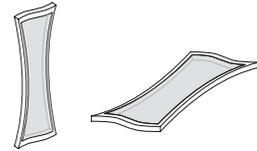


---

Gregor Grunwald

Dissertation



**Mechanisch vorgespannte, doppelagige  
Membranmodule in ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle**

---

**Technische Universität Berlin**

Fachgebiet für konstruktives Entwerfen und klimagerechtes Bauen  
Univ.-Prof. Rainer Hascher

Institut für Geodäsie und Ausgleichsrechnung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lothar Gründig

**Mechanisch vorgespannte, doppelagige Membranmodule  
in ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle**

vorgelegt von Dipl.-Ing. (Architektur) Gregor Grunwald

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt -  
Institut für Architektur der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer.-nat. Rudolf Schäfer, TU Berlin  
1. Bericht: Univ.-Prof. Rainer Hascher, TU Berlin  
2. Bericht: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lothar Gründig, TU Berlin  
Tag der Wissenschaftlichen Aussprache: 12. September 2007

ISBN: 3-9809030-9-5

Berlin, 2007  
D83

---

## Vorwort

Die dynamischen Formen und die Leichtigkeit des Membranbaus motivierten mich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Tragwerksentwurf und -konstruktion am Institut für Architektur der Technischen Universität Berlin in den Jahren 2002 bis 2007 diese Arbeit zu schreiben.

Das Thema resultiert ursprünglich aus meinen Forschungsaufenthalten im indischen Himalaja zu Studienzeiten. Inspiriert von dortigen Lehm- und Zeltbauten vertiefte ich meine Studien auf diese Konstruktionsweisen und beschäftigte mich mit ihrer zeitgenössischen Anwendung in unserer Kulturlandschaft.

Die Mitarbeit in Planungsbüros für Membranbau ermöglichten mir praktische Erfahrungen zu sammeln, die zur Grundlage meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der TU-Berlin wurden. Hier mündeten die Studien in der nun fertiggestellten, vorliegenden Dissertation.

Danken möchte ich meinem Freund Eddy Widjaja für seine Unterstützung und Motivation. Seine Tipps und Ratschläge ermutigten mich in der Ausarbeitung der Arbeit und das Korrekturlesen war eine große Hilfe. Vielen Dank auch an meine Tutorin Nicole Braune, für ihre gestalterische Mithilfe.

Abschließend ein großer Dank an meine Eltern und Anja für ihre liebevollen Unterstützungen.

---

## Kurzdarstellung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung von mechanisch vorgespannten, doppellagigen Membranmodulen im Bezug auf ihre Anwendung, Gestaltung, Konstruktion sowie bauphysikalische und statische Gesichtspunkte. Innerhalb eines modularen Rahmensystems wird die Membran als standardisiertes und seriengefertigtes, mechanisch vorgespanntes Bauelement entwickelt und in der Anwendung als zweite Fassade vorgestellt.

Fassadenstudien entwickeln das mögliche Gestaltungsrepertoire dieser Konstruktionen und zeigen einen Weg auf, wie der mechanisch vorgespannte Membranbau aus dem starren Korsett seiner klassischen Großform in eine Bauform aktueller Formensprache und zeitgenössischer Architektur überführt werden kann.

Bauphysikalische Studien und Energiebilanzen untersuchen die Leistungsfähigkeit der membranumhüllten Gebäudesysteme. Mit Hilfe dynamischer Strömungssimulationen können Aussagen zu Luftbewegung und Temperaturverteilung innerhalb der aufgespannten Zwischenzone getroffen werden. Die zusammenfassende Auflistung der Energieeinsparpotenziale ermöglicht eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Systems.

Unter dem Aspekt wirtschaftlicher Serienfertigung werden entsprechende Konstruktionen des Membranrahmenmoduls vorgestellt, verglichen und optimiert. Sie werden mit zwei Membranen doppellagig bespannt, wobei zwischen drei Formen der Membranbespannung unterschieden wird und Studien die günstigste Form der Bespannung und ihrer Rahmenkonstruktion herausarbeiten.

Abschließend untersucht die Arbeit vertiefend das Tragverhalten der drei unterschiedlich bespannten Membranmodule. Neben Analyse, Beschreibung und Optimierung des Tragverhaltens werden umfangreiche Studien aufgestellt, die vergleichende Aussagen zur Dimensionierung der Rahmenkonstruktion, Beanspruchung und Auslastung der Membran, Optimierung der Vorspannung und möglichen Rahmenmaßen liefern. In direktem Vergleich werden die membranbespannten Rahmenmodule mit einer ETFE Folienbespannung verglichen.

---

## Abstract

The main topic of this work is the application, design, construction, static and thermal behaviour of mechanically pre-stressed membrane modules. Developed to become a standardized and pre-fabricated element, the membrane module will be examined in the paper as the basic element of second skin facade systems.

By examining the architectural language and the repertoire of their expression, studies on the design of membrane-enveloped buildings have come to the fore in the development of facade systems. As a modular system, they have the capacity to expel the mechanically pre-stressed membrane architecture from their narrow conundrum of their dominant and anticlastic large-scale shape. Through researching and exploring the possibilities of membrane structures is to simultaneously research how membrane structures can impact in architectural design.

The studies on the thermal behaviour of mechanically pre-stressed membrane modules likewise similarly examine the energetic efficiency of this building system. Numerical simulations are employed to deliver results of airflow and -temperature of the buffer zone and, energy balances report and compare the saving rates of differently constructed building envelopes.

A detailed construction of the membrane frame is developed. Under consideration is the possibility for series production; resulting in the construction being optimized and in where three different membrane forms can be taken into account. As a result this research will bring forward and present the most economical and efficient construction of mechanically pre-stressed membrane modules.

Besides a static analyse, description and optimization of this hybrid load bearing behaviour of frame and membrane, extensive tables report on frame dimensioning, stress distribution of the membrane as well as optimized pre-tension-values and feasible frame sizes. Finally the membrane construction is directly compared with ETFE-foil constructions.

---

## Inhaltsverzeichnis

Einleitung .....	8
Einordnung .....	8
Vorgehensweise .....	10
Begriffsdefinitionen .....	11
<b>1. Der Membranbau .....</b>	<b>14</b>
1.1. Tragverhalten vorgespannter Membrane .....	14
1.1.1. mechanische Vorspannung .....	15
1.1.2. weitere Vorspannungsarten .....	16
1.2. Formen vorgespannter Membrane .....	17
1.2.1. Formfindung .....	17
1.2.2. Morphologie der Formen .....	21
1.2.3. Formenaddition .....	24
1.2.4. Misch- und Sonderformen .....	25
1.2.5. Einfach gekrümmte und nicht gekrümmte Flächen .....	26
1.3. Bemessung, Sicherheitskonzept .....	27
1.3.1. Einwirkungen .....	27
1.3.2. Tragfähigkeit .....	28
1.3.3. Gebrauchstauglichkeit .....	30
1.4. Konstruktion .....	32
1.4.1. Zuschnitt .....	32
1.4.2. Kompensation .....	32
1.4.3. Membranstöße, Fügetechnik .....	33
1.4.4. Membranränder .....	35
1.4.5. Membranecken .....	36
1.4.6. Grat- und Kehlen .....	36
1.4.7. Zugverankerungen .....	37
1.5. Material .....	38
1.5.1. Gewebe .....	38
1.5.2. Folien .....	41
1.5.3. Vergleich .....	43
1.6. Bauphysikalische Eigenschaften .....	46
1.6.1. Wärme- und Feuchteschutz .....	46
1.6.2. Brandschutz .....	51
1.6.3. Schallschutz und Akustik .....	53
1.6.4. Luftdichtheit .....	55
1.6.5. Lichttechnische Eigenschaften .....	55
<b>2. Membranhüllte Gebäudesysteme .....</b>	<b>64</b>
2.1. Das Gebäudekonzept .....	64
2.1.1. Wärmeschutzkonzept .....	66
2.1.2. Raumklima .....	67
2.1.3. Belichtung, Belüftung, Überhitzung .....	67

2.2.	Energieeinsparpotenziale .....	69
2.2.1	Gebäudedefinition .....	69
2.2.2.	Parameterstudien .....	72
2.2.3.	Gebäudevarianten .....	78
2.2.4.	Jahrestemperaturbilanz der Zwischenzone .....	79
2.2.5.	Energiebilanzierung nach EnEV04 .....	80
2.3.	Strömungssimulation .....	83
2.3.1.	Modellbeschreibung .....	83
2.3.2.	Variationen .....	86
3.	<b>Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranrahmenmodule</b> .....	93
3.1.	Form, Nutzung und Gestaltung .....	93
3.1.1.	Das Gebäude .....	93
3.1.2.	Die Zwischenzone .....	93
3.1.3.	Die Gebäudehülle .....	94
3.1.4.	Referenzen .....	96
3.1.5.	Das Membranmodul .....	100
3.1.6.	Sattelfläche .....	110
3.1.7.	Buckelfläche .....	118
3.1.8.	Bogenfläche .....	124
3.2.	Konstruktion und Optimierung .....	130
3.2.1.	Vorspannsysteme .....	131
3.2.2.	Druckschrauben-Rahmenmodule .....	134
3.2.3.	Zugschrauben-Rahmenmodule .....	140
3.2.4.	Zugschrauben-Balkenmodule .....	148
3.2.5.	Konstruktionen zur Auslenkung der Membran .....	151
3.2.6.	Vergleich der Vorspannsysteme .....	153
3.2.7.	Optimierung und Weiterentwicklung der Zugschrauben-Rahmenmodule .....	155
3.3.	Untersuchung des Tragverhaltens .....	162
3.3.1.	Tragverhalten am vereinfachten Rahmen .....	162
3.3.2.	Tragverhalten am Spannbalkenrahmen .....	171
3.3.3.	Einwirkungen .....	179
3.3.4.	Lastfälle und Lagerbedingungen .....	183
3.3.5.	Tragverhalten sattelförmig bespannter Rahmenmodule ....	185
3.3.6.	Tragverhalten buckelförmig bespannter Rahmenmodule ..	203
3.3.7.	Tragverhalten bogenförmig bespannter Rahmenmodule ...	210
3.3.8.	Vergleich des Tragverhaltens der Rahmenmodule .....	217
4.	<b>Auswertung der Ergebnisse, Ausblick</b> .....	224
	Literaturverzeichnis .....	230
	Abbildungsverzeichnis .....	234
	Anhang A: EnEV Berechnungsbeispiel .....	235
	Anhang B: Programmcode Strömungssimulation .....	238

## Einleitung

Bei der gestalterischen und funktionalen Entwicklung des Membranbaus ist es zu einer Stagnation der mechanisch vorgespannten Formen gekommen. Noch immer gleichen die Formen aktueller Membrankonstruktionen denen, die Frei Otto [Wil85] in den 50er Jahren entwickelte und die sich durch großmaßstäbliche, antiklastisch gekrümmte, ikonenhafte Strukturen auszeichnen [Ott54]. Die nachstehenden Abbildungen zeigen, dass der mechanisch vorgespannte Membranbau auch weiterhin hauptsächlich Dekoration und architektonisches Accessoire geblieben ist und mit Anwendungsmöglichkeiten, die nicht viel mehr als Sonnen- oder Regenschutz bieten, ein Nischenprodukt in der Architektur darstellen. Sein scheinbar unausweichlicher Formenkanon ist mittlerweile visuell überstrapaziert und gehört eher in die 60er und 70er Jahre des letzten Jahrhunderts, als dass sie eine zeitgenössische Bauform darstellen (Abb1a,b).

Der pneumatisch gestützte Membranbau erfuhr dagegen in seiner Entwicklung von Traglufthallen hin zu kleinmaßstäblichen Kissenkonstruktionen formale und konstruktive Innovationen (Abb.2a,b). Sie führten dazu, dass luftgestützte Folienkissen vermehrt Anwendung in der aktuellen Architektur finden. So ist beispielsweise die Allianz Arena in München [Tem04] von den Architekten Herzog de Meuron Ausdruck dieser neuen Formensprache.



Abb. 1 a,b  
Gegenüberstellungen  
von Membrankonstruk-  
tionen der 60er Jahre  
(links) und entspre-  
chenden Konstrukti-  
onen aus dem  
21. Jahrhundert  
(rechts). [Ten07]



Abb. 2 a,b  
Gegenüberstellungen  
einer frühen pneuma-  
tischen Traglufthalle  
(ohne Traggerüst) mit  
der Luftkissenfassade  
der Allianz Arena (mit  
Traggerüst) [Cov07]

Die vorliegende Arbeit versucht durch die Entwicklung einer neuen Anwendung den mechanisch vorgespannten Membranbau in einer kleinmaßstäblicheren Gestaltung seiner Struktur und Konstruktion zu einer Bauform der aktuellen, zeitgenössischen Architektur zu überführen und seine neue Formensprache, energetische Sinnhaftigkeit und konstruktive Detaillierung aufzuzeigen.

## Einordnung

Die Form mechanisch vorgespannter Membrane wird durch den Prozess der Formfindung erzeugt: Dies kann näherungsweise in physikalischen Modellen umgesetzt, oder über rechnerische Methoden erzielt werden. In beiden Fällen stellt das Ergebnis dieses Prozesses eine Form dar, in der die inneren und äußeren Kräfte durch Verformung des Materials in einen Spannungsausgleich überführt werden. Form und Tragverhalten sind also unabdingbar voneinander abhängig.

Formfindungsmethoden des Membranbaus bestechen gegenüber traditionellen, heuristischen Formgebungsansätzen durch eine konsequente und transparente Systematik. Ihre Rationalität unterstreicht die Einordnung dieser Formenwelt und Bauweise in den auf Technik und Statik bezogenen Konstruktivismus des 20. Jahrhunderts und kann in enger Verwandtschaft zu den filigranen räumlichen Tragwerken Konrad Wachsmanns, den Stahl- und Stahlbetonkonstruktionen Pier Luigi Nervis, den Kuppeln Richard Buckminster Fullers oder den Schalenbauten Félix Candelas gesehen werden [Pah99].

Mit ihren gekrümmten, räumlichen Formen entwickeln und erforschen Frei Otto und das Stuttgarter Institut für leichte Flächentragwerke eine Formenwelt, die sich deutlich von der rechtwinkligen Strenge des Funktionalismus der frühen Moderne abhebt und können als Impulsgeber der heutigen „Blob-Architektur“ verstanden werden. Diese neoexpressionistische Stilrichtung zielt auf Formfindungen ab, die sich mit „Momentaufnahmen aus Evolutionen und Prozessen“ beschäftigt [Tra04]. Sie können wie im Membranbau von physikalischen und mathematischen Gesetzen abgeleitet sein, Regeln der Selbstbildung oder selbstdefinierten logischen Verknüpfungen folgen. Greg Lynn ist einer der Vertreter und Entwickler dieser neuen Formfindung, die beispielsweise in der presbyterianischen Kirche in New York (Doug Garofalo), oder dem Konferenzraum der Niederlassung der „Nationale Niederlande“ in Budapest (Erik van Egeraat) mündete. Auch im Wasserstoff-Bubble von BMW auf der IAA 1999 von Bernhard Franken wurde mit der Momentaufnahme zweier verschmelzender Wassertropfen diese Idee baulich umgesetzt.

Zwei Jahre später wurde ein membranbespannter BMW Pavillon auf der IAA präsentiert. Der Pavillon ist eines der wenigen Projekte, indem die Membranform nicht mehr offensichtlich der Formfindung nach Ausgleichsberechnungen folgt, sondern sich den Prinzipien eines freien, assoziativen Formfindungsverfahrens unterwirft. Auch wenn statisch gesehen und formal im Detail betrachtet die eingesetzte Membran zugbelastet und antiklastisch gekrümmt ist und somit alle Voraussetzungen des klassischen Membranbaus erfüllt, entspricht ihre Großform einer frei assoziierten Formensprache. Es ist eine Sprache der prozesshaften Strukturen und amorphen „Blob“-Formen, bei der die antiklastische Membranform sekundär im Hintergrund bleibt.

Abb. 3 a,b  
Blob Architektur:  
BMW-Pavillon auf der  
a) IAA 1999  
b) IAA 2001  
[Cov07]



Die architektonisch und gestalterische Weiterentwicklung des Membranbaus findet also nicht mehr innerhalb des klassischen Formenkanons der einfachen Membranbauten statt, sondern muss im Kontext der aktuellen Formenwelt geschehen. Nur so kann der Membranbau eine zeitgenössische Bauweise darstellen. Erst jenseits der Formenwelt Frei Ottos wird der Membranbau wieder eine Chance haben mit seiner Leichtigkeit, Transluzenz und dynamische Form Akzente in der Architektur zu setzen.

---

Aus diesen Überlegungen heraus versucht die Arbeit einen Beitrag zu leisten und eine Anwendung innerhalb dieser „neuen“ Formensprache zu entwickeln. Dafür wird ein membranbespanntes Bauelement vorgestellt, das Membranrahmenmodul. Es kann im Werk in Serie produziert werden und somit, im Gegensatz zu den Einzelanfertigungen früherer Membranbauten, zu einem kostengünstigen Produkt werden. Nur so kann die Anwendung des Membranbaus gesteigert werden. Die steigende Nachfrage wird eine Weiterentwicklung des Produkts, Materials und Alternativenwendungen nach sich ziehen und dem Membranbau in seiner Entwicklung vorantreiben. Dabei könnten Forschungen von computergesteuerten Membran und Folienwerkstoffen eine Kommunikation mittels Farbe und Schrift auf ihren Oberflächen ermöglichen. Auch sind adaptierbare, sich verändernde Oberflächen denkbare Innovationen, die beispielsweise auf klimatische Veränderungen reagieren [Bru05]. Die Möglichkeiten sind vielfältig und zukunftsweisend.

Als stark technisch ausgerichtete Bauweise darf bei ihrer Weiterentwicklung der gestalterische Aspekt jedoch nicht weiter vernachlässigt werden. Es ist notwendig, den mechanisch vorgespannten Membranbau, in der Auseinandersetzung mit der sich wandelnden Architektur, wieder als eine zeitgenössische Bauform zu etablieren.

### **Vorgehensweise**

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf den mechanisch vorgespannten Membranbau. Pneumatisch vorgespannte Konstruktionen werden nur am Rande, aus Gründen der Vollständigkeit oder des direkten Vergleichs angeführt.

Die Arbeit ist in drei Hauptteile gegliedert. Sie beginnt mit einem zusammenfassenden Überblick über den Membranbau und zeigt den Stand der Technik und Gestaltungsmöglichkeiten des Membranbaus auf.

Auf dieses Wissen aufbauend, entwickelt das zweite Kapitel das Konzept der membranumhüllten Gebäude als innovative Anwendungsmöglichkeit des mechanisch vorgespannten Membranbaus. Die gestalterischen und bauphysikalischen Qualitäten werden untersucht und vorgestellt.

Der dritte Teil der Arbeit fokussiert anschließend auf das einzelne Element der membranen Gebäudehülle, dem mechanisch vorgespannten, doppelagigen Rahmenmodul. Die Konstruktion wird vorgestellt und optimiert und unter statischen Gesichtspunkten untersucht und ausgewertet. Die Tabellen zur Vordimensionierung der Rahmenmodule können dabei als Entwurfshilfen verstanden werden, die Auskunft über notwendige Vorspannung und Querschnittsgrößen der Rahmenmodule geben.

Die Arbeit nähert sich also von anfänglich allgemeinen Informationen über die Beschreibung eines Anwendungskonzeptes detaillierten Untersuchungen des Rahmenmoduls und konzentriert sich auf die Beschreibung, Untersuchung und Optimierung seiner Form, Konstruktion, seinem Trag- und bauphysikalischen Verhalten.

## Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden Definitionen der Begriffe vorangestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit Verwendung finden und für ein besseres Verständnis eine einführende Erklärung benötigen:

### Membranbau

Im Vordergrund dieser Arbeit steht die Anwendung von mechanisch vorgespannten Membrankonstruktionen. Alternativ zur Membran wird die ETFE-Folie als mechanisch vorgespanntes Material untersucht und mit Membrankonstruktionen verglichen werden. Technisch zeigen diese beiden Materialien ein völlig unterschiedliches Verhalten auf. Begrifflich soll mit „Membranbau“ als Oberbegriff auch der „Folienbau“ mit eingeschlossen werden.

### Rahmenmodul, Membranrahmenmodul, Membranmodul

ist die Bezeichnung einer biegesteifen Rahmenkonstruktion, die beidseitig mit Membran oder Folie bespannt wird und so ein modulares Fassaden oder Dachelement bildet.

### Stiel und Riegel

Als Rahmenstiel werden die beiden vertikalen Seiten eines stehenden Rahmenmoduls bezeichnet, die durch die horizontal liegenden oberen und unteren Rahmenriegel miteinander verbunden werden. Die Verbindung der Rahmenecken ist biegesteif auszuführen.

### Spannbalken, Spannschraube

Der Spannbalken ist das verschiebbliche Element in der Rahmenkonstruktion und ermöglicht das Spannen von Membran oder Folie. Über Spannschrauben ist der Balken an Stiel, bzw. Riegel befestigt und kann durch Aufdrehen der Schrauben in seiner Lage verändert werden.

### Sattelflächen, Buckelflächen, Grat- und Kehlflächen, Bogenflächen

Diese Bezeichnungen erklären Form und Vorspannungsart der Membran, bzw. Folie. Rahmenmodule können in unterschiedlicher Weise bespannt werden. Die dafür eingesetzten Konstruktionen führen zu einer der vier oben genannten Grundformen. Variationen, Misch- und Sonderformen sind möglich.

### Membranhülle, Zwischenzone

Als Membranhülle wird die folien- bzw. membranbespannte Fassaden- und Dachkonstruktion bezeichnet, die einem innen liegenden Gebäude vorgeschaltet ist. Zwischen innen liegendem Gebäude und außen liegender Membranhülle entsteht ein Raum, der als Zwischenzone bezeichnet wird.



1. Der Membranbau
  - 1.1. Tragverhalten vorgespannter Membrane
    - 1.1.1. mechanische Vorspannung
    - 1.1.2. weitere Vorspannungsarten
  - 1.2. Formen vorgespannter Membrane
    - 1.2.1. Formfindung
    - 1.2.2. Morphologie der Formen
    - 1.2.3. Formenaddition
    - 1.2.4. Misch- und Sonderformen
    - 1.2.5. Einfach gekrümmte und nicht gekrümmte Flächen
  - 1.3. Bemessung, Sicherheitskonzept
    - 1.3.1. Einwirkungen
    - 1.3.2. Tragfähigkeit
    - 1.3.3. Gebrauchstauglichkeit
  - 1.4. Konstruktion
    - 1.4.1. Zuschnitt
    - 1.4.2. Kompensation
    - 1.4.3. Membranstöße, Fügetechnik
    - 1.4.4. Membranränder
    - 1.4.5. Membranecken
    - 1.4.6. Grat- und Kehlen
    - 1.4.7. Zugverankerungen
  - 1.5. Material
    - 1.5.1. Gewebe
    - 1.5.2. Folien
    - 1.5.3. Vergleich
  - 1.6. Bauphysikalische Eigenschaften
    - 1.6.1. Wärme- und Feuchteschutz
    - 1.6.2. Brandschutz
    - 1.6.3. Schallschutz und Akustik
    - 1.6.4. Luftdichtheit
    - 1.6.5. Lichttechnische Eigenschaften

## 1. Der Membranbau

Als Einführung in die Thematik des Membranbaus beleuchtet dieses Kapitel grundsätzliche Eigenschaften dieser Bauweise, des Materials, seiner Form, Anwendung und Funktionsweise.

Membrantragwerke gehören zur Kategorie des Leichtbaus. Es handelt sich um „leichte“ Konstruktionen, das heißt Konstruktionen mit geringen Eigenlasten. Das Verhältnis Eigengewicht zu Nutzlast kann als Parameter für ihre Leichtigkeit gesehen werden [Sch00]. Darüber hinaus ist der Membranbau Teil der Konstruktionsfamilie der Flächentragwerke. Ihre Konstruktionselemente sind Flächen, deren Materialstärke im Verhältnis zu den übrigen Dimensionen sehr klein ist. Dadurch, dass lediglich Normalkräfte in der Fläche auftreten, kann diese Konstruktion dünn ausgebildet werden. Zu den Flächentragwerken gehören Platten, ebene, flächige Tragwerke, die normal zu ihrer Ebene belastet werden, Platten, die tangential zu ihrer Ebene belastet werden, Schalen, die man als gekrümmte Platten beschreiben kann, das Faltwerk sowie die Membran. Membranbauten können also zusammenfassend als leichte Flächentragwerke bezeichnet werden, ihre detaillierte Einordnung wird in [Hoe99] ausgeführt.

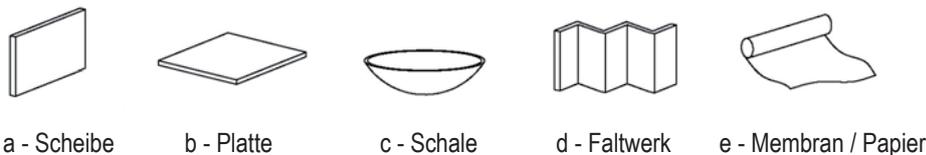


Abb. 4 a-e  
Flächentragwerke

### 1.1. Tragverhalten vorgespannter Membrane

Die Membran ist hier symbolisch als aufgerolltes Material dargestellt<sup>1</sup>. Sie ist ein biegeweiches Gewebe, das nur zur Aufnahme von Zug- und Schubkräften fähig ist. Durch eine doppelt gekrümmte Geometrie sowie dem Einbringen einer Vorspannung kann das Material so ertüchtigt werden, dass es Lasten nur durch Zugkraft ableiten kann.<sup>2</sup> Die ausschließlich in der Fläche wirkenden Kräfte erzeugen eine gleichmäßige Beanspruchung über die Dicke der Membran, wodurch eine optimale Ausnutzung des Materials erzielt wird. Aus der Biegeweichheit des Membranmaterials resultiert die charakteristische Abhängigkeit ihrer Formen von den, auf sie einwirkenden Kräften: Es gilt das Prinzip „Form Follows Force“ [Hol05]. Zum besseren Verständnis der Membranformen ist es deshalb notwendig zuerst ihr Tragverhalten zu untersuchen.

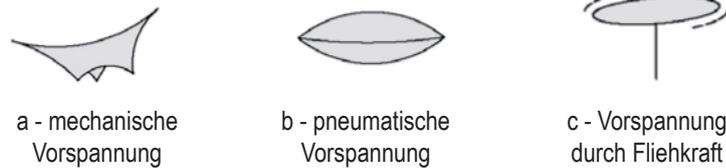
Grundsätzlich kann die Vorspannung zur Ertüchtigung der Membran auf drei verschiedenen Arten in das Material eingebracht werden. Erstens: die mechanisch eingebrachte Vorspannung, sie führt zu einer gegensinnigen Krümmung des Materials, der antiklastischen Form. Definiert wird die antiklastische Form durch ihre zwei Hauptkrümmungen in der Fläche, deren Richtung entgegengesetzt ist. Zweitens: die pneumatisch gestützte Form, die durch Druckdifferenz zu synklastischen Flächen führt. Hier weisen beide Hauptkrümmungen gleichsinnige Richtungen auf.

<sup>1</sup> Auch das Seiltragwerk ist ein Flächentragwerk, wird hier aber nicht explizit aufgeführt, sondern als Sonderfall des Membrantragwerks betrachtet.

<sup>2</sup> In geringem Maße besitzen Membrane auch Schubsteifigkeit, sie wird in der Bemessung von Membrankonstruktionen häufig vernachlässigt

Und drittens: die durch Fliehkräfte stabilisierten Formen. Sie bilden ebene Flächen, finden in der Baupraxis aber so gut wie keine Anwendung.

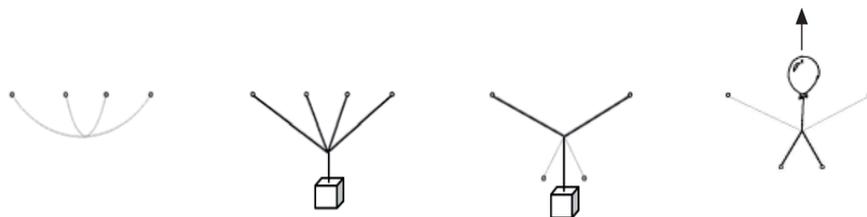
Abb. 5 a-c  
Grundtypen der  
Vorspannung



### 1.1.1. Mechanische Vorspannung

Die Membran ist ein Gewebe aus vielen gewobenen Fäden. Insofern ist ihr Tragprinzip vereinfacht durch ein Seilnetz abzubilden. Vereinfacht man das Seilnetz, bleibt das Modell zweier sich kreuzender Seile übrig. An ihm ist das Tragverhalten der Membrane recht einfach zu erläutern. Als biegeweiches Material hängt das Seil unter Eigenlast schlaff nach unten (Abb.6a) und kann nur nach unten gerichtete Kräfte aufnehmen. (Abb.6b) Stellt man jedoch eins der hängenden Seile auf den Kopf, wird das hängende Seil von einem stehenden Seil gekreuzt. (Abb.6c) So kann es nun Kräfte aus unterschiedlichsten Richtungen aufnehmen, auch die nach oben wirkende Kraft (Abb.6d). Das durchhängende Seil wird als Tragseil bezeichnet, es „trägt“ die nach unten wirkende Last ab. Das auf den Kopf gestellte Seil ist das Spannseil. Bei Lastwirkung nach oben wird das stehende Seil zum Lastabtrag verwendet und das hängende Seil zum Spannseil. Durch diese gegenseinnige Seilanordnung erhält das Seiltragwerk eine geometrische Steifigkeit. Nach demselben Prinzip wird die Membran ertüchtigt: Sie erhält Steifigkeit durch eine antiklastische Form.

Abb. 6 a-d  
Tragverhalten der  
Membran



Problematisch an dem angeführten Beispiel ist, dass das unbelastete Seil (schwach grau dargestellt) nicht mehr durch Zugkräfte gespannt ist und schlaff ausfällt. (Abb.6c,d) In der Membrankonstruktion würde ein solcher Ausfall von Trag- oder Spannrichtung durch Faltenbildung in der Membran sichtbar werden. Die Gefahr des Flatterns, Reißens und des Versagens des Tragwerks wären die Folgen. Zur Vermeidung des Ausfalls wird eine Vorspannung in das Tragwerk gebracht, die eine ständige Zugbeanspruchung von Trag- und Spannseil, auch unter Belastung, gewährleistet. Das Prinzip der Vorspannung ist folgendermaßen zu erklären: Im Beispiel des Seilknotens wird durch das Verkürzen des Seils eine Vorspannung in das hängende Seil eingebracht (Abb.7a), dargestellt durch die beiden Pfeile. Der Schnittpunkt beider Seile weicht nach oben aus. Die gleiche Vorspannung wird in das Spannseil eingebracht (Abb.7b) und stabilisiert den Schnittpunkt wieder in mittiger Lage.

Abb. 7 a,b  
Prinzip  
Vorspannung



Eine äußere Last kann jetzt aus jeder Richtung angreifen. In dem dargestellten Beispiel (Abb.8a) führt die nach unten gerichtete Last zu einer Spannungszunahme im Tragseil, da die Last vom Tragseil nach oben abgehängt wird. Der Schnittpunkt weicht unter der Last nach unten aus und entlastet dabei das Spannseil. Die resultierenden Seilkräfte sind in Abb.8b dargestellt. Die Vorspannung im Spannseil wird reduziert, aber nicht völlig abgebaut. Eine geringe Vorspannung bleibt im Spannseil erhalten und garantiert die notwendige Zugbelastung des Seils, die sein Erschlaffen und Ausfallen verhindert.

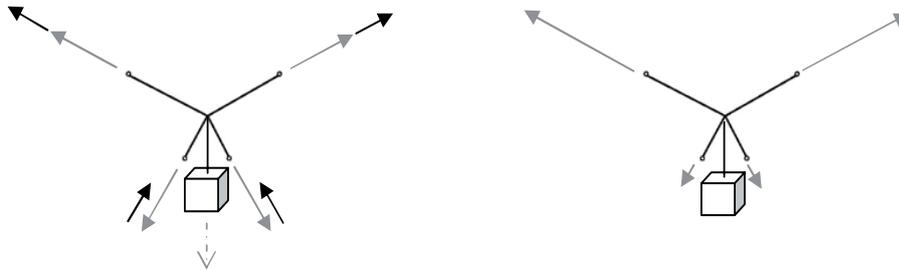
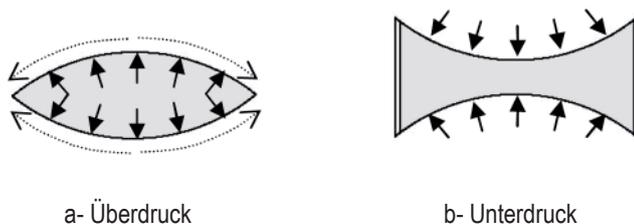


Abb. 8 c, d  
Prinzip  
Vorspannung

Bei der Bemessung von Membranbauten ist es also wichtig die Vorspannung so zu wählen, dass äußere Lasten die eingebrachte Vorspannung nicht vollständig abbauen. Das System sollte also grundsätzlich durch Zugkräfte beansprucht werden, da der Vorspannungsausfall zum Erschlaffen der Membran führt. Die Form mechanisch vorgespannter Membranbauten ist, wie gezeigt, notwendigerweise antiklastisch, dies führt zu dem eingeschränkten Formenkanon dieser Bauweise.

