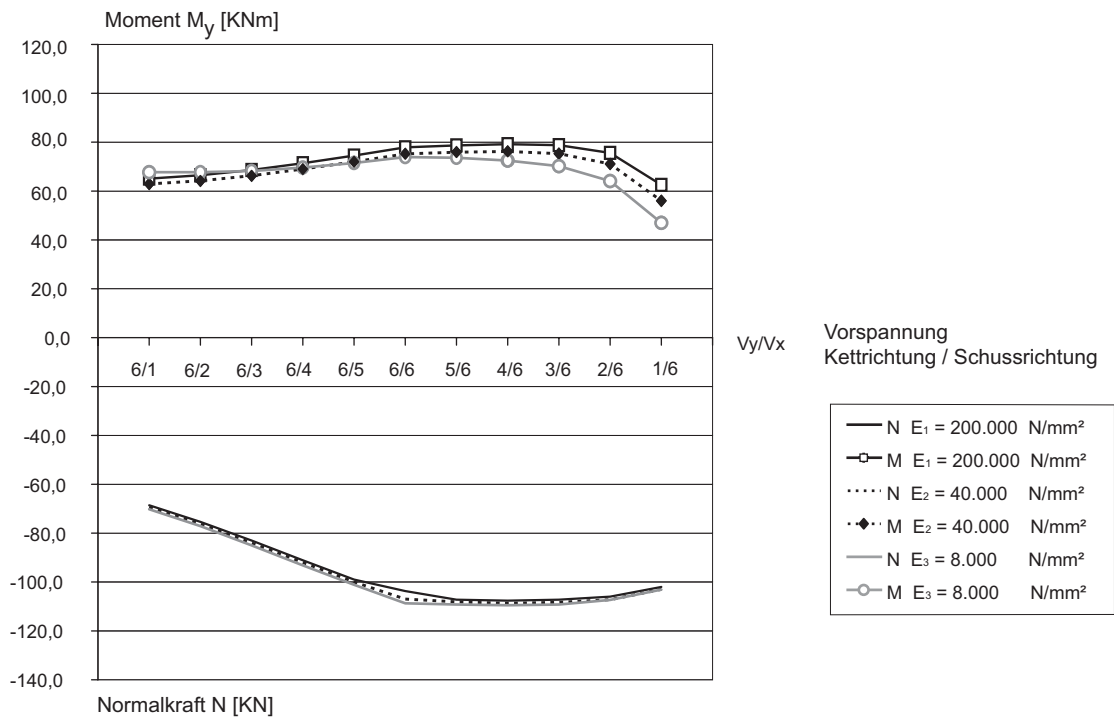


Abb. 6-35. System C - Änderung von max. Normalkraft- und Momentenbelastung in Abhängigkeit veränderter Vorspannungsverhältnisse für drei verschiedene Steifigkeiten des Korbbogens, Darstellung der Schnittgrößenverläufe siehe Anhang B (siehe S.366)

### 6.3.8 System C - Korbbogen

Der Korbbogen ist statisch weniger günstig als der Kreisbogen, da er eine größere Exzentrizität zur Stützlinie aufweist, bietet dafür aber eine bessere Ausnutzung des Lichtraumprofils. Beim Korbbogen zeigt sich wie beim Kreisbogen eine deutliche Normalkraftzunahme bei der Erhöhung der Vorspannung in Schussrichtung gegenüber der Vorspannung in Kettrichtung. Im Gegensatz zum Kreisbogen ist jedoch die Zunahme der Normalkraftbeanspruchung mit einer Erhöhung der Biegemomentenbeanspruchung verbunden. Eine Ursache ist die stärkere Abweichung der Bogenlinie von der Stützlinie. Hinzu kommt die anfängliche Erhöhung der Verformung und die damit verbundene zusätzliche Biegebeanspruchung durch die ansteigende Membrankräfte in Schussrichtung.

Erst bei einer konstanten Vorspannung in Schussrichtung und gleichzeitiger starken Abnahme der Vorspannung in Kettrichtung kehrt sich dieser Effekt um. Die nahezu konstanten Normalkräfte verursachen keine Erhöhung der Biegebeanspruchung und die Membran eine Reduzierung des Biegemoments  $M_y$ . Grundsätzlich liegt die Biegebeanspruchung des Bogens deutlich über den Werten des Systems mit einer Kreisbogengeometrie.

Wie erwartet verstärken die Vorspannkkräfte der Membran grundsätzlich die Biegebeanspruchung des Systems gegenüber dem Kreisbogen. Im Bereich eines Vorspannungsverhältnisse  $6 \leq V_y/V_x \leq 1$  steigt die Beanspruchung um etwa 10 % weitgehend unabhängig von der Steifigkeit. Für veränderte Vorspannungsverhältnisse im Bereich  $1 \geq V_y/V_x \geq 0,16$  ergibt sich in Abhängigkeit von der Steifigkeit eine unterschiedlich starke Reduzierung von  $M_y$ .

### 6.3.9 Modifizierung des Systems A - Kreisbogen mit Kehlseil

Die verschiedenen Berechnungen am Kreis- und Korbbogen zeigen, dass der Effekt einer Stabilisierung des Bogens in Bogenebene durch die Membran bei einer Aneinanderreihung mehrerer Bögen relativ gering ist. Die Ausbildung einer starken doppelten Krümmung durch veränderte Vorspannverhältnisse bewirkt eine Reduzierung der Biegemomente, verursacht aber gleichzeitig aus architektonischer Sicht eine starke Einschränkung des Lichtraumprofils (Abb. 6-23).

Dieser Umstand führt zu der Idee, durch Kehlseile die Anfangsgeometrie im Hinblick auf eine stabilisierende Wirkung und auf ein nutzbares Lichtraumprofil zu verbessern. Dazu wird die zwischen den Bögen gespannte Membran durch zwei Seile in eine neue Form gezogen, wobei die Seile mit der Membran verbunden sind (Abb. 6-36). Die Membran hat eine konstante Vorspannung von  $V_y = 6$

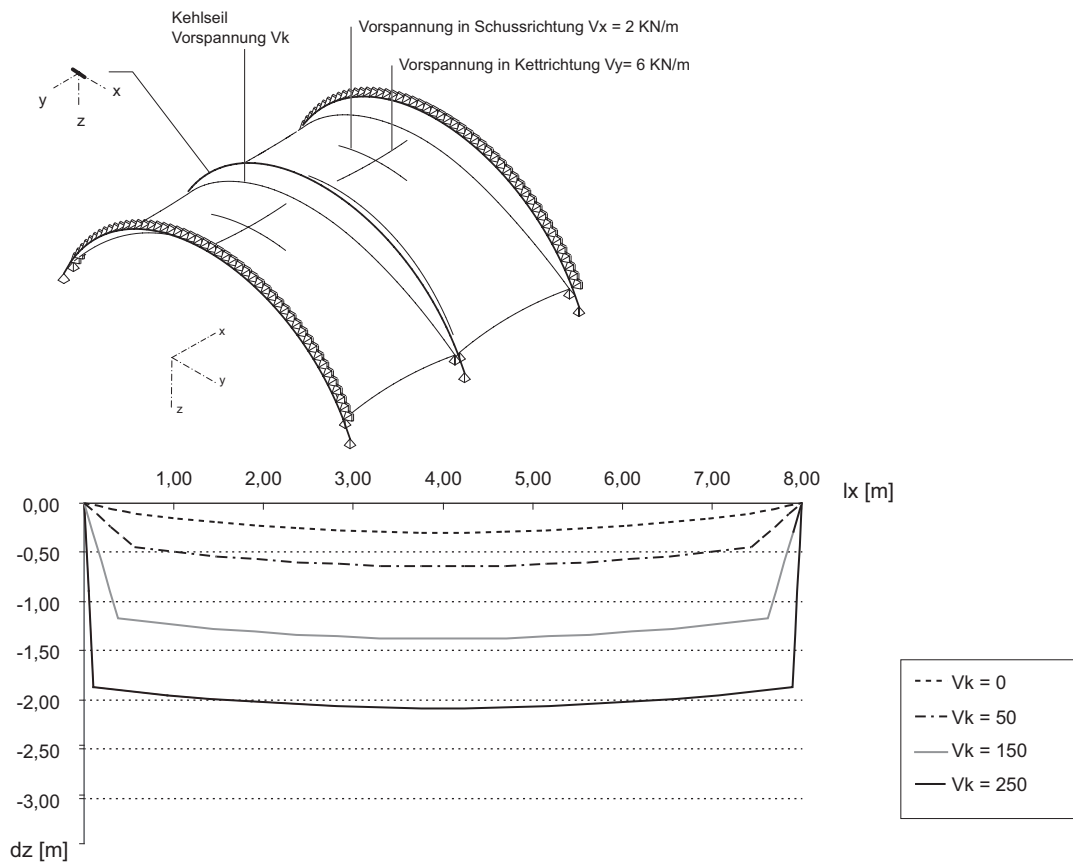


Abb. 6-36. Membranform in Kettrichtung in Abhängigkeit der Erhöhung der Vorspannung im Kehlseil

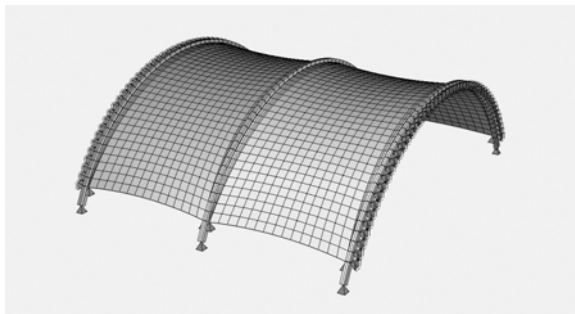


Abb. 6-37.  $V_k = 0$

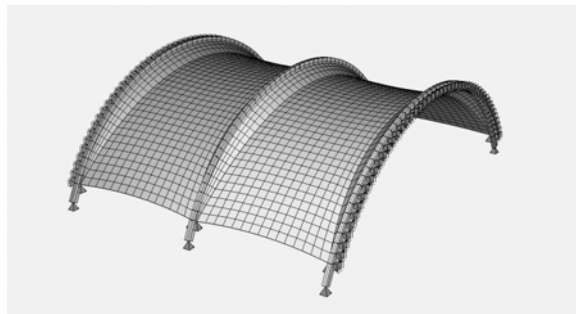


Abb. 6-38.  $V_k = 50 \text{ KN}$

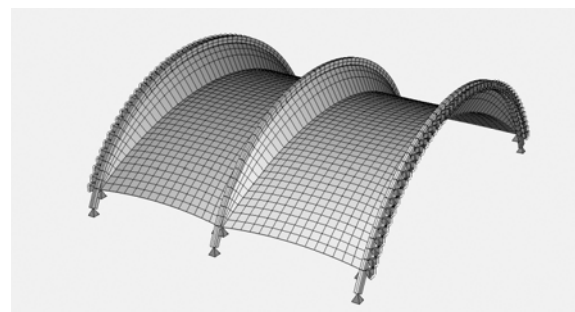


Abb. 6-39.  $V_k = 150 \text{ KN}$

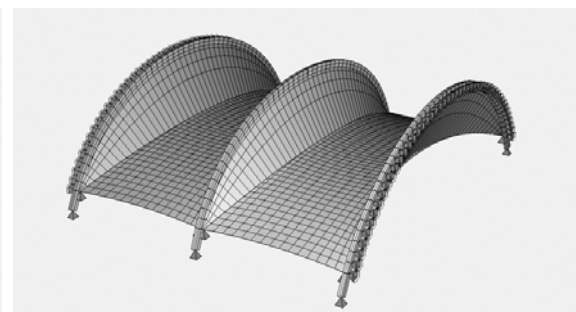


Abb. 6-40.  $V_k = 250 \text{ KN}$

KN/m in Kettrichtung und  $V_x = 2$  KN/m in Schussrichtung, die Form der Membran wird durch die Vorspannung in den Kehlseilen variiert. Das Kehlseil verläuft konstruktiv in einer Tasche und ist darin abhängig von einem Reibungsfaktor verschieblich. Da die Simulation dieser Reibung in SOFISTIK nur über Koppelemente mit Federeigenschaften erfolgen kann, der Reibungsfaktor allerdings abhängig von der sich ändernden Seilkraft ist, wurde vereinfachend eine Grenzbetrachtung gemacht. Im ersten Fall ist der Reibungsfaktor null und es stellt sich ein sogenanntes „slip-cable“ ein, in dem die Normalkraft in allen Punkten gleich ist, im zweiten Fall ist der Reibungsfaktor eins und das Kehlseil ist in allen FE-Knoten unverschieblich mit der Membran verbunden.

Bei der Formfindung spielt die Reibung des Kehlseils keine Rolle, da die Seillänge erst in Abhängigkeit von der vorgegebenen Seilkraft ermittelt wird. Je höher die Vorspannung des Kehlseils gewählt wird, desto kleiner ist der Winkel  $\alpha$  zwischen Membran und Bogenebene. Zwischen den Randelementen der einzelnen Membranflächen stellt sich eine gegensinnig gekrümmte Fläche ein (Abb. 6-36). Der Bogen wird durch die Vorspannung in der Membran und im Kehlseil vorbelastet. Die Normalkräfte nehmen abhängig von der Vorspannung des Kehlseils zu und liegen deutlich höher als beim ersten System ohne Kehlseile. Die Biegemomente  $M_y$  betragen ca. 20 KN/m ( $E_1, E_2$ ) bis 30 KN/m ( $E_3$ ) und liegen damit ebenso deutlich höher als beim ersten System, bei dem das maximale Moment 12 KN/m nicht überschritten hat. Die höhere Biegebeanspruchung ist dadurch zu erklären, dass durch das Kehlseil eine höhere, nicht geometrie-affine Belastung des Bogens erfolgt.

Für den Lastfall Wind + Schnee zeigt sich für den Fall 1 (Reibungsfaktor = 0), dass die Normalkraft bei zunehmender Vorspannung ebenso wie im Formfindungszustand deutlich ansteigt. Durch die asymmetrische Belastung ergibt sich ein positives Biegemoment auf der windzugewandten Seite und ein negatives auf der windabgewandten Seite. Während das positive Moment bei zunehmender Kehlseilvorspannung abnimmt, steigt das negative Moment zunächst an und nimmt ab einer Vorspannung von 150 KN/m wieder ab. In Abbildung 6-41 ist das betragsmäßig maximale Moment aufgetragen. Anhand der Kurve wird sichtbar, dass es nicht gelingt, durch die Vorspannung in den Kehlseilen die Biegemomente im Bogen zu reduzieren.

Im 2. Fall (Reibungsfaktor = 1) ergibt sich bei verhältnismäßig geringer Vorspannung im Kehlseil ebenso ein Anstieg der Normalkräfte im Bogen. Darüber hinaus fällt die Normalkraft im Bogen jedoch wieder ab. Dies liegt darin begründet, dass die Vorspannkraft im Kehlseil aufgrund der Verformungen der Membran abgebaut wird. So übt das Kehlseil keine Vorspannung mehr auf den Bogen

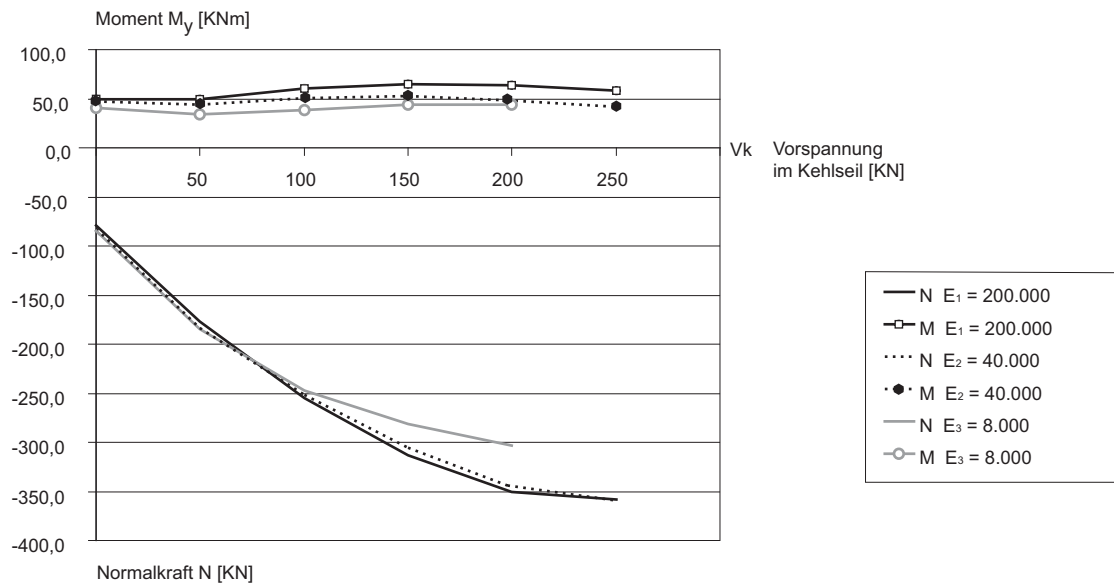


Abb. 6-41. Verlauf von max. Normalkraft- und Momentenbelastung bei steigender Vorspannung im Kehlseil, Reibungsfaktor des Kehlseils 0

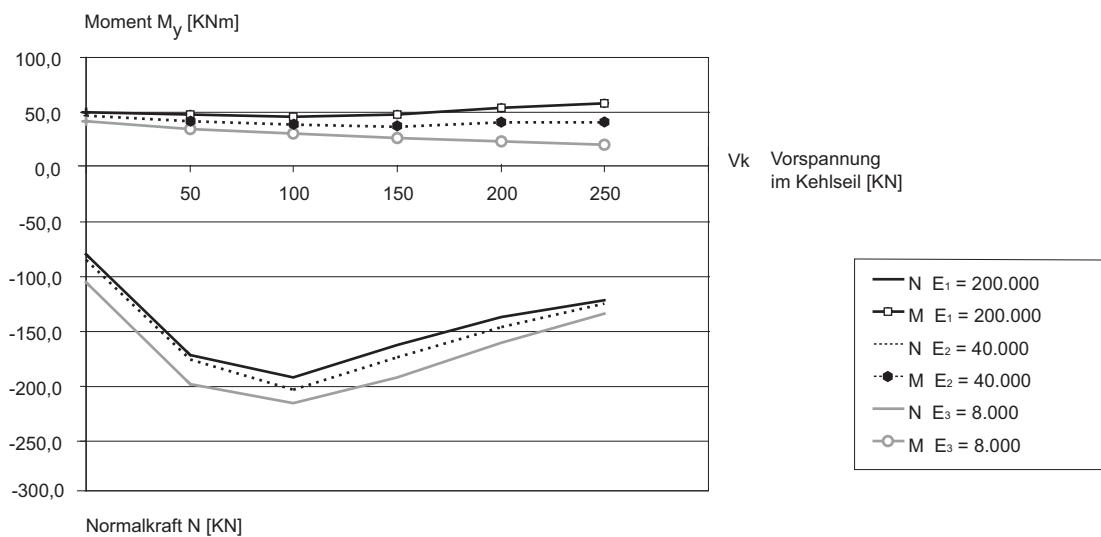


Abb. 6-42. Verlauf von max. Normalkraft- und Momentenbelastung bei steigender Vorspannung im Kehlseil, Reibungsfaktor des Kehlseils 1



aus, sondern ist vom Tragverhalten lediglich eine lineare Verstärkung der Membran. Solange das Kehlseil durchgehend zugbeansprucht ist, erfolgt auch eine Reduzierung des Biegemoments im Bogen, danach wird der Bogen nur noch durch die Spannung in der Membran beeinflusst. Dabei zeigt sich, dass bei einer geringen Steifigkeit des Bogens das Biegemoment nochmals reduziert wird, bei einer höheren Steifigkeit steigt es dagegen an (Abb. 6-42).

Zusammenfassend lässt sich bei beiden Grenzbetrachtungen feststellen, dass es nicht gelingt, durch die Erhöhung der Vorspannung des Kehlseils das Biegemoment im Bogen deutlich zu reduzieren. Die Kopplung von Kehlseil und Bogen durch die Membran zu einem sich selbst stabilisierenden System stellt sich nicht in ausreichendem Maß ein. Grund dafür ist die geringe Schubsteifigkeit der Membran, die ein Verschieben von Kehlseil und Bogen gegeneinander erlaubt. Zudem wird durch hohe Vorspannkraft im Kehlseil, die eine nicht geometrie-affine Belastung des Kreisbogens verursachen, die Normalkraft- und Biegebelastung des Bogens erhöht.

#### 6.3.10 Tragverhalten von Gesamtsystemen

Um das Tragverhalten von Bogen und Membran auch bei größeren Systemen beurteilen zu können, werden zwei weitere Modelle untersucht. Diese bestehen aus jeweils vier Feldern; die Aussteifung in Längsrichtung erfolgt beim ersten System durch in den Endfeldern angeordnete Pfetten und diagonale, vorgespannte Seile, beim zweiten System durch eine zum Boden abgespannte Membran. Die Abmessungen werden vom Kreisbogensystem übernommen und um zwei Felder erweitert, die Materialkennwerte bleiben unverändert. Es werden folgende Lastfälle untersucht:

- LF 1 Vorspannung + Eigengewicht
- LF 2 asymmetrische Schneelast (feldweise)
- LF 3 Wind (orthogonal in y- Richtung)
- LF 4 Wind (schräg unter  $45^\circ$ )
- Lastkombination aus LF1+2+3

Beim ersten System (Abb. 6-43) werden die Längskräfte über die Pfetten mit Auskreuzungen abgetragen. Die Längsaussteifung des Tragwerks wird von den Verbänden aus Zug- und Druckstäben übernommen. Für den Mittelbogen ergeben sich maximale Verschiebungen in Längsrichtung von 5 cm. Das zweite System (Abb. 6-44) ist lediglich über die Membran in Längsrichtung gehalten. Die auftretenden Verformungen der Bögen in Längsrichtung sind entsprechend höher. Die größten Ver-

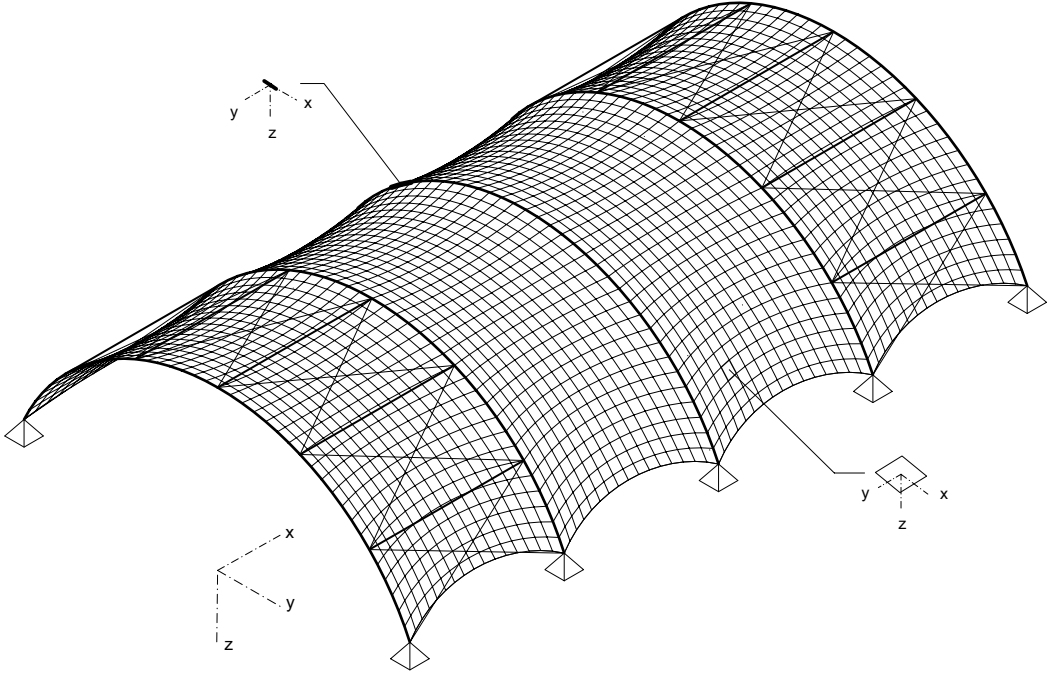


Abb. 6-43. Gesamtsystem 1

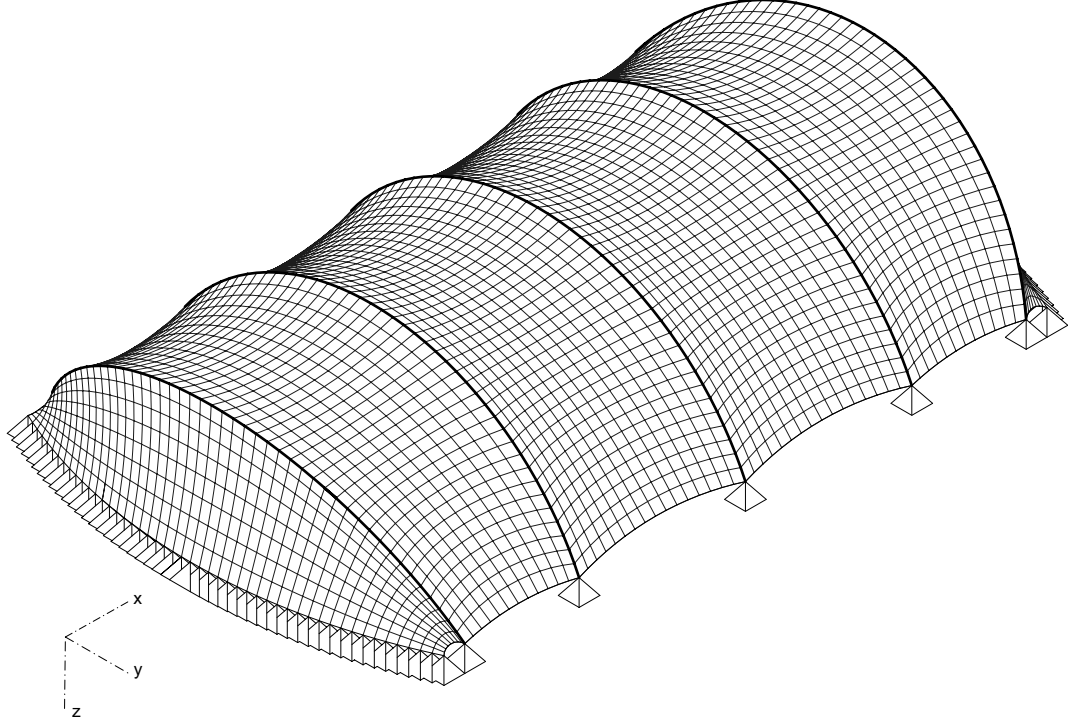


Abb. 6-44. Gesamtsystem 2

formungen treten bei einer über allen Feldern konstanten Schneelast an den äußeren Bögen auf, die sich um bis zu 110 mm nach innen verschieben.

Die beiden Systeme bestätigen das Ergebnis der Vorstudie. Die Bögen lassen sich senkrecht zur Bogenebene über die Membran ausreichend stabilisieren. Die aussteifende Wirkung in Bogenebene ist jedoch durch die starke Gesamtverformung der Systeme gering.

### 6.3.11 Zusammenfassung

Für die stabilisierende Wirkung der Membran in Bogenebene haben die Auflagerbedingungen der zum Bogen parallelen Membranränder eine entscheidende Bedeutung. Bei einer Verschieblichkeit in Bogenebene erzeugt die Membran erst bei einer sehr starken Ausbildung einer doppelten Krümmung, eine nennenswerte Reduzierung der Biegebeanspruchung ( $M_y$ ) für den Bogen mit geringer Steifigkeit.

Bei einer unverschieblichen Lagerung der äußeren Membranränder werden die Verformungen des Bogens durch die Membran deutlich stärker reduziert. Der Einfluss der Steifigkeit des Bogens auf die stabilisierende Wirkung der Membran nimmt deutlich zu.

Der Korbbogen erweist sich als ungünstig in Bezug auf eine stabilisierend Wirkung der Membran. Im Bereich eines Vorspannungsverhältnisses von  $V_x > V_y$  nimmt die Biegebeanspruchung ( $M_y$ ) des Bogens bei steigendem  $V_y$  deutlich zu. Erst bei einem deutlichen Anstieg der Vorspannung  $V_x$  und konstanter Vorspannung  $V_y$  tritt eine Reduzierung der Biegebeanspruchung ein. Grundsätzlich liegen die Werte jedoch wesentlich höher als bei dem vergleichbaren Kreisbogensystem (System A).

Der Gedanke, die Membranform durch Kehlseile zu modifizieren, um einen günstigeren Anschlusswinkel zwischen Membran und Bogen zu erreichen und die Verformungen der Membran und damit des Bogens zu begrenzen, führt nicht zu dem erwarteten Erfolg. Eine Ursache hierfür ist die geringe Schubsteifigkeit des Membranmaterials, die starke Verschiebungen zwischen den Kehlseilen und den Bögen ermöglichen. Gleichzeitig entsteht aus den notwendigen hohen Vorspannkräften in den Kehlseilen eine Biegebeanspruchung, die insgesamt zu einer Erhöhung der Gesamtbiegebeanspruchung der Bögen führt.

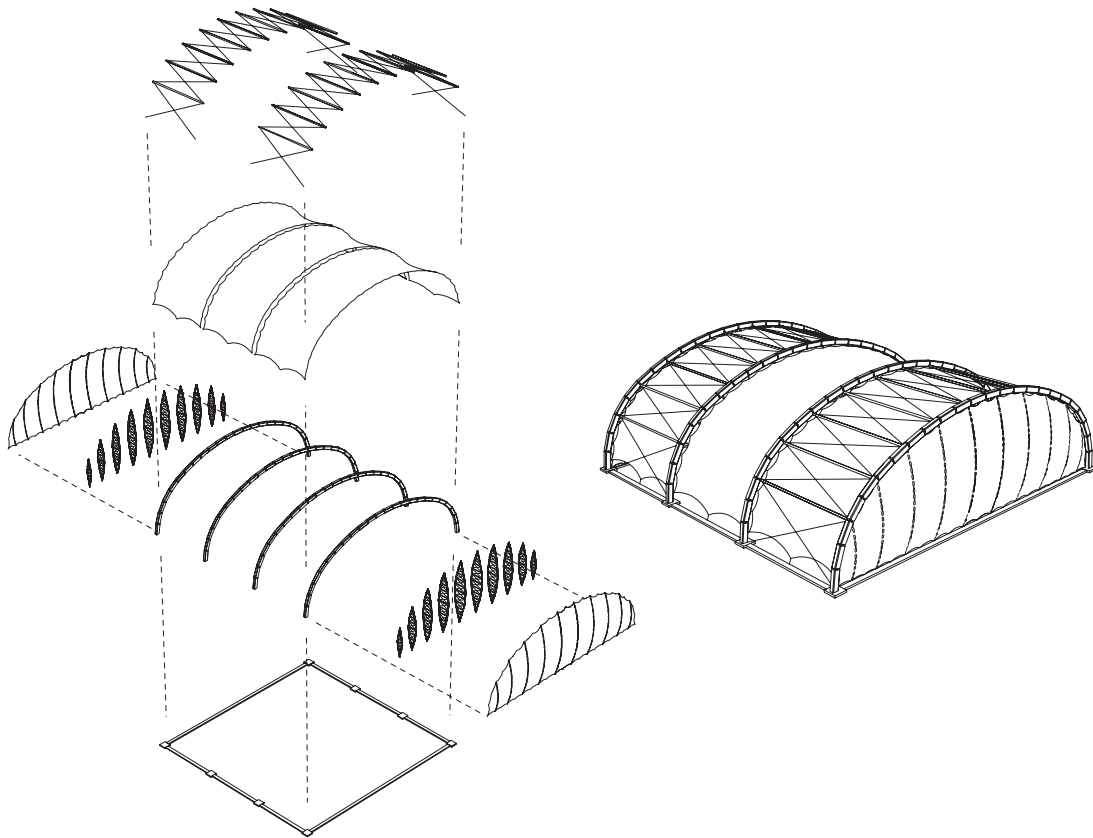


Abb. 6-45. Konzept für eine Tennishalle auf Grundlage des neuen Konstruktionssystems

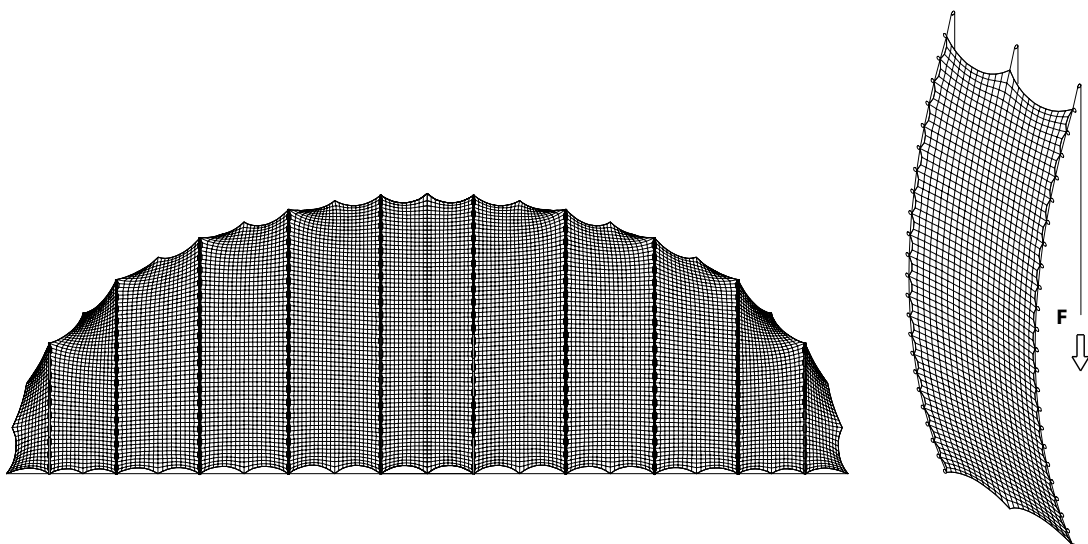


Abb. 6-46. Konzept für Hallengiebel mit doppelt gekrümmten wandelbaren Membranflächen

## 6.4 Konstruktive Überlegungen

Auf der Grundlage der vorangegangenen Überlegungen zum Einsatz einer wandelbaren Stützkonstruktion und der Untersuchung der Interaktion von Membran und Bogentragwerk wurde für das Anwendungsbeispiel einer Tennishalle (Abb. 6-45) mit einer Spannweite von ca. 37 m ein Gesamtkonzept entwickelt. Die Konstruktion sollte einen minimalen Aufwand an Gründungsarbeiten erfordern, eine Standzeit von wenigen Monaten bis zu mehreren Jahren, die Aufstellung an beliebigen Standorten Europas und eine schnelle Montage auf der Grundfläche der Halle erlauben.

Das statisch in sich geschlossene Primärtragwerk besteht aus vier wandelbaren Bögen im Abstand von 12 m und einer Spannweite von 37 m. Zur Gewährleistung der Stabilisierung der Bögen während des Aufrichtens und zur späteren Längsaussteifung der Halle sind jeweils zwei Bögen zu Verbänden gekoppelt und ausgesteift. Für die Montage der Membran sind zwei Varianten möglich: das Zusammenfügen der Teilflächen am Boden und vertikale Hochziehen der Gesamtfläche mit Hilfe der Bögen und eines Seilzugsystems oder das radiale Einziehen der einzelnen Teilflächen entlang der Bögen (siehe S.209). Der Einsatz einer der beiden Alternativen ist von den Anforderungen an eine mögliche spätere Wandelbarkeit der Membran abhängig. Die Weiterentwicklung der Konstruktion für ein zirkuläres Einziehen einzelner Felder oder der gesamten Fläche würde bei einer langfristigen Nutzung der Halle erlauben, bei Bedarf die Dachfläche relativ einfach und schnell zu öffnen und zu schließen. Der entstehende konstruktive Aufwand könnte durch den Nutzungskomfort eines wandelbaren Daches aufgewogen werden. Als problematisch werden die durch den Verzicht auf Abspannungen notwendigen Druckstäbe der Verbände mit einer Länge von 12 m angesehen. Hier sollte in einer weiteren Untersuchung ein Optimum zwischen Bogenanzahl, dem daraus resultierenden Montageaufwand, einer sinnvollen Membranflächenbreite und den sich ergebenden Dimensionen der Druckstäbe ermittelt werden.

Um notwendige Abspannungen zu vermeiden und erforderliche Fundamente zu minimieren ist ein Kurzschließen der Bogenfußpunkte und der Einsatz von Aussteifungsverbänden vorgesehen. Die aus der Membran entstehenden Horizontalkräfte werden ebenso wie die Horizontalkräfte aus den Giebelfeldern über diese Verbände zu den Fußpunkten abgetragen. Die entstehenden Auflagerkräfte erlauben bei einer moderaten Wind- und Schneebelastungen (Windgeschwindigkeit bis 28 m/s, Schneelast = 0.5 KN/m<sup>2</sup>) und einer Nutzung als „fliegender Bau“ eine Gründung über Lastverteilerplatten und Erdnägeln für normale Bodenverhältnisse. Für längere Standzeiten bzw. höhere Lasten ist eine Grün-

dung mit Hilfe von Fertigteilfundamenten geplant, die ebenfalls schnell montiert, demontiert und wiederverwendet werden können.

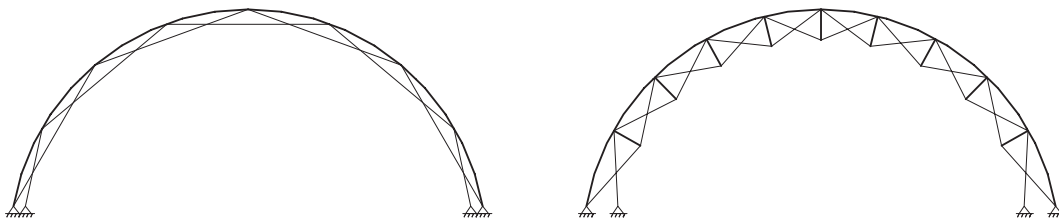
Für die Giebfelder wird ein System aus fischbauchartigen Stützen und doppelt gekrümmten Membranflächen vorgesehen, das konsequent die Möglichkeit nutzt, druck- und biegebeanspruchte Elemente eines Sekundärsystems vorwiegend durch die Membran zu stabilisieren. Damit wird die Ausbildung eines sehr leichten und effizienten Fassadensystems mit Höhen von bis zu 9 m möglich. Durch ein einfaches Seilzugsystem lässt sich auch hier eine Montage vom Boden aus realisieren (Abb. 6-46). Die Ausbildung einer Fassade mit doppelt gekrümmten Membranflächen bietet die Möglichkeit einer Verbesserung der Gebrauchseigenschaften, da insbesondere die Geräuschentwicklung der flatternden ebenen Membranflächen in diesen Bereichen bei bestehenden Systemen durch die Nutzer kritisiert wurden.

### 6.5 Schlussfolgerung

Das neue wandelbare Bogentragwerk verfügt über einen sehr einfachen Mechanismus, der den Aufrichtungsprozess gegenüber elastisch verformten Tragwerken zwar verlangsamt, jedoch eine hohe Flexibilität in Bezug auf die konstruktive Ausbildung der Bogensegmente, die Belastbarkeit der Konstruktion, die Montagemöglichkeiten der Membran und die zu realisierenden Spannweiten und Bogengeometrien ermöglicht. Das entstehende Tragwerk kann als statisch in sich geschlossenes System ausgebildet werden und erlaubt somit auch eine Versteifung durch höhere Vorspannung bei nahezu gleichbleibenden Auflagerkräften. Mit dem Einsatz von Verbänden zur Realisierung eines statisch in sich geschlossenen Bogentragwerks im Zusammenhang mit mechanisch vorgespannten Membranflächen entsteht generell das Problem, dass die an sich möglichst breiten Membranflächen Druckstäbe mit relativ großen Knicklängen verursachen. Dadurch werden große Querschnitte bzw. aufwendige konstruktive Lösungen zur Stabilisierung dieser Elemente notwendig. Zur Lösung dieses Grundproblems ist eine weiterführende Untersuchung über die Abhängigkeiten der einzelnen Parameter wie Bogenkonstruktion, Anzahl der Bögen, Veränderung der Montagezeiten und Abläufe, Teilflächenverbindung und Randausbildung der Membran, mögliche Wandelbarkeit der Membranhülle sowie Herstellung und Transport der Gesamtkonstruktion erforderlich.

Die Untersuchung der Interaktion zwischen Bogentragwerk und Membran führt nicht zu der erwarteten grundsätzlichen Verbesserung der Tragfähigkeit der Stützkonstruktion durch die Berücksichtigung der Membran. Die mechanisch vorgespannte Membran kann zwar sehr wirksam zur

Stabilisierung der Bögen senkrecht zur Bogenebene verwendet werden, ihre versteifende Wirkung auf den Bogen in der Bogenebene ist jedoch sehr gering. Ursache hierfür sind die relativ großen Verformungen der Membrane affin zur äußeren Belastung, die die stabilisierende Wirkung der Membran in der Bogenebene stark reduzieren. Im Gegensatz dazu unterliegen nur für die Stabilisierung angeordnete zusätzliche Versteifungen aus zugbeanspruchten Elementen keiner unmittelbaren Verformung durch äußere Lasten und können so wesentlich effizienter ein Ausweichen des Bogens in Bogenebene begrenzen (Abb. 6-47). Die Sinnhaftigkeit des Einsatzes solcher Systeme für mobile Bauten muss jedoch im Zusammenhang mit der Erhöhung des konstruktiven Aufwandes und des Montageaufwandes beurteilt werden.



**Abb. 6-47.** Beispiele für Seilverspannungen zur Stabilisierung des Bogens in Bogenebene

Eine Nutzung der sehr effizienten Stabilisierung der Bögen senkrecht zur Bogenebene durch die Membran ist generell möglich. Für das Primärtragwerk sollte sie immer zur Reduzierung der Verformungen im Gebrauchszustand mit berücksichtigt werden. Für den Nachweis der Standsicherheit des Primärtragwerks ist die stabilisierende Wirkung der Membran aufgrund des kritischen Weiterreißverhaltens nur bei einer entsprechenden Redundanz des Gesamtsystems im Falle des Versagens der Membran zu verwenden. Dagegen kann sie für den Nachweis von Sekundärtragwerken wie z.B. die vorgeschlagenen Giebfelder mit fischbauchartigen Stützen und doppelt gekrümmten Membranflächen sehr effizient eingesetzt werden.

---



## 7 Entwicklung und Analyse einer mobilen Tribünenüberdachung

Innerhalb der Darstellung der Entwicklung einer 12m frei auskragenden, schnell errichtbaren mobilen Tribünenüberdachung wird die Eignung eines wandelbaren Stütztragwerkes zusammen mit einer mechanisch vorgespannten Membran für diese spezifische Anwendung analysiert. Der aus der Analyse entwickelte Mechanismus eines elastisch vorverformten Trägers wird in einer Parameterstudie mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode auf seine allgemeine Anwendbarkeit für größere Spannweiten hin überprüft. In einer zweiten Studie wird die Interaktion zwischen dem sich unter äußerer Belastung stark verformenden Stütztragwerk und der Membran untersucht, um grundlegende Möglichkeiten zur Erhöhung der Tragfähigkeit solcher Gesamtsysteme durch die Berücksichtigung der Interaktion beider Elemente abzuschätzen.

### 7.1 Kontext

Den Anstoß zu der Entwicklung gab die Firma ARENA Seating Ltd., einer der führenden Hersteller und Verleiher temporärer Tribünen- und Veranstaltungsbauten in Großbritannien. ARENA verwendet zur Überdachung ihrer eigenen Tribünensysteme eine einfache Aluminium-Rahmenkonstruktion mit einer nicht vorgespannten PVC-Polyestermembran als Hülle. Dieses Konstruktionsprinzip stellt aufgrund des langsamen Aufbauprozesses und der beschränkten Gebrauchseigenschaften keine wirtschaftlich und ästhetisch befriedigende Lösung dar. Anlässlich der Überarbeitung des gesamten Tribünensystems in Zusammenarbeit mit der deutschen Firma PERI entstand der Wunsch nach einer neuen, zeitgemäßen und wirtschaftlicheren Dachkonstruktion. Die wichtigsten Anforderungen an die neue Überdachung waren:

- ein sehr schneller und sicherer Montageprozess
- eine Reduzierung der zur Montage notwendigen Arbeitskräfte
- die Modularität des Gesamtsystems
- eine deutliche Verbesserung des Erscheinungsbildes und der Gebrauchseigenschaften

Auf der Suche nach Partnern für die Entwicklung eines Überdachungssystems, das diese grundlegenden Anforderungen erfüllte, wandte sich ARENA an die Lightweight Structures Unit (LSU) der Uni-



Abb. 7-1. Aufbausequenzen der bestehenden Überdachung der Firma ARENA

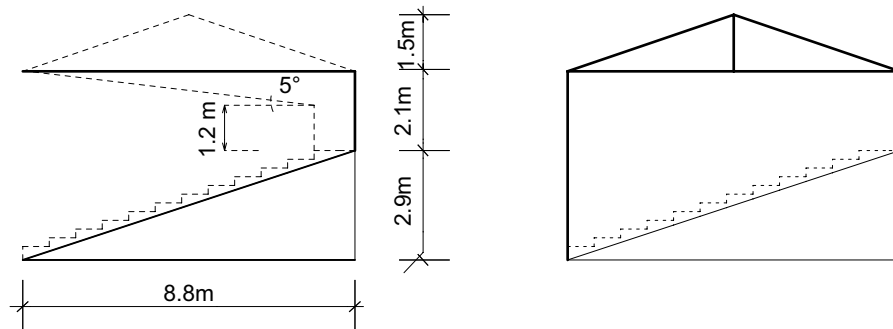


Abb. 7-2. Geometrie der bestehenden Überdachung

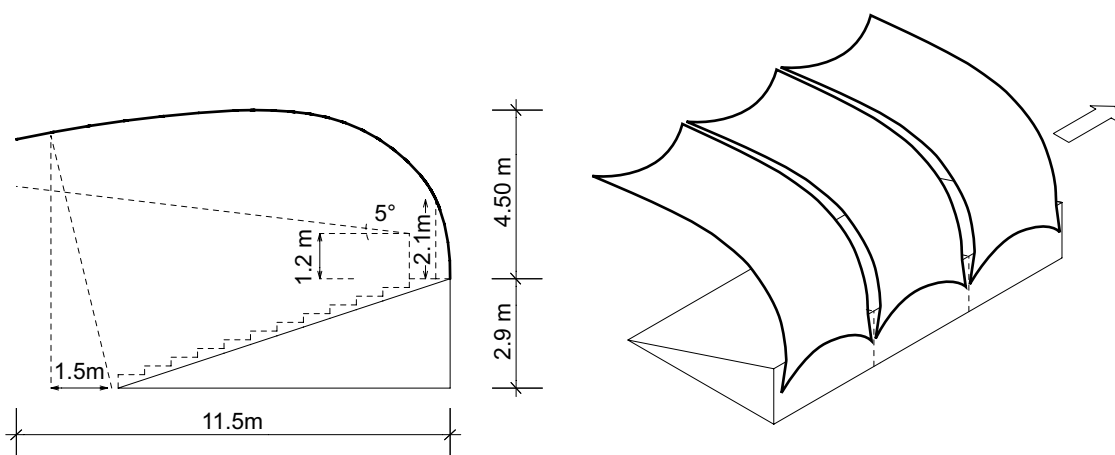


Abb. 7-3. Geometrie und Modularität der neuen Überdachung

---

versity of Dundee. 1996 entwickelte die LSU ein erstes Konzeptmodell eines sich während des Aufrichtens elastisch verformenden Kragarms, der als Auflager für eine doppelt gekrümmte Membranüberdachung dienen sollte. Die Weiterentwicklung dieses Konzepts wurde im Jahr 2000 wieder aufgenommen und durch Förderprogramme der britischen Regierung, des British Council und des DAAD unterstützt. In dieser zweiten Phase erfolgte die Entwicklungsarbeit in Kooperation zwischen der LSU, dem Lehrstuhl für Tragwerksplanung der TUM, vertreten durch den Verfasser, und der Firma ARENA Seating Ltd.

## 7.2 Konzept

Die einfache Form und Konstruktion der bestehenden Überdachung weist mehrere Nachteile auf. Sie erlaubt zum Einen nicht die Ausbildung einer durch Vorspannung stabilisierten Membranfläche. Das führt zur Geräusentwicklung durch das Flattern der Membran unter dynamischen Windlasten und der Bildung von Wasser- bzw. Schneesäcken. Zum Anderen stören die relativ starken vertikalen Pfosten das Sichtfeld der Zuschauer. Um diese Einschränkung zu vermeiden, wird für das Primärtragwerk der neuen Überdachung eine Kragkonstruktion gewählt.

### 7.2.1 Form und Geometrie

Die kontinuierliche Krümmung der Kragträger ergibt sich aus dem Wunsch, eine doppelt gekrümmte durch Vorspannung stabilisierte Membran als Überdachung zu verwenden. Die Form der Krümmung wird durch verschiedene ergonomische Maßgaben bestimmt: Zur Gewährleistung einer ausreichenden Kopffreiheit am oberen Ende der Tribüne ist ein Abstand zwischen Dach und Tribüne von 2.1 m einzuhalten. Der Mindestabstand zwischen vorderem Tribünenfuß und Überdachung wird durch die Sichtlinie der Zuschauer in der letzten Reihe definiert. Zur Verbesserung des Wetterschutzes wurde außerdem ein Dachüberstand von 1.5 m gefordert. Als Spannweite der neuen Überdachung wurden erst 6 m, später ca. 12 m festgelegt. Entsprechend der Morphologie stellt die Überdachung eine dreiseitig offene Form dar, die eine lineare Erweiterung erlaubt.

### 7.2.2 Aufbauprozess und Wandelbarkeit

Aus den Erfahrungen mit dem bestehenden System resultiert neben der allgemeinen Forderung nach einer schnellen und einfachen Aufbaumöglichkeit eine ganze Reihe von sehr spezifischen Anforderungen an die neue Tribünenüberdachung. Die Errichtung soll mit maximal zwei Arbeitskräften von der Tribüne aus ohne schwere mechanische Hilfsmittel, Hilfsgerüste oder Sicherungsmaßnahmen erfolgen. Aufgrund der Größe der Überdachung ist eine Elementierung der gesamten Konstruktion

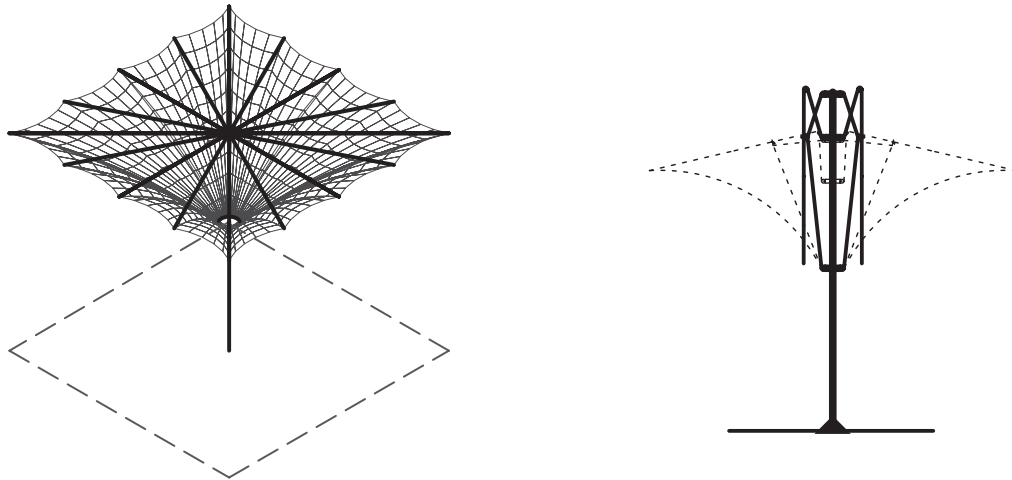


Abb. 7-4. Konstruktionsprinzip und wandelbares System eines Großschirms



Abb. 7-5. Modellstudien des Systems „Cabrio“ (31)

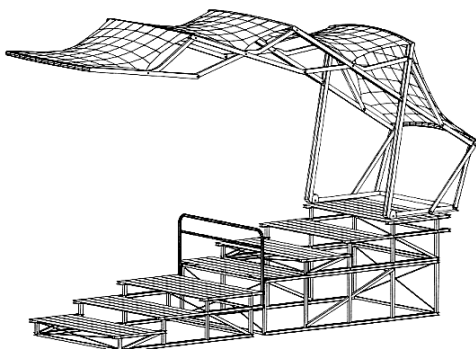


Abb. 7-6. Grundmodul der Konstruktion (31)

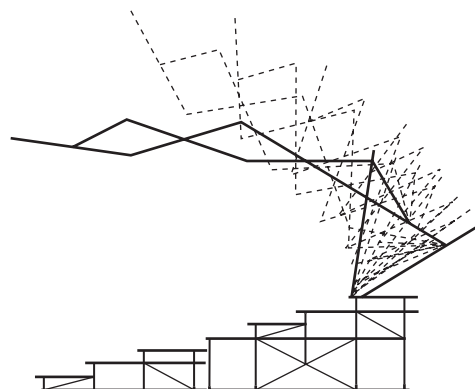


Abb. 7-7. Bewegungsstudie des Scherenmechanismus (31)

in leicht handhabbare Komponenten mit einem maximalen Gewicht von jeweils 50 kg und minimalen Packmaßen vorzusehen. Die Verbindungen der Komponenten untereinander sollen lösbar gestaltet und für eine vielfache Montage und Demontage ausgelegt sein. Für die Optimierung des Aufbauprozesses der Gesamtkonstruktion ist die Errichtung der Kragträger, die als Stütztragwerk für die Membranflächen dienen sollen, von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden werden die grundlegenden Möglichkeiten für die Errichtung beschrieben und vorhandene Kragkonstruktionen mobiler Membranüberdachungen auf die in der Morphologie dargestellten Merkmale hin untersucht und verglichen.

#### 7.2.2.1 Analyse bestehender Systeme

##### *Nichtwandelbare Kragträger*

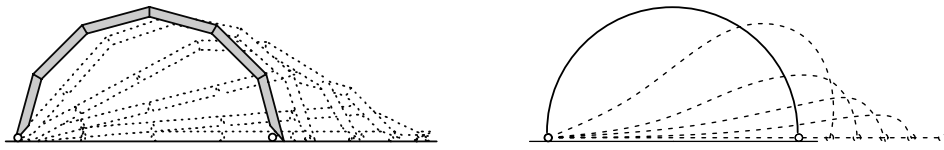
Ein gebogener Kragträger der geforderten Spannweite als Einzelelement weist beim Transport ein relativ großes Volumen mit hohem Eigengewicht auf. Die Montage erfordert in der Regel schwere Hebemittel und Arbeitsgerüste. Durch eine Aufteilung in viele kleine Segmente mit geringer Krümmung wird zwar das Transportvolumen verringert, dafür aber der Montageaufwand durch das notwendige additive Aneinanderfügen der Segmente erhöht. Grundsätzlich erfordern beide Varianten einen schrittweisen Aufbau der Stützkonstruktion bzw. der Gesamtkonstruktion über einen relativ langen Zeitraum. Ein Verzicht auf Arbeitsgerüste und Sicherungsmaßnahmen ist nicht möglich.

##### *Wandelbare Kragträger*

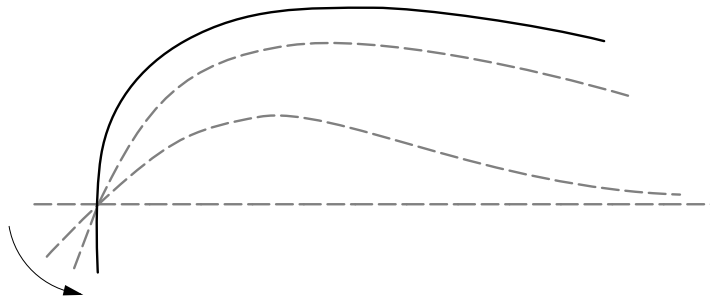
Ein wandelbares System bietet die Möglichkeit, alle Elemente des Systems bereits am Boden aneinanderzufügen und dann in einem kontrollierten Bewegungsablauf als eine Einheit aufzurichten. Die Notwendigkeit von Arbeitsgerüsten und schweren Hebemitteln entfällt und ein Einhalten der geforderten kurzen Montagezeiten für die Gesamtkonstruktion wird möglich. Die Morphologische Übersicht zeigt jedoch für wandelbare Kragkonstruktionen nur wenige vorhandene Varianten.

Das bekannteste Beispiel eines wandelbaren auskragenden Systems sind Schirmkonstruktionen. Die mit diesem System realisierbaren Spannweite bleiben jedoch weit unter den geforderten 12.0 m. Hinzu kommen die starke Einschränkung des Sichtfeldes durch die eingespannten Mittelstützen, die in der Regel sehr aufwendige Detailausbildung von Großschirmen und die fehlende Möglichkeit aus einzelnen Modulen eine völlig geschlossene, regendichte Dachfläche herzustellen.

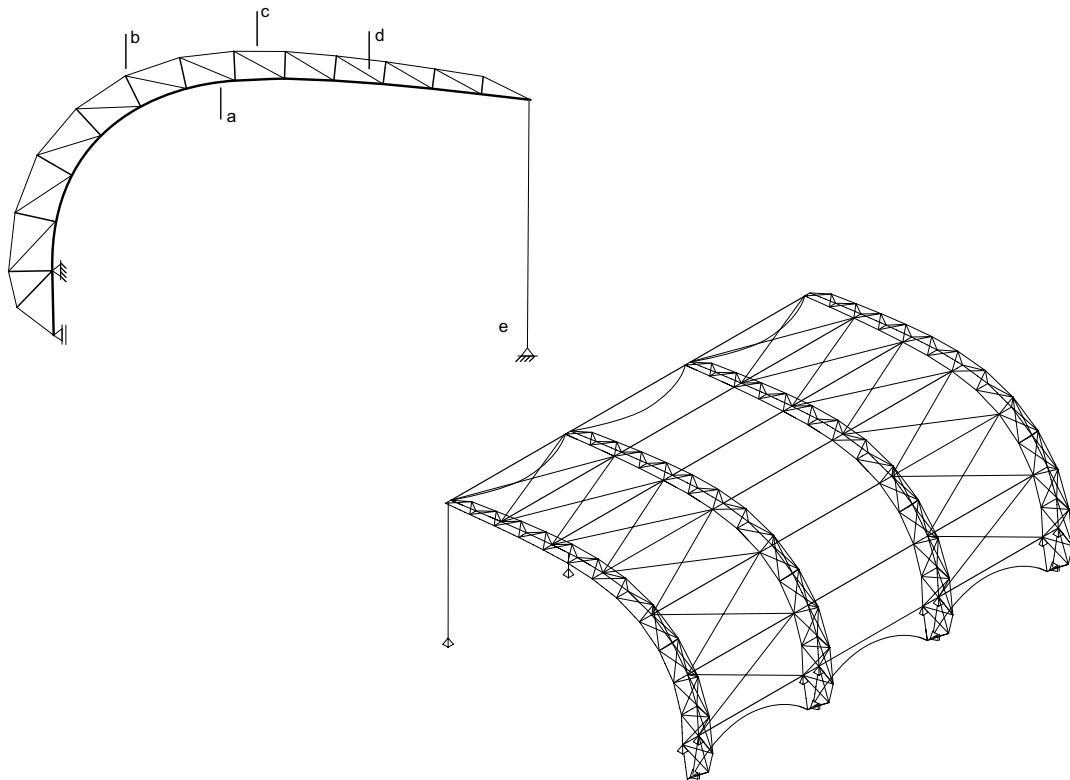
Durch das Büro SL Rasch wurde für eine mobile Tribünenüberdachung ein wandelbares auskragendes Dachtragwerk entwickelt, das einen Scherenmechanismus als Stützkonstruktion für eine PVC-



**Abb. 7-8.** Wandelbares Bogentragwerk aus Elementkette und elastisch verformten kontinuierlichen Element



**Abb. 7-9.** Konzept für die Anwendung eines elastisch verformten gekrümmten Kragträgers



**Abb. 7-10.** Statisches System der Kragträger und der Gesamtkonstruktion (Beispiel mit drei Grundmodulen)

Polyestermembran verwendet (Abb. 7-5) [58]. Das Grundmodul des sogenannten Systems „Cabrio“ überdacht eine Grundfläche von 2.5 m Breite und 7.0 m Länge (Abb. 7-6). Das Stabwerk des Scherenmechanismus besteht aus Aluminiumprofilen. Das Tragwerk wurde 1986 entwickelt. Bis 1988 wurden vier Prototypen hergestellt und getestet. Das System erlaubt sehr kurze Bewegungszeiten von 60 sec. für das Öffnen bzw. Schließen des Daches. Entsprechend der in der Morphologie gewählten Unterscheidungen von Montagevorgängen beinhaltet das Öffnen der Überdachung eine horizontale und vertikale Bewegung innerhalb der Grundrissfläche der Gesamtkonstruktion (Typ5). Ähnlich den Schirmkonstruktionen ist aber auch diese Anwendung eines Scherenmechanismus mit verschiedenen Einschränkungen verbunden, die eine Realisierung größerer Spannweite kaum ermöglichen. So wird z.B. die Tragfähigkeit der Stützkonstruktion durch die starke Biegebeanspruchung der Einzelstäbe des Scherentragwerks reduziert. Eine störungsfreie Funktion des Mechanismus ist nur bei der Gewährleistung geringer Verformungen der Gesamtkonstruktion gegeben. Dafür ist eine entsprechende Dimensionierung der steifen Tragelemente und eine sehr präzise und aufwendige Detaillierung der Anschlußknoten erforderlich. Die Überdachung wurde ausschließlich als Sonnenschutz entwickelt. Für einen Einsatz als ein genereller Wetterschutz stellt der Anschluss der Membran an das Scherentragwerk ein grundsätzliches Problem dar, da die punktweise Anbindung des beweglichen weichen Randes der Membran keine dichten Verbindungen der Teilflächen der einzelnen Grundmodule erlaubt (Abb. 7-6).

#### 7.2.2.2 Ein neuer wandelbarer Kragträger

Die Analyse vorhandener wandelbarer Kragkonstruktionen zeigt, dass keines der Systeme die geforderten Randbedingungen erfüllt. Die grundlegenden strukturellen Probleme der Scherenmechanismen führen zu einer Untersuchung der Möglichkeiten, die Elementketten bzw. kontinuierlich elastische gebogene Stützkonstruktion bieten (Abb. 7-8). Als Kragträger erlauben beide Varianten eine Vormontage am Boden und ein Aufrichten durch eine Rotation der Kragträger um einen Drehpunkt am oberen Tribünenende (Abb. 7-9). Die elastisch vorgebogene Stützkonstruktion bietet gegenüber einer Elementkette die Möglichkeiten, die Konstruktion der Kragträger durch die Verwendung eines kontinuierlichen durchlaufenden biegesteifen Elementes zu vereinfachen und gleichzeitig eine durchgängige lineare Stützung der Membran zu erreichen. Ein weiterer konstruktiver Vorteil ist die Verbindungsmöglichkeit der Membranteilflächen durch den Kragträger und damit die einfache Herstellung einer geschlossenen Gesamtfläche der Überdachung. Das hochelastische Biegeelement benötigt nach seiner Verformung eine Stabilisierung, um weitere Belastungen abtragen zu können ohne erneut seine Form zu ändern. Zur Versteifung des Elements ist ein ebenfalls wandelbares

System aus Druck- und Zugstäben notwendig, das durch Vorspannung stabilisiert wird. Der sich ergebende wandelbare Kragträger besteht aus dem flexiblen Untergurt (a), der durch drehbar gelagerte vertikale Druckstäbe (b) mit einem beweglichen Obergurt (c) verbunden ist. Diagonalseile (d) zwischen den Kopf- und Fußpunkten der Vertikalstäbe lassen einen Fachwerkträger mit ausreichender Steifigkeit entstehen. (Abb. 7-10) Durch die Rotation des hinteren Endpunkts des Trägers um das andere Auflager beginnt sich der Kragarm aufzurichten und zu krümmen. Damit verlängert sich der Abstand zwischen dem Kopfpunkt der Vertikalstäbe und dem jeweiligen Fußpunkt des folgenden Stabes, und die Diagonalseile spannen sich. Die Länge der Diagonalseile definiert die Form des Kragträgers. Sind alle Diagonalseile angespannt, hat der Kragträger seine Endposition erreicht. Das hintere Ende wird fixiert und die Gesamtkonstruktion durch das Anziehen einer Abspannung (e) am Kragarmende vorgespannt.

### 7.2.3 Statisches System

Haupttragelement des statischen Systems der Überdachung sind die Kragträger. Um ihr Tragsystem mit nur zum Auflager steigenden Zugdiagonalen ausbilden zu können und ihre Formstabilität zu gewährleisten ist eine Abspannung am vorderen Kragarmende notwendig (Abb. 7-10). Die dadurch entstehende Einzellast am Kragarmende und die lineare Belastung aus der Vorspannung der Membran stellt damit den formbestimmenden Lastfall für dieses Tragelement des Gesamtsystems dar. Die mögliche Größe der Kraft in der Abspannung und damit der Vorspannkraft im Kragträger wird durch die mögliche Größe der Ankerkräfte bestimmt. Um aufwendige zusätzliche Ballastierung bzw. Verankerung durch Erdnägel etc. zu vermeiden soll das Eigengewicht der Tribüne soweit als möglich als Ballastierung genutzt werden. In Längsrichtung ist die Konstruktion durch Verbände aus Druckstreben und Zugdiagonalen ausgesteift, die zusammen mit den Untergurten liegende Fachwerkssysteme bilden, die Horizontalkräfte aus der Vorspannung der Membran und aus externen angreifenden Lasten aufnehmen und zum hinteren Auflager ableiten. Kragkonstruktionen können generell keine statisch in sich geschlossenen Systeme bilden. Eine Erhöhung der Vorspannung des System führt immer auch zu einer Vergrößerung der Auflagerkräfte.

### 7.2.4 Konzeptmodell

Zur Prüfung des Konzeptes wurde in Dundee ein erstes Modell des wandelbaren Kragarms mit einer Spannweite von 6 m gefertigt. (Abb. 7-11) Als flexibler Untergurt wurde ein flacher Rechteckquerschnitt aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) gewählt, dessen niedrige Steifigkeit die für diese Anwendung notwendige hohe Verformbarkeit im elastischen Bereich erlaubt. Die vertikalen Druck-



---

stäbe wurden als A- Bock aus Aluminiumrohren mit gequetschten Enden hergestellt. Am Fußpunkt wurden Aluminiumrohre in Stahlschuhen drehbar gelagert. Die Stahlschuhe wurden mit dem Untergurt aus GFK verschraubt. Die Enden der Diagonalseile, als einfache Seilkauschen ausgeführt, wurden ebenfalls frei beweglich am Stahlschuh bzw. am Kopf der A-förmigen Vertikalstäbe befestigt. Anhand dieses sehr einfachen Modells wurden die Bewegungsabläufe erprobt und die weitere Optimierung aller Elemente und Anschlüsse des Kragarms diskutiert.

### 7.2.5 Prototyp

Der erste Prototyp wurde 2001/2002 zur Prüfung und Verbesserung der Funktionalität aller Konstruktionselemente und zur experimentellen Untersuchung des Tragverhaltens der Gesamtstruktur hergestellt. Alle Konstruktionsdetails sind entsprechend den sich daraus ergebenden Anforderungen ausgebildet und erlauben einen Auf- und Abbau der gesamten Überdachung. Der mehrfache Auf- und Abbau des Prototyps an verschiedenen Standorten ermöglichte die Untersuchung und Verbesserung der Montage- und Demontagevorgänge. (siehe Anhang B)

#### 7.2.5.1 Geometrie und Materialwechsel

Die Geometrie der Kragarme des Prototyps entstand in einem iterativen Prozess aus gestalterischen, konstruktiven und statischen Überlegungen, in dem vorallem die Umsetzung und Prüfung des Aufbaukonzeptes maßgeblich war. Gegenüber dem Konzeptmodell wurden zwei entscheidende Veränderungen vorgenommen: einerseits wurde die Auskragung auf ca. 12 m vergrößert, andererseits fand ein Materialwechsel der elastisch verformbaren Untergurte von GFK zu Aluminium statt.

Die Erhöhung der Spannweite resultierte aus den Anforderungen der Fa. ARENA an eine mobile Überdachung insbesondere für mittlere Spannweiten. Auf den Einsatz von GFK wurde trotz der besseren Eignung des Werkstoffs für biegeelastisch verformte Elemente verzichtet, da Erfahrungen mit Entwicklungen anderer Leichtbauprojekte mit diesem Material gezeigt hatten, dass die Herstellung und Fügung von Konstruktionselementen aus GFK noch immer sehr aufwendig und kostenintensiv ist. Zusammen mit den hohen Materialpreisen für Harze und Fasern wäre somit keine wirtschaftlich interessante Lösung möglich gewesen. Damit fiel die Wahl auf Aluminium als Material für alle biege- und normkraftbeanspruchten Konstruktionsteile. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen für das Tragverhalten, Form und konstruktive Ausbildung werden im Abschnitt 7.3.1.4, S. 253 behandelt.



Abb. 7-11. Konzeptmodell während des Aufrichtvorgangs

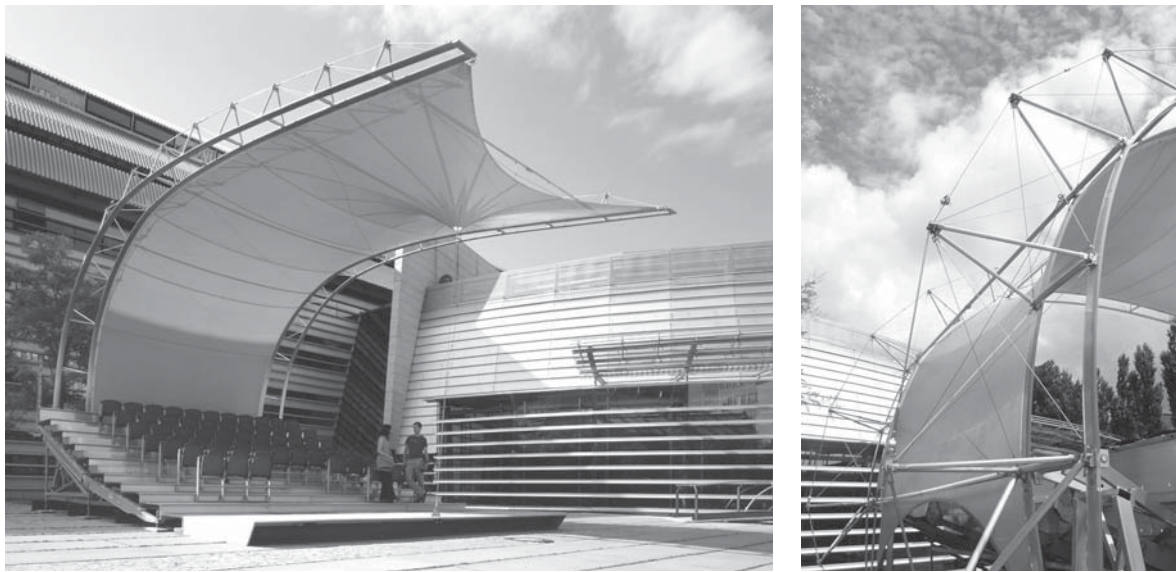


Abb. 7-12. Prototyp errichtet in München 2003

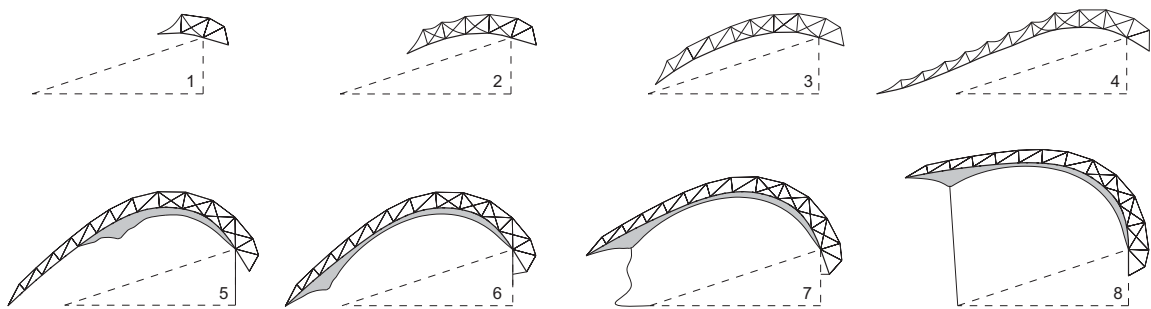


Abb. 7-13. Aufbausequenzen des Prototyps

### 7.2.5.2 Aufbauprozess

Die Vergrößerung der Spannweite der Überdachung, die notwendige vorgebogene Form des Kragträgers und weitere Anforderungen aus Transport und Montage führten zu der Entscheidung, den Träger in vier Segmente aufzuteilen. Dadurch konnten sowohl das geforderte Maximalgewicht jeder Komponente von 50kg, als auch sinnvolle Transportmaße eingehalten werden. Der Aufbau der Überdachung gliedert sich in vier Phasen (Abb. 7-13): Zunächst wird der Kragträger aus den vier Segmenten am Boden bzw. auf der Tribüne montiert (Schritt 1-4). Das letzte Segment wird zuerst auf den Drehpunkt am oberen Ende der Tribüne montiert und dann über ein Seil mit einer Winde am Tribünenfuß verbunden. Durch das Anziehen des Seils am hinteren Ende rotiert das Segment um den Drehpunkt und wird vorn angehoben, bis ein weiteres Segment angesetzt werden kann. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis der Kragträger in seiner vollen Länge montiert ist. Die Druckstäbe und Auskrenzungen zwischen den beiden Trägern werden angebracht und das System über ein Anziehen der Winde soweit angehoben, bis sich die endgültige Form der Kragträger unter Eigengewicht einstellt. In der zweiten Phase wird die Membran von hinten nach vorn durch eine Nut in den Rippen eingezogen und an den vorderen Endpunkten der Kragträger fixiert. (Schritt 5-6) Dann erfolgt das erste Vorspannen der Membran über das Anziehen der Spanngurte am hinteren Ende der Kragträger. In der dritten Phase wird das gesamte Dach durch das Anziehen des Seils am hinteren Ende der Träger weiter aufgerichtet, bis das Gesamtsystem seine Endposition erreicht (Schritt 7). Die hinteren Endpunkte der Kragträger werden mit Bolzen gesichert. In der vierten Phase erfolgt mit dem Anspannen des Vertikalseils die endgültige Vorspannung der Membran und der Kragträger (Schritt 8). Das Gesamtsystem wird damit ausreichend versteift und die Montage ist abgeschlossen.

### 7.2.5.3 Konstruktion

Der erste Prototyp im Maßstab 1:1 besteht aus einem Grundmodul der Überdachung mit 12 m Länge und 6 m Breite (Abb. 7-12). Zwischen den beiden Kragträgern spannt eine doppelt gekrümmte Membran aus PVC-Polyester. Über die vertikale Abspannung im Tiefpunkt der Membran wird die gesamte Konstruktion vorgespannt und stabilisiert. Um ein Aufstellen unabhängig von der Wahl des Tribüensystems zu erlauben, wurden zwei Standfüße für die Kragträger angefertigt, die keinen Teil des Überdachungssystems darstellen und einer weiteren Ausarbeitung bedürfen. Am Kopf der Standfüße befindet sich der vordere Auflager- und Drehpunkt der Kragträger. Die Träger sind durch Druckrohre im Abstand von ca. 3 m verbunden, die zusammen mit einer Auskrenzung aus Zuelementen die Aussteifung in Querrichtung des Grundmoduls gewährleisten.

### *Kragträger*

Die Kragträger selbst bestehen aus jeweils zwei Aluminium Strangpressprofilen, auf denen frei drehbar die A-förmige Vertikalstäbe aus Aluminiumrohren mit einem Durchmesser von 30 bzw. 40 mm befestigt sind. Kopf- und Fußpunkt der A-förmigen Vertikalstäbe sind mit zum Drehpunkt hin steigenden Diagonalseilen verbunden. Zusätzlich wurden in den letzten vier Feldern vor dem ersten Auflager gegenläufige Diagonalseile eingeführt, da während des Aufbauvorgangs ein Teil der zum Auflager hin steigenden Zugdiagonalen durch Druckkräfte beansprucht werden und ausfallen. Dieser Ausfall der Zugdiagonalen wird im Abschnitt 7.3.1.5, S. 258 näher untersucht und erläutert.

### *Abspannung/ Membran*

Das zur Versteifung der wandelbaren Träger notwendige Vorspannen der Konstruktion erfolgt über ein vertikales Abspannseil am Kragarmende. Durch das Anspannen dieses Vertikalseils erhalten die Untergurte ihre endgültige Form und alle Zugelemente der Kragträger ihre erforderliche Vorspannung. Gleichzeitig sichert das Abspannseil die Überdachung gegen abhebende Windlasten. Die grundsätzlich möglichen Membranformen, Anordnungsmöglichkeiten der Abspannung und die Auswirkung auf das Tragverhalten der Gesamtkonstruktion werden in Abschnitt 7.3.2 diskutiert. Die für den Prototypen gewählte Membranform vereint konstruktive und statische Aspekte. Die entlang der Kragarme kontinuierlich feste und an ihren Schmalseiten beweglich linear gelagert Membranfläche besitzt durch die Anordnung eines Tiefpunktes im vorderen Drittel des Daches eine ausreichende doppelte Krümmung. Der Tiefpunkt stabilisiert insbesondere diesen durch Windsog gefährdeten Bereich und ermöglicht die Nutzung eines großen Teils des Eigengewichts der Tribüne als Ballast für die Abspannung. Zum Anderen erlaubt er eine Sammlung und gezielte Ableitung des Niederschlags vom vorderen Teil der Membranfläche. Die Verbindung von stabilisierender Abspannung der Stützkonstruktion und der Membran lässt ein interaktives Tragwerk aus biegeweichen und biegesteifen Elementen entstehen. Die Ausbildung des Tiefpunktes erfordert einen Wechsel des Zuschnitts in der Fläche der Membran. Der hintere Teil besteht aus 5 parallelen Teilflächen, der Tiefpunkt wird aus 11 radial angeordneten Teilflächen gebildet (Abb. 7-12). Vorderer und hinterer Rand sind durch Polyestergurte verstärkt, die die Membrankräfte aus der Fläche aufnehmen und zu den Eckpunkten ableiten. Der Montageablauf erfordert ein Einziehen des Kederrandes der Membran in Längsrichtung der Kragträger. Durch die Verjüngung der Kragträger wird die Membran während des Einziehens in Querrichtung leicht angespannt. Das eigentliche Vorspannen der Membran kann jedoch nur über die Vorspannung der gurtverstärkten kurzen Ränder erfolgen bzw. über die Vorspannung des Vertikalseils des Tiefpunktes. Damit ist die Größenordnung der möglichen Vorspannung der Membran begrenzt.

### 7.3 Untersuchung des Tragverhaltens

Die Entwicklung und Herstellung des Prototyps diene vor allem der Erprobung des neuen Aufbaukonzepts und der Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der entwickelten Detaillösungen in der praktischen Anwendung. Geometrie und Ausbildung der einzelnen Tragelemente wurden diesen Aspekten untergeordnet. Ausgehend von der Konfiguration des Prototypen wird deshalb im Folgenden das Tragverhalten der wandelbaren Kragarme und der Membran in Parameterstudien untersucht, um Optimierungsmöglichkeiten für eine robuste und leicht herstellbare Lösung zu entwickeln, die eine flexible Anwendung des Überdachungssystem für verschiedene Standorte und Randbedingungen erlaubt. Ein weiteres Ziel der Analyse ist eine generelle Aussage über die Möglichkeit, elastische Vorverformungen für wandelbare Tragwerke und die Interaktion von Stützkonstruktion und Membran für die Tragwerksentwicklung bewusst einzusetzen.

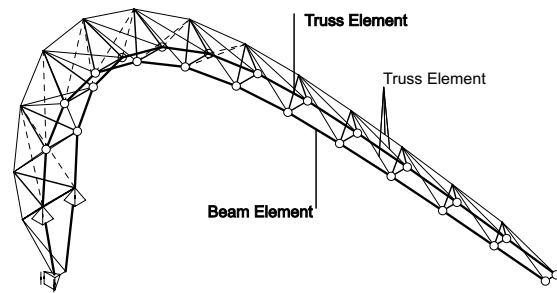
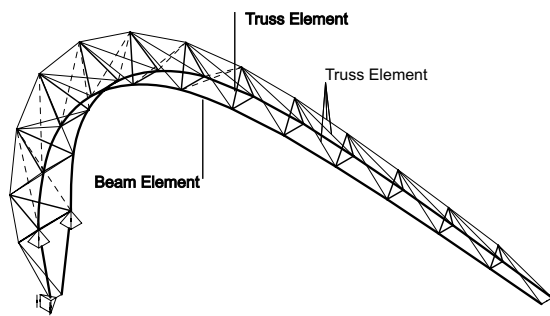
#### 7.3.1 Der wandelbare Kragträger

Die Konstruktion der Kragträger des Prototyps weist zwei besondere Eigenheiten auf:

- durchlaufende und gekrümmte Untergurte mit einem geringen Querschnitt
- Ausführung aller Diagonalstäbe bis zum Auflager als Zugelemente

Das Konzept, die Wandelbarkeit der Kragträger mit der elastischen Biegung der Untergurte zu verbinden, begrenzt abhängig vom gewählten Material die Querschnittshöhe der Untergurte und damit die weitere Beanspruchbarkeit der Kragträger. Durch die deutlich geringeren Grenzspannungen des neuen Materials Aluminium gegenüber GFK und die zu erwartenden hohe Spannungsanteile durch spätere Normalkraft- und Biegebeanspruchungen aus äußeren Belastungen der Träger wird eine Überprüfung dieses Grundkonzeptes erforderlich.

Um eine Beweglichkeit des Kragarms zu gewährleisten sind die Diagonalen als Zugseile geplant. Ein eventueller Ausfall dieser Elemente aufgrund von Geometrieänderung während des Aufrichtens oder durch große Verformung unter äußerer Last gefährdet die Stabilität der Träger. Ein Auskreuzen der Felder der Kragträger stellt keine befriedigende Lösung dar, da das erforderliche Nachspannen den Aufbauprozess verlangsamen und generell die Anzahl der Konstruktionselemente und Anschlüsse erhöhen würde. Somit wird die Verwendung eines Untergurtes aus geraden und gelenkig verbundenen Elementen (Abb. 7-15) untersucht und die Möglichkeit, durch eine Geometrieänderung die Anzahl der Zugdiagonalen zu minimieren.



**Abb. 7-14.** System A1- Kragträger mit durchlaufendem gekrümmtem Untergurt, System A2- Kragträger mit durchlaufendem geradem Untergurt

**Abb. 7-15.** System B1- Kragträger mit Untergurt aus gelenkig verbundenen geraden Stäben

Querschnittsbezeichnung Querschnittswerte	Material	E- Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Grenzspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Geometrie
Untergurt <sup>1</sup> A = 13,29cm <sup>2</sup> I <sub>y</sub> = 12,48cm <sup>4</sup> I <sub>z</sub> = 155,48cm <sup>4</sup>	Aluminium	70 000	235 <sup>2</sup>	
Zugdiagonalen A = 1,26cm <sup>2</sup>	Stahlseil	80 000	800	
Druckdiagonalen A = 2,01cm <sup>2</sup>	Edelstahl	210 000	500	
Obergurt A = 1,13cm <sup>2</sup>	Stahlseil	120 000	800	
A- förmige Vertikalstäbe A = 6,03cm <sup>2</sup> I <sub>y</sub> = I <sub>z</sub> = 7,99cm <sup>4</sup>	Aluminium	70 000	235	

**Tabelle 7-1.** Querschnittswerte der verwendeten Profile

1. vereinfachtes Ersatzprofil für das verwendete Strangpressprofil des Prototyps
2. max. Knickspannung als Stabelement 92.5 N/mm<sup>2</sup>, L = 1200 mm

### 7.3.1.1 Numerische Modellierung

Die Untersuchung beinhaltet eine nichtlineare numerische Analyse eines räumlichen Kragträgermodells mit Hilfe der FEM für die maßgebenden Belastungsfälle. Als Software wird in diesem Fall das Programm ABAQUS genutzt. Das räumliche Stabwerk der Kragträger wird mit sogenannten Beam-Elementen (6 Freiheitsgrade pro Knoten) bzw. Truss-Elementen (3 Freiheitsgrade pro Knoten) modelliert. Die Berechnung erfolgt nach der nichtlinearen Theorie (Berücksichtigung großer Verschiebungen und Rotationen) und berücksichtigt geometrisch und materiell nichtlineare Effekte (Abb. 7-16). Zur Verfolgung des nichtlinearen Verhaltens wird „Riks Method“<sup>1</sup> verwendet. Der in ABAQUS verwendete modifizierte Riks Algorithmus findet ein Gleichgewicht für die Struktur nach jeder Laststufe innerhalb einer Traglastuntersuchung. Durch die Kontrolle der Lasterhöhung in Abhängigkeit vom Gleichgewichtsverhalten der Struktur können auch Lösungen nach dem Stabilitätsversagen der Struktur gefunden werden. [29]

### 7.3.1.2 Materialkennwerte und Querschnitte

Für die Untersuchung wurden die Querschnittswerte der Profile des Prototypen bzw. für die Untergurte ein Querschnittswert eines vereinfachten Ersatzprofils verwendet. Für alle druckbeanspruchten geraden Tragelemente wurde das Stabilitätsversagen eine parabelförmige Vorverformung entsprechend der DIN 18800 berücksichtigt. Als Grenzspannung wird entsprechend den Angaben des Profilherstellers eine Zugfestigkeit von 235 N/mm<sup>2</sup> angenommen

Für die Untersuchungen an den Modellen mit gekrümmten, kontinuierlich durchlaufenden Untergurten wird aufgrund der Modellierung jedes Trägerabschnittes aus 7 in sich geraden Beam-Elementen (mit 6 Verbindungsknoten), die der gekrümmten Geometrie des Untergurtes folgen, auf das Aufbringen einer Imperfektion verzichtet. Die zugbeanspruchten Elemente des Obergurtes und der Diagonalen werden als Truss-Elemente modelliert, die bei Druckbeanspruchung ausfallen. Ausgefallene Stäbe werden durch ABAQUS bei einer möglich Zugbeanspruchung in einem späteren Iterationsschritt automatisch wieder reaktiviert.

### 7.3.1.3 Lastannahmen

Eine typische Eigenschaft von Leichtbauten ist ihre Anfälligkeit gegenüber Windbelastungen bzw. asymmetrischen Schneelasten. Aufgrund der geplanten Einsatzmöglichkeit der Überdachung im

---

1. Riks Methode beinhaltet die Belastung als eine Unbekannte im Lösungsansatz. Dieser Ansatz ermöglicht Lösungen auch für instabile Zustände der Struktur.[51]

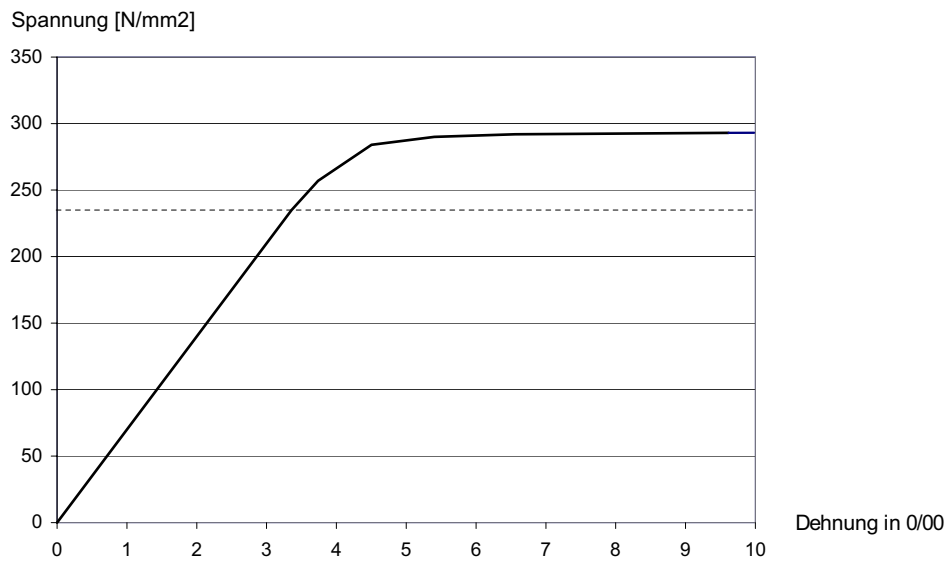


Abb. 7-16. Nichtlineare Spannungs- Dehnungslinie der verwendeten Aluminiumlegierung

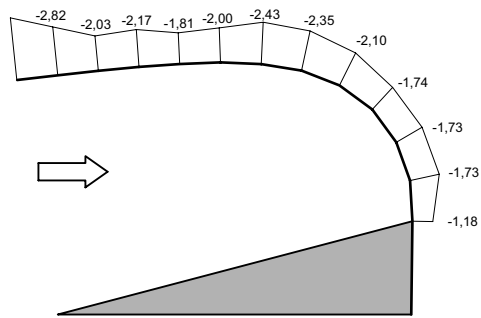


Abb. 7-17. Druckbeiwerte für eine orthogonale Anströmung von vorn für ein Gesamtmodell aus drei Modulen

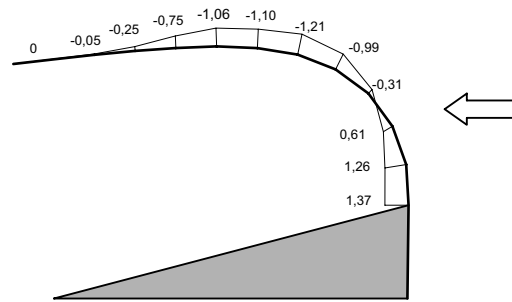


Abb. 7-18. Druckbeiwerte für eine orthogonale Anströmung von hinter für ein Gesamtmodell aus drei Modulen

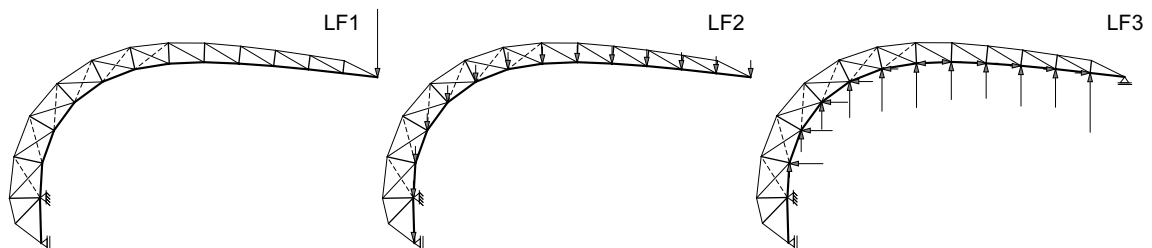


Abb. 7-19. Untersuchte Lastfälle: LF1- Vorspannung Kragträger, LF2- Eigengewicht, LF3- Windlast, Wind von vorn



Sommerhalbjahr bzw. in den Übergangszeiten wird auf eine Betrachtung von Schneelastfällen verzichtet. Für die Vordimensionierung des Prototypen wurden Windkanalversuche zur Ermittlung der Druckbeiwerte durchgeführt. Es wurden zwei Fälle untersucht:

- orthogonale Anströmung eines Modells aus drei Grundmodulen von vorn
- orthogonale Anströmung eines Modells aus drei Grundmodulen von hinten

Die Verläufe der Druckbeiwerte weisen insbesondere bei einer Anströmung von vorne hohe Sogbeiwerte im ersten Drittel der Membranüberdachung auf. Zur Stabilisierung der Membran und der Kragträger gegenüber dieser Belastung ist eine ausreichend hohe Vorspannung des vertikalen Abspannseils notwendig. Zusammen mit einer gleichmäßigen Belastung aus dem Eigengewicht der Gesamtkonstruktion können drei maßgebende Lastfälle definiert werden:

- LF1: Vorspannung - Einzellast am Kragarmende
- LF2: Eigengewicht - gleichmäßige verteilte Einzellasten in allen unteren Knoten des Fachwerks
- LF3: Windbeanspruchung von vorn - ungleichmäßig verteilte Einzellasten

#### 7.3.1.4 Effekt der Vorbiegung der Untergurte

Das ursprüngliche Konzept der wandelbaren Kragträger basierte auf der Annahme einer elastischen Vorbiegung der Untergurte aus einer geraden Ausgangs- in eine gekrümmte Endlage. Dadurch wird ein großer Anteil der zulässigen Spannungen beansprucht, der die Tragfähigkeit der Kragträger im Endzustand einschränkt. Die Größe des Spannungswertes aus reiner Biegung kann entsprechend dem Navierschen Geradliniengesetz [38] aus dem linearen Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul des Materials, Krümmungsradius und Abstand der beanspruchten Faser des Querschnitts von der Nulllinie bestimmt werden:

$$\sigma(z) = E \cdot z \cdot \frac{d_{\alpha}}{d_x} = E \cdot z \cdot \frac{1}{R} \quad (7-1.)$$

Mit der Festlegung der Krümmungsradien der Endform durch geometrische Anforderungen (siehe 7.2.1 S. 239) und einem definierten Spannungsanteil aus der Vorbiegung können bei der Annahme reiner Biegebeanspruchung und der sich daraus ergebenden Übereinstimmung von Nulllinie und Schwerachse überschlägig Querschnittshöhen für verschiedene Materialien ermittelt werden. Zur Ermittlung der Querschnittshöhe des Konzeptmodells mit Untergurten aus GFK wurden ca. 30% der

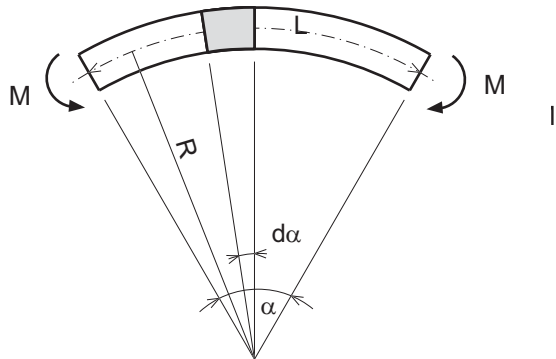


Abb. 7-20. Biegebeanspruchung eines Stabes

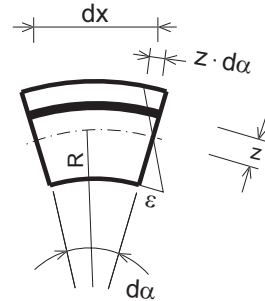


Abb. 7-21. Dehnung im Abstand z von der Stabachse

Material	Kleinsten Radius nach dem Aufrichten [mm]	E- Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Anteil aus Vorbiegung (30%) [N/mm <sup>2</sup> ]	max. Querschnittshöhe
GFK	3854	17 000	207	62	28.0
Aluminium		70 000	235	71	8.0

Tabelle 7-2. Materialbezogene max. Querschnittshöhen für einen konstanten Anteil von 30 % der Spannungsanteile aus der Vorbiegung an der max. Grenzspannung

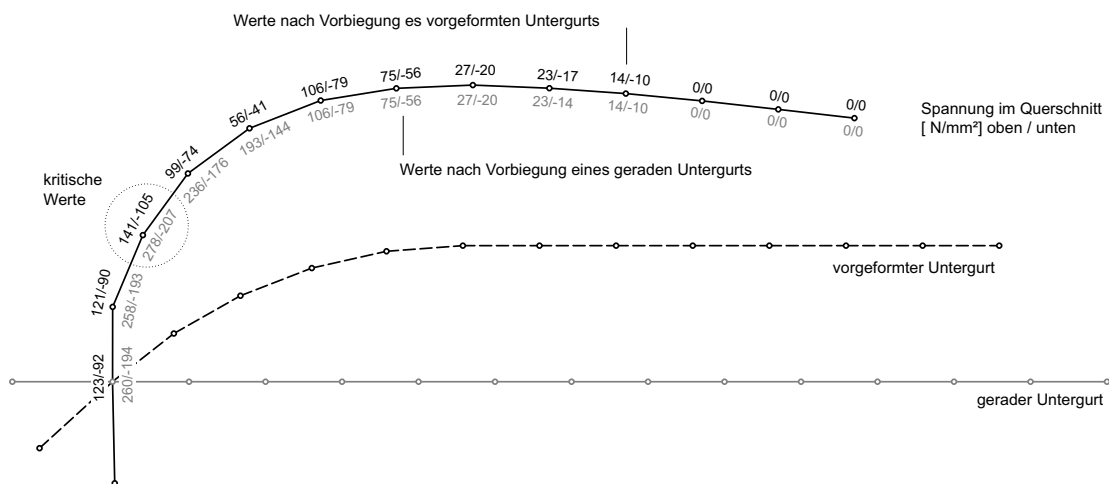


Abb. 7-22. Spannungswerte aus der Vorbiegung eines Untergurtes

elastischen Spannungen als maximaler Werte für den Spannungsanteil aus der Vorbiegung festgelegt. Daraus ergibt sich bei einer Annahme einer reinen Biegebeanspruchung des Querschnitts eine mögliche Querschnittshöhe von 28 mm. Nach dem Materialwechsel von GFK zu Aluminium führt der gleiche Anteil zu einer maximalen Querschnittshöhe von ca. 8 mm (Tabelle 7-2).

Ein Querschnitt dieser Höhe besitzt jedoch keine ausreichende Stabilität unter Druckbeanspruchung. Um die gleiche Endform des Kragträgers zu erreichen und das aus konstruktiven und gestalterischen Gründen vorteilhafte Grundkonzept der kontinuierlich gekrümmter Untergurte beizubehalten, wird deshalb die Verwendung von vorgeformten Untergurten geprüft. Zwei der vier Segmente des Kragträgers werden mit einer Vorkrümmung versehen, die die Spannungsanteile in den Untergurten durch das Aufrichten der Kragträger auf 60% der Grenzspannungen reduziert. Abbildung 7-22 zeigt das Profil eines Untergurtes vor und nach dem Aufrichten aus dem geraden bzw. vorverformten Zustand mit den dazugehörigen Spannungswerten aus der jeweils entstehenden Biegebelastung. Die Werte gelten für den in Tabelle 7-1 dargestellten Querschnitt. Der Effekt der Vorbiegung wird durch eine nichtlineare Analyse eines Kragträgers unter Gleichlast (Lastfall 1) mit und ohne den dargestellten Anteilen der Spannung aus der Vorbiegung der vorgekrümmten Untergurte betrachtet. Die Ergebnisse in Abbildung 7-23 zeigen eine Reduzierung der Traglast um 30 % (von 17.3 kN auf 12.0 kN) bei einer Vorbiegung der Untergurte. Die Anfangssteifigkeit (definiert als der Anstieg der Traglastkurve im ersten Lastschritt) des Systems verändert sich jedoch nicht. Ohne Vorbiegung versagt das System aufgrund des Erreichens der Fließgrenze des Obergurts. Bei einer Reduktion der Grenzspannung durch Vorbiegung führt das Stabilitätsversagen der Untergurte zum Versagen des Kragträgers.

Der Effekt der Vorbiegung wird ebenfalls für einen Kragträger mit gekreuzten Zugdiagonalen untersucht. Durch das Auskreuzen der Felder und die daraus folgende Versteifung des Kragträgers zum Auflager hin wird eine gleichmäßigere Beanspruchung aller Tragelemente in diesem Bereich erwartet. Das Resultat der Berechnung in Abbildung 7-24 zeigt erneut eine deutliche Reduzierung der Traglast des Kragträgers um 37 % für das System mit Vorbiegung. Die Anfangssteifigkeit des Systems bleibt unverändert. Anhand der Verformungsfigur des Systems ist nun jedoch das Stabilitätsversagen der Untergurte deutlich erkennbar.

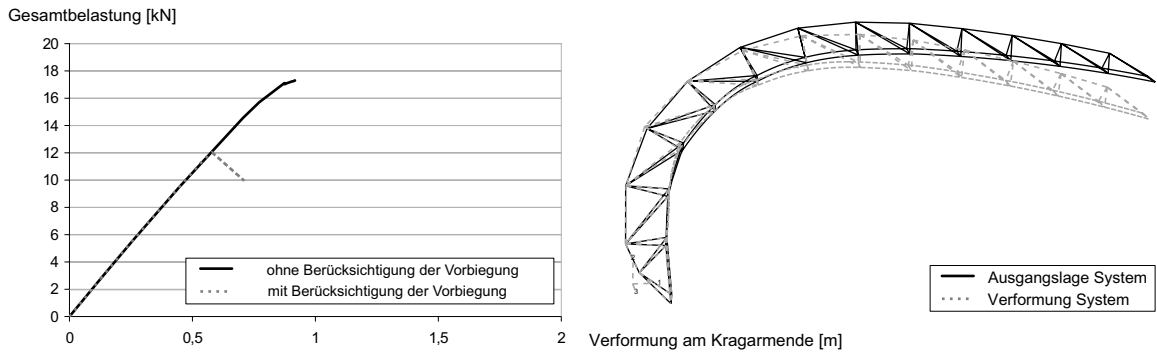


Abb. 7-23. Effekt der Vorbiegung auf die Traglast, System A1 ohne Auskreuzung, Lastfall 2

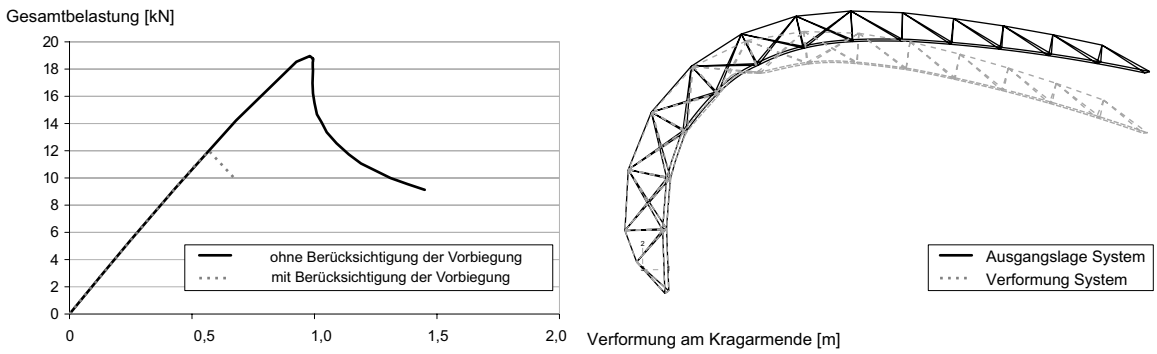


Abb. 7-24. Effekt der Vorbiegung auf die Traglast, System A1 mit Auskreuzung, Lastfall 2

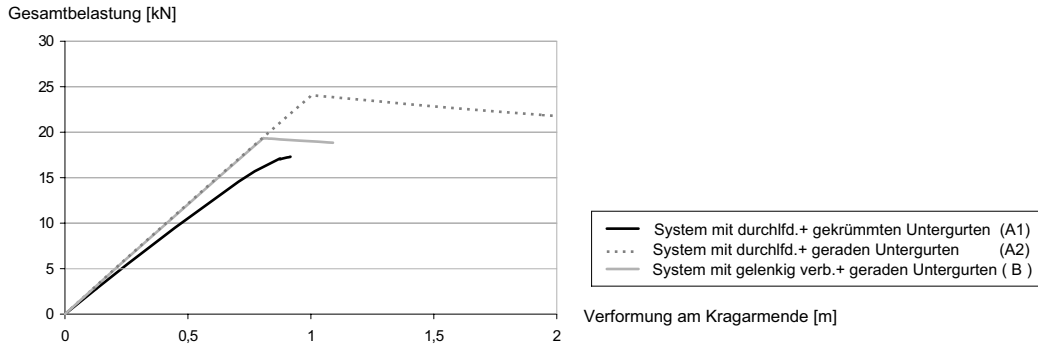


Abb. 7-25. Effekt auf die max. Traglast verschiedener Arten von Untergurten LF2

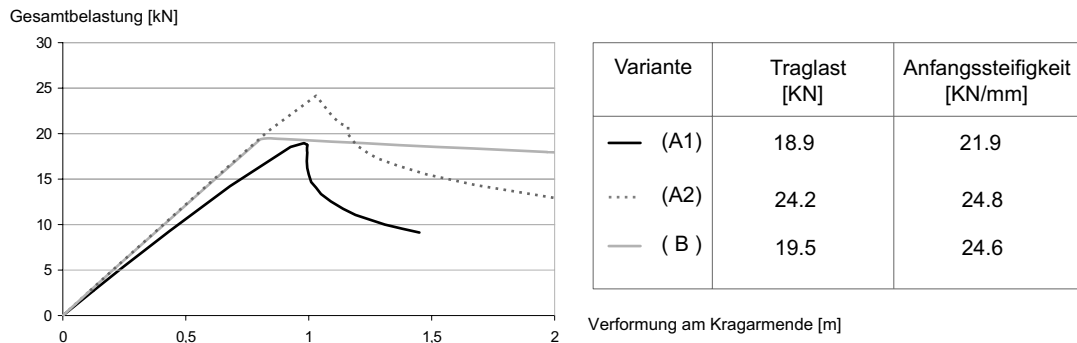


Abb. 7-26. Effekt auf die max. Traglast verschiedener Arten von Untergurten, Träger mit Auskreuzungen LF2

Die Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss des Stabilitätsproblems der druckbeanspruchten Untergurte auf die Traglast der Kragträger. Obwohl die Kapazität der Untergurte für Normalspannungen selbst nach der Berücksichtigung der Biegespannungen aus Vorbiegung eine wesentlich höhere Normalkraftbeanspruchung gegenüber dem Obergurt erlaubt (Untergurt: 2 Querschnitte mit  $A=1336.7 \text{ mm}^2$ ;  $N = 2 \cdot 1333 \text{ mm}^2 \cdot (235 - 141) \text{ N/m}^2 = 251 \text{ kN}$ , Obergurt: 1 Querschnitt mit  $A = 113 \text{ mm}^2$ ;  $N = 133 \text{ mm}^2 \cdot 800 \text{ N/m}^2 = 90 \text{ kN}$ ), führt ihr Versagen zur Beschränkung der Traglast der Gesamtstruktur. Ursache hierfür ist die starke Krümmung der kontinuierlich durchlaufenden Druckgurte in den letzten fünf Feldern vor dem Auflager. Die Verformung des Gesamtsystems unter der Belastung vergrößert die Krümmung der Druckgurte insbesondere in diesem Bereich und führt damit zu höheren Biegespannungen. Damit unterscheidet sich der in seiner Gesamtform gekrümmte Fachwerkträger in seinem Tragverhalten grundsätzlich von vergleichbaren geraden Systemen.

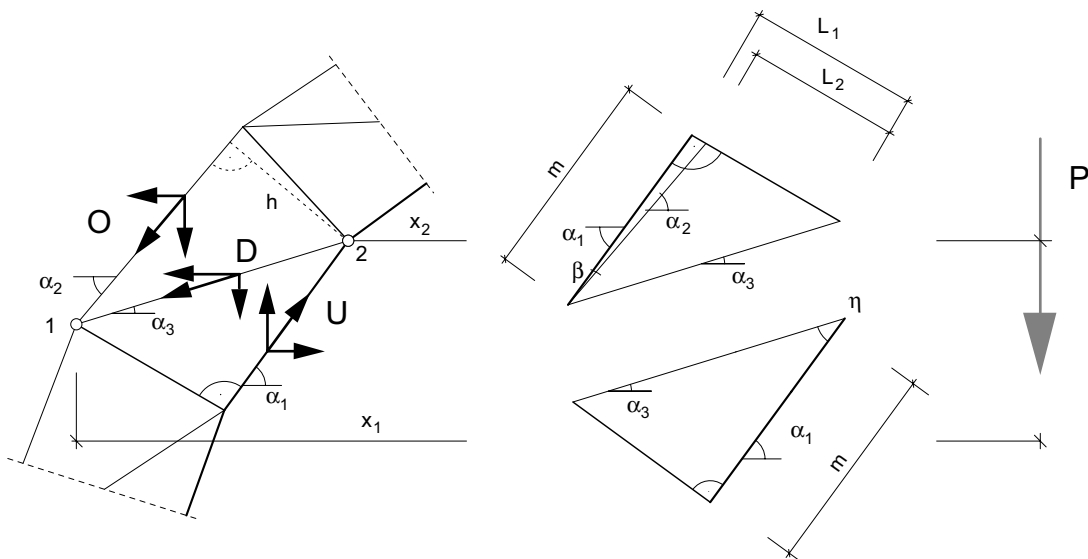
Diese Erkenntnis führt zu der Entscheidung, das Tragverhalten der oben beschriebenen Systeme mit einem System zu vergleichen, bei dem die Untergurte aus geraden und gelenkig verbundenen Stäben bestehen (Polygonzug). Ein erster grundlegender Unterschied dieser Variante ist das Fehlen des Spannungsanteils aus der Vorbiegung. Dafür ist das Stabilitätsversagen eines Einzelelementes des Stabzuges von großer Bedeutung für die Traglast des Gesamtsystems. Die sich daraus ergebende Grenzspannung (Tab. 7-1 Seite 250) ist geringfügig kleiner als der verbleibende Spannungsanteil der durch Vorbiegung beanspruchten durchlaufenden Untergurte. Der Spannungswert für die kritischste Stelle im dritten Feld vor dem Auflager beträgt  $\sigma = 235 - 141 = 94 \text{ N/mm}^2$ . Abbildung 7-25 zeigt das Tragverhalten beider Systeme unter einer gleichförmigen Belastung (LF 2). Zum Vergleich wurde ebenfalls das Tragverhalten eines Systems mit geraden und biegesteif durchlaufenden Untergurten abgebildet.