### 1.1.2. weitere Vorspannungsarten

Pneumatisch vorgespannte Membranen, bzw. Folien stellen die zweite Gruppe der zugbeanspruchten, räumlich gekrümmten und vorgespannten Konstruktionen in der Gruppe der leichten Flächentragwerke dar. Sie sind nicht Bestandteil der Untersuchungen dieser Arbeit, sollen aber der Vollständigkeit halber einführend beschrieben werden. Im Unterschied zu den mechanisch vorgespannten Membranen und Seiltragwerken werden die Pneu durch Druckunterschiede stabilisiert. Kissenförmig umschließt die Membran ein Volumen, das mit höherem Druck als die umgebende Luft gefüllt ist. Dieser Druck spannt als Flächenlast die Konstruktion blasenförmig nach außen und spannt die Membran vor (Abb.9a). Gefüllt ist der Pneu in den meisten Fällen mit Luft. Aber auch andere Gase oder feste Schüttungen sind Möglichkeiten einen Kisseninnendruck aufzubauen. Das Prinzip kann auch umgedreht werden. Es gibt pneumatische Konstruktionen bei denen Unterdruck im Kissen die Membran konkav nach innen zieht. Sie wird durch die von Außen drückende Luft stabilisiert. (Abb.9b)



a- Überdruck

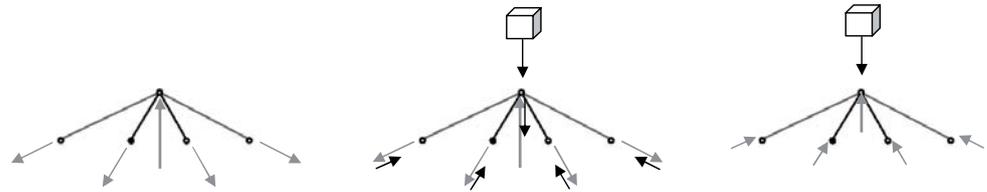
b- Unterdruck

Abb. 9 a,b  
pneumatische  
Vorspannungen

Durch Innendruck gestützte Konstruktionen resultieren in kuppelförmigen Kissen, deren Fläche eine gleichsinnige, synklastische Krümmung aufweisen. Den auf das Kissen wirkenden äußeren Lasten steht der Kisseninnendruck entgegen. Je höher

die äußere Einwirkung, desto stärker wird die Vorspannung abgebaut. Auch hier ist darauf zu achten, dass die angreifenden Kräfte den Innendruck nicht komplett abbauen, dies würde das Kissen in sich zusammenfallen lassen.

Abb. 10 a-c  
prinzipieller Lastabtrag  
pneumatischer  
Konstruktionen



### Vorspannung durch Fliehkraft

Der Vollständigkeit halber sei noch auf die dritte Möglichkeit hingewiesen Vorspannung in zugbeanspruchte Membrankonstruktionen einzubringen. Durch Fliehkkräfte können Rotationsmembranen stabilisiert werden. Eine scheibenförmig geschnittene Membran, die um ihre Symmetrieachse in Drehung versetzt wird, faltet sich zu einer weitgehend schirmartigen Fläche auf. Je nach Drehzahl und Zuschnitt ergibt sich eine wellige oder glatte Form (Abb.5c). In der Praxis haben diese Konstruktionen aber bisher kaum Anwendung gefunden. Experimentelle Versuchsbauten sind unter anderem von der Projektgruppe Sullooln gebaut worden [Bau06].

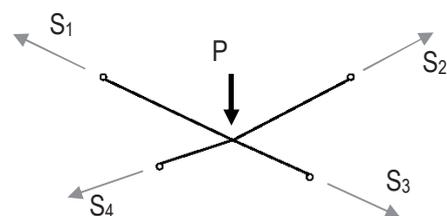
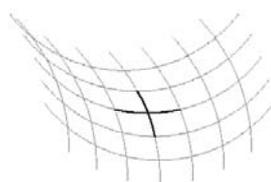
## 1.2. Formen vorgespannter Membrane

Membrankonstruktionen sind Formen, die das Abbild des Kraftflusses des Tragwerks darstellen. Wie beschrieben, ist die doppelte Krümmung der Membran in Verbindung mit dem Einbringen einer Vorspannung zur Ertüchtigung des Tragwerks unerlässlich, da die Membrankonstruktionen verformungsaktiv sind und ihre Form sich nach der Einwirkung der Lasten richtet. Diese Formenbestimmung durch Kräfte charakterisiert den Membranbau. Sie kann mittels physikalischer Gesetzmäßigkeiten erklärt und simuliert werden, ein Prozess der als Formfindung bezeichnet wird.

### 1.2.1. Formfindung

Die Formen mechanisch vorgespannter Membrane unterliegen dem Bestreben analog zum Seil, Kräften so auszuweichen, dass sie über Zugkräfte aufgenommen und abgeleitet werden können. Das vorherige Kapitel ging ausführlich darauf ein. Genauso kann das Verhalten der Membranstruktur beschrieben werden: Durch Formänderung weicht die Membran Kräften so aus, dass die Kräfte abgeleitet werden können und sich ein Kräftegleichgewicht in der Membran einstellt. Die Gleichung  $P = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$  beschreibt also exemplarisch an einem Knotenpunkt der Membranfläche das Grundverhalten des Membrantragwerks, äußere und innere Kräfte auszugleichen (Gleichgewicht).

Abb. 11 a,b  
Prinzip des Kräfte-  
gleichgewichts  
[Grü00]



Die Formfindung der Membran ist demnach ein Prozess, der sich mehr oder weniger selber einstellt und ergibt. Hierin unterscheidet sich das Entwerfen von Membranstrukturen ganz wesentlich vom herkömmlichen Entwurf. Der Entwerfer kann lediglich über das Festlegen von Randparametern auf die Form und Gestalt der Membran Einfluss nehmen. Randparameter sind dabei, wie in Abb. 12 dargestellt, das Festlegen von Auflagerpunkten der Membran, die Ausbildung des Membranrandes, Ausrichtung von Kett- und Schussrichtung sowie die Justierung der Vorspannung. Innerhalb dieser Randgeometrie bildet sich eine Fläche, in der alle inneren und äußeren Kräfte ausgeglichen sind. Diese Fläche wird als Ausgleichsfläche bezeichnet.



Abb. 12 a-e  
Möglichkeiten der  
Formgebung im  
Formfindungsprozess

### Minimalfläche

Bekannt sind Ausgleichsformen zum Beispiel in Form der Seifenhaut. Innerhalb einer Randgeometrie bilden sie eine Minimalfläche. Sie ist eine Sonderform der Ausgleichsfläche. Minimalflächen sind Flächen, die eine geschlossene Raumkurve mit dem kleinsten Flächeninhalt ausfüllen. Die mathematische Lösung des Problems ist seit Jahrhunderten Thema der Wissenschaft [Ble00] und wird durch zwei Eigenschaften definiert: Die erste mathematische Definition verlangt, dass die so genannte mittlere Hauptkrümmung in jedem Punkt einer Minimalfläche Null beträgt. Das heißt, dass die beiden Hauptkrümmungen gleich groß sind und dabei rechtwinklig zueinander verlaufen müssen. Aus diesem Grund sind alle nicht ebenen Minimalflächen antiklastisch gekrümmte Flächen. Zweitens, als Folge der Forderung nach gleichen Krümmungen, hat die Minimalfläche an jedem Punkt der Membran, in jeder Richtung, die gleiche Spannung. Daraus resultiert ein homogenes Vorspannungsverhältnis von 1:1 in allen Punkten der Fläche. Umfassende Studien erarbeitete Frei Otto [Ott62].

Minimalflächen sind ein künstliches Produkt und kommen im Membranbau nicht vor. Das Eigengewicht der Membran zum Beispiel, widerspricht den Grundsätzen der Spannungshomogenität: Die Belastung der Membrane durch das Materialeigengewicht addiert sich auf, je mehr man sich dem Auflager nähert und führt zu höheren Membranspannungen als in Feldmitte. Spannungshomogenität kann in materialisierten Ausgleichsformen also nicht vorliegen. Trotzdem aber propagiert Frei Otto ein Nahekommen dieser Form. „Wenn Zelte von der Minimalfläche stark abweichen, fällt dies selbst ungeübten Augen auf. Sie sehen nicht nur schlecht aus, sie sind zumeist auch schlecht konstruiert“ [Ott95, S.59]. Formen, die der Minimalfläche nahe kommen nutzten das Material besser aus und seien zudem ästhetisch und elegant. „Insgesamt jedoch sind Membranen mit homogener Spannung nicht notwendigerweise als höherwertig anzusehen als solche mit unterschiedlicher Oberflächenspannung“ [Koc04, S.105] Im Gegenteil: Unterschiedliche Materialkennwerte von Kett- und Schussrichtung, Eigengewicht und veränderliche Lasten bedingen sogar ihre Heterogenität.

### Experimentelle Formfindung

Weder die Minimalfläche, noch die Ausgleichsflächen lassen sich auf herkömmliche Weise entwerfen. „Wegen der untrennbaren Interaktion von Form und Kräften kann

ein solches Netz nicht mit Bleistift auf dem Papier entworfen werden, wie es bei konventionellen Konstruktionen der Fall ist. Diese Tatsache machen den Entwurf leichter Flächentragwerke zu einer Aufgabe, die dem Architekten und Ingenieur zunächst neu und fremd ist.“ [Tei96, S.120] Statt mit Bleistift und Papier muss auf experimentelle und/oder computerunterstütztem Wege die Form modelliert werden.

Zur experimentellen Modellierung von mechanisch vorgespannten Membranen eignet sich der auf Stützen oder Bögen aufgezugene Perlonstrumpf. Die große Elastizität des Gewebes simuliert recht genau das Verhalten einer Ausgleichsfläche und der Stoff, begrenzt in einer Randgeometrie, wird automatisch eine Form annehmen, die der Ausgleichsform nahe kommt. Der Stoff reagiert auf Veränderungen von Auflagern oder das Auslenkungen in seiner Fläche und gibt äußerer Belastung durch Formänderung nach. Nutzen und Notwendigkeit experimenteller Formfindung mittels physikalischer Modelle werden in [Grü00] aufgezeigt. Zu Beginn des modernen Membranbaus wurden experimentelle Modelle auch als Grundlage für statische Berechnungen, Bemessungen und Zuschnitte genutzt.

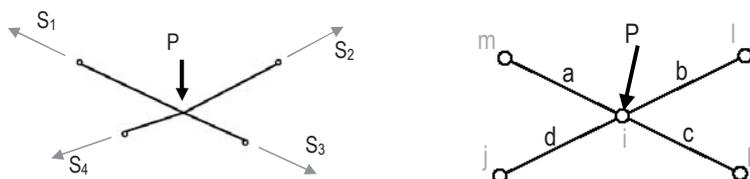
### Numerische Formfindung

Die numerische, meist computerunterstützte Formfindung berechnet über eine Ausgleichsrechnung die Flächenform. Eine effektive und schnelle Berechnung ermöglicht die Kraft-Dichte-Methode, die nachfolgend beschrieben werden soll. Sie bildet die Membran als Maschennetz ab und gewährleistet einen Kräftegleichgewicht an jedem Maschenknotenpunkt. Je feiner die Maschen, desto genauer die Abbildung der Membran und desto größer das Gleichungssystem, das nur noch mit Hilfe des Computers zu lösen ist.

### Kraft-Dichte-Methode

Die Kraft-Dichte-Methode wird als Lösungsalgorithmus in der Software EASY genutzt [Tec07]. Die Ingenieure Linkwitz, Schek und Gründig entwickelten die Kraft-Dichte-Methode [Tei96] [Grü76]. Über die Methode der kleinsten Quadrate, wie sie in der Geodäsie und Physik zur Auswertung von Messungen eingesetzt wird, fanden sie einen Zugang zu einem Lösungsweg, der das nichtlineare Problem in ein lineares und damit einfach zu lösendes Problem zerlegt.

Abb. 13 a,b  
Gleichgewicht  
am Knoten  
[Grü00]



Nach Diskretisierung des vorgespannten Seilnetzes, als ein in den Knotenpunkten beweglich gelagertes Stabwerk aus Zugstäben, (Abb.13) müssen drei grundlegende Beziehungen berücksichtigt werden:

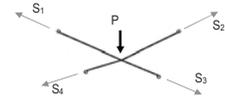
1. Jeder einzelne Stab verlängert sich im gespannten Zustand des Netzes unter dem Einfluss der wirkenden Zugkraft. Der Unterschied zwischen ungedehnter und gedehnter Länge des Stabes ergibt sich aus dem Materialgesetz. Dieses beschreibt die elastische Verlängerung als Funktion der ungedehnten Länge, des Querschnitts, der Steifigkeit des Materials und der Zugkraft.
2. Im gespannten Zustand des Netzes hat jeder elastisch verlängerte Stab genau

die Länge des Abstands der Knotenpunkte, zwischen denen er eingespannt ist. Dies beschreibt die Verträglichkeit zwischen den elastisch verlängerten Stäben und der Geometrie des Seilnetzes im Spannungszustand.

3. Zwischen den in jedem Knoten angreifenden vier Zugkräften und dem Eigengewicht muss Gleichgewicht herrschen. Diese Beziehungen lassen sich in einem stark nichtlinearen Gleichungssystem zusammenfassen:

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 &\Rightarrow s_a \cos(a,x) + s_b \cos(b,x) + s_c \cos(c,x) + s_d \cos(d,x) = p_x \\ \sum F_y = 0 &\Rightarrow s_a \cos(a,y) + s_b \cos(b,y) + s_c \cos(c,y) + s_d \cos(d,y) = p_y \\ \sum F_z = 0 &\Rightarrow s_a \cos(a,z) + s_b \cos(b,z) + s_c \cos(c,z) + s_d \cos(d,z) = p_z \end{aligned}$$

1.1.



Hierbei sind  $s_a, s_b, s_c, s_d$  die Seilkräfte und  $\cos(a,x)$  die projizierte Seillänge auf der x-Achse. Diese normalisierte Länge kann auch durch  $(x_m - x_i)/a$  ausgedrückt werden. Dies führt zu folgender Veränderung in den drei Gleichungen:

$$\begin{aligned} \frac{s_a}{a}(x_m - x_i) + \frac{s_b}{b}(x_j - x_i) + \frac{s_c}{c}(x_k - x_i) + \frac{s_d}{d}(x_l - x_i) &= p_x \\ \frac{s_a}{a}(x_m - y_i) + \frac{s_b}{b}(x_j - y_i) + \frac{s_c}{c}(x_k - y_i) + \frac{s_d}{d}(x_l - y_i) &= p_y \\ \frac{s_a}{a}(x_m - z_i) + \frac{s_b}{b}(x_j - z_i) + \frac{s_c}{c}(x_k - z_i) + \frac{s_d}{d}(x_l - z_i) &= p_z \end{aligned} \quad 1.2.$$

Die Lösung kann nach Vorgabe von Anfangswerten mit Hilfe numerischer Methoden oder aber mit der Kraft-Dichte-Methode gefunden werden. Durch Definition einer neuen Variablen, der Kraftdichte  $q_a$ , die als Quotient aus dem Betrag der Kraft und der Wirkungslänge der Kraft (= Raumabstand der zwei benachbarten Knotenpunkte) definiert ist ( $s_a / a$ ), wird das nichtlineare Gleichungssystem linear und ist somit bei entsprechenden Vorgaben lösbar. Dieses lineare Gleichungssystem beschreibt nach wie vor das Gleichgewicht in den einzelnen Knotenpunkten. Die Nichtlinearitäten sind gewissermaßen in dem neu geschaffenen Begriff „Kraftdichte“ verschwunden. Zur Berechnung der Gleichgewichtsform wird nur noch die Vorgabe der Kraftdichte  $q_a$  benötigt.

$$\begin{aligned} q_a(x_m - x_i) + q_b(x_j - x_i) + q_c(x_k - x_i) + q_d(x_l - x_i) &= p_x \\ q_a(y_m - y_i) + q_b(y_j - y_i) + q_c(y_k - y_i) + q_d(y_l - y_i) &= p_y \\ q_a(z_m - z_i) + q_b(z_j - z_i) + q_c(z_k - z_i) + q_d(z_l - z_i) &= p_z \end{aligned} \quad 1.3.$$

Im Wesentlichen genügt es, den Kraftdichten im Innern eines gleichmaschigen Netzes für jeden Stab den gleichen Wert (Vorspannkraft geteilt durch die Länge) zu geben und im unregelmäßigen Randbereich unterschiedliche Werte anzusetzen, die sich für den Rand aus gewünschter Randseilkraft geteilt durch die Länge errechnet.

Die Gleichgewichtsfigur wird ohne Iteration in einem einzigen Rechenschritt berechnet. Im verwendeten Gleichungssystem treten keine Größen auf, die Materialeigenschaften beschreiben. Die Gleichungen beschreiben vielmehr den zu einer vorgegebenen Menge von Kraftdichten und damit zu einer entsprechenden Menge von Kräften gehörenden physikalischen und geometrischen Gleichgewichtszustand. Dieser kann und muss erst in einem zweiten Schritt mit einem beliebigen Material versehen werden. Dadurch erreicht man in der analytischen Formfindung eine völlige Trennung der Formfindung, der Materialisierung und des Lastverhaltens. Im

Unterschied zu anderen Methoden werden keine Näherungskordinaten benötigt. Die Gleichgewichtsfigur wird in exakt den angegebenen Abspannpunkten ermittelt. Neben der Kraft-Dichte-Methode gibt es noch weitere Rechenverfahren, um eine Ausgleichsform analytisch zu bestimmen. Vor allem im englischsprachigen Raum ist die Dynamic-Relaxation Methode verbreitet. [Bar94] Darüber hinaus kann das Problem auch durch die Finite-Elemente Methode gelöst werden [Höl99].

Software

Für diese Arbeit konnte ich die Software EASY der Firma Technet GmbH verwenden [Tec07]. Die Software umfaßt Programmteile zur Formfindung, zur statischen Analyse von Membran und Unterkonstruktion sowie zur Abwicklung gekrümmter Flächen.

1.2.2. Morphologie der Formen

Die Ausführungen zum Thema Formfindung machen deutlich, dass Ausgleichsflächen physikalischen Bedingungen unterliegen, die ihre Form prägen und bedingen. Trotz dieser Bindung an doppelte Krümmung und einem Ausgleich der Kräfte ist die Variation der Formen unendlich groß. Um diese Vielzahl an Formen zu strukturieren und zu ordnen ist eine Klassifizierung in Abhängigkeit ihrer Randbedingungen sinnvoll. Dabei haben vor allem zwei Faktoren maßgeblichen Einfluss auf die Gestalt der Membranform: Die Stützung der Fläche sowie die des Randes.

Abb. 14 a,b  
Kriterien zur Formendifferenzierung



Tabelle 1.1.  
Formenkanon  
der mechanisch  
vorgespannten  
Konstruktionen

		Stützung der Fläche				
		keine	punktuell	linear		flächig
				biegeweich	biegesteif	
Stützung des Randes	biegeweich	 1	 2	 3	 4	 5
	biegesteif	 I	 II	 III	 IV	 V
Typ		Sattelfläche	Trichter-Buckelfläche	Grat- und Kehlfläche	Bogenfläche	Pneu

Nach Ausbildung dieser beiden Randparameter können vier mechanisch vorgespannte Grundformen unterschieden werden, die Sattel- und Buckelform, Grat- und Kehlform, Bogenform sowie die pneumatische Form.

Über die Differenzierung nach Flächenstützung hinaus, unterscheidet Tabelle 1.1 die fünf Grundtypen noch nach Art ihrer Randstützung. Sie kann biegeweich in Form von Randseilen ausgebildet (1-5) oder durch biegesteife Randelemente umfaßt sein (I-V). In [Höl99] wird diese Typologie noch erweitert. Mir erscheint die Reduzierung der Formen auf ihre fünf Grundtypen als ausreichend, sie hat sich zudem als Klassifizierung in der Literatur durchgesetzt [For04, Kapitel 3] [Mol03].

### Sattelfläche



Abb. 15 a-c  
Sattelfläche vor dem  
Bundeskanzleramt,  
Berlin

Die Sattelfläche ist wohl die expressivste Form im Kanon der vorgespannten Membrane. Zwischen Festpunkten, die als Hoch- und Tiefpunkt alternieren, wird die Membranfläche gespannt. Das Vierpunktsegel, auch Hyparfläche genannt, ist dabei die einfachste Form, aus der sich weitere vielfältige Formen ableiten. Ihr Rand kann biegeweich ausgeführt werden oder linear eingespannt sein, ihre Fläche ist nicht gestützt. Konstruktiv bedarf diese Form einer Unterkonstruktion, die zur Aufnahme der Vertikal-, vor allem aber auch Horizontalkräfte imstande ist. Häufig werden hierfür abgespannte Stützen verwendet. Je flacher die Membran gespannt ist, desto größer ist die Horizontalkraft. Ein Beispiel hierfür stellt die sehr flach gespannte Membrankonstruktion vor dem Bundeskanzleramt dar (Abb.15c).

### Buckel- bzw. Trichterfläche



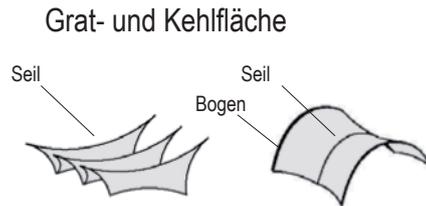
Abb. 16 a-c  
Buckelfläche,  
Waldbühne, Berlin

Buckel-, bzw. Trichterflächen entstehen durch das lokale Auslenken der Membranfläche. Ähnlich der Sattelfläche kann der Rand biegesteif oder –weich ausgeführt werden. Die Ausbildung von Hoch- und Tiefpunkten im Randbereich der Membranfläche ist nicht erforderlich, da durch die Auslenkung in der Fläche die nötige zweite Krümmung entsteht. So können die Randaufleger der Membrane auf einer Ebene liegen. Der Begriff Buckelfläche entstand aus den Versuchen Frei Ottos, eine unkomplizierte und günstige Variante des Krümmens einer Membranfläche zu finden.

Es gibt verschiedene Wege die Auslenkung der Fläche zu erzielen: Einfache Buckel wölben die Membrane. Sie müssen eine ausreichende Krümmung und Fläche aufweisen, über die das Material gezogen werden kann. Unter der Fläche angeordnete Stützen haben das Problem, dass ihre Auslenkung zu punktuell ist und somit hohe Spannungsspitzen das Material zerstören würden. Deshalb geschieht die Kopplung von Membrane und Stütze über einen Ring, der die Punktlast in eine linienartige Ringlast aufteilt und somit das Membranmaterial flächiger belastet sowie schont. Die Stütze unter der Membran schränkt die Nutzung der überdachten Fläche stark ein. Abhilfe schafft eine Luftstütze. Hier wird ein Druckstab zur Auslenkung der Membranfläche verwendet, der aber nicht bis auf den Boden geführt wird, sondern in der Luft nach Außen abgespannt wird.<sup>3</sup> Trichterflächen sind Formen die das Prinzip der punktförmigen Stützung umkehren. Die Anwendung von Tiefpunkten in der Fläche erfordert besondere Aufmerksamkeit in der Planung der Entwässerung.

<sup>3</sup> Beispiel: Amt für Abfallwirtschaft, München (siehe Abb.21)

Abb. 17 a-c  
Innenhofüberdachung  
Rathaus Wien. [Cov07]



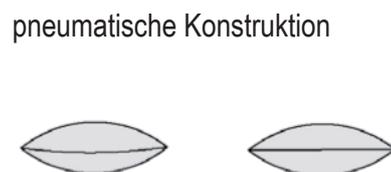
Grat- und Kehlflächen bieten sich an, um flächige Ebenen zu erzeugen, die durch Raffung sogar beweglich ausgeführt werden können. Zu Beachten ist, dass ausreichendes Gefälle für Entwässerung vorhanden ist und Schneeansammlung in den Kehlen das Tragwerk nicht zerstört. Ein Durchschlagen der Fläche bei Windsog muss durch entsprechende Vorspannung verhindert werden [Koc04, S.77].

Abb. 18 a-c  
Überdachung Baernau  
[Koc07]



Die Geometrie des Primärtragelementes Bogen gibt bereits eine der notwendigen Krümmungen der Membran vor. Dabei ist der Bogen ein überwiegend druckbeanspruchtes Tragelement, das die Membranfläche auslenkt und steht damit als lineare Umkehrung des biegeweichen Seils den Grat- und Kehlflächen gegenüber. Nach unten abgespannt, wie in Abb18 a und b dargestellt, kann die Membran den Bogen stabilisieren und aussteifen. Sie stellt also eine wirksame Sicherung des Bogens gegen Knicken dar, sodass der Bogen schlank ausgeführt werden kann.

Abb. 19 a-c  
Pneumatische  
Konstruktion,  
Traglufthalle [Koc07]



Mit luftgestützte Strukturen lassen sich vielfältige Tragwerke entwickeln. Sie sind extrem weit spannbar und sehr effizient. Dabei ist zwischen Groß- und Kleinstrukturen zu unterscheiden. Ist das ganze Gebäude einem Überdruck ausgesetzt, kann damit die gesamte Konstruktion stabilisiert werden. Diese Formen bezeichnet man als Traglufthalle. Sie ermöglicht stützenfreie Grundrisse und eine Reduzierung des Tragwerks auf ein Minimum. Dagegen benötigen kleinteilige Kissenkonstruktionen ein Traggerüst zur Befestigung und Lastabtrag.

Pneumatische Konstruktionen erfordern eine permanente Überdruck-Ventilation, um den nötigen Innendruck zu erzeugen und müssen entsprechend luftdicht ausgeführt sein. Ihre optimale Form ist die einer Halbkugel.

Neuste Anwendungen experimentieren mit mehrlagigen, steuerbaren Kissenkonstruktionen. Interessante Entwicklungen gibt es zudem in der Ausbildung von pneumatischen Tragelementen. Sie können als Stütze oder Balken ausgeführt werden. [Her77] [Koc04].

### 1.2.3. Formenaddition

Die aufgeführten fünf Formen stellen die prototypischen Grundformen des Membranbaus dar. Durch die Addition dieser Typen kann ihr Formenkanon erheblich erweitert werden. Nachstehend Beispiele für die Verbindung mehrerer gleichartiger Membranflächen:



Abb. 20 a-c  
Addition von Sattel-  
flächen, Sail Island,  
Saudi Arabien [Ten07]



Abb. 21 a-c  
Addition von Buckel-  
und Trichterflächen,  
Amt für Abfallwirt-  
schaft, München



Abb. 22 a-c  
Addition von Grat- und  
Kehlfächen, Sony  
Center, Berlin



Abb. 23 a-c  
Addition von Bogen-  
flächen, Nordische  
Botschaften, Berlin



Abb. 24 a-c  
Addition von pneuma-  
tischen Konstruktionen  
auf einem Traggerüst,  
Garden Eden Project,  
Cornwall [Gri07]

### Prinzipien der Formenaddition

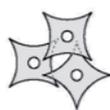


Abb. 25 a,b  
Überlappen von Mem-  
branflächen, Beispiel  
IHK Schirme Würzburg  
[Cov07]

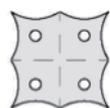


Abb. 26 a,b  
Koppeln von Membra-  
nflächen, Beispiel But-  
lins Skyline Pavilions,  
Büro Happold [Ten07]

Abb. 27 a,b  
Absetzen der Membranflächen, Beispiel Umbrella - Saudi arabia, SL-Rasch GmbH [Ten07]

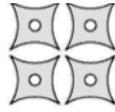
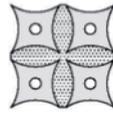


Abb. 28 a,b  
Füllen des Zwischenraumes von Membranflächen, Beispiel Shopping Center, Saudi Arabien [Cov07]



### 1.2.4. Misch- und Sonderformen

Abb. 29 a,b  
Buckelfläche mit mehreren Hochpunkten, The Machine Tent [Ten07]



Abb. 30 a,b  
Addition von Bögen, Kurzschließen der Horizontalkräfte, Jerez de la Frontera [Ten07]



Abb. 31 a-c  
Sattelflächen an Bogenkonstruktion, Il Grand Bigo [Ten07]



Abb. 32 a,b  
Sattelflächen eben gespannt, Pavillon, Athen zur Olympiade [Cov07]



Abb. 33 a-c  
biegeweiche und biegesteife Membrandächer, Überdachung Stadtplatz Magdeburg [Ten07]



Nachstehend eine schematische Zusammenfassung möglicher Formenaddition:

		Addition			
		überlappen	koppeln	absetzen	füllen
Membran- Membran	biegeweich				
	biegesteif				
Membran – Baukörper	biegeweich				
	biegesteif				

Tabelle 1.2.  
Addition von  
Membranflächen

### 1.2.5. Einfach gekrümmte und nicht gekrümmte Flächen

Die Anwendungen des Membranbaus sind nicht ausschließlich auf die Formenwelt der doppelt gekrümmten Konstruktionen beschränkt. Wie auch in dieser Arbeit fokussiert sich das Interesse von Autor, Leser und Entwerfer auf den doppelt gekrümmten, den modernen Membranbau und die Literatur könnte den Eindruck entstehen lassen, als gäbe es nur diese Konstruktionsweise in der Architektur. Vielmehr ist das Gegenteil der Fall. Den wohl größten Anteil an Membrankonstruktionen nehmen Membranformen ein, die nur einfache, oder gar keine Krümmung aufweisen. Sie lassen sich viel leichter herstellen, sind flexibel und kostengünstig. Tabelle 1.3. fasst ihre Formen schematisch zusammen.

In der Dissertation von Hoppe wird ein geschichtlicher Überblick über die Entwicklung der Membrankonstruktionen gegeben, angefangen von einfachen nicht gekrümmten Membranen als Zeltplane, oder Gewand bis hin zu den vorgespannten doppelt gekrümmten Membranen die den modernen Membranbau kennzeichnen [Hop98].

		Krümmung		
		eben	einfach	doppelt
Vorspannung	schlaff			
	vorgespannt			



Tabelle 1.3.  
einfach gekrümmte und  
nicht gekrümmte Mem-  
branflächen

Abb. 34  
Curtain House,  
Shigeru Ban  
www.vestaldesign.com

### 1.3. Bemessung, Sicherheitskonzept

Die Bemessung eines Membrantragwerks soll ihre Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sicherstellen. Hierfür werden unter Berücksichtigung verschiedenster Einwirkungen auf das Tragwerk, aber auch unter Berücksichtigung des Materials und seiner Qualität Sicherheitsfaktoren aufgestellt. Die Sicherheitsfaktoren reduzieren die Beanspruchbarkeit des Materials so, dass trotz Einwirkungen und Langzeitnutzung, die zur Schwächung des Materials führen, Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Tragwerks garantiert bleiben. Es gibt noch kein einheitliches Sicherheitskonzept für Membrantragwerke. Vielmehr gibt es verschiedene, landeseigene Normen, die sich teilweise sehr unterscheiden. Der Artikel „Structural Design Basis And Safety Criteria“ von Barnes, Forster und Dencher vergleicht diese Normen. [For06, Kapitel 6] In Deutschland findet die DIN 4134 Anwendung [DIN4134]. Sie und die ergänzenden Beiträge von Minte und Meffert sollen hier vorgestellt werden [Min81] [Mef78].

#### 1.3.1. Einwirkungen

Als biegeweiches Material reagiert die Membran sehr empfindlich auf äußere Einwirkungen. Für eine statische Bemessung spielen folgende Einwirkungen eine Rolle: Eigengewicht, Vorspannung, Windkräfte, Schnee- und Eislasten.

##### Ständige Einwirkungen

Das Eigengewicht der Membran liegt zwischen 0,2 und 1,5 kg/m<sup>2</sup> Membranfläche und ist damit sehr gering. Zu addieren sind Eigenlasten der Randseile und Verbindungselemente der Membrankonstruktion. Die Vorspannung hat entscheidenden Einfluss auf die Steifigkeit des Tragwerks. Sie sollte so hoch gewählt sein, dass trotz äußerer Belastung der Membran durch Wind und Schnee die Vorspannung nicht ausfällt. Zu niedrig vorgespannte Systeme neigen unter diesen Einwirkungen zu größeren Verformungen, Faltenbildung und Flattererscheinungen. Andererseits ist das Einbringen der Vorspannung aufwändig und zu hohe Vorspannungen führen zu kurzer Lebensdauer des Materials. Der ideale Vorspannungsgrad liegt also zwischen diesen gegensätzlichen Ansprüchen und soll als Daumenwert zwischen 2,5% und 6% der durchschnittlichen Reißfestigkeit liegen [For06, S.193]. Differenziert werden kann die Vorspannung in Kett- und Schussrichtung innerhalb eines Verhältnisses bis 1:3. Unterschiedliche Vorspannung von Kett- und Schussrichtung führt zu einer Änderung von Form und Tragverhalten [Ott62].

Nachstehend tabellarisch zusammengefasste Richtwerte von Vorspannungsgraden für Membrankonstruktionen.

Tabelle 1.4.  
Richtwerte für  
Vorspannung

Materialtyp	2,5% der Kurzzeitfestigkeit Kette/Schuss [kN/m]	6% der Kurzzeitfestigkeit Kette/Schuss [kN/m]
PVC-PE		
I	0,9/ 0,9	3,6/ 3,6
II	1,3/ 1,2	5,3/ 4,7
III	1,7/ 1,5	6,9/ 6,1
IV	2,2/ 1,9	8,9/ 7,7
V	2,9/ 2,5	11,8/ 10,0
PTFE beschichtetes Glasfasergewebe	2,5% der Kurzzeitfestigkeit Kette/Schuss [kN/m]	6% der Kurzzeitfestigkeit Kette/Schuss [kN/m]
I	1,8/ 1,5	4,2/ 3,6
II	2,5/ 2,2	6,0/ 5,3
III	3,5/ 3,0	8,3/ 7,1
IV	3,7/ 3,3	8,8/ 7,8

## Veränderliche Einwirkungen

Das Ansetzen von Windlasten ist ein sehr komplexes Thema. Durch die gekrümmte Form der Membran können genaue Angaben nur durch Versuche im Windkanal generiert werden oder durch CFD-Simulationen am Computer<sup>4</sup>. Für eine überschlägige Lastannahme können die Werte der DIN 1055-4 entnommen werden [DIN1055]. In Abhängigkeit der Membrangeometrie kann auf Ansätze analog zu geschlossenen Sattel-, Pult- oder Flachdächern bzw. frei stehenden Dächern zurückgegriffen werden. Die Windlasten sind senkrecht auf die Membranoberfläche anzusetzen. Eine Berechnungshilfe liefern Dencher und Balz mit ihrer Angabe der  $c_p$  Werte auf prototypische Membranformen, wie der Hyparfläche oder der Trichterfläche. Sie zonieren die Fläche in Abhängigkeit zur Windrichtung und liefern für die jeweiligen Segmente die zugehörigen Druckbeiwerte [For04, Kapitel 7].

Teil 5 der DIN 1055 enthält Angaben zu Schnee- und Eislasten [DIN1055]. Je nach Membranflächengeometrie sind Ansätze für geschlossene Sattel-, Pult- oder Flachdächer bzw. frei stehende Dächer auf die Membrangeometrie zu übertragen. Die Schneelast wird senkrecht auf die Grundrissfläche angesetzt.

Temperatureinwirkungen können dagegen vernachlässigt werden. Erhöhte Temperaturen führen zwar zu einer Ausdehnung des Materials und damit einhergehend zu einem Abbau der Vorspannung, ihre Auswirkung ist aber gering. Das Problem wird auf der Materialseite durch einen Sicherheitsfaktor berücksichtigt, der untenstehend näher beschrieben wird. Ebenso können Erdbebenlasten vernachlässigt werden. Die hohe Verformbarkeit der Membranbauten, ihr weiches Tragwerk und ihre Leichtigkeit machen es zu einer Bauweise, die sich im hohen Maße für erdbebengefährdete Gebiete eignet. [Bac02]

### 1.3.2. Tragfähigkeit

Der Bemessungswert des Widerstandes für das Gewebe und die Verbindungen (Schweißnähte, Klemmplatten, etc.)  $f_d$  gibt die Spannung an, die bei der Bemessung maximal zugelassen wird. Sie lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$f_d = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m \cdot A_{mod}} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3}$$

$f_d$	Bemessungswert des Widerstandes, zulässige Spannung
$f_{t,k}$	Zugfestigkeit, definiert als 5%-Fraktilwert der Kurzzeitzugfestigkeit bei 23 °C Prüftemperatur für das Gewebe bzw. die Verbindung (Schweißnaht, Klemmverbindung, etc.)
$\gamma_m$	materialspezifischer Teilsicherheitsbeiwert
$A_{mod}$	Modifikationsfaktor, Produkt der maßgebenden Abminderungsfaktoren
$A_0$	Abminderungsfaktor infolge biaxialer Beanspruchung
$A_1$	Abminderungsfaktor infolge Langzeiteinwirkung
$A_2$	Abminderungsfaktor infolge Umgebungseinfluss (Klima, Umwelt)
$A_3$	Abminderungsfaktor infolge Temperatur

1.4.  
Quellen:  
[Min81], [Mef78],  
[Zel05], [For06]

### Kurzzeitzugfestigkeit

Die Kurzzeitzugfestigkeiten und Abminderungsfaktoren sind für die Kett- und Schussrichtung durch Versuche zu ermitteln. Hierfür werden einachsige Zugversuche unternommen, um an 10cm breiten Membranstreifen, bei 23° Raumtemperatur

<sup>4</sup> CFD = Computational Fluid Dynamics, Software zur Simulationen der numerischen Strömungsmechanik

einen 5%-Fraktilwert zu ermitteln.<sup>5</sup> Er ist Ausgangswert für die Bestimmung des Widerstandes  $f_d$ . Die DIN 53 353 und ISO 1421 regeln diese Testversuche. Die Bestimmung erfolgt sowohl für Gewebe als auch für Verbindungen wie beispielsweise Schweißnähte oder Klemmverbindungen. Nach Minte, kann der  $f_{t,k}$  Wert alternativ auch folgendermaßen angenommen werden: für die Schweißnaht des Gewebes gilt:  $f_{t,k} = 0,802 \cdot f_{mean}$ , wobei  $f_{mean}$  der Mittelwert der Kurzzeitzugfestigkeit ist.

Tabelle 1.5.  
Ergebnisprotokoll  
Zugfestigkeit  
a) Gewebe, b)  
Schweißnaht [Zel05]

Pr 570: Taconic Solus 1300							Pr 570: Taconic Solus 1300						
Monoax M03/007-02 to 25							Monoax M03/007-02 to 25						
Strips, nominal width 10cm, 23°C							Strips, nominal width 10cm, 23°C						
Testing Standard: DIN 53 353							Testing Standard: DIN 53 353						
Evaluation Standard: DIN ISO 13 934-1							Evaluation Standard: DIN ISO 13 934-1						
5-%-Fractile: DIBt							5-%-Fractile: DIBt						
Name of sample	width	Force Warp	Force Weft	Strength Warp	Strength weft	Kind of Rupture *)	Name of sample	width	Force Warp	Force Weft	Strength Warp	Strength weft	Kind of Rupture *)
	cm	N	N	kN/m	kN/m			cm	N	N	kN/m	kN/m	
M03/007-03	9.0	15'382		170.91		C	M03/007-1K	9.8	15481		157.97		F
M03/007-04	9.1	14'301		157.16		F	M03/007-2K	9.9	14472		146.18		F
M03/007-06	9.1	15'332		168.48		C	M03/007-3K	10	15477		154.77		F
M03/007-07	9.1	14'336		157.53		F	M03/007-4K	9.9	14709		148.58		F
M03/007-09	8.9	14'036		157.71		F	M03/007-5K	9.9	16157		163.20		F
M03/007-21	9.7		11'819		121.85	F	M03/007-1S	9.9		11546		116.62	F
M03/007-22	9.6		10'501		109.38	C	M03/007-2S	9.8		11345		115.76	F
M03/007-23	9.6		10'912		113.67	F	M03/007-3S	9.7		11698		120.59	C
M03/007-24	9.5		11'522		121.28	F	M03/007-4S	9.9		11365		114.79	F
M03/007-25	9.7		11'303		116.52	F	M03/007-5S	9.9		10947		110.57	F
Mean Value				162.36	116.54		Mean Value				154.14	115.67	
Standard Deviation				6	5		Standard Deviation				6	3	
Related Standard Deviation [%]				3.72	4.03		Related Standard Deviation [%]				4.01	2.79	
5-%-Fractile				146.58	104.16		5-%-Fractile				139.09	108.18	

### Teilsicherheitsbeiwert

$\gamma_m$  ist der materialspezifische Teilsicherheitsbeiwert. Er kann für das Gewebe mit  $\gamma_m = 1,4$  und für Verbindungen mit  $\gamma_m = 1,5$  angesetzt werden. [Min81]

### Abminderungsfaktoren

Die Abminderungsfaktoren reduzieren die zulässige Spannung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Aspekte:

Der Abminderungsfaktor  $A_0$  erfasst den festigkeitsmindernden Einfluss infolge tatsächlich biaxialer Beanspruchung. Für das Gewebe gilt  $A_0 = 1,0 - 1,2$  bzw. für Verbindungen ist  $A_0$  mit 1,2 angegeben.

Der Abminderungsfaktor  $A_1$  berücksichtigt Langzeiteinwirkungen, wie Kriechen und die Relaxation des Materials.  $A_1$  kann für das Gewebe mit 1,6 - 1,7 für Verbindungen mit 1,5 - 3,4 angenommen werden. Faktoren wie UV-Strahlung, Bewitterung, Chemikalien, also Umgebungseinflüsse werden durch den Faktor  $A_2$  beschrieben. Dabei wird die Kurzzeitzugfestigkeit des Materials geteilt durch ihre Festigkeit nach dem Einfluss von Bewitterung, das Ergebnis zwischen 1,1 und 1,2 stellt den Faktor  $A_2$  dar. Erhöhte Umgebungstemperatur führt zu einem Festigkeitsabfall des Materials. Dieses Verhalten wird im Faktor  $A_3$  ausgedrückt. Er ist der Quotient der Kurzzeitzugfestigkeit bei 23°C zur Kurzzeitzugfestigkeit bei 70°C und liegt für das Gewebe zwischen 1,1 und 1,25 bzw. für Verbindungen zwischen 1,4 und 1,95.

### Bemessungswert

Die Reißfestigkeit geteilt durch das Produkt der Abminderungsfaktoren und Sicherheitsbeiwerte führt zum Bemessungswert  $f_d$ . Eine pauschale Produktbildung aller Abminderungsfaktoren würde aber zu einer unwirtschaftlichen Bemessung führen. Die Anwendung der Abminderungsfaktoren ergibt sich in Abhängigkeit der Einwirkungsdauer und des Temperaturniveaus. Der Nachweis ist in Kett-

<sup>5</sup> Messwert, den nur 5% der Ergebnisse unterschreiten

---

und Schussrichtung für das Gewebe und die Verbindungen (Bemessungswert in Klammern angegeben) zu führen.

Ständige Lasten	$A_{\text{res}} = \gamma_f \cdot \gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = 4,9 - 6,4$	(6,7 – 9,5)	1.5.
Max. Windlast	$A_{\text{res}} = \gamma_f \cdot \gamma_m \cdot A_0 \cdot A_2 = 2,9 - 3,2$	(3,5)	
Max. Schneelast	$A_{\text{res}} = \gamma_f \cdot \gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 = 4,4 - 5,1$	(4,9)	

Die Zusammenfassung berücksichtigt, dass zum Beispiel beim Lastfall Wind die Abminderung von erhöhten Temperaturen vernachlässigt werden kann, der Wind kühlt die Membran, beide Lastfälle werden nicht zusammenfallen. Lastfälle, die zu untersuchen sind, werden in Abhängigkeit ihrer Einwirkungsdauer und ihres Temperaturniveaus angegeben. [Ack02]

Langzeitlasten (> eine Woche)

- Erhöhtes Temperaturniveau: „Eigengewicht + Vorspannung“
- Niedriges Temperaturniveau: „Eigengewicht + Vorspannung + Schnee“

Kurzzeitlasten (< eine Woche)

- Erhöhtes Temperaturniveau: „Eigengewicht + Vsp. + Winddruck“  
„Eigengewicht + Vsp. + Windsog“
- Niedriges Temperaturniveau: „Eigengewicht + Vsp. + Schnee“  
„Eigengew. + Vsp. + Winddruck + Schnee“

### 1.3.3. Gebrauchstauglichkeit

Während der Nachweis der Tragfähigkeit geführt wird, um den Einsturz und das Versagen des Membrantragwerks auszuschließen, betrifft die Prüfung der Gebrauchstauglichkeit Aspekte des Bauwerks, die das optische Erscheinungsbild betreffen oder das Wohlbefinden von Personen anbelangt. Bei Membranbauten sind vor allem Flattererscheinungen, Faltenbildung und Wassersackbildung zu vermeiden. Nachfolgend werden diese Aspekte ausführlicher angesprochen.

Verformungen

Membrantragwerke neigen aufgrund ihrer Biegeweichheit zu großen Verformungen. Im Gegensatz zu anderen biegesteifen Materialien stellt die Verformung an sich kein Problem dar, solange sie von den Detailkonstruktionen zugelassen wird. Unterbunden werden muss die Berührung der verformten Membran mit festen Einrichtungen, um eine Beschädigung der Membran zu verhindern.

Wasser- und Schneesackbildung

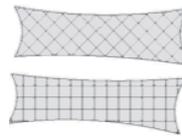
Schwach gekrümmte Teilflächen in der Membranfläche bergen die Gefahr, dass sich unter Last Senken bilden, in denen sich Wasser bzw. Schnee sammelt. Diese lokale Beanspruchung kann das Material zum Reißen bringen und das Tragwerk beschädigen und zerstören. Insofern ist die Topographie der unter entsprechender Last verformten Membranfläche auf diese Schwachstellen hin zu überprüfen. Höhenschichtlinien helfen die Membranfläche zu untersuchen.

Faltenbildung

Sobald das biegeweiche Membranmaterial nicht mehr durch Zugkraft beansprucht wird, erschlafft das Material und wirft Falten. Faltenbildung sollte nicht nur aus

ästhetischen Gründen vermieden werden. Durch die fehlende Steifigkeit kann das Material zum Flattern angeregt werden und so mechanisch geschädigt und zerstört werden. Das Material kann zerreißen und durch Weiterreißen auch andere Gewebeteile zerstören. Das Tragwerk sollte idealerweise so stark vorgespannt werden, dass es zu keinem Ausfall der Vorspannung kommt. Wie bereits erwähnt liegt der Richtwert für geeignete Vorspannung bei 2,5% - 6% der Kurzzeitzugfestigkeit des Gewebes. Dies ist ein Kompromisswert, der billigend in Kauf nimmt, dass es bei Membrantragwerken unter kurzzeitigen Höchstbelastungen auch zum Ausfall einer Spannrichtung kommen kann. Das DIBT<sup>6</sup> gibt für die Vorspannung an, dass sie bei einer Einwirkung von 70% der Schneelast und 50% der Windlast nicht aufgezehrt werden sollte [Dib87]. Diese Forderung ist vor allem von schwach gekrümmten Membranflächen kaum einzuhalten. Zellinger schlägt als Kriterium für die Faltenbildung die häufige Einwirkungskombination nach Eurocode vor: Dabei wird entweder 50% der Windlast oder 20% der Schneelast angesetzt. [Zel05] [EC1] Neben ausreichender Vorspannung sind aber auch andere Faktoren zur Vermeidung des Faltenwurfes entscheidend. Das Aneinanderfügen zweier Membranstreifen mit unterschiedlicher Gewebeausrichtung führt aufgrund von unterschiedlichem Dehnverhalten zwangsläufig zu Faltenbildung und sollte vermieden werden.

Abb. 35  
Faltenbildung durch unterschiedliche Lage der Kett- und Schussrichtung



#### Flattererscheinungen

Je flacher die Membran gespannt und je niedriger ihre Vorspannung, umso stärker wird die Membran zum Flattern unter Windbelastung neigen. Als Maß dieser Flattererscheinung kann die geometrische Steifigkeit  $K_G$  im Vorspannzustand herangezogen werden.

Ein optimales Tragverhalten wird bei einer geometrischen Steifigkeit erreicht, die größer als  $0,3 \text{ kN/m}^2$  ist. Ist  $K_G$  kleiner als  $0,2 \text{ kN/m}^2$  liegt eine verformungsanfällige Form vor. Werte unter  $0,15 \text{ kN/m}^2$  weisen auf Flattererscheinungen der Membrankonstruktionen unter Windbelastung hin.

$$1.6. \quad K_G \approx \frac{v_K}{r_K} + \frac{v_S}{r_S}$$

$K_G$	geometrische Steifigkeit [ $\text{kN/m}^2$ ]
$v_K$	Vorspannung in Kettrichtung [ $\text{kN/m}$ ]
$v_S$	Vorspannung in Schussrichtung [ $\text{kN/m}$ ]
$r_K$	Krümmungsradius in Kettrichtung [ $\text{m}$ ]
$r_S$	Krümmungsradius in Schussrichtung [ $\text{m}$ ]

#### Weiterreißfestigkeit

Der Nachweis der Weiterreißfestigkeit stellt sicher, dass sich ein vorhandener Riss unter Belastung nicht weiter ausbreitet. Der Riss kann als Materialfehler vorliegen, oder durch Umweltbedingungen oder Vandalismus in die Membran eingebracht worden sein. Im Normalfall wird ein Sicherheitsfaktor von mindestens 4 angesetzt um die abgeminderte Festigkeit des Materials zu berücksichtigen. Es kann vorkommen, dass bei Projekten dieser Lastfall maßgebend wird.

---

## 1.4. Konstruktion

Um doppelt gekrümmte Membranflächen aus ebenen Membranflächen herstellen zu können, muss ihre dreidimensionale Form in die Ebene abgewickelt und ihre Vorspannung dekomponiert werden. Dieser Vorgang wird als Zuschnittsberechnung bezeichnet. Das Schnittmuster ist Grundlage der Konfektionierung der Membran: Sie wird aus ebenen Bahnen zu einzelnen Membranstreifen geschnitten und unter Verwendung bestimmter Fügeverfahren miteinander verbunden. Die Ränder und Ecken werden mit entsprechenden Details versehen, um sie so zusammengefügt in ihre gewünschte, doppelt gekrümmte Ausgangsform aufzuspannen. Die nachfolgenden Kapitel gehen ausführlicher auf die Aspekte der Konstruktion von vorgespannten Membranen ein. Eine umfassende Darstellung bietet [Bub97] [Koc04] [Dob99]. Für pneumatische Konstruktionen sei auf [Her76] und [Ott83] verwiesen.

### 1.4.1. Zuschnitt

Die Aufgabe des Zuschnitts ist es, die doppelt gekrümmte Fläche so in die Ebene abzuwickeln, dass aus dem flächig, ebenen Werkstoff der Membran ihre Form geschnitten werden kann. Dabei sind die Rollenbreite der Membran und die Ausrichtung ihres Gewebes begrenzende Parameter. Die Abbildung der gekrümmten Membranfläche in die Ebene führt zwangsläufig zu Verzerrungen der Längen und Winkel.<sup>7</sup>

Für die Zuschnittsgenerierung von doppelt gekrümmten Membranflächen werden vorzugsweise geodätische Linien zur Einteilung der Fläche in Zuschnittsbahnen verwendet. Die geodätische Linie ist die kürzeste Verbindung zweier Punkte auf einer Fläche. Ihre Eigenschaft ist es, nur einfach gekrümmt zu sein, sodass sich die Linie in der Ebene als Gerade abwickeln lässt. Zwischen zwei dieser geodätischen Linien entsteht so ein Membranstreifen, der auf die Fläche projiziert eine Zuschnittsbahn ergibt und damit gut und mit wenig Verschnitt aus der Membranrolle zu schneiden ist.

So, wie die orthogonale Ausrichtung von Kett- und Schussfäden in der Membran möglichst mit den Richtungen der Hauptspannungen zusammenfallen sollte, richtet sich auch die Einteilung der Bahnen nach diesem Kraftverlauf. Die Kettfäden, als die Richtung höherer Steifigkeit, kann stärker belastet werden. Folglich sollte der Zuschnittsverlauf diesen Kraftfluss nicht durchschneiden, sondern parallel zur Kettrichtung verlaufen. Mit zunehmendem Winkel zwischen Kettfäden und Schnittkante steigen die Tangentialkräfte an und führen zu verzerrten Strukturen.

### 1.4.2. Kompensation

Der Zuschnitt ist Grundlage für die Konfektion der Membran. Nachdem Zusammenfügen der einzelnen Bahnen, dem Anbringen der Details, kann die Membran in ihre doppelt gekrümmte Ausgangsform gespannt werden. Diese Vorspannung wird die Membran allerdings stark dehnen.

Durch Kompensation der Membranstreifen wird dieser Dehnung Rechnung getragen: Der berechnete Zuschnitt wird um einen, vom Material abhängigen Prozentsatz verkleinert. Das Vorspannen der Membran führt dann wiederum zu den gewünschten Maßen der Ausgangsform. Maßgebend für die Reduzierung der Streifen ist die Dehnsteifigkeit der Membran sowie die gewünschte Vorspannung. Die Eigenschaften des Gewebes müssen berücksichtigt werden und zwischen Kett-

---

<sup>7</sup> Dieses Problem ist aus der Kartographie bekannt.

und Schussrichtung differenziert werden: die Schussrichtung erhält generell eine höhere Kompensation, aufgrund ihrer geringeren Festigkeit.<sup>8</sup>

### 1.4.3. Membranstöße, Fügetechnik

Der Membranstoß ist die Verbindung zweier Membranbahnen. Der Stoß kann durch Nähen, Schweißen oder Kleben verbunden werden. Man unterscheidet ferner in lösbare und unlösbare Verbindungen. Sie sollten wasserdicht und luftdicht ausgeführt sein. Durch die notwendige Aufdopplung der Membran weisen Membranstöße immer eine höhere Steifigkeit auf, die bei der Bemessung zu berücksichtigen ist.

#### Nähte

Das Nähen von Stoßverbindungen ist im Membranbau die älteste Verbindungsmethode. Problematisch ist, dass beim Nähen das Material durchlöchert und die Dichtigkeit des Materials verletzt wird. Vor allem findet diese Verbindung bei nicht schweißbaren Materialien, wie Baumwolle und Fluorkunststoff Anwendung. Dabei ist ihre Nahtverbindung gestalterisch eine ästhetisch hochwertige Lösung.

Die Naht kann als Flachnaht, Kappnaht oder Doppelnäht ausgeführt werden. Flachnähte gewähren keine Wasserdichtigkeit und weisen nur geringe Festigkeiten auf. Doppelnähte sind Verbindungen, bei der beide Membranränder umgeschlagen und miteinander vernäht werden. Üblicherweise finden die Kappnähte Verwendung. Bei der Kappnaht wird durch das Umschlagen eines Randes eine doppelte Überlappung des Materials erreicht. Sie weist eine hohe Festigkeit auf und ist wasserdicht.

Dabei kann der Kettstich oder der Steppstich zum Einsatz kommen. Der Kettstich liefert durch Verschlingung der Fäden eine verhältnismäßig dehnbare Verknüpfung zwischen Ober- und Unterfaden. Der Kettstich ist schnell herstellbar, birgt jedoch die Gefahr des reiðverschlussartigen Öffnens, wird er an einer Stelle verletzt. Der Steppstich dagegen stellt eine sehr feste und dehnungsarme Fadenverknüpfung her. Beide Sticharten können linear, oder als Zickzackstich ausgeführt werden.

Im Normalfall kommen zwei bis vier Nahtreihen zur Ausführung. Ab drei Nahtreihen wird jedoch erst eine Festigkeit erreicht, die bei 80% der Gewebefestigkeit liegt, abhängig von der Qualität des Nähfadens. Beständigkeit gegen UV-Strahlung kann vor allem durch Schwarzfärbung des Nähfadens erzielt werden. Feuchtigkeit und Schmutzanfälligkeit des Stoßes kann durch richtige Ausrichtung der Falz in Gefällrichtung eingeschränkt werden.

#### Schweißnähte

Die Verschweißung der Randbereiche, zweier sich überlappenden Membrane führt zu einer sehr hochfesten Verbindung, die einfach auszuführen ist. Auf eine Aufdopplung des Materials kann verzichtet werden.

Es gibt drei unterschiedliche Arten des Schweißens. Das Warmgasschweißen geschieht mittels Heißluft. Eine Walze drückt die erwärmten Membranränder aufeinander. Warmgasschweißen eignet sich für PES/PVC, PVC Dachabdichtungen, LKW- und Abdeckplanen. Erwärmt ein Heißkeil das Material so spricht man von Heißelementschweißen. Mit der Technik des Hochfrequenzschweißens werden die höchsten Festigkeiten erzielt. Durch Elektroden im Hochfrequenzfeld werden die Membranränder auf die erforderliche Schweißtemperatur erwärmt und gleichzeitig

<sup>8</sup> Detaillierte Informationen zum Materialaufbau im folgenden Kapitel 1.5. Material

---

zusammengepresst.

Nahtbreiten liegen bei einfacher Überlappung zwischen 5 bis 12cm. Darüber hinaus beginnen die Randbereiche sich abzulösen, ehe die mittleren Bereiche zur Kraftübertragung herangezogen werden. Insofern ist die Breite des Stoßes begrenzt. Neben der einfachen Überlappung können auch Stumpfstöße mit Deckstreifen zur Anwendung kommen.

Zu beachten ist die Längsschrumpfung des Materials die sich beim Schweißprozess einstellt. Vor allem bei PTFE beschichtetem Gewebe ist sie mit 1% relativ hoch und wird erst durch das Einbringen von Vorspannung herausgezogen.

#### Kombinähte

Die Kombinaht kommt zur Anwendung, wenn zu übertragende Kräfte nicht allein durch eine der Stoßverbindungsarten aufgenommen werden kann. Die Herstellung bedingt einen erhöhten Aufwand und Kosten, die endgültige Tragwirkung ist maßgeblich von der Reihenfolge des Herstellungsprozesses bestimmt.

Wird zuerst genäht und dann geschweißt, lockert sich der Nähfaden, denn durch das Schweißen nimmt die Dicke des Stoßes um ein Viertel ab und der gespannte Nähfaden lockert sich. Bei der Kraftübertragung wird erst der Faden herangezogen, wenn die Schweißnaht allein die Kräfte nicht mehr übertragen kann. Dagegen erhält man einen Tragverbund von Schweiß- und Nähnaht, wenn zuerst geschweißt und anschließend genäht wird. Die Naht bleibt gespannt und kann zum direkten Übertragen der Kräfte genutzt werden. Negativ wirkt sich in diesem Fall die Verletzung der Schweißnaht durch nachträgliches Nähen aus. Die Wasserdichtigkeit ist dadurch verletzt und kann nur durch entsprechende Beschichtung zurückgewonnen werden.

#### Klebenähte

Duroplaste und Elastomere werden verklebt, weil sie den Schweißtemperaturen nicht Standhalten können. Auch unbeschichtete Gewebe können größtenteils nicht verschweißt werden. In diesen Fällen bietet das Kleben eine Möglichkeit ihrer Verbindung. Abhängig von der Qualität des Klebers werden aber nur geringe Festigkeiten erzielt, sodass die Klebetechnik für untergeordnete Zwecke, bei denen geringe Nahtfestigkeiten tolerierbar sind, zum Einsatz kommt. Die Klebeverbindung kann als Überlappstoß, oder Stumpfstoß mit Deckstreifen ausgeführt werden.

#### Montagestöße

Sind Membranflächen zu groß oder zu schwer, um sie in einem Teil zur Baustelle zu befördern, werden ihre Teile durch Montagestöße vor Ort verbunden. Dabei wird der Membranrand mit einer Keder versehen, der mit einer Platte verklemmt wird. Diese Klemmplatte stellt die Verbindung zum zweiten Membranteil her, das auf der gegenüberliegenden Seite der Klemmplatte eingebaut wird. Klemmplatte und Bolzen werden meist aus eloxiertem, oder pulverbeschichtetem Aluminium, oder Edelstahl hergestellt. Die Keder besteht aus PVC-Monofile, mit einem Durchmesser von 5-10mm, oder nicht rostenden Stahlseilen. Bei der Ausführung eines Montagestoßes ist darauf zu achten, dass die Kanten der Metallteile die Membrane nicht verletzen. Die unterschiedlichen Dehneigenschaften von Membrane und Keder sind zu berücksichtigen. Die Klemmplatte sollte aus Gründen der Dichtigkeit abschließend mit einem Überlappungsstreifen abgedeckt werden.

### Schnürstöße

Werden in den Membranrand Ösen eingebracht, kann die Membran mittels Schnur verbunden werden. Die einfache Montage, Flexibilität in der Verschiebbarkeit in Längsrichtung sowie das schrittweise Spannen und Entspannen der Verbindung sind Vorteile dieser Konstruktion. Die Ösen werden maschinell in das Gewebe eingestanz und bestehen aus verzinktem Stahl, Messing oder Edelstahl. Polyesterschnüre, deren Durchmesser sich aus der Statik ergeben, werden durch die Ösen gezogen und verbinden die Membranteile. Die Nahtbreite der Gewebeflächen ist das Spiel, mit dem mögliche Ungenauigkeiten ausgeglichen werden können, je nach Spannen der Polyesterschnur.

Eine abschließende Abdeckung der Naht garantiert Witterungsschutz. Die Abdeckung wird auf der höher liegenden Membran aufgeschweißt und mittels Riemen- oder Klettverschluss auf der tieferen fixiert.

### Reißverschlüsse

Die Festigkeit von Reißverschlüssen liegt deutlich unter den anderer Montagestöße. Die Statik des Membrantragwerks gibt Auskunft über mögliche Verwendung von Reißverschlüssen. Im Membranbau kommen überwiegend Zahnverschlüsse aus Metall zum Einsatz. Durch das Ineinandergreifen der Zähne werden die Zugkräfte übertragen. Reißverschlüsse können wasserdicht und sogar gasdicht hergestellt werden. Eine abschließende Abdeckung des Reißverschlusses schützt vor Verschmutzung.

#### 1.4.4. Membranränder

Der Membranrand ist die Halterung eines Membranfeldes an seiner äußeren Begrenzung. Er nimmt die rechtwinklig als auch tangential zu ihm verlaufenden Kräfte auf und leitet sie in die angrenzenden Konstruktionen, wie Stütze, Wand oder Fundament. Der Membranrand kann biegeweich aus Seilen oder Gurten, oder biegesteif aus Stahl, Holz oder Beton hergestellt sein.<sup>9</sup> Der Anschluss kann starr, spannbar und/oder federnd sowie längsverschieblich an die Randkonstruktion angeschlossen werden. Eine Spannvorrichtung des Randelements zum Einbringen der nötigen Membranvorspannung ist jedoch vorteilhaft. Konstruktionselemente des Membranrandes sollten einfach montierbar sein: geringe Anzahl der Teile, geringes Gewicht und weitgehende Vormontage im Werk sind vorteilhaft.

#### Biegeweiche Ränder

Wird der Rand biegeweich ausgeführt so resultiert eine filigrane Konstruktion da die Ausbildung des Randelements als Stahlseil, Kunststoffseil oder Gurtband möglich ist, je nach vorhandener Belastung. Ein Schutzstreifen wird unter das Seil eingelegt, um ein Durchreiben der Membran zu verhindern. Das Randelement weist immer einen ausreichenden Stich auf, um die Lasten zu transportieren. Geführt wird das Seil in einer Membrantasche. Sie wird durch einfaches Umschlagen des Randes, oder durch einen zusätzlichen Membranstreifen, der um den Rand der Membran gelegt wird, hergestellt und durch Schweißen oder Vernähen mit dem Gewebe befestigt. Um ein Verrutschen zwischen Randseil und Tasche aufgrund von Tangentialkräften zu verhindern, müssen zusätzlich Konstruktionselemente eingefügt werden. Gurte, die parallel zum Rand mit der Membran verbunden sind, spannen seitlich ab und sichern gegen seitliches Verschieben.

<sup>9</sup> Vgl. Randausbildung im Kapitel Formen

---

Soll das Randseil, statt in einer Tasche, frei geführt werden, verbindet eine Schnürung den Membranrand mit dem Randelement. Die Schnürung wird durch Ösen in der Membrane geführt. Die Ösen liegen direkt an der Keder, die den Membranrand fasst. So ist ein stufenloses Spannen zwischen Randseil und Membran möglich. UV empfindliche Schnürungen bedürfen einer entsprechenden Abdeckung. Eine weitere Möglichkeit der weichen Randausbildung sind frei laufende Seile, an denen die mit Klemmplatten gefasste Membran durch Metallaschen befestigt wird.

#### Biegesteife Ränder

Biegesteife Ränder müssen druck-, zug- und biegebeanspruchbar sein, sodass die Dimensionen des Randelementes natürlich nicht an die Filigranität der Seile herankommen. Auch ihre Spannweiten sind wesentlich eingeschränkter, als die der biegeweichen Ränder. Meist wird der Rand der Membran mit einer Keder gefasst, und durch eine Klemmleiste auf das biegesteife Randelement gepresst. 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 und die Gefahr des Versagens der Membran entstehen können.

#### 1.4.5. Membranecken

Der Punkt an dem zwei Membranränder zusammen kommen, bezeichnet man als Membranecke. Die Ecke kann als Hoch- oder Tiefpunkt vorliegen. Infolge der Krümmung des Randes, laufen die Randelemente in unterschiedlichen Winkeln aufeinander zu und müssen von der Membranecke aufgenommen werden. Sie bildet einen Zwickel, in der sich Membrankräfte konzentrieren. Diese Ecken werden meist durch Aufdopplung des Materials verstärkt. Bei kleinen Projekten kann das Gewebe als spitze Ecke ausgeführt werden und mit einem in Gurtbändern gefassten Ring münden. Normalerweise werden diese Ecken aber ausgeschnitten. Dann leiten die Randseile die Kraft in biegesteife Eckplatten, die wiederum mit der Primärkonstruktion verbunden sind. Die radiale Aussparung verhindert Spannungsspitzen im Gewebe. Der Rand der Aussparung erhält eine radiale Verstärkung und wird in die Fläche hinein durch Aufdopplung ebenfalls verstärkt.