Die Resultate zeigen, dass die Verwendung von geraden und gelenkig verbundenen Stäben für die Untergurte zu einer Erhöhung der Traglast des Gesamtsystems von fast 12 % und einer Erhöhung der Anfangsteifigkeit von 11 % führt. Für das System mit geraden und biegesteif verbundenen Stäben für die Untergurte erhöht sich die Traglast noch deutlicher auf 39 % und die Anfangsteifigkeit auf 12%. Die Tendenz der Ergebnisse legt eine weitere Untersuchung der einzelnen Parameter zu ihrer Quantifizierung nahe. Zuerst werden die gleichen Systeme mit Auskreuzungen in den letzten sechs Feldern untersucht. Die Ergebnisse in Abbildung 7-26 zeigen einen relativ geringen Unterschied in der erreichbaren Traglast. Ein Unterschied ist das Verhalten der Systeme nach dem Stabilitätsversagen, das als eine Art Redundanz interpretiert werden kann.

Insgesamt zeigt sich, dass die Verwendung gerader gelenkig verbundener Stäbe für die Untergurte, trotz der Berücksichtigung des Stabilitätsversagens des Einzelstabs zu einer Erhöhung der Traglast gegenüber den Systemen mit durchlaufenden vorgebogenen Untergurten führt. Neben der geringen Erhöhung der Traglast liegt der größte Vorteil des Einsatzes eines gelenkig verbundenen Stabzuges in der Möglichkeit, die Querschnittsgröße zu erhöhen und die für die Vorbiegung optimierte Querschnittsform der nun überwiegenden Normalkraftbeanspruchung anzupassen. Somit würde ein höherer und damit eher quadratischer Querschnitt der Untergurte die Traglast beträchtlich steigern. Andererseits führt das Zurückgehen zu einem wandelbaren Tragwerk mit gelenkig verbundenen Elementen (Elementkette) zu einer deutlichen Reduzierung der Redundanz des Gesamtsystems, das auf eine lokale Beschädigungen bzw. Versagen mit einem plötzlichen globalen Versagen reagiert. Damit erhält das Problem der ausfallenden Zugdiagonalen weitere Bedeutung.

### 7.3.1.5 Ausfall der Zugdiagonalen

Der modifizierte Aufrichtungsprozess des Prototypen beinhaltet das schrittweise Anspannen der Zugdiagonalen und des Obergurtes, beginnend mit den Feldern vom Auflager zur Kragarmspitze hin. Beim Aufbau des Prototypen zeigte sich, dass bedingt durch Ausführungstoleranzen ein Teil der Diagonalen ausfiel. Es werden daher kurz die geometrischen Bedingungen untersucht, die zu einem Ausfall der Zugdiagonalen führen können. Zu diesem Zweck wird der Kragträger vereinfacht als ebenes Fachwerk betrachtet und die Stabkräfte über das Freischneiden der Knoten (Rittersches Schnittverfahren) ermittelt.



**Abb. 7-27.** Ermittlung der Inneren Stabkräfte in einem Feld des Kragträgers, Einzellast am Kragarmende (LF1)

Abbildung 7-27 zeigt ein Feld im letzten Drittel des Kragarms mit Obergurt (O), Untergurt (U), zwei Vertikalstäben (A-förmig) und einer Zugdiagonalen (D). Die Längen der Vertikalstäbe betragen  $L_1$  und  $L_2$ , die Neigung des Untergurtes, Obergurtes und der Zugdiagonalen  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , die Länge des Druckgurtes  $m$ . Bei einem Schnitt durch das Feld ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen für vertikale und horizontale Kräfte mit U, O und D als Stabkräfte:

$$\Sigma V: \quad U \sin \alpha_1 - O \sin \alpha_2 - D \sin \alpha_3 = P \quad (7-2.)$$

$$\Sigma H: \quad U \cos \alpha_1 = O \cos \alpha_2 - D \cos \alpha_3 \quad (7-3.)$$

Die äußere Last  $P$  greift im Abstand  $x_2$  von Punkt 2 an. In Abhängigkeit von  $x_2$  kann der Abstand des Punktes 1 zur angreifenden Kraft  $P$  wie folgt bestimmt werden:

$$: \quad x_1 = x_2 + m \cdot \cos \alpha_1 + L_1 \cdot \sin \alpha_3 \quad (7-4.)$$

Aus dem Momentengleichgewicht um Punkt 1 und Punkt 2 lassen sich die Kräfte im Obergurt (O) und Untergurt (U) in Abhängigkeit von der äußeren Kraft  $P$  ermitteln. Zur Vereinfachung wird  $L_2 = h$  gesetzt, damit ergibt sich:

$$\Sigma M_1: \quad U \cdot L_1 = P \cdot x_1 \quad \text{oder} \quad U = P \cdot \frac{x_1}{L_1} \quad (7-5.)$$

$$\Sigma M_2: \quad O \cdot L_2 = P \cdot x_2 \quad \text{oder} \quad O = P \cdot \frac{x_2}{L_2} \quad (7-6.)$$

Abbildung (Abb. 7-27) zeigt den Fall  $L_1 > L_2$ . Die oben aufgestellten Gleichungen gelten jedoch auch für Fälle, in denen  $L_1 \leq L_2$  ist. Die Vorzeichen der Kräfte im Ober- und Untergurt ändern sich dabei nicht zwingend. Für einen vorgegeben Winkel  $\alpha_1$  können die Winkel  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  aus  $L_1$  und  $L_2$  über Winkelfunktionen ermittelt werden. Mit Hilfe der Beziehungen zwischen den Winkeln  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  lässt sich die der Effekt einer Änderung der Längen des Vertikalstabs  $L_2$  auf die Diagonalkraft (D) untersuchen. Abbildung 7-30 zeigt die Resultate für ein Fallbeispiel mit einer Länge des Untergurtes  $m = 1.2$  m, Länge des Vertikalstabs  $L_1 = 0.75$  m, Winkel  $\alpha_1 = 60^\circ$ , Kraft  $P = 10$  KN und Abstand  $x_2 = 10$  m. Für verschiedene Längen zwischen  $0.5 L_1$  und  $1.5 L_1$  variiert die resultierende Kraft in der Diagonale von Zug bei  $L_1 \leq L_2$  zu Druck für  $L_1 > L_2$ .

---

1. die daraus entstehende geringfügige Abweichung der Ergebnisse ist für die grundlegende Aussage vernachlässigbar

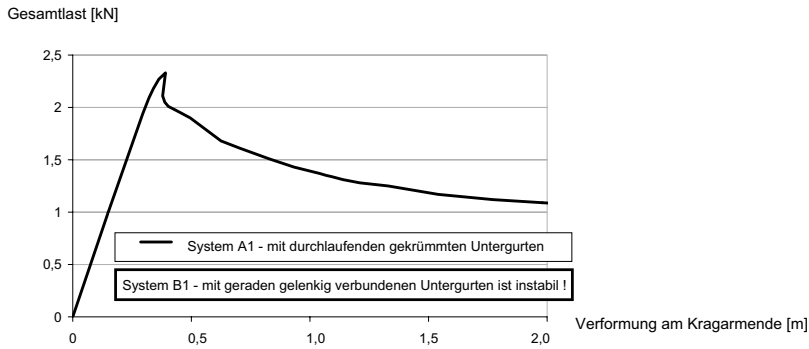
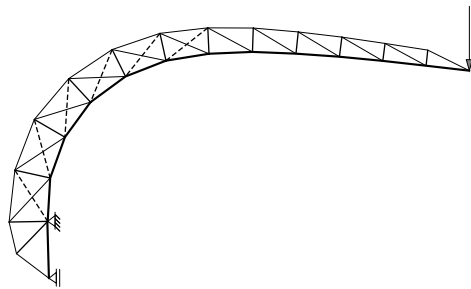
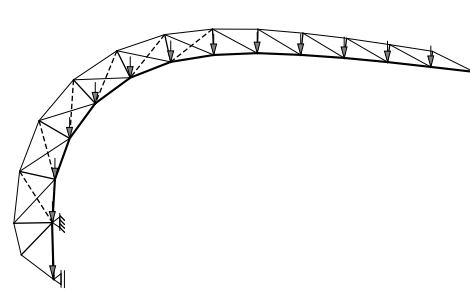


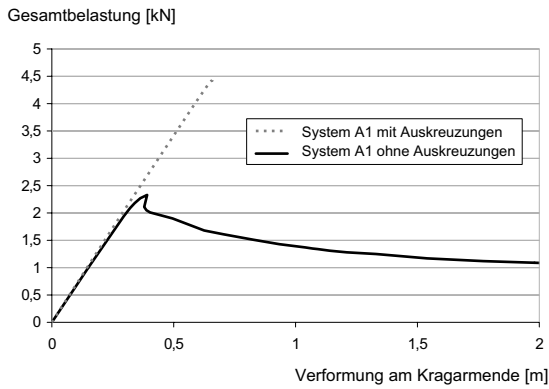
Abb. 7-28. Tragverhalten der Systeme A1 und B1, ohne Auskreuzungen im LF 1: Vorspannung



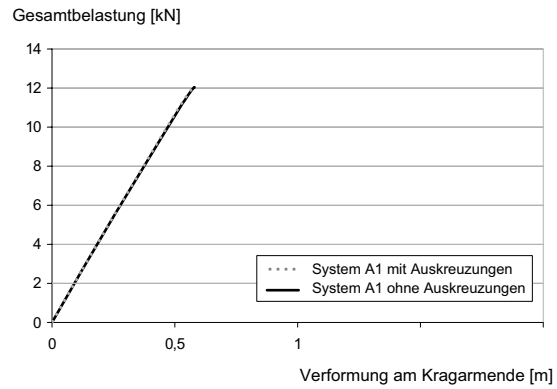
Lastfall 1: Einzellast am Kragarmende



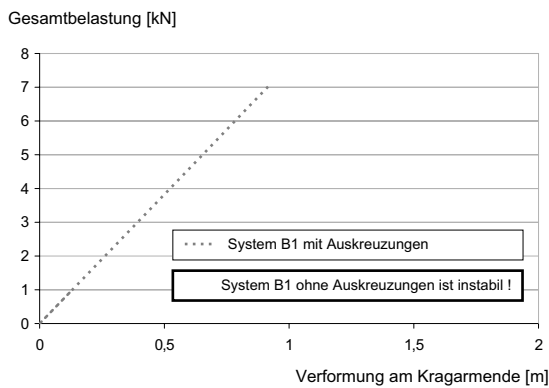
Lastfall 2: gleichförmige Last



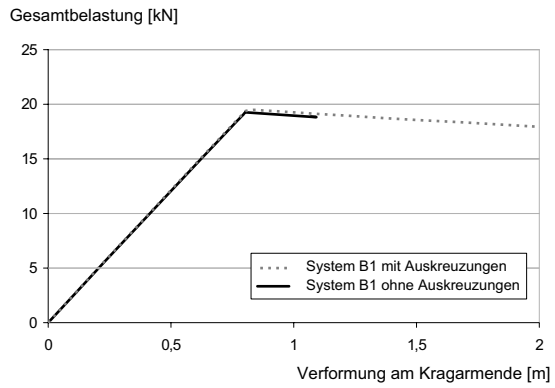
System A: Erhöhung Traglast 90%, Anfangssteifigkeit 3.7%



System A: keine Erhöhung Traglast, Anfangssteifigkeit 0.1%



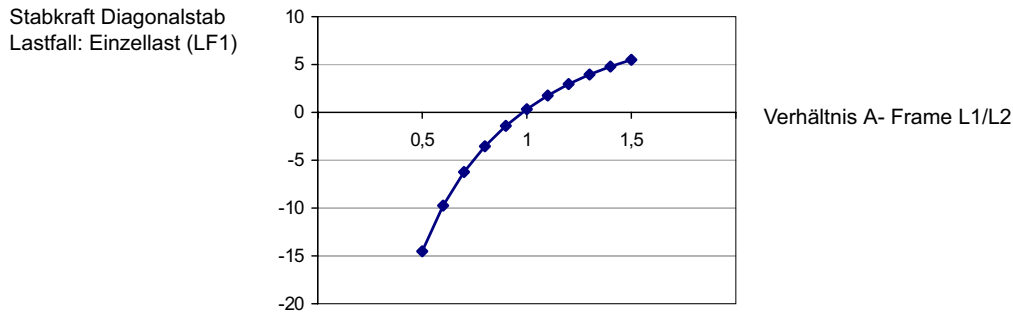
System B



System B: Erhöhung Traglast 0.7%, Anfangssteifigkeit 1.2%

Abb. 7-29. Effekte von Auskreuzungen auf die Traglast im LF 1 und 2





**Abb. 7-30.** Effekt der Änderung der A- Framehöhe auf die Stabkraft im Diagonalstab

Ähnliche Resultate wurden erzielt bei veränderten Verhältnissen zwischen  $L_1$  und  $m$  bzw. verschiedenen Neigungswinkeln  $\alpha_1$ . Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass offensichtlich nur für eine konstante Höhe der A-förmigen Vertikalstäbe bzw. einen Anstieg ihrer Höhe zum Kragarmende hin alle Diagonalen zugbeansprucht werden. Eine Abnahme der Höhe zum Kragarmende hin führt dagegen zu Druckbeanspruchungen in den Diagonalen. Generell könnten die relativ geringen Druckkräfte durch schlanke Druckstäbe aufgenommen werden. Um jedoch eine einfache Wandelbarkeit der Träger bzw. ein minimales Transportvolumen zu gewährleisten, soll die Ausführung der Diagonalstäbe als Seile beibehalten werden. Damit besitzt die Vermeidung von Druckbeanspruchungen während des Aufbauvorgangs nach der Versteifung und unter späterer Belastung eine große Bedeutung.

Um den Effekt des Ausfalls von Zugdiagonalen zu quantifizieren werden weitere Traglastuntersuchungen für ein System mit durchlaufenden gekrümmten Untergurten (System A1) und für ein System mit Untergurten aus gelenkig verbundenen geraden Einzelstäben vorgenommen (System B1). Als Belastung wird eine Einzellast am Kragarmende gewählt (LF1), die das Vorspannen und Versteifen des Systems simuliert. Eine lineare Voruntersuchung eines ebenen Fachwerks gleicher Geometrie zeigte, dass im zweiten Feld über dem Auflager die Diagonale eine Druckkraft erhält. Die nichtlineare Analyse des räumlichen Modells des Kragträgers bestätigt dieses Ergebnis. Abbildung 7-28 zeigt die Last-Verformungskurve des Systems mit durchlaufenden gekrümmten Untergurten. In diesem System führt der Ausfall der Zugdiagonalen zu einer deutlichen Erhöhung der effektiven Knicklänge der Untergurte in diesem Bereich und in Folge zu einem Versagen des Gesamtsystems. Das System mit Untergurten aus gelenkig verbundenen geraden Stäben ist aufgrund der ausfallenden Zugdiagonalen kinematisch und versagt sofort.

Für die Realisierung des Prototypen wurde das Problem durch die Anordnung von Auskreuzungen in den letzten vier Feldern vor dem Auflager gelöst. Bei einem Druckausfall der zum Auflager steigenden Diagonalen erhalten diese gegenläufigen Diagonalen Zugkräfte und sichern die Formstabilität der Felder. Die Auswirkungen des Einsatzes von Auskreuzungen auf beide oben beschriebene Systeme für Lastfall 1 (Einzellast am Kragarmende) und Lastfall 2 (gleichmäßige Belastung des Kragarms) zeigt Abbildung 7-29.

Die Untersuchungen zeigen, dass für beide Systeme im Lastfall 2 die Auskreuzungen keine bzw. keine nennenswerte Erhöhung der Traglast oder der Anfangssteifigkeit verursachen, da die Belastung in allen zum Auflager hin steigenden Diagonalen Zugkräfte bewirkt. Allerdings sind die Zugkräfte in den letzten Diagonalen sehr gering. Die gegenläufigen Diagonalen erhöhen die Anfangssteifigkeit für das System B unwesentlich, für System A vernachlässigbar. Im Lastfall 1 besitzen die Auskreuzungen einen großen Einfluss auf das Tragverhalten beider Systeme. Für System A1 ergibt sich eine deutliche Erhöhung der Traglast (90%) und eine Verbesserung der Anfangssteifigkeit bei der Verwendung von Auskreuzungen. Trotzdem ist die maximale Traglast des Systems für diesen Lastfall deutlich geringer als für System B1. Für System B1 sind die Auskreuzungen Voraussetzung für die Stabilität des System.

Obwohl eine gleichförmige Belastung ausschließlich Zugkräfte in den steigenden Diagonalen erzeugt, zeigen die relativ geringen Werte in den letzten Diagonalen vor dem Auflager, dass ein Verzicht auf Auskreuzungen für die Geometrie des Prototypen nicht möglich ist. Schon eine geringe Einzellast am Kragarmende verursacht deutliche höhere Druckkräfte, die zu einem Versagen des Systems führen würden. Die gegenläufigen Diagonalen sind für das System A1 Voraussetzung für das Erreichen einer akzeptablen Traglast, für das System B1 sind sie notwendige Elemente für ein stabiles Gesamtsystem. Die Vermeidung von Auskreuzungen ist nur durch eine Geometrieänderung oder die Einführung von Druckdiagonalen erreichbar.

### 7.3.1.6 Geometrische Optimierung

Eine Änderung der Geometrie, die den ausschließlichen Einsatz von Zugdiagonalen vom Auflager bis zum Kragarmende ermöglicht, würde die Konstruktion vereinfachen und den Montagevorgang beschleunigen. Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen ein sehr unterschiedliches Tragverhalten der Kragarme bei unterschiedlichen Beanspruchungen. Als kritischer Lastfall für die Stabilität und Traglast erweist sich Lastfall 1 (Einzellast am Kragarmende), der gleichzeitig aber für die Versteifung des wandelbaren Tragwerks gegenüber Windlasten von großer Bedeutung ist. Deshalb ist eine geometrische Optimierung der Kragträger insbesondere für diese Belastungen sinnvoll.

Zur Veranschaulichung der Abhängigkeit von Geometrieänderung und Tragverhalten wurde unter der Verwendung des Tabellenkalkulationsprogrammes EXCEL eine Optimierungsroutine entwickelt. Die Routine kontrolliert die Größe der Diagonalkräfte durch die Variation der Geometrie. Grundlage bildet eine lineare Berechnung aller Stabkräfte nach der Fachwerktheorie. Das Gleichgewicht der Knotenkräfte wird zur Bestimmung der inneren Stabkräfte unter einer durch den Anwender definierten externen Belastung der Knoten verwendet. Die Geometrie (Kontur) des Untergurts wird als gegeben angenommen. Die Routine kontrolliert die Höhe der Vertikalstäbe (A-förmig) um die ebenfalls durch den Anwender vorgegebenen Werte (Betrag, Vorzeichen etc.) einzuhalten.

In diesem Zusammenhang wird die Routine verwendet, um für die Diagonalen in den ersten 8 Feldern vom Kragarmende aus konstante Kräfte zu erzeugen, mit einem Betrag annähernd doppelt so groß wie die am Kragarmende angreifende Last. In den letzten vier Feldern vor dem Auflager wird die Kraft in den Diagonalen auf 5% der Obergurtkraft in diesen Feldern begrenzt. Das Resultat der geometrischen Optimierung nach diesen Vorgaben zeigt Abbildung 7-31. Die Höhe der A-förmigen Vertikalstäbe bleibt annähernd konstant über die gesamte Länge des Kragträgers. Das Resultat bestätigt die Erkenntnisse vorheriger Untersuchungen. (siehe Ausfall der Zugdiagonalen, Seite 258).

Die Überprüfung des Tragverhaltens des Kragträgers mit der neuen Geometrie (System C) in einer nichtlinearen Berechnung eines dreidimensionalen Modells für den Lastfall 1 (Einzellast am Kragarmende) zeigt das erwartete Ergebnis. (Abb. 7-32) Alle Diagonalen sind zugbeansprucht. Das Hinzufügen von Auskreuzungen verbessert die Tragfähigkeit nur unwesentlich (3.4%). Einziger Vorteil des Hinzufügen von Auskreuzungen ist die Verbesserung des Verhaltens des Systems nach dem Versagenspunkt. Das System versagt aufgrund des Erreichens der Grenzzugkraft des Obergurts.

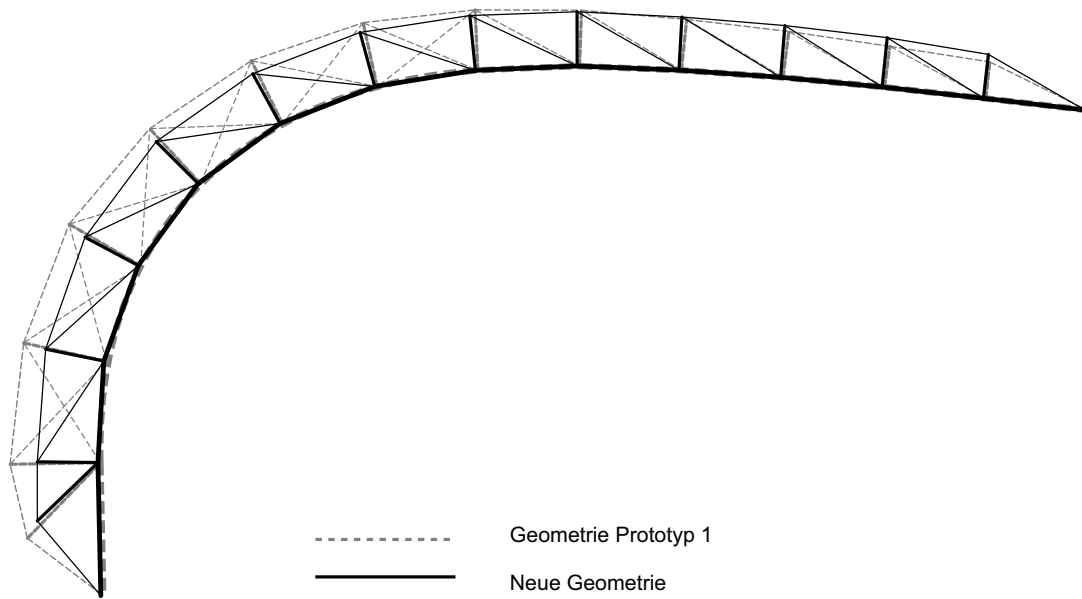


Abb. 7-31. Geometrie des Prototypen und modifizierte Geometrie

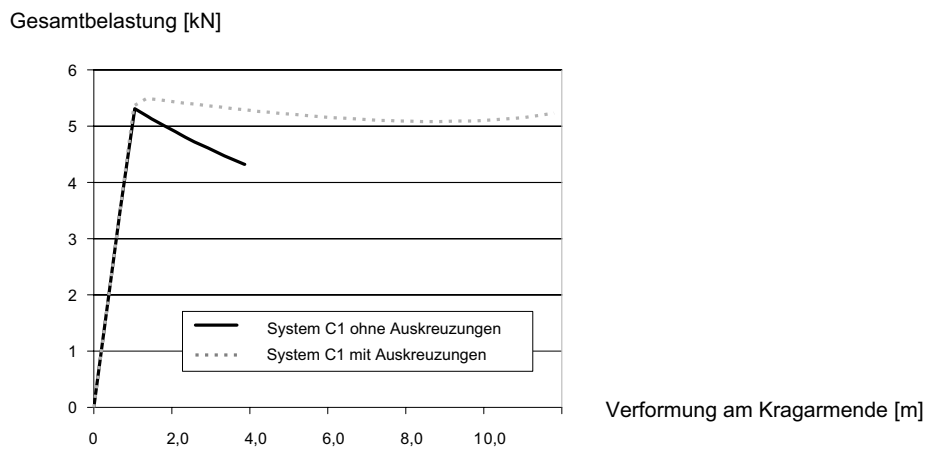


Abb. 7-32. Tragverhalten des Systems mit neuer Geometrie, LF1: Vorspannung

### 7.3.1.7 Tragverhalten unter Windlast

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass das Tragverhalten unter Eigengewicht oder eventuellen Schneelasten als unkritisch in Bezug auf den Druckausfall von Zugelementen angesehen werden kann. Windlasten, insbesondere Windbeanspruchungen von vorne (siehe Abb. 7-17 S.252), stellen dagegen einen sehr kritischen Lastfall dar. Für diesen Fall muss eine ausreichende Vorspannung der Zugglieder einen Druckausfall und damit eine Instabilität des Systems bzw. eine Reduzierung der Traglast verhindern. Zur Überprüfung einer ausreichenden Vorspannung aus Abspannung am Kragarmende und Eigengewicht im Lastfall 3 (Wind von vorne) werden die Stabkräfte für System B1 (Geometrie Prototyp) und System C1 (neue Geometrie) in einer linearen Berechnung ebener Fachwerkmodelle kontrolliert. Das Eigengewicht wird mit  $0.04 \text{ KN/m}^2$  und die Einzellast aus der Abspannung mit  $4.0 \text{ KN}$  angenommen. Die Windbelastung wird entsprechend der Verteilung der Druckbeiwerte für Wind von vorne mit einer Windgeschwindigkeit von  $20 \text{ m/s}$  als Vertikal- und Horizontalkomponenten in den Knoten eingetragen. Alle Elemente der Fachwerke können sowohl Druck- als auch Zugkräfte aufnehmen.

Abbildung 7-33 zeigt, dass die Diagonalen der Kragträger mit der Geometrie des Prototypen (System B) wie erwartet zum Auflager hin Druckkräfte erhalten bzw. kaum zugbeansprucht werden. Dasselbe gilt für den Lastfall 2. Auch in der Überlagerung aller Lastfälle, also nach dem Stabilisieren des Systems über Vorspannung und Eigengewicht und der Beanspruchung durch Windkräfte, erhält eine Diagonale nahezu eine Druckkraft. Für die Lastfälle 1 und 2 und die Überlagerung aller Lastfälle weisen Obergurt und Untergurt nur Zug- bzw. Druckkräfte auf.

Der Kragträger mit der neuen Geometrie (System C1) weist für die Diagonalen eine deutlich verbesserte Verteilung der Normalkräfte auf. Abbildung 7-34 zeigt, dass das Vorspannen keine Druckkräfte in den Diagonalen erzeugt und auch nach der Überlagerung alle Diagonalen ausreichend zugbeansprucht werden. Ein Nachteil der neuen Geometrie sind die durch die gleichbleibende Höhe der A-förmigen Vertikalstäbe deutlich höheren Normalkräfte in Obergurt und Untergurt zum Auflager hin.

Mit der Möglichkeit, den Kragarm neuer Geometrie durch eine Abspannung (LF1) und Eigengewicht (LF2) ausreichend vorzuspannen, wird eine Ermittlung der maximalen Traglast für eine nachfolgende Windbeanspruchung sinnvoll. Die nichtlineare Berechnung beinhaltet zwei Schritte: Belastung des Kragarms durch eine Einzellast von  $4.0 \text{ KN}$  am Kragarmende und anteiliges Eigengewicht der Gesamtkonstruktion von  $0.04 \text{ KN/m}^2$  als Vorbelastung, sowie die Belastung durch Windlast

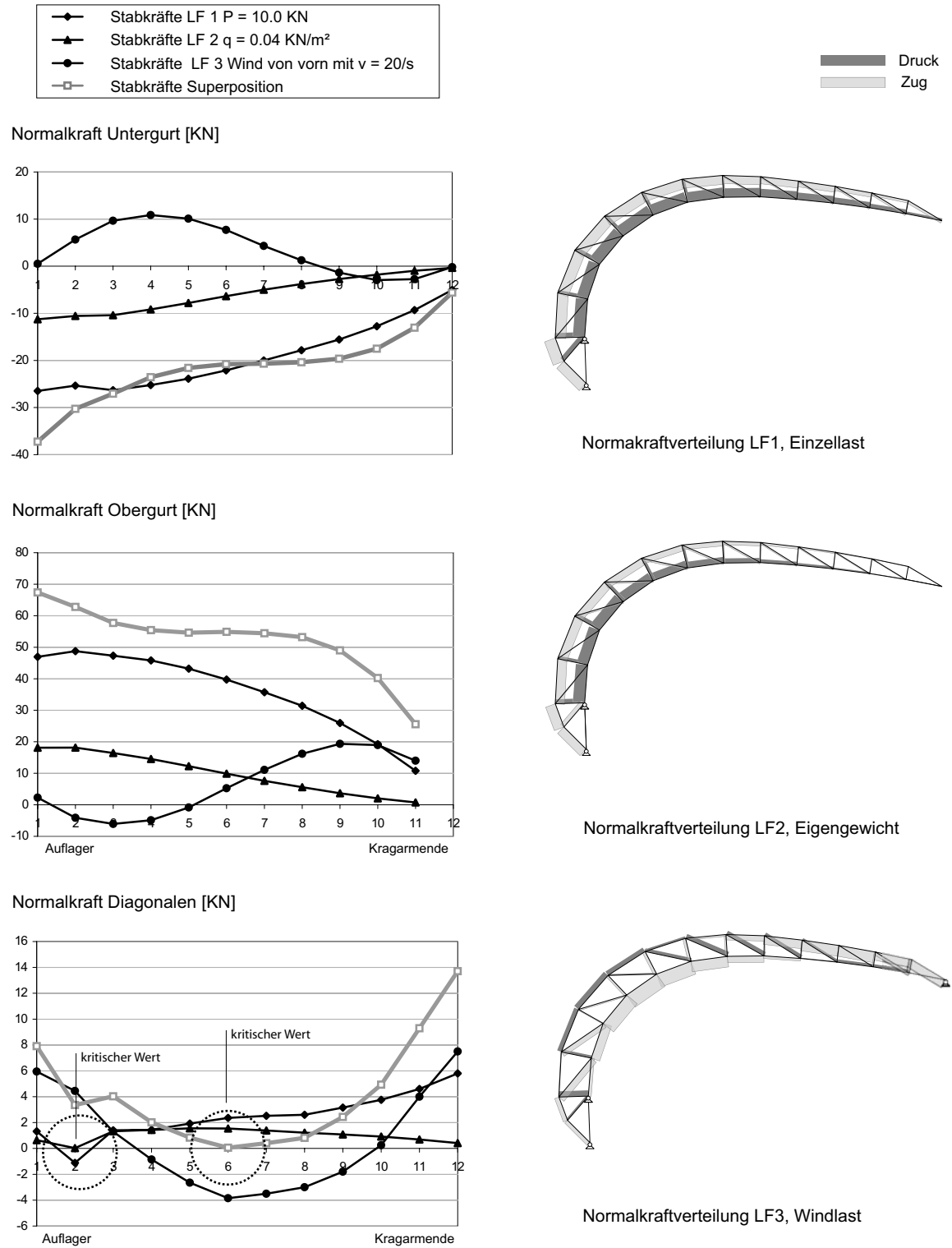


Abb. 7-33. Ergebnisse einer Linearen Analyse: Normalkraftverteilung System B1 (Geometrie Prototyp) als ebenes Fachwerk für LF1, 2 und 3

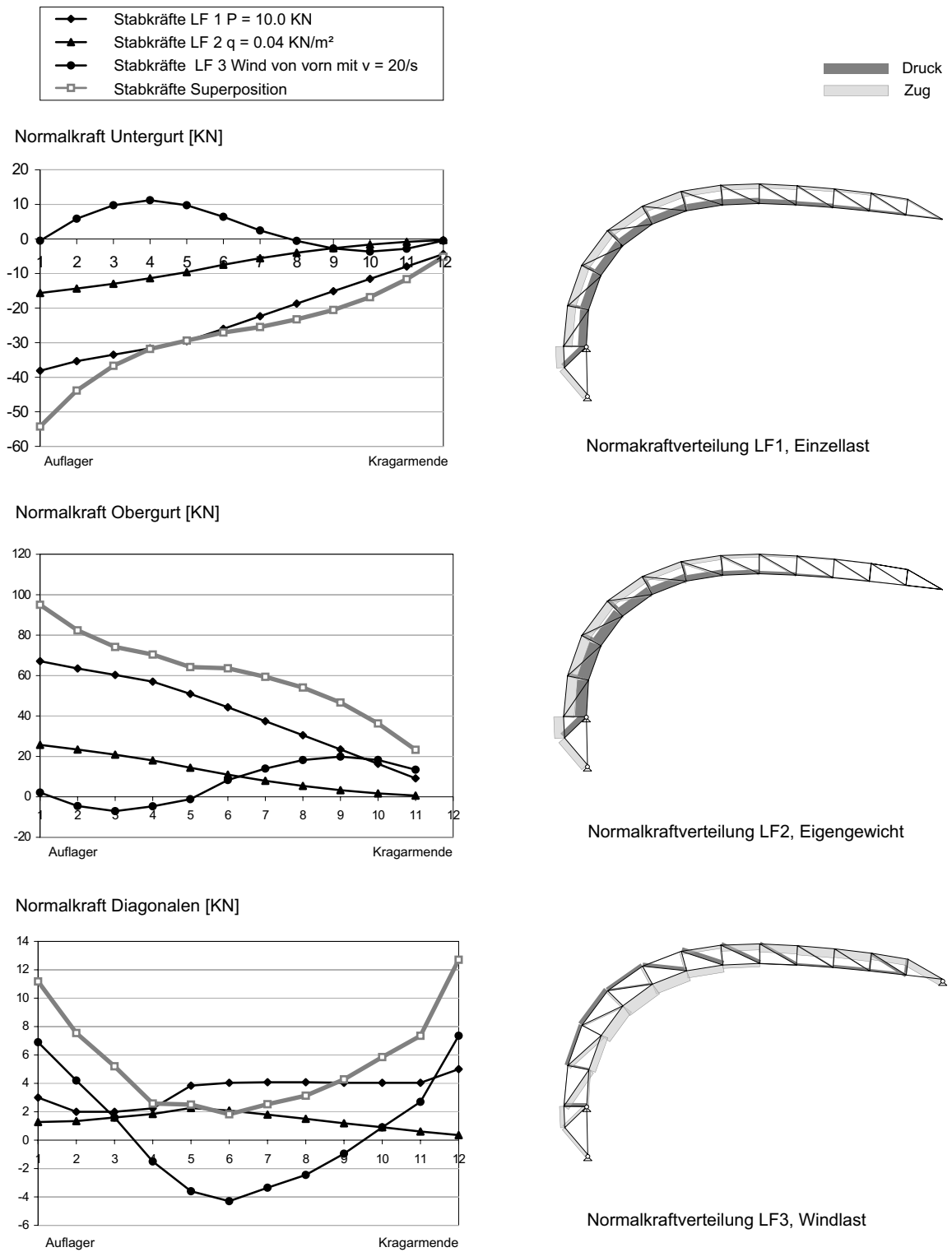


Abb. 7-34. Ergebnisse einer Linearen Analyse: Normalkraftverteilung System C (neue Geometrie) als ebenes Fachwerk für LF1, 2 und 3

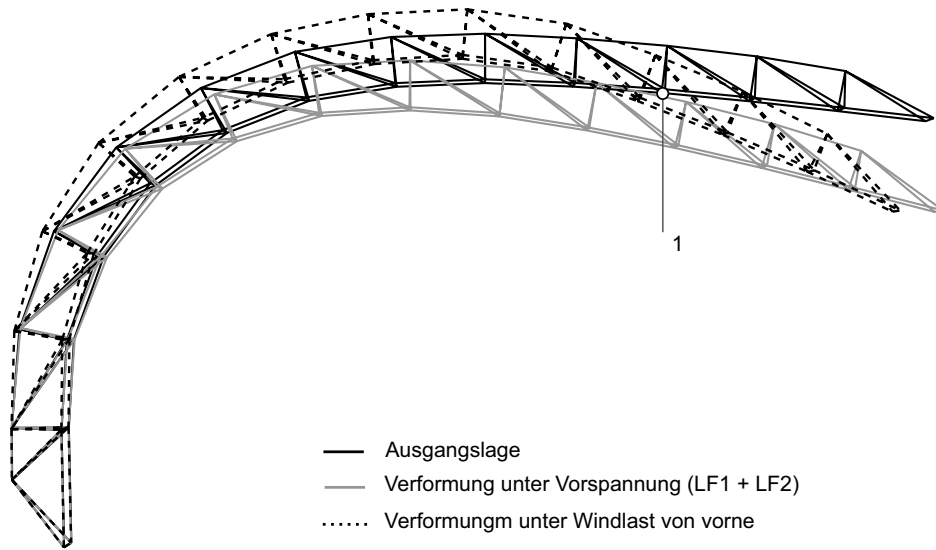


Abb. 7-35. Schrittweise Verformung des Systems C1 unter Vorspannung und Windbeanspruchung

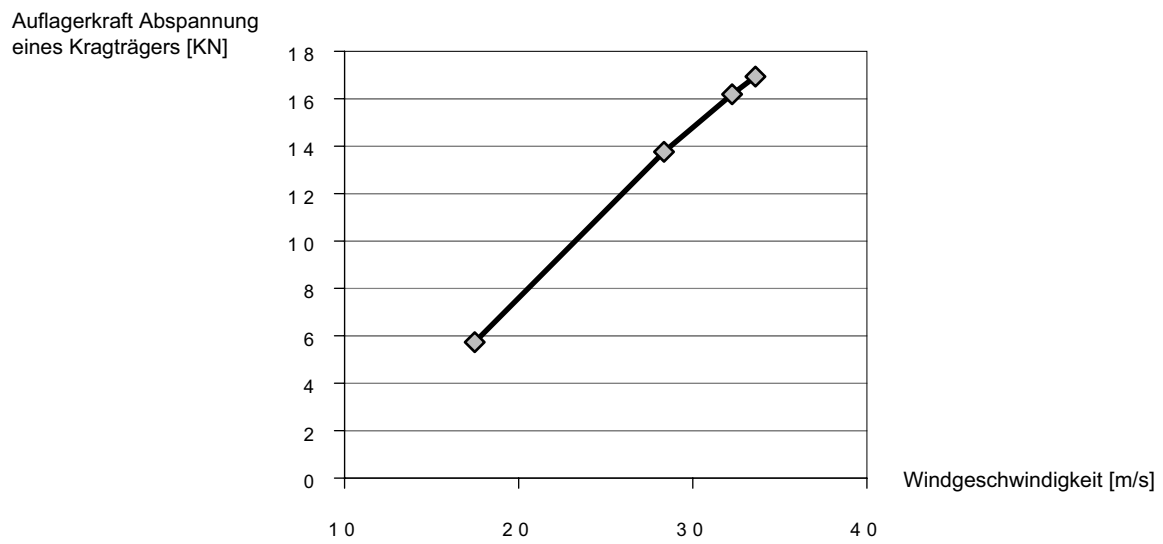


Abb. 7-36. Auflagerkraft der Abspannung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit



(LF3) mit einer schrittweisen Laststeigerung bis zum Versagen des Systems. Im Schritt zwei wird das System durch ein vertikales Auflager am Kragarmende ergänzt, das die in diesem Fall als Auflager wirkende Abspannung simuliert. Abbildung 7-35 zeigt die schrittweise Verformungen des Kragarms. Der Kragträger versagt bei einer Windbeanspruchung, die einer Windgeschwindigkeit von 34 m/s entspricht. Versagensursache ist das Erreichen der Fließgrenze des Obergurtes im mittleren Bereich des Trägers. Dies stellt jedoch keine grundlegende Einschränkung der Belastbarkeit des Systems dar, da der gewählte Querschnitt für den Obergurt einfach vergrößert werden kann, ohne das Gewicht der Segmente nennenswert zu erhöhen bzw. konstruktive Probleme zu verursachen. Ein wesentlich schwierigerer Parameter ist die bei dieser Belastungsgröße entstehende Auflagerkraft von 16.0 KN pro Abspannung. Eine Rückverankerung der Last in die Tribünenkonstruktion erfordert eine zusätzlich Ballastierung, da aufgrund der Leichbauweise der Tribüne das Eigengewicht der Konstruktion nicht ausreicht. Die Darstellung der Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Verankerungskraft (Abb. 7-36) ermöglicht die notwendige Entwicklung eines Lastkonzeptes für verschiedene Standorte bzw. Anwendungen und die Festlegung entsprechender konstruktiver Maßnahmen.

#### 7.3.1.8 Zusammenfassung

Die Untersuchung beschäftigt sich mit zwei grundlegenden Fragen zur Konstruktion der Kragträger, die das Tragverhalten und den Montagevorgang wesentlich beeinflussen: die Verwendung von durchlaufenden gekrümmten Untergurten und die Auswirkungen des Druckausfalls der Zugdiagonalen. Das ursprüngliche Konzept der Verwendung von durchlaufenden und gekrümmten Untergurten, die während des Aufrichtvorgangs durch elastische Biegung unter Eigengewicht ihre Endform erhalten, wird durch den Materialwechsel von GFK zu Aluminium grundsätzlich in Frage gestellt. Die Vorbiegung der Untergurte verursacht relativ hohe Eigenspannungen, die auch bei der Verwendung von vorgekrümmten Segmenten bis zu 60% der Grenzspannungen betragen. Damit wird die Traglast stark eingeschränkt. Die Verwendung von Untergurten aus gelenkig verbundenen Stäben, mit vergrößerten Querschnitten würde dem gegenüber eine deutliche Erhöhung der Traglast ermöglichen. Eine solche Fachwerklösung wäre aber mit konstruktiven, statischen und gestalterischen Nachteilen verbunden. Konstruktiv würden Untergurte aus gelenkig verbundenen Stäben die vierfache Anzahl von Verbindungsknoten pro Untergurt gegenüber der Variante des Prototypen benötigen. Die Knotenausbildung wäre grundsätzlich aufwendiger und eine Änderung der einfachen Membranbefestigung mit Hilfe des Kederrandes notwendig. Aus statischer Sicht erfordert die Ausbildung der Kragträger als reines Fachwerk eine Auskreuzung der Fachwerksfelder, um ein Versagen des Systems beim Ausfall

der Zugdiagonalen zu verhindern. Gestalterisch werden vor allem der entstehende polygonale Verlauf der Untergurte und die Änderung der Membranform als negativ angesehen.

Um das vor allem in Hinblick auf konstruktive und gestalterische Aspekte vorteilhafte Konzept der elastischen durchlaufenden Untergurte beibehalten zu können und gleichzeitig die Traglast der Gesamtkonstruktion zu erhöhen, ist eine Ausführung der Untergurte in GFK bzw. in Aluminium mit einer höherwertigen Legierung notwendig.

Die Vermeidung des Druckausfalls der zum Auflager steigenden Zugdiagonalen ist für die Geometrie des Prototypen nicht möglich. Als kritisch erweist sich vor allem die Belastung der Kragträger durch eine Einzellast am Kragarmende. Um eine Instabilität des Systems zu vermeiden und eine ausreichende Tragfähigkeit zu erreichen müssen die letzten sechs Felder ausgekreuzt oder die Zugdiagonalen durch Druckstäbe ersetzt werden. Eine dritte Alternative bietet die Veränderung der Geometrie der Kragträger. Für die vorhandene Kontur der Untergurte wurde eine neue Geometrie des Versteifungssystem entwickelt und geprüft, die eine reine Zugbeanspruchung der zum Auflager hin steigenden Diagonalen gewährleistet. Nachteil dieser neuen Geometrie ist die relative geringe und konstante Höhe der A-förmigen Vertikalstäbe, die zu hohen Druckbeanspruchungen der Untergurte in Auflagernähe führt. Eine endgültige Aussage über die Effizienz geometrischer Optimierung des Systems kann aber erst nach einer Betrachtung des Gesamtsystems erfolgen, da aufgrund der geringen Steifigkeit der Kragträger von einer starken Interaktion zwischen Stützkonstruktion und Membran ausgegangen wird.

### 7.3.2 Interaktion zwischen Membran und Stützkonstruktion

Die vorangegangenen Untersuchungen des Tragverhaltens der Kragarme und der Möglichkeiten Ihrer Optimierung vernachlässigen den Einfluss der Membran auf die Stützkonstruktion. Verschiedene Tests des Prototypen in der Anwendung, sowie die vorangegangene Analyse der Kragträger lassen erwarten, dass die sehr „weiche“ Stützkonstruktion in ihrem Tragverhalten von der Membran beeinflusst wird. Normalerweise stellt die Stützkonstruktion ein wesentlich steiferes Element als die Membran dar, deren geringere Verformung eine getrennte Betrachtung rechtfertigt. Die großen Verformungen der wandelbaren Kragträger lassen diese vereinfachte Betrachtungsweise in diesem Fall jedoch nicht als ausreichend erscheinen. Die für den Prototypen gewählte Membranform, die Tiefpunkt und Abspannung der Kragträger vereint, weist folgende Besonderheiten auf:

- aufwendiger Zuschnitt und dadurch kostenintensive Herstellung der Membran
- Membran als Element des Primärtragwerks, das das Tragverhalten der Gesamtkonstruktion maßgeblich beeinflusst

Um Zuschnitt und Herstellung der Membran zu vereinfachen, werden neben der Membranform des Prototyps auch Varianten der Membran ohne Tiefpunkt untersucht. Als Parameter zur Beurteilung der verschiedenen Membranformen werden die ausreichende Formstabilität der Membran unter Windbelastung und der Einfluss der Membran auf die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion betrachtet.

#### 7.3.2.1 Untersuchte Tragsysteme

Für die Untersuchung wird das statische Gesamtsystem eines Einzelmoduls der Überdachung bestehend aus zwei Kragträgern, Membranfläche, Pfetten und Aussteifungsdiagonalen betrachtet. Die Betrachtung des Einzelmoduls beruht auf der Anforderung, auch die Anwendung eines freistehenden einzelnen Moduls zu erlauben. Die Abmessungen des Systems entsprechen denen des Prototyps (wie in vorhergehenden Untersuchung). Die Spannweite der Kragarme beträgt 11.5 m, der Achsabstand 6 m und die lichte Höhe zwischen Kragarmende und Grundfläche 5.50 m. Um eine ausreichende Tragfähigkeit zu erreichen werden die letzten sechs Felder vor dem Auflager der Kragträger ausgekreuzt. Zur Aussteifung des Gesamtsystems sind zwischen den Kragträgern Pfetten und Verbände angeordnet. Die Veränderung der Geometrie im weiteren Verlauf der Untersuchung betreffen nur Form und Ausbildung von Membran und Kragträgern, die Spannweiten, Achsabstände und die grundsätzliche Anordnung von Pfetten und Verbänden werden beibehalten.

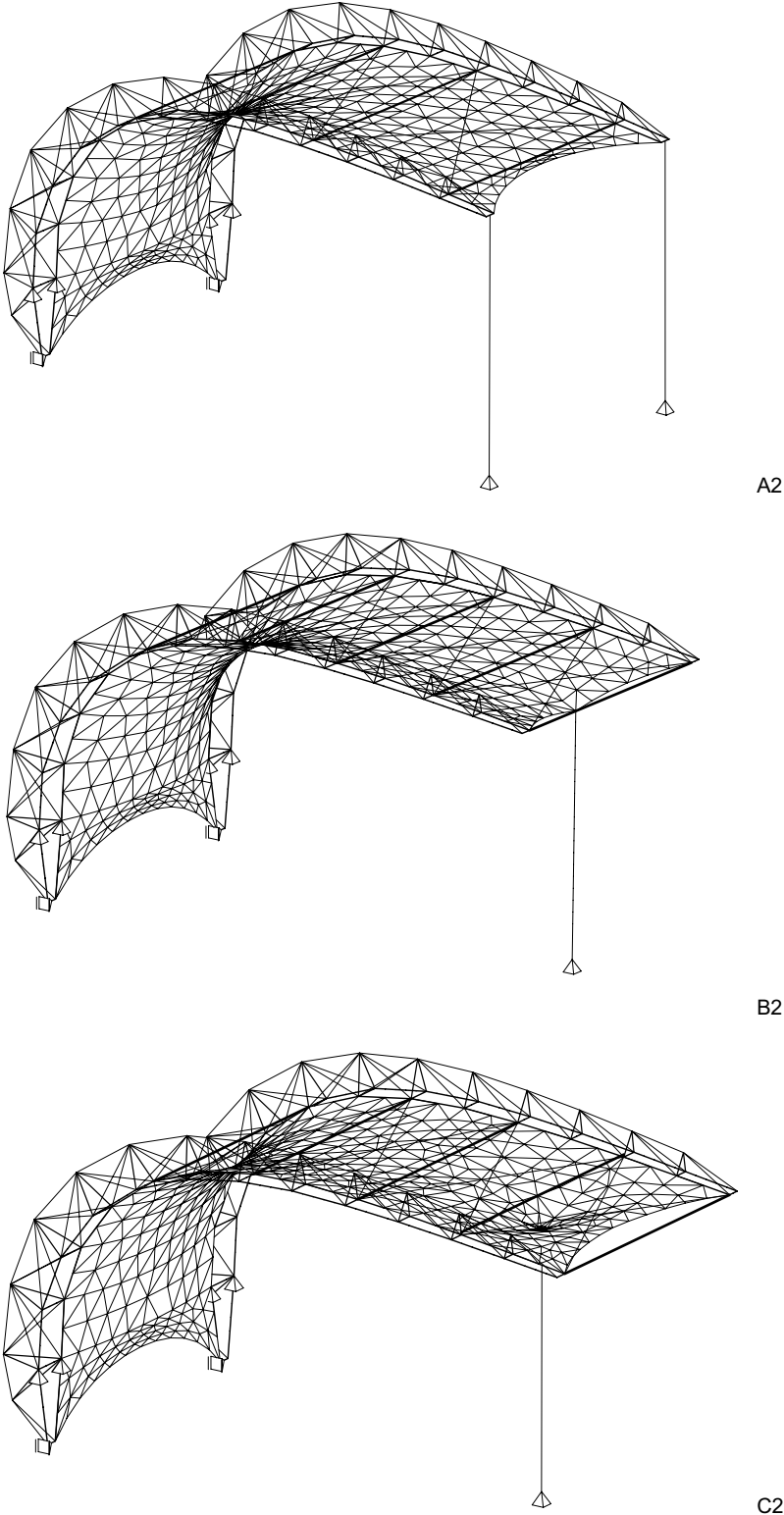


Abb. 7-37. Gesamtsysteme mit verschiedenen Arten der Abspannung und Membranformen

### 7.3.2.2 Numerische Modellierung

Die gesamten Berechnungen wird mit dem Modul ASE des FEM-Programms SOFISTIK durchgeführt. [60]. Der Untersuchung der Gesamtstruktur unter der kritischen Windbeanspruchung geht die Formfindung für die unterschiedlichen Membrangeometrien voraus. Die Formfindung erfolgt im Modul ASE des Programmpakets SOFISTIK mit Hilfe einer geometrisch nichtlinearen Berechnung. Die Form der Membranfläche ergibt sich in Abhängigkeit eines vorgegebenen Vorspannungszustand der Fläche, den Auflagerbedingungen und den Steifigkeiten der Randelemente. Die beweglichen oder weichen Ränder werden als Seilelemente modelliert. Dabei kann bei vorgegebener Seilkraft die Geometrie oder für eine vorgegebene Seilgeometrie die Seilkraft ermittelt werden. Die aus der Formfindung für Membran und Stützkonstruktionen resultierenden Spannungen und Verformungen werden für die weiteren Berechnungen als Primärlastfall angesetzt.

Für die Kragträger werden für die Untergurte gerade Balkenelemente verwendet. Zur Ermittlung der ungünstigsten Vorverformungsfigur wurden mehrere Lastverformungsfiguren des Gesamtsystems untersucht. Die als kritische Verformung angesehene Figur wird auf  $1/300$  (der Gesamtlänge Untergurte des Kragarms) skaliert und als Ausgangsgeometrie für eine erneute Formfindung und nachfolgende Traglastuntersuchung verwendet. Die A-förmigen Vertikalstäbe, Pfetten und Druckdiagonalen sind als Fachwerkelemente modelliert und alle Zugstäbe als Seile, die bei einer Druckbelastung ausfallen. Die Traglaststeigerung erfolgt bis zum Erreichen der Grenzspannungen der Tragelemente der Kragträger, ein Spannungsversagen der Membran wird nicht berücksichtigt.

### 7.3.2.3 Materialkennwerte

Das in SOFISTIK implementierte Membranelement wird durch ein orthotropes, linear-elastisches Materialgesetz beschrieben, welches auf dem Werkstoffgesetz von Münsch und Reinhardt beruht (siehe Kapitel 2 Seite 36). Als Steifigkeitswerte wird in Kettrichtung und Schussrichtung ein E-Modul von  $400 \text{ KN/m}$  und ein Schubmodul von  $5 \text{ KN/m}$  angesetzt. Dies entspricht etwa der Steifigkeit eines isotropen PVC-beschichteten Polyestergewebes Typ I - Precontraint Ferrari® (siehe Kapitel 2 Seite 36). Für die Kragarme wird die Vergleichsquerschnitte des Prototypen (Tab. 7-1 Seite 250) beibehalten. Nur für die Zugglieder werden wesentlich steifere hochfeste Spannseile mit einem E-Modul von  $205\,000 \text{ N/mm}^2$  verwendet. Der Durchmesser der Pfetten beträgt  $70 \text{ mm}$  bei einer Wandstärke von  $2.6 \text{ mm}$ .

#### 7.3.2.4 Lastannahmen

Die vorgehende Untersuchung zeigt, dass eine Lastkombination aus Vorspannung, Eigengewicht und einer Windbeanspruchung entscheidend für die Ermittlung der Traglast der Kragträger und damit für die gesamten Überdachung ist.

Im Lastfall Formfindung wird die gesamte Struktur durch das Anspannen der Vertikalabspannung am Kragarmende vorgespannt. Für das System A2 beträgt die Vorspannung je Vertikalseil 2.5 KN, für die Systeme B2 und C2 5.0 KN. Das hintere Randseile der Membranfläche erhält bei allen Systemen eine Vorspannung von 2.0 KN.

Die Windlast wird als Flächenlast orthogonal zu den Flächenelementen für einen Staudruck von 0.5 KN/m<sup>2</sup> ( $v =$  und entsprechend den in einem Windkanalversuch ermittelten Druckbeiwerten (siehe Abb. 7-17 S.252) aufgebracht. Die untersuchte Lastkombinationen besteht aus folgenden Lastfällen:

- LF1: Formfindung Vorspannung
- LF2: Eigengewicht
- LF3: Windlast

Die Kombination der Lastfälle entsteht durch die Berechnung des Lastfalls Formfindung unter Verwendung der vorverformten Struktur (siehe 7.3.1.1) und der Berücksichtigung des Eigengewichts. Diese Lastkombination (LK1) wird als sogenannter Primärlastfall für die Lastkombination mit dem Lastfall 3 verwendet. Die veränderte Geometrie und die resultierenden Spannungen aus LK1 werden so übernommen. Für die Traglastuntersuchung wird vor jedem Lastschritt der Primärlastfall erneut eingelesen, somit erhöhen sich nur die Lasten aus LF3.

- LK1: LF1 + LF2
- LK2: (LF1 + LF2)<sup>1</sup> + LF3

Grundsätzlich werden alle Lasten ohne Lastfaktor angesetzt (keine Designlasten). Das Ziel der Studie ist nicht eine Bemessung der Struktur sondern ein Vergleich des Tragverhaltens von Systemen mit verschiedenen Membranformen und Kragträgergeometrie. Als Kriterium wird die globale Verformung des Kragträgers gewählt.

---

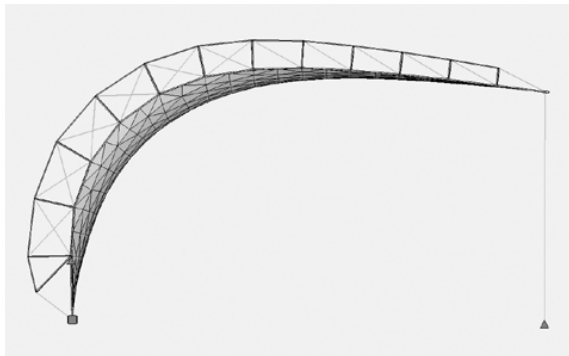
1. Primärlastfall

### 7.3.2.5 Analyse alternativer Membranformen für den Prototypen

Das Grundkonzept der Überdachung beruht auf der Verwendung der kontinuierlich gekrümmten Untergurte als fester linearer Rand der Membranfläche. Beim Anspannen der beiden kurzen beweglichen Ränder der Membran entsteht durch die gebogene Form der Kragträger eine doppelt gekrümmte Fläche.

#### System A2

Im System A2 wird die oben beschriebene einfache Membranform verwendet. Die Abspannungen sind an den Kragarmenden angeordnet und erlauben damit ein Vorspannen der Membran und der Stützkonstruktion unabhängig voneinander. Das Ergebnis der Formfindung zeigt jedoch, dass die für den Prototyp gewählte Geometrie mit zum Ende gerade auslaufenden Kragarmen zu einer nahezu ebenen Membranfläche in diesem Bereich (Abb. 7-38) und einer ungleich stärkeren Krümmung im auflagnahen Bereich führt, die dort das erforderliche Lichtraumprofil beeinträchtigt. Abbildung 7-39 zeigt die erwartete starke Verformung der Membran bei Windsogbelastung. Um das Durchschlagen der Membran gegen die Pfetten und Verbände zu vermeiden bzw. zu minimieren, müsste die Vorspannung extrem erhöht werden. Die sich daraus ergebenden hohe Belastungen der Stützkonstruktion und die notwendige Änderung des Montageablaufs werden jedoch als nicht sinnvoll angesehen.



**Abb. 7-38.** Membran nach der Formfindung LK1, System A2



**Abb. 7-39.** Verformung der Membran unter 0.5facher Windbeanspruchung LK2, System A2

Zur Vermeidung einer hohen Vorspannung der Membran ist eine stärkere Krümmung der Fläche im vorderen Bereich notwendig, die nur durch eine zusätzliche Stützung der Fläche bzw. eine Veränderung der Geometrie der Ränder erreichbar ist. Für den Fall eines Beibehaltens der Geometrie der Untergurte der Kragarme ergeben sich zwei Alternativen:

- Veränderung der Geometrie des vorderen beweglichen Randes durch eine Mittelabspannung
- Einführung einer zusätzlichen Stützung der Fläche durch eine Tiefpunkt oder Kehlseil

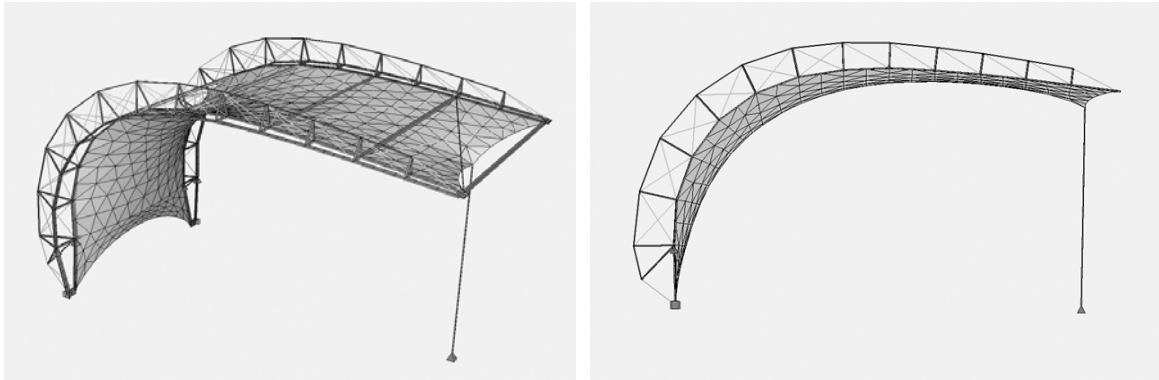


Abb. 7-40. System mit Mittelabspannung (FEM Modell - System B2)

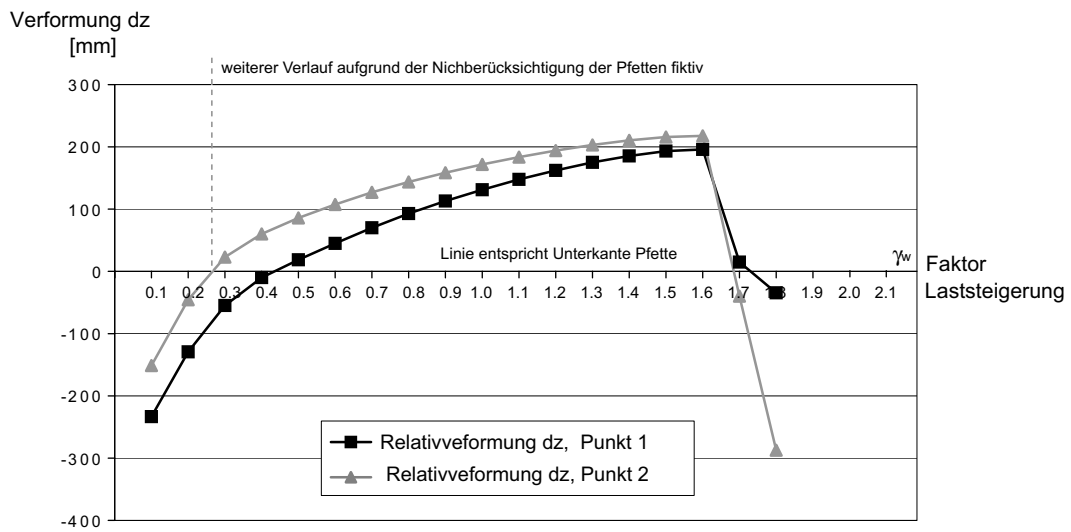


Abb. 7-41. Abstand Membran - Pfette für LK2: Vorspannung, Eigengewicht, Wind, System B2

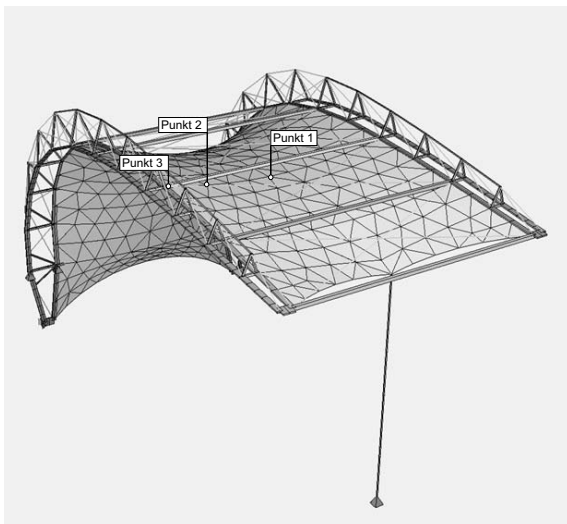


Abb. 7-42. Lage der Messpunkte- System B2

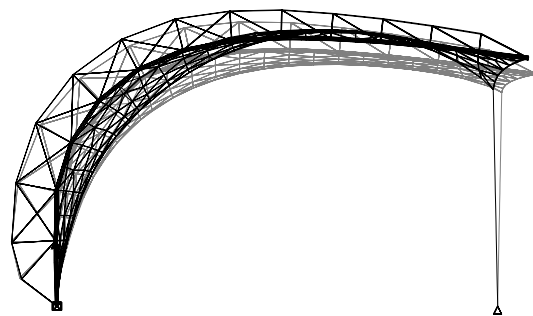


Abb. 7-43. nichtüberhöhte Verformung- Systems B2 bei Lastfaktor 1.0



*System B2*

Die Einführung einer Mittelabspannung erscheint eine einfache und wirkungsvolle Lösung. Sie erlaubt neben der Ausbildung einer stärkeren Krümmung der Membran, eine unmittelbare Abspannmöglichkeit für die Kragarme über die Randseile bzw. Gurtverstärkungen des Membranrandes. Der Zuschnitt für die sich ausbildende Membranform und die Randausbildung bleibt weiterhin einfach.

Die Vorspannung wird über das Anspannen des hinteren Randseils mit einer Kraft von 1.9 kN und der Vertikalabspannung mit 5.0 kN erzeugt. Damit ist eine der geplanten Montageweise entsprechende Vorspannungsniveau gesichert.

Die entstehende Membranform besitzt jetzt auch eine doppelte Krümmung im vorderen Randbereich. Die Krümmung ist jedoch in Längsrichtung der Fläche ungleichmäßig verteilt. Sie nimmt stark zum Auflager hin zu und ist im kritischen mittleren Bereich weiterhin relativ schwach. (Abb. 7-40) Die Analyse des Gesamtsystems unter Windbeanspruchung zeigt grundsätzlich eine Verbesserung des Verformungsverhalten der Membran. Zu Verifizierung wurde die relative Verformung zweier Punkte der Membran (1 und 2) gegenüber dem Mittel - einem Viertelpunkt der dritten Pfette gewählt. Abbildung 7-41 zeigt den Verlauf der Verformung bei einer Steigerung des Lastfaktors (LF Wind) bis zum Versagen des Gesamtsystems. Der Abstand zwischen Pfettenunterseite und dem Membrananschluß am Kragträger von ca. 20 mm wurde berücksichtigt. Die Relativverformung beider Punkte steigt rasch bis zum gedachten Anschlagen der Membran an die Pfetten zwischen 0.2 bis 0.3facher (Punkt 2) bzw. 0.4facher Laststeigerung (Punkt 1) an. Danach nimmt die Verformung kontinuierlich weiter zu, da der Kontakt zwischen Membran und Pfette im Rechenmodell nicht modelliert wird.

Die Verformung würde somit nicht nur ein zu einer Geräuschentwicklung durch das Anschlagen an die Pfetten und Verbände sorgen, sondern vorallem in den Pfetten mit steigender Belastung eine zunehmende Biegebeanspruchung verursachen. Das Gesamtsystem versagt rechnerisch bei einer 1.7fachen Belastung durch das Erreichen der Grenzspannung für die Untergurte.

Abbildung 7-43 zeigt die Verformung des Gesamtsystems bei 1.0facher Belastung. Der Einfluss der Mittelabspannung nimmt schnell ab und die Membran schlägt im mittleren Bereich weiterhin gegen Pfetten und Verbände. Dies führt neben der Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion durch Geräuschentwicklung, zu einer ansteigenden Biegebelastung der Pfetten.

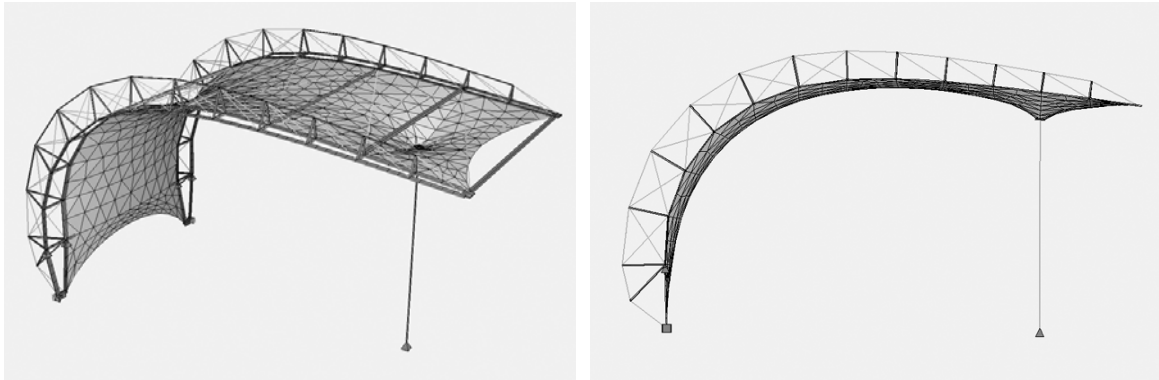


Abb. 7-44. System mit Tiefpunkt (FEM Modell - System C2)

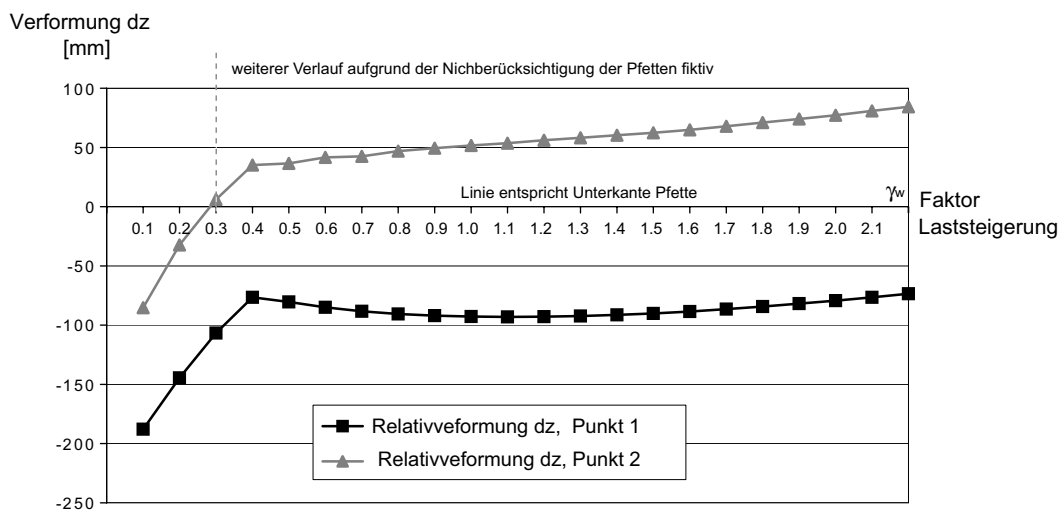


Abb. 7-45. Abstand Membran - Pfette für LK2: Vorspannung, Eigengewicht, Wind, System C2

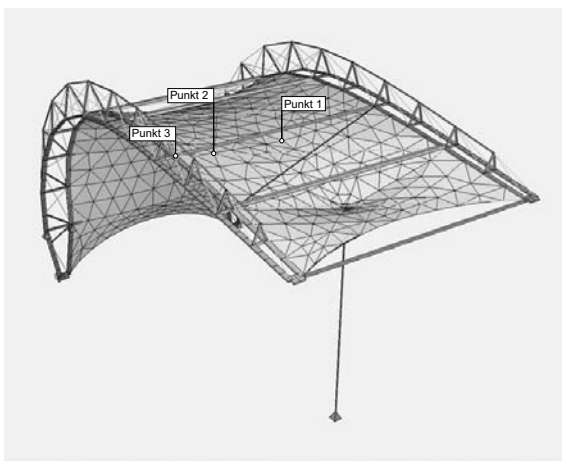


Abb. 7-46. Lage der Messpunkte- System C2

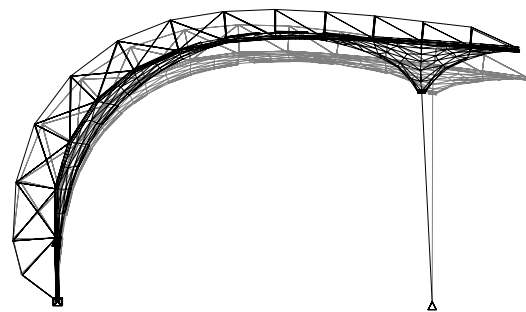


Abb. 7-47. nichtüberhöhte Verformung System C2 bei Lastfaktor 1.0

*System C2*

Um den beschriebenen Effekt des Kontakts zwischen Membran und Pfette zu verhindern, ist bei gleichbleibender Geometrie der Längsränder der Fläche eine zusätzliche Stützung zum Erreichen einer ausreichenden doppelten Krümmung im vorderen Drittel der Membranfläche notwendig. Aus verschiedenen konstruktiven und gestalterischen Überlegungen wurde für den Prototypen ein Tiefpunkt gewählt. Um die Anzahl der Konstruktionselemente insbesondere im Sichtfeld der Zuschauer zu minimieren und einen möglichst großen Teil des Eigengewichts der Tribüne als Auflast für die Abspannung der Kragträger zu nutzen wurden beide Elemente Tiefpunkt der Membran und Abspannung der Kragträger zusammengefasst. Die Trennung von Stützkonstruktion und Membran in Primär- und Sekundärsystem ist damit vollständig aufgehoben. Stützkonstruktion und Membran bilden ein Gesamtsystem

Die Formfindung der Membranfläche erfolgt vorwiegend durch das Anspannen des Vertikalseils des Tiefpunktes mit 5.0 KN. Damit wird eine sehr einfache Methode des Vorspannens der Membran während der Montage realitätsnah simuliert. Die beiden Randseile erhalten bei einer vorgegebenen Geometrie nur eine sehr geringe Vorspannung, ihre Endform ergibt sich damit weitgehend aus der Formfindung. Das Resultat der Formfindung zeigt eine deutliche Verbesserung der Form im Vergleich zu System B2. Die Fläche weist zum Auflager hin eine relativ gleichmäßige doppelte Krümmung auf. (Abb. 7-44) Im durch Windsogkräfte hoch beanspruchten ersten Drittel der Fläche erzeugt der Tiefpunkt eine stabile Form. In Bezug auf das Tragverhalten des Kragträgers ist der Eintrag der Kraft aus der Abspannung als verteilte Linienlast über den Membranrand anstatt als Einzellast am Kragarmende positiv zu bewerten. Der Zuschnitt für die Membranform ergibt eine Versteifung der Membran im Bereich des Tiefpunktes durch die notwendigen radial angeordneten Nähte. Zur Berücksichtigung dieses Effekts wurde die Steifigkeit der Membran für die Traglastermittlung, nach Abschluss der Formfindung in diesem Bereich um 30 % erhöht.

Die Analyse des Gesamtsystems unter Windbeanspruchung zeigt ein deutlich verbessertes Verformungsverhalten der Membran. Zur Verifizierung wurde die relative Verformung zweier Punkte der Membran gegenüber dem Mittel- und einem Viertelpunkt der kritischen zweiten Pfette gewählt. Die Abbildung 7-45 zeigt den Verlauf der Verformung bei einer Steigerung der Last von 0.1 bis 2.2. Im Randbereich schlägt die Membran wieder bei einer 0.2 - 0.3fachen Belastung gegen die Pfette. Die Relativverformung erreicht im Punkt 1 ihren maximalen Wert bei einer 0.7fachen Belastung. Dann beginnt die Ausbildung einer starken „Kehle“ zwischen Tiefpunkt und hinterem Randseil (Abb. 7-

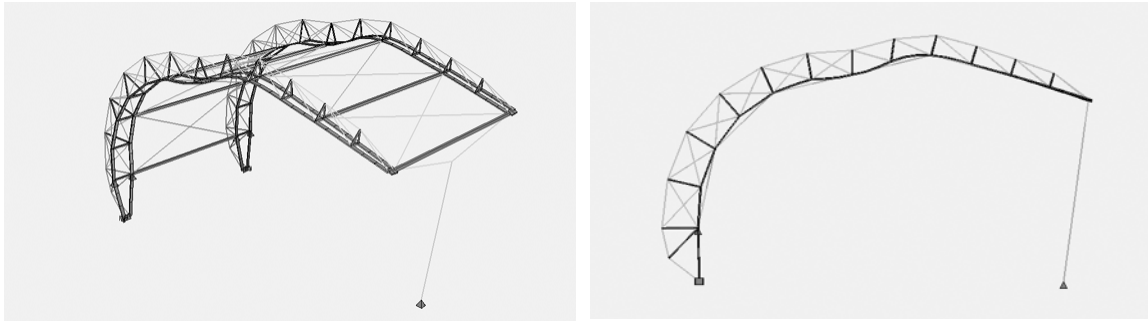


Abb. 7-48. Versagen des Systems B2 ohne Membran, LK2, 2fach überhöht;

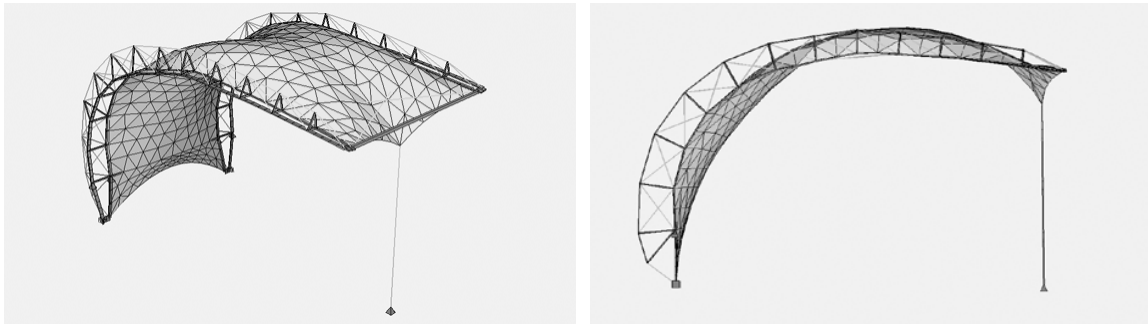


Abb. 7-49. Versagen des Systems mit Mittelabspannung (System B2), LK2, 2fach überhöht;

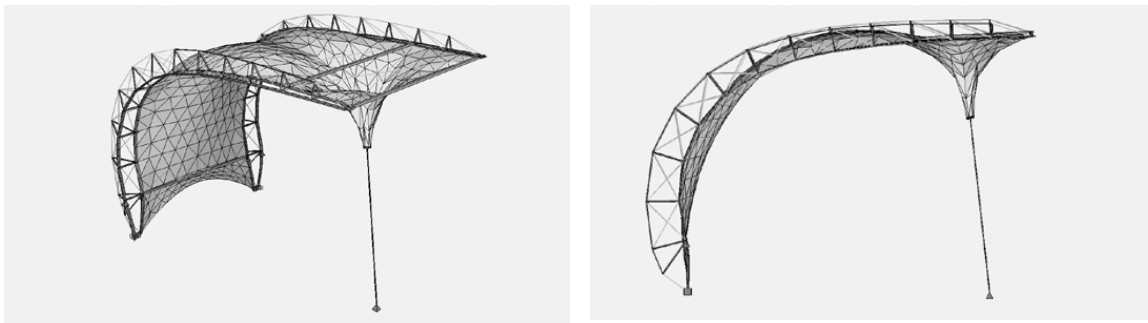


Abb. 7-50. Versagen des Systems mit Tiefpunkt (System C2), LK2, 2fach überhöht;

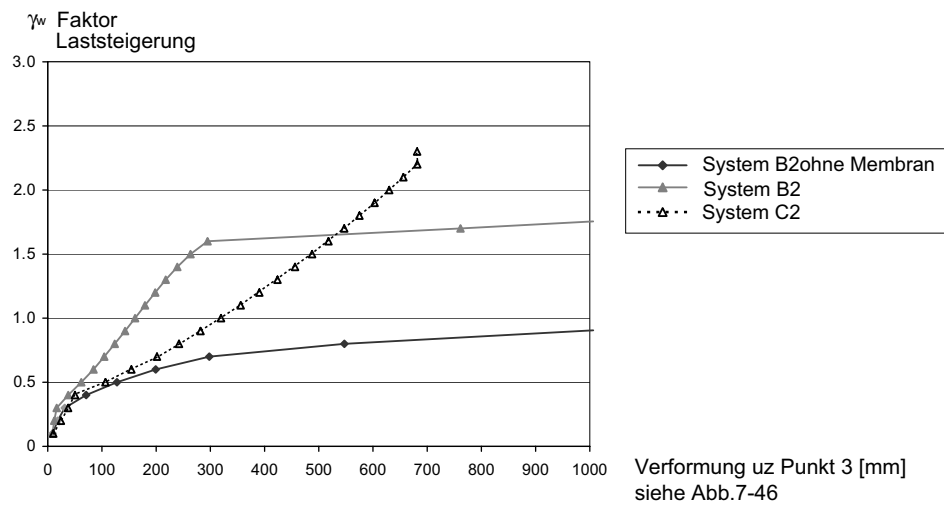


Abb. 7-51. Traglast des Systems ohne Membran, sowie System B2 und C2

50), die zu einer Abnahme der Verformung bis zu einer 1.2fachen Belastung führt. Danach erfolgt wieder ein kontinuierlicher leichter Anstieg der Verformung bis zum Versagen des Gesamtsystems.(ohne Berücksichtigung des Kontakts zwischen Membran und Pfetten). Damit ergibt sich im Randbereich eine geringere Biegebeanspruchung der Pfetten durch die Membran als bei System B2. Im Mittelbereich kommt es bis zum Versagen des Gesamtsystems nicht zu einem Durchschlagen der Membran. Insgesamt bedeutet dies eine deutliche Reduzierung der Biegebeanspruchung der Pfetten. Das Gesamtsystem versagt durch das Erreichen der Grenzspannung für die Membran im Tiefpunktbereich. Dies könnte durch Gurtverstärkungen oder Seile in Membrantaschen verhindert werden. Allerdings würde eine solche Versteifung die Verteilung der Belastung der Kragträger erneut verändern und damit das Verformungs- und Tragverhalten des Gesamtsystems stark beeinflussen.

Die Betrachtung der Gesamtverformung bei 1.0facher Belastung des Systems in Abbildung 7-47 zeigt neben einer starken Vertikalverschiebung auch eine wesentlich deutlichere Horizontalbewegung des Kragarmendes als bei System B. Damit wird deutlich, dass für die Gesamtstabilität des Systems Auskreuzungen bzw. diagonale Druckstäbe in den Feldern der Kragträger zum Auflager hin notwendig sind, da insbesondere der Abbau der Vorspannung und Horizontalbewegung zu Druckbeanspruchungen in den zum Auflager steigenden Zugdiagonalen führen. Generell führt die Abspannung bzw. die Stabilisierung des Gesamtsystems durch die Membran zu einem deutlichen Anstieg der Traglast. Eine Ursache ist die für die Kragarme günstigere Verteilung der Abspannkräfte über das erste Drittel der Kragarme anstelle der Beanspruchung der Kragarmenden durch eine Einzellast. Hinzu kommt, dass die Membran im Mittelbereich nicht durchschlägt und trotz großer Verformung weiterhin stabilisierend auf die Untergurte wirkt. Gleichzeitig wird durch die große Verformung der Membran ein starkes Anwachsen der Biege- und Druckbeanspruchung der Untergurte im mittleren Teil der Kragarme vermieden. Das heißt, die „weiche Lagerung“ am Kragarmende sorgt für eine Umverteilung der Beanspruchung von den Kragträgern auf die Membran. Die aus der großen Verformung resultierende sich einstellende Biegebeanspruchung der Untergurte in Auflagernähe begrenzt die Tragfähigkeit des Systems unabhängig von der Membran.

Die Analyse der Relativverformung beider Systeme zeigt, dass ein Anschlagen der Membran gegen die Pfetten und Verbände aufgrund der praktisch realisierbaren geringen Vorspannung und der allgemein geringen Krümmung im hoch belasteten vorderen Teil der Überdachung nicht völlig vermieden werden kann.

### *Vergleich Traglast System B2 und C2*

Die Ergebnisse der Traglastuntersuchung zeigen jedoch eine positive Wirkung für die Traglast der Kragträger im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Kapitel. Damit besteht eine starke Abhängigkeit zwischen Membranform, Verformung des Gesamtsystems und der erreichbaren Traglast des Systems. Zur Abschätzung des Einflusses der Membran und ihrer Form auf die Traglast der Kragarme wird das System B2 ohne Membran mit einer vergleichbaren Belastung untersucht. Das System erhält als Primärlastfall die Beanspruchungen aus der Formfindung des Systems B2. In der nachfolgenden Traglastermittlung werden die Membranelemente ausgeschaltet und die Windlast als anteilige Linienlast auf die Untergurte aufgebracht. Abbildung 7-51 zeigt das Resultat der Traglastuntersuchung aller drei Systeme. Als Referenzpunkt für die Verformung wurde Punkt 3 gewählt (Abb. 7-46). Der Vergleich der Versagensmechanismen der Systeme bestätigt die Annahme eines sehr großen Einflusses der Membran auf die Tragfähigkeit der Systeme. Das System ohne Membran versagt bei Lastfaktor 0.7. Ohne die stabilisierende Wirkung der Membran führen die wesentlich stärkere lokale Verformung der Untergurte bzw. des Gesamtsystems zum Ausfall der Zugdiagonalen und nachfolgend zu einer ungünstigeren Veränderung der Knicklänge der Untergurte. Verbunden mit schnell wachsenden Druckkräften führt die daraus resultierende Biegebeanspruchung zum Versagen der Kragträger (Abb. 7-48).

Ein weiterer Grund ist das für die Kragträger ungünstige Einleiten der Vorspannung als Einzellast über die vertikale Abspannung, anstatt als Linienlast oder mehrere verteilte Einzellasten. Das System B weist gegenüber dem System ohne Membran eine überraschend hohe Steigerung der Traglast von 100% auf. Allerdings ist anzunehmen, dass der Wert bei einer realitätsnahen Modellierung des Anschlagens der Membran an die Pfetten geringer ausfallen wird. Ein Teil der Windlasten wird dann über die Pfetten abgetragen, die wiederum eine Punktbelastung der Kragträger verursachen würden. Das System B2 versagt bei 1.7facher Last. Die Versagensursache ähnelt der des Systems ohne Membran. Das System verfügt über die größte Anfangssteifigkeit der untersuchten Systeme. Nach dem Abbau der Vorspannung im Kragträger und der Membran bei 0.3 und 0.4facher Last nimmt die Steifigkeit des Systems deutlich ab und die Membran beginnt im mittleren Bereich durchzuschlagen.

Die Tragfähigkeit des Systems C2 wird nach dem Erreichen der 0.4fachen Last hauptsächlich durch die elastische Steifigkeit der Membran bestimmt. Dementsprechend nimmt die Steifigkeit nach Erreichen dieser Laststufe deutlich ab. Sie liegt deutlich unter der des Systems B2 und zeigt bis zum Versagen einen nahezu linearen Verlauf. Eine Verstärkung der Membran durch textile Gurte oder durch

in Taschen geführte Seile würde die Steifigkeit des Systems zwar deutlich verbessern, dafür jedoch die ohnehin kritischen Kosten der Membranlösung weiterhin erhöhen.

Aus der Traganalyse und der Vorstellung des Prototypen bei verschiedenen Herstellern und Nutzern ergibt sich, dass das System B2 eine ausreichend leistungsfähige und wesentlich kostengünstigere Membranform darstellt. Nachteilig ist jedoch das sehr frühe Durchschlagen der Membran. Die weitere Optimierung des Konstruktionsprinzips befasst sich deshalb vor allem mit einer Reduzierung dieses Effekts.

#### 7.3.2.6 Geometrische Optimierung von Membran und Kragarmen

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen deutlich die Vorteile der Betrachtung von Stützkonstruktion und Membran als ein Gesamtsystem. In einem weiteren Optimierungsschritt sollen deshalb die Erkenntnisse aus der Analyse des Tragverhaltens der wandelbaren Kragträger und der Interaktion zwischen Membran und Stützkonstruktion zusammengefasst werden.

Ein wichtiger Aspekt der Verbesserung des Tragverhaltens der Konstruktion ist die Reduzierung der Verformung der Membran für geringe Windlasten. Damit würde die Geräuschbelästigung durch das Anschlagen an die Verbände und die Biegebeanspruchung der Pfetten vermieden werden. Zum Erreichen dieses Zieles bestehen verschiedene Möglichkeiten:

- Erhöhung der Vorspannung der Membran
- Einführung zusätzlicher Stützungen der Membran
- Änderung der Krümmung der Kragträger

Eine Erhöhung der Vorspannung führt zu wesentlich größeren Verankerungslasten und würde damit die Anwendbarkeit des Systems deutlich einschränken. Die für die angenommene Windbelastung notwendige Ankerlast von ca. 31.0 KN bei einer Vorspannung von 5.0 KN schöpft eventuelle Ballastierungsmöglichkeiten des Ankerpunktes weitgehend aus. Zusätzliche Stützungen der Membran verursachen einen deutlichen größeren konstruktiven Aufwand und beeinträchtigen die ästhetische Wirkung der Konstruktion. Damit erscheint die Änderung der Krümmung der Kragträger als sinnvollste Alternative. Die Weiterführung ihrer Krümmung über die Mitte der Träger hinaus ermöglicht die Ausbildung einer gleichmäßigen und stärkeren doppelten Krümmung der Membranfläche über die gesamte Länge. Die gewählte Kontur erfüllt die geometrischen Anforderungen und ermöglicht

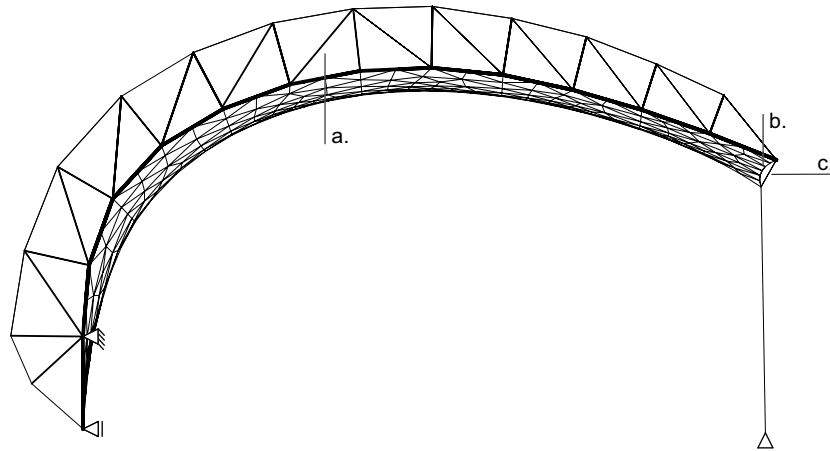


Abb. 7-52. Neue Kragträgergeometrie und Ausbildung des vorderen Membranrandes bzw. der Abspannung

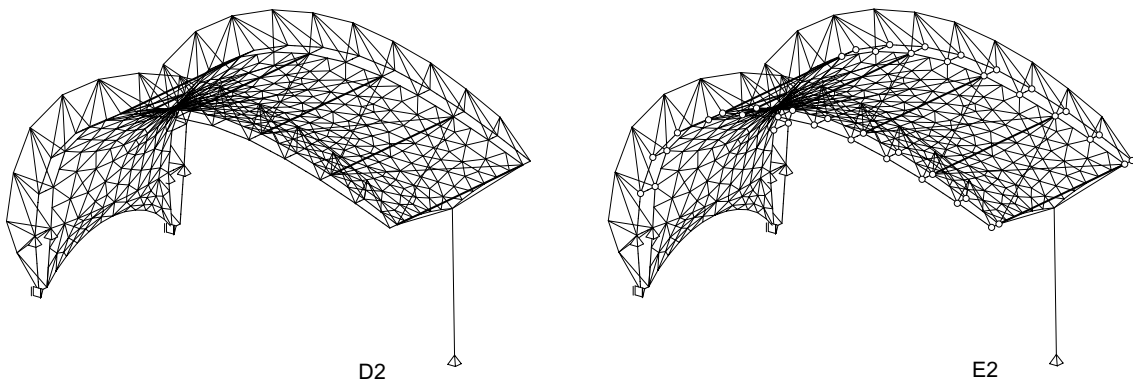


Abb. 7-53. System D2 - kontinuierlich durchlaufende Untergurte der Kragträger und E2 -

Abb. 7-54. System E2 - gelenkig verbundene Untergurte der Kragträger

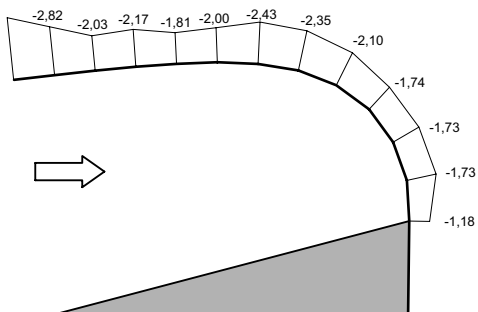


Abb. 7-55. Druckbeiwerte für die Geometrie des Prototyps

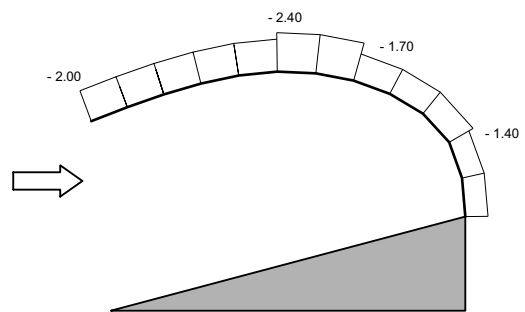


Abb. 7-56. Modifizierte Druckbeiwerte für die neue Geometrie des Systems



weiterhin verschiedene Alternativen für die konstruktive Umsetzung des ursprünglichen Montagekonzeptes.(Abb. 7-52)

Entsprechend den Ergebnissen der Analyse des Kragträgers des Prototypen wurde für die neue Kontur der Untergurte mit Hilfe der unter Absatz 7.3.1.6, S. 263 beschriebenen EXEL Routine die Gesamtgeometrie der Kragträger ermittelt. Als Parameter wurde die Sicherung einer Zugbeanspruchung der Diagonalen für die Lastfälle Vorspannung und Windbeanspruchung gewählt. Um bei nahezu konstanter Höhe der A-förmigen Vertikalstäbe zum Auflager hin die Normalkräfte in den Untergurten gering zu halten, wurde generell eine deutlich größere Höhe für Die A-förmigen Vertikalstäbe gegenüber der Geometrie des Prototypen gewählt. Die nichtlineare Untersuchung der Struktur mit der neuen Geometrie zeigt jedoch, dass die Ergebnisse aus der linearen Berechnung nur einen ersten Anhaltspunkt für die Stabkräfte geben. Aufgrund des ausgeprägten geometrisch nicht-linearen Verhaltens der Struktur, kann auch die optimierte Höhe der A-förmigen Vertikalstäbe nicht eine Druckbeanspruchung der zum Auflager steigenden Diagonalen verhindern. Damit sind auch für diese Geometrie Auskreuzungen bzw. Druckstäbe erforderlich. Um den Konstruktionsaufwand zu minimieren und die Wandelbarkeit zu vereinfachen, werden statt Auskreuzungen gegenläufige Druckstäbe (a) für die letzten sechs Felder vor dem Auflager verwendet. Die Druckbeanspruchung dieser Stäbe ist relativ gering, für bestimmte Lastfälle wandelt sie sich sogar in eine Zugbeanspruchung. Zur Vermeidung einer Überbeanspruchung der Membran durch Querkraft im Zwickelbereich zwischen vorderem Membranrand und Kragarmende werden Randseil (b) und Verbindung (c) von Vertikalseil und Kragarm durch zwei getrennte Seilelemente realisiert. Die bisher verwendeten Querschnittsabmessungen werden beibehalten. Die Windbelastung wird der neuen Form angepasst. Die bisher verwendeten Druckbeiwerte beruhen auf Ergebnissen aus Windkanaltest für die Geometrie des Prototypen. Daraus hatten sich insbesondere am fast geraden vorderen Ende der Überdachung ausgesprochen hohe abhebende Kräfte ergeben. Durch das Absenken des vorderen Randes und die stärkere Krümmung des Daches wird eine etwas günstigere Verteilung der Druckbeiwerte angenommen.(Abb. 7-56) Diese Annahme ist durch noch durchzuführende Windkanaluntersuchungen zu bestätigen.

Die Formfindung erfolgt mit einer Vorspannung von 5.0 KN im Vertikalseil und einer Vorspannung im hinteren Randseil von 4.8 KN. Die sich einstellende doppelte Krümmung verläuft wesentlich gleichmäßiger über die gesamte Länge der Membranfläche. Im Gegensatz zu System B wird die

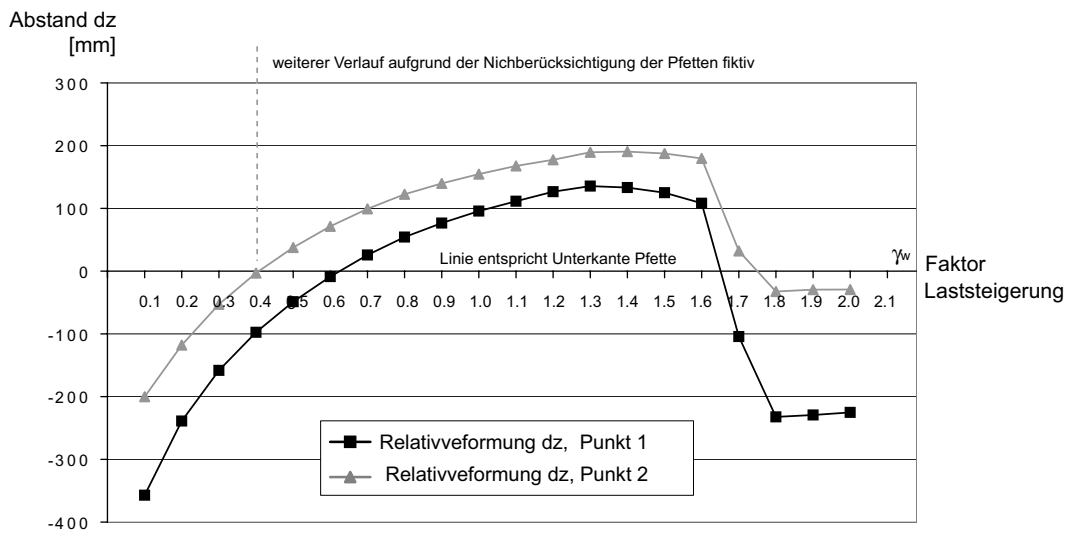


Abb. 7-57. Abstand Membran - Pfette für LK: Vorspannung, Eigengewicht, Wind, System D2

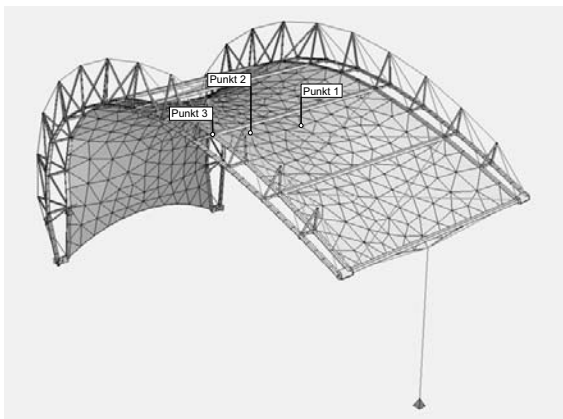


Abb. 7-58. Lage der Messpunkte- System D2

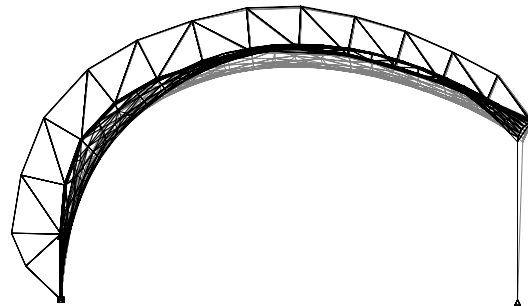


Abb. 7-59. Verformung bei Lastfaktor 1.0 - System D2

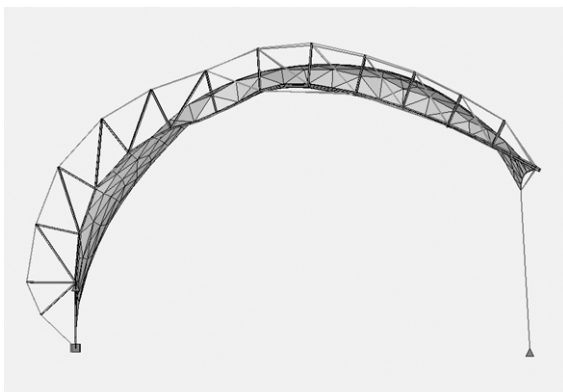


Abb. 7-60. Versagensfigur System D2 LF 1.5, 2fach überhöht, Grenzspannung der Kragträger überschritten

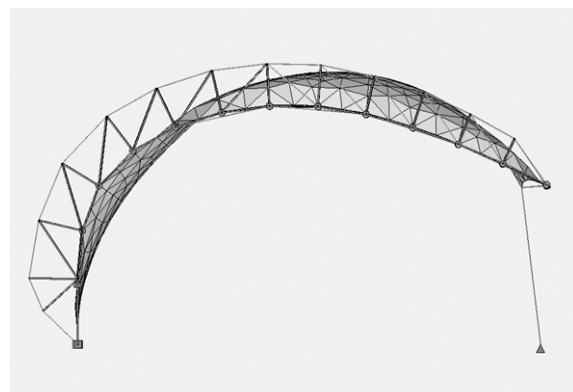


Abb. 7-61. Verformung System E2 für LF 3.0, 2fach überhöht, Grenzspannung der Membran überschritten

Beeinträchtigung des Lichtraumprofils im Bereich vor dem Auflager deutlich verringert und eine wesentlich stärkere Krümmung im Mittelbereich der Membran erreicht.

Die Analyse der Verformung der Membran ergibt zwar eine Verbesserung der Formstabilität der Membran gegenüber dem System B2, zeigt aber auch, dass sich für höhere Windlasten (Lastfaktor 0.6 für Punkt 1 und Lastfaktor 0.4 für Punkt 2) ein Anschlagen der Membran an die Verbände nicht vermeiden lässt. (Abb. 7-57) Im Gegensatz zu System B2 behält die Membran auch bei 1.0facher Last eine doppelte Krümmung im kritischen Mittelbereich. Um eine größerer Formstabilität der Membran zu erreichen, die ein Anschlagen gegen die Verbände grundsätzlich verhindert, ist ein wesentlich höheres Niveau für die Vorspannung der Membran notwendig.

#### *System D2 und E2*

Die Traglastuntersuchung erfolgt an zwei verschiedenen Systemen. System D2 besitzt Untergurte aus biegesteif verbundenen geraden Stäben. In System E2 sind die Stäbe gelenkig in der Ebene der Kragträger verbunden. System D2 weist eine hohe Anfangssteifigkeit auf. Das System versagt bei Lastfaktor 1.5 aufgrund des Erreichens der Grenzspannung der Untergurte. System E2 zeigt ein grundsätzlich gegensätzliches Verhalten. Aufgrund der gelenkigen Verbindungen beginnt sich das Gesamtsystem belastungsaffin zu verformen. Das System versteift sich unter Last. Untergurte und Obergurte erhalten bei einer fortlaufender Laststeigerung Zugbeanspruchungen. Das Erreichen der Grenzspannung der Membran und der Fließgrenze des Obergurts führen zu einem Versagen des Systems. Auch hier gilt zu beachten, dass das Anschlagen der Membran an die Pfetten und die daraufhin sich verändernde Beanspruchung der Kragträger das Ergebnis beeinflussen kann. Grundsätzlich bietet aber die veränderte Geometrie und die gelenkige Verbindung der Untergurte dem System die Möglichkeit, sich unter Belastung zu versteifen.

#### 7.3.3 Zusammenfassung

Die Studie beschäftigte sich mit zwei grundlegenden Fragen: lässt sich die Membranform vereinfachen sowie ein Anschlagen der Membran an die Aussteifungsverbände verhindern und wie groß ist der Einfluss der Membran bzw. ihrer Form auf das Tragverhalten der Stützkonstruktion?

Die Analyse der verschiedenen Systeme zeigt, dass die Membran einen deutlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Gesamtsystems besitzt. Ursache hierfür ist die relativ geringe Steifigkeit der Stützkonstruktion.

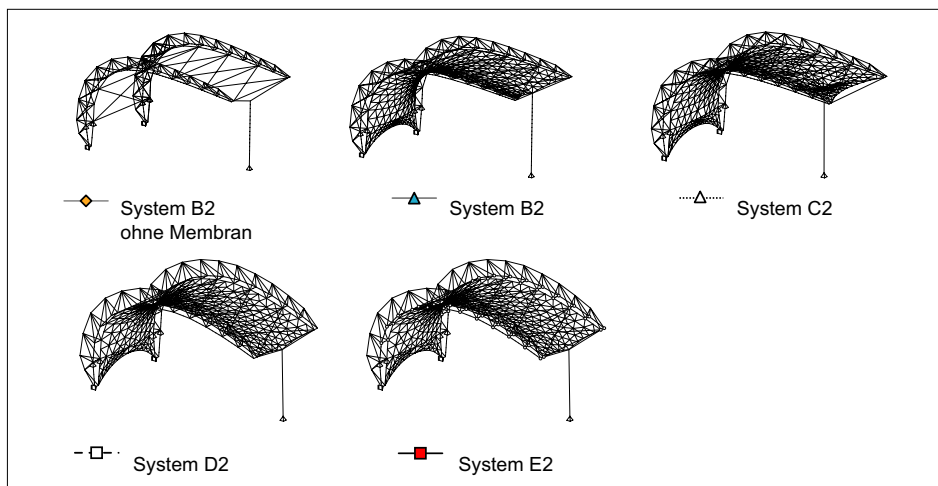
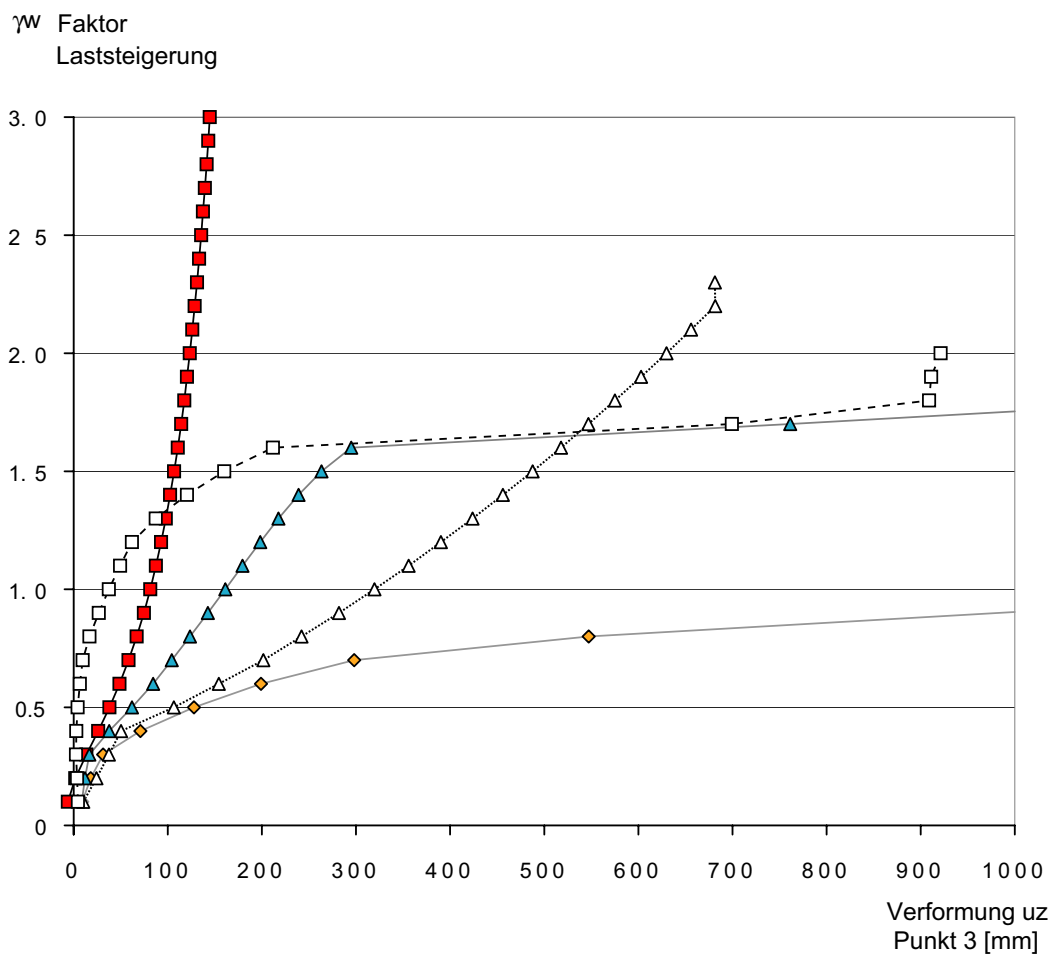


Abb. 7-62. Vergleich der Traglast für LK2 der Systeme B, C, D und E

Die einfachste Form der Membran ohne Tiefpunkt und ohne eine Mittelabspannung des vorderen Randseils (System A2) führt schon bei geringen Windsogbelastungen zu einem Anschlagen an die Verbände. Grundproblem ist die sehr geringe doppelte Krümmung der Fläche im vorderen Bereich. Durch die Kombination von Vertikalabspannung und vorderem Randseil (System B2) wird die Krümmung der Membranfläche in diesem Bereich deutlich verbessert. Ein Anschlagen der Membran an die Verbände kann nicht grundsätzlich vermieden werden. In Bezug auf dieses Problem erweist sich die Membranform des Prototypen (System C) als die vorteilhafteste Variante. Aber auch hier kann ein Anschlagen der Membran an die Verbände nicht völlig vermieden werden. Insgesamt zeigt sich, dass durch das relativ geringe Vorspannungsniveau die Membran bei Windsogbelastungen zu großen Verformungen neigt, die in Folge zu Biegebeanspruchungen der Druckstreben der Verbände führen. Dies ist bei der Dimensionierung dieser Elemente zu berücksichtigen. Im Falle des Systems mit einer Mittelabspannung (System B2) wird durch die vorwiegende Einleitung der Abspannung der Kragträger über Rand- und Vertikalseil die Anfangssteifigkeit gegenüber dem System des Prototypen (System C2) erhöht und ein deutlich verbessertes Verformungsverhalten des Gesamtsystems in der Traglaststeigerung erreicht. Die Steifigkeit des System C2 wird nach dem Abbau der Vorspannung weitestgehend durch die elastische Steifigkeit des Membranmaterials bestimmt, was zu starken Verformungen des Gesamtsystems führt. Das System mit einer deutlich veränderten Geometrie der Kragarme und einer von der Membran weitgehend unabhängigen Mittelabspannung (System D2), erhält die Gesamtkonstruktion eine ausreichende Anfangssteifigkeit und zeigt ein zufriedenstellendes Verhalten unter zunehmender Belastung. Das Problem der großen Relativverformung der Membran gegenüber den Verbänden kann aber auch mit dieser Änderung nicht endgültig gelöst werden.