Vorspannung kann durch das Anziehen der Verankerungsseile oder dem Neigen der Verankerungsstützen über die Membranecken in die Randelemente und schließlich die Membran eingebracht werden. Ein zusätzliches Spannen der Randseile an der Eckplatte erhöht die Spannweite.

#### 1.4.6. Grate und Kehlen

Grate und Kehlen sind, vergleichbar der Ausführung biegeweicher Ränder, Seile oder Gurte, die die Membran in ihrer Fläche umlenken.<sup>10</sup> Grate bilden dabei den hoch liegenden Abschluss, Kehlen den tiefliegenden Abschluss zweier Membranfelder. Ihre Krümmung ist entgegengesetzt. Verwendung finden Grat- und Kehlflächen hauptsächlich bei großen Projekten, bei denen die Lasten von dem Gewebe allein nicht mehr abgeleitet werden kann. Hier führen die Grat- und Kehlseile die Lasten direkt in Stützen, bzw. Fundamente ab. Die gefaltete Geometrie bringt die Problematik des Sammelns und Abführens von Niederschlag mit sich. Gerade die Kehlseile müssen gut abgedichtet und mit ausreichendem Gefälle geplant sein. Schneeansammlungen im Kehlbereich sind in der Bemessung der Konstruktion zu berücksichtigen.

<sup>10</sup> vgl. Morphologie der Formen, Kapitel Formen

#### 1.4.7. Zugverankerungen

Membrantragwerke werden häufig durch Seile in den Baugrund abgespannt. Die Verankerung der Zugkräfte kann prinzipiell über Eigengewicht, Mantelreibung, Plattenwirkung, Erddruck und deren Kombinationen erfolgen.

Bei temporären Bauten bietet sich die Verankerung durch Stahlbetonfertigteile, oder mit Wasser befüllbare Behälter an, die vor allem durch ihr Eigengewicht die Membrankonstruktion verankern. Dabei kann die Zugkraft bis zur Größe der Gewichtskraft vom Fundament aufgenommen werden. Die horizontale Zugkraftkomponente wird in Abhängigkeit der Fundamentausbildung durch Reibung bzw. Erdwiderstand abgeleitet.

Erdanker stellen eine oft verwendete Zugverankerung für Membrankonstruktionen dar. Dabei wird der Zugkraft mittels im Boden eingebrachter Ankerplatten, sowie der Mantelreibung des Ankers entgegengewirkt. Üblicherweise werden Ankerplatten axial zur Zugkraft angeordnet. Die Ankerplatten sollten jedoch nicht zu steil gesetzt werden, da die Gefahr des Herausgleitens besteht, wenn die Reibung zwischen Ankerplatte und Boden aufgezehrt ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei allen Details, neben der Kraftübertragung vor allem der hohen Beweglichkeit und Verformbarkeit der Membrankonstruktion Rechnung zu tragen ist. Die räumliche Geometrie und die Größen der Hauptelemente zueinander sind dabei zu beachten. Eine Möglichkeit zur Einbringung der Membranvorspannung ist einzuplanen.

## 1.5. Material

Der Ursprung des Begriffs Membran liegt in dem lateinischen Wort „membrana“, das mit Pergament bzw. Haut übersetzt werden kann. Das Charakteristikum für alle Flächentragwerke, die reduzierte Bauteilhöhe einer Achse im Vergleich zu den übrigen beiden, ist bei der Membran besonders ausgeprägt. Mit Materialstärken zwischen 0,05 mm und 1 mm ist sie äußerst dünn. Ihre Leichtigkeit drückt sich mit 0,2 bis 1,5kg/m<sup>2</sup> in Zahlen aus. Zu unterscheiden sind grundsätzlich anisotrope Gewebe und isotrope Folien.

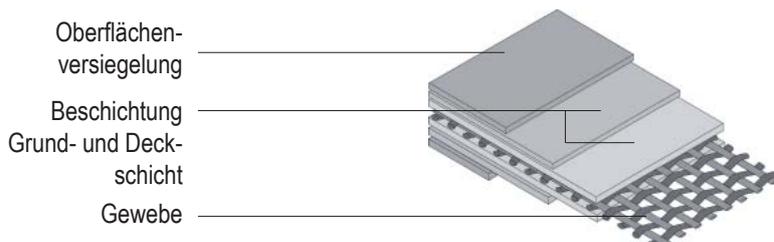


Abb. 36 prinzipieller Aufbau eines Membrangewebes

### 1.5.1. Gewebe

Membrane werden in herkömmlicher Weise aus Kett- und Schussfäden zu einem Gewebe verwebt. Das Tragverhalten von Geweben ist anisotrop. Das Material weist in beiden orthogonalen Richtungen ein unterschiedliches Spannungs- und Dehnungsverhalten auf. Der Grund hierfür liegt in der Einspannung des Kettfadens im Webstuhl. Er bleibt im Gegensatz zum Schussfaden, der über und unter dem Kettfaden wellenförmig verwebt wird, vorgespannt und gestreckt (Abb.36). Im fertigen Gewebe wird der Kettfaden also eine deutlich höhere Steifigkeit und geringere Bruchdehnung aufweisen als der häufig umgelenkte Schussfaden. Durch unterschiedliche Einstellparameter beim Webvorgang können diese Eigenschaften gezielt verändert und variiert werden.<sup>11</sup> Das Spannungs-Dehnungsverhalten eines Membranstreifens ist also abhängig von der Orientierung des Streifens zur Geweberichtung. Zudem weist er einen deutlich nichtlinearen Zusammenhang auf.

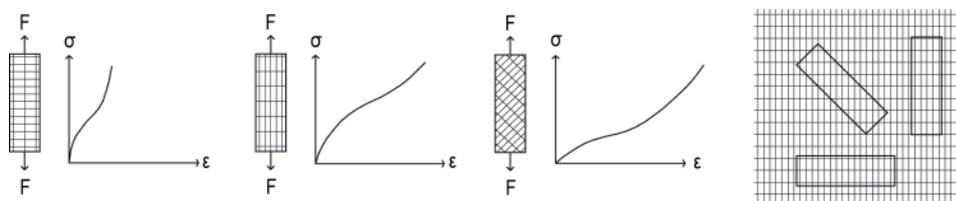


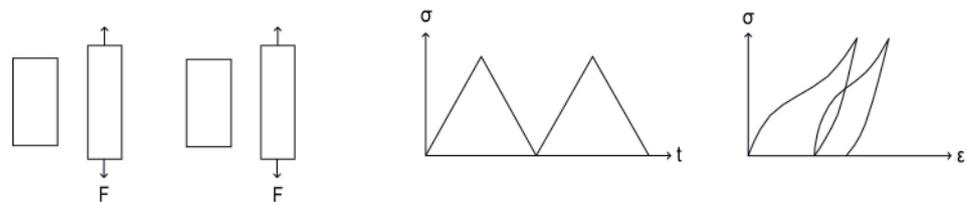
Abb. 37 Nichtlineares und anisotropes Kraft-Dehnungsverhalten einer Gewebemembran, nach [Blu90]

Kett- und Schussfäden werden üblicherweise aus mehreren hundert miteinander verdrehten Einzelfasern gebildet und als Filament bezeichnet. Die Feinheit des Filamentgarns wird durch die Einheit „dtex“, also dem Gewicht in Gramm pro 10.000m Länge angegeben. Anzahl der Filamente und die Angabe über die Drehung der Filamente pro Meter sind weitere Materialkennwerte. Die freie Reißlänge beschreibt die Länge des Filaments, bei der es unter Eigenlast zerreißen würde. (Stahl 25km, Baumwolle 48km, Polyamid (Nylon) 89km, Polyester 94km, Glas 140km, Kohlenstoff

<sup>11</sup> Die Technik Precontraimt von Ferrari® verleiht dem Gewebe vor und nach der Beschichtung eine Vorspannung um Kraft-Dehnungseigenschaften von Kett- und Schussrichtung anzugleichen. [www.ferrari-textiles.com](http://www.ferrari-textiles.com)

153km, Aramid 190km) [Sob95]. Im Bauwesen finden vor allem die synthetischen Fasern aus Polyester (PE), aber auch aus Glasfaser oder Aramid Anwendung. Als Gewebe bilden sie das Traggerüst der Membrane und sind maßgeblich für ihre mechanischen Eigenschaften verantwortlich. Aufgebrachte Beschichtungen und Oberflächenversiegelungen können darüber hinaus weitere Membraneigenschaften verbessern. Das viskoelastische Materialverhalten dieser Beschichtungen führt zu einem nichtelastischen Verhalten der Membran, das durch das Kriechverhalten des Gewebes unterstützt wird. Dehnungen der Membran nach Belastung gehen nicht auf Null zurück [Sob95].

Abb. 38  
nichtelastisches Verhalten einer Gewebemembran bei wiederholter Belastung, nach [Blu90]



### Beschichtungen, Versiegelungen

Üblicherweise werden Beschichtungen beidseitig aufgebracht und schützen das Gewebe vor Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Feuer und Befall durch Mikroben oder Pilze. Anschmutzverhalten, Lebensdauer sowie Brandverhalten des Materials werden so verbessert. Durch die Beschichtung wird die Membran wind- und wasserdicht und ermöglicht eine Farbgebung durch Pigmente, bzw. ihre Bedruckung. Unbeschichtete Gewebe müssen per Naht miteinander verbunden werden. Beschichtungen auf dem Gewebe ermöglichen das thermische und/oder hochfrequente Schweißen als Verbindung. Detaillierte Informationen zu Beschichtungen in [Mor00], hier eine Übersicht:

PTFE (Polytetrafluorethylen bekannt als Teflon) weist eine hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Substanzen auf. Es ist nicht entflammbar, weich und leicht verformbar und verhält sich unter hohen Temperaturen stabil. In der Regel werden PTFE- Beschichtungen mit einem Topcoat versehen, um die Schweißbarkeit des Materials zu verbessern.

Silikone (Polyorganosiloxane) besitzen nahezu unbegrenzte Einsatzmöglichkeiten. Sie sind resistent gegen Hitze und Kälte, haben eine Wasser abweisende Wirkung, hohe Elastizität und eine besondere Umweltverträglichkeit. Vorteil der beiden ersten Stoffe ist ihre Resistenz gegen Alterungsprozesse. Auch nach 25 Jahren zeigen PTFE- oder silikonbeschichtete Membrane keine Anzeichen von Versprödung, Rissbildung oder Abwitterung. Nachteilig ist ihr hoher Preis.

Polyvinylchlorid (PVC) ist nicht UV beständig, insofern braucht diese Beschichtung, zusätzlichen Oberflächenschutz aus Lacken oder Laminierungen, denen Hitzestabilisatoren und Weichmacher beigemischt sind.

ETFE (Ethylen- Tetrafluorethylen) ist ein thermoplastischer Kunststoff. ETFE ist transparent, UV-stabil, selbst reinigend, schwer entflammbar, witterungsbeständig und mechanisch belastbar.

TFA/PFA (Tetrafluorethylen- Perfluoralkylvinyläther) ist dem weit verbreiteten PTFE in seinen Eigenschaften sehr ähnlich. es ist beständig gegen nahezu alle Chemikalien, hat eine sehr hohe Temperaturfestigkeit und Flammwidrigkeit. Allerdings besitzt es eine geringe Festigkeit.

---

Vor allem aber sind die mechanischen Zugfestigkeiten und elastischen Eigenschaften der Membrane von Bedeutung, insofern werden ca. 90% aller Membranprojekte mit PTFE beschichteten Glasgeweben, PVC-beschichteten Polyestergeweben oder aus ETFE-Folien hergestellt. [Koc04, S.48] Sie sollen im Folgenden genauer beschrieben werden:

#### PVC-beschichtetes Polyestergewebe

PVC-beschichtete Polyestergewebe sind aufgrund ihrer Materialeigenschaften und ihres günstigen Preises die im Membranbau am häufigsten eingesetzten Materialien. Der Werkstoff wird bereits seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts eingesetzt und ist seitdem ständig optimiert worden. Er wird in verschiedenen Materialfestigkeiten hergestellt, man unterscheidet zwischen Typ 1 (2.000 N/5cm) bis Typ 5 (10.000 N/5cm). Ebenso variieren Weiterreißfestigkeiten und Materialdehnung. Die Transluzenz des Kompositstoffes ist allerdings gering.<sup>12</sup> Höhere Transluzenz kann lediglich auf Kosten der Festigkeit, durch offenporige Gewebe erzielt werden. PVC beschichtete PE Gewebe sind wasserdicht, schwer entflammbar, weisen einen guten Selbstreinigungseffekt sowie gute chemische Beständigkeit auf.

Durch das Aufbringen eines Fluorpolymer-Topcoats erhöhen sich die Knickbeständigkeit der Membrane und damit die Eignung für faltbare Konstruktionen. (z.B. Tennisstadion am Rothenbaum, Hamburg). Ein auflaminierter Tedla-Film steigert die Beständigkeit des Materials vor UV-Strahlung. Beschichtete und versiegelte PVC-Gewebe haben eine Lebensdauer von ca. 20 Jahren.

#### PTFE beschichtetes Glasfasergewebe

PTFE beschichtete Glasfasergewebe sind vor allem aufgrund ihrer Unbrennbarkeit und hervorragender Haltbarkeit ein häufig verwendetes Membranmaterial. Mit einer Lebensdauer von bis zu 30 Jahren überzeugen sie durch gute Oberflächeneigenschaften. Durch die Grundimprägnierung des Glasfasergewebes kann keine Feuchtigkeit in die Zwischenräume des Gewebes eindringen, wodurch eine Immission von Schmutzpartikeln oder Pilzsporen ausgeschlossen ist. Die Reißfestigkeiten liegen zwischen 1.000 bis 8.000 N/5cm und damit unter den Werten des PVC-PE Typ 5. Auch die Materialdehnung und die Weiterreißfestigkeit sind aufgrund des relativ spröden Glasfasergewebes geringer. Das PTFE beschichtete Glasfasergewebe ist wasserdicht, weist ausgezeichnete UV-Beständigkeit und einen sehr guten Selbstreinigungseffekt sowie sehr gute chemische Beständigkeit auf. Durch ihre geringe Knickfähigkeit eignet sie sich das Material nicht für faltbare Konstruktionen.

Im Vergleich weisen beide aufgeführten Materialien ähnliche Eigenschaften auf. Zusätzlich zu höheren Materialpreisen erfordern die geringere Elastizität und höhere Knickempfindlichkeit von PTFE-Glasfasergewebe aufwändigere Detaillierung, Fertigung und Montage, sodass die Kosten bei Verwendung von PTFE-Glasfasergewebe höher sind als bei PVC-PE.

#### Sonstige Gewebe

Neben diesen beiden Standardmaterialien gibt es eine Reihe weiterer Gewebe, die mögliche Alternativen, vor allem bei Anwendungen mit geringeren Anforderungen darstellen. Silikonbeschichtete Glasfasergewebe sind kostengünstiger, ebenfalls

<sup>12</sup> Siehe Kapitel 1.6.5. Lichttechnische Eigenschaften

unbrennbar, verschmutzen jedoch recht schnell, sodass sie für Außenanwendungen nur bedingt zu verwenden sind. Weiterer Nachteil ist dass Silikon nicht thermisch schweißbar ist, insofern nur durch Klebverbindungen gefügt werden kann.

Anstelle von Polyester oder Glas stellen Aramidfasergewebe eine hochfeste Alternative im Materialspektrum dar. Mit bis zu 25.000 N/5cm sind sie die am stärksten belastbaren Membrane. Meist wird Aramid mit einer PVC-Beschichtung geschützt, erreicht so eine B1 Brandklassifizierung, mit einer PTFE Beschichtung sogar A2. Ihr Anwendungsspektrum beschränkt sich auf wenige Speziallösungen.

Am unteren Ende des Spektrums bezüglich ihrer Belastbarkeit rangieren imprägnierte Baumwollgewebe, sie kommen jedoch nur für Innenraumanwendungen in Frage. Segel- und Persenningtücher dagegen sind leichte Textilie, die auch im Außenraum verwendet werden können. Sie sind nicht schweißbar und müssen vernäht werden, stellen für kleine Projekte aber eine sehr ästhetische Lösung dar. Durch das Durchstoßen des Materials beim Nähen wird die Zugfestigkeit und Wasserdichtigkeit herabgesetzt. Beides muss im Entwurf und Berechnung berücksichtigt werden.

Abschließend sollen noch Metallgewebe erwähnt werden.<sup>13</sup> In verschiedensten Ausführungen stößt das Material zurzeit auf zunehmende Beliebtheit und wird als Fassadenverkleidungen, Innendecken, Werbeträger oder als Sonnenschutz verwendet.

### 1.5.2. Folien

Folien werden aus thermoplastischen Kunststoffen extrudiert und zu Rollware gewalzt. Sie weisen deshalb, im Unterschied zu den Geweben, einen homogenen Materialaufbau auf. Aus diesem Grund sind Folien isotrope und schubsteife Werkstoffe. Ihre Festigkeit liegt weit unter der von Geweben, sodass das Material nur über geringe Distanzen zu spannen ist. Das Material kann transparent hergestellt werden, da kein innen liegendes Gewebe die Durchsicht hindert. Als Materialien sind Folien aus ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen), THV (Tetrafluorethylen Hexafluorpropylen Vinylidenfluorid) und PVC (Polyvinylchlorid) zu nennen.

#### Herstellungsprozess

Die Folienherstellung kann grundsätzlich in die drei Produktionsschritte Polymerisation, Granulierung und Extrusion unterteilt werden. Die Polymerisation (Vervielfachung) ist das gebräuchlichste Verfahren zur Herstellung von Kunststoffen. Dabei kommt es zu einer Aneinanderreihung kleinerer Moleküle zu langkettigen Makromolekülen. Der Molekularaufbau bestimmt das mechanische Verhalten der Folie.

Nach der Polymerisation fällt das ETFE pulverförmig aus. Bei der Granulierung kommt es zur Umformung vom Pulver- in den Granulatzustand. Bei der Extrusion wird das Granulat mit einer Schnecke durch einen beheizten Zylinder gefördert und aufgeschmolzen. Die Schmelze wird anschließend über ein Werkzeug für die Formgebung als Folie ausgetragen.

#### ETFE Folien

Unter den Folien kommt der ETFE-Folie (Ethylen-Tetrafluorethylen) im Bauwesen die größte Bedeutung zu. Mit einem Gewicht von 350 g/m<sup>2</sup> können Konstruktionen mit ETFE Folie filigran und transparent ausgeführt werden. ETFE weist eine hohe

<sup>13</sup> Hersteller: Gebr. Kufferath AG, [www.gkd.de](http://www.gkd.de)

---

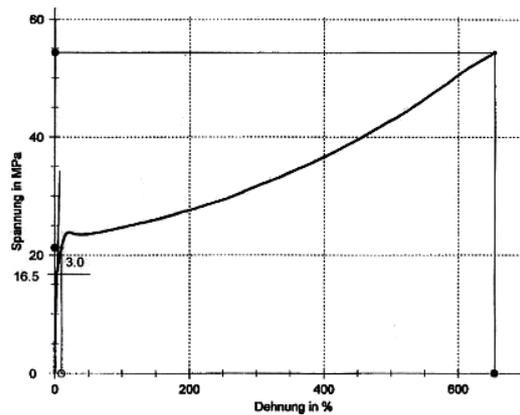
Lichtdurchlässigkeit von 97% auf. Im Vergleich zu Glas (90%) werden die für das Pflanzenwachstum wichtigen kurzwelligigen UV-Strahlen von ETFE-Folien in viel höherem Maße durchgelassen.<sup>14</sup> Seine Materialstärken liegen zwischen 250µm bis 0,2mm, die Rollenbreiten liegen bei 1,55m. Die Oberfläche ist antiadhäsiv und daher wenig schmutzanfällig. Das Niederschlagswasser führt zu einem hohen Selbstreinigungseffekt. ETFE-Folien weisen eine hohe Beständigkeit und ein gutes Brandverhalten auf (DIN 4102-B1). Die Folien selbst sind reißfest und haben eine sehr große Weiterreißfestigkeit. Die Reißfestigkeit liegt bei 500N/5cm und damit bei etwa 1/6 der Festigkeit des einfachsten PVC-beschichteten PE-Gewebes (Typ1). ETFE-Foliendächer können für Belastungen von 150kg/m<sup>2</sup> Soglast und 200kg/m<sup>2</sup> Schneelast ausgelegt werden. Die Lebensdauer von ETFE-Folien beträgt ca. 30 Jahre. Mit einem Grundpreis von 14-15€ pro m<sup>2</sup> ist die Folie relativ preiswert. Bezogen auf die Ausführungskosten (pro Quadratmeter Dachfläche) liegt die ETFE Konstruktion mit 350-800€ oberhalb vergleichbarer Konstruktionen aus PTFE (200-600€) oder PVC (150-350€), ist aber in der Regel immer noch günstiger als vergleichbare Eindeckung in Glas [Llo05]. Auf der Internetseite von Foiltec<sup>15</sup> findet man zusammenfassend folgende Materialangaben:

- Praktisch keine Reinigung erforderlich
- Selbstreinigungskraft durch die extrem hohe Oberflächenspannung
- UV-Durchlass (UV-A = 100 %), (UV-B = 50 %), (UV-C = 0 %)
- Rastergrößen: Breite ist begrenzt auf 3,5 bis 5,0 m, je nach Dachneigung, Länge ist nahezu unbegrenzt Vorteil einer sehr groben Rasterung der Unterkonstruktion, was zu wirtschaftlichen Effekten führt
- k-Wert zwischen 1,18 und 2,94 W/m<sup>2</sup>K
- g-Wert je nach Erfordernis, eine Einstellung zwischen 0,05 und 0,85 ist möglich
- Beschattungsmöglichkeit durch umsteuerbare Folien innerhalb des Kissens
- Brandverhalten der Folie: DIN 4102 B1, schwer entflammbar, nicht brennend abtropfend, im Brandfall löst sich die Folie auf und ein Entlüftungsloch entsteht. Es besteht keine Gefahr (wie bei Glas) von herunterstürzenden komplexen Bauteilen
- Hagelbeständigkeit: Deformationen der Oberfolie sind bei sehr großen Hagelkörnern zu erwarten, eine Zerstörung hingegen nicht
- Preis: ca. 30-50 % Kostenersparnis im Vergleich zum Einsatz konventioneller transparenter Überdachungslösungen.
- Schmelzbereich: 275° C +/- 10, Prüfmethode: DSC 16K/min
- Reißdehnung bei 23°C bei 160°C: 150% - 200%, Prüfkörper nach ASTM D 1708
- Weiterreißfest nach Graves, längs Quer: 180 N/mm / 190 N/mm: DIN 53 515, 23°C
- Witterungsbeständigkeit: keine Veränderung der mechanischen Werte
- Lichtdurchlässigkeit, Luft Folie (mit 50-200 µm Stärke): 100% / 95%: Ulbrichtkugel/ System Gluehlampenlicht
- Brandklasse: B1, schwer entflammbar, DIN 4102

14 Siehe Kapitel 1.6.5. Lichttechnische Eigenschaften

15 <http://www.foiltec.de>

Abb. 39  
Spannungs-Dehnungs  
Diagramm ETFE  
[Sch04a]



### Sonstige Folien

ETFE hat sich als Standardfolie auf dem Markt behaupten können. Die THV Folie, ebenfalls hoch transparent und widerstandsfähig unterliegt der ETFE Folie durch ihre geringere Reißfestigkeit. PVC-Folien werden infolge ihrer geringen Festigkeit, ihrer hohen Materialdehnung und geringer UV- und Hitzebeständigkeit ausschließlich im Innenbereich (Messe- und Ausstellungsbau oder als abgehängte Lichtdecke oder hinterleuchtete Wand) eingesetzt.

### 1.5.3. Vergleich

Die nachfolgende Tabelle ermöglicht einen vergleichenden Überblick auf die Eigenschaften der üblichen Membranmaterialien. Weiterführende Informationen sind zu finden in [Sch04] [Blu90] [Koc04] [Gen05]

Tabelle 1.6. Eigenschaften üblicher Membran- und Folienmaterialien

	Polyestergewebe, PVC-beschichtet	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet	Silikonbeschichtete Polyester- und Glasfasergewebe
 <p>Verformbarkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoch in Kett- und Schussrichtung</li> <li>- Bruchdehnung 10-20%</li> <li>- geringe Schubsteifigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoch in Kett- und Schussrichtung</li> <li>- Bruchdehnung 10-15%</li> <li>- relativ hohe Schubsteifigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoch in Kett- und Schussrichtung</li> <li>- Bruchdehnung 10-20%</li> <li>- sehr geringe Schubsteifigkeit</li> </ul>
 <p>Fügbarkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fügen durch Hochfrequenz- oder Thermoimpuls-schweißen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fügen durch Thermoimpuls-schweißen unter Verwendung einer Zwischfolie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbinden durch Vulkanisieren</li> </ul>
 <p>Brandverhalten</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brennt unter Entwicklung giftiger Gase</li> <li>- Brandklasse B1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brandklasse A2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brandklasse A2</li> <li>- Zersetzungsprodukte sind ungiftig</li> </ul>
 <p>Langzeitstabilität</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- je dicker die Beschichtung, desto länger stabil, d.h. länger UV-beständig</li> <li>- Einschränkung der Transparenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Glas wird durch die Einwirkung von Feuchte hydrolysiert</li> <li>- Imprägnierung des Gewebes vor der Beschichtung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Silikon-Beschichtung ist UV-beständig und wird durch chemische Einflüsse auch bei Temperaturen von 70°C nicht angegriffen</li> </ul>
 <p>Knickempfindlichkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Knickempfindlichkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe Knickempfindlichkeit,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Knickempfindlichkeit,</li> </ul>
 <p>Schmutzempfindlichkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sehr schmutzanfällig</li> <li>- kann durch Fluorlack geschützt werden, dieser ist jedoch anfällig gegen Beschädigungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nicht schmutzanfällig</li> <li>- reinigt sich selbst</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lädt sich elektro-statisch auf und zieht dadurch Staub an</li> </ul>
 <p>Festigkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewebe in verschiedenen Festigkeitsklassen</li> <li>- großer Widerstand gegen Weiterreißen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewebe in verschiedenen Festigkeitsklassen</li> <li>- sehr gute UV-Beständigkeit</li> <li>- Nahtfestigkeit kleiner als Gewebefestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ähnlich PTFE-beschichtete Glasfasergewebe</li> <li>- sehr gute UV-Beständigkeit</li> <li>- Nahtfestigkeit wie Gewebefestigkeit bei 70°C</li> </ul>
 <p>Umweltbelastung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PVC zerfällt unter Bildung von Chlor und Salzsäure</li> <li>- Entsorgung problematisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Glasfasern lassen sich umweltfreundlich entsorgen</li> <li>- PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Glas und Silikon sind chemisch unbedenklich und lassen sich umweltfreundlich entsorgen</li> <li>- Silikon ist zu 100% recycelbar</li> </ul>
 <p>Transparenz</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 5-10 % Lichtdurchlässigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 8-12 % Lichtdurchlässigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 25-30% Transparenz durch Füllung mit feuerhemmenden Material</li> <li>- Silikon selbst ist klar bis opak</li> </ul>
Flächengewicht nach DIN 55352 [g/m <sup>2</sup> ]	Typ I – 800 Typ II – 900 Typ III – 1050 Typ IV – 1300 Typ V – 1450	800 1050 1250 1500	800 1270
Zugfestigkeit Kett/Schuss nach DIN 53354 [N/50mm]	Typ I – 3000/3000 Typ II – 4400/3950 Typ III – 5750/5100 Typ IV – 7450/6400 Typ V – 9800/8300	3500/3000 5000/4400 6900/5900 7300/6500	3500/3500 6600/6000
Bruchdehnung Kett/Schuss nach DIN 53354 [%]	Typ I – 15/20 Typ II – 15/20 Typ III – 15/25 Typ IV – 15/30 Typ V – 20/30	7/10 bis 2/17	7/10 bis 2/17
Weiterreißfestigkeit Kett/Schuss nach DIN 53363 [N]	Typ I – 310/350 Typ II – 520/580 Typ III – 800/950 Typ IV – 1100/1400 Typ V – 1800/1600	300/300 300/300 400/400 500/500	300 570
Lebenserwartung [a]	>20	>25	>20

ETFE – Folien (THV, ET ähnlich)	PTFE-Gewebe, unbeschichtet	Aramidgewebe, PVC-beschichtet	Baumwoll-Polyestergewebe
- hohe Verformbarkeit - THV-Folie höhere Verformbarkeit als ET-Folie	- hoch in Kett- und Schussrichtung - Bruchdehnung 8-11%	- sehr hoch in Kett- und Schussrichtung - Bruchdehnung 5-6%	- hohe Verformbarkeit
- Fügen durch Thermoimpulsschweißen - THV-Folien auch durch Hochfrequenzschweißen			
- als nicht brennbar eingestuft	- Brandklasse A2	- Brandklasse B1	- Brandklasse B1
- gut auch unter UV-Einwirkung - sehr gute UV-Beständigkeit	- sehr gute UV-Beständigkeit	- ausreichende UV-Beständigkeit	- ausreichende UV-Beständigkeit
- Knicken hat kaum Einfluss auf Festigkeit, - Erscheinungsbild leidet jedoch stark	- sehr knickbeständig - für faltbare Systeme gut geeignet	- ausreichende Knickbeständigkeit	- sehr knickbeständig
- nicht verschmutzungsanfällig	- sehr gutes Anschmutzverhalten	- sehr schmutzanfällig	- sehr schmutzanfällig - wird imprägniert, nicht beschichtet
- Fließgrenze gering - Einsatz meist in pneumatischen Konstruktionen - großer Widerstand gegen Weiterreißen	- Gewebe in verschiedenen Festigkeitsklassen	- Gewebe in verschiedenen Festigkeitsklassen - großer Widerstand gegen Weiterreißen	- Gewebe in verschiedenen Festigkeitsklassen - geringer Widerstand gegen Weiterreißen
- 100% recycelbar	- PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor	- PVC zerfällt unter Bildung von Chlor und Salzsäure - Entsorgung problematisch	
- glasklar - ca. 97% Transluzenz	- 72 % Transluzenz	- nicht lichtdurchlässig	- 5 – 10 % Transluzenz
50 µm – 87,5 80 µm – 140 100 µm – 175 150 µm – 262,5 200 µm – 350 250 µm – 437,5	300 520 710	900 2020	350 520
50 µm – 64/56 80 µm – 58/54 100 µm – 58/57 150 µm – 58/57 200 µm – 52/52 250 µm – >40/>40	2390/2210 3290/3370 4470/4510	7000/9000 24500/24500	1700/1000 2500/2000
50 µm – 450/500 80 µm – 500/600 100 µm – 550/600 150 µm – 600/650 200 µm – 600/600 250 µm – >300/>300	11/10 11/10 8/9	5/6	35/18 38/20
50 µm – 450/450 80 µm – 450/450 100 µm – 430/440 150 µm – 450/430 200 µm – 430/430 250 µm – >300/>300	ca. 500/500	700 4450	60 80
>25	>25	>20	<5

## 1.6. Bauphysikalische Eigenschaften

Das Material wurde im Verlauf der Entwicklung von mechanisch vorgespannten Membranen ständig verbessert und weiterentwickelt. Aus diesem Grund konnten durch den Einsatz des verbesserten Materials das Spektrum ihres Einsatzes erweitert werden. Im Anschluss an die materialbezogenen Aspekte der Membran sollen hier die bauphysikalischen Eigenschaften der Membran beleuchtet werden.

### 1.6.1. Wärme- und Feuchteschutz

Der Wärmeschutz in Bauteilen wird durch die Behinderung des Wärmeflusses durch das Bauteil erzielt. Kenngröße für diesen Wärmedurchlasswiderstand ist der U-Wert.<sup>16</sup> Darüber hinaus interessieren die Regensicherheit, Luftdichtheit der Innenhaut sowie die Dampfdiffusion und Tauwasserbildung in und auf den Schichten. Dieses Kapitel befasst sich mit den Themen, des Wärme und Feuchteschutzes nach [DIN4108].