Die Ausbildung der Kragträger als reine Fachwerksysteme (System E2) verändert das Tragverhalten der Gesamtkonstruktion grundlegend. Die Anfangssteifigkeit nimmt gegenüber System D2 ab, dafür kann aber das Gesamtsystem aufgrund der gelenkig verbundenen Untergurte eine neue belastungsfine Form finden, die infolge zu einem starken Anstieg der geometrischen Steifigkeit der Kragträger führt. Der Einfluss der Membran auf das Tragverhalten des Gesamtsystems nimmt daraufhin stark ab.

#### 7.4 Schlussfolgerung

Der Grundgedanke, die elastische Verformung druck- und biegebeanspruchter Elemente für die Formänderung wandelbarer Tragwerke einzusetzen, ermöglicht eine wesentliche Vereinfachung der Konstruktion, eine Beschleunigung des Aufbauprozesses und neue gestalterische Möglichkeiten. Die Verwendung dieses Prinzips setzt jedoch möglichst große Krümmungsradien der zu verformenden

Elemente und den Einsatz hochelastischer Materialien voraus. Dies bedeutet für die mobile Tribünenüberdachung, dass die Untergurte der Kragträger aus GFK oder sehr hochwertigen Aluminiumlegierungen ausgeführt und die Krümmungsradien zum Auflager hin geringfügig vergrößert werden müssen.

Ein grundlegendes Problem mobiler Membrankonstruktionen besteht in der Notwendigkeit, erforderliche Ankerlasten aus Abspannungen auf ein Minimum zu reduzieren, da die Verankerung von großen Zugkräften durch Stab- oder Spezialanker bzw. eine entsprechend große Ballastierung nicht möglich oder stark eingeschränkt ist. Damit ist die für permanente Konstruktionen oft verwendete Lösung, sehr leichte Tragwerke durch entsprechend hohe Vorspannung zu versteifen, bei offenen statischen Systemen nur eingeschränkt anwendbar. Die Tribünenüberdachung ist ein solches offenes statisches System, das aufgrund kleiner Ankerkräfte nur eine relativ geringe Vorspannung in der vertikale Abspannung und damit für das Gesamtsystem erlaubt.

Das von den Profilrahmen- und Bogenhallen abgeleitete Prinzip der Verbindung von Membran und Stützkonstruktion und Montagevorgang der Membran erweist sich für die Ausbildung einer doppeltgekrümmten Membran mit größeren Spannweiten als nicht günstig. Die konstruktiv und gestalterisch sehr vorteilhafte Kederverbindung zwischen Membran und Stützkonstruktion erfordert eine Montage der Membran durch Einziehen entlang der Stützkonstruktion. Damit wird auch die Möglichkeit der Vorspannung der Membran quer zur Stützkonstruktion stark eingeschränkt. Das sich aus diesen Randbedingungen ergebende Vorspannungsniveau der Membran kann trotz einer doppelten Krümmung der Fläche ein Anschlagen der Membran an die Aussteifungsverbände nicht verhindern. Um die daraus resultierende Belastung dieser Tragelemente durch die Membran bzw. eine Geräuschentwicklung grundsätzlich zu vermeiden, ist eine Änderung des Montagekonzeptes bzw. der Art der Stützung und Randausbildung der Membran notwendig.

Grundsätzlich zeigen die statischen Untersuchungen, dass bei einer Annäherung Steifigkeiten von Stützkonstruktion und Membran die Berücksichtigung der Interaktion zu einer deutlichen Erhöhung der Traglast führen kann. Sie erfordert jedoch eine relativ aufwendige und präzise Modellierung des Gesamtmodells. Die Möglichkeiten, durch einfachere lineare Modelle das Tragverhalten während des Entwurfsprozesses abzuschätzen, sind dementsprechend begrenzt.

## 8 Zusammenfassung

### 8.1 Schlussfolgerung

Der in Kapitel 3 dargestellte geschichtliche Überblick der Entwicklung mobiler Membrankonstruktionen im 20. Jahrhundert und die Analyse aktueller Beispiele in Kapitel 4 zeigen, dass die Mehrzahl der sich im Einsatz befindlichen Systeme sehr einfache Konstruktionen verwenden, die nur zum Teil die in Kapitel 2 erläuterten Möglichkeiten des Membranbaus ausnutzen. Insbesondere in der Gruppe der Bogen- und Rahmenkonstruktionen, bei denen die Membran fast ausschließlich als ebene oder einfach gekrümmte Fläche die Funktion einer Hülle für ein in sich stabiles steifes Primärtragwerk erfüllt, beschränken sich die technischen Neuerungen vorwiegend auf die Anschlussdetails und die Optimierung einzelner Tragelemente. Strukturelle Neuansätze sind nur in einigen wenigen Fällen festzustellen. So konnten für den Einsatz einer wandelbaren Stützkonstruktion zur Beschleunigung und Vereinfachung der Montage bzw. für die Nutzung der Membran als stabilisierendes Element des Primärtragwerks für Membrankonstruktionen mittlerer und großer Spannweite nur jeweils ein Beispiel ermittelt werden.

Die in Kapitel 5 entwickelte Morphologie mobiler Membrankonstruktionen, geordnet nach den Parametern Form, Konstruktion und Montage, erlaubt eine Klassifizierung der Vielfalt der existierenden Systeme, die weiter führt als die allgemein übliche Zuordnung nach Lagerungs- und Stützungsart bzw. Art des Stütztragwerks. Die Definition von Grundtypen wandelbarer Tragwerke und die Analyse der beiden Konstruktionsparameter Tragwerk und Hülle anhand des Merkmals der Wandelbarkeit ermöglicht die Zuordnung geeigneter Mechanismen für bestimmte Tragwerksarten und Hüllen. Der Vergleich der verschiedenen Systeme mobiler Überdachungen zeigt, dass vor allem bogenförmige Konstruktionen eine ganze Reihe von Vorteilen für die Entwicklung effizienter mobiler Überdachungen im Zusammenhang mit mechanisch vorgespannten Membranen bieten. In den folgenden beiden Fallstudien wird die entwickelte Morphologie erfolgreich zur Analyse geeigneter Konstruktionsweisen und Aufbauvarianten verwendet.

Die in Kapitel 6 dargestellte Konzeptentwicklung für ein mobiles Hallensystem mit einem wandelbaren Bogentragwerk als Skelett und einer doppelt gekrümmten Membran als Hülle demonstriert das Potential der Konstruktionsweise für die Entwicklung modularer und flexibel einsetzbarer weitge-

spannter Systeme. Der entwickelte neuartige einfache Mechanismus ermöglicht prinzipiell die Errichtung von Bogentragwerken mittlerer und großer Spannweite, sowie unterschiedlichster Bogengeometrien, ohne schwere Hebewerkzeuge. Ein weiteres Merkmal ist die Möglichkeit, die gesamte Konstruktion auf der Grundfläche der späteren Halle vom Boden aus mit einem geringen personellen Aufwand zu errichten. Die Montage der Membran kann entweder gemeinsam mit der Errichtung der Stützkonstruktion oder nachträglich erfolgen.

Die innerhalb einer Parameterstudie durchgeführte Untersuchung der Interaktion zwischen Bogentragwerk und Membran führt zu dem Ergebnis, dass die Tragfähigkeit der Stützkonstruktion durch die Berücksichtigung der Membran nicht grundsätzlich verbessert werden kann. Die mechanisch vorgespannte Membran kann zwar sehr wirksam zur Stabilisierung der Bögen senkrecht zur Bogenebene verwendet werden, ihre versteifende Wirkung auf den Bogen in der Bogenebene ist jedoch sehr gering.

Die in Kapitel 7 dargestellte Entwicklung und Analyse einer mobilen Tribünenüberdachung demonstriert die Anwendungsmöglichkeit wandelbarer Stütztragwerke insbesondere für die Entwicklung schnell errichtbarer mobiler Membrankonstruktionen, aber auch den erforderlichen hohen Planungsaufwand gegenüber konventionellen Systemen. Das für die spezifische Anwendung einer frei auskragenden Überdachung verwendete neuartige hybride wandelbare Tragwerk ermöglicht eine Vereinfachung der Konstruktion, eine Beschleunigung des Aufbauprozesses und eröffnet neue Möglichkeiten für die Gestaltung. Entwicklung und Analyse vom Grundkonzept bis zum Prototypen zeigen jedoch, dass der Einsatz biegeelastisch verformter Elemente zur Formänderung für größere Spannweiten grundsätzlich eingeschränkt ist. Die bei kleiner werdenden Krümmungsradien relativ hohe Ausnutzung von Querschnitten durch die Vorbiegung reduziert die Tragfähigkeit des Systems wesentlich.

Die Analyse des Tragverhaltens der wandelbaren Kragträger innerhalb einer Parameterstudie zeigt, dass eine weitere strukturelle Schwäche des Systems in der Beschränkung der Höhe der Vorspannung durch die begrenzten Ankerlasten liegt. Die sich daraus ergebende nicht ausreichende Versteifung der Kragträger führt zu einer starken nichtlinearen Verformungen der Stützkonstruktion. Die Berücksichtigung der Interaktion zwischen Membran und Kragträgern wirkt sich überraschend stark auf die Tragfähigkeit des Gesamtsystems aus. Die Ursache hierfür ist die wesentlich gleichmäßigere Übertragung der Kraft aus der Abspannung auf den Kragträger durch die Membran, als durch Einzelab-



spannungen an den Kragarmenden. Die gekrümmte Form der Kragträger verursacht bei einer starken Belastung am Kragarmende eine stark ansteigende Verformung und damit eine zusätzliche Beanspruchung. Durch die Verteilung der Belastung aus der Einzellast der Abspannung durch die Membran zum Auflager hin wird dieser Effekt verringert und die Tragfähigkeit erhöht. Die stabilisierende Wirkung der Membran auf die Untergurte ist, aufgrund der geringen Vorspannung und Krümmung der Membran, als eher gering anzusehen. Damit lassen sich aus diesem sehr spezifischen Anwendungsbeispiel keine allgemeinen Aussagen über die Vorteile einer Berücksichtigung der Interaktion von Stütztragwerk und Membran formulieren.

Die Analyse des Tragverhaltens der Membran unter Windsog bzw. Windruck zeigt, dass das Vorspannungsniveau in der Membran generell zu niedrig ist, um ein Anschlagen der Membran an die Aussteifungsverbände zu verhindern. Neben der zuvor diskutierten relativ begrenzten Möglichkeit der Vorspannung in Längsrichtung, liegt die Ursache in der sehr geringen Vorspannung in Querrichtung der Fläche, die aus der gewählten Kederverbindung zwischen Membran und Stützkonstruktion in Verbindung mit einer Montage durch das Einziehen des Kederrandes in ein Randprofil resultiert. Diese für die Rahmen- oder Bogenkonstruktionen aus Strangpressprofilen in Verbindung mit ebenen bzw. einfach gekrümmten Membranflächen typische Konstruktionsweise führt bei der Realisierung von doppelt gekrümmten Membranflächen zu nicht ausreichend stabilisierten Flächen.

## 8.2 Ausblick

Die in Kapitel 5 entwickelte morphologische Darstellung mobiler Membrankonstruktionen kann als Werkzeug bei der Entwicklung mobiler Überdachungen verwendet werden. Sie ist ebenfalls zur Klassifizierung bestehender Systeme und Identifizierung neuer Forschungsgebiete geeignet.

Das in Kapitel 6 vorgestellte Konzept eines Hallensystems mit einem wandelbaren Bogentragwerk als Skelett und einer mechanisch vorgespannter Hülle kann durch die Anwendung eines einfachen Mechanismus die Errichtung einer Gesamtkonstruktion mittlerer oder großer Spannweite mit wenigen Hilfsmitteln und minimalen personellen Einsatz ermöglichen. Dadurch ist das System in seiner Anwendung sehr flexibel und kann auch für Einsätze an schwer erreichbaren Standorten verwendet werden. Weiterhin sollten die Möglichkeiten untersucht werden, den generellen Vorteil des entwickelten Mechanismus, bogenförmige Tragwerke beliebiger Form und Spannweite mit wenigen Hilfsmitteln unter Einsatz einer, geringer Vertikalkraft zu errichten, für die Montage von permanenten Bauwerken zu nutzen.

Für das entwickelte Hallensystem stellen bei einem Verzicht auf Abspannungen an den Giebelseiten die dann erforderlichen Verbände in den Giebelfeldern ein strukturelles Problem dar. Ein effizienter Einsatz mechanisch vorgespannte Membran erfordert Membranflächen möglichst großer Breite. Daraus entstehen in den Verbänden Druckstäbe mit relativ großen Knicklängen, die wiederum große Querschnitte bzw. weitere Elemente zur Stabilisierung erfordern. Zur Lösung dieses Grundproblems erscheint eine weiterführende Untersuchung über die Abhängigkeiten der einzelnen Parameter wie die alternative Ausbildung der Verbände, Anzahl der Bögen, Beeinflussung der Montagezeiten und Abläufe, Teilflächenverbindung und Randausbildung der Membran, mögliche Wandelbarkeit der Membranhülle sowie Herstellung und Transport der Gesamtkonstruktion sinnvoll.

Die relativ geringe stabilisierende Wirkung der Membran in Bogenebene erfordert den Einsatz von stabilisierenden Elemente in Bogenebene, um möglichst leichte und effiziente Stütztragwerke zu entwickeln. Dabei stellen die Anforderungen an das Lichtraumprofil und eine mögliche Wandelbarkeit des Bogentragwerks schwierige Randbedingungen für die Entwicklung entsprechender versteifender System dar. Neben der Ausbildung von verschiedenen Seilverspannungen ist aber auch hier die Anwendung von Membranen als ebenes aussteifendes Element in Bogenebene [3] denkbar und stellt ein interessantes Gebiet für zukünftiger Forschung dar.

Eine Nutzung der Stabilisierung der Bögen senkrecht zur Bogenebene durch die Membran ist generell möglich. Für das Primärtragwerk sollte sie immer zur Reduzierung der Verformungen im Gebrauchszustand mit berücksichtigt werden. Für den Nachweis der Standsicherheit des Primärtragwerks ist Anwendung des stabilisierende Wirkung der Membran bei entsprechender Redundanz des Gesamtsystems im Falle eines Membranversagens möglich. Hierbei spielt das Weiterreißverhalten des verwendeten Membranwerkstoffs eine entscheidende Rolle.

# Literaturverzeichnis

## Bücher, Beiträge in Zeitschriften

- [1] Ackermann K.: Tragwerke in der konstruktiven Architektur – Grundlagen für das Entwerfen und Konstruieren, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1988
- [2] Alpermann H.: Interaktion eines Bogentragwerks mit einer mechanisch vorgespannten Membran; Diplomarbeit, TU München, 2002
- [3] Burford N, Gengnagel C.: Mobile Shelter Systems - 2 Case Studies in Innovation; Conference Proceedings IASS Symposium 2004; Shell and Spatial Structures from Modells to Realization; Montpellier France 2004
- [4] H.Ayrle: Welche Chancen hat der Textilbau in der Veranstaltungsarchitektur ?, Bauen mit Textilien Heft 3 /1998, Ernst & Sohn 1998
- [5] Barnes M. : Form and Stress Engineering of Tension Structures; Structural Engineering Review; Volume 6; Number 3 -4
- [6] Bellmann J.: Membrantragwerke und Seifenhaut - Unterschiede in der Formfindung, Bauingenieur 70, Springer VDI Verlag 1995
- [7] Bletzinger K.-U., Ziegler R.: Theoretische Grundlagender numerischen Formfindung von Membranttragwerken und Minimalflächen, Beton-Kalender 2000, Ernst & Sohn, Berlin 2000
- [8] Blum R.: Zeltbaumaterialien; in "Leicht und Weit", S. 200ff, VCH-Verlagsgesellschaft, 1990
- [9] Bird W., Kinnius R.A.: The History of the Air Structures in The USA; Institut für leichte Flächentragwerke (Hrsg): IL16- Zelte, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1976
- [10] Bubner, E.: Membrankonstruktionen-Verbindungstechniken, 2.Auflage Druckerei Wehlmann GmbH, Essen 1999
- [11] Burkhardt B.: Geschichte des Zeltbaus, in Detail 6/2000, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 2000
- [12] Burkhardt B.: Hallen und Hangars für Luftschiffe in Beiträge zur Geschichte des Bauingenieurwesens 10, Verkehrsbauten, Hrsg. Prof. E.Schunck TU München 1999
- [13] Büttner O., Hampe E.: Bauwerk Tragwerk Tragstruktur – Klassifizierung Tragqualität Bauwerkbeispiele, Verlag für das Bauwesen, Berlin 1985

- [14] Cover-All Deutschland GmbH: Cover-All - Das Innovative Hallensystem; Produktinformation; Ochtrup 2004
- [15] De Boer: Product Information Olympia; De Boer International B.V. Alkmaar 2004
- [16] Dupavillon C.: Architectures du Cirque - des origenes a nos jours; Edition Le Moniteur, 2.Auflage, Paris 2001
- [17] Escrig F., Brebbia C.A.(Hrsg): Mobile and Rapidly Assembled Structures II; Conf. Proc. Computational Mechanics Publications, Southampton 1996
- [18] Friebe W.: Architektur der Weltausstellungen 1851 bis 1970, W.Kohlhammer GmbH 1983,
- [19] Försters Allgemeine Bauzeitung, Wien 1867 S. 51-59, 100- 107
- [20] Göppert K.: Primärtragwerke für Membranbauten; in Bauen mit Membranen - Der innovative Werkstoff in der Architektur, Hrsg. K.-M. Koch, Prestel 2004
- [21] Gründig L.: Die Berechnung von vorgespannten seilnetzen und Hängernetzen unter Berücksichtigung ihrer topologischen Eigenschaften und der Ausgleichsrechnung; Dissertation am IAGB; Universität Stuttgart; DGK Reihe C Nr. 216 1976 und SFB Mitteilungen 34/1976
- [22] Gründig L., Moncrieff E.: Computational Modelling; Conference Proceedings Textile Roof 97; Second Workshop on the Design and Practical Realisation of Architectural Membrane Structures; Technische Universität Berlin 1997
- [23] Gödel A., Sigrid D., Mauksch D., Kayser C.: Spiegelzelt, in: Zelte, Studienarbeit Lehrstuhl Prof. Kiessler TU München 2002
- [24] Habermann K.J.: Zur Geschichte der Zirkuszelte, Konstruktionen mit Holz, Stahl und textilen Membranen; in Detail 8/1996, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 1996
- [25] Habermann K.J.: Geschichte des Membranbaus; in Bauen mit Membranen - Der innovative Werkstoff in der Architektur, Hrsg. K.-M. Koch, Prestel 2004
- [26] Hanaor A: Some structural-morphological aspects of deployable structures for space enclosures, Proceedings 4. International Colloquium on Structural Morphology, Delft University of Technology 2000
- [27] Herzog T.: Pneumatische Konstruktionen - Bauten aus Membranen und Luft; Verlag Gerd Hatje, Stuttgart 1976
- [28] Herzog T.: Bauen mit Membranen - Perspektiven und künftige Optionen; in Bauen mit Membranen - Der innovative Werkstoff in der Architektur, Hrsg. K.-M. Koch, Prestel 2004

- 
- [29] Hibbitt, Karlsson & Sorensen: Static Postbuckling and Collapse Analysis Using the Modified Riks Procedure; in Answers to Common ABAQUs Questions, 1997
- [30] Institut für leichte Flächentragwerke (Hrsg): IL5 - Wandelbare Dächer, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1972
- [31] Institut für leichte Flächentragwerke (Hrsg): IL12 - Wandelbare Pneus, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1975
- [32] Institut für leichte Flächentragwerke (Hrsg): IL16- Zelte, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1976
- [33] Institut für leichte Flächentragwerke (Hrsg): Lufthallenhandbuch,
- [34] Koch K.: Das Buddy Holly Mobiltheater in Hamburg als ein Beispiel temporärer Bauwerke in Membranbauweise; Bauingenieur 71, Springer VDI Verlag 1996
- [35] Kronenburg R.: Portable Architecture, 1. Auflage, Architectural Press New technology Series 1996
- [36] Kronenburg R.: Houses in Motion, The Genesis, History and Development of Portable Buildings, 2. Auflage, Wiley Academay 2002
- [37] Kronenburg R., Dalland T.; Goldsmith N.: Future Tents Limited (FTL) Architects- Softness Movement and Light; John Wiley & Sons; 1997
- [38] Künzel, O.: Tragkonstruktionen I, Lehre von den Kräften, Statisch Bestimmte Tragwerke, Festigkeitslehre, Skriptum zur Vorlesung; ETH Zürich Abteilung für Architektur 1994
- [39] Kugel, F.: Zelt aufschlagen; Die Montage von Membranbauten - Lösungskonzepte an Beispielen; db Deutsche Bauzeitung 9/96, Konradin Medien GmbH 1996
- [40] Larkin W.B.: Steel-Frame Portable Aircraft Hangars, Engineering News Record, Mai 1946
- [41] Linkwitz K., Ströbel D., Singer P.: Die Analytische Formfindung; in: Prozess und Form - "Natürliche Konstruktionen" - Der Sonderforschungsbereich 230; Ernst &Sohn; Berlin 1996
- [42] Ludwig, M.: Mobile Architektur, Geschichte und Entwicklung transportabler und modularer Bauten, DVA Stuttgart 1998
- [43] Mallory K.; Arvid O.: Walls of war - a history of military architecture in North West Europe 1900-1945 London, Astragal Books, 1979 Originally published as "Architecture of aggression", Architectural Press, 1973
- [44] Mamilton K.P., Champell D. M., Gossen P.A.: Cuurent State of Development and Future Trends in Employment of Air-Supported Roofs in Long -span Applications; Proceedings IASS International Symposium; Atlanta 1994

- [45] Moritz K.: Membranwerkstoffe im Hochbau - Gewebe und Folien; in: DETAIL Praxis – Transluzente Materialien – Glas Kunststoff Metall; Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 2003
- [46] Moritz K.: Materialeinsatz und Konfektionierung von Membranwerkstoffen; Stahlbau 69 Heft 8 ; Ernst & Sohn 2000
- [47] Moritz K.: Membranwerkstoffe im Hochbau ; in: Detail 6/2000; Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 2000
- [48] Münsch R., Reinhardt H.-W.: Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichtetem Gewebe mit Hilfe genäherter elastischer Materialparameter, Bauingenieur 70, Springer VDI Verlag 1995
- [49] Oasys Ltd.(Hrsg): Dynamic Relaxation; Solution method used by Fablon, GSA for Windows, OASYS-Ltd. Newcastle 2000
- [50] Rein A., Wilhelm V.: Das Konstruieren mit Membranen ; in: Detail 6/2000; Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 2000
- [51] Riks E.:The application of Newtons´ s Method to the Problem of Elastic Stability, Journal of Applied Mechanics, 1972 , Bd. 39, S.1060- 1066
- [52] Roland C.: Frei Otto - Spannweiten; Ideen und Versuche zum Leichtbau; Verlag Ullstein GmbH, Frankfurt/M - Berlin 1965
- [53] Rückert G.: Wandelbare hybride Konstruktionen - von der morphologischen Studie zum Prototyp, Dissertation ETH Zürich 2000
- [54] Schlaich J.(Hrsg): Bauen mit Seilen, Vorlesungsskript, Institut für Konstruktion und Entwurf II, Universität Stuttgart, 2000
- [55] Schmitt, E.: Zirkus- und Hippodromgebäude; Handbuch der Architektur; Bergsträsser Verlag; Stuttgart 1904
- [56] Sedlak V.: The Morphological Approach to the Teaching of Structures, Conferenc Proceedings, LSA86 International Conference on Lightweight Structures In Architecture, University Research Ltd., Sydney 1986
- [57] Seraphin M.: Zur Entstehung des Ingenieurholzbaus, Eine Entwicklungsgeschichte Diss., Shaker Verlag 2003
- [58] SL Rasch GmbH: SL Rasch - The Work of SL; Bürobroschüre; SL Rasch GmbH Special and Lightweight Structures; Leinfelden Echerdingen 2002
- [59] Sobek W., Speth M.: Textile Werkstoffe, in: Bauingenieur 70, Springer VDI Verlag 1995

- [60] SOFISTIK AG (Hrsg): Membrantragwerke - Formfindung und statische Analyse; Handbuch Stand 16.03.2000; SOFiSTiK AG München
- [61] Taylor B.:Inflatable Structures-air apparent- New innovations make inflatable structures a viable - even preferable-options for semi permanent installations; in InTents 12/2002 -01/2003; www.intents.info
- [62] Verge A.S.: Rapidly Deployable Structures in Collective Protection Systems, Soldier Biological Chemical Command, US Army Natick Soldier Centre 2002
- [63] Wagner, R.: Technisches Handeln als formerzeugender Vorgang beim Bauen, Dissertation Universität Stuttgart
- [64] Wagner R. Raible T.: Wann trägt Luft wirklich ? in: Bauen mit Textilien, 3/2000; Ernst & Sohn; Berlin 2000
- [65] Wallner, M.: Bewegliche Tragwerke, Aus der Sicht der Tragwerkslehre für Architekten, Dissertation, TU Graz 2003
- [66] Wakefield D.: Grundlagen zur Berechnung von Membrankonstruktionen; in Bauen mit Membranen - Der innovative Werkstoff in der Architektur, Hrsg. K.-M. Koch, Prestel 2004
- [67] Waterson,R.: Mobilität in der traditionellen Architektur, in Detail 8/1998 S.1372, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 1996
- [68] Wilhelm Layher GmbH & Co. KG: Kederdach und -hallen-System; Produktinformation; Wilhelm Layher GmbH & Co. KG 2004
- [69] Zimmermann M.: Untersuchung zum Unterschied zwischen Formfindung und dem aus Bahnen zusammengefügt System bei Membrantragwerken; Diplomarbeit ILEK; Universität Stuttgart 2000
- [70] Zwicky, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im Morphologischen Weltbild, Fritz Zwicky Stiftung, Verlag Baeschlin, Glarus 1989

#### Webseiten

- [71] [www.ablyshelters.co.uk](http://www.ablyshelters.co.uk); Juni 2004
- [72] [www.bigtopshelters.com](http://www.bigtopshelters.com); Juni 2004
- [73] [www.binisystems.com](http://www.binisystems.com); September 2003
- [74] [www.bruno.postle.net](http://www.bruno.postle.net); Mai 2003
- [75] [www.deboer.com](http://www.deboer.com); Juli 2004

- [76] [www.circus-crone.de](http://www.circus-crone.de); Juli 2004
- [77] [www.contitech.de](http://www.contitech.de); Juni 2004
- [78] [www.coverall.net](http://www.coverall.net); Juni 2004
- [79] [www.drash.com](http://www.drash.com); Oktober 2003
- [80] [www.europeenne-de-spectacles.com](http://www.europeenne-de-spectacles.com); Mai 2004
- [81] [www.ftl-happold.com](http://www.ftl-happold.com); August 2002
- [82] [www.haltec.net](http://www.haltec.net); Juni 2004
- [83] [www.kayam.co.uk](http://www.kayam.co.uk); Juni 2004
- [84] [www.natick.army.mil](http://www.natick.army.mil); Dezember 2003
- [85] [www.knie.ch](http://www.knie.ch); Juli 2004
- [86] [www.sl-rasch.de](http://www.sl-rasch.de); Juli 2004
- [87] [www.rudienosdesign.com](http://www.rudienosdesign.com); Mai 2003
- [88] [www.spannbau.com](http://www.spannbau.com); Juni 2004
- [89] [www.sprung.com](http://www.sprung.com); Oktober 2003
- [90] [www.strarch.com](http://www.strarch.com); Oktober 2003, 2004
- [91] [www.summitstructures.com](http://www.summitstructures.com); Oktober 2003
- [92] [www.tacticalshelters.com](http://www.tacticalshelters.com); März 2004
- [93] [www.tvicorp.com](http://www.tvicorp.com); Oktober 2003
- [94] [www.vertigo-inc.com](http://www.vertigo-inc.com); November 2003
- [95] [www.weatherhaven.com](http://www.weatherhaven.com); Juni 2004
- [96] [de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode](http://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode); Juli 2004



## Patentschriften

- [97] GB 119339: An Improved Construction of Tent, Field Hospitals, Depots and like purposes; November 1917
- [98] US 4.583.331: Frame Supported Structure With Tensioned Fabric Panels, 1983
- [99] US 4.689.932: Portable Shelter Assemblies, 1987
- [100] US 4.796.389: Reticular spatial structure, 1989
- [101] US 4.838.294: Openable Enclosures and Structures Incorporating Such Inclosures; June 1989
- [102] US 4.890.429: Building Truss; 1990
- [103] US 5.159.790: Frame Structure, November 1992
- [104] US 5.230.196: Polyhedron Building System, 1990
- [105] US 5.943.837: Quick Erect Shelter Aparatus, 1997
- [106] US 6.026.613: Truss Arch For Fabric Covered Buildings And The Like, Februar 2000
- [107] US 6.085.468: Truss Arch For Fabric Covered Buildings And The Like, Juli 2000
- [108] US 6.145.526: Tie Down System For Fabric Covered Buildings, November 2000
- [109] US 6.564.513: Extrusion Design And Fabric Installation Method For Weather Tight Seal, May 2003
- [110] WO 96.01930: Self-Supporting Collapsible Covered Frame Structure, 1996



# Abbildungsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
Abb. 1-1. Formen von weichen Hüllen.....	6
Abb. 1-2. Beispiele für punktförmige (a), linienförmige) und flächige (c) Stützungen von Membranen.	7
Abb. 1-3. luftgestütztes System (a), luftgefüllte Systeme (b), (c) und (d).....	8
<b>2 Membrankonstruktionen- Grundlagen</b>	<b>9</b>
Abb. 2-1. antiklastische und synklastische Fläche .....	11
Abb. 2-2. Sattelförmige Membran dargestellt als Seilnetzmodell .....	12
Abb. 2-3. Entwurfsmodelle: (a) Arbeitsmodelle zur Formfindung, (b) und (c) Präsentationsmodell.....	14
Abb. 2-4. Formfindungsschritte in SOFISTIK (34) .....	19
Abb. 2-5. Numerisch ermittelte Zuschnittsbahnen einer Membranfläche .....	22
Abb. 2-6. Schichtenaufbau einer Gewebemembran (beidseitig PVC beschichtetes Polyestergerewebe) ..	25
Abb. 2-7. Leinwandbindung .....	29
Abb. 2-8. Panamabindung .....	29
Abb. 2-9. Nichtlineares Kraft- Dehnungsverhalten von Gewebemembranen nach [8] .....	34
Abb. 2-10. Anisotropes Verhalten einer Gewebemembran nach [8] .....	35
Abb. 2-11. Nichtelastisches Verhalten einer Gewebemembran bei wiederholter Belastung, nach [8]....	35
Abb. 2-12. (a) HF- Naht PVC- Polyestergerewebe; (b) Schweißnaht PTFE- PTFE Gewebe mit Zusatzstreifen; (c) Nähnaht mit Abdichtstreifen, (d) Verstärkung für hohe Beanspruchung; (e) Seil in Membrantasche; (f) Gurt in Membrantasche .....	40
Abb. 2-13. (g) Zickzackstoß; (h) Kettschnürstoß mit laufendem Seil; (i) Kettschnürstoß mit fester Schlaufe .....	40
Abb. 2-15. (m) Rohr in Tasche; (n) Zickzackrand; (p) Klemmplattenrand; (q) Klemmplatte mit Keder ohne Perforation der Membran; (r) Strangpressprofil mit Kedernuten .....	42
Abb. 2-14. (j) Gurtrand; (k) Seil in Tasche; (l) Seil in Tasche und eingenähter Gurt.....	42
Abb. 2-16. Geometrische Beziehung zwischen Membran und Stützkonstruktion .....	44
<b>3 Geschichtliche Entwicklung</b>	<b>47</b>
Abb. 3-1. Tipi.....	47
Abb. 3-2. Kutuk .....	47
Abb. 3-3. Nordafrikanisches Beduinenzelt.....	48
Abb. 3-4. Tibetisches Nomadenzelt.....	48
Abb. 3-5. Schirme 5x5 m, SL Rasch GmbH 1989 .....	49
Abb. 3-6. Crystal Palais 1851 Aussenansicht (24) .....	50
Abb. 3-7. Montage Crystal Palace (18) .....	50
Abb. 3-8. Montage Crystal Palace (10) .....	50
Abb. 3-9. Mobile Halle mit Wellblechdach 1832 (25) .....	50
Abb. 3-10. „Portable Cottage“, 1850 (25) .....	50
Abb. 3-11. Zelt aus einem Versandkatalog Ende 19.Jhd. (26).....	50
Abb. 3-12. Französisches Militärzelt 19.Jhd.(9) .....	50
Abb. 3-13. Sängerhalle Dresden 1865 (11).....	52
Abb. 3-14. Axonometrie Dachtragwerk, Bodenanker (11).....	52
Abb. 3-15. Leihalle L.StromeyerStromeyer & Co, Holzkonstruktion ca.1911 (1).....	52
Abb. 3-16. Leihalle L.Stromeyer & Co, Holzkonstruktion ca.1911 (1) .....	52
Abb. 3-17. Luftschiffhangar, Behrens & Kühne, Stahlkonstruktion 1911 (1).....	52
Abb. 3-18. Luftschiffhangar, Behrens & Kühne 1911 (1) .....	52

---

Abb. 3-19.	Luftschiffhangar, Behrens & Kühne 1911 (1).....	52
Abb. 3-20.	Zirkus Marseille Schnitt, Grundriss (13).....	54
Abb. 3-21.	Zirkus Marseille 1893 (13).....	54
Abb. 3-22.	Zirkus Medrano, Caen (9).....	54
Abb. 3-23.	Zirkus Mikkenie 1953 (9).....	54
Abb. 3-24.	Spiegelzelt Innenansicht 2003 (48);.....	54
Abb. 3-25.	Konstruktionsprinzip (12).....	54
Abb. 3-26.	Chapiteau 1893 (1).....	56
Abb. 3-27.	Chapiteaus Barnum & Bailey (9).....	56
Abb. 3-28.	Innenansicht Barnum & Bailey (9).....	56
Abb. 3-29.	Aufbau eines Chapiteau (9).....	56
Abb. 3-30.	Chapiteau Zirkus Zanfretta (9).....	56
Abb. 3-31.	Chapiteau Zirkus Apollo (17).....	56
Abb. 3-32.	Chapiteau Zirkus Krone (17).....	56
Abb. 3-33.	Aufbausequenzen Chapiteau Zirkus Knie 1995, (45).....	58
Abb. 3-34.	Abspannungen der Rondellstangen und Dachmembran (45).....	58
Abb. 3-35.	Aufbausequenzen Chapiteau Zirkus Nock 1994 (45).....	58
Abb. 3-36.	Chapiteau, Schnitt Grundriss, Aufbauschnitte.....	60
Abb. 3-37.	Deutsche Flugzeughangar Typ ML 3, 1938 (17).....	62
Abb. 3-38.	USAAF Hangar, 1943 (23).....	62
Abb. 3-39.	Bewegliche Giebelmembran (23).....	62
Abb. 3-40.	Primärtragwerk (23).....	62
Abb. 3-41.	Membranmontage (23).....	62
Abb. 3-42.	Catenary (25).....	62
Abb. 3-43.	Helikopter Hangar (42).....	62
Abb. 3-44.	Transport (42).....	62
Abb. 3-45.	Raleigh-Arena in North Carolina, USA, (27).....	66
Abb. 3-46.	Temporärer Schweizer Pavillion der Berliner Industrieausstellung (27).....	66
Abb. 3-47.	Eingangsbogen Bundesgartenschau, Köln 1957(32) (nicht mobil).....	66
Abb. 3-48.	Tanzbrunnen, Köln 1957 (32).....	66
Abb. 3-49.	Tanzbrunnen, Köln 1957 (32).....	66
Abb. 3-50.	WN12 Mobiler Hangar bzw. Kirche Flughafen Bonn 1955 (17).....	70
Abb. 3-51.	Flugzeughangars WN16 der Bundeswehr 1959 (17).....	70
Abb. 3-52.	Aufbauvorgang (17).....	70
Abb. 3-53.	Parasolzelt, Innenansicht (17).....	70
Abb. 3-54.	Außenansicht (17).....	70
Abb. 3-55.	Missionszelt (16).....	72
Abb. 3-56.	Pilgerzelt Dyce Schottland (16).....	72
Abb. 3-57.	Stromeyer Leihhalle Innenraum, 1976 (16).....	72
Abb. 3-58.	Stromeyer Leihhalle (16).....	72
Abb. 3-59.	Stromeyer Leihhalle (16).....	72
Abb. 3-60.	Masthydraulik(22).....	74
Abb. 3-61.	Vorderansicht (22).....	74
Abb. 3-62.	Eckausbildung (22).....	74
Abb. 3-63.	Axonometrie der Stützkonstruktion, Entfalten des Dreibocks.....	74
Abb. 3-64.	Randseilfassung (22).....	74
Abb. 3-65.	Montagesequenzen (22).....	74
Abb. 3-66.	Querschnitt (22).....	74
Abb. 3-67.	Cadillac Exceleration Center (22).....	76
Abb. 3-68.	Montagesequenzen (22).....	76
Abb. 3-69.	Buddy Holly Musical Theater.....	78
Abb. 3-70.	Aufsicht (19).....	78
Abb. 3-71.	Seitenansicht (19).....	78
Abb. 3-72.	Montagesequenzen (19).....	78

Abb. 3-73.	Cirque Phenix (52).....	78
Abb. 3-74.	Axonometrie Gesamtkonstruktion (9) .....	78
Abb. 3-75.	Innenansicht (20) .....	82
Abb. 3-76.	Längsschnitt, Axonometrie und Querschnitt (20) .....	82
Abb. 3-77.	Aufbau (20).....	82
Abb. 3-78.	Lanchester Patent 1917 (69) .....	84
Abb. 3-79.	Radomes (26).....	84
Abb. 3-80.	Pentadomes (14) .....	84
Abb. 3-81.	Atomes for Peace (14) .....	84
Abb. 3-82.	Krupp Traglufthalle (14).....	84
Abb. 3-83.	Fuji Pavillon, Osaka (14).....	84
Abb. 3-84.	Electric Power, Osaka (14) .....	84
Abb. 3-85.	Pneumatische Schirme, Osaka (14).....	84
Abb. 3-86.	M-51 (36).....	88
Abb. 3-87.	MUST (14) .....	88
Abb. 3-88.	Krupp Erste Hilfe Zelt (14) .....	88
Abb. 3-89.	Aussenansicht (47) .....	88
Abb. 3-90.	TME Axonometrie (47) .....	88
Abb. 3-91.	Innenansicht (47) .....	88
Abb. 3-92.	Entwicklung mobiler Membrankonstruktionen mittlerer und großer Spannweite im 20.Jahrhundert .....	90

#### 4 Aktuelle Beispiele

95

Abb. 4-1.	Aufsicht Versammlungszelt (15) .....	98
Abb. 4-2.	Schnitt, Grundriss (15) .....	98
Abb. 4-3.	Dreibein (15).....	98
Abb. 4-4.	Wandelbarer Zentralmast.....	98
Abb. 4-5.	Montagemast (15).....	98
Abb. 4-6.	Untersicht Membran (15) .....	98
Abb. 4-7.	Zentralmast (15) .....	98
Abb. 4-8.	Century Series Anchor (22).....	100
Abb. 4-9.	Leihzelt "Olympia" (49).....	100
Abb. 4-10.	Leihzelt "Olympia" (49).....	100
Abb. 4-11.	Leihzelt "Olympia" (49).....	100
Abb. 4-12.	Leihzelt "Olympia" (49).....	100
Abb. 4-13.	Valhalla - Aussen (56) .....	102
Abb. 4-14.	seitliche Abspannung (56) .....	102
Abb. 4-15.	2 und 8 Mast Variante des „Vahalla“ - System (56) .....	102
Abb. 4-16.	Maststoss (44).....	102
Abb. 4-17.	Mastfuss (44) .....	102
Abb. 4-18.	Stützring (44) .....	102
Abb. 4-19.	Membranstoss .....	102
Abb. 4-20.	Montagesequenzen (44),(56) .....	102
Abb. 4-21.	Vergleichende Übersicht der betrachteten Mast- Seilkonstruktionen.....	106
Abb. 4-22.	De Boer Aluhalle „Jumbo“(8) .....	108
Abb. 4-23.	Spannweiten (7) .....	108
Abb. 4-24.	Walu Tennishalle Aussen- Innenansicht (46) .....	108
Abb. 4-25.	Rahmenvarianten .....	108
Abb. 4-26.	Varianten Primärtragwerk.....	108
Abb. 4-27.	Varianten der Rahmenecke .....	108
Abb. 4-28.	Beispiel Firstpunkt.....	108
Abb. 4-29.	Montagesequenzen System Herchenbach (68).....	108
Abb. 4-30.	Membrantomontage.....	108
Abb. 4-31.	Übersicht europäischer Profil- Rahmenhallen (Aluhallen) .....	110

---

Abb. 4-32.	LIBRA- Hallensystem (39) .....	112
Abb. 4-33.	LIBRA- Befestigungssystem Membran (39) .....	112
Abb. 4-34.	Layher Kederhallen- System (38) .....	112
Abb. 4-35.	Übersicht Gerüstsystemen .....	112
Abb. 4-36.	Sonnenschutz Spannweite 46 m (41) .....	114
Abb. 4-37.	Flugzeughangar 36 m, Docküberdachung 18 m, Notunterkünfte (41) .....	114
Abb. 4-38.	Varianten der Fachwerkrahmen und Bögen M 1:200, (41) .....	114
Abb. 4-39.	Fundamente (41) .....	114
Abb. 4-40.	Membranmontage (41) .....	114
Abb. 4-41.	Sprung Lagerhalle, Radial öffentlicher Giebel einer Lagerhalle, Inneraum Bürogebäude (60) . 116	
Abb. 4-42.	Aufsicht Rahmenhalle mit Vollwandträgern .....	116
Abb. 4-43.	Rahmenvarianten 9.4 m - 61.0 m M 1:1000 .....	116
Abb. 4-44.	North Side Baptist Church (60) .....	116
Abb. 4-45.	Innenansicht Sporthalle (60) .....	116
Abb. 4-46.	Klemmprofil, Rahmenhalle im Aufbau, Montage Dämmung (60) .....	116
Abb. 4-47.	Konzerthalle Innenansicht (61) .....	118
Abb. 4-48.	Aussenansicht (61) .....	118
Abb. 4-49.	Flugzeughangars (61) .....	118
Abb. 4-50.	Vertikales Klapptor (61) .....	118
Abb. 4-51.	Notunterkunft (61) .....	118
Abb. 4-52.	Beispiele für Bogen (TAS)- und Rahmenformen (TBS) von Cover All Building System Inc. (61) .....	118
Abb. 4-53.	Primärtragwerk (61) .....	118
Abb. 4-54.	Montage (61) .....	118
Abb. 4-55.	Lagerhalle (61) .....	118
Abb. 4-56.	TAS System: Bogen, Konstruktionsprinzip, nach (72) .....	120
Abb. 4-57.	Rahmen der TITAN Serie (61), Axonometrie des Konstruktionsprinzips (74) .....	120
Abb. 4-58.	patentiertes TBS Kederprofil System, nach (74) .....	120
Abb. 4-59.	Übersicht Fachwerksysteme .....	122
Abb. 4-60.	Übersicht Fachwerksysteme .....	123
Abb. 4-61.	LVRE (57) .....	124
Abb. 4-62.	LVRE (57) .....	124
Abb. 4-63.	Primärtragwerk .....	124
Abb. 4-64.	Aufbausequenzen .....	124
Abb. 4-65.	ARMADILLO- Grundriss Aussenansichten (63) .....	124
Abb. 4-66.	Geologisches Camp mit verschiedenen Überdachungssystemen (66) .....	128
Abb. 4-67.	Innenansicht einer Lagerhalle, (66) .....	128
Abb. 4-68.	Isometrie des Systems (75) .....	128
Abb. 4-69.	Wandelbarer Bogen (75) .....	128
Abb. 4-70.	Membranbahnen und Aussteifung .....	128
Abb. 4-71.	Verbände (f)(66) .....	128
Abb. 4-72.	Membranbahnen .....	128
Abb. 4-73.	Aufrichtvorgang (66) .....	129
Abb. 4-74.	Überdachung einer Leichtathletikanlage (59) .....	130
Abb. 4-75.	Grundmodule und Kombinationsmöglichkeiten (59) .....	130
Abb. 4-76.	Showroom (59) .....	130
Abb. 4-77.	Bühnenüberdachung (59) .....	130
Abb. 4-78.	Setzen der Erdnägel und Bogenmontage (59) .....	130
Abb. 4-79.	Aufrichten der Bögen (59) .....	130
Abb. 4-80.	Grundprinzip (29) .....	132
Abb. 4-81.	System nach Zeigler (29) .....	132
Abb. 4-82.	System nach Nodskov, Thelander (29) .....	132
Abb. 4-83.	Überdachungssystem von TVI Corporation .....	133

Abb. 4-84.	Übersicht Schnellbausysteme .....	134
Abb. 4-85.	.....	135
Abb. 4-86.	Airquarium - Aussenansicht .....	136
Abb. 4-87.	Innenansicht.....	136
Abb. 4-88.	Les Arts Sauts (9), (58).....	136
Abb. 4-89.	Querschnitt, Grundriss (9) .....	136
Abb. 4-90.	Einbauten (9) .....	136
Abb. 4-91.	Aufblasen der Membran (58) .....	136
Abb. 4-92.	Ringschläuche.....	136
Abb. 4-93.	Beispiele luftgefüllter Tragwerke .....	139
Abb. 4-94.	Bogenschalensegment 1999, (54).....	140
Abb. 4-95.	Flugzeughangar 2003, (53).....	140
Abb. 4-96.	Belastungstest (65) .....	140
Abb. 4-97.	Nahaufnahme des Hüllschlauchs (65) .....	140
Abb. 4-98.	STAT, Aussenansicht (65).....	140
Abb. 4-99.	SAFS Aussen- und Innenansicht (65) .....	140
Abb. 4-100.	MASTER Aussenansicht, Aufsicht, Axonometrie, Seiten- und Vorderansicht (65) .....	140
Abb. 4-101.	AIMS Aussenansicht, Axonometrie (65) .....	140
Abb. 4-102.	Übersicht luftgestützte und luftgefüllte Systeme.....	144

## 5 Morphologie

147

Abb. 5-1.	Parameter und Komponenten der Morphologie .....	148
Abb. 5-2.	Typische Querschnitts- und Grundrissgeometrien mobiler Überdachungen.....	150
Abb. 5-3.	Klassifizierung der Formen nach dem Merkmal der Erweiterbarkeit .....	150
Abb. 5-4.	Beispiele allgemeiner Formen mobiler Überdachungen .....	152
Abb. 5-5.	Beziehungen zwischen Tragwerk und Hülle .....	154
Abb. 5-6.	Konstruktionseinheit aus Tragwerk und Hülle einer offenen und einer geschlossenen Form	154
Abb. 5-7.	Einteilung von Tragsystemen .....	156
Abb. 5-8.	geschlossene (a) und offene Tragsysteme (b, c).....	158
Abb. 5-9.	Primärtragwerke mobiler Überdachungen.....	160
Abb. 5-10.	Einsatz verschiedener wandelbarer Tragwerke zur Montage eines Bogentragwerks.....	162
Abb. 5-11.	Typ5 - Verformung einer Elementkette mit zwei Elementen durch eine Vertikalkraft .....	165
Abb. 5-12.	Typ2 - Verformung einer Elementkette mit zwei Elementen durch eine Horizontalkraft ...	165
Abb. 5-13.	Typ3- Horizontale Verschiebung durch eine hydraulische Presse.....	165
Abb. 5-14.	Typ4 - Grundprinzip eines Pantographen, Mechanismus aus vier Elementen .....	166
Abb. 5-15.	Typ3 - Verschieben eines Elements entlang eines steifen Elements.....	166
Abb. 5-16.	Typ6 - Verschieben einer Elementkette mit zwei Elementen an einem dritten Element....	167
Abb. 5-17.	Typ7 Elastisch verformtes System.....	167
Abb. 5-18.	Typ8 - zentrales Entfalten/Raffen von weichen Hochpunktflächen .....	168
Abb. 5-19.	Typ9- pneumatisches Entfalten von luftgestützten oder luftgefüllten Systemen .....	168
Abb. 5-20.	Arten Wandelbarer Tragwerke - aus gelenkig verbundenen steifen Elementen.....	170
Abb. 5-21.	Arten wandelbarer Tragwerke -aus gelenkig verbundenen steifen Elementen .....	172
Abb. 5-22.	Wandelbare Tragwerke- aus elastisch verformbaren steifen und weichen Elementen.....	173
Abb. 5-23.	Kategorien der Hüllen mobiler Überdachungen.....	175
Abb. 5-24.	Bewegungsvorgänge: Falten, Raffen, Rollen .....	176
Abb. 5-25.	Wandelbarkeit mechanisch vorgespannter Membrane .....	176
Abb. 5-26.	Bewegungsvorgänge steifer Hüllen: Schieben, Falten, Rollen .....	180
Abb. 5-27.	Montage geordnet nach Modul- und Elementbauweise bzw. Wandelbarkeit.....	182
Abb. 5-28.	Montagevorgänge geordnet nach Bewegungsrichtung und Einsatz wandelbarer Tragwerke ...	182
Abb. 5-29.	Beispiel für die Errichtung einer wandelbaren Gesamtkonstruktion.....	186
Abb. 5-30.	Beispiel für die Montage der Hülle unabhängig vom Primärtragwerk .....	186
Abb. 5-31.	Montage liniengelagerte Membranen, nach Errichtung des Stütztragwerks .....	186
Abb. 5-32.	Montage liniengelagerte Membranen mit der Errichtung des Stütztragwerks .....	186

Abb. 5-33.	Montage einer punktgestützte Membranen nach der Errichtung des Stütztragwerks .....	186
Abb. 5-34.	Montageprozesse wandelbarer Konstruktionen .....	190
Abb. 5-35.	Montageprozesse wandelbarer Konstruktionen .....	191
Abb. 5-36.	Montageprozesse wandelbarer Konstruktionen .....	192

## 6 Konzept für ein mobiles Hallensystem

197

Abb. 6-1.	Verschiedene Tennishallen der Firma Walther UK Ltd. (46) .....	198
Abb. 6-2.	Ermittlung von kreisbogen- und korbformen Hallenquerschnitten für das geforderte Lichtraumprofil einer Tennishalle - Punkt A, B und C .....	198
Abb. 6-3.	Grundformen und Modularität des Hallensystems .....	198
Abb. 6-4.	Varianten der Montage von Bogenkonstruktionen .....	202
Abb. 6-5.	Neuer Mechanismus zur Errichtung eines Bogentragwerks .....	206
Abb. 6-6.	Sequenzen der Errichtung eines Korb- und Kreisbogens mit Hilfe des neuen Mechanismus .....	207
Abb. 6-7.	Alternative Ausbildungsmöglichkeiten der Bogensegmente .....	208
Abb. 6-8.	Schematische Darstellung der Varianten der Membranmontage: a. gemeinsam mit dem wandelbaren Stütztragwerk, b. nach dem Errichten der Stützkonstruktion durch vertikales Hinaufziehen an einzelnen Punkten, c. nach dem Errichten der Stützkonstruktion durch ein Ziehen entlang der Bögen- feldweise, d. wie c. alle Felder gemeinsam .....	208
Abb. 6-9.	Statische Systeme: a. Stütztragwerk im Montagezustand, b. Stütztragwerk im Endzustand, c. Primärtragwerk ohne Membran, d. Primärtragwerk mit Membran, Stabilisierung der Bögen durch Seile, f. Stabilisierung der Bögen durch die Membran .....	210
Abb. 6-10.	System A - Kreisbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert .....	212
Abb. 6-11.	System B - Kreisbogen, Randbögen in x,y und z- Richtung fest gelagert .....	212
Abb. 6-12.	System C - Korbformen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert .....	212
Abb. 6-13.	Bogengeometrien: Kreissegment und Korbformen .....	214
Abb. 6-14.	symmetrische Schneelast - LF Vorstudie .....	216
Abb. 6-15.	Windlast - LF Vorstudie .....	216
Abb. 6-16.	Maßgebende Lastkombination für die Untersuchung (Programm intern wird die Schneelast auf die globale z-Richtung und die Windlast auf die lokale z-Richtung der Flächenelemente bezogen) .....	216
Abb. 6-17.	geometrische Ersatzimperfectionen in der Bogenebene nach DIN 18800-2 .....	216
Abb. 6-18.	geometrische Ersatzimperfectionen aus der Bogenebene nach DIN 18800-2 .....	216
Abb. 6-19.	Membranform in Kettrichtung in Abhängigkeit des Vorspannungsverhältnisses - System A..	218
Abb. 6-20.	$V_y = 6, V_x = 1$ .....	218
Abb. 6-21.	$V_y = 6, V_x = 3$ .....	218
Abb. 6-22.	$V_y = 6, V_x = 6$ .....	218
Abb. 6-23.	$V_y = 3, V_x = 6$ .....	218
Abb. 6-24.	$V_y = 1, V_x = 6$ .....	218
Abb. 6-25.	System A - Änderung von max. Normalkraft - und Momentenbelastung in Abhängigkeit veränderter Vorspannungsverhältnisse für drei verschiedene Steifigkeiten des Kreisbogens, Darstellung der Schnittgrößenverläufe siehe Anhang B (siehe S.354) .....	220
Abb. 6-26.	System B - Änderung von max. Normalkraft - und Momentenbelastung in Abhängigkeit veränderter Vorspannungsverhältnisse für drei verschiedene Steifigkeiten des Kreisbogens, Darstellung der Schnittgrößenverläufe siehe Anhang B (siehe S.360) .....	220
Abb. 6-27.	Beispielhafte Darstellung von Normalkraft $N_x$ , Biegemoment $M_y$ und der Verformung des Mittelbogens für System A und System B, Vorspannungsverhältnis $V_y/V_x = 6/2$ , E- Modul = $8\ 000\ \text{N/mm}^2$ .....	222
Abb. 6-28.	Spannungstrajektoren, System B Lastfall 1+2, Verformung 3fach überhöht, Aufsicht .....	223
Abb. 6-29.	System C .....	224
Abb. 6-30.	$V_y = 6, V_x = 1$ .....	224
Abb. 6-31.	$V_y = 6, V_x = 3$ .....	224
Abb. 6-32.	$V_y = 6, V_x = 6$ .....	224
Abb. 6-33.	$V_y = 3, V_x = 6$ .....	224