	Aufbau	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Transluzenz Membrane PES/PVC + PFTE/Glas etc.	Transluzenz Folie + laminierte Glasgewebe
	2-lagig + 240mm WD040	0,16	0 %	
	2-lagig + 160mm WD040	0,21	0 %	
	2-lagig +80mm WD040	0,24	0-2 %	10% (bei Glasvlies- WD)
	2+2 Lagen	1,5	0-6 %	0- 96 %
	3 Lagen	1,9	0-12 %	0-97 %
	2 Lagen	2,9	0-25 %	0-98 %
	1 Lage	5,7	0-50%	0-99%
	2-lagig, luftgestützt			0-98 %

Tabelle 1.7.  
U-Werte mehrlagiger Membran-  
konstruktionen [Ip103],  
www.foiltec.de

Die oben aufgeführte Tabelle 1.7. listet den Wärmedurchgangskoeffizient einfacher und mehrlagiger Membrankonstruktionen auf. Ausreichender Wärmeschutz, nach EnEV04<sup>17</sup>, ist mit einer einfachen Membranlage nicht zu erzielen ist. Erst im Zusammenspiel mit weiteren Membranlagen kann durch die eingeschlossenen, stehenden Luftschichten zwischen den einzelnen Lagen, der Wärmefluss durch dieses Bauteil behindert werden. Die Kombination von vier Lagen weist bereits einen U-Wert von 1,5 W/m<sup>2</sup>K auf. Für Gebäude notwendige U-Werte, die den

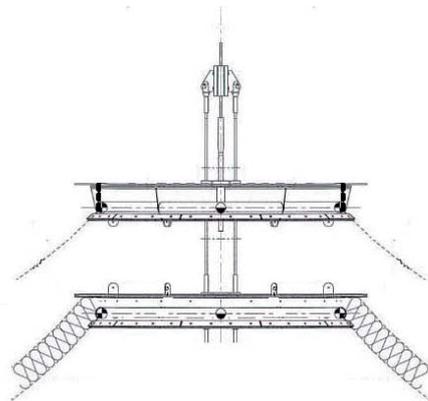
<sup>16</sup> Wärmedurchgangskoeffizient

<sup>17</sup> Energieeinsparverordnung 2004

Anforderungen der EnEV gerecht werden, können erst durch den Verbund mit Dämmstoffen erzielt werden. Die pneumatischen Konstruktionen erzielen durch ihren kissenartigen Einschluss von Luft eine gute Wärmedämmung und sind in die Tabelle 1.7. eingefügt.

Insofern weisen Membrankonstruktionen, die erhöhten Wärmeschutz bieten, normalerweise eine Verbundkonstruktion mit Dämmstoffen auf. An dem Beispiel der Schwimmhallenüberdachung in Velbert<sup>18</sup> soll im Folgenden diese Konstruktionsweise genauer aufgezeigt werden. Das Hallendach des Bades besteht aus zwei mechanisch vorgespannten Membranen von rund 1000m<sup>2</sup> und neun formgebenden Hochpunkten, die durch einen geneigten Pylon vorgespannt werden. [Ip103]

Abb. 40  
Schwimmbad Velbert,  
a) Schnitt durch die  
Dachkonstruktion, b)  
Außenansicht [Ip103]



Außenmembran 1  
Hinterlüftung 2  
diffusionsoffene Unterspannbahn 3  
flexible Wärmedämmung, zweilagig je 120mm  
Innenmembran 5  
Montagelaschen 6  
Anschlussleiste für Klemmleisten 7  
Hochpunkt Spanntechnik 8  
Außenmembrane: PES/PVC-Gewebe Typ IV mit Flurlack; 997 m<sup>2</sup> Oberfläche; Ferrari Précontraint 1302 Serie 8000; B1 nach DIN 4102  
Innenmembrane: PES/PVC-Gewebe Typ II mit Acryllack; 861 m<sup>2</sup> Oberfläche; Ferrari Précontraint 1002 Serie 8000; B1 nach DIN 4102

Die hier gewählte Konstruktion ähnelt prinzipiell dem Aufbau eines herkömmlichen Kaldaches. Auf der Innenmembran aufgebracht ist eine Wärmedämmung, die durch eine Unterspannbahn geschützt wird. Es folgt der Hinterlüftungsspalt, der durch die Außenmembran begrenzt wird.

Die Innenmembran erfüllt in dieser Konstruktion die Aufgabe, die Dämmung vor der Raumluftfeuchte zu schützen. Der Widerstand, den eine Schicht dem Wasserdampf bietet, wird als  $S_d$ -Wert angegeben. Er gibt an, wie dick eine vergleichbare Luftschicht ist, die dem Wasserdampf den gleichen Widerstand entgegengesetzt und ist das Produkt von Schichtdicke und der materialspezifischen Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Die DIN 4108 schreibt für Kaldächer einen  $S_d$  Wert von  $>2m$  für die Dampfbremse vor. In diesem Fall übernimmt die Innenmembran die Funktion der Dampfbremse. Tabelle 1.8. gibt einen Überblick über Wasserdampfdiffusionswiderstände bzw ihrer  $-a$ quivalente:

<sup>18</sup> Parkbad Velbert, Dr. Krieger, Architekten und Ingenieure GmbH & Co. KG, Velbert, Membrandachplanung: IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH, Radolfzell, Bauphysik Membrandach: CCD Bautechnik, Remscheid, Membrankonfektion: Koch Membranen, Rimsting, Fertigstellung: September 2002

Material	Schichtdicke s	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $m_y$ [-]	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke Sd-Wert [m] = $s \times m_y$
Alufolie	ab 0,00005 m = 0,05 mm	30.000.000	>1500 = praktisch dampfdicht
PVC Kunststoff-Folie	0,001 m = 1 mm	50.000	50
Normalbeton	0,25 m = 250 mm	150	37
Styroporplatte	0,1 m = 100 mm	30	3
Spanplatte	0,02 m = 20 mm	100	2
Fluor-Folie	0,0001 = 0,1 mm	10.000	1
Gipskarton, Holzfaserplatten	0,02 m = 20 mm	10-20	0,1-0,2 = praktisch diffusionsoffen
Mineralwolle, Faserdämmstoffe	0,1 m = 100 mm	1	0,1
PP-Folie	0,0001 = 0,1 mm	1.000	0,1
Diffusionsoffene Unterspannbahn (B1)	ab 0,15 m = 150 mm		0,02 - 0,15

Tabelle 1.8.  
S<sub>d</sub> Werte verschiedener Werkstoffe  
[pl03]

Gegen Feuchte im Bereich der Hinterlüftung, hervorgerufen durch horizontalen Regen oder Kondensat auf der Unterseite der Außenmembran, wird die Dämmung auf ihrer Oberseite durch eine aufgebrachte Unterspannbahn geschützt. Sie muss wasserdicht sein und durch ein Gefälle anfallendes Wasser abführen. Andererseits muss sie diffusionsoffen sein, um Bauteilfeuchte der Dämmung in den hinterlüfteten Spalt durchzulassen.<sup>19</sup> Auch für Membranbauteile gilt ganz allgemein, dass der Widerstand der einzelnen Werkstoffe des Bauteils Wasserdampf durchzulassen, nach Außen hin abnehmen muss. Nur so kann die Feuchte aus dem Bauteil abtransportiert werden.<sup>20</sup>

Fugen oder mechanische Beschädigungen der Innenmembran können diese Forderung schnell stören. Durch sie kann soviel Feuchte in das Bauteil dringen, dass die folgenden Bauteilschichten nicht mehr in der Lage sind diese Mengen durch Diffusion abzuleiten. Insofern gilt es mechanische Beschädigungen der Dampfbremse zu vermeiden, damit nicht mehr Feuchtigkeit in die Dämmung dringt, als durch die Unterspannbahn diffundieren und durch die Hinterlüftung abtransportiert werden kann.

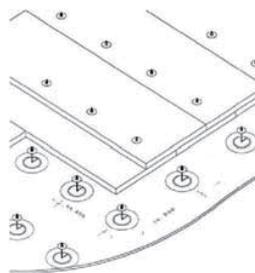


Abb. 41 a-c  
Befestigung der Dämmung am Beispiel der Schwimmhalle Velbert  
[pl03]

<sup>19</sup> In Velbert wurde eine Unterspannbahn mit einem S<sub>d</sub> Wert von 8cm verwendet

<sup>20</sup> Kondensat fällt in Velbert im Winter auf der Unterseite der Außenhülle an, im Sommer zwischen Dämmung und Innenmembran

Die Dorne für die Befestigung der Dämmung (Abb.41b) dürfen demnach nicht die Innenmembran durchstoßen, sondern müssen für ihre Befestigung in aufgeschweißte Taschen (Abb.41a) gesteckt werden. So wird eine Beschädigung der Membran verhindert. Die Dorne verhindern das Verschieben und Abrutschen der Dämmung.

Die ersten Membrandächer wurden noch mit Mineralwolle gedämmt. Aufgrund der geringen Strukturstabilität wurde die Mineralwolle inzwischen vollständig von dauerelastischer Kunststoffdämmung abgelöst, wie zum Beispiel elastische Vlieswerkstoffe aus Polyester [Sch04,Teil2]. Sie sind feuchteunempfindlich, pilzfest und unverrottbar. Diese Eigenschaften sind notwendige Voraussetzung, da wärmegeprägten Membranbauteilen Baustoffe fehlen, die Feuchtigkeit aufnehmen und speichern könnten. Die Membran als Kunststoff kann nur sehr wenig Feuchte aufnehmen, sodass der überwiegende Teil ausfällt. Diese Feuchte darf laut DIN bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten.<sup>21</sup> Die Wärmedämmung muss gegen Feuchte resistent sein. Insofern eignen sich PES-Dämmstoffe für diese Anwendung. Der Dämmstoff kann in mehreren Lagen aufgebracht werden, über die Dicke kann der U-Wert des gesamten Bauteils gesteuert werden. Die Dämmung muss zudem recht elastisch sein, um sie dem Zuschnitt der Innenmembran anzupassen. Hohlraum- und Faltenfreies Aufliegen der Dämmung auf der Innenmembran muss gewährleistet sein, um volle Dämmwirkung zu erreichen. Im Parkbad Velbert wurden zwei 120mm starke Dämmlagen fugenversetzt eingebracht (Abb.41c). Sie erreichen einen U-Wert von 0,16 W/m<sup>2</sup>K. [Ipl03]

Die Breite des Hinterlüftungsspalt ergibt sich aus der maximalen Verformung der äußeren Membran. Sie unterliegt wesentlich höheren Belastungen als die Innenmembran. Durch Wind und Schnee, verformt sich die Außenmembran wesentlich stärker als die Innenmembran. Das Aufliegen der Außenmembran auf die Dämmung soll durch einen entsprechend großen Abstand voneinander verhindert werden. Das Aufliegen würde zu einer Belastung der Innenmembran führen, für die die Innenmembran nicht bemessen wurde. Auch unterbindet das Aufliegen der Außenmembran die Hinterlüftung und damit einen ausreichenden Feuchtetransport.

Das unterschiedliche Verhalten von Innen- und Außenmembran muss auch am Dachrand, am Übergang von Dach zu Fassade berücksichtigt werden. Die unterschiedlichen Bewegungen der einzelnen Bauteile werden durch ein flexibles, elastisches Bauteil ausgeglichen. Konstruktive Lösungen sind ein mehrlagiger Faltenbalg mit Gummizug oder, wie im Schwimmbad Velbert, eine V-förmig eingeknickte Membran, die mit Gummibändern nach Innen verspannt ist. Bei Windsog streckt sie sich, bei Winddruck wird sie stärker gefaltet und ihr Knick nach innen eingezogen. Der seitliche Dachabschluss ist zudem mit Lufteinströmöffnungen für die Dachhinterlüftung zu versehen. Die eingeströmte Luft kann im Bauteil die Feuchte aufnehmen und über Auslässe im Hochpunkt abtransportieren.

Abschließend sei noch auf die Außenmembran hingewiesen. Sie ist wind- und wasserdicht und bildet so den primären Wetterschutz der Konstruktion.

Das Beispiel der Velberthalle zeigt den prinzipiellen Aufbau eines wärmegeprägten Membrandaches. Sind Anfang der 80er Jahre, wie im Schlumberger Research Center

21 0.5 l/m<sup>2</sup> in der Tauperiode

in Cambridge mit einlagigen Konstruktionen U-Werte von  $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  erzielt worden, so ist die Entwicklung heute, wie im Parkbad Velbert bei Werten von  $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$  angekommen. Die Dämmung des Bauteils führt allerdings auch zu dem Verlust der Transluzenz und den damit verbundenen solaren Gewinnen, die in die Wärmebilanz eingerechnet werden kann.

### Beispiele

Die Modernisierung des Freizeitbades in Rülzheim im Jahr 2000, durch die Firma Covertex, zeigt eine Lösung zum Wärmeschutz durch eine pneumatisch gestützte ETFE-Konstruktion. Durch den Einbau von 3-lagigen ETFE-Pneukissen von denen die obere Lage an ihrer Unterseite bedruckt wurde, um die Wärmeimmission in den Sommermonaten zu verringern, wurde eine Durchsicht durch das Dach ermöglicht. Erzielt wurden folgende Werte: Lichttransmission: ca. 50%, U-Wert:  $2,0 \text{ K/W m}^2$ , g-Wert:  $0,54 \text{ K/W m}^2$ . Im Projekt „Desert Seal“ (Abb. 42b) wird statt einer Wärmedämmung eine aktive Kühlung durch Form und Material erzielt. Die Struktur macht Gebrauch von der spezifischen Temperaturkurve heißer Regionen, in denen die Luft kühler wird, je größer ihr Abstand zum Erdboden ist. Durch eine Ventilation wird diese kühlere Luft durch den hohen Lüftungsschacht in das Zelt gebracht. Im Zusammenspiel mit der strahlungsreflektierenden Membranoberfläche ermöglicht dies den Einsatz des Zeltens in Wüstenregionen [Vog06].



Abb. 42 a-f  
a - Freizeitbad Rülzheim, [Cov07]  
b - Desert Seal, Studie der Europäischen Raumfahrt Behörde [Ten07]  
c - Buddy Holly Musical, Hamburg  
d - Gaudi Musical, Köln  
e - Papageno Theater Frankfurt [Cov07]  
f - Sporthalle Jeddah [Ten07]

### 1.6.2. Brandschutz

Der Brandschutz umfasst die Brandverhütung, die Brandbegrenzung und die Brandbekämpfung. Geregelt werden diese Maßnahmen in [DIN 4102], bzw. in der neuen DIN-EN13501.

Die Brandverhütung befasst sich mit allen Maßnahmen, die die Entstehung von Feuer von vorn herein verhindern. Vor allem arbeitet die Norm mit Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen. Membrane erreichen aufgrund ihrer thermoplastischen Schweißnaht keine Feuerwiderstandsklasse. Die unter Spannung stehenden Nähte schmelzen unter Hitze.<sup>22</sup> Insofern werden Membrane überwiegend als nichttragendes Bauteil eingesetzt. Ihr Ausfall im Brandfall tangiert nicht die Tragfähigkeit der Tragkonstruktion. Als nichttragendes Bauteil klassifiziert die Norm allerdings nach Brennbarkeit des Materials selber. Hierfür verwendet sie verschiedene Baustoffklassen. Membrane werden aus brennbaren und nicht brennbaren Werkstoffen hergestellt und erreichen die, nach DIN 4102 bekannten Klassifizierungen B2 bis A2. Die Brennbarkeit von Membranen lässt sich durch Flammschutzmittel regulieren. Meist werden Rauchgase durch sie aber toxischer. Vereinzelt werden brandschutzwirksame Beschichtungen verwendet. Sie bilden eine Dämmschicht, die sich unter Hitze zu einem thermisch stabilen Schaum aufbläht, oder unter Hitzeeinwirkung kühlen.

Die bisher üblichen Brennbarkeitsklassen wurden in der EN auf A1, A2, B, C, D, E und F –Klassen erweitert und mit Brennbarkeitskriterien zur Rauchentwicklung (s1-s3) und dem Abtropfen (d0-d2) ergänzt. Somit sind genauere Aussagen zum Brandverhalten der Baustoffe möglich. Die nachstehende Tabelle dient dem Vergleich von DIN und EN Normierungen:

Tabelle 1.9. Übersetzungstabelle EN 13501-1 zu DIN 4102-1

Bauaufsichtliche Benennung	Zusatzanforderung Kein Rauch	Zusatzanforderung Kein brennendes Abfallen/Abtropfen	Europäische Klasse nach EN 13501-1	Klasse nach DIN 4102-1
Nicht brennbar	x	x	A1	A1
	x	x	A2-s1	A2
Schwer entflammbar	x	x	B,C-s1d0	B1
		x	B,C-s3d0	
	x		B,C-s1d2	
			B,C-s3d2	
Normal entflammbar		x	D-s3d0	B2
			D-s3d2	
			E-d2	
Leicht entflammbar			F	B3

Die Brandbegrenzung wird durch Brandabschnitte, Meldeanlagen, Sprinkler, Rauchklappen und Rauchschutzvorhängen umgesetzt. Hier kann die Membrane als Schutzvorhang zum Einsatz kommen. Eine Rauchschürze besteht aus Aluminium beschichteten Glasgewebe und kann 60 Minuten lang einer Brandtemperatur von 600°C widerstehen.<sup>23</sup>

Bei der Brandbekämpfung bietet die Membran einige Vorteile. Sie stellt für die Feuerwehr kein Hindernis da. Mit ihren Werkzeugen kann leicht ein ausreichend großer Zugang geschaffen werden, bzw. Öffnungen zu Entrauchungszwecken

<sup>22</sup> Ausnahme hiervon sind alle Membrane die ein Glasgewebe aufweisen und mit Glasfäden vernäht werden

<sup>23</sup> Firma Stürmann GmbH & Co

geschnitten werden. Brandherde unter der Membran führen zum Schmelzen der Membran. Das entstehende Loch in der Membran stellt automatisch einen Rauchabzug dar. Der Rauch, als das größte Problem und Sicherheitsrisiko im Brandfall, kann abziehen. Das geringe Gewicht der Membrane reduziert zudem die Gefahr durch herabstürzende Bauteile [Sch04].

Zusammenfassend weisen Membrane, vor allem durch ihre geringe brennbare Materialmenge, schlechte Brandeigenschaften auf. Auch das Schweißnahtproblem kann als automatischer Rauchabzug in ein Brandschutzgesamtkonzept eingearbeitet werden. Durch die Einführung der neuen EU-Norm ist zu erwarten, dass durch die neuen Klassifizierungen, differenziertere Produkte auf dem Markt angeboten werden. Tabelle 1.10. vergleicht Schmelzpunkt, Pyrolysetemperatur<sup>24</sup> und Selbstzündungstemperatur verschiedener Membranmaterialien:

	Schmelzpunkt in °C	Pyrolysetemperatur in °C	Selbstzündungstemperatur (°C)
PVC	>140°	200–300°	455°
Polyester	250°	283–306°	510°
ETFE	270°	-	-
PTFE	327°	510–540°	580°
Glasgewebe	>1100°	-	-

Tabelle 1.10. Schmelzpunkt, Pyrolysetemperatur und Selbstzündungstemperatur verschiedener Membranmaterialien

## Materialien

PVC beschichtetes Polyestergewebe enthält flammenhemmende Mittel und wird damit in Klasse B1 eingestuft. Es tropft nicht brennend ab und die Rauchentwicklung beim Brand bleibt gering. Die Temperaturen über 120°C beginnen die Schweißnähte aufzureißen und bei weiterem Temperaturanstieg schrumpft und schmilzt die Dachbahn im Bereich der Flammenwirkung. Außerhalb der direkten Feuereinwirkung brennen PVC Bahnen nicht weiter.

PTFE beschichtetes Glasfasergewebe zeigt hervorragende brandschutztechnische Eigenschaften. Es lässt sich erst in einem Temperaturbereich von 500°C bis 560°C entzünden und kann nur in einer Atmosphäre mit 95% Sauerstoff zum Brennen gebracht werden. PTFE brennt also nur bei extremsten Bedingungen und zeigt auch hinsichtlich Raucherzeugung und strukturellem Zusammenhalt sehr gute Eigenschaften. Bei der Prüfung des Brandverhaltens nach DIN 4102 erreichen PTFE beschichtete Glas- und Aramidgewebe die Klasse A2. [Hop98, S.81]

ET und THV werden als nicht brennbar eingestuft, silikonbeschichtete Glasfasergewebe erreichen die Brandklasse A2. Die Zersetzungsprodukte sind ungiftig. Im Einzelnen gibt die Tabelle 1.9. eine Übersicht über die jeweilige Brandschutzklasse. Nicht zu vergessen ist darüber hinaus, dass die vorgespannte Membrankonstruktion meist noch aus weiteren Materialien besteht. So ist bei der Bemessung der Seilquerschnitte beispielsweise zu beachten, dass der Seilquerschnitt so dimensioniert wird, dass er erst bei einer bestimmten Brandtemperatur die Zugfestigkeit verliert.

<sup>24</sup> thermische Zersetzung von Stoffen unter Ausschluss von Sauerstoff

### 1.6.3. Schallschutz und Akustik

Schall entsteht durch Schwingungen von elastischen Körpern, die durch Schlagen oder Klopfen von Gegenständen, den Schallquellen, ausgelöst werden und durch feste, flüssige und gasförmige Stoffe (z.B.: Luft, Wasser, aber auch Wänden) an unser Ohr geleitet werden. Die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde bezeichnet man als Schwingungszahl oder Frequenz. Die Einheit der Frequenz ist eine Schwingung pro Sekunde, gleich 1 Hertz (Hz). Das menschliche Ohr kann Töne hören, deren Frequenz zwischen 20Hz und 20.000Hz liegen. Die Lautstärke des Schalls wird in Dezibel gemessen. 0db ist die Hörschwelle, 40db so laut wie eine normale Unterhaltung, 60-80db entspricht dem Straßenlärm, alles über 70db schädigt die Gesundheit. Da die Schallmaßeinheit Dezibel (dB) eine logarithmische Größe ist, bedeutet eine Erhöhung von 3dB mehr als eine Verdopplung der Schallenergie und Lautstärke.

#### Schalldämmung

Unter Schalldämmung wird die Behinderung der Schallübertragung zwischen zwei abgegrenzten Räumen verstanden. Die bekannte und bewährte Methode ist, dem Außenlärm Masse zur Aufnahme der Schallenergie gegenüberzustellen. Die Luftschalldämmung einschaliger, homogener Bauteile kann in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse dargestellt werden. Zweischalige Bauteile zeigen im Vergleich zu einem gleich schweren einschaligen Bauteil eine höhere Luftschalldämmung. Die Höhe der Verbesserung wird durch die Biegesteifigkeit der Schalen und ihrem Abstand, der Hohlraumfüllung, der Resonanzfrequenz des gesamten Systems und der flächenbezogenen Masse beeinflusst. Schalldichtigkeit ist darüber hinaus abhängig von der Dichtigkeit der Anschlüsse und der Vermeidung von Körperschallbrücken. Die Mindestanforderungen an den Schallschutz im Hochbau sind in [DIN4109] festgelegt. Für Außenwandbauteile von Gebäuden wird zum Beispiel ein Schalldämmmaß von  $\geq 30\text{dB}$  gefordert, welches je nach Ruhebedarf der dahinter liegenden Räume und der Größe des Außenlärms auf bis zu 50dB ansteigen kann [Fas03].

Durch Mehrlagigkeit von Membranen und der Füllung ihres Zwischenraums, kann auch mit der Membran eine Schalldämmung erreicht werden, ohne dass der Vorteil des leichten, flexiblen Materials aufgegeben wird. So genannte Zweiwandgewebe werden mittels Eisenspänen oder Sand gefüllt, um mit dieser Masse das Schalldämmmaß zu erhöhen. Mit beiden Maßnahmen geht der Verlust der Transluzenz einher.

So bietet zum Beispiel die Firma Heywinkel Zweiwandgewebe aus PES/PVC an, aus denen 22mm dicke biegeeweiche planparallele Wandscheiben hergestellt werden können, die entweder wie Schlauchboote mit Luft aufgeblasen werden und dann immerhin 18dB bringen, oder die sich mit Quarzsand reversibel befüllen lassen, und dann mit 38dB aufgrund der fehlenden Resonanzfrequenzen einer 100mm dicken Betonwand ebenbürtig sind.<sup>25</sup> Reicht ein etwas geringerer Dämmwert, so sind extrem leichte und selbsttragende, pneumatische Schallschutzwände aus Membran oder Folie mit 1–3 kg/m<sup>2</sup> ein Lösungsansatz. Mit ihnen können modulare und auch freie Formen mit kürzesten Montage- und Demontagezeiten realisiert werden. Hier verbessert sich durch hohen Stützluftdruck die niederfrequente Dämpfung, dagegen verschlechtert sich die höherfrequente Dämpfung.

<sup>25</sup> Julius Heywinkel GmbH, [www.heytex.de](http://www.heytex.de),  
Wanddicken erhältlich in 22, 50, 67, 150, 200 und 335 mm

---

Für textile Lärmschutzwände bietet die Firma Girmes IN-TEX das TEXTFLEX-Zweiwandgewebe zum Verfüllen mit Quarzsand oder anderen mineralischen Materialien an.<sup>26</sup> Der besondere Vorteil liegt hierbei im geringen Flächengewicht von nur ca. 30kg/m<sup>2</sup> bei gleichzeitig hoher Luftschalldämmung (DIN 52210, Rw=38 dB).

### Schallabsorption

Der Einbau von Materialien wie Stoffe, Polstermöbel und Teppichböden, die schallabsorbierende Oberflächen besitzen hat sich als bewährte Methode der Raumdämpfung, d.h. Verkleinerung des Innenlärmpegels und der Nachhallzeit, herausgestellt. In moderner Architektur wird zunehmend schallhartes Glas- und Sichtbeton verbaut. Die Sprachverständlichkeit leidet unter hohen Innenraumlärmpegel und Nachhallzeiten von mehreren Sekunden. Besonders ungünstig wirken konkave Wandflächen, da sie den Schall fokussieren. Bei schlechter Sprachverständlichkeit wird instinktiv lauter gesprochen, da die niederfrequenten Grundtöne der Sprechenden sich mit den niedrigen Resonanzfrequenzen der Räume verstärken<sup>27</sup>, was die Gespräche sehr anstrengend macht. Hier helfen Tiefen- und Breitbandabsorber. Wenn kein Platz für opake Schallsabsorber vorhanden ist oder ein spezielles Absorberfrequenzspektrum benötigt wird, bieten sich Absorber aus transparenten Folien oder mikroperforierten transparenten Folien an. Bei mikroperforierten Folien schwingt die Luft in vielen, nebeneinander angeordneten Löchern als Masse zusammen mit der im Zwischenraum eingeschlossenen Luft als Feder in der Art eines Masse-Feder-Systems. Die Absorberfrequenz und der Wirkungsgrad kann rechnerisch durch die Wahl der Absorberdicke, Lochgröße und Lochabstand, Lagenzahl und Abstandsmaße im Voraus berechnet werden. Damit ist eine Pegeldämpfung um 4–5dB im Bereich zwischen 500 und 2.000Hz erreichbar und eine Halbierung der Nachhallzeit.

Aufgespannte oder frei hängende Folien, die gelocht und ungelocht als Breitbandabsorber Frequenzen zwischen 100 und 3.150Hz dämpfen, können auf Grund der hohen Absorberleistung und Unempfindlichkeit sogar in Schwimmbädern eingesetzt werden. Da sie transluzent sind, können sie sogar vor Glas und Sichtflächen montiert werden<sup>28</sup> [Sch04, Teil3].

### Schallreflexion

Neueste Untersuchungen an realisierten Bauten, etwa dem Domaquarée in Berlin, den Atrien des Technologiezentrums von Festo oder dem Parkbad Velbert zeigen, dass sich insbesondere die massearmen ETFE- Folien gegenüber Glas nachhallreduzierend und somit günstig auf die Raumakustik auswirken. Ein nachhallreduzierendes Polyestergewebe wird zum Beispiel von der Firma Kochmembranen angeboten.<sup>29</sup> Das Artex® Licht- und Akustikgewebe ist ein speziell für Licht- und Akustik-Membranstrukturen entwickeltes Gewebe, das sich durch die hervorragenden Licht- und Schallabsorptionseigenschaften sowie ihrer schwer Entflammbarkeit für Innenraumanwendungen eignet.

Bei der Sanierung einer Hauptschule in Bobingen wurden die auf der nächsten Seite abgebildeten Akustiksegel zur Akustikverbesserung der Aula realisiert (Abb.43 a,b) Durch die Einlage von Akustikplatten zwischen den zwei Membranflächen konnte eine Schallabsorption erzielt werden [Ims02].

26 [www.girmes-intex.de](http://www.girmes-intex.de)

27 bei Räumen < 120 qm liegt die Resonanzfrequenz zwischen 50 und 200 Hz

28 vgl. Freizeitbad „die Welle“, Gütersloh

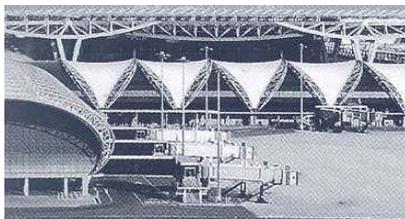
29 Koch Membranen, [www.kochmembranen.com](http://www.kochmembranen.com)

Eine weitere sehr aktuelle Membrankonstruktion, die sich durch hohe Schalldämmung auszeichnet, ist der Flughafenterminal in Bangkok von den Architekten Murphy / Jahn in Kooperation mit Werner Sobek. Das dreilagige Membranpaket besteht aus einer Außenmembran (teflonbeschichtetes Glasfasergewebe) einer beschichteten inneren Membranebene und dazwischen, auf einem Seilnetz angeordnet schalldämmende, transparente Polycarbonatplatten. Sie führen zu einer Schalldämpfung von 35dB [Hee06].

Abb. 43 a,b  
Akustiksegel Haupt-  
schule Bobingen  
[ImS02]



Abb. 44 a,b  
Flughafenterminal  
Bangkok  
[Detail 7/8 2006]



#### 1.6.4. Luftdichtheit

Membrane und Folien sind Luftdicht und bieten als Dampfsperre einen Widerstand gegen die Wasserdampfdiffusion. Luftdichtheit ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal von Gebäuden und die Voraussetzung für Behaglichkeit durch hohe Luftqualität und die Vermeidung von Zugluft. Sie führt zudem zur Reduzierung des Heizenergieverbrauchs. Bis zu 50% der Heizenergie moderner Gebäude wird zum Ausgleich von Lüftungswärmeverlusten benötigt [Tra06].

Der Begriff „Luftdichtheitsschicht“ ist in [DIN 4108] definiert als „Schicht, die die Luftströmung durch Bauteile hindurch verhindert“. Bei dieser Definition ist zunächst nicht gesagt, wo diese Schicht zu liegen hat. Die Prinzipskizzen<sup>30</sup> zeigen die Luftdichtheitsschicht jeweils auf der Warmseite der Gebäudehülle. Dort ist sie aus bauphysikalischer Sicht richtig untergebracht<sup>31</sup>. Zum Blockieren des Windes, als Schutz des Dämmmaterials vor Luftdurchströmung werden Unterspannbahnen eingebaut. Die Unterspannbahn liegt außen und stellt Winddichtheit her. An die Luftdichtheit der Unterspannbahn gibt es keine besonderen Anforderungen. Sie wird überlappend verlegt. Wichtig ist, dass sie diffusionsoffen ist. Es darf keine Dampfsperre sein.

#### 1.6.5. Lichttechnische Eigenschaften

Die Faszination der Membrane und Folien, ihre Leichtigkeit und Dynamik, liegt vor allem in ihrer Transluzenz und Transparenz begründet. Um ihre Funktionsweise besser zu verstehen sollen in diesem Kapitel die lichttechnischen Eigenschaften dieser Materialien untersucht werden.

<sup>30</sup> Punkt 7 der genannten Norm

<sup>31</sup> Vermeidung von Feuchteschäden durch Kondensation

---

## Licht

Strahlung, egal ob von der Sonne oder einer künstlichen Lichtquelle, entsteht durch die Emission von Photonen aus einem erhitzten Festkörper. Wellenlängen zwischen 380nm (violett) und 780nm (rot) sind für den Menschen als Licht sichtbar. Ultraviolett-Strahlung UV-A (315–380nm) ist dagegen nicht mehr zu sehen. Diese Strahlung wird durch herkömmliches Fensterglas, aber auch ETFE Folien durchgelassen. Es schädigt Farben und Gewebe und lässt die Haut altern. Die noch kurzwelligere UV-B-Strahlung (280–315nm) durchdringt ETFE-Folien und Spezialglas, bräunt und verursacht bei Überdosis Hautkrebs, entkeimt und wird für die Bildung von Vitamin D gebraucht. Im Strahlungsspektrum davor befindet sich die UV-C Strahlung (100–280nm). Sie wird, bei intakter Atmosphäre von der Ozonschicht vollständig absorbiert. Im Gegensatz zur kurzwelligen UV-Strahlung ist die langwelligere Infrarotstrahlung (IR) (800nm–1mm) auf der Haut als Wärmestrahlung spürbar. Der Treibhauseffekt in Glasbauten funktioniert durch die selektive Durchlässigkeit von Glas, das kurzwellige IR-Strahlung passieren lässt, die von den erwärmten Bauteilen zurückgesendete langwelligere Wärmestrahlung (3000nm–0,4mm) aber reflektiert und nicht durchlässt.

Von der Sonne erreichen uns an einem Sommertag 100.000lx, an einem bedeckten Sommertag 5.000–20.000lx, an einem sonnigen Wintertag 10.000 lx, an einem trüben Wintertag 400lx, bei Vollmond 1lx. Das menschliche Auge erkennt Farben ab 3lx, die Arbeitsstättenrichtlinie nennt 100lx für Aufenthaltsräume, 300–500lx für Büros, 1.000lx für feinmechanische Arbeiten. Bei einer Transluzenz der Gebäudehülle von 5–10% (Traglufthalle für Tennis aus PES/PVC Membrane) ist folglich an allen Sommertagen ausreichend Licht vorhanden, sodass tagsüber auf eine zusätzliche Beleuchtung verzichtet werden kann. [Sch04]

### Transmission, Reflexion, Absorption

Membrane und Folien verhalten sich je nach Zusammensetzung des Materials unterschiedlich. Deutlicher Unterschied ist, dass die Membran transluzent ist, die Folie dagegen transparent hergestellt werden kann. Transmission, Reflexion und auch Absorption von Strahlung muss also werkstoffabhängig ermittelt werden.

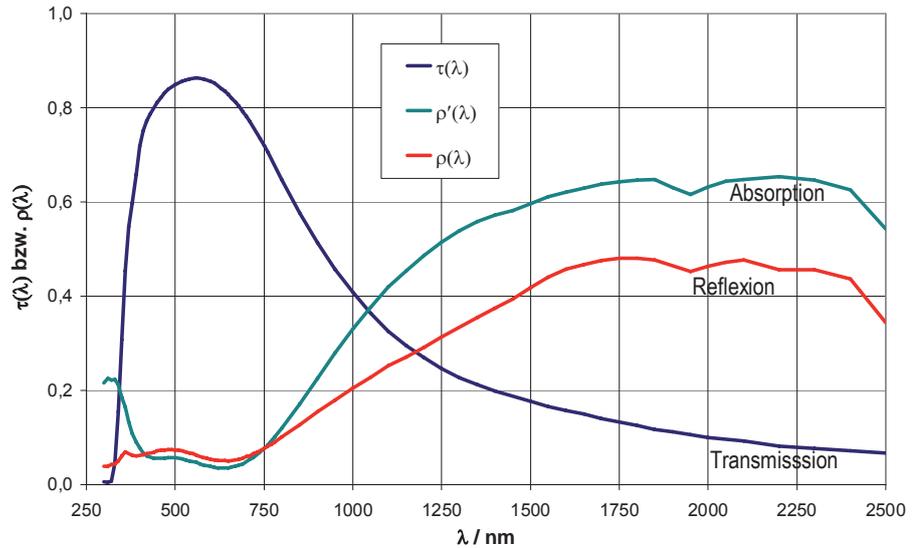
Dabei bieten Membrane und Folien eine Bandbreite von Lichttransmission. Sie kann bei opaken, beschichteten Geweben bei 0% liegen, transparente Folien weisen dagegen Transmissionswerte bis zu 95% auf. Ein fünfprozentige Lichtdurchlässigkeit des Daches erzielt bereits eine so helle Atmosphäre, dass künstliches Licht überflüssig wird.

Für den Energieeintrag in das Gebäude, aber auch für Beleuchtungszwecke, ist in erster Linie die Transmission von Bedeutung. Sie bestimmt wie viel Strahlung durch das Bauteil fällt. Neben der direkten Strahlungstransmission absorbiert das Bauteil zudem Strahlung, die in Wärme umgewandelt wird. Dieses Verhalten wird über Absorptionsgrade angegeben. Der Verbleib dieser Wärme wird durch die Reflexionseigenschaft des Bauteils bestimmt. Ein hoher Reflexionsgrad führt zu geringen Wärmeverlusten nach Außen.

Für eine energieoptimierte Fassade sollte das Bauteil also eine hohe Transmission im sichtbaren Strahlungsbereich aufweisen, eine gute Absorptionseigenschaft aufweisen und dazu eine hohe Reflexion im langwelligen Strahlungsbereich besitzen.

Optimiert wurden diese Eigenschaften bei Wärmeschutzverglasungen. Zum Vergleich nachstehend die spektralen Kennzahlen des Wärmeschutzglases:

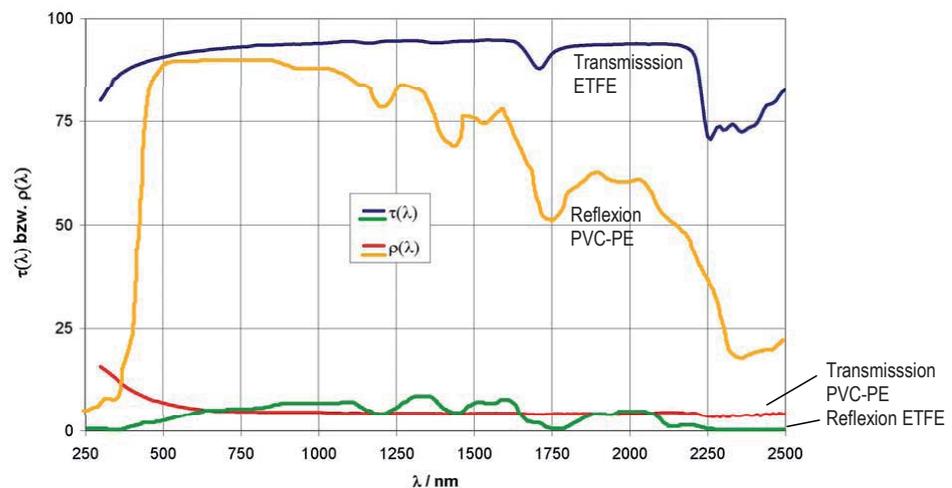
Abb. 45  
Strahlungseigen-  
schaften von  
Wärmeschutzglas  
Institut für Lichttech-  
nik, TU-Berlin



Das Wärmeschutzglas zeichnet sich durch hohe Transmissionswerte im sichtbaren Strahlungsspektrum zwischen 380nm und 780nm aus. Im Bereich langwelliger Strahlung steigt dagegen der Absorptions- und Reflexionsgrad.

Dem gegenüber verdeutlichen die Messungen der Strahlungseigenschaften an PVC-PE Membranen, durchgeführt durch das Laboratorium Blum und ETFE Folien, durchgeführt am Institut für Lichttechnik an der TU-Berlin, die Charakteristik dieser beiden Materialien.

Abb. 46  
Strahlungseigen-  
schaften von ETFE-  
Folie und PVC-PE  
Membran.



Das hier getestete PVC-PE weist eine Strahlungstransmission im sichtbaren Spektralbereich von ca. 8% auf. Die Werte können je nach Hersteller und Typ zwischen 5 bis 20% differieren. Dagegen ist der Reflexionsgrad sehr hoch. ETFE, als transparentes Material, verhält sich gegenteilig. Mit bis zu 95% Transmissionsfähigkeit ist es sehr Strahlungsdurchlässig, die Reflexionsgrade dagegen laufen gegen Null. Für den Einsatz im Fassadenbereich ist festzuhalten, dass für die Deckung des Tageslichtes, beide Materialien geeignet sind. ETFE Fassaden sind auf jeden Fall mit einer Verschattung zu versehen. Für den Energieeintrag ist die ETFE Folie deutlich günstiger. Die hohe Transmission ermöglicht hohe Strahlungseinträge. PVC-PE Fassaden ermöglichen weit geringere Strahlungserträge.

So gut die Strahlungstransmission der ETFE Folie ist, so kritisch muss dagegen ihr Verhalten der Wärmespeicherung gesehen werden. Die Reflexion der Strahlungswärme im langwelligem Bereich ist hierfür verantwortlich. Sie verläuft wie nachstehend dargestellt:

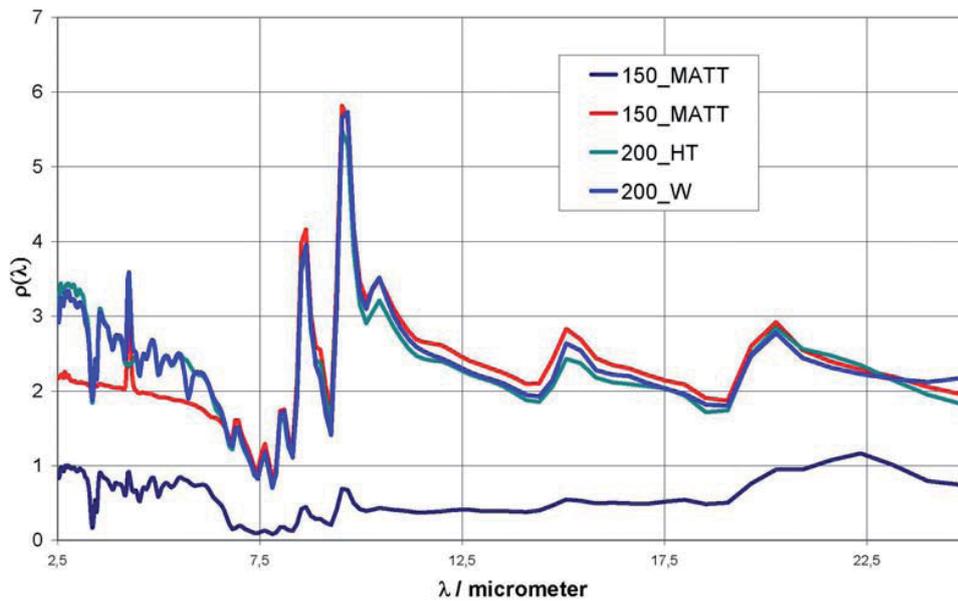


Abb. 47  
Strahlungseigen-  
schaften von ETFE-  
Folie im langwelligen  
Bereich

Mit einem maximal fünfprozentigen Reflexionsgrad ist der Wärmeverlust der absorbierten Strahlung aus dem Bauteil sehr hoch. Wärmeschutzverglasungen weisen in diesem Bereich bis zu 90% auf. Eine Beschichtung von Folie und PVC Membran, analog der Aluminiumbedampfung von Wärmeschutzgläsern könnte diese Eigenschaften verbessern, die Beschichtungen müssen jedoch auf die hohe Verformbarkeit der Materialien angepasst werden. Diesen Ansprüchen wird eine von der Firma Dunmore<sup>32</sup> entwickelt Aluminium Beschichtung, mit einer ITO Schutzlackierung gerecht. Die Aluminiumbeschichtung erhöht dabei das Reflexionsvermögen des Materials. Nachteilig an dieser Behandlung ist jedoch, dass gleichzeitig die Transmission der Folie reduziert wird. Die nachstehenden Strahlungsspektren verdeutlichen diesen Zusammenhang:

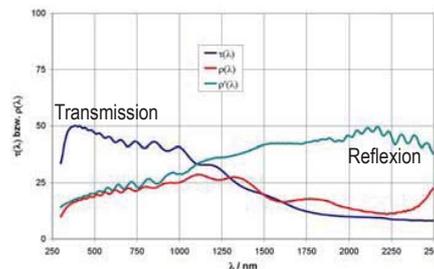
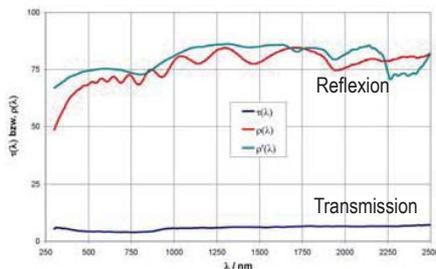
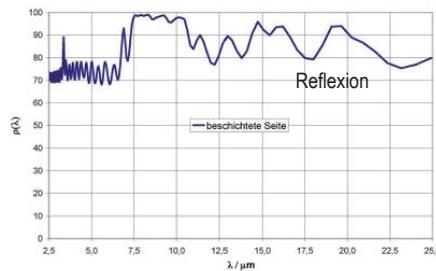


Abb. 48 a,b  
Strahlungseigen-  
schaften von  
a) Aluminiumbeschich-  
teter ETFE-Folie  
b) Aluminium und ITO-  
beschichtete ETFE  
Folie

Muster 1 (Abb.48a) ist eine 0,05mm starke ETFE Folie, Aluminium beschichtet. Die Aluminiumbeschichtung führt zu einem Ansteigen des Reflexionsgrades, nachteilig dabei die gleichzeitige, drastische Reduzierung des Transmissionsgrades. Diese also gegensätzlich wirkenden Eigenschaften können durch eine nachträgliche ITO Beschichtung angeglichen werden. Muster 2 (Abb.48b) zeigt das Strahlungsverhalten einer Aluminium- und ITO-beschichteten ETFE-Folie. Trotz einer fast 50 prozentigen Transmission können hohe Reflexionswerte gerade im Langwelligen Wärmestrahlungsbereich verzeichnet werden. Hierfür eine detaillierte Betrachtung des Wärmestrahlungsspektrums das zwischen 2,5 und 25 Mikrometern liegt:

32 Dunmore Europe GmbH, Freiburg

Abb.49  
Wärmestrahlungsspektrum der Aluminium- und ITO-beschichteten ETFE-Folie

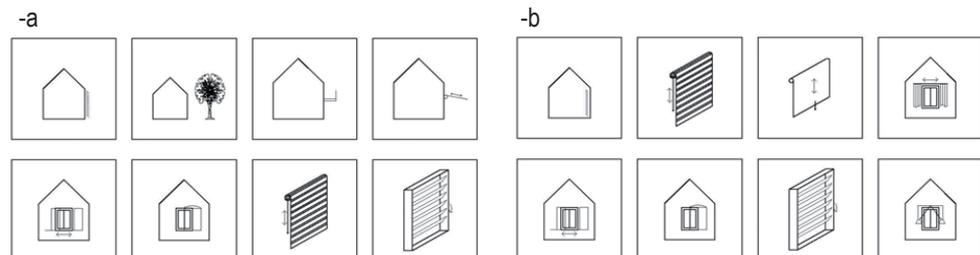


Eine kombinierte Aluminium-ITO Beschichtung von ETFE Folien führt also zu Folieneigenschaften, die ähnlich von Wärmeschutzglas hohe Reflexionsgrade im langwelligen Wärmestrahlungsbereich aufweisen, und mit 50% noch eine hohe Lichttransmission im sichtbaren Strahlungsspektrum zulassen.

Die Entwicklung von Low-E-Folien hat also gerade erst begonnen. Dagegen werden Low-E-Membrane bereits serienreif eingesetzt. Beispiel hierfür ist die äußere Membranlage des Flughafenterminals in Bangkok, entwickelt und ausgeführt von der Firma Hightex Engineering GmbH [Hee06].

Dadurch, dass die Eigenschaften von Transmission und Absorption einander ausschließen, liegt das Optimum entweder in diesen aufwendigen Behandlungen des Fassadenmaterials, oder in einfacheren Sonnen- und Wärmeschutzvorrichtungen, wie Rollos oder Jalousien, die je nach Tages- und Jahreszeit die Fassade innen, bzw. außen schließen und auf diese Weise überschüssige Strahlung reflektieren oder vor Abkühlung des Gebäudeinneren schützen.

Tabelle 1.11.  
-a außen- und  
-b innenliegende  
Sonnenschutz-  
elemente



Die nachfolgende Tabellen 1.12 bis 1.15 fassen die Messergebnisse für gängige Membran und Folienstoffe abschließend zusammen, sie wurden in [Sch04] veröffentlicht.

Die Materialangaben zu Lichteigenschaften sind Designwerte. Da unterschiedliche Messungen und Bewertungsmethoden verwendet wurden, sind die Zahlen nur eingeschränkt vergleichbar.

Messmethode: ASHRAE 74-79		Ferrari 702T2, Typ I	Ferrari 1502T2, Typ V
Sichtb. Licht 340-780 nm	Transmission	14%	6%
UV	Transmission	0%	0%

Tabelle 1.12.  
PES/PVC-Gewebe

PES/PVC-Gewebe in Weiß für Membrankonstruktionen, Traglufthallen, Bierzelte, Chapiteaus in B1

Messmethode: DIN EN 410		Verseidag Typ 18039	Verseidag Typ 18059
Sichtb Licht 380-780 nm	Transmission	17%	11%
Sichtb Licht 380-780 nm	Reflexion	77%	80%
UV	Transmission	0,1%	0,1%

Tabelle 1.13.  
PTFE-Glasgewebe

PTFE-Glasgewebe für Membranbauten, Luftkissen in A2/B1

Messmethode: ASTM E903		4T20	4T40
Sichtb.Licht 450-650 nm	Transmission	19%	38%
Sichtb. Licht 450-650 nm	Reflexion	81%	62%
UV-Licht 350 nm	Transmission	1%	32%
UV-Licht 350 nm	Reflexion	33%	67%

Tabelle 1.14.  
PTFE-Gewebe

PTFE-Gewebe für Lichtdecken und Messestände von Gore, Rk K/S 4200/4000 N/5cm in B1

Messmethode: DIN 5036- Ulbrichtkugel mit Glühlampe		Nowoflon 6235 Klar 200 my	Nowoflon 6235 Weiß 200 my
Sichtb Licht 380-780 nm	Transmission	95%	40-50%
Sichtb Licht 380-780 nm	Streulicht	10%	40-45%
Sichtb Licht 380-780 nm	Geradliniger Lichtdurchgang	85%	5%
Energiedurchlassgrad		92%	
		Nowoflon 6235 klar 100 my	Nowoflon 6235 Weiß 200 my
UV-A 320-380 nm	Transmission	83%	7%
UV-B 280-320 nm	Transmission	<60%	<5
Opazität		7%	50%

Tabelle 1.15.  
ETFE-Folien

ETFE-Folien für Gewächshäuser, Tiergehege, Schwimmbäder, Solarkollektoren von Nowoflon in B1

## Transparenz

Die Angaben zur Transparenz können aus den Transmissionswerten, im sichtbaren Spektrum des Lichts, abgelesen werden. Die Lichtdurchlässigkeit eines PVC-beschichteten Gewebes liegt bei ungefähr 5-10%. Die Lichtdurchlässigkeit von PTFE-beschichteten Glasfasergeweben liegt bei 8-12 %. [Blu02]. ETFE-Folien weisen eine bis zu 99 prozentige Transparenz auf.

## UV Beständigkeit

Die heute gängigen Membrane aus Folien oder beschichteten Geweben für den Außenbereich sind sowohl UV- als auch witterungsbeständig. Weichmacherfreie Materialien aus reinen Fluorkunststoffen wie PTFE beschichtete Glasgewebe oder ETFE Folien zeigen selbst nach 25 Jahren keine nennenswerte Qualitätsminderung durch Sonne oder Witterung. Auch PVC-Materialien haben sich im Praxiseinsatz zwanzig Jahre lang bewährt, allerdings wegen ihrer Verschmutzungsanfälligkeit mit Einschränkungen beim optischen Erscheinungsbild. [Koc04]

## Gestaltung

Die optischen Eigenschaften der Membrane und Folien sind auch für ihre Gestaltung von Interesse. Bei bereits 5% Transluzenz sind von innen beleuchtete Membranhüllen bei Nacht weithin sichtbar. Die Allianz Arena erzeugt mit ihren hinterleuchteten ETFE-Kissenstrukturen ein solches Farbenspiel.<sup>33</sup> Mit Auflicht, Durchlicht und Streiflicht, mit weißem oder farbigem Licht, mit Kunst- oder mit Sonnenlicht kann die Textur und die

33 <http://www.foiltec.de/deu/symposium/ctfoa-vortrag-ifes.pdf>

Topologie der Membranbauten ins Vielfache gesteigert oder auch aufgelöst werden. Einige Bauten, etwa der Busbahnhof in Offenburg oder die Reichstagsverhüllung sind Gesamtkunstwerke, bei denen die Transparenz, Transluzenz und Reflexion der Hüllwerkstoffe die Basis für die Interaktion mit Form und Licht ist.

Membrane, vor allem die PVC- beschichteten Polyestergewebe sind in ihrer Farbgestaltung beliebig, ihre Einfärbung ist in jeder erdenklichen Farbe möglich. Die gebräuchlichen Farbpigmente sind farb- und lichtecht, schwermetallfrei und umweltfreundlich. Für andere Gewebe ist die Farbpalette eingeschränkter.

Die Entwicklung der LCD-Technik wird ganz neue Möglichkeiten eröffnen: „Wenn diese, heute noch teurer Teil unseres Notebook-Computers, in vielleicht 5 Jahren so billig sind wie Küchenfolie aus Aluminium, können Gläser standardmäßig damit beschichtet werden. Die Grenzen zwischen Wand, Fenster und Dach verschwimmen: Die intelligente Glasscheibe ändert Farbe und Durchlässigkeit nach der Tageszeit, der Sonne, der Funktion, ist Vorhang, Jalousie und Werbetafel in einem. Damit können Läden, Büro, Bibliotheken, Fertigungsstätten mit einheitlichen, industriell vorgefertigten Hüllelementen, die sich gesteuert oder chamäleonhaft ihrer Aufgabe anpassen, eingekleidet werden. Das ergibt neue Dimensionen für das Vokabular des architektonischen Entwurfs“ [Cov07].



## 2. Membranhülle Gebäudesysteme

### 2.1. Das Gebäudekonzept

2.1.1. Wärmeschutzkonzept

2.1.2. Raumklima

2.1.3. Belichtung, Belüftung, Überhitzung

### 2.2. Energieeinsparpotenziale

2.2.1. Gebäudedefinition

2.2.2. Parameterstudien

2.2.3. Gebäudevarianten

2.2.4. Jahrestemperaturbilanz der Zwischenzone

2.2.5. Energiebilanzierung nach EnEV04

### 2.3. Strömungssimulationen

2.3.1. Modellbeschreibung

2.3.2. Variationen

---

## 2. Membranhülle Gebäudesysteme

Ziel der Arbeit ist es, eine neue Anwendung für den mechanisch vorgespannten Membranbau zu entwickeln. Wie bereits in der Einführung dieser Arbeit dargelegt, beschränkt sich sein Einsatz bisher auf Projekte mit geringen Anforderungen. Größtenteils werden mechanisch vorgespannte Membrankonstruktionen für einfache Überdachungen, gering oder nicht gedämmte Pavillons, Zelte oder als bloße Dekoration verwendet. Verantwortlich für dieses Nischendasein dieser Konstruktion sind ihre gekrümmten Geometrien, die nur schwer mit der herkömmlich, rechtwinkligen Gebäudekubaturen zu verbinden sind, die geringe Materialstärke und Biegeweichheit des Materials sowie den fehlenden wärme- oder schalldämmenden Eigenschaften der Membrane.

Die Qualitäten der Membran liegen in ihrer Leichtigkeit, Lichtdurchlässigkeit und dynamischen Form. Um diese Vorzüge vermehrt in die Architektur einbinden zu können wird in dieser Arbeit eine Anwendungsmöglichkeit vorgestellt, die trotz der beschriebenen Nachteile der Membran, einen sinnvollen Einsatz des Materials ermöglicht: Das membranumhüllte Gebäudesystem.

Das membranumhüllte Gebäudesystem zeichnet sich durch eine Dopplung von Fassade und Dach aus, die durch eine Membrane Umhüllung des Gebäudes erfolgt. Es entsteht eine Zone zwischen Gebäudewand und Membranhülle, die als Wärme- und Schallschutzpuffer funktioniert. Diese und weitere vorteilhafte bauphysikalische Eigenschaften der membranumhüllten Gebäudesysteme werden im Folgenden vorgestellt.

### 2.1. Das Gebäudekonzept

Die Membranumhüllten Gebäudesysteme reihen sich ein in die Entwicklung der Glasdoppelfassaden. Das Ziel einer Optimierung von Raumkomfort und gleichzeitiger Reduzierung des Energieverbrauchs steht bei beiden Konzepten im Vordergrund. Glasdoppelfassaden schaffen durch das Vorhängen einer Einfachverglasung als Windbarriere einen Fassadenzwischenraum mit integrierten beweglichen Sonnenschutz als Wintergarten. Dies verbessert Schall-, Wärme und Sonnenschutzigenschaften der Fassade. Die Erfahrungen der Anwendungen zeigen jedoch, dass die Glasdoppelfassade bei niedrigen und hohen Außenlufttemperaturen an ihre Grenzen stoßen. Ausführliche Entwicklungen und Probleme werden in [Boh04] [Oes01] beschrieben.

Eine Weiterentwicklung der Glasdoppelfassade sind die Hybridfassaden. Ihr wesentlicher Unterschied besteht in der Reduzierung aufwändiger Technik. Anstelle herkömmlicher Vollklimaanlagen erfolgt bei diesem Konzept die Frischluftversorgung mit geringem Luftwechsel nach dem Prinzip der Quelllüftung, ohne Zugscheinungen und die Raumkühlung über eine mit Kaltwasser gespeiste Kühldecke. Eine natürliche Belüftungsmöglichkeit ist vorgesehen. „Hybridfassaden stellen sich nicht mehr als starre undurchlässige Grenze zwischen Raum und Umgebung dar, sondern als semipermeable Membran mit dynamischen Eigenschaften, welche negative Außeneinflüsse (Regen, Sturm, Hitze, Kälte und Lärm) reduziert und die positiven (Sonne, Licht, Luft) so weit wie möglich und sinnvoll zur natürlichen Beheizung, Beleuchtung und Belüftung nutzt.“ [Heu05]

Membranumhüllte Gebäude folgen den Prinzipien der Hybridfassade. Als zweite Gebäudehülle umhüllen sie ein Gebäude und spannen so einen Gebäudewischenraum auf, der als thermische Pufferzone die Wärmeenergieverluste des Gebäudes

reduziert. Mit nutzerfreundlichen Konzepten, sind dabei natürliche Belichtung und Belüftung jederzeit möglich, auf den Einsatz von technischer Gebäudesteuerung kann verzichtet werden. Die Membran, als gewichtsoptimierter Baustoff, erzielt dabei durch ihr geringes Eigengewicht hohe Wirtschaftlichkeit. Neben der Leichtigkeit des Materials profitieren membranumhüllte Gebäude von ihrer Transluzenz und Winddichtigkeit. Die Verwendung von Folien ermöglicht darüber hinaus Transparenz und UV-Durchlässigkeit.

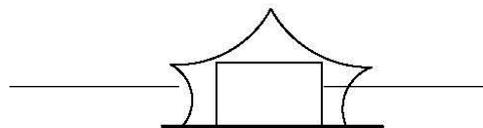
Nachteilig dagegen ist, dass Membran- und Folienbaustoffe Aspekte der Wärme- und Schallsolierung, der Einbruchesicherheit und Diffusionsoffenheit nicht erfüllen.

Die membranumhüllten Gebäudesysteme ermöglichen durch eine Dopplung der Gebäudehülle die Verwendung dieser Werkstoffe: Membran und Folie wirken als Wetterschutz, sie bilden den äußeren Raumabschluss und lassen ausreichend Licht und UV-Strahlung ins Gebäudeinnere. Wind und Schneelasten werden jedoch direkt an die primäre Tragkonstruktion des Gebäudes weitergeleitet. Sie ist konventionell aufgebaut und übernimmt neben dem Lastabtrag des Gebäudes, die Schall- und Wärmeisolierung des Gebäudes. Sie bietet Einbruchschutz und stellt einen Energiespeicher für solare Wärmegevinne.

Nachstehend die Funktionenverteilung von primär-konventioneller Gebäudehülle und sekundär-vorgeschaalteter Membran-, bzw Folienhülle.

Abb. 50  
Eigenschaften  
der gedoppelten  
Gebäudehülle

leicht  
transluzent  
transparent  
UV-durchlässig  
winddicht  
wasserabweisend  
selbsttragend



Geschoßlasten abtragend  
wärmeisolierend  
schallsolierend  
einbruchesicher  
diffusionsoffen  
energiespeicherfähig

Die Vorteile dieser Fassadendopplung durch eine Membranhülle sind vielfältig. Architektonisch können Fassaden bei der Verwendung der zweiachsig gekrümmten Oberflächen der Membran durch hohe Plastizität und räumlicher Tiefe neue Formensprachen aufzeigen, die eine hohe visuelle Leichtigkeit besitzt. Auch unter Verwendung von Kunstlichtsystemen ergeben sich neue gestalterische Möglichkeiten dieser Gebäudesysteme. Die Membran-, bzw. Folienfassaden kann als adaptierbare, sich verändernde Fassade ausgeführt werden. So wird aus der statisch unveränderlichen Ansicht eines Gebäudes, ein sich nach Klimaverhältnissen und den Nutzungsanforderungen veränderndes Erscheinungsbild entstehen. Bedruckung, farbliche Gestaltung und der Einsatz als Werbemedium schließen den Kanon der Möglichkeiten der Membranfassade ab.

Die Leichtigkeit des Materials reduziert notwendige Unterkonstruktionen. Es resultiert eine Fassadenkonstruktion die weit wirtschaftlicher herzustellen ist, als vergleichbare Glasfassaden.

Bauphysikalisch ermöglicht diese Konstruktionsweise Verbesserungen im Bereich des Wärmeschutzes. Er führt zu Absenkung des Energieverbrauchs. Der Feuchtigkeitsschutz der Bauteile wird erhöht und vor allem kann ein natürliches, gesundes Raumklima des Gebäudes erzielt werden.

Nachstehend ein schematisches Konstruktionsprinzip der Gebäudedoppelhülle. In Kombination einer äußeren biegeweichen Membranhülle mit einer innenliegenden Wand aus biegesteifen, tragenden Materialien und Dämmstoffen, entsteht eine Membrandoppelfassade. Die innere Hülle ist geschützt durch die äußere Membran. Zwischen Innen- und Außenhülle entsteht eine dämmende Zwischenzone.

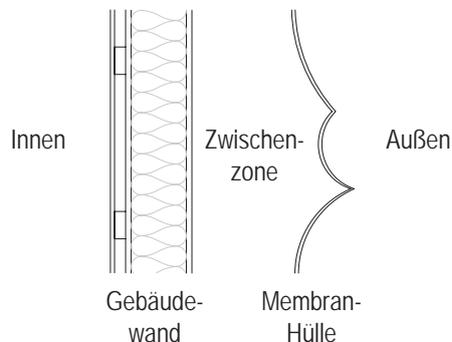


Abb. 51  
schematischer  
Fassadeaufbau

### 2.1.1. Wärmeschutzkonzept

Bevor in den folgenden Kapiteln ausführlicher auf bauphysikalische Eigenschaften eingegangen wird und hierzu Studien entwickelt werden, folgt nachstehend eine Zusammenfassung der Funktionsweise membranumhüllter Gebäudesysteme.

Die zweite Gebäudehülle funktioniert als Solarfalle des Gebäudes. Die Membran wird durch die solare Strahlung am Tag erwärmt. Das lichtdurchlässige Membranmaterial absorbiert die Strahlung. Die Luftschicht in der Pufferzone wird erwärmt. Sie bildet eine zweite Isolationsschicht für das Gebäude und trägt deutlich zur Minimierung der Wärmeverluste des Gebäudes bei. Die innen liegende Gebäudewand dient nicht nur statischen Funktionen. Sie ist eine zweite wärmedämmende Schicht für die innen liegenden Räume und kann zudem die einfallende solare Strahlung aufnehmen und als Wärmespeicher genutzt werden [Hau04, S.160]. Auch der Boden der Zwischenzone funktioniert als aktiver Speicher.<sup>36</sup> Tagsüber nimmt er die Strahlungsenergie auf und gibt sie nachts ab an die Zwischenzone, sodass auch ohne Sonnenstrahlung die Zwischenzone aktiviert wird.

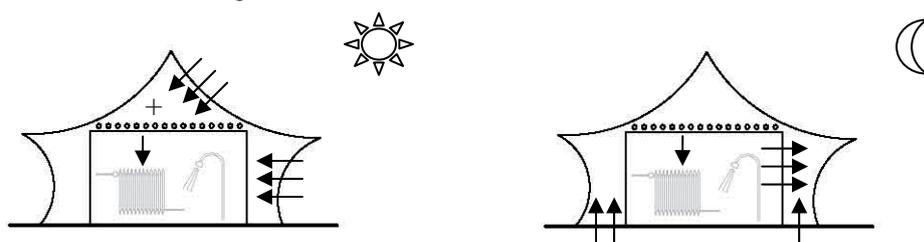


Abb. 52 a,b  
Wärmeschutzkonzept

Energiegewinne werden außerdem durch die Installation von Sonnenkollektoren erzielt. Auf dem Dach oder der Wand des Innengebäudes werden Absorberschläuche verlegt. Sie speichern die Strahlungswärme im Wasser. Mit dieser Energie kann die Warmwasseraufbereitung sowie die installierte Wandheizung des Gebäudes betrieben werden.

<sup>36</sup> Da die passive Speicherung von Wärme (Kälte) im Raum durch die Konstruktion des Gebäudes und das thermische Verhalten der Materialien begrenzt ist, liegt die Überlegung nahe, zusätzliche Speicher im, neben oder unter dem Gebäude einzurichten. Solche Ansätze sind schon zahlreich untersucht worden. Typisch sind z.B. die Anfang der 1980er Jahre entwickelten Konzepte mit Kiesspeicher [Boh04] Seite 27. Weiterführende Informationen in [Fis01] und [www.solarserver.de](http://www.solarserver.de)



gedämmte innere Gebäudehülle, die, genauso wie sie im Winter der Auskühlung vorbeugt, im Sommer das Eindringen der Wärme reduziert. In Kombination dieser Gebäudeeigenschaften erzielt das membranumhüllte Gebäude einen wirksamen Schutz gegen überhöhte Temperaturen. Ihr Aufbau versucht die positiven Aspekte einer Glasdoppelfassade zu nutzen, stellt der problematischen Überhitzung jedoch konstruktiv ein völlig anderes Konzept gegenüber, um die Fehler einer Doppelfassade zu vermeiden.