Abb. 6-34.	$V_y = 1, V_x = 6$ .....	224
Abb. 6-35.	System C - Änderung von max. Normalkraft- und Momentenbelastung in Abhängigkeit veränderter Vorspannungsverhältnisse für drei verschiedene Steifigkeiten des Korbbogens, Darstellung der Schnittgrößenverläufe siehe Anhang B (siehe S.366) .....	224
Abb. 6-36.	Membranform in Kettrichtung in Abhängigkeit der Erhöhung der Vorspannung im Kehlseil. 226	
Abb. 6-37.	$V_k = 0$ .....	226
Abb. 6-38.	$V_k = 50 \text{ KN}$ .....	226
Abb. 6-39.	$V_k = 150 \text{ KN}$ .....	226
Abb. 6-40.	$V_k = 250 \text{ KN}$ .....	226
Abb. 6-41.	Verlauf von max. Normalkraft- und Momentenbelastung bei steigender Vorspannung im Kehlseil, Reibungsfaktor des Kehlseils 0 .....	228
Abb. 6-42.	Verlauf von max. Normalkraft- und Momentenbelastung bei steigender Vorspannung im Kehlseil, Reibungsfaktor des Kehlseils 1 .....	228
Abb. 6-43.	Gesamtsystem 1 .....	230
Abb. 6-44.	Gesamtsystem 2 .....	230
Abb. 6-45.	Konzept für eine Tennishalle auf Grundlage des neuen Konstruktionssystems .....	232
Abb. 6-46.	Konzept für Hallengiebel mit doppelt gekrümmten wandelbaren Membranflächen .....	232
Abb. 6-47.	Beispiele für Seilverspannungen zur Stabilisierung des Bogens in Bogenebene .....	235

## **7 Entwicklung und Analyse einer mobilen Tribünenüberdachung 237**

Abb. 7-1.	Aufbausequenzen der bestehenden Überdachung der Firma ARENA .....	238
Abb. 7-2.	Geometrie der bestehenden Überdachung .....	238
Abb. 7-3.	Geometrie und Modularität der neuen Überdachung .....	238
Abb. 7-4.	Konstruktionsprinzip und wandelbares System eines Großschirms .....	240
Abb. 7-5.	Modellstudien des Systems „Cabrio“ (31) .....	240
Abb. 7-6.	Grundmodul der Konstruktion (31) .....	240
Abb. 7-7.	Bewegungsstudie des Scherenmechanismus (31) .....	240
Abb. 7-8.	Wandelbares Bogentragwerk aus Elementkette und elastisch verformten kontinuierlichen Element .....	242
Abb. 7-9.	Konzept für die Anwendung eines elastisch verformten gekrümmten Kragträgers .....	242
Abb. 7-10.	Statisches System der Kragträger und der Gesamtkonstruktion (Beispiel mit drei Grundmodulen) .....	242
Abb. 7-11.	Konzeptmodell während des Aufrichtvorgangs .....	246
Abb. 7-12.	Prototyp errichtet in München 2003 .....	246
Abb. 7-13.	Aufbausequenzen des Prototyps .....	246
Abb. 7-14.	System A1- Kragträger mit durchlaufendem gekrümmten Untergurt, System A2- Kragträger mit durchlaufendem geradem Untergurt .....	250
Abb. 7-15.	System B1- Kragträger mit Untergurt aus gelenkig verbunden geraden Stäben .....	250
Abb. 7-16.	Nichtlineare Spannungs- Dehnungslinie der verwendeten Aluminiumlegierung .....	252
Abb. 7-17.	Druckbeiwerte für eine orthogonale Anströmung von vorn für ein Gesamtmodell aus drei Modulen .....	252
Abb. 7-18.	Druckbeiwerte für eine orthogonale Anströmung von hinter für ein Gesamtmodell aus drei Modulen .....	252
Abb. 7-19.	Untersuchte Lastfälle: LF1- Vorspannung Kragträger, LF2- Eigengewicht, LF3- Windlast, Wind von vorn .....	252
Abb. 7-20.	Biegebeanspruchung eines Stabes .....	254
Abb. 7-21.	Dehnung im Abstand z von der Stabachse .....	254
Abb. 7-22.	Spannungswerte aus der Vorbiegung eines Untergurts .....	254
Abb. 7-23.	Effekt der Vorbiegung auf die Traglast, System A1 ohne Auskreuzung, Lastfall 2 .....	256
Abb. 7-24.	Effekt der Vorbiegung auf die Traglast, System A1 mit Auskreuzung, Lastfall 2 .....	256
Abb. 7-25.	Effekt auf die max. Traglast verschiedener Arten von Untergurten LF2 .....	256
Abb. 7-26.	Effekt auf die max. Traglast verschiedener Arten von Untergurten, Träger mit Auskreuzungen LF2 .....	256

Abb. 7-27.	Ermittlung der Inneren Stabkräfte in einem Feld des Kragträgers, Einzellast am Kragarmende (LF1) .....	258
Abb. 7-28.	Tragverhalten der Systeme A1 und B1, ohne Auskreuzungen im LF 1: Vorspannung .....	260
Abb. 7-29.	Effekte von Auskreuzungen auf die Traglast im LF 1 und 2 .....	260
Abb. 7-30.	Effekt der Änderung der A- Framehöhe auf die Stabkraft im Diagonalstab.....	261
Abb. 7-31.	Geometrie des Prototypen und modifizierte Geometrie.....	264
Abb. 7-32.	Tragverhalten des Systems mit neuer Geometrie, LF1: Vorspannung .....	264
Abb. 7-33.	Ergebnisse einer Lineare Analyse: Normalkraftverteilung System B1 (Geometrie Prototyp) als ebenes Fachwerk für LF1, 2 und 3 .....	266
Abb. 7-34.	Ergebnisse einer Linearen Analyse: Normalkraftverteilung System C (neue Geometrie) als ebenes Fachwerk für LF1, 2 und 3.....	267
Abb. 7-35.	Schrittweise Verformung des Systems C1 unter Vorspannung und Windbeanspruchung ..	268
Abb. 7-36.	Auflagerkraft der Abspannung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit .....	268
Abb. 7-37.	Gesamtsysteme mit verschiedenen Arten der Abspannung und Membranformen .....	272
Abb. 7-38.	Membran nach der Formfindung LK1, System A2.....	275
Abb. 7-39.	Verformung der Membran unter 0.5facher Windbeanspruchung LK2, System A2.....	275
Abb. 7-40.	System mit Mittelabspannung (FEM Modell - System B2).....	276
Abb. 7-41.	Abstand Membran - Pfette für LK2: Vorspannung, Eigengewicht, Wind, System B2 .....	276
Abb. 7-42.	Lage der Messpunkte- System B2.....	276
Abb. 7-43.	nichtüberhöhte Verformung- Systems B2 bei Lastfaktor 1.0 .....	276
Abb. 7-44.	System mit Tiefpunkt (FEM Modell - System C2) .....	278
Abb. 7-45.	Abstand Membran - Pfette für LK2: Vorspannung, Eigengewicht, Wind, System C2 .....	278
Abb. 7-46.	Lage der Messpunkte- System C2.....	278
Abb. 7-47.	nichtüberhöhte Verformung System C2 bei Lastfaktor 1.0.....	278
Abb. 7-48.	Versagen des Systems B2 ohne Membran, LK2, 2fach überhöht; .....	280
Abb. 7-49.	Versagen des Systems mit Mittelabspannung (System B2), LK2, 2fach überhöht;.....	280
Abb. 7-50.	Versagen des Systems mit Tiefpunkt (System C2), LK2, 2fach überhöht; .....	280
Abb. 7-51.	Traglast des Systems ohne Membran, sowie System B2 und C2.....	280
Abb. 7-52.	Neue Kragträgergeometrie und Ausbildung des vorderen Membranrandes bzw. der Abspannung .....	284
Abb. 7-53.	System D2 - kontinuierlich durchlaufende Untergurte der Kragträger und E2 - .....	284
Abb. 7-54.	System E2 - gelenkig verbundene Untergurte der Kragträger .....	284
Abb. 7-55.	Druckbeiwerte für die Geometrie des Prototyps .....	284
Abb. 7-56.	Modifizierte Druckbeiwerte für die neue Geometrie des Systems .....	284
Abb. 7-57.	Abstand Membran - Pfette für LK: Vorspannung, Eigengewicht, Wind, System D2.....	286
Abb. 7-58.	Lage der Messpunkte- System D2 .....	286
Abb. 7-59.	Verformung bei Lastfaktor 1.0 - System D2 .....	286
Abb. 7-60.	Versagensfigur System D2 LF 1.5, 2fach überhöht, Grenzspannung der Kragträger überschritten.....	286
Abb. 7-61.	Verformung System E2 für LF 3.0, 2fach überhöht, Grenzspannung der Membran überschritten.....	286
Abb. 7-62.	Vergleich der Traglast für LK2 der Systeme B, C, D und E .....	288
<b>8 Zusammenfassung</b>		<b>291</b>
Abb. B-1.	System .....	354
Abb. B-2.	Lastkombination .....	354
Abb. B-3.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	354
Abb. B-4.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	355
Abb. B-5.	System .....	356
Abb. B-6.	Lastkombination .....	356
Abb. B-7.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	356
Abb. B-8.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	357
Abb. B-9.	System .....	358
Abb. B-10.	Lastkombination .....	358

---

Abb. B-11.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen.....	358
Abb. B-12.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	359
Abb. B-14.	System.....	360
Abb. B-15.	Lastkombination .....	360
Abb. B-16.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	360
Abb. B-13.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	361
Abb. B-18.	System.....	362
Abb. B-19.	Lastkombination .....	362
Abb. B-20.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	362
Abb. B-17.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	363
Abb. B-22.	System.....	364
Abb. B-23.	Lastkombination .....	364
Abb. B-24.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	364
Abb. B-21.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	365
Abb. B-26.	System.....	366
Abb. B-27.	Lastkombination .....	366
Abb. B-28.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	366
Abb. B-25.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	367
Abb. B-30.	System.....	368
Abb. B-31.	Lastkombination .....	368
Abb. B-32.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	368
Abb. B-29.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	369
Abb. B-34.	System.....	370
Abb. B-35.	Lastkombination .....	370
Abb. B-36.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	370
Abb. B-33.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	371
Abb. B-38.	System.....	372
Abb. B-39.	Lastkombination .....	372
Abb. B-40.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	372
Abb. B-37.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	373
Abb. B-41.	System C - Änderung von max. Normalkraft- und Momentenbelastung in Abhängigkeit veränderter Vorspannungsverhältnisse für drei verschiedene Steifigkeiten des Korbbogens, Lastkombination L1+LF3 (Vorspannung +Schnee symmetrisch).....	374
Abb. B-42.	Modifizierung des Systems A - Kreisbogen mit Kehlseil .....	375
Abb. B-43.	System.....	376
Abb. B-44.	Lastkombination .....	376
Abb. B-45.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	376
Abb. B-46.	System.....	377
Abb. B-47.	Lastkombination .....	377
Abb. B-48.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	377
Abb. B-49.	System.....	378
Abb. B-50.	Lastkombination .....	378
Abb. B-51.	Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen .....	378
Abb. C-52.	Prototyp der Tribünenüberdachung, Seitenansicht und Grundriss M 1:100.....	380
Abb. C-53.	Prototyp, Detail hinteres Auflager (ohne Maßstab) .....	381
Abb. C-54.	Details Kragträger M1:10 .....	382
Abb. C-55.	Anschlußdetails Membran M 1:10.....	382
Abb. C-56.	Membran Prototyp 1 - Zuschnitt (ohne Maßstab).....	382
Abb. C-57.	Kragträger Prototyp 2001 .....	383
Abb. C-58.	Anschluss Verband - Kragträger .....	383
Abb. C-59.	Anschlussvarianten Obergurt - A Frame .....	383
Abb. C-60.	Aufbau des Prototyps auf dem Gelände der Firma ARENA Ltd. 2001.....	383
Abb. C-61.	Aufbau des Prototyps in München, Sommer 2003 .....	384

---

---

# Abbildungsnachweis

## Archive

- (1) Archiv Berthold Burkhardt, Technische Universität Braunschweig

## Bücher, Zeitschriften

- (2) Bellmann, J.: Membrantragwerke und Seifenhaut - Unterschiede in der Formfindung, Bauingenieur 70, Springer VDI Verlag 1995
- (3) Bubner, E.: Membrankonstruktionen-Verbindungstechniken, 2.Auflage Druckerei Wehlmann GmbH, Essen 1999
- (4) "build" Zeitschrift, Ausgabe 10/01; Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG; Köln;
- (5) Burkhardt, B.: Geschichte des Zeltbaus, in Detail 6/2000, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 2000
- (6) Burkhardt, B.: Hallen und Hangars für Luftschiffe in Beiträge zur Geschichte des Bauingenieurwesens 10, Verkehrsbauten, Hrsg. Prof. E.Schunck TU München 1999
- (7) De Boer: Product Information ALU HALL 5 METRES; De Boer International B.V. Alkmaar 2004
- (8) De Boer: Product Information JUMBO HALL; De Boer International B.V. Alkmaar 2004
- (9) Dupavillon, C.: Architectures du Cirque - des origenes a nos jours; Edition Le Moniteur, 2.Auflage, Paris 2001
- (10) Elliott C.D.: Technics and Architecture, The development of Materials and Systems for Buildings, The MIT Press, Massachusetts 1994
- (11) Försters Allgemeine Bauzeitung, Wien 1867 S. 51-59, 100- 107
- (12) Gödel, A.; Sigrid, D.; Mauksch, D.; Kayser, C.: Spiegelzelt, Studienarbeit Lehrstuhl Prof. Kiessler TU München 2001
- (13) Habermann, K.J.: Zur Geschichte der Zirkuszelte, Konstruktionen mit Holz, Stahl und textilen Membranen, in Detail 8/1998, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 1996
- (14) Herzog T.: Pneumatische Konstruktionen - Bauten aus Membranen und Luft; Verlag Gerd Hatje, Stuttgart 1976
- (15) Institut für internationale Architektur-Dokumentation (Hrsg): Versammlungszelt-Projektdokumentation; in Detail 08/1998; Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 1998

- (16) Institut für leichte Flächentragwerke (Hrsg): IL5 Wandelbare Dächer, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1972
- (17) Institut für leichte Flächentragwerke (Hrsg): IL 16 Zelte, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1976
- (18) Jesberg P.: Die Geschichte der Ingenieurbaukunst - aus dem Geist des Humanismus, DVA Stuttgart 1996
- (19) Koch K.: Das Buddy Holly Mobiltheater in Hamburg als ein Beispiel temporärer Bauwerke in Membranbauweise; Bauingenieur 71, Springer VDI Verlag 1996
- (20) Kronenburg, R.(Hrsg.): Portable Architectue, 1. Auflage, Architectural Press 1996
- (21) Kronenburg, R.: Houses in Motion, The Genesis, History and Development of Portable Buildings, 2. Auflage, Wiley Academay 2002
- (22) Kronenburg; R., Dalland, T.; Goldsmith N.: Future Tents Limited (FTL) Architects- Softness Movement and Light; John Wiley & Sons; 1997
- (23) Larkin, W.B.: Steel-Frame Portable Aircraft Hangars, Engineering News Record, Mai 1946
- (24) Le Moniteur : Construire En Acier, Guides De Conception Et De Realisation, Edition le Moniteur 1993
- (25) Ludwig, M.: Mobile Architektur, Geschichte und Entwicklung transportabler und modularer Bauten, DVA Stuttgart 1998
- (26) Mollerup. P.: Collapsible, The Genius of Space Saving Design, Chronicle Books LLC San Francisco 2001
- (27) Otto Frei.: Das hängende Dach, Reprint , DVA Stuttgart 1990
- (28) Oasys Ltd.(Hrsg): Dynamic Relaxation; Solution method used by Fablon, GSA for Windows, OASYS-Ltd. Newcastle 2000
- (29) Rückert G.: Wandelbare hybride Konstruktionen - von der morphologischen Studie zum Prototyp, Dissertation ETH Zürich 2000
- (30) Seraphin, M.: Zur Entstehung des Ingenieurholzbaus, Eine Entwicklungsgeschichte Diss., Shaker Verlag 2003
- (31) SL Rasch GmbH: SL Rasch - The Work of SL; Bürobroschüre; SL Rasch GmbH Special and Light-weight Structures; Leinfelden Echerdingen 2002
- (32) Roland C.: Frei Otto - Spannweiten; Ideen und Versuche zum Leichtbau; Verlag Ullstein GmbH, Frankfurt/M - Berlin 1965
- (33) Sobek W., Speth M.: Textile Werkstoffe, in: Bauingenieur 70, Springer VDI Verlag 1995
- (34) SOFISTIK AG (Hrsg): Membrantragwerke, Formfindung und statische Analyse; Tutorial; SOFISTIK AG München, 2000
- (35) Topham, Sean: blowup - Inflatable Art, Architecture and Design, Prestel Verlag 2002

- 
- (36) Verge A.S.: Rapidly Deployable Structures in Collective Protection Systems, Soldier Biological Chemical Command, US Army Natick Soldier Centre 2002
- (37) Wallner, M.: Bewegliche Tragwerke, Aus der Sicht der Tragwerkslehre für Architekten, Dissertation, TU Graz 2003
- (38) Wilhelm Layher GmbH & Co. KG: Kederdach und -hallen-System; Produktinformation; Wilhelm Layher GmbH & Co. KG 2004

### Webseiten

- (39) [www.ablyshelters.co.uk](http://www.ablyshelters.co.uk); Juni 2004
- (40) [www.anchorinc.com](http://www.anchorinc.com); Juni 2004
- (41) [www.arts-sauts.org](http://www.arts-sauts.org), März 2003
- (42) [www.bfi.org](http://www.bfi.org); Juni 2004
- (43) [www.bigtopshelters.com](http://www.bigtopshelters.com); November 2003
- (44) [www.bruno.postle.net](http://www.bruno.postle.net); Mai 2003
- (45) [www.circusweb.de](http://www.circusweb.de), Mai 2004
- (46) [www.coveredtennis.org.uk](http://www.coveredtennis.org.uk), Oktober 2002
- (47) [www.ftl-happold.com](http://www.ftl-happold.com); August 2002
- (48) [www.danspaleis.com](http://www.danspaleis.com); Mai 2004
- (49) [www.deboer.com](http://www.deboer.com); Juli 2004
- (50) [www.designpreis.de/designpreis11.html](http://www.designpreis.de/designpreis11.html); Juni 2004
- (51) [www.drash.com](http://www.drash.com); Oktober 2003
- (52) [www.europeenne-de-spectacles.com/html/phenix.htm](http://www.europeenne-de-spectacles.com/html/phenix.htm); Mai 2004
- (53) [www.hiflyer.info/Inflatable/](http://www.hiflyer.info/Inflatable/); Juni 2004
- (54) [www.itek-usa.com](http://www.itek-usa.com); Juni 2004
- (55) [www.kayam.co.uk](http://www.kayam.co.uk); Juni 2004
- (56) [www.rudienosdesign.com](http://www.rudienosdesign.com); Mai 2003
- (57) [www.tacticalshelters.com](http://www.tacticalshelters.com), Februar 2004
- (58) [www.arts-sauts.org](http://www.arts-sauts.org), März 2003
- (59) [www.spannbau.com](http://www.spannbau.com); Juni 2004

- (60) [www.sprung.com](http://www.sprung.com); Oktober 2003
- (61) [www.summitstructures.com](http://www.summitstructures.com); Oktober 2003
- (62) [www.southerninflatables.co.uk](http://www.southerninflatables.co.uk), November 2003
- (63) [www.tacticalshelters.com](http://www.tacticalshelters.com), Februar 2004
- (64) [www.tvicorp.com](http://www.tvicorp.com); Oktober 2003
- (65) [www.vertigo-inc.com](http://www.vertigo-inc.com); November 2003
- (66) [www.weatherhaven.com](http://www.weatherhaven.com); März 2003
- (67) [www.wssl.com](http://www.wssl.com); Juni 2004
- (68) [www.zelte.herchenbach.de](http://www.zelte.herchenbach.de); Mai 2004


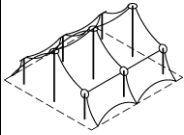
#### Patentschriften


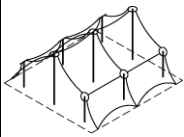
- (69) GB 119339: An Improved Construction of Tent, Field Hospitals, Depots and like purposes; November 1917
- (70) US 4.583.331: Frame Supported Structure With Tensioned Fabric Panels, 1983
- (71) US 6.026.613: Truss Arch For Fabric Covered Buildings And The Like, Februar 2000
- (72) US 6.085.468: Truss Arch For Fabric Covered Buildings And The Like, Juli 2000
- (73) US 6.145.526: Tie Down System For Fabric Covered Buildings, November 2000
- (74) US 6.564.513: Extrusion Design And Fabric Installation Method For Weather Tight Seal, May 2003
- (75) WO 96,01930: Self-Supporting Collapsible Covered Frame Structure, 1996


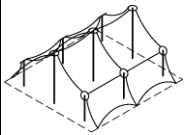



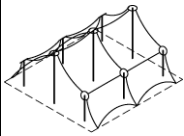
# Anhang A




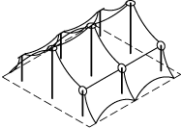
<b>Name</b>	<b>New Century Tent</b>	<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>Anchor Industries Inc.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 12,20...36,60 Länge [m] 12,20...36,60 Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 1340	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.anchorinc.com	

<b>Name</b>	<b>Olympia</b>	<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>De Boer International B.V.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 20,30/ 30,30 Länge [m] 8/ 12 (Raster) Firsthöhe [m] 8,45/ 10,80 Traufhöhe [m] 3,00 Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 160/ 360	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.deboer.com	

<b>Name</b>	<b>New Galaxy</b>	<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>De Boer International B.V.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 60,30 Länge [m] 15,00 (Raster) Firsthöhe [m] 20,20 Traufhöhe [m] 4,50 Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 900	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.deboer.com	


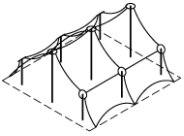
<b>Name</b>	<b>Valhalla (Tensile 1)</b>	<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>RE Design, Sheffield</b>	1999
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 43,00...75,00 Länge [m] 73,00...150,00 Firsthöhe [m] 24,50 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 11250	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.specialstructures.com	


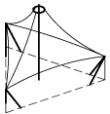



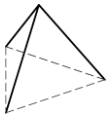
<b>Name</b>	<b>Peak Pole Tent (PPT40x60 ... PPT60x120)</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Warner Shelter Systems Ltd.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 12,20...18,30 Länge [m] 18,30...36,60 Firsthöhe [m] ca. ...10 Traufhöhe [m] ca. 3 Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 669	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	<a href="http://www.wssl.com">www.wssl.com</a>	


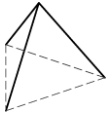



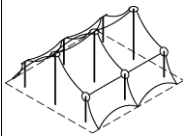



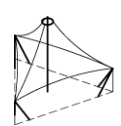
<b>Name</b>	<b>Boston Harbourlights Pavillon</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>FTL Happold</b>	1994
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] Länge [m] Firsthöhe [m]      22,85 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]    3480	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> www.ftlstudio.com/ Kronenburg, R.: FTL Softness Movement and Light, Chichester 1997.	

<b>Name</b>	<b>Darian LakePavilion</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>FTL Happold</b>	1994
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] Länge [m] Firsthöhe [m]      24,40 Traufhöhe [m]      8,55 Grundfläche [m <sup>2</sup> ]    3400	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> www.ftlstudio.com	


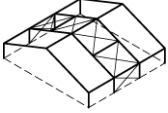
<b>Name</b>	<b>Carlos Moseley Music Pavillon</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>FTL Happold</b>	1995
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] Länge [m] Firsthöhe [m]      20,70 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]    288 (Bühne)	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> www.ftlstudio.com	


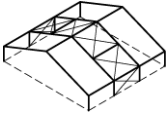
<b>Name</b>	<b>Cadillac Exeleration Center</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>FTL Happold</b>	1996
	<b>Dimensionen</b> Breite [m]            21,35f Länge [m]            Durchmesser Firsthöhe [m]      18,30 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]    278	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> www.ftlstudio.com	


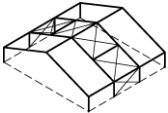
<b>Name</b>	<b>RSSB - Radha Soamy Sastsang Beas Shelter</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Buro Happold Engineers</b>	1993
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 60,00 Länge [m] 15,00 (Raster) Firsthöhe [m] ca. 8 Traufhöhe [m] ca. 3 Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 900 (Raster)	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.burohappold.com,	

<b>Name</b>	<b>Versammlungszelt</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Büro SL Rasch GmbH und Frei Otto</b>	1997
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 12,50 Länge [m] Durchmesser Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 500	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	Detail 8/1998 S.1438-1442	



<b>Name</b>	<b>Aluhalle 5m</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>De Boer International B.V.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m]		
Länge [m]	5,00 (Raster)		
Firsthöhe [m]	4,06...7,75		
Traufhöhe [m]	2,53...3,22		
<b>Referenz</b>	www.deboer.com		

<b>Name</b>	<b>Jumbo Hall</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>De Boer International B.V.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m]		
Länge [m]	5,00 (Raster)		
Firsthöhe [m]	9,12...12,26		
Traufhöhe [m]	3,87		
<b>Referenz</b>	www.deboer.com		

<b>Name</b>	<b>AHA</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Eschenbach Zeltbau GmbH</b>		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m]		
Länge [m]	5,00 (Raster)		
Firsthöhe [m]	10,05		
Traufhöhe [m]	4,00		
<b>Referenz</b>	www.eschenbach-zeltbau.de		

<b>Name</b>	<b>Aluhalle 23</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Eschenbach Zeltbau GmbH</b>		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m]		
Länge [m]	5,00 (Raster)		
Firsthöhe [m]	6,25		
Traufhöhe [m]	3,00		
<b>Referenz</b>	www.eschenbach-zeltbau.de		


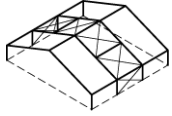




<b>Name</b>	<b>Polygonhalle</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Eschenbach Zeltbau GmbH</b>		
	<b>Dimensionen</b>		 Primärtragwerk
	Breite [m]	20,00...28,00	
	Länge [m]	5,00 (Raster)	
	Firsthöhe [m]	7,80...9,30	
	Traufhöhe [m]	4,00	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	140 (Raster)	
<b>Referenz</b>	<a href="http://www.eschenbach-zeltbau.de">www.eschenbach-zeltbau.de</a>		

<b>Name</b>	<b>Aluflex 20</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Haltec</b>		
	<b>Dimensionen</b>		 Primärtragwerk
	Breite [m]	20,00	
	Länge [m]	2,50 (Raster)	
	Firsthöhe [m]	ca. 7,50	
	Traufhöhe [m]	5,00	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	50 (Raster)	
<b>Referenz</b>	<a href="http://www.haltec-hallen.de">www.haltec-hallen.de</a>		


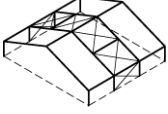
<b>Name</b>	<b>Zelthalle</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Herchenbach Industrie- und Zeltbau GmbH</b>		
	<b>Dimensionen</b>		 Primärtragwerk
	Breite [m]	5,00...20,00	
	Länge [m]	2,50/5,00 (Raster)	
	Firsthöhe [m]	4,20...7,50	
	Traufhöhe [m]	2,40...5,00	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	100 (Raster)	
<b>Referenz</b>	<a href="http://zelte.herchenbach.de">http://zelte.herchenbach.de</a>		


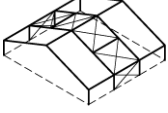
<b>Name</b>	<b>Halle</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Höcker Hallen</b>		
	<b>Dimensionen</b>		 Primärtragwerk
	Breite [m]	10,00...40,00	
	Länge [m]	5,00 (Raster)	
	Firsthöhe [m]		
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	200 (Raster)	
<b>Referenz</b>	<a href="http://www.hoecker-structures.com">www.hoecker-structures.com</a>		






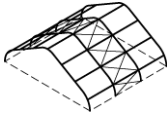
<b>Name</b>	<b>Satteldachhalle</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>HPS Fertighallen</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	10,00...25,00	
	Länge [m]	2,50/5,00 (Raster)	
	Firsthöhe [m]	4,65...6,80	
	Traufhöhe [m]	3,75...4,50	
<b>Referenz</b>	www.hps-fertighallen.de		


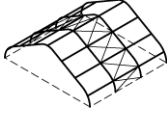
<b>Name</b>	<b>Hampshire Structures Series 200/300</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>J&amp;J Carter Ltd.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	12,00...30,00	
	Länge [m]	5,00 (Raster)	
	Firsthöhe [m]	3,00...ca. 8,50	
	Traufhöhe [m]	ca. 2...5,40	
<b>Referenz</b>	www.jjcarter.com		


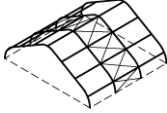
<b>Name</b>	<b>Leichtbauhalle</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Losberger Intertent GmbH</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	8,13...30,18	
	Länge [m]	5,00 (Raster)	
	Firsthöhe [m]	4,67...11,10	
	Traufhöhe [m]	3,20...6,20	
<b>Referenz</b>	www.losberger.com		


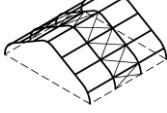
<b>Name</b>	<b>Walu Sport</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Walter UK Ltd.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	17,50...36,00	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	ca. 9...11	
	Traufhöhe [m]	ca. 4...6	
<b>Referenz</b>	www.walu.co.uk		




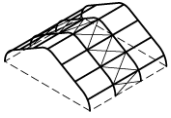
<b>Name</b>	<b>Anchor Span</b>	<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>Anchor Industries Inc.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 9,15...18,30 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] ca. 6...8 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.anchorinc.com	

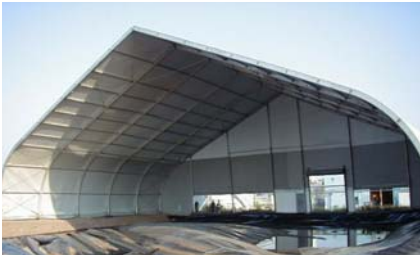
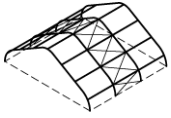
<b>Name</b>	<b>Family 4</b>	<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>ClearSpan Modular Structures Ltd.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 39,60...61,00 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] 16,50...25,00 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.clearspanonline.com	


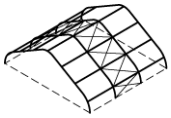
<b>Name</b>	<b>Rainier Quick Span</b>	<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>Rainier Industries Ltd.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] ...18,30 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] ca. 8,5 Traufhöhe [m] ca. 4 Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.rainierindustries.com	


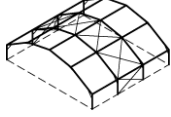
<b>Name</b>	<b>140'-200' Truss Structure</b>	<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>Sprung Instant Structures Ltd.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 42,70...61,00 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] 16,80...25,90 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.sprung.com	



<b>Name</b>	<b>30'-130' I Beam Structure</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Sprung Instant Structures Ltd.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	9,40...39,60	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	4,80...15,30	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.sprung.com		

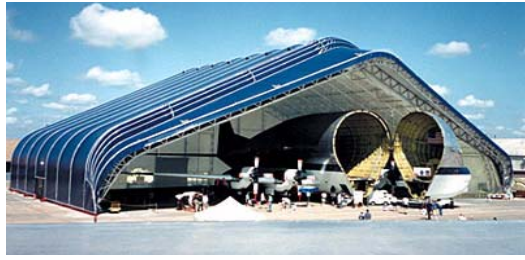
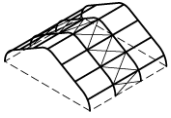
<b>Name</b>	<b>UFS Shelter</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Universal Fabric Structures Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	ca. 20	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	ca. 9	
	Traufhöhe [m]	ca. 3	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.usfinc.com		


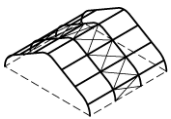
<b>Name</b>	<b>UFS Tennishall</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Universal Fabric Structures Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	ca. 36	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	ca. 11	
	Traufhöhe [m]	ca. 5	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.ufsinc.com		


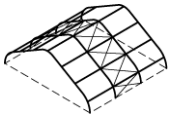
<b>Name</b>	<b>Modular Clearspan (MOD 2x/ 3x/ 4x)</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Warner Shleter Systems Ltd.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	11,9/ 16,9/ 21,3	
	Länge [m]	4,50 (Raster)	
	Firsthöhe [m]	4,8/ 6,0/ 7,8	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	96	
<b>Referenz</b>	www.wssl.com		


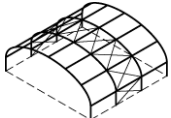




<b>Name</b>	<b>Clamshelter</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Clamshell Buildings</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	8,50...91,00	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	ca 5,5...30	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.clamshell.com		


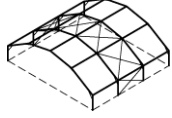
<b>Name</b>	<b>Low Profile 4LP-G165</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Cover-All</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	50,40	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	ca. 10	
	Traufhöhe [m]	ca. 5	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.coverall.net; www.coverall.de; www.summitstructures.com		


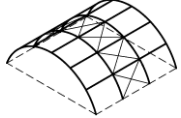
<b>Name</b>	<b>TBS Series 2/ 3/ 4 Titan 30' - 160'</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Cover-All</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	9,15...48,80	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	6,40...18,60	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.coverall.net; www.coverall.de; www.summitstructures.com		


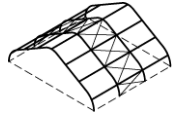
<b>Name</b>	<b>Large Trussed Structures (60' / 72')</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>CoverIt</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	18,30...22,00	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	ca. 5	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.coverit.com		


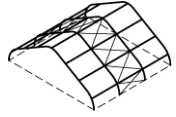


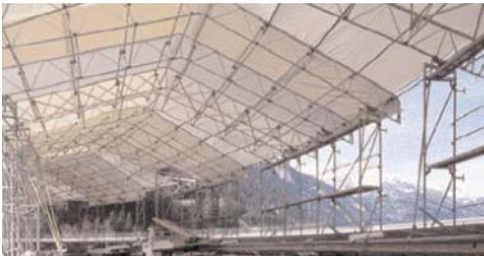
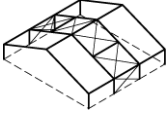



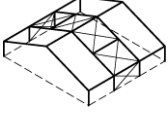
<b>Name</b>	<b>Hangar Medium Span (NV Span Profile)</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Rubb Building Systems</b>		
	<b>Dimensionen</b>		 Primärtragwerk
	Breite [m]	25,00	
	Länge [m]	24,50	
	Firsthöhe [m]	ca. 10	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	610	
<b>Referenz</b>	www.rubb.com		

<b>Name</b>	<b>Hangar Wide Span (NV Span Profile)</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Rubb Building Systems</b>		
	<b>Dimensionen</b>		 Primärtragwerk
	Breite [m]	77,80	
	Länge [m]	82,30	
	Firsthöhe [m]	ca. 25	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	6400	
<b>Referenz</b>	www.rubb.com		

<b>Name</b>	<b>TFS Shelter</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Universal Fabric Structures Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		 Primärtragwerk
	Breite [m]	10,00...100,00	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	ca. 5,5...28	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.usfinc.com		

<b>Name</b>	<b>SFS Shelter</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Universal Fabric Structures Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		 Primärtragwerk
	Breite [m]	ca. 40	
	Länge [m]	beliebig	
	Firsthöhe [m]	ca. 12	
	Traufhöhe [m]	ca. 5	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.usfinc.com		


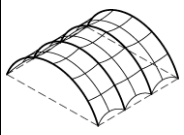
<b>Name</b>	<b>Kederdach und Kederhallen System</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Wilhelm Layher GmbH &amp; Co. KG</b>		
	<b>Dimensionen</b>		  Primärtragwerk
	Breite [m]	...18,70	
	Länge [m]	2,57 (Raster)	
	Firsthöhe [m]		
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	48 (Raster)	
<b>Referenz</b>	<a href="http://www.layher.com">www.layher.com</a>		


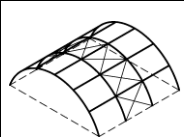
<b>Name</b>	<b>Libra System</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Ably Shelters Ltd.</b>		
	<b>Dimensionen</b>	z.B.	  Primärtragwerk
	Breite [m]	20,00	
	Länge [m]	30,00	
	Firsthöhe [m]	ca. 8	
	Traufhöhe [m]	5,00	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	600	
<b>Referenz</b>	<a href="http://www.ablyshelters.co.uk">www.ablyshelters.co.uk</a>		


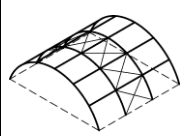


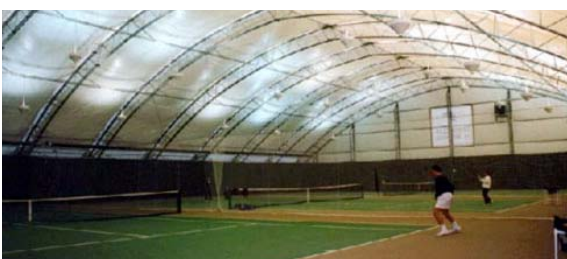
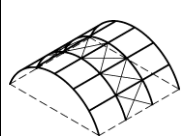




<b>Name</b>	<b>LVRE - Mobile Forward Aircraft Shelter</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	Ably Shelters Ltd.		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m] 15,30 Länge [m] 35,60 Firsthöhe [m] 7,80 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 545		
<b>Referenz</b>	www.ablyshelters.co.uk		


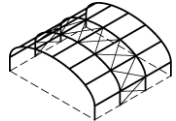
<b>Name</b>	<b>VLAS Armadillo - Lynx/ Apache</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	Ably Shelters Ltd.		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m] 8,78/ 9,96 Länge [m] 21,09/ 22,70 Firsthöhe [m] 5,14/ 5,95 Traufhöhe [m] 3,50 Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 24/ 27		
<b>Referenz</b>	www.ablyshelters.co.uk		


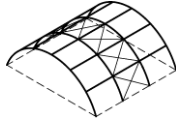
<b>Name</b>	<b>Aerospan - B2 SS Relocatable Hangar</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	American Spaceframe Fabrication Inc. (ASFI)		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m] 76,20 Länge [m] 38,10 Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 2900		
<b>Referenz</b>	www.asfi.net		


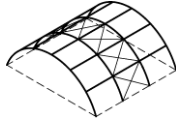
<b>Name</b>	<b>Sportspan - Tennis Center</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	American Spaceframe Fabrication Inc. (ASFI)		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m] 38,71 Länge [m] 60,96 Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 2360		
<b>Referenz</b>	www.asfi.net		




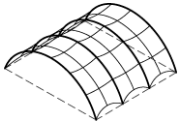
<b>Name</b>	<b>Quonset Style Shelters</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Big Top Manufacturing</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 9,15...37,30 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] 9,75...24.40 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk	
<b>Referenz</b>	www.bigtopshelters.com		


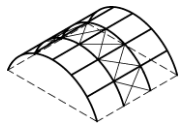
<b>Name</b>	<b>Standard Style Shelters</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Big Top Manufacturing</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 6,10...45,70 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] ...14,00 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk	
<b>Referenz</b>	www.bigtopshelters.com		


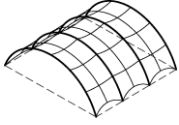
<b>Name</b>	<b>Family 1</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>ClearSpan Modular Structures Ltd.</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 11,90...18,30 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] 6,00...7,30 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk	
<b>Referenz</b>	www.clearspanonline.com		


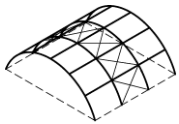
<b>Name</b>	<b>IAS G72</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Cover-All</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 22,00 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] ca. 11 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk	
<b>Referenz</b>	www.coverall.net; www.coverall.de; www.summitstructures.com		




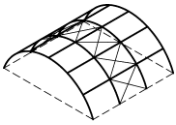
<b>Name</b>	<b>Behrend Halle</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Spannbau GmbH</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 24,00 Länge [m] 87,00 Firsthöhe [m] 12,00 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 2088	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b>	www.spannbau.com

<b>Name</b>	<b>ArchSpan Building</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Tarp Rite Inc.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 12,19...18,29 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] 6,10...9,15 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b>	www.tarprite.com

<b>Name</b>	<b>Arabesk Stage SA22/ SA34/ SA41/ SA56/ SA80</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Warner Shelter Systems Ltd.</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 6,70...24,40 Länge [m] 9,15...21,60 Firsthöhe [m] 3,10...8,80 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b>	www.wssl.com

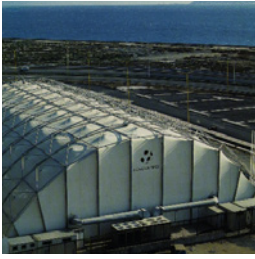
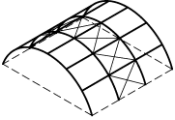
<b>Name</b>	<b>Widespan Quick Erect Shelter</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Weatherhaven</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 15,30...45,70 Länge [m] min 18,30 Firsthöhe [m] ca. 7...22 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 280	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b>	www.weatherhaven.com




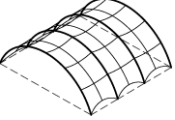
<b>Name</b>	<b>Dome Shelter Systems</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Western Tarpaulin &amp; Co.</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m]            2,44...21,34 Länge [m]             beliebig Firsthöhe [m]        2,44...11,28 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk	
	<b>Referenz</b>		<a href="http://www.domeshelter.com">www.domeshelter.com</a>

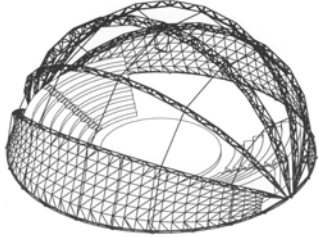
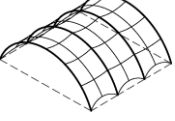



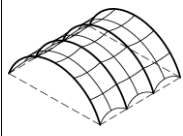



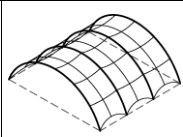
<b>Name</b>	<b>Binistar</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Binisystems</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] Länge [m] Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.binisystems.com	

<b>Name</b>	<b>Buddy Holly Musical Theatre Hamburg</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Urban Project GmbH &amp; IPL Leichtbau GmbH</b>	1994
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 55,00 Länge [m] 94,87 Firsthöhe [m] 20,59 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 5000	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	Bauingenieur 71/1996 S. 289-296	


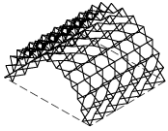
<b>Name</b>	<b>Cirque Archaos</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Serge Calvier</b>	1990
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 40,00 Länge [m] 60,00 Firsthöhe [m] 20,00 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 2400	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>		


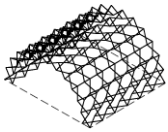
<b>Name</b>	<b>Cirqu'enflex</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>k.A.</b>	1996
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 25,00 Länge [m] Durchmesser Firsthöhe [m] 12,00 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 490	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>		


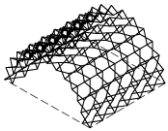
<b>Name</b>	<b>Cirque Phenix</b>	<b>Baujahr</b>	
<b>Entwurf</b>		2000	
	<b>Dimensionen</b>		
	Breite [m]		67,00
	Länge [m]		89,00
	Firsthöhe [m]		19,00
	Traufhöhe [m]		
<b>Referenz</b>		Primärtragwerk	

<b>Name</b>	<b>MOMI Tent</b>	<b>Baujahr</b>	
<b>Entwurf</b>	<b>Future Systems</b>	1992	
	<b>Dimensionen</b>		
	Breite [m]		9,60
	Länge [m]		28,80
	Firsthöhe [m]		ca. 4
	Traufhöhe [m]		
<b>Referenz</b>	<a href="http://www.future-systems.com">www.future-systems.com</a>	Primärtragwerk	



<b>Name</b>	<b>XB Series</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Drash Shelters</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 4,70 Länge [m] 4,70...10,80 Firsthöhe [m] 3,23 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 50		  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> <a href="http://www.drash.com">www.drash.com</a>		


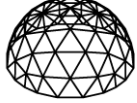
<b>Name</b>	<b>J Series</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Drash Shelters</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 10,42 Länge [m] 10,30 Firsthöhe [m] 5,48 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 107		  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> <a href="http://www.drash.com">www.drash.com</a>		

<b>Name</b>	<b>Command &amp; Control Shelters</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>TVI Corporation</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] ...4,88 Länge [m] ...7,32 Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 35		  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> <a href="http://www.tvicorp.com">www.tvicorp.com</a>		




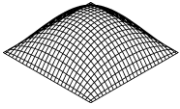



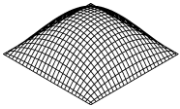


<b>Name</b>	<b>Mobile Theatre Ijburg (NL)</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Shigeru Ban</b>	2003
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 12,5 Länge [m] 12,5 Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 450	  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b>	


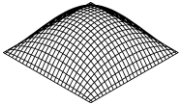




<b>Name</b>	<b>AirDome 60x</b>	Baujahr	
<b>Entwurf</b>	<b>Absolute Hollywood</b>		
	<b>Dimensionen</b>	  Primärtragwerk	
	Breite [m]		18,30
	Länge [m]		61,00
	Firsthöhe [m]		
	Traufhöhe [m]		
Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	1115		
<b>Referenz</b>	www.absolutehollywoodworld.com		


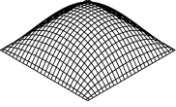
<b>Name</b>	<b>Seilnetz gestützte Traglufthalle</b>	Baujahr	
<b>Entwurf</b>	<b>Sattler AG</b>		
	<b>Dimensionen</b>	  Primärtragwerk	
	Breite [m]		
	Länge [m]		
	Firsthöhe [m]		
	Traufhöhe [m]		
Grundfläche [m <sup>2</sup> ]			
<b>Referenz</b>	www.traglufthallen.biz		


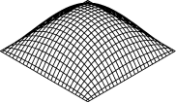
<b>Name</b>	<b>Traglufthalle (1-4 Tennisfelder)</b>	Baujahr	
<b>Entwurf</b>	<b>Friedrich Struckmeyer GmbH &amp; Co. KG</b>		
	<b>Dimensionen</b>	  Primärtragwerk	
	Breite [m]		18...34
	Länge [m]		36...72
	Firsthöhe [m]		9...11
	Traufhöhe [m]		
Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	2450		
<b>Referenz</b>	www.struckmeyer-systembau.de		

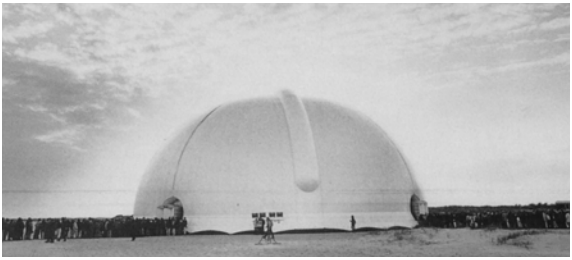
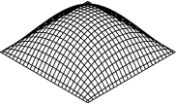
<b>Name</b>	<b>Traglufthalle, Williams, Iowa</b>	Baujahr	
<b>Entwurf</b>	<b>Yeadon Air-Supported Structures</b>		
	<b>Dimensionen</b>	  Primärtragwerk	
	Breite [m]		61,00
	Länge [m]		144,75
	Firsthöhe [m]		17,68
	Traufhöhe [m]		
Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	8830		
<b>Referenz</b>	www.yeadondomes.com		




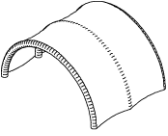



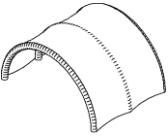
<b>Name</b>	<b>Airquarium</b>	Baujahr	
<b>Entwurf</b>	<b>Festo AG &amp; Co. KG</b>		
	<b>Dimensionen</b>	  Primärtragwerk	
	Breite [m]		32,00
	Länge [m]		Durchmesser
	Firsthöhe [m]		8,00
	Traufhöhe [m]		
<b>Referenz</b>	www.festo.com		


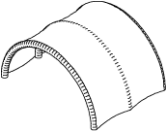
<b>Name</b>	<b>Experience House</b>	Baujahr	
<b>Entwurf</b>	<b>Katerina Vincourova</b>	2001	
	<b>Dimensionen</b>	  Primärtragwerk	
	Breite [m]		
	Länge [m]		
	Firsthöhe [m]		
	Traufhöhe [m]		
<b>Referenz</b>	www.jirisvestka.com		


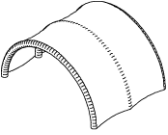
<b>Name</b>	<b>Kayassine - Les Arts Sauts</b>	Baujahr	
<b>Entwurf</b>	<b>H.-W. Müller</b>	1998	
	<b>Dimensionen</b>	  Primärtragwerk	
	Breite [m]		41,00
	Länge [m]		Durchmesser
	Firsthöhe [m]		19,80
	Traufhöhe [m]		
<b>Referenz</b>	www.arts-sauts.org		




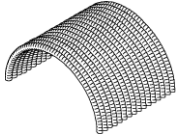
<b>Name</b>	<b>CBPS - Chemical and Biological Protective Shelter</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Federal Fabric Fibres (US GP Approved)</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] Länge [m] Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.federalfabrics.com	


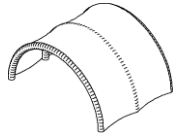
<b>Name</b>	<b>SuperDome</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Federal Fabric Fibres (US GP Approved)</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 12,20 Länge [m] 12,20 Firsthöhe [m] 6,10 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 135	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.federalfabrics.com	


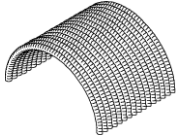
<b>Name</b>	<b>Lanmas</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>FTL Happold</b>	1992
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 9,00 Länge [m] 24,50 Firsthöhe [m] 6,00 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.ftlstudio.com	


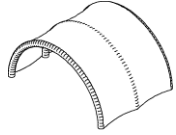
<b>Name</b>	<b>ARZ 15 H - 60 H</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Lanco - Dr. Lange GmbH &amp; Co. KG</b>	
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 5,50 Länge [m] 2,90...10,40 Firsthöhe [m] 2,95 Traufhöhe [m] 2,00 Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 57,20	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>		



<b>Name</b>	<b>Mobiler Flugzeughangar</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Lindstrand Technologies</b>		
	<b>Dimensionen</b>		
	Breite [m]	12,00	
	Länge [m]	16,00	
	Firsthöhe [m]	9,00	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	192	Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.lindstrandtech.com		


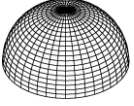
<b>Name</b>	<b>IMAS - Inflatbale Modular Airforce Shelter</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>MFC Survival</b>		
	<b>Dimensionen</b>		
	Breite [m]	12,80	
	Länge [m]	18,00	
	Firsthöhe [m]	6,40	
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	230	Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.mfc-survival.co.uk		


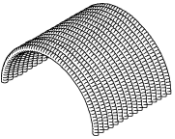
<b>Name</b>	<b>Airshelta</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Reeves Manufacturing Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		
	Breite [m]	3,60...9,00	
	Länge [m]	3,60...9,00	
	Firsthöhe [m]		
	Traufhöhe [m]		
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	81	Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.reevesdecon.com		

<b>Name</b>	<b>Expander</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>ROFI Industries</b>		
	<b>Dimensionen</b>		
	Breite [m]	6,40	
	Länge [m]	9,00	
	Firsthöhe [m]	3,00	
	Traufhöhe [m]	2,00	
	Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	57,60	Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	www.rofi.com		





<b>Name</b>	<b>BAE Eurofighter Exhibition Dome</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Southern Inflatables Ltd.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m] 12,20 Länge [m] Durchmesser Firsthöhe [m] 6,10 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 115		
<b>Referenz</b>	www.southerninflatables.net		

<b>Name</b>	<b>Temporary Building</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Southern Inflatables Ltd.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m] 3,84...14,45 Länge [m] beliebig Firsthöhe [m] 2,63...6,70 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		
<b>Referenz</b>	www.southerninflatables.net		

<b>Name</b>	<b>AIMS - Aviation Inflatable Maintenance Shelter</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Vertigo Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m] 25,90 Länge [m] 51,80 Firsthöhe [m] 10,70 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 1340		
<b>Referenz</b>	www.vertigo-inc.com		


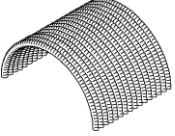
<b>Name</b>	<b>Master - Medium Airbeam Shelter</b>		Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Vertigo Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b>		Primärtragwerk
	Breite [m] 11,80 Länge [m] 15,30 Firsthöhe [m] 5,00 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 180		
<b>Referenz</b>	www.vertigo-inc.com		



<b>Name</b>	<b>SAFS - Small AirForce Shelter</b>		<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>Vertigo Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 6,10 Länge [m] 9,15 Firsthöhe [m] 3,05 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]		  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> <a href="http://www.vertgio-inc.com">www.vertgio-inc.com</a>		

<b>Name</b>	<b>STAT - Small Tactical Airbeam Tent</b>		<b>Baujahr</b>
<b>Entwurf</b>	<b>Vertigo Inc.</b>		
	<b>Dimensionen</b> Breite [m] 6,70 Länge [m] 14,60 Firsthöhe [m] 3,35 Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ] 44,5		  Primärtragwerk
	<b>Referenz</b> <a href="http://www.vertgio-inc.com">www.vertgio-inc.com</a>		

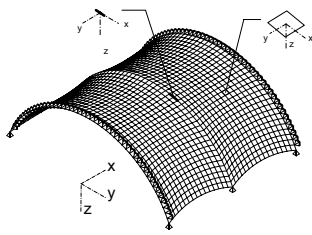


<b>Name</b>	<b>Powerhouse UK</b>	Baujahr
<b>Entwurf</b>	<b>Branson Coates Architecture Ltd.</b>	1998
	<b>Dimensionen</b> Breite [m]      4 x 16m Länge [m]      Durchmesser Firsthöhe [m] Traufhöhe [m] Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	  Primärtragwerk
<b>Referenz</b>	<a href="http://www.bransoncoates.com">www.bransoncoates.com</a>	

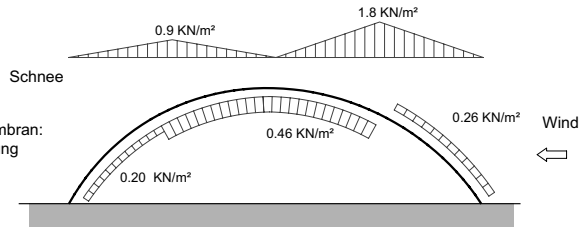


# Anhang B

**System A - Kreisbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 200 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
V<sub>x</sub> = Schussrichtung  
V<sub>y</sub> = Kettrichtung



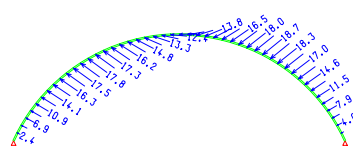
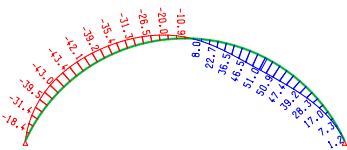
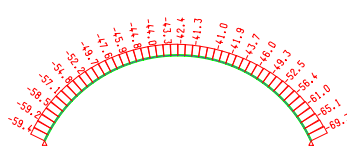
**Abb. B-1.** System