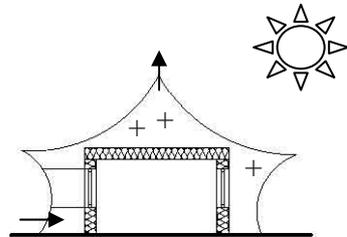


Abb.54  
Belüftung

Die Belüftung des Gebäudeinneren erfolgt über Fensteröffnung. Im Gegensatz zu Niedrigenergiehäusern, in denen ein Öffnen der Fenster zugunsten der Energieeinsparung durch Lüftungsanlagen ersetzt wird, versucht dieses Gebäudekonzept dem natürlichen Lüftungsverhalten der Menschen zu entsprechen und Lüftung durch das Öffnen der Fenster, oder Lüftungsklappen zu ermöglichen. Im Sommer können dabei die Fenster mit direktem Außenkontakt geöffnet werden. So kann Frischluft in das Haus gelangen und nachts zur Kühlung des Hauses beitragen. Im Winter dagegen würde das Lüften über diese Fenster zu hohen Energieverlusten des Gebäudes führen. Ist es draußen kalt, können die „Winterfenster“ geöffnet werden. Sie haben keinen Kontakt nach Außen, sondern Lüften nur in die Zwischenzone des Hauses, sodass die vorgewärmte Luft der Zwischenzone als Frischluftzufuhr für die Innenräume genutzt wird. Das Belüftungskonzept zieht darüber hinaus in Betracht, dass der winterliche Lüftungsbedarf dieses Gebäudekonzeptes minimiert werden kann. Dadurch dass über die diffusionsoffenen Gebäudeaußenwände die schädliche und geruchsbelastete Luftfeuchte automatisch abgeführt wird kann auf vermehrte Fensterlüftung oder Lüftungsanlagen verzichtet werden. Nachstehend eine Prinzipskizze von „Winter-“ und „Sommerfenster“ der membranumhüllten Gebäudesysteme.

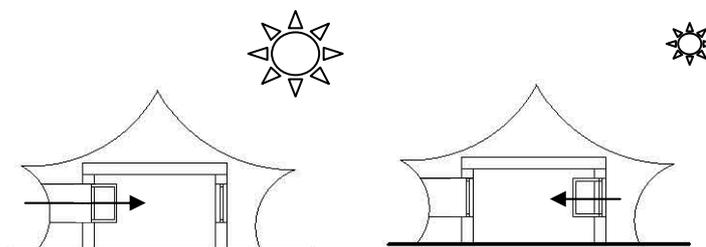


Abb. 55 a,b  
Konzept der Winter-  
und Sommerfenster

Die Belichtung des Gebäudeinneren erfolgt zum einen direkt über die Sommerfenster, zum anderen, indirekt auch durch die Winterfenster. Die Zwischenzone ist durch die Transluzenz der Membran ausreichend mit natürlichem Tageslicht versorgt. So kann Tageslicht auch durch die Winterfenster in das Gebäude gelangen.

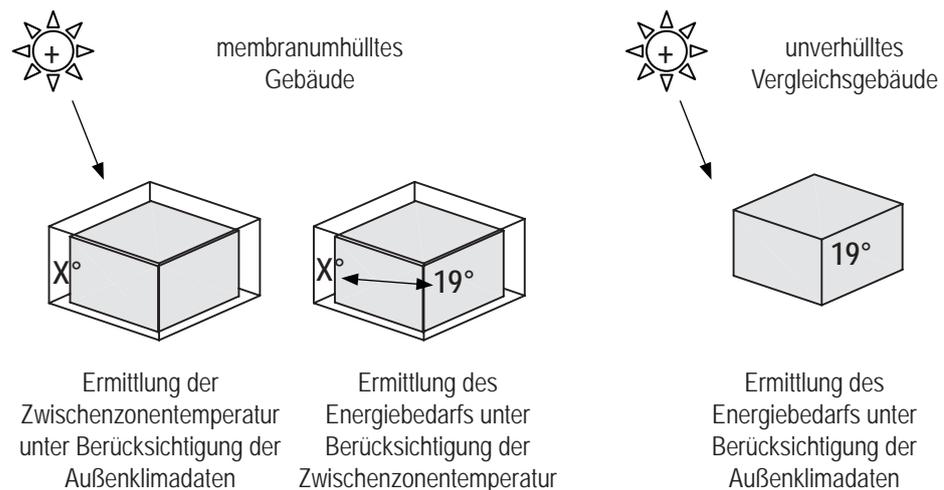
## 2.2. Energieeinsparpotenziale

Die membranumhüllten Gebäudesysteme werden in den folgenden Studien auf ihren Heizwärme- und Primärenergiebedarf hin untersucht. Durch einen direkten Vergleich desselben Gebäudes ohne Berücksichtigung der zweiten Gebäudehülle können Aussagen zum Energieeinsparpotenzial der Gebäudehülle getroffen werden.

Die Gebäudesimulation wird auf Grundlage der Energieeinsparverordnung 2004 [EnEV04] durchgeführt. Hierfür wird die Software DÄMMWERK verwendet [Ker07].

Die Vorgehensweise sieht dabei folgendermaßen aus: Der doppelte Fassadenaufbau der membranumhüllten Gebäude wird durch eine Berechnung in zwei Schritten simuliert. Zuerst wird die Temperaturverlaufskurve unter Berücksichtigung örtlicher Klimadaten und den Eigenschaften der Membranhülle in der Zwischenzone ermittelt. Anschließend können diese Werte dann als künstliche Außenklimadaten in eine herkömmliche Energiebilanzierung nach EnEV einfließen und den Energiebedarf des Gebäudes klären. Verglichen wird dieser Bedarf mit dem eines unverhüllten Vergleichsgebäudes. Sein Energiebedarf wird auf herkömmliche Weise, durch direktes Ansetzen der Außenklimadaten errechnet, eine Abminderung dieser Werte entfällt, da keine zweite Hülle das Gebäude schützt.

Abb. 56 a-c  
Vorgehensweise:  
Zuerst wird die Temperatur der Zwischenzone ermittelt, im zweiten Schritt erfolgt die Energiebilanz des Gebäudes unter Berücksichtigung des künstlich erzeugten Klimas



Für diese Berechnung sind folgende Festlegungen zu treffen: Zuerst muß das Gebäude in seinen Abmessungen, seiner Kubatur, Öffnungen und Ausrichtung bestimmt werden. Die wichtigsten Außenbauteile werden definiert und ihre bauphysikalischen Eigenschaften festgelegt. Anschließend wird eine Haus- und Anlagentechnik bestimmt. Unter Berücksichtigung dieser Werte kann im Folgenden eine Ermittlung der solaren Gewinne für die Zwischenzone durchgeführt werden. Durch Variation bestimmter Eigenschaften der Gebäudehülle, die im Kapitel 2.2.3 durchgeführt werden, können Aussagen zur ihrer Optimierung getroffen werden. Anschließend werden sechs unterschiedlich optimierte membranumhüllte Gebäude entwickelt. Ihr Energiebedarf wird dem des unverhüllten Gebäudes gegenübergestellt.

### 2.2.1. Gebäudedefinition

Die Grundgeometrie des Versuchsgebäudes ist ein Kubus mit einer Grundfläche von 10x10m, die Gebäudehöhe liegt bei 7m. Innerhalb dieses Kubus liegt umlaufend eine Zwischenzone von 1m Breite, die auch im Dachbereich das Innengebäude von

der Außenhülle trennt. Daraus resultieren die Maße von 8x8x6m für das eingestellte Innengebäude. Als Standort des Gebäudes wurde Berlin festgelegt, mit gemittelten Durchschnittsklimawerten des Deutschen Wetterdienstes, die in den Jahren 1991-2006 zwischen -1,3°C und 24,7°C lagen. [Dwd06].

Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
-1,3	-1,0	1,3	4,8	9,4	12,3	14,8	14,7	10,7	6,3	1,9	-1,0
3,7	5,0	8,7	14,4	19,3	22,1	24,5	24,7	19,3	13,7	7,0	3,5

Tabelle 2.1.  
Gemittelter Durchschnittswert aus den Daten des Deutschen Wetterdienstes Station Berlin Tempelhof

Als relevante Klimadaten wurde zudem Luftfeuchtigkeit von durchschnittlich 70% angenommen und ein Reflexionsgrad der Erdoberfläche von Null. Nachstehend eine Skizze von Grundriss und Ansicht.

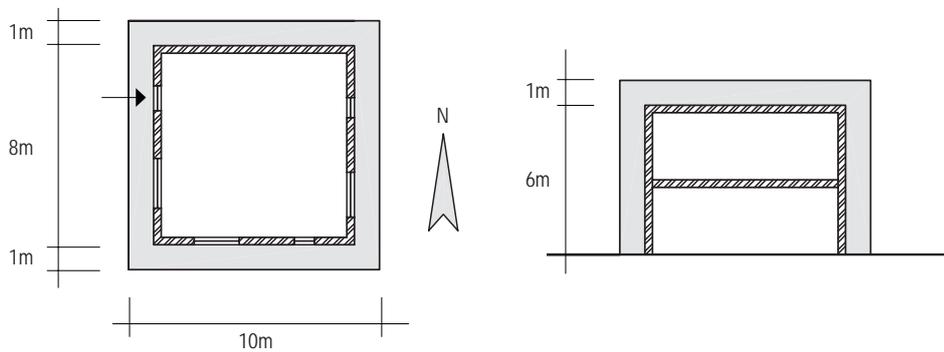


Abb. 57 a,b  
Grundriss und Ansicht des Versuchsgebäudes

Das Gebäude ist Nord- Süd orientiert. Auf der Westseite befindet sich die Hauseingangstür. Süd- und Ostseite des Gebäudes weisen eine Fensterfläche von jeweils 6,1m<sup>2</sup> auf, die Westseite von 4,1m<sup>2</sup>. Der U-Wert von Fensterkonstruktion und Rahmen wird mit 1,38 W/m<sup>2</sup>K angenommen, der der Eingangstür mit 1,0W/ m<sup>2</sup>K. Die Bodendecke gegen Erdreich ist in Stahlbeton ausgeführt und hat einen Wärmedurchgangskoeffizienten von U= 3,1W/m<sup>2</sup>K. Dach und Wandkonstruktion werden mit 0,2W/m<sup>2</sup>K, bzw. 0,14 W/m<sup>2</sup>K angenommen, genauere Angaben hierzu auf den folgenden Seiten.

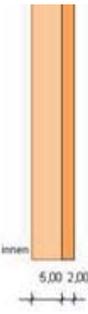
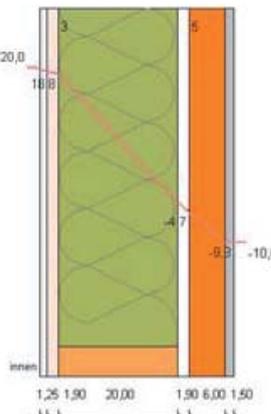
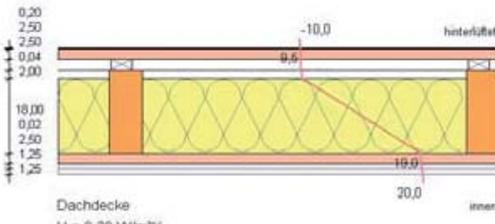
Die Gebäudehülle wird als eine membranbespannte Konstruktion simuliert, bei der der Rahmenanteil mit 10% in die Berechnung einfließt. Je nach gewähltem Material und Aufbau der Hülle werden die U-Werte dieses Bauteils variieren. Als Grundlage für die Beschreibung des Wärmedurchlasses der Membrankonstruktionen werden die in [Ip103] veröffentlichten U-Werte veranschlagt, die bereits im Kapitel 1.6. vorgestellt wurden. Der Gesamtenergiedurchlass von Membran und Folie variiert dabei, je nach gewähltem Material und Hersteller.

Hülle	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	max. Transluzenz der Membran [%]	max. Transluzenz von ETFE Folien [%]
vierlagig	1,5	6	96
dreilagig	1,9	12	97
zweilagig	2,9	25	98
einlagig	5,7	40	99

Tabelle 2.2

Nachstehend eine Zusammenfassung der in den Studien verwendeten Bauteile, Informationen über ihren Aufbau, Querschnittsbreiten und den Wärmedurchgangskoeffizienten U.

Abb. 58  
aus [Ker06]

	<p><b>Fenster</b></p> <p>iplus C E, 4/14/4, Ug 1.1 (BAZ), g 60% Weichholzrahmen 90mm (EN ISO 10077-1 D.2), Uf 1.55 Fenster DIN V 4108-4:2002 Tab.6 V</p> <p>U = 1,38 W/m²K</p>																				
	<p><b>Außentür</b></p> <table border="0"> <tr><td>01 Deckfurnier</td><td>0,200</td></tr> <tr><td>02 Dampfbremse 30m</td><td>0,030</td></tr> <tr><td>03 Sperrfurnier</td><td>0,200</td></tr> <tr><td>04 Trägerplatte</td><td>1,500</td></tr> <tr><td>05 PUR-Hartschaum 025</td><td>1,600</td></tr> <tr><td>06 Trägerplatte</td><td>1,500</td></tr> <tr><td>07 Deckfurnier</td><td>0,200</td></tr> </table> <p>U = 1,010 W/m²K</p>	01 Deckfurnier	0,200	02 Dampfbremse 30m	0,030	03 Sperrfurnier	0,200	04 Trägerplatte	1,500	05 PUR-Hartschaum 025	1,600	06 Trägerplatte	1,500	07 Deckfurnier	0,200						
01 Deckfurnier	0,200																				
02 Dampfbremse 30m	0,030																				
03 Sperrfurnier	0,200																				
04 Trägerplatte	1,500																				
05 PUR-Hartschaum 025	1,600																				
06 Trägerplatte	1,500																				
07 Deckfurnier	0,200																				
	<p><b>Außenwand</b></p> <table border="0"> <tr><td>01 Gipsfaser-Bauplatte</td><td>1,250</td></tr> <tr><td>02 Schichtholzplatte</td><td>1,900</td></tr> <tr><td>03 Zellulosefasern 035</td><td>20,000</td></tr> <tr><td>04 Holzweichfaserplatte 200</td><td>1,900</td></tr> <tr><td>05 Korkdämmplatten 050</td><td>6,000</td></tr> <tr><td>06 Kalk-Zementputz</td><td>1,500</td></tr> </table> <p>Wärmedurchgangskoeffizient U = 0,146 W/m²K</p>	01 Gipsfaser-Bauplatte	1,250	02 Schichtholzplatte	1,900	03 Zellulosefasern 035	20,000	04 Holzweichfaserplatte 200	1,900	05 Korkdämmplatten 050	6,000	06 Kalk-Zementputz	1,500								
01 Gipsfaser-Bauplatte	1,250																				
02 Schichtholzplatte	1,900																				
03 Zellulosefasern 035	20,000																				
04 Holzweichfaserplatte 200	1,900																				
05 Korkdämmplatten 050	6,000																				
06 Kalk-Zementputz	1,500																				
 <p>Dachdecke U = 0,20 W/m²K</p>	<p><b>Dachdecke</b></p> <table border="0"> <tr><td>01 Gipskartonplatten 12,5 mm</td><td>1,250</td></tr> <tr><td>02 Gipskartonplatten 12,5 mm</td><td>1,250</td></tr> <tr><td>03 Traglattung</td><td>2,500</td></tr> <tr><td>04 PE-Folie</td><td>0,020</td></tr> <tr><td>05 Mineralfaser 030</td><td>18,000</td></tr> <tr><td>06 Luftschicht schwach belüf.</td><td>2,000</td></tr> <tr><td>07 Unterspannbahn</td><td>0,040</td></tr> <tr><td>08 Luftschicht belüftet</td><td>2,500</td></tr> <tr><td>09 Traglattung</td><td>2,500</td></tr> <tr><td>10 Bitumendachbahn</td><td>0,200</td></tr> </table> <p>U = 0,196 + 0,008 = 0,204 W/m²K</p>	01 Gipskartonplatten 12,5 mm	1,250	02 Gipskartonplatten 12,5 mm	1,250	03 Traglattung	2,500	04 PE-Folie	0,020	05 Mineralfaser 030	18,000	06 Luftschicht schwach belüf.	2,000	07 Unterspannbahn	0,040	08 Luftschicht belüftet	2,500	09 Traglattung	2,500	10 Bitumendachbahn	0,200
01 Gipskartonplatten 12,5 mm	1,250																				
02 Gipskartonplatten 12,5 mm	1,250																				
03 Traglattung	2,500																				
04 PE-Folie	0,020																				
05 Mineralfaser 030	18,000																				
06 Luftschicht schwach belüf.	2,000																				
07 Unterspannbahn	0,040																				
08 Luftschicht belüftet	2,500																				
09 Traglattung	2,500																				
10 Bitumendachbahn	0,200																				
	<p><b>Fußboden</b></p> <table border="0"> <tr><td>01 Stahlbeton</td><td>14,000</td></tr> <tr><td>02 Kiesschüttung trocken</td><td>6,000</td></tr> </table> <p>U = 3,102 W/m²K</p>	01 Stahlbeton	14,000	02 Kiesschüttung trocken	6,000																
01 Stahlbeton	14,000																				
02 Kiesschüttung trocken	6,000																				

## 2.2.2. Parameterstudien

Zur thermischen Optimierung der Gebäudehülle wird in den nachfolgenden Parameterstudien jeweils eine Eigenschaft der Membranhülle variiert, um ihre Relevanz zu prüfen. Untersucht wird der Einfluss des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der membranen Gebäudehülle, der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert), der Einfluss verschiedener Luftwechselraten, der Einfluss der solaren Strahlung, Wand- und Dachkonstruktion, das Verhältnis zwischen transparenten und opaken Hüllflächen sowie dem Einfluss des Volumens der Zwischenzone.

### Variation des U-Wertes

In der ersten Studie werden vier verschiedene Hüllkonstruktionen miteinander verglichen: Ein-, zwei-, drei- und vierlagige Konstruktionen. Sie unterscheiden sich vor allem durch unterschiedliche U-Werte. Eine einlagige Membranfassade erzielt einen U-Wert von  $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ , zweilagige  $2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ , dreilagige  $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$  und vierlagige  $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Für jede dieser Konstruktion wird in Abhängigkeit der Strahlung der Temperaturverlauf berechnet, der sich in der Zwischenzone einstellt, zum einen für einen sonnigen Sommertag (21. Juni), zum anderen für einen sonnigen Wintertag (21. Dezember) durchgeführt.

Der Temperaturverlauf ist unter dem Strahlungsdiagramm als Temperaturdiagramm dargestellt. Der gepunktete Kurvenverlauf gibt die Außenlufttemperatur an, in blau dargestellt ist der Temperaturverlauf einlagiger Konstruktionen, in violett zweilagiger Konstruktionen, in gelb der Temperaturverlauf von dreilagigen- und in türkis der von vierlagigen Konstruktionen. Diese Werte ergeben sich unter konstantem Gesamtenergiedurchlassgrad von 0,9 und einer konstanten Luftwechselrate von 0,3. Das Ergebnis berücksichtigt dabei nicht, dass der g-Wert mehrlagiger Konstruktionen deutlich schwächer ausfällt als bei einlagigen. Insofern kann das Ergebnis nur indirekte Aussagen treffen. Es zeigt jedoch die Relevanz ausreichender Wärmedämmeigenschaften der Membranhülle, um die gewonnene Strahlungsenergie nicht sofort wieder an die Umgebung zu verlieren. Im weiteren Verlauf wird der U-Wert der Membranhülle konstant auf  $2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$  gesetzt, um damit das Verhalten doppelagiger Membranfassaden zu simulieren, die als Mindestanforderung an zweite Gebäudehüllen zu stellen sind.

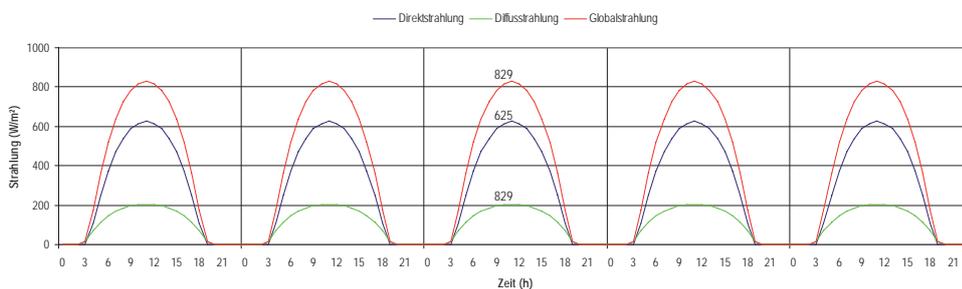


Abb.59a  
Strahlungsdiagramm  
21. Juni  
U-Wert: variierend  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: 0,3

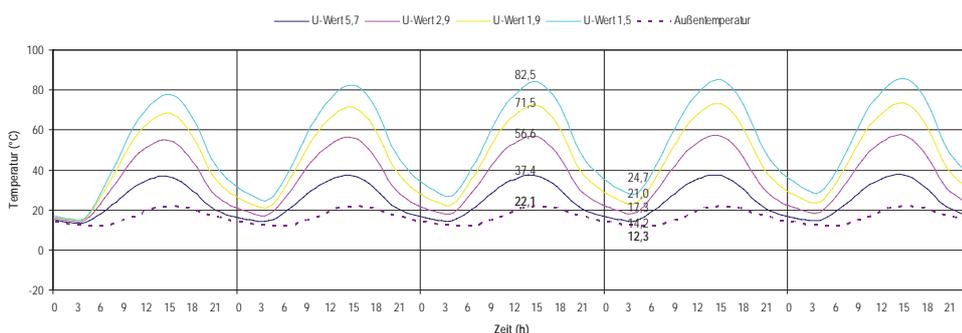


Abb 59b  
Temperaturdiagramm  
21. Juni  
U-Wert: variierend  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: 0,3

Abb. 59c  
Strahlungsdiagramm  
21. Dezember  
U-Wert: variierend  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: 0,3

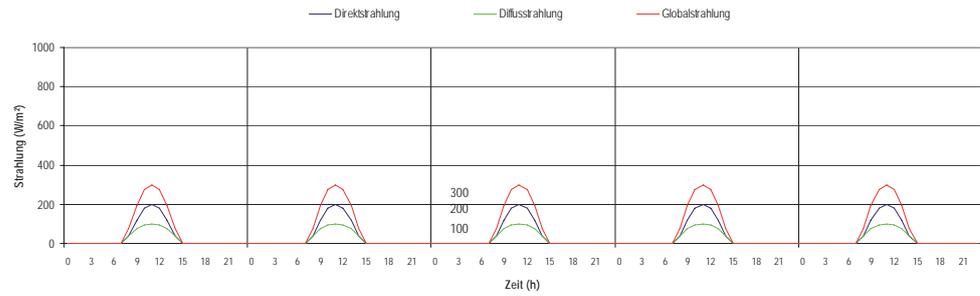
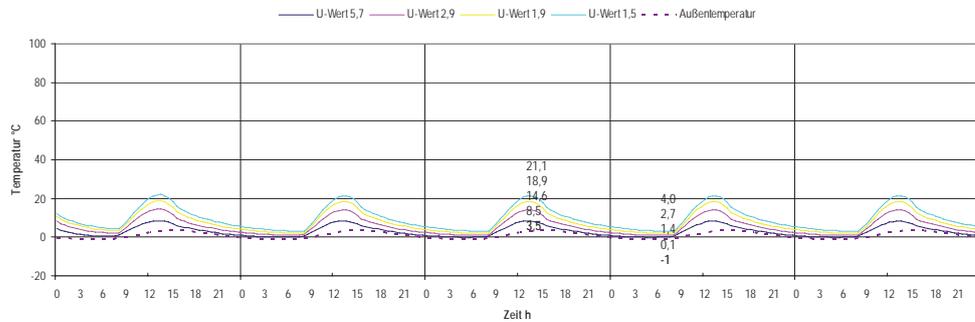


Abb. 59d  
Temperaturdiagramm  
21. Dezember  
U-Wert: variierend  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: 0,3



### Variation des Gesamtenergiedurchlassgrades (g-Wert)

Je nach Verwendung von Material ändert sich der g-Wert der Fassade. Hohe Transluzenz ist eine der Voraussetzungen für einen hohen Energiedurchlassgrad, genauere Untersuchungen wurden im Kapitel 1.7. ausgeführt. In dieser Studie werden Fassadenkonstruktionen untersucht die mit 10, 30, 60 und 90% schwach transluzente PVC-Membranen, oder hochtransparente, Ito-beschichtete ETFE-Folien simulieren. Die Auswirkungen auf den Temperaturverlauf ist nachstehend für einen Sommer- bzw. Wintertag dargestellt. Ein zehnzprozentiger g-Wert führt immerhin noch zu einer Temperaturerhöhung von 2°C, Bei einem g-Wert von 90% können Temperaturen von 54°C in der Zwischenzone erreicht werden. Der Einfluss der g-Wert Veränderung liegt jedoch unter der, die durch U-Wert Variationen erzielt werden kann.

Abb. 60a  
Strahlungsdiagramm  
21. Juni  
U-Wert: 2,9 W/m²K  
g-Wert: variierend  
Luftw.: 0,3

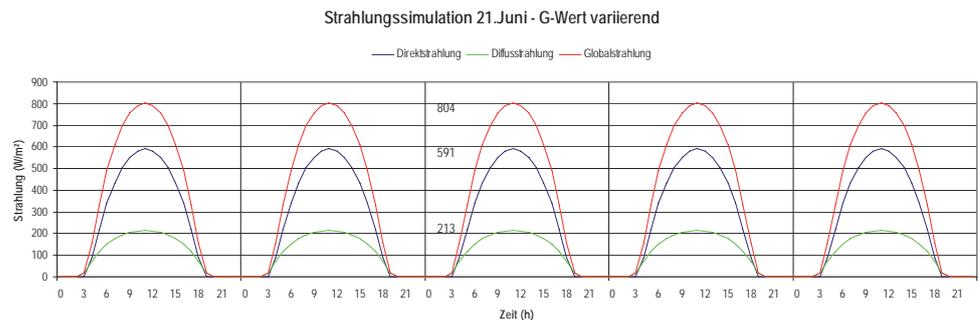
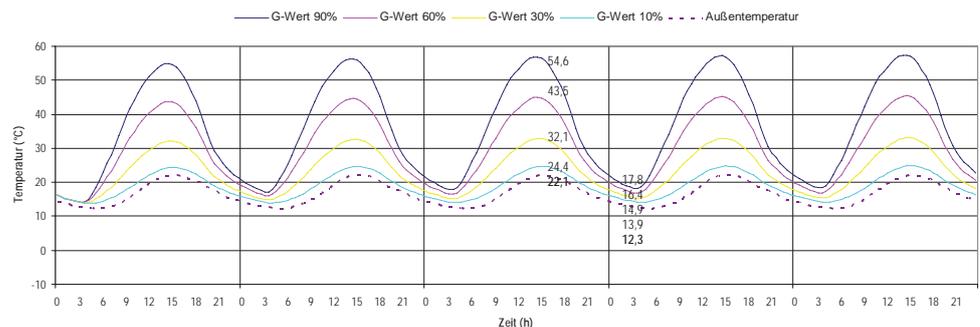


Abb. 60b  
Temperaturdiagramm  
21. Juni  
U-Wert: 2,9 W/m²K  
g-Wert: variierend  
Luftw.: 0,3



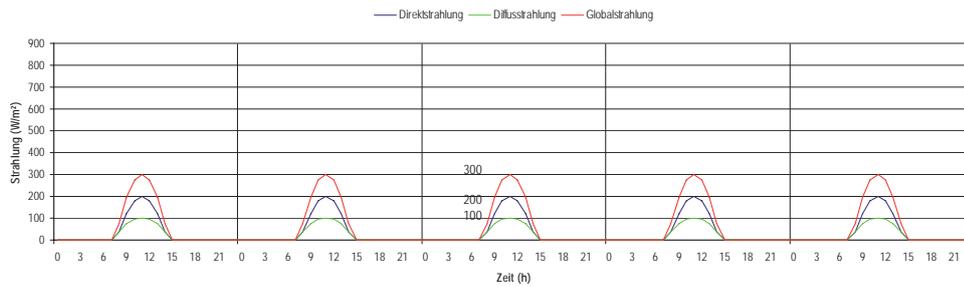


Abb. 60c  
Strahlungsdiagramm  
21. Dezember  
U-Wert: 2,9 W/m²K  
g-Wert: variierend  
Luftw.: 0,3

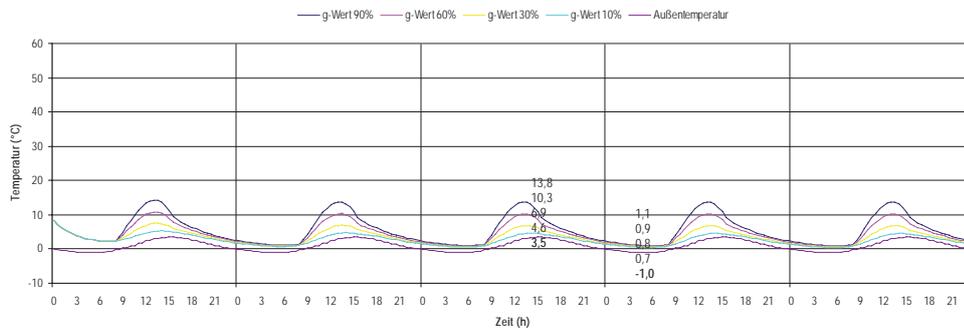


Abb. 60d  
Temperaturdiagramm  
21. Dezember  
U-Wert: 2,9 W/m²K  
g-Wert: variierend  
Luftw.: 0,3

### Variation der Luftwechselrate

Die Belüftung der Zwischenzone wurde bisher mit dem 0,3-fachen Luftaustausch des Zwischenzonenvolumens in Betracht gezogen. Eine Erhöhung der Luftwechselrate durch Öffnen von Lüftungsklappen oder Fenstern führt zur Abkühlung der Zwischenzonentemperatur, wie die nächste Parameterstudie zeigt. Im Sommer kann so einer Überhitzung vorgebeugt werden, im Winter durch Schließen der Öffnungen höhere Temperaturen erzielt werden. Auf die Strahlungsdiagramme wird im Folgenden verzichtet, sie sind identisch mit denen der vorherigen Studien und liegen bei 800W/m² zu sommerlichen- und 300W/m² zu winterlichen Mittagszeiten. Dies entspricht einer Strahlung, die bei guten, wolkenlosen Wetterbedingungen auftritt.

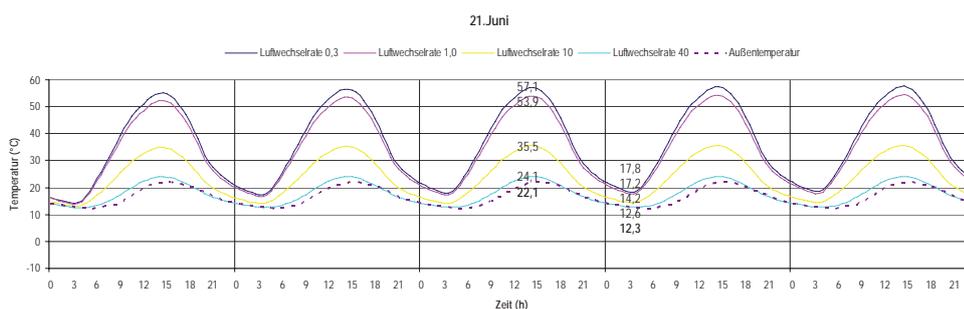


Abb. 61a  
Temperaturdiagramm  
21. Juni  
U-Wert: 2,9 W/m²K  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: variierend

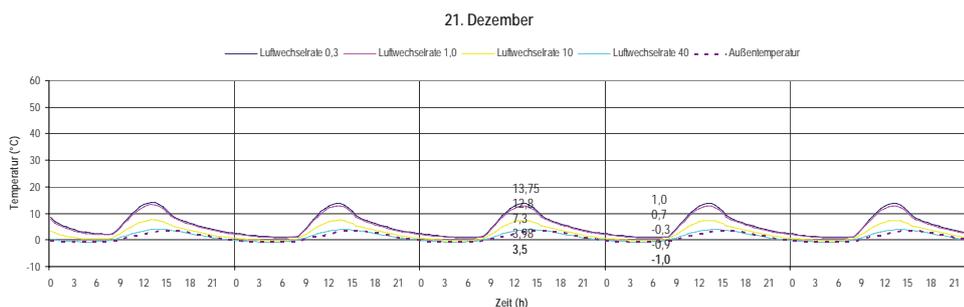


Abb. 61b  
Temperaturdiagramm  
21. Dezember  
U-Wert: 2,9 W/m²K  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: variierend

Variation der Strahlung

Als Ergebnis der vorherigen Studie wird nachfolgend die Luftwechselrate saisonal angepasst. Um Überhitzung im Sommer zu vermeiden liegt die Rate zwischen Juni und August bei 10. Zwischen Dezember und Februar liegt sie bei 0,5. Hiermit können stärkere Auskühlung vermieden werden. In den Übergangszeiten wird die Luftwechselrate interpoliert.

Studie A4 variiert nun, bei angepasster Luftrate die in die Zwischenzone einfallende Strahlungsintensität. Es wird ein blauer Himmel (100%) verglichen mit weißlich bedecktem Himmel (0%) in verschiedenen Abstufungen. Die Strahlung nimmt mit zunehmend bedecktem Himmel ab. Jedoch verbleibt auch bei bedecktem Himmel noch eine Reststrahlung, die die Zwischenzonentemperatur über die Außentemperatur steigen lässt.

Abb. 62a  
Strahlungsdiagramm  
21. Juni  
U-Wert: 2,9 W/m<sup>2</sup>K  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: 10

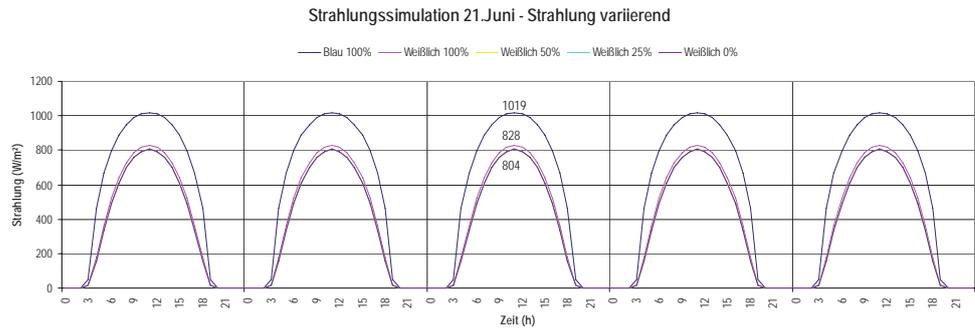


Abb. 62b  
Temperaturdiagramm  
21. Juni  
U-Wert: 2,9 W/m<sup>2</sup>K  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: 10

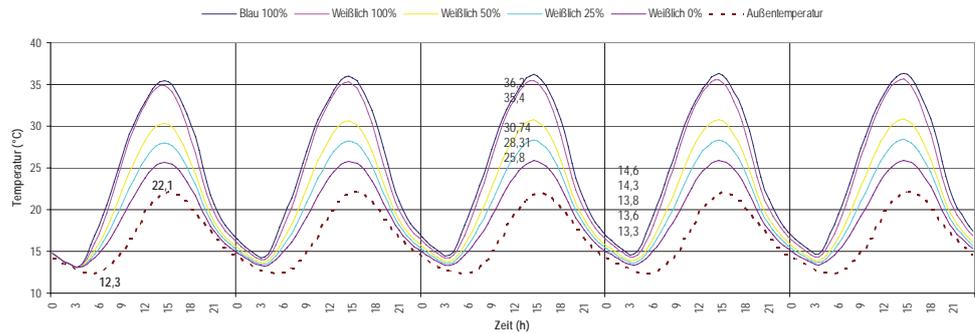


Abb. 62c  
Strahlungsdiagramm  
21. Dezember  
U-Wert: 2,9 W/m<sup>2</sup>K  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: 0,5

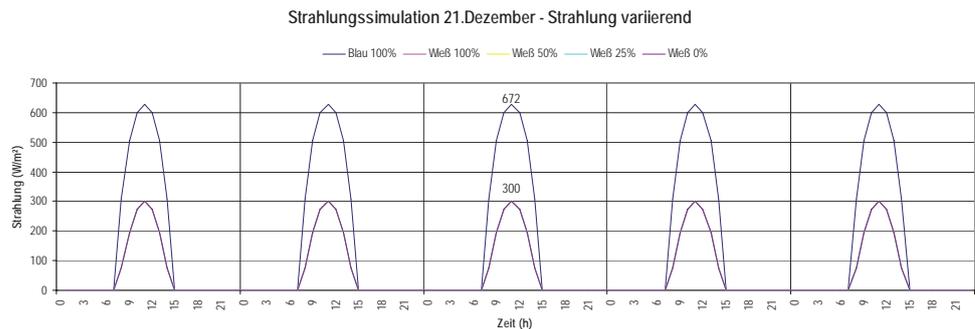
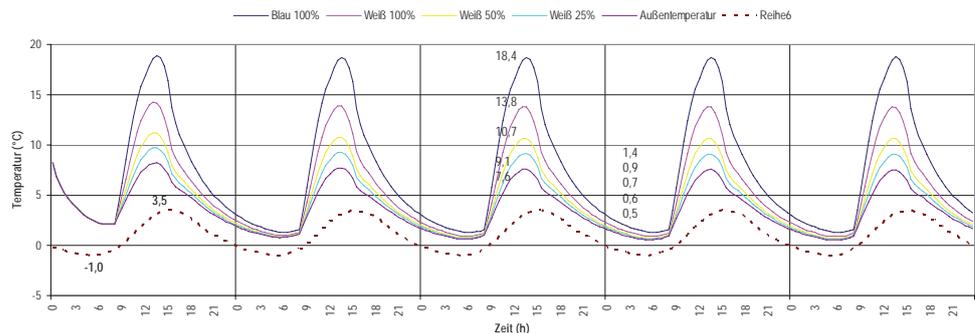


Abb. 62d  
Temperaturdiagramm  
21. Dezember  
U-Wert: 2,9 W/m<sup>2</sup>K  
g-Wert: 0,9  
Luftw.: 0,5



## Variation von Wand- und Dachkonstruktion

Das Temperaturdiagramm der Studie A5 untersucht inwieweit die Speicherfähigkeit der Gebäudewand Einfluss auf die Zwischenzonentemperatur hat. Es wird eine einschalige, ungedämmte Stahlbetonwand (violett) mit der einer gedämmten (blau) verglichen.

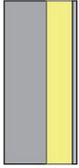
gedämmte Außenwand	ungedämmte Außenwand
	
01 Beton mittlere Rohdichte 2000 16cm 02 Mineralwolle MW 030, I 10cm 03 Putzmörtel aus Kalk 1,5cm	01 Beton mittlere Rohdichte 2000 16cm
$U = 0,324 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U = 3,466 \text{ W/m}^2\text{K}$

Abb.63

Das Ergebnis zeigt, dass die ungedämmte Wand unmittelbarer die einfallende Strahlung in Form von Wärmeenergie speichern kann und somit höhere Tagestemperaturen in der Zwischenzone erreicht werden. Nachts ist jedoch auch die Auskühlung dieser Wand höher und kühlere Zwischenzonentemperaturen entstehen. Die gedämmte Wand zeigt eine Reaktionsverzögerung. Sie dämpft hohe Tagestemperaturen und erwärmt die Zwischenzone nachts.

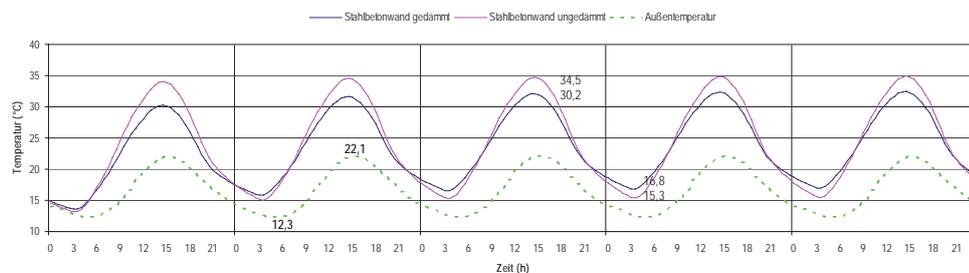


Abb. 64  
 Temperaturdiagramm  
 21. Juni  
 U-Wert: 2,9 W/m<sup>2</sup>K  
 g-Wert: 0,9  
 Luftw.: 10

## Variation des Verhältnis von transparenter zu opaker Hüllfläche

Durch die Reduzierung der transparenten Hüllfläche zugunsten wärmedämmender, opaker Bauteile kann die Zwischenzonentemperatur optimiert werden. Je stärker der transparente Flächenanteil gesenkt wird, desto geringer fallen die Temperaturspitzen in der Zwischenzone aus und desto mehr Wärme verbleibt nachts in der Zwischenzone. Transparente Hüllflächenanteile von 25% reichen aus, um ausreichend Strahlung in die Zwischenzone einstrahlen zu lassen, um mit erhöhten Temperaturen das Gebäude vor Energieverlusten zu schützen. Die restlichen 75% gedämmter und opaker Hüllflächen schützen vor Energieverlusten und verhindern gleichzeitig eine Überhitzung im Sommer. Die Klimaproblematik herkömmlicher Doppelglasfassaden kann also durch die Erhöhung des opaken Flächenanteils in der Gebäudehülle vermieden werden.

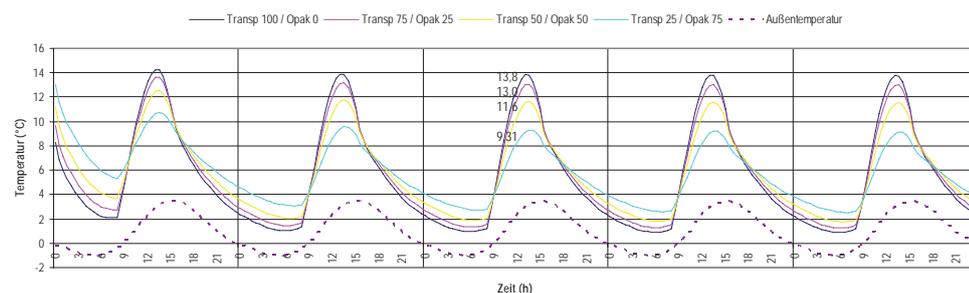
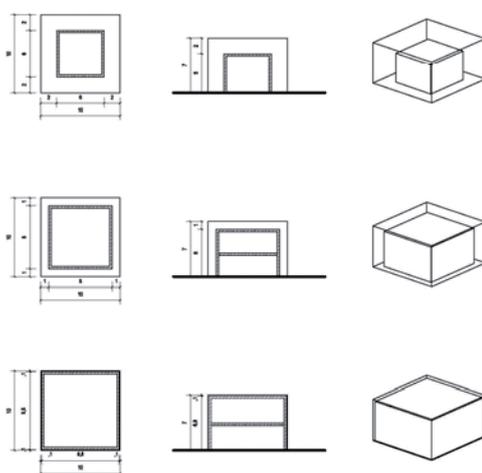


Abb. 65  
 Temperaturdiagramm  
 21. Juni  
 U-Wert: 2,9 W/m<sup>2</sup>K  
 g-Wert: 0,9  
 Luftw.: 10

Variation des Volumens der Zwischenzone

Abschließend wird in dieser letzten Studie der Einfluss des Zwischenzonenvolumens auf ihre Temperaturentwicklung untersucht. Dafür werden drei verschiedene Gebäude untersucht. Ihre Außenmaße sind mit jeweils 10x10x7m identisch, jedoch wird durch Variation des Volumens des eingestellten Innengebäudes die Größe der Zwischenzone variiert. So ergeben sich folgende drei Versuchsgebäude:

Abb. 66 a-i



**Volumen der Zwischenzone: 520m<sup>3</sup>**  
 Breite der Zwischenzone: 2m  
 Innenwandfläche: 120m<sup>2</sup>  
 Innendachfläche: 36m<sup>2</sup>

**Volumen der Zwischenzone: 316m<sup>3</sup>**  
 Breite der Zwischenzone: 1m  
 Innenwandfläche: 192m<sup>2</sup>  
 Innendachfläche: 64m<sup>2</sup>

**Volumen der Zwischenzone: 37,2m<sup>3</sup>**  
 Breite der Zwischenzone: 0,1m  
 Innenwandfläche: 254m<sup>2</sup>  
 Innendachfläche: 85m<sup>2</sup>

Die Ergebnisse dieser Studie sind unten dargestellt. Dabei zeigt der violette Kurvenverlauf die Temperaturentwicklung der Zwischenzone größten Volumens, der gelbe Verlauf die des geringsten Volumens. Die Auswirkung von Volumenvariation ist im hier betrachteten Spektrum unerheblich. Je geringer das Volumen desto geringere Tages- und erhöhte Nachttemperaturen resultieren. Die Studie bestätigt also die Funktionstüchtigkeit von Zwischenzonen die sehr schmal ausgeführt werden. Bei der Volumenausdehnung der Zwischenzone sind Grenzen gesetzt. Die beiden hier beispielhaft untersuchten größeren Zwischenzonenvolumen funktionieren jedoch eben sogut. Bei Verhältnissen größer 2:1 müssen gesonderte Untersuchungen angestellt werden.

Abb. 67a  
 Temperaturdiagramm  
 21. Juni  
 U-Wert: 2,9 W/m<sup>2</sup>K  
 g-Wert: 0,9  
 Luftw.: 10

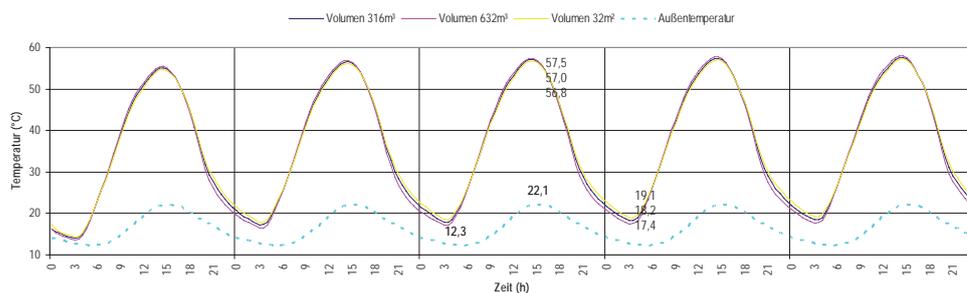
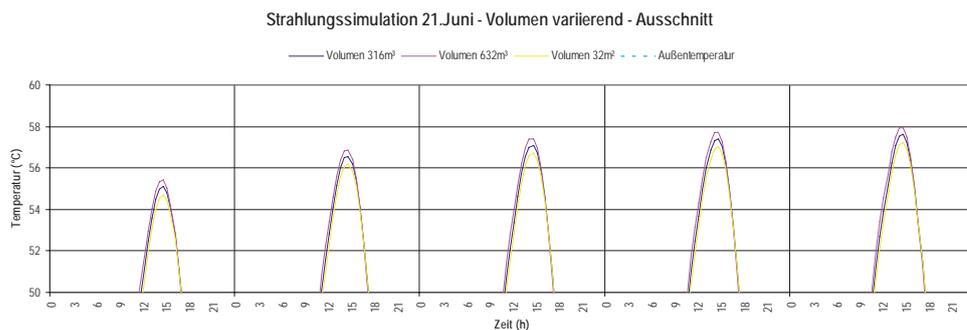


Abb. 67b  
 Vergrößerung des  
 Temperaturdiagramms  
 21. Juni  
 U-Wert: 2,9 W/m<sup>2</sup>K  
 g-Wert: 0,9  
 Luftw.: 0,5



### 2.2.3. Gebäudevarianten

Nachdem einzelne Eigenschaften der Membranhülle in den Parameterstudien untersucht wurden, werden im Folgenden sechs Gebäudevarianten festgelegt, die sich durch leichte Variationen in den Eigenschaften der Membranhülle voneinander unterscheiden. Für sie wird eine Energiebilanz aufgestellt die anschließend der Bilanz des Vergleichsgebäudes gegenübergestellt wird. Das Vergleichsgebäude weist die identische Eigenschaften der sechs Varianten auf, es unterscheidet sich von ihnen lediglich durch das Fehlen der membranengebäudehülle.

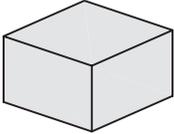
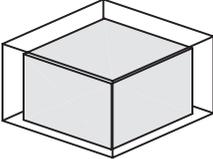
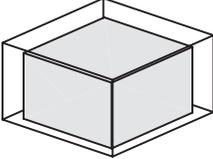
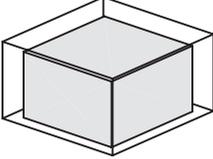
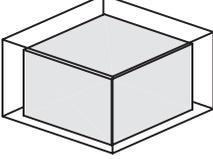
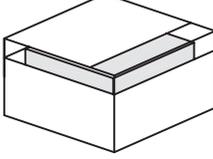
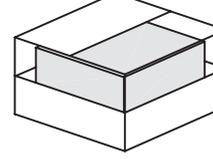
O		<p>Vergleichsgebäude 0 Gebäudekante: 8,00m Höhe: 6,00m Wand, hochgedämmt, U-Wert 0,19 W/m<sup>2</sup>K Dach, hochgedämmt, U-Wert</p>
A		<p>Variante A wie Vergleichsgebäude mit zusätzlicher zweiten Gebäudehülle, U-Wert: 5,7 W/m<sup>2</sup>K, g-Wert: 0,9, konstante Luftwechselrate</p>
B		<p>Variante B wie Variante A, Luftwechselrate wird jedoch über das Jahr variiert.</p>
C		<p>Variante C wie Variante B, mit wechselnder Luftwechselrate und einer Verbesserung des U-Wertes der Gebäudehülle auf 2,9 W/m<sup>2</sup>K (zweilagige Ausführung der Hülle)</p>
D		<p>Variante D Der Gesamtenergiedurchlassgrad wird auf 0,3 gesenkt (statt ETFE Folie wird eine PVC-PE Membran simuliert)</p>
E		<p>Variante E Der transparente Anteil der Gebäudehülle wird auf ein Viertel reduziert. 75% der Hülle ist opak und hochgedämmt.</p>
F		<p>Variante F Der transparente Anteil der Gebäudehülle wird auf die Hälfte reduziert. 50% der Hülle ist opak und hochgedämmt.</p>

Tabelle 2.3.  
Gebäudevarianten der  
Energiebilanzierung

2.2.4. Jahrestemperaturbilanz der Zwischenzone

Zur Ermittlung der Jahrestemperaturbilanz der sieben vorgestellten Gebäudevarianten werden für jede Variante die zwölf durchschnittlichen Monatstemperaturen ihrer Zwischenzone aus thermischen Simulationsberechnungen ermittelt. Wie in den Voruntersuchungen A1-A7 können so monatlich die durchschnittlichen Minimal- und Maximaltemperaturen der Zwischenzone ausgelesen und zu einer Jahrestemperaturbilanz zusammengestellt werden. Dabei werden als Ausgangswert die Klimadaten Berlins hinterlegt, die im Zusammenspiel mit den variierenden Membranhülleneigenschaften Einfluss auf die erzielte Zwischenzonentemperatur nehmen. Für das unverhüllte Vergleichsgebäude 0 können keine künstlichen Zwischenzonentemperaturen ermittelt werden, da es keine zweite Membranhülle besitzt. Stattdessen werden hier die Klimadaten Berlins, also die Außentemperaturen aufgelistet.

Tabelle 2.4. Jahrestemperaturbilanz

Außentemperatur für Variante 0 ist ein gemittelter Durchschnittswert aus den Daten des Deutschen Wetterdienstes, Station Berlin (1991-2006) [www.dwd.de](http://www.dwd.de) vgl. EnEV04 und DIN 4108-6

Die monatliche Durchschnittstemperatur wird als Berechnungsgrundlage für die folgende Energiebilanzierung verwendet

		0	A	B	C	D	E	F
Hülle	Transp.		100%	100%	100%	100%	25%	50%
	U-Wert		5,7	5,7	2,9	2,9	2,9	2,9
	g-Wert		0,9	0,9	0,9	0,3	0,9	0,9
	LW-rate		konstant	wechselnd	wechselnd	wechselnd	wechselnd	wechselnd
min / max Monatstemperatur	Jan	-1,3 / 3,7	6,8 / -0,4	7,1 / -0,3	11,5 / 0,9	8,1 / 0,5	13,1 / 2,0	10,1 / 0,6
	Feb	-1,0 / 5,0	10,1 / 0,0	10,3 / 0,1	17,0 / 1,4	8,9 / 0,9	19,2 / 2,8	14,8 / 1,2
	Mär	1,3 / 8,7	15,6 / 2,4	15,0 / 2,3	22,2 / 3,5	12,9 / 2,9	23,8 / 4,5	19,5 / 3,2
	Apr	4,8 / 14,4	29,3 / 10,6	20,5 / 5,7	26,9 / 6,7	20,4 / 6,2	27,6 / 7,3	24,4 / 6,4
	Mai	9,4 / 19,3	31,8 / 13,8	24,9 / 10,1	30,3 / 10,8	24,1 / 10,4	30,5 / 11,2	28,0 / 10,6
	Jun	12,3 / 22,1	34,7 / 15,8	26,8 / 13,1	31,1 / 13,8	24,7 / 13,2	31,3 / 14,0	29,3 / 13,5
	Jul	14,8 / 24,5	34,1 / 15,5	29,4 / 15,3	34,1 / 16,4	27,3 / 15,4	34,1 / 16,1	32,0 / 15,6
	Aug	14,7 / 24,7	26,7 / 11,5	29,3 / 15,1	33,5 / 15,5	27,2 / 15,2	36,1 / 15,9	31,6 / 15,5
	Sep	10,7 / 19,3	18,9 / 11,5	23,4 / 11,1	27,4 / 11,6	21,6 / 11,3	27,5 / 11,8	25,7 / 11,5
	Okt	6,3 / 13,7	18,9 / 7,1	17,3 / 6,8	21,2 / 7,4	15,7 / 7,2	21,5 / 7,8	19,7 / 7,3
	Nov	1,9 / 7,0	10,3 / 2,7	10,0 / 2,6	13,5 / 3,4	8,9 / 3,1	14,4 / 4,1	12,3 / 3,4
	Dez	-1,0 / 3,5	6,0 / -0,3	6,1 / -0,1	10,4 / 1,0	5,5 / 0,6	11,0 / 2,0	8,6 / 0,7
monatliche Durchschnittstemperatur	Jan	-0,9	3,2	3,4	6,2	4,3	7,5	5,4
	Feb	0,2	5,1	5,2	9,2	4,9	11,0	8,0
	Mär	3,7	9,0	8,7	12,9	7,9	14,2	11,4
	Apr	8,0	19,9	13,1	16,8	13,3	17,5	15,4
	Mai	13,2	22,8	17,5	20,6	17,3	20,9	19,3
	Jun	16,6	25,3	19,9	22,5	18,9	22,7	21,4
	Jul	17,9	24,8	22,4	25,3	21,4	25,1	23,8
	Aug	17,5	19,1	22,2	24,6	21,2	26,0	24,6
	Sep	13,9	15,2	17,3	19,5	16,5	19,7	18,6
	Okt	9,4	13,0	12,1	14,3	11,5	14,7	13,5
	Nov	4,2	6,5	6,3	8,5	6,0	9,2	7,8
	Dez	0,7	2,8	3,0	5,7	3,1	6,5	4,6
Ø Temp.	8,7	13,9	12,6	15,5	12,2	16,2	14,4	

Die Luftwechselrate der Zwischenzone liegt bei Gebäudevariante A konstant bei 1,0. Die wechselnde Luftwechselrate in den Varianten B-F ist folgendermaßen festgelegt: Dezember - Februar 0,5 / März, November 2,0 / April, Oktober 5,0 / Mai, September 8,0 / Juni - August 10,0. Die ermittelten Durchschnittstemperaturen werden im zweiten Berechnungsschritt als künstliche Außentemperaturen angesetzt, um auf dieser Grundlage eine Bilanz der Energieverluste des Gebäudes aufzustellen.

### 2.2.5. Energiebilanzierung nach EnEV04 - Monatsbilanzverfahren

Ziel der Energiebilanzierung ist es, für jede Gebäudevariante den Primärenergiebedarf festzustellen. Dabei wird die Energie in kWh/m²a errechnet, die notwendig ist, um das Gebäude mit einer Raumlufttemperatur von 19°C zu beheizen sowie ausreichend Warmwasser vorzuhalten. Bei der Berechnung werden die Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste des Gebäudes bilanziert. Diesen Verlusten werden die solaren und internen Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung, bzw. Abwärme durch Mensch oder Maschine gegenübergestellt. Berücksichtigt wird dabei auch die wirksame Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes. In Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Haustechnik kann so ermittelt werden, wie viel Energie im Jahr für die Bereitstellung von Warmwasser und Heizungswärme benötigt wird. Eine ausführliche Berechnung wird im Anhang dieser Arbeit dargestellt, nachstehend zwei Diagramme, die den Primärenergiebedarf des Vergleichsgebäudes und den der Variante E monatlich aufschlüsseln.

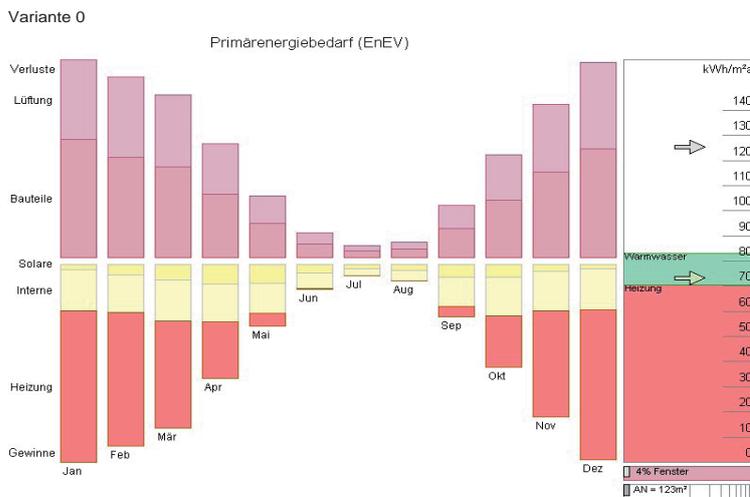


Abb. 68a  
Primärenergiebedarf  
Variante 0

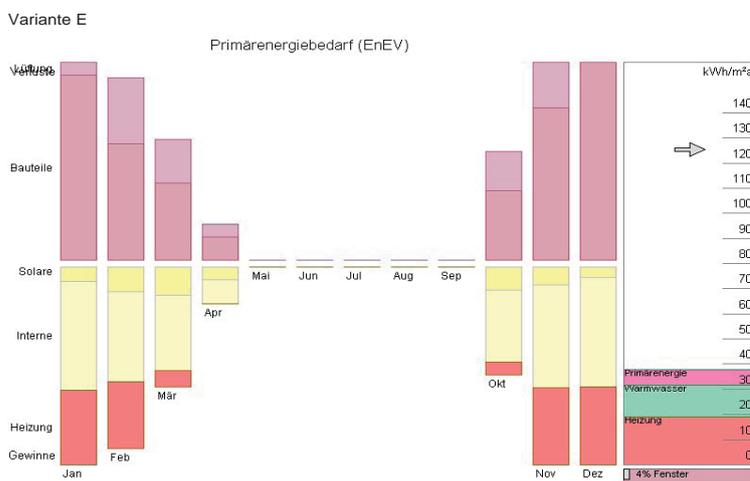
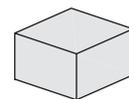
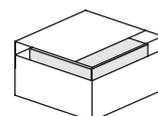


Abb. 68b  
Primärenergiebedarf  
Variante E



U-Wert: 2,9  
g-Wert 0,9  
LW-rate: wechselnd  
Transp.: 25%

Die Primärenergiebilanz der membranumhüllten Variante E zeigt, dass sich die Zeit autarker Energieversorgung des Gebäudes auf einen Zeitraum zwischen Mai bis September ausdehnt. Durch Energieverluste über Bauteile und Lüftung muss in den kälteren Jahreszeiten noch Energie aufgewendet werden, jedoch um fast zwei Drittel weniger als beim unverhüllten Vergleichsgebäude.

Zwei weitere Jahresbilanzierungen folgen. In den unten dargestellten Temperaturdiagrammen werden Aussagen über den Temperaturverlauf der Zwischenzone unter Variation des g-Wertes getroffen, indem Variante C und D miteinander verglichen werden. Der Einfluss des transparenten Hüllenanteils zum opaken Anteil wird als Jahresbilanz durch den Vergleich der Gebäudevariante E mit F verdeutlicht. Die diesen Studien zugrunde liegende Globalstrahlung ist im darunter abgebildeten Strahlungsdiagramm angegeben.

Abb. 69a  
Temperatur-  
jahresdiagramm  
der Varianten C / D  
U-Wert: 2,9 / 2,9  
g-Wert: 0,9 / 0,3  
Luftw.: wechselnd  
Transp. 100% / 100%

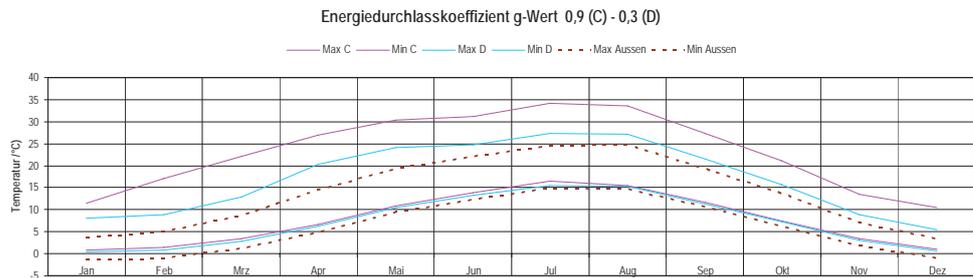


Abb. 69b  
Temperatur-  
jahresdiagramm  
der Varianten E / F  
U-Wert: 2,9 / 2,9  
g-Wert: 0,9 / 0,9  
Luftw.: wechselnd  
Transp. 25% / 50%

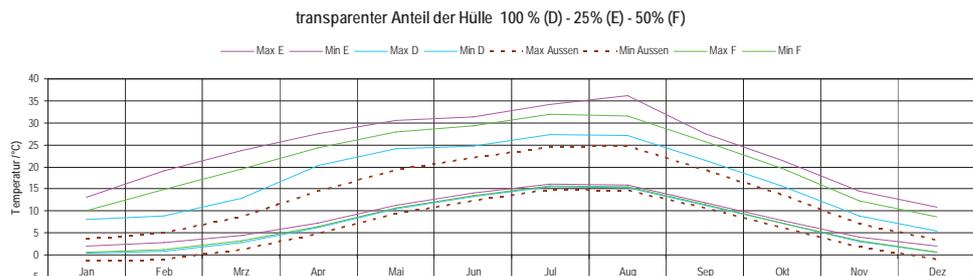


Abb. 69c  
Jahresstrahlungs-  
diagramm



Nach Bilanzierung aller Gebäudevarianten kann als Ergebnis die Tabelle 2.5, die auf der folgenden Seite abgebildet ist, mit Werten gefüllt werden. Dabei werden Parameter wie Gebäudegeometrie oder Haustechnik in allen Varianten konstant gehalten, um eine Vergleichbarkeit der Gebäudevarianten zu erreichen. Nur so können die Energieeinsparungen, die in den vier letzten Tabellenzeilen prozentual tabelliert sind, auf den Einfluss der Membranhülle zurück geführt werden. Ihre Unterschiede sind auf Eigenschaftsänderungen der Membranhülle zurückzuführen, wie sie in der Tabelle der Gebäudevarianten angegeben wurden.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass eine Membranfassade als einfach ausgeführte Konstruktion keine sinnvolle, energieeinsparende Konstruktion darstellt. Sie sollte wenigstens doppellagig sein, oder als Sandwichelement mit innenliegender Dämmung ausgeführt werden. Dabei ist auf die Verschlechterung des g-Wertes zu achten. Je mehrlagiger die Konstruktion, desto geringer ihr Energiedurchlass. Hier

bieten transparente Folien erhöhte Qualitäten. Eine Lösung dieser widersprüchlichen Eigenschaften zeigen die Gebäudevarianten E und F. Durch die Reduzierung der transparenten, aber wenig dämmenden Flächenanteile in Fassade und Dach zugunsten opaker, aber gut dämmender Sandwichpaneel, wurde bei ihnen das Verhältnis zwischen Energiedurchlass und Dämmvermögen der Hülle optimiert. Diese Maßnahme unterscheidet das Konzept der membranumhüllten Gebäude grundsätzlich von herkömmlichen Glasdoppelfassaden, die durch ihre vollflächige Transparenz gerade in den Sommermonaten starke Überhitzungsprobleme aufweisen.

Gebäudevariante		0	A	B	C	D	E	F
Ø Temp.		8,7	13,9	12,6	15,5	12,2	16,2	14,4
Hülle	Transp.		100%	100%	100%	100%	25%	50%
	U-Wert		5,7	5,7	2,9	2,9	2,9	2,9
	g-Wert		0,9	0,9	0,9	0,3	0,9	0,9
	LW-rate		konstant	wechselnd	wechselnd	wechselnd	wechselnd	wechselnd
Energiebilanz								
	$Q_t$	7.856	5.003	5.377	3.793	5.491	3.351	4.294
	$Q_l$	6.238	2.832	3.042	2.142	3.106	1.892	2.427
	$Q_h$	8.678	4.369	4.503	2.838	4.573	2.335	3.356
	$Q_{ce+d+s}$	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290
	$Q_E$	3.419	2.428	2.458	2.076	2.474	1.960	2.195
	$Q_t$	100%	64	68	48	70	43	55
	$Q_l$	100%	45	49	34	50	30	39
	$Q_h$	100%	50	52	33	53	27	39
$Q_{ce+d+s}$	100%	100	100	100	100	100	100	

Tabelle 2.5.  
Energiebilanz

$Q_t$  Hüllflächen-,  
Transmissions-  
wärmeverluste  
 $Q_l$  