**Abb. B-2.** Lastkombination

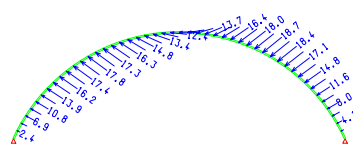
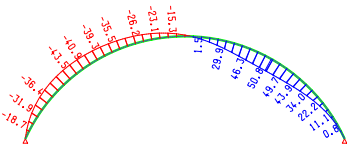
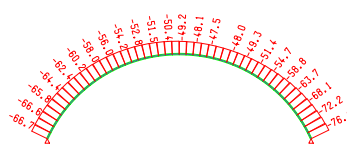
Normalkraft N<sub>x</sub> [KN/m]

Moment M<sub>y</sub> [KN/m]

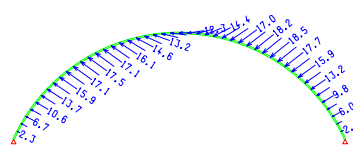
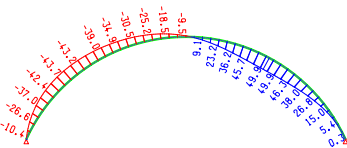
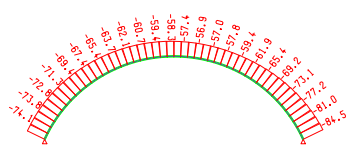
Verformungsvektor [mm]



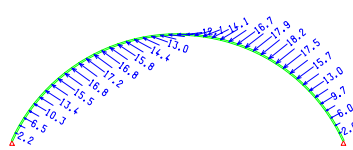
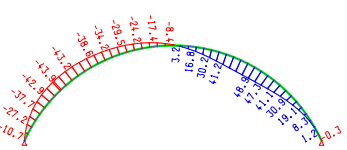
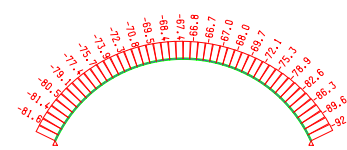
V<sub>x</sub> = 1 V<sub>y</sub> = 6



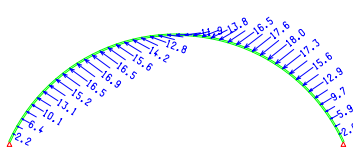
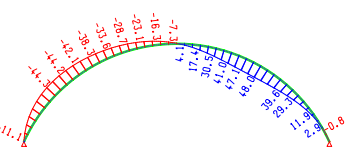
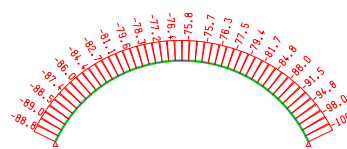
V<sub>x</sub> = 2 V<sub>y</sub> = 6



V<sub>x</sub> = 3 V<sub>y</sub> = 6



V<sub>x</sub> = 4 V<sub>y</sub> = 6



V<sub>x</sub> = 5 V<sub>y</sub> = 6

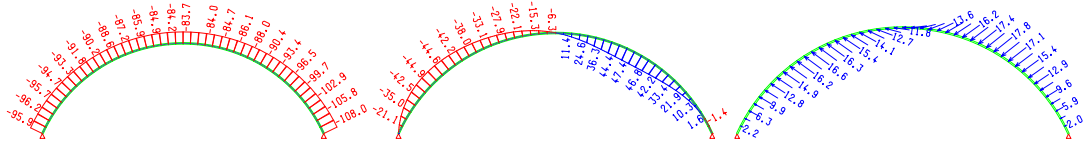
**Abb. B-3.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System A - Kreisbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 200 000 N/mm<sup>2</sup>**

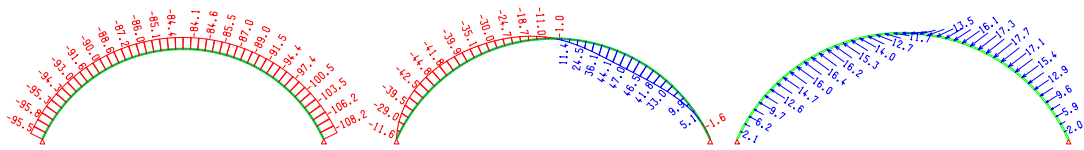
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

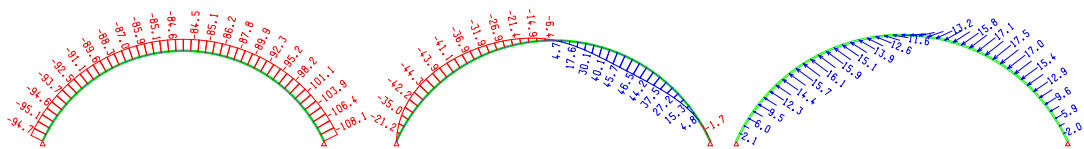
Verformungsvektor [mm]



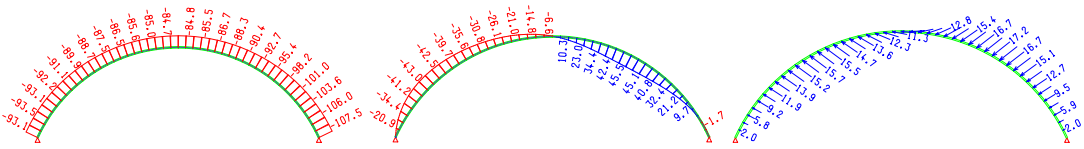
Vx = 6 Vy = 6



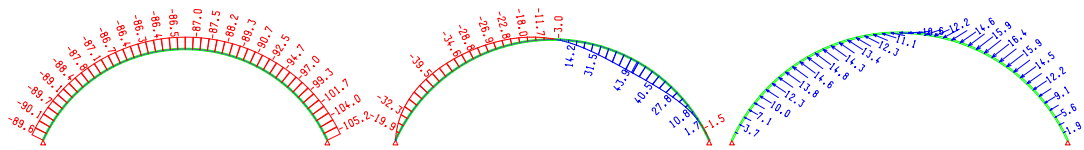
Vx = 6 Vy = 5



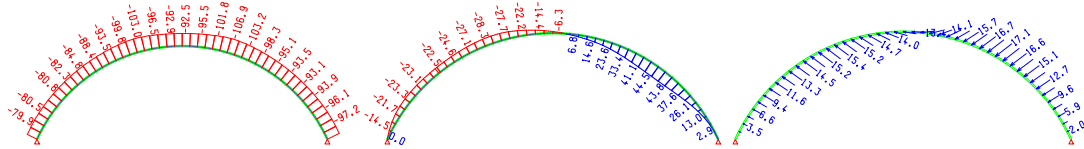
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3



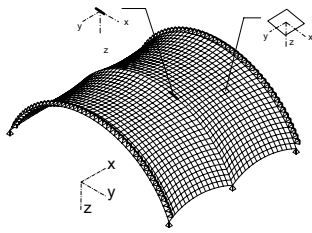
Vx = 6 Vy = 2



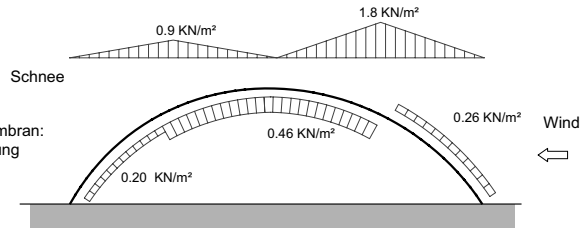
Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-4.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System A - Kreisbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 40 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



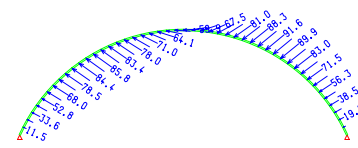
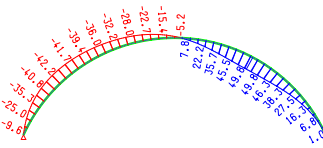
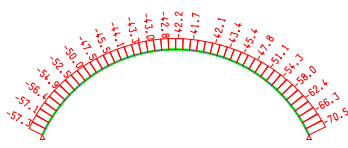
**Abb. B-5.** System

**Abb. B-6.** Lastkombination

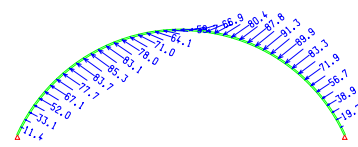
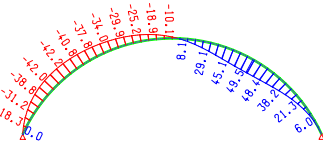
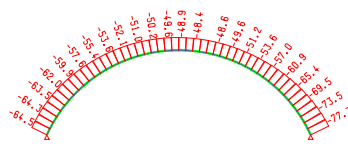
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

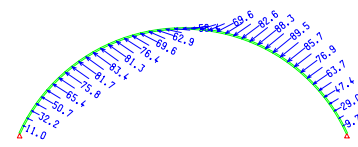
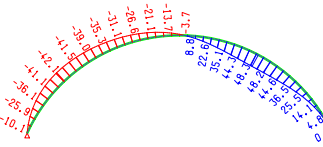
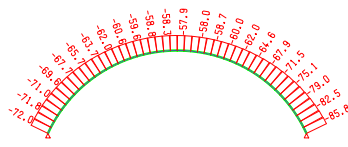
Verformungsvektor [mm]



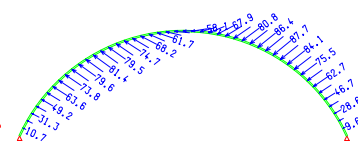
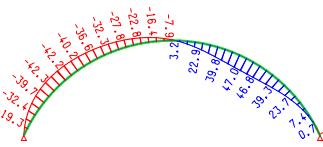
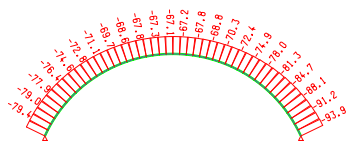
Vx = 1 Vy = 6



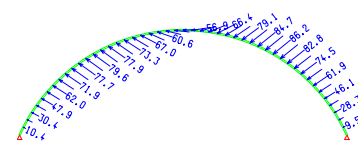
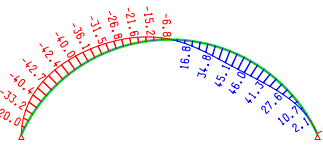
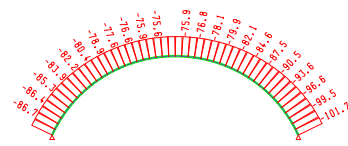
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

**Abb. B-7.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

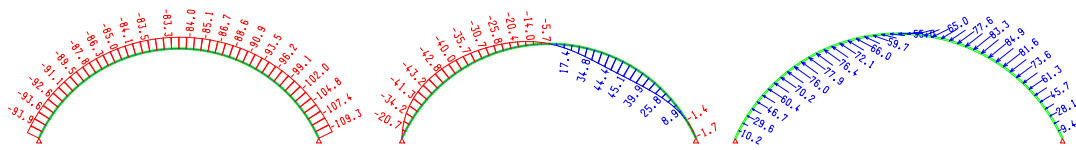


**System A - Kreisbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 40 000 N/mm<sup>2</sup>**

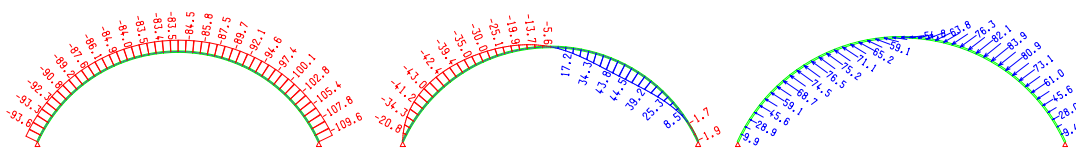
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

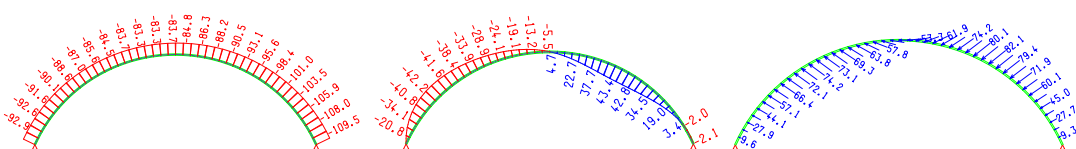
Verformungsvektor [mm]



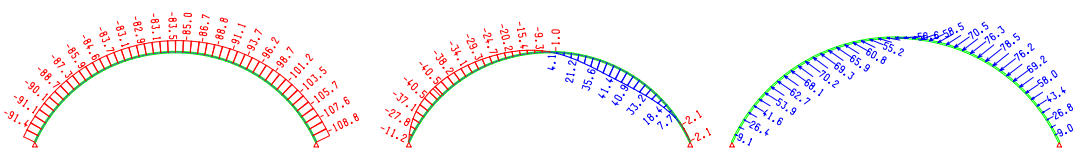
$V_x = 6$   $V_y = 6$



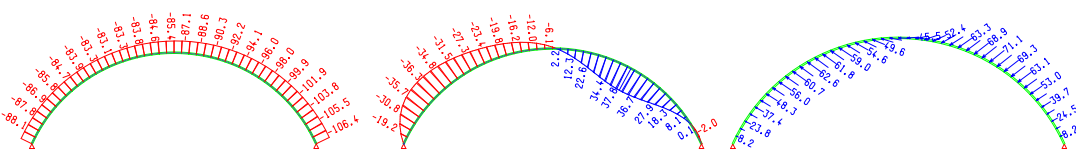
$V_x = 6$   $V_y = 5$



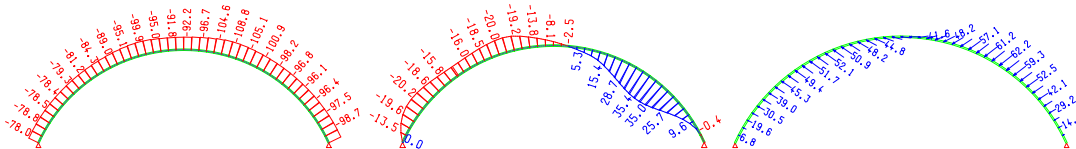
$V_x = 6$   $V_y = 4$



$V_x = 6$   $V_y = 3$



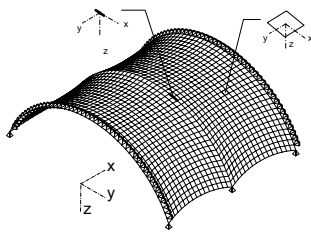
$V_x = 6$   $V_y = 2$



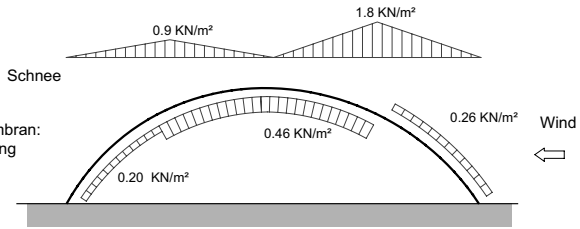
$V_x = 6$   $V_y = 1$

**Abb. B-8.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System A - Kreisbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



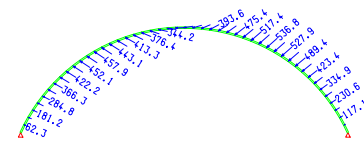
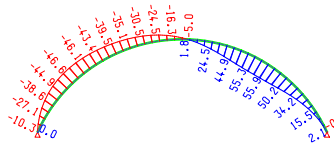
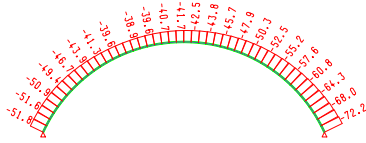
**Abb. B-9.** System

**Abb. B-10.** Lastkombination

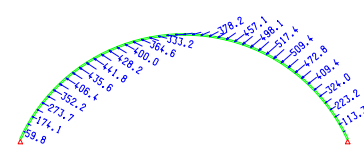
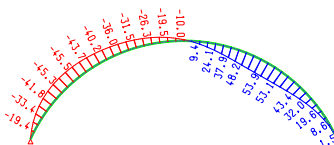
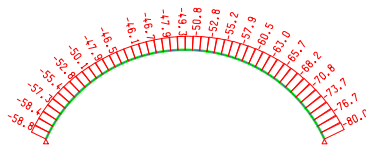
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

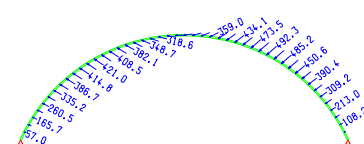
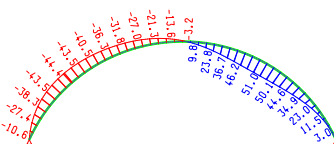
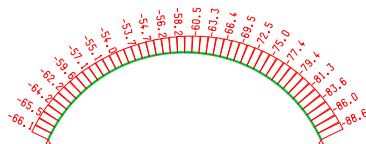
Verformungsvektor [mm]



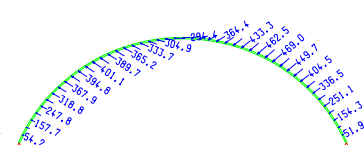
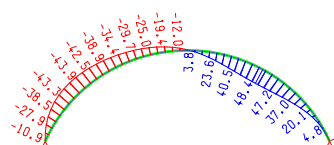
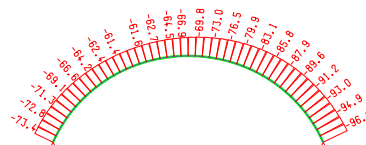
Vx = 1 Vy = 6



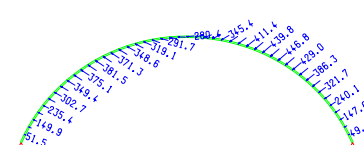
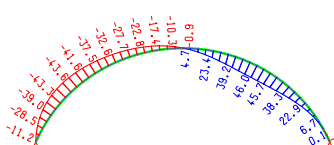
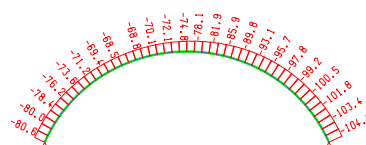
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

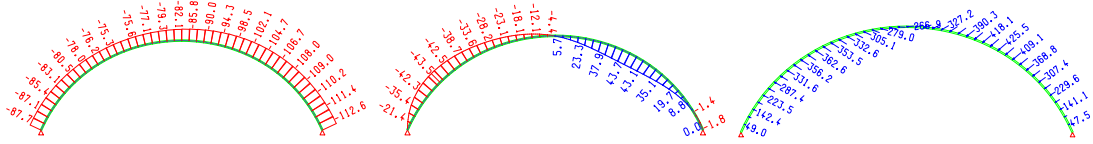
**Abb. B-11.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System A - Kreisbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**

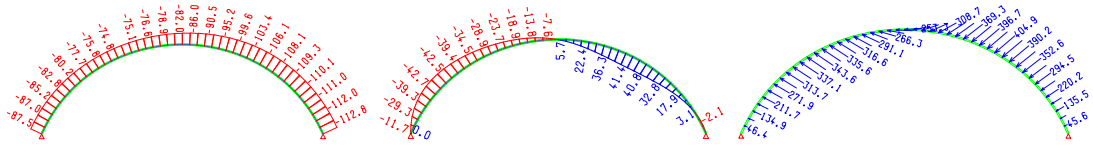
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

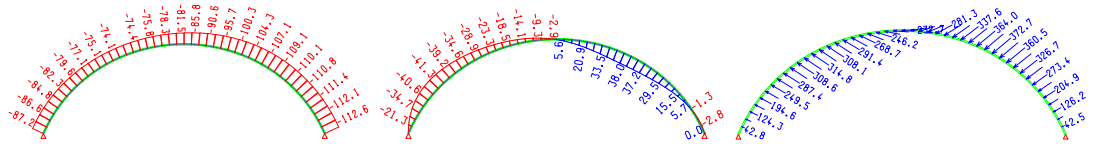
Verformungsvektor [mm]



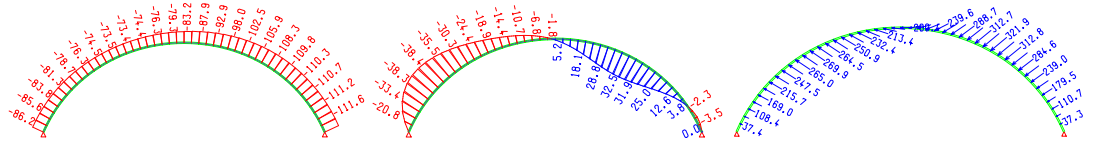
Vx = 6 Vy = 6



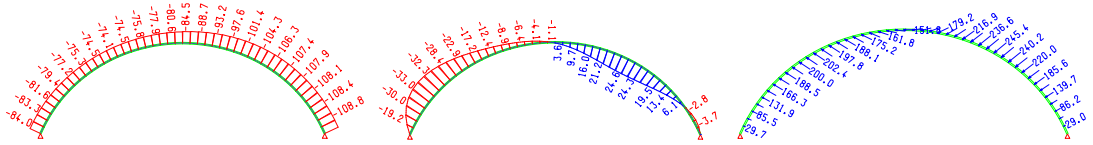
Vx = 6 Vy = 5



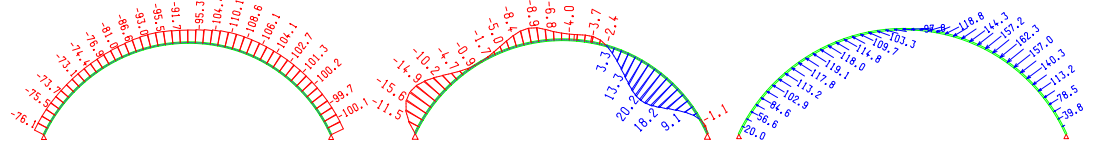
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3



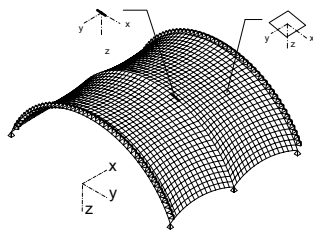
Vx = 6 Vy = 2



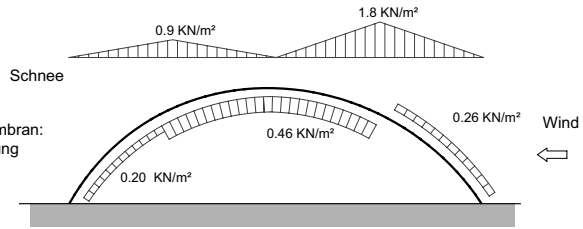
Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-12.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System B -Kreisbogen, Randbögen in x-und z-Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 200 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



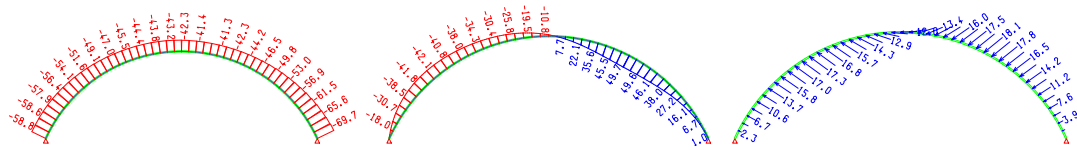
**Abb. B-14.** System

**Abb. B-15.** Lastkombination

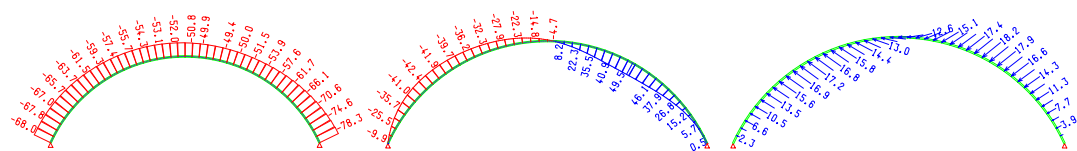
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

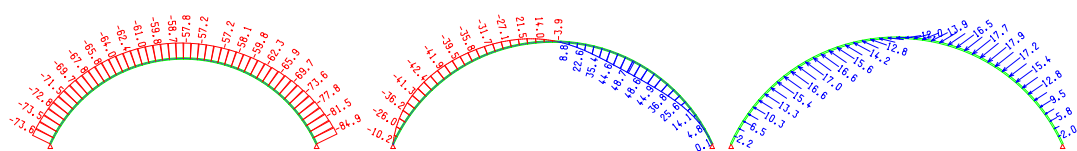
Verformungsvektor [mm]



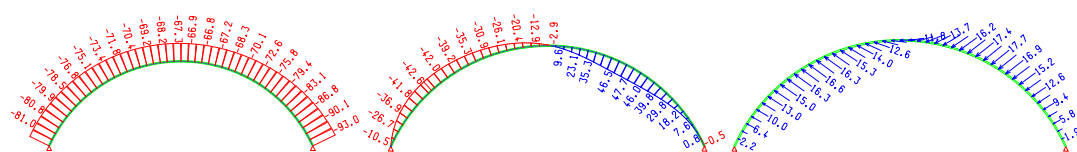
Vx = 1 Vy = 6



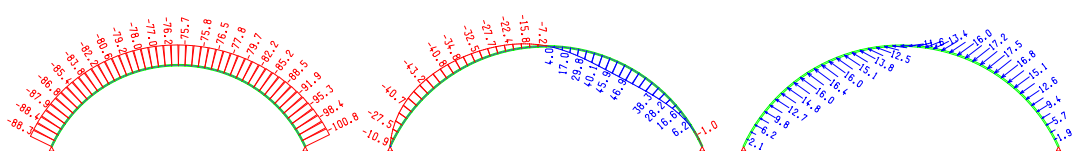
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

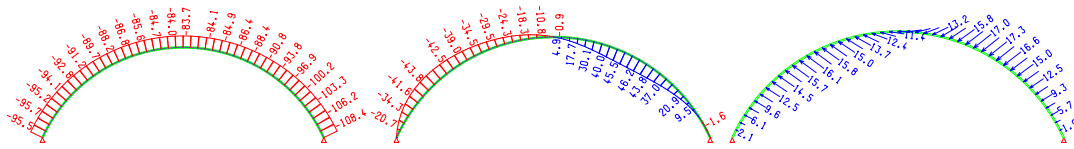
**Abb. B-16.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System B -Kreisbogen, Randbögen in x-und z-Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 200 000 N/mm<sup>2</sup>**

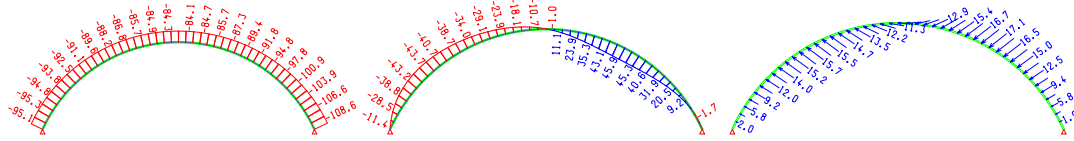
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

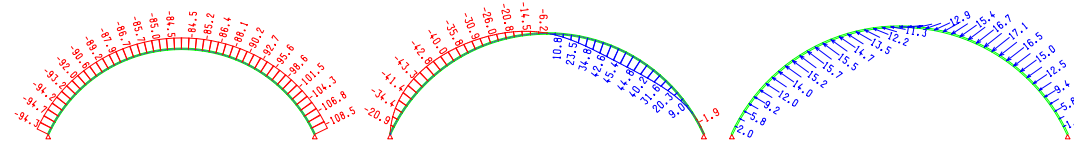
Verformungsvektor [mm]



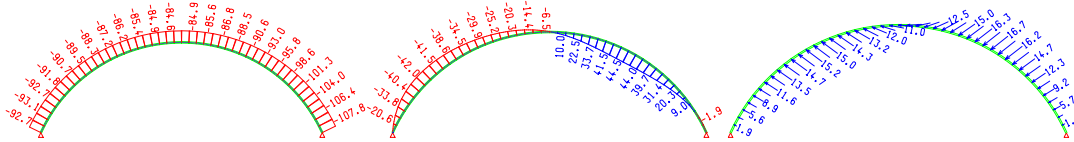
Vx = 6 Vy = 6



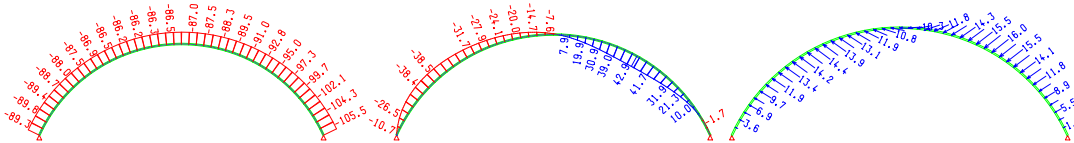
Vx = 6 Vy = 5



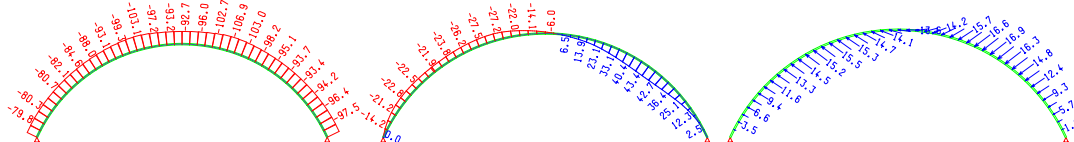
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3



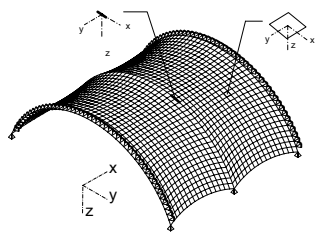
Vx = 6 Vy = 2



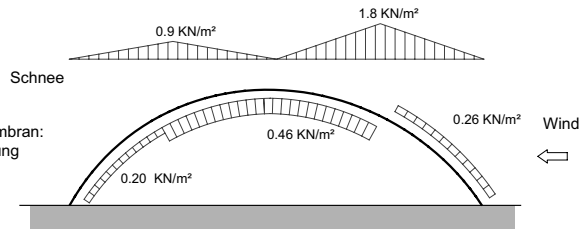
Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-13.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System B - Kreisbogen, Randbögen in x- und z- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 40 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



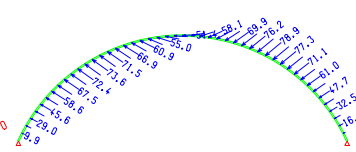
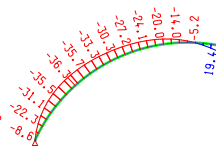
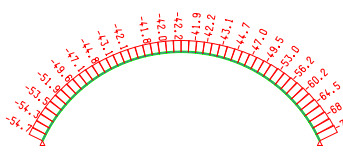
**Abb. B-18.** System

**Abb. B-19.** Lastkombination

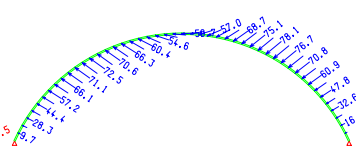
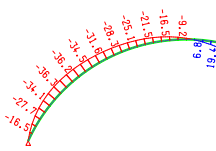
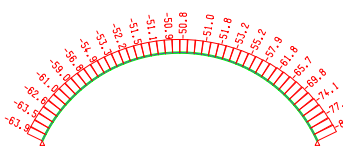
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

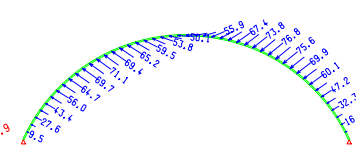
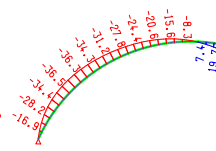
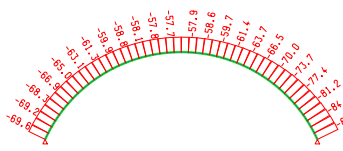
Verformungsvektor [mm]



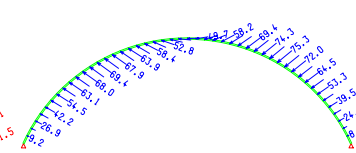
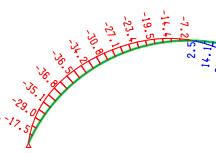
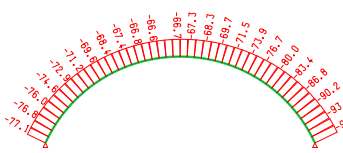
Vx = 1 Vy = 6



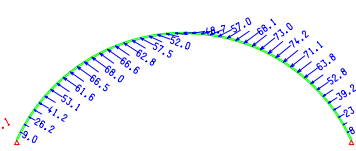
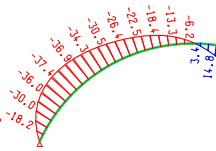
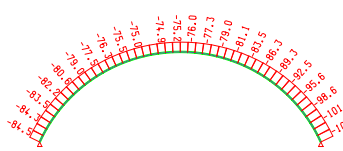
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

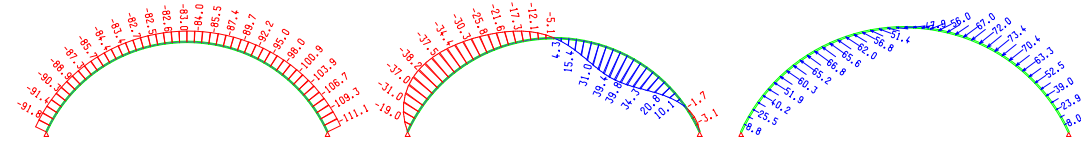
**Abb. B-20.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System B - Kreisbogen, Randbögen in x- und z-Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 40 000 N/mm<sup>2</sup>**

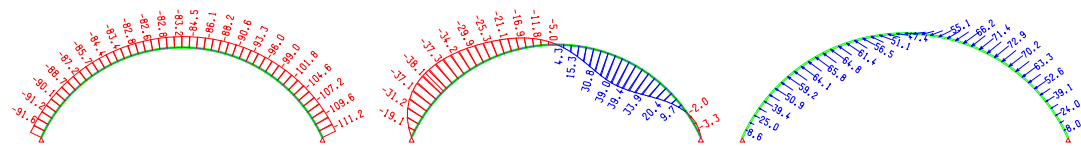
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

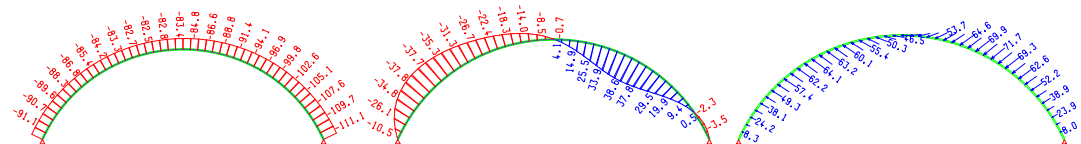
Verformungsvektor [mm]



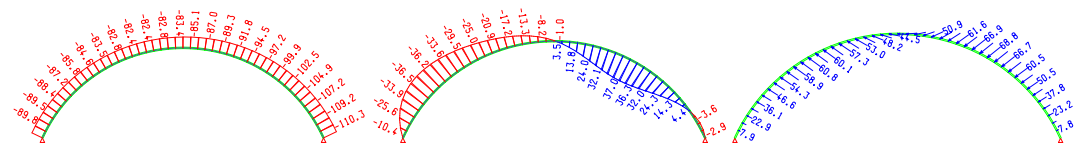
Vx = 6 Vy = 6



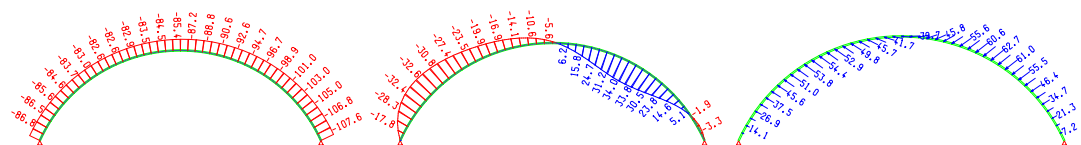
Vx = 6 Vy = 5



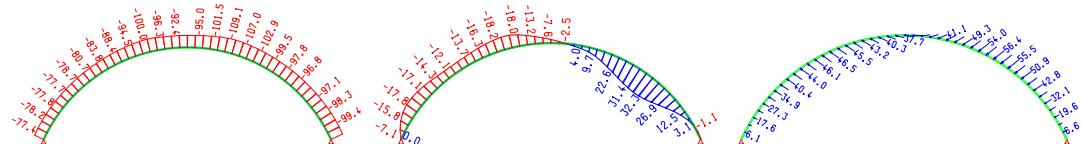
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3



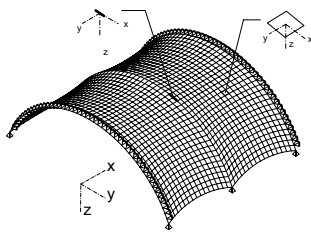
Vx = 6 Vy = 2



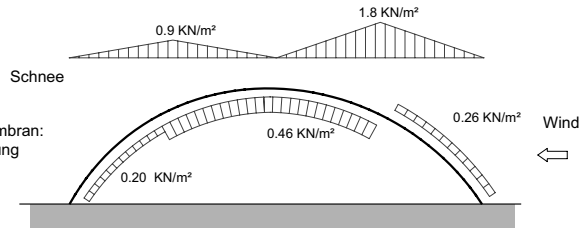
Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-17.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System B - Kreisbogen, Randbögen in x- und z-Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



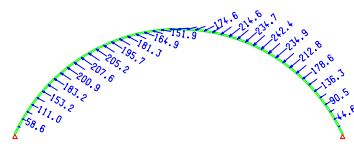
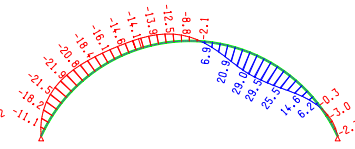
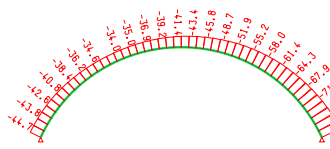
**Abb. B-22. System**

**Abb. B-23. Lastkombination**

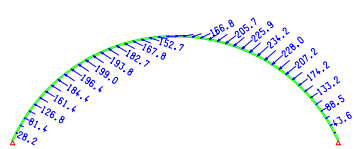
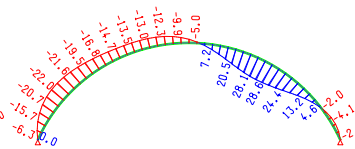
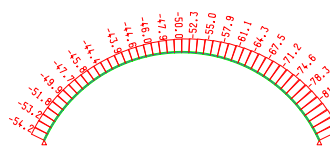
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

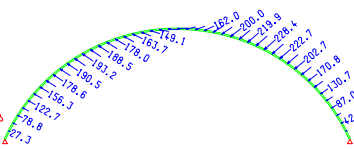
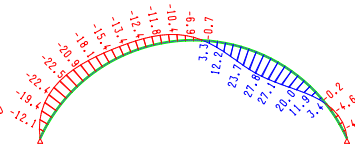
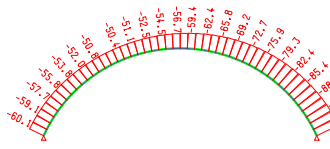
Verformungsvektor [mm]



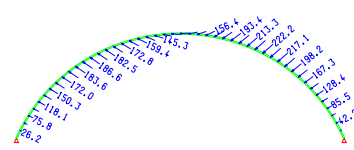
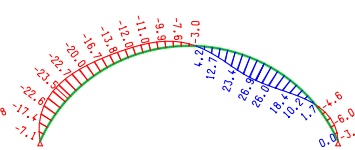
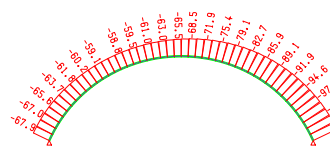
Vx = 1 Vy = 6



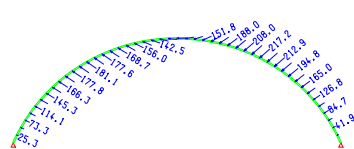
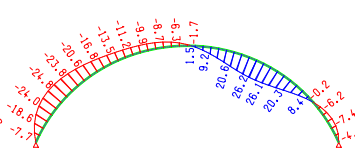
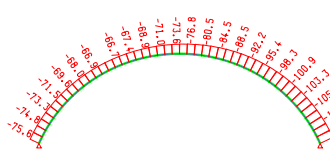
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

**Abb. B-24. Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen**

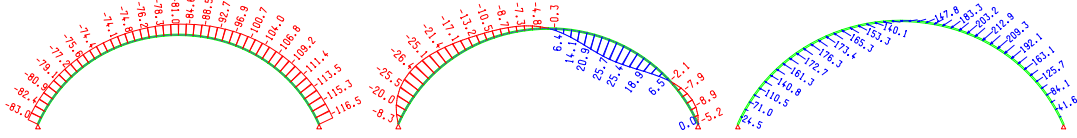


**System B - Kreisbogen, Randbögen in x- und z- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**

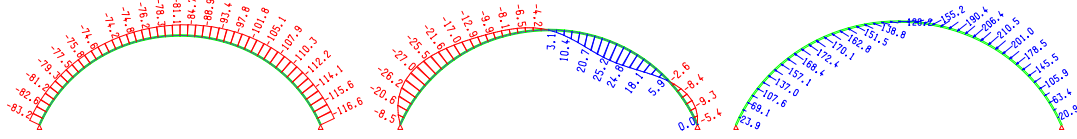
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

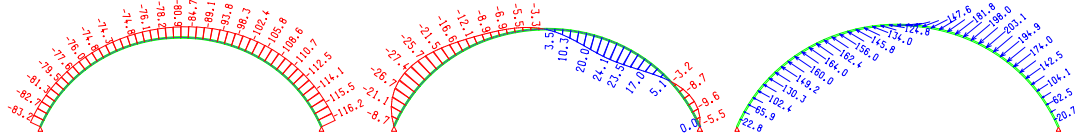
Verformungsvektor [mm]



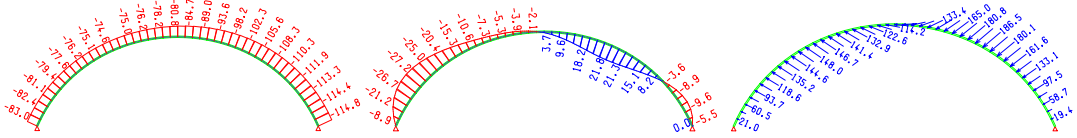
Vx = 6 Vy = 6



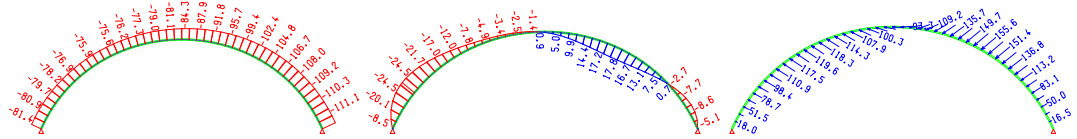
Vx = 6 Vy = 5



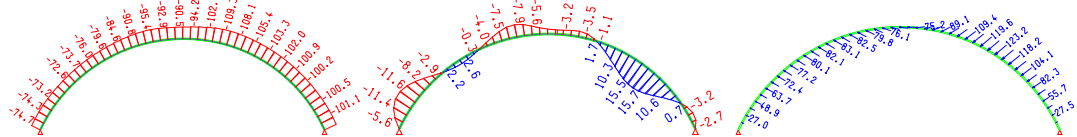
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3



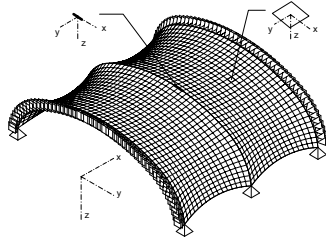
Vx = 6 Vy = 2



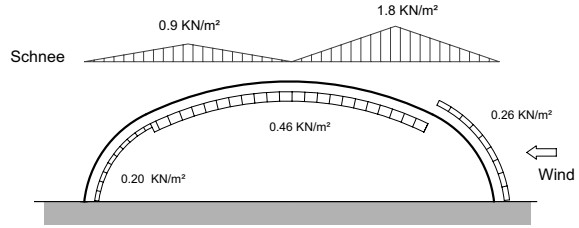
Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-21.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System C - Korbbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 200 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



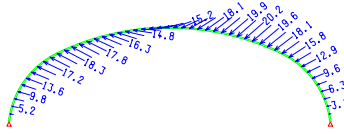
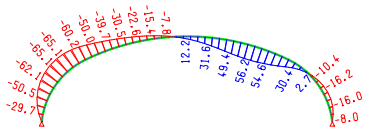
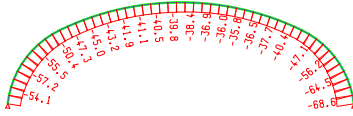
**Abb. B-26. System**

**Abb. B-27. Lastkombination**

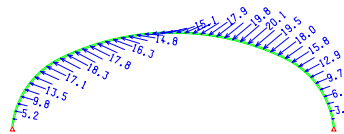
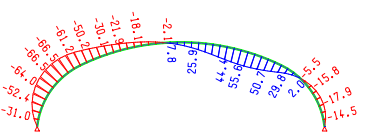
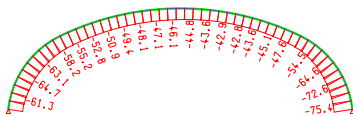
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

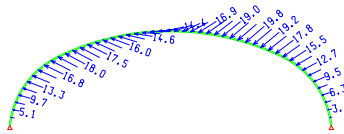
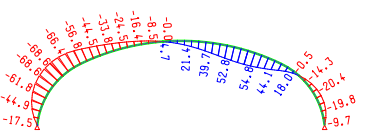
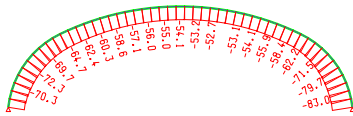
Verformungsvektor [mm]



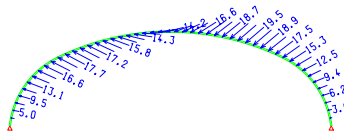
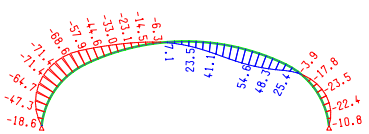
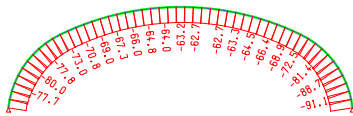
Vx = 1 Vy = 6



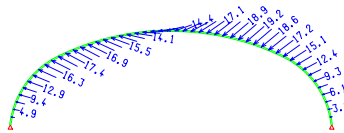
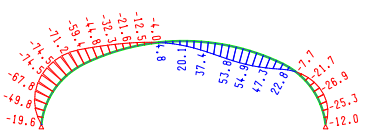
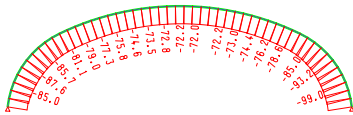
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

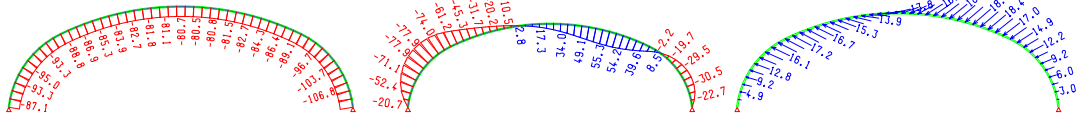
**Abb. B-28. Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen**

**System C - Korbbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 200 000 N/mm<sup>2</sup>**

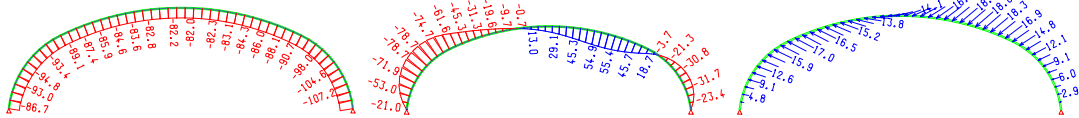
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

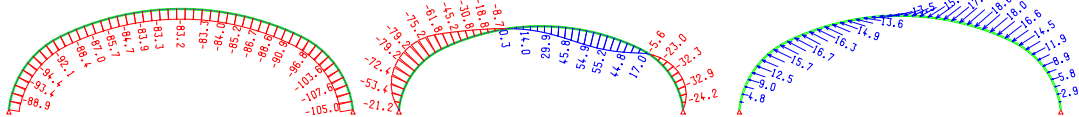
Verformungsvektor [mm]



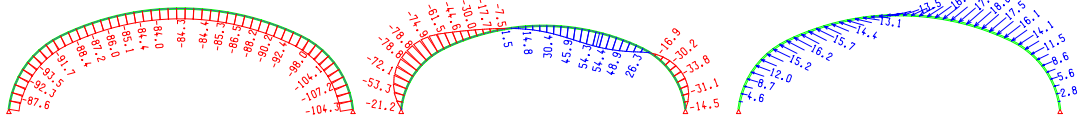
Vx = 6 Vy = 6



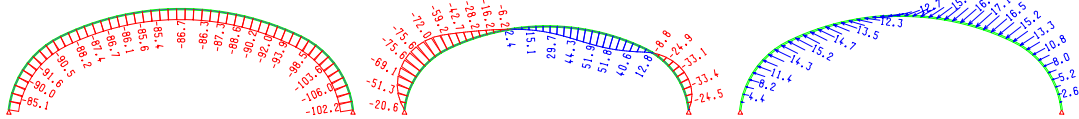
Vx = 6 Vy = 5



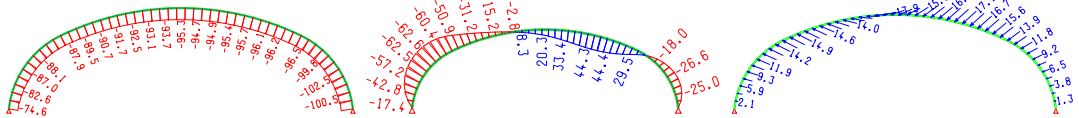
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3



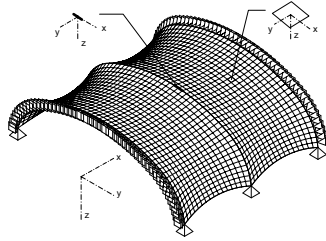
Vx = 6 Vy = 2



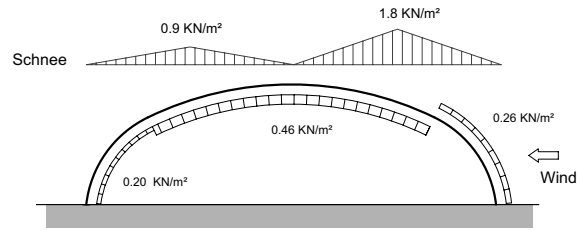
Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-25.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System C - Korbbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 40 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



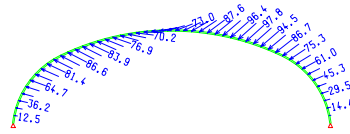
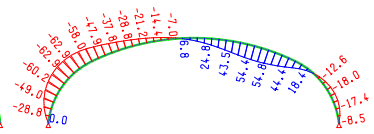
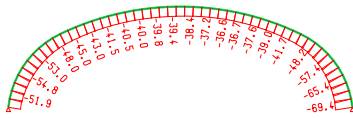
**Abb. B-30. System**

**Abb. B-31. Lastkombination**

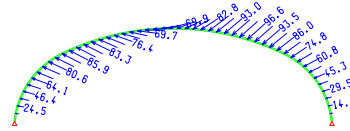
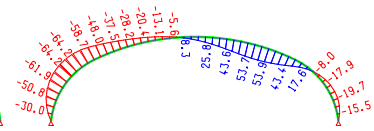
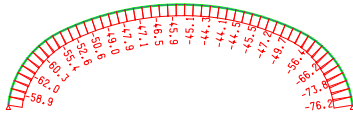
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

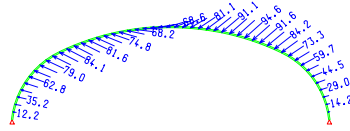
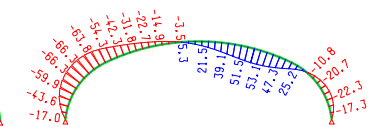
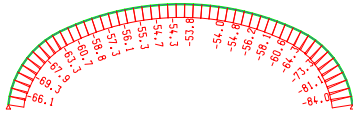
Verformungsvektor [mm]



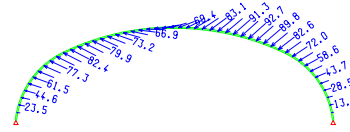
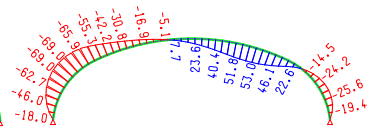
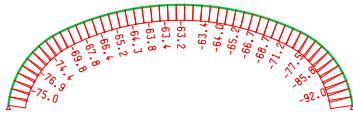
Vx = 1 Vy = 6



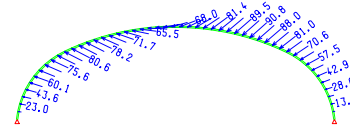
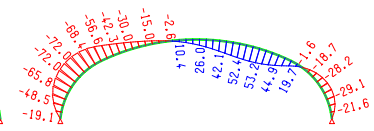
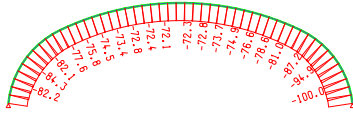
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

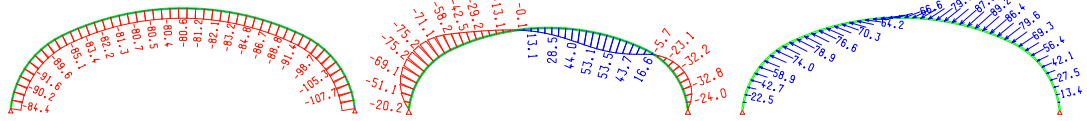
**Abb. B-32. Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen**

**System C - Korbboegen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 40 000 N/mm<sup>2</sup>**

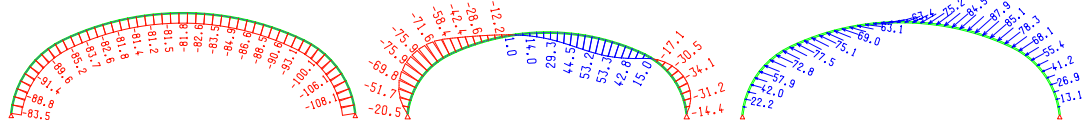
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

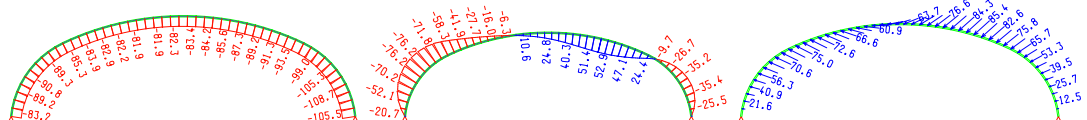
Verformungsvektor [mm]



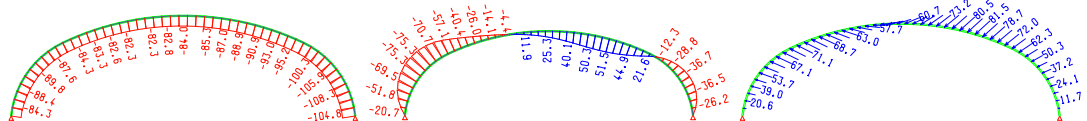
Vx = 6 Vy = 6



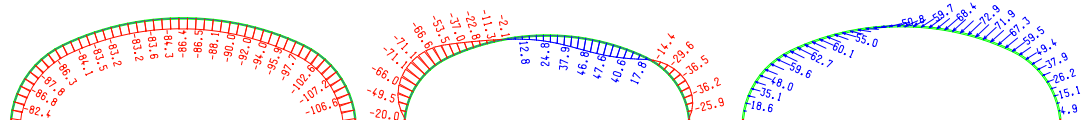
Vx = 6 Vy = 5



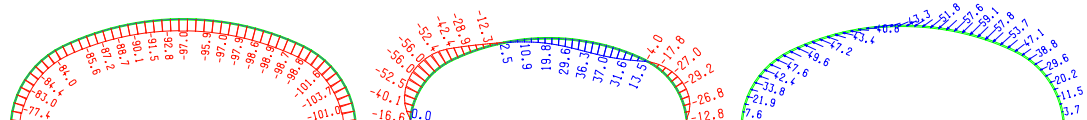
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3



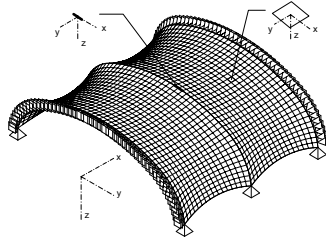
Vx = 6 Vy = 2



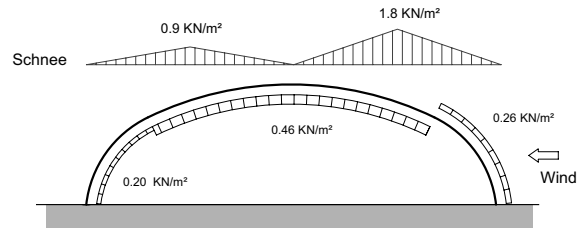
Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-29.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System C - Korbbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



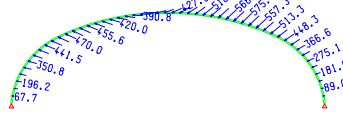
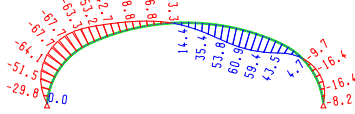
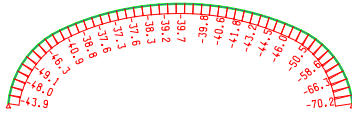
**Abb. B-34. System**

**Abb. B-35. Lastkombination**

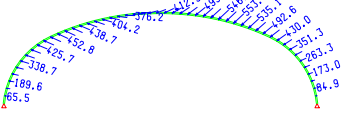
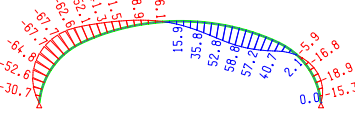
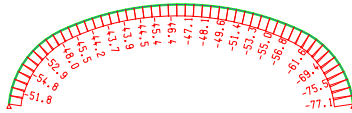
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

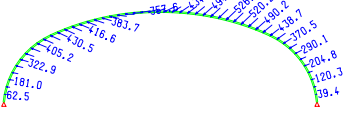
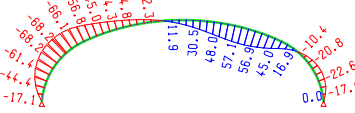
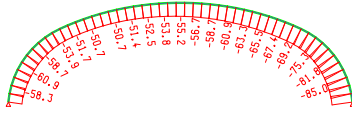
Verformungsvektor [mm]



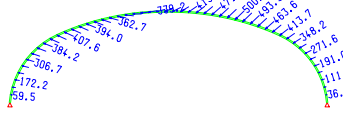
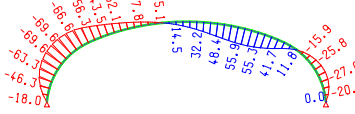
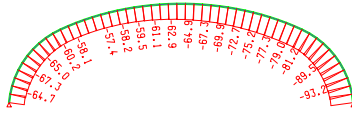
Vx = 1 Vy = 6



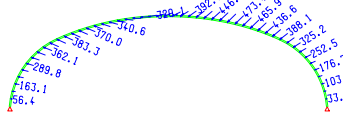
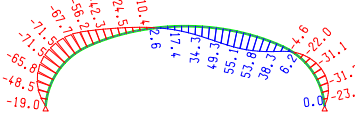
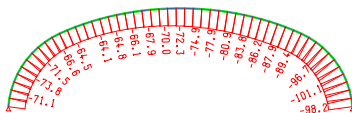
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

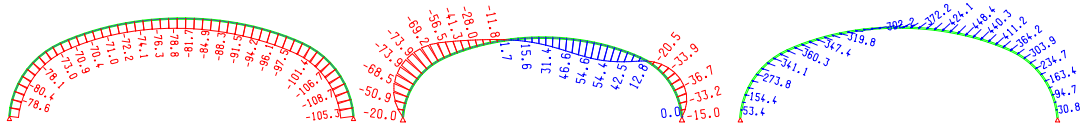
**Abb. B-36. Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen**

**System C - Korbboegen, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**

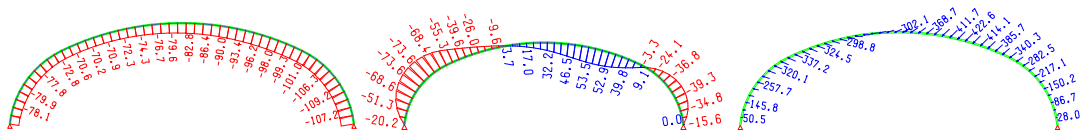
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

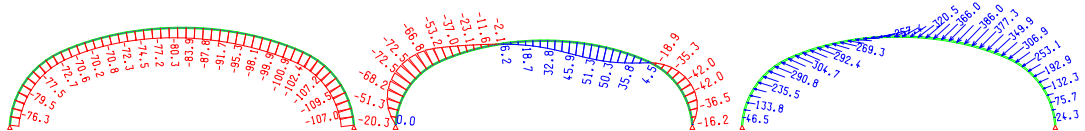
Verformungsvektor [mm]



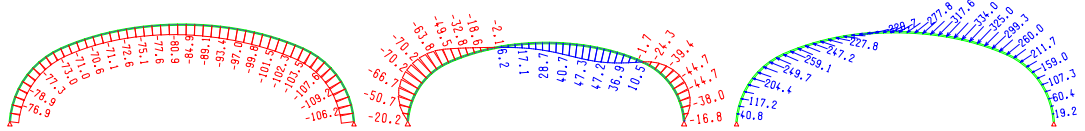
Vx = 6 Vy = 6



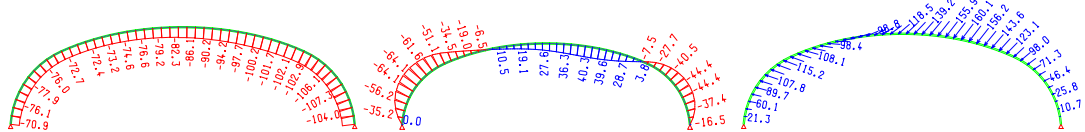
Vx = 6 Vy = 5



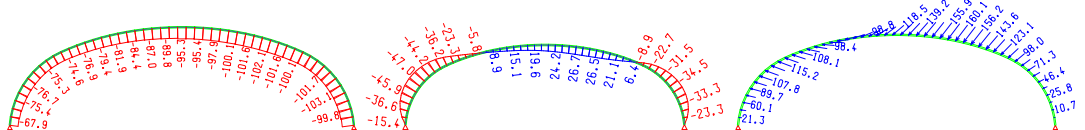
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3



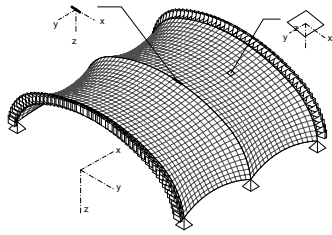
Vx = 6 Vy = 2



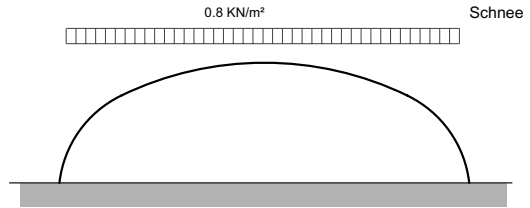
Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-33.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**System C - Korbbogen, Randbögen in x- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
Vx = Schussrichtung  
Vy = Kettrichtung



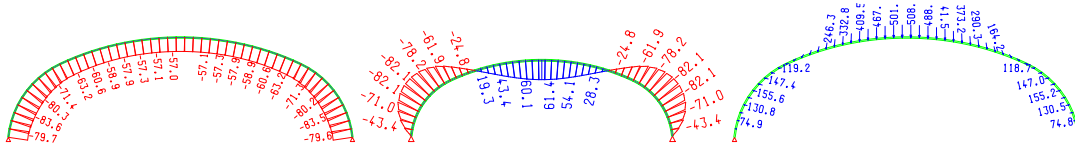
**Abb. B-38. System**

**Abb. B-39. Lastkombination**

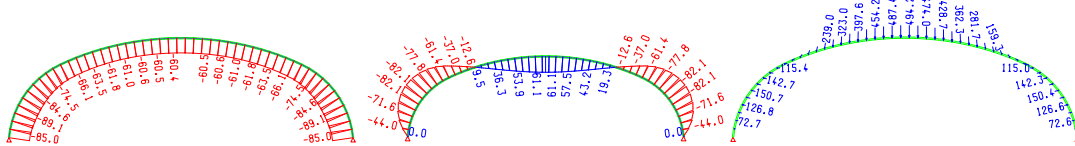
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

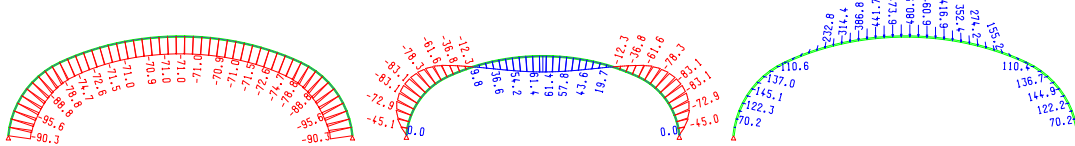
Verformungsvektor [mm]



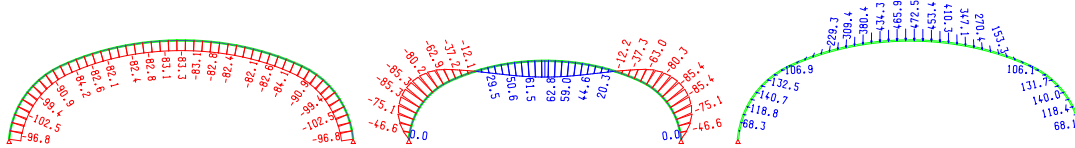
Vx = 1 Vy = 6



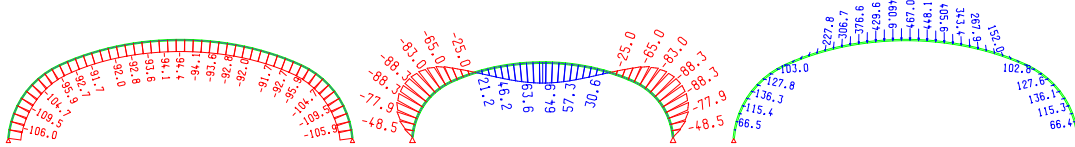
Vx = 2 Vy = 6



Vx = 3 Vy = 6



Vx = 4 Vy = 6



Vx = 5 Vy = 6

**Abb. B-40. Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen**

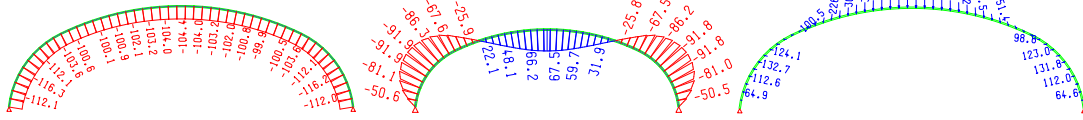


**System C - Korbboogen, Randbögen in x- Richtung fest gelager, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**

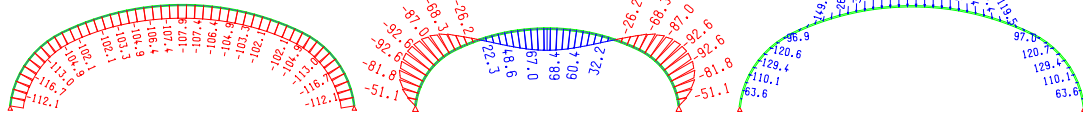
Normalkraft Nx [KN/m]

Moment My [KN/m]

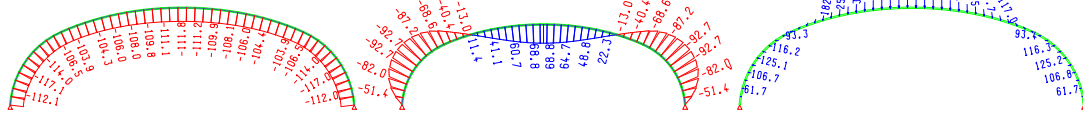
Verformungsvektor [mm]



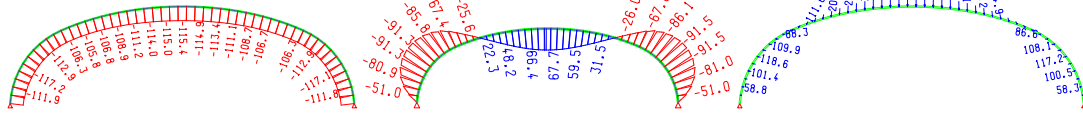
Vx = 6 Vy = 6



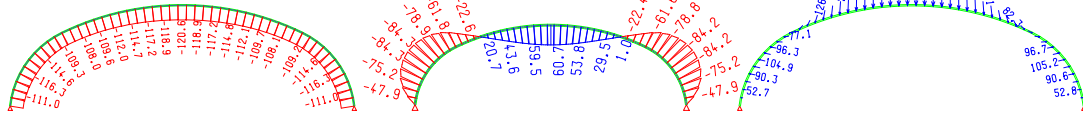
Vx = 6 Vy = 5



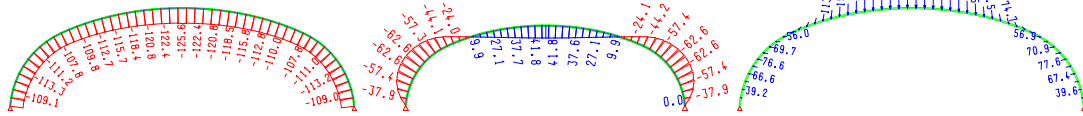
Vx = 6 Vy = 4



Vx = 6 Vy = 3

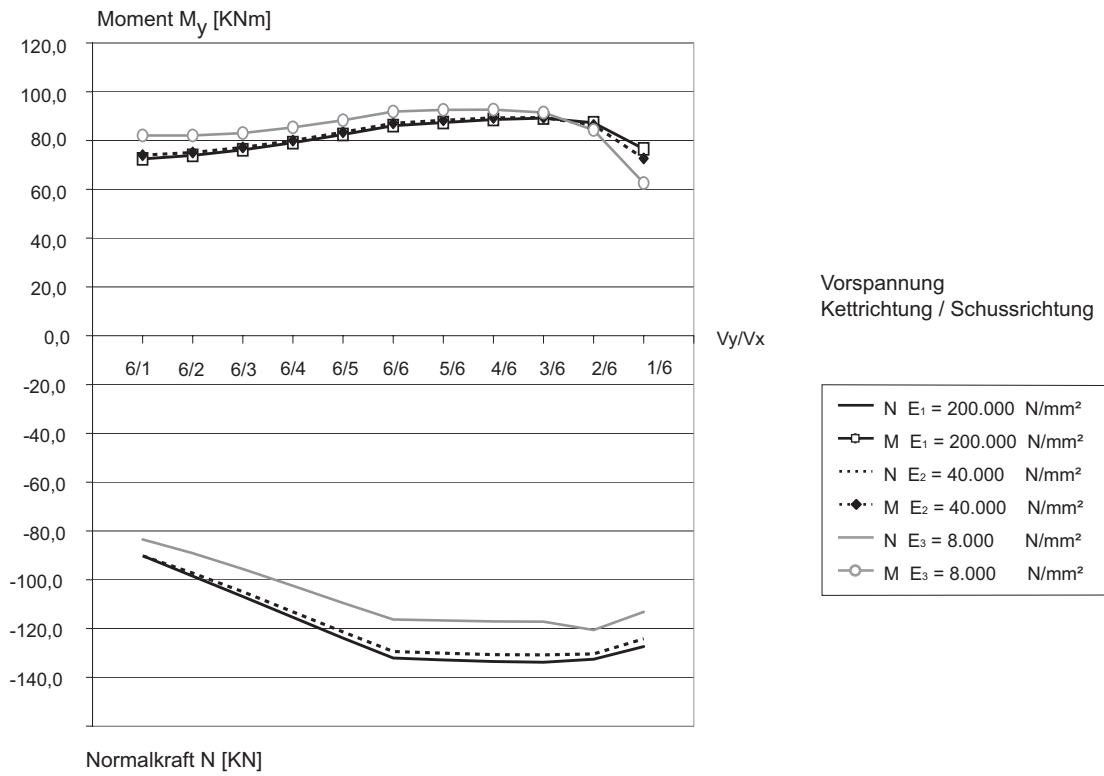


Vx = 6 Vy = 2



Vx = 6 Vy = 1

**Abb. B-37.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen



**Abb. B-41.** System C - Änderung von max. Normalkraft- und Momentenbelastung in Abhängigkeit veränderter Vorspannungsverhältnisse für drei verschiedene Steifigkeiten des Korbbogens, Lastkombination L1+LF3 (Vorspannung +Schnee symmetrisch)

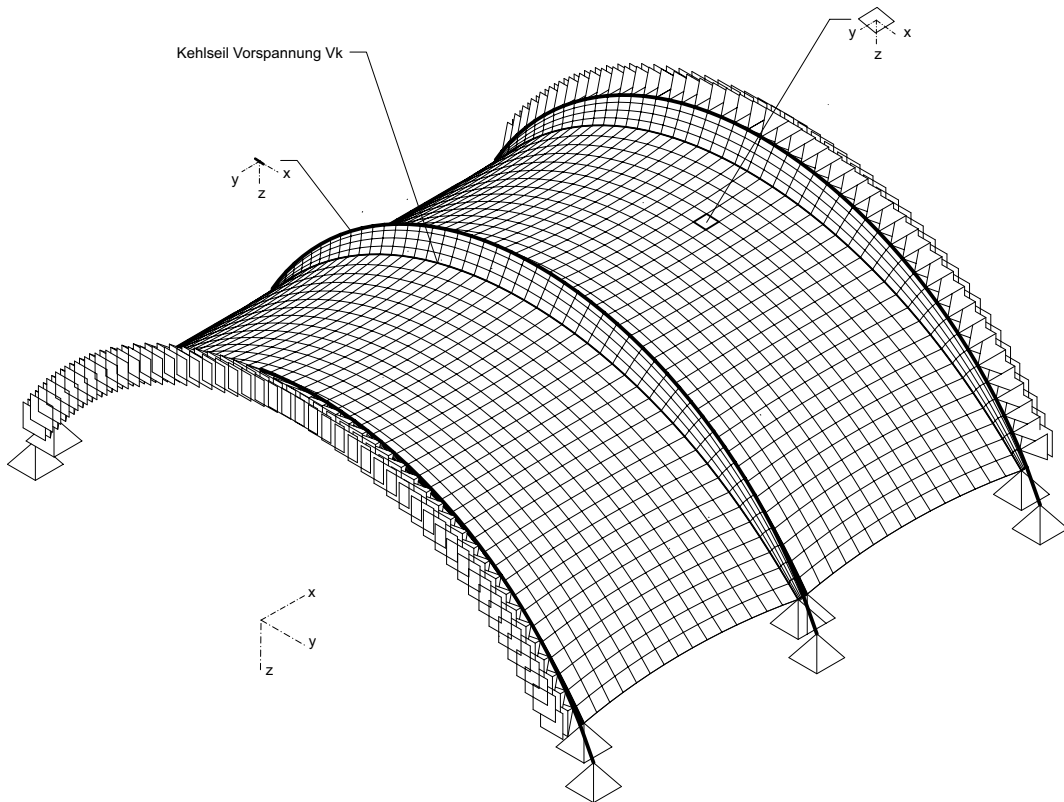
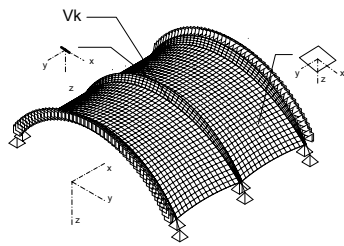
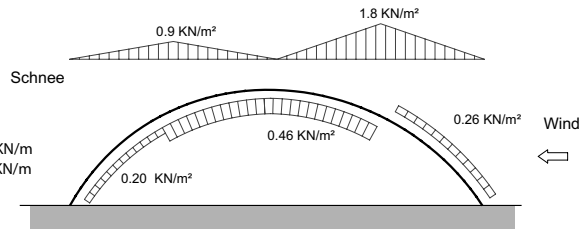


Abb. B-42. Modifizierung des Systems A - Kreisbogen mit Kehlseil

**Kreisbogen mit Kehlseil, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 200 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
 $V_x = \text{Schussrichtung} = 2 \text{ KN/m}$   
 $V_y = \text{Ketttrichtung} = 6 \text{ KN/m}$



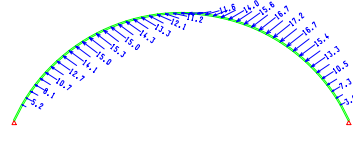
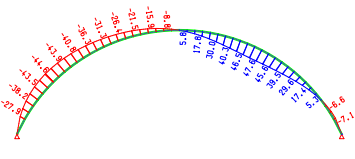
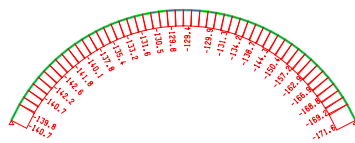
**Abb. B-43. System**

**Abb. B-44. Lastkombination**

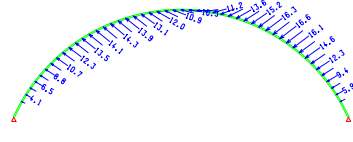
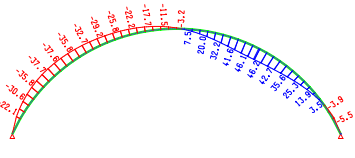
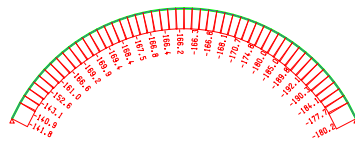
Normalkraft  $N_x$  [KN/m]

Moment  $M_y$  [KN/m]

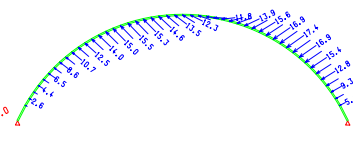
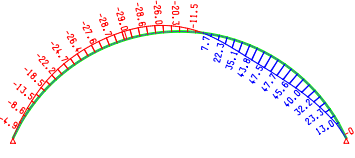
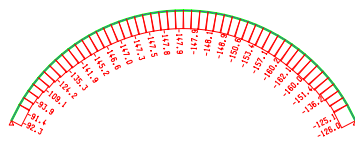
Verformungsvektor [mm]



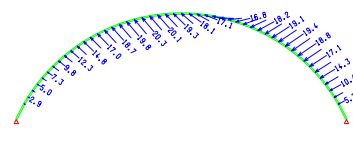
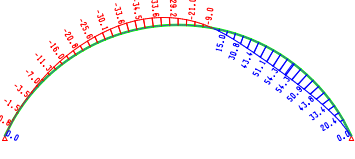
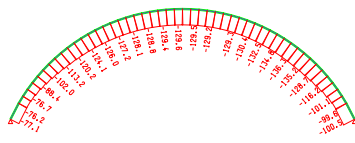
Vk = 50 KN



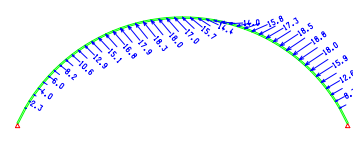
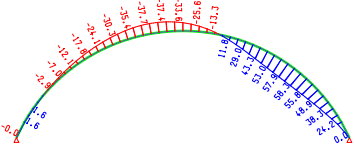
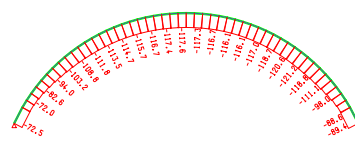
Vk = 100 KN



Vk = 150 KN



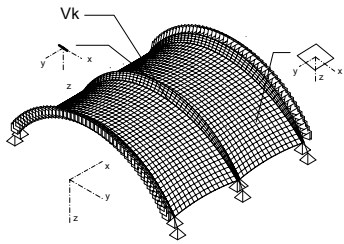
Vk = 200 KN



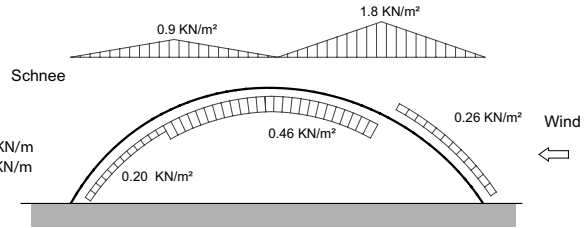
Vk = 250 KN

**Abb. B-45. Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen**

**Kreisbogen mit Kehlseil, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 40 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
 $V_x = \text{Schussrichtung} = 2 \text{ KN/m}$   
 $V_y = \text{Ketttrichtung} = 6 \text{ KN/m}$



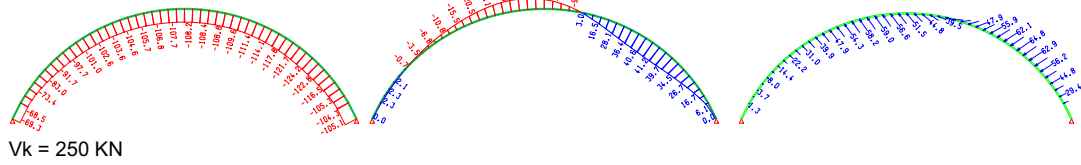
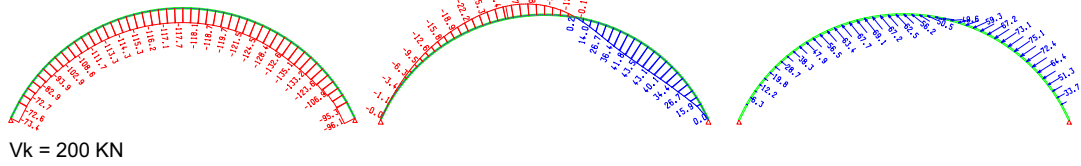
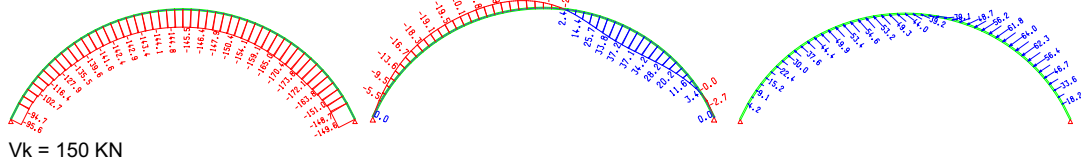
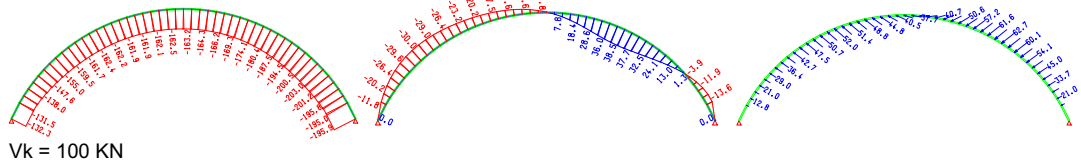
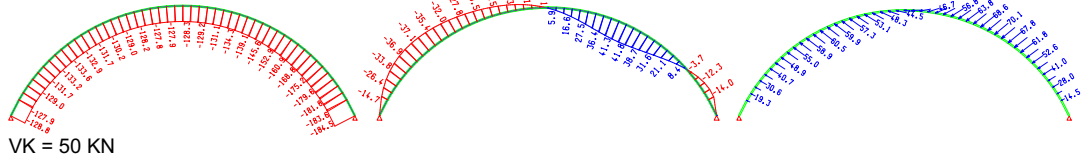
**Abb. B-46.** System

**Abb. B-47.** Lastkombination

Normalkraft  $N_x$  [KN/m]

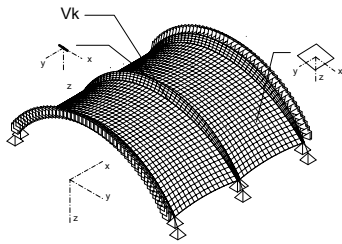
Moment  $M_y$  [KN/m]

Verformungsvektor [mm]

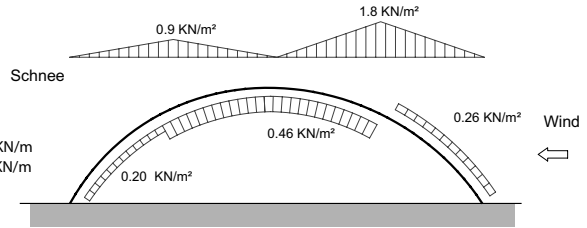


**Abb. B-48.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

**Kreisbogen mit Kehlseil, Randbögen in x- Richtung fest gelagert, E- Modul Bogen: 8 000 N/mm<sup>2</sup>**



Vorspannung Membran:  
 $V_x = \text{Schussrichtung} = 2 \text{ KN/m}$   
 $V_y = \text{Ketrichtung} = 6 \text{ KN/m}$



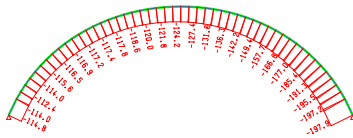
**Abb. B-49.** System

**Abb. B-50.** Lastkombination

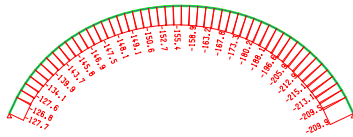
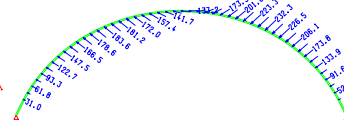
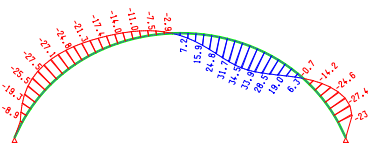
Normalkraft  $N_x$  [KN/m]

Moment  $M_y$  [KN/m]

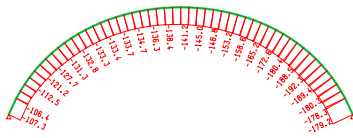
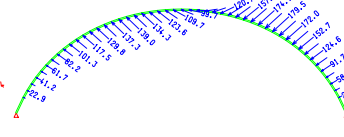
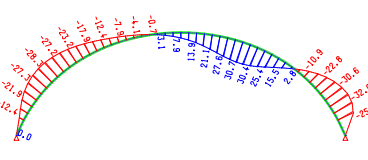
Verformungsvektor [mm]



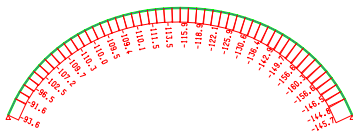
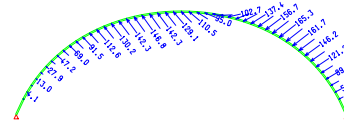
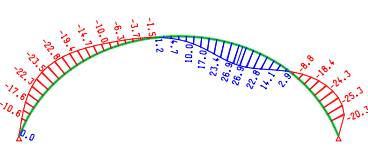
VK = 50 KN



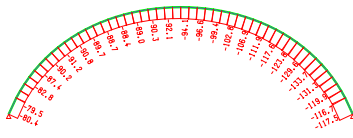
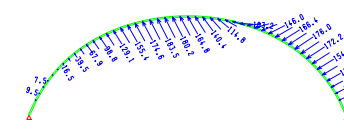
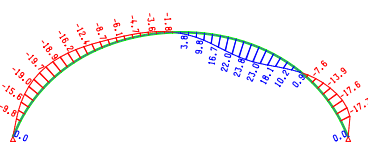
VK = 100 KN



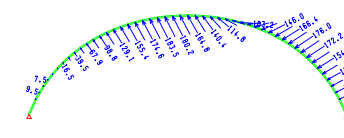
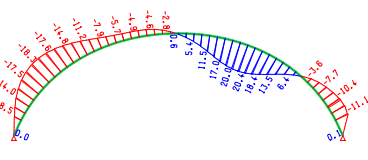
VK = 150 KN



VK = 200 KN

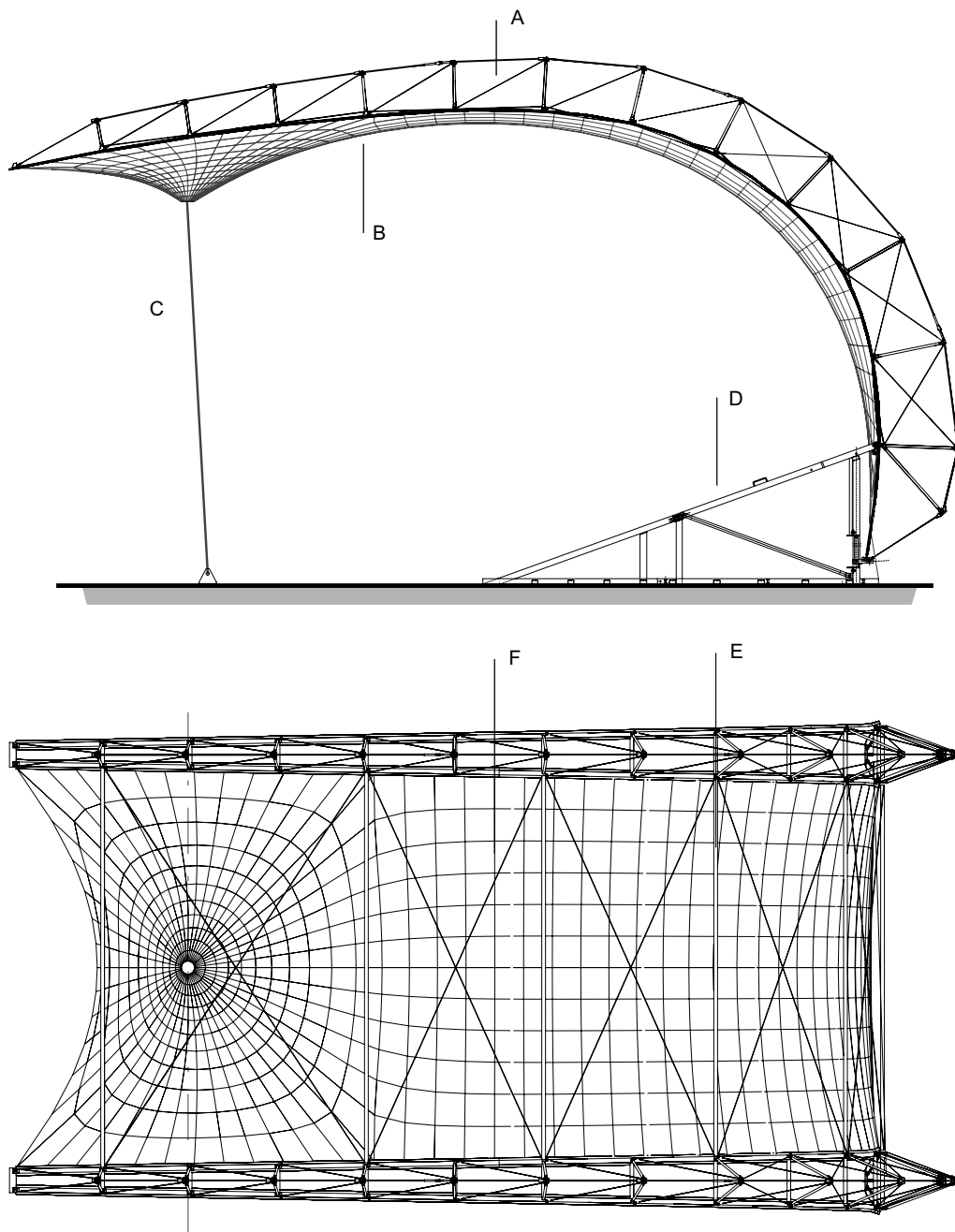


VK = 250 KN



**Abb. B-51.** Schnittgrößen und Verformungen Mittelbogen

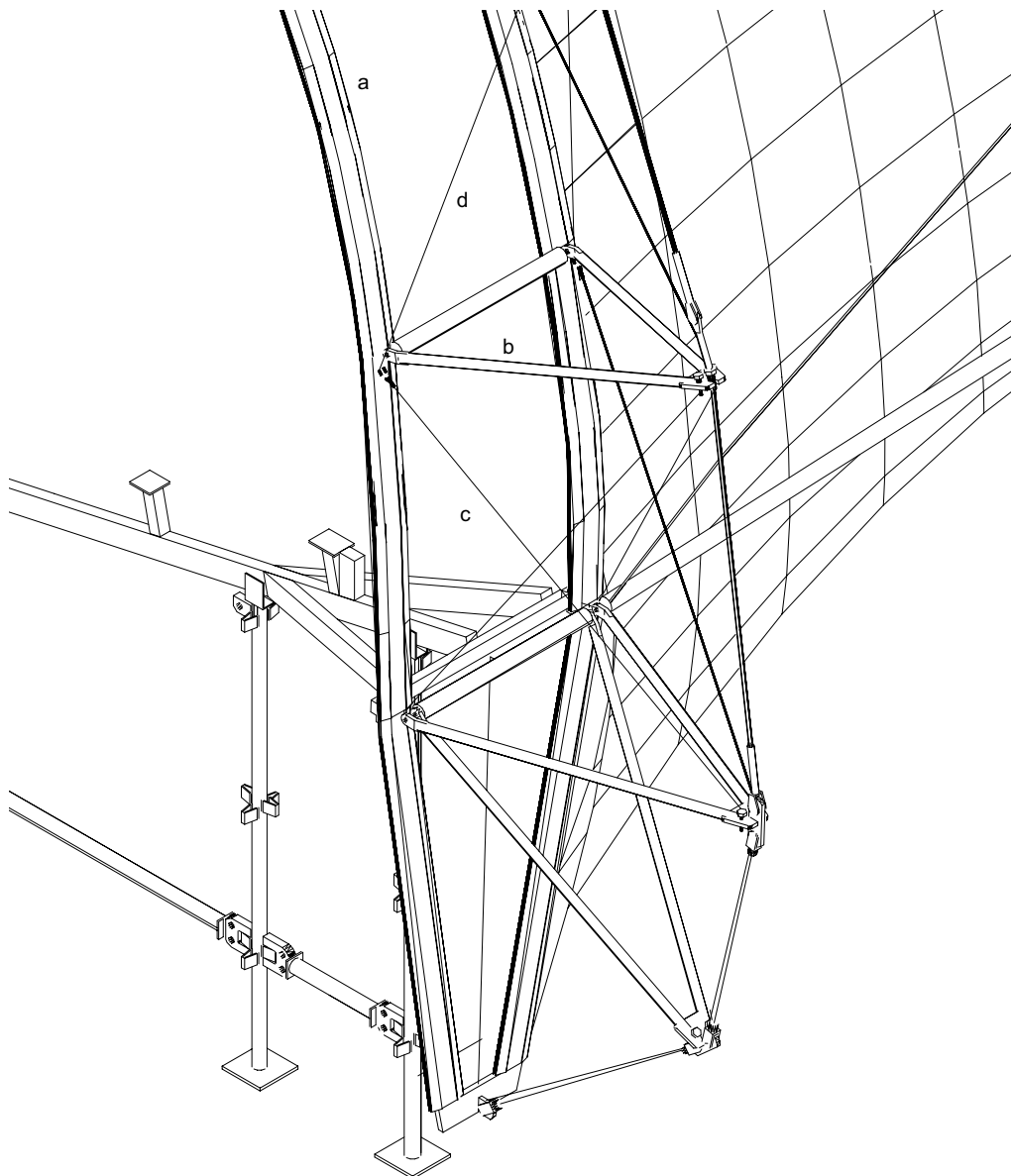
# Anhang C



- A Kragträger
- B Membran PVC-Polyestergewebe
- C vertikale Abspannung
- D Standfüße
- E Druckstäbe Verbände
- F Zugstäbe Verbände

**Abb. C-52.** Prototyp der Tribünenüberdachung, Seitenansicht und Grundriss M 1:100





- a. Aluminium Strangpressprofile
- b. A-förmige Rahmen aus Aluminiumrohren mit einem Durchmesser von 30 bzw. 40 mm
- c. Diagonalseile 4 mm
- d. gegenläufige Diagonalseile 4 mm

**Abb. C-53.** Prototyp, Detail hinteres Auflager (ohne Maßstab)

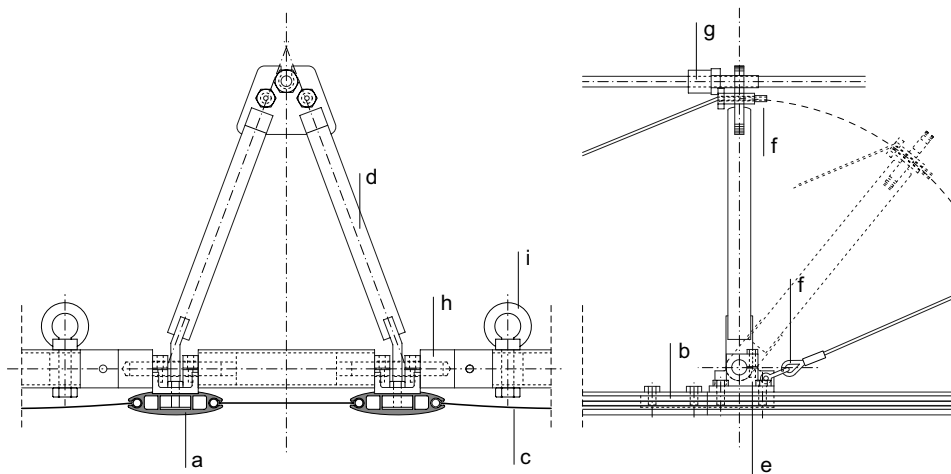


Abb. C-54. Details Kragträger M1:10

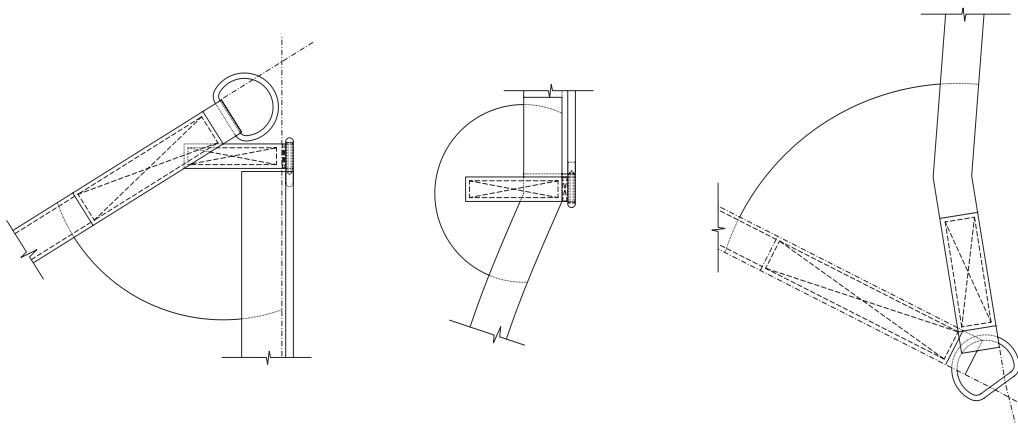


Abb. C-55. Anschlußdetails Membran M 1:10

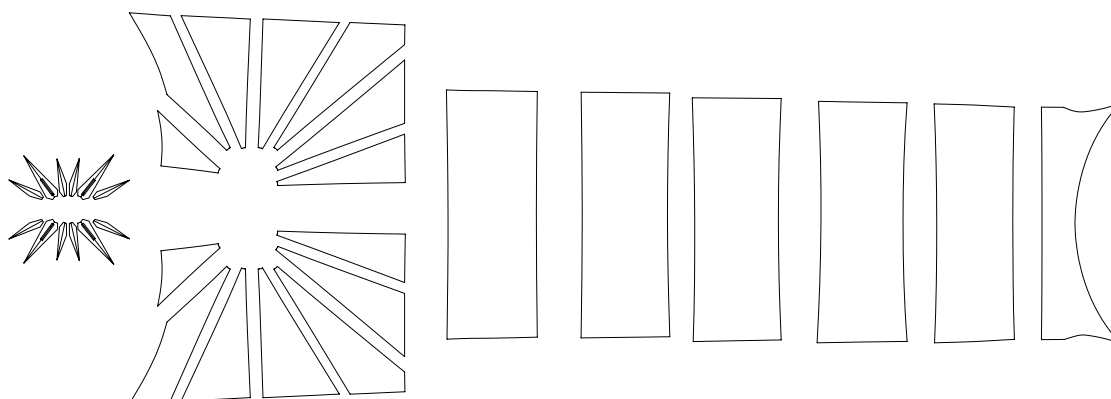


Abb. C-56. Membran Prototyp 1 - Zuschnitt (ohne Maßstab)

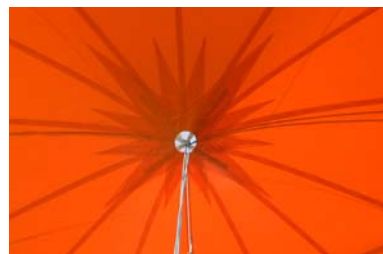


**Abb. C-57.** Kragträger Prototyp 2001



**Abb. C-58.** Anschluss Verband - Kragträger

**Abb. C-59.** Anschlussvarianten Obergurt - A Frame



**Abb. C-60.** Aufbau des Prototyps auf dem Gelände der Firma ARENA Ltd. 2001



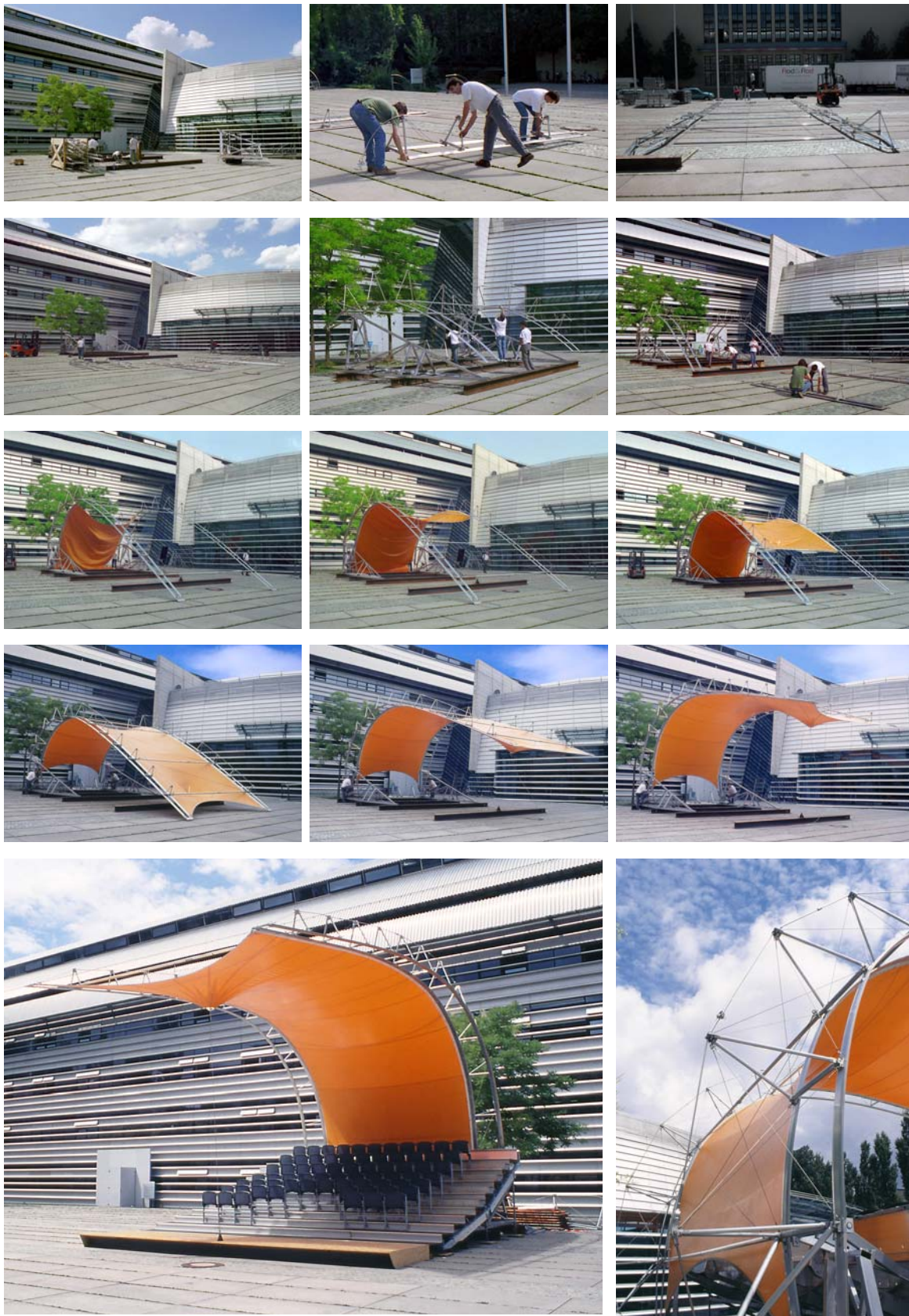


Abb. C-61. Aufbau des Prototyps in München, Sommer 2003

## Lebenslauf

Christoph Gengnagel

08.06.1965 geboren in Jena

### *Ausbildung*

2001 Dipl.Ing.der Architektur, Technische Universität München  
1993 bis 2001 Studium Architektur Technische Universität München  
1992 Dipl.Ing.des Bauingenieurwesens, Bauhausuniversität Weimar  
1987 bis 1992 Studium Bauingenieurwesen, Bauhausuniversität Weimar

### *Akademische Laufbahn*

1998 bis 2004 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Tragwerksplanung TUM  
1996 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tragwerksplanung TUM

### *Berufspraxis*

seit 1999 Partner a.k.a.ingenieure, München  
1996 bis 1998 Tragwerksplaner, Barthel & Maus, Beratende Ingenieure, München  
1993 bis 1996 Tragwerksplaner, Fakler Consult, München  
1992 bis 1993 Tragwerksplaner Dyckerhoff&Widmann AG, NL München  
1985 bis 1986 Straßen- und Tiefbauer, Straßen-Brücken-Tiefbaukombinat Gera, BT Jena

---

### *Publikationen*

- Gengnagel C.: Leicht gedacht - Bauen mit Membranen, db Deutsche Bauzeitung 2/2005, Konradin Medien Gruppe, Leinfelden Echterdingen 2005
- Gengnagel C.: Wandelbare Membrandächer; in Kunststoffe und freie Formen - ein Werkbuch; Springer Verlag Wien 2004
- Burford N., Gengnagel, C.: Mobile Shelters Systems – 2 Case Studies in Innovation; Conference Proceedings IASS Symposium 2004, Shell and Spatial Structures from Models to Realization; Montpellier France 2004
- Burford N., Gengnagel, C.: Mobile Shelters Systems – A new typology for classification; Conference Proceedings IASS Symposium 2004, Shell and Spatial Structures from Models to Realization; Montpellier France 2004
- Gengnagel C.: Mobile Tribünenüberdachung- Die Entwicklung von A.R.I.E.S.; in: Umriss - Zeitschrift für Baukultur; Ausgabe 3 2004; Verlagsgruppe Wiederspahn; Wiesbaden 2004
- Burford N., Gengnagel C.: A Very Rapid Deployable Canopy System, Conf. Proc. Transportable Environments, Ryerson University, Toronto Canada 2004
- Alpermann H., Gengnagel C.: Interaktion von Membran und biegesteifen Bogentragwerken, in: Stahlbau 10/2003, Ernst & Sohn 2003
- Burford N., Gengnagel C.: Ein Dach der besonderen Art, in: Mitteilungen der TUM 03/04, Technische Universität München 2003
- Gengnagel C., Kling N.: Public Spaces [L.A.EX], in "Stadtwerk", ISBN 3-936721-05-X, Verlag Büro Wilhelm Amberg 2003
- Barthel R., Gengnagel C.: Die Schalen Eladio Diestes, in Eladio Dieste - Form und Konstruktion, Verlag das Beispiel GmbH Darmstadt 2001, ISBN 3-935243-09-x
- Gengnagel C., Barthel R.: Bewegliche Dächer, in: Detail 5/2001, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München 2001
- Barthel R., Brengelmann T., Gengnagel C.: Eine modulare Tragwerks -Struktur; in: Detail 4/2001 S. 630 - 631

# LT

## Veröffentlichungsreihe des Lehrstuhls für Tragwerksplanung

LT 1	Jagfeld, Matthias: Tragverhalten und statische Berechnung gemauerter Gewölbe bei großen Auflagerverschiebungen Untersuchung mit der Finite-Elemente-Methode	Dissertation 2000	15,- €
LT 2	Seraphin, Mathias: Zur Entstehung des Ingenieurholzbaus	Dissertation 2003	15,- €
LT 3	Stepan, Kurt: Vergleichende Untersuchungen von Deckensystemen des Stahlbeton-Skelettbaus	Dissertation 2004	15,- €
LT 4	Casertano, Michel; Keltsch, Michael: Konstruktion und Form von Stadien - Fußballstadion München	Diplomarbeit WS 2002	15,- €
LT 5	Braun, Marius; Lax Jakob: morphix - mobile shelter system	Diplomarbeit SS 2003	15,- €
LT 6	Neumann, Christine; Meyer-Arend, Peter: le Rond et Vous - ein mobiler Bühnenraum	Diplomarbeit SS 2004	15,- €
LT 7	Bauen mit Glas	Seminarbericht SS 2001	20,- €
LT 8	Form und Konstruktion Sportarenen mit Tragwerken großer Spannweite	Seminarbericht SS 2002	20,- €
LT 9	Zugbeanspruchte Konstruktionen	Seminarbericht SS 2003	20,- €
LT 10	Brücken Gestalt und Konstruktion	Seminarbericht SS 2004	20,- €
LT 11	Schalen Formen, Konstruktionen, Bauten	Seminarbericht SS 2005	20,- €
LT 12	Gengnagel, Christoph: Mobile Membrankonstruktionen	Dissertation 2005	25,- €

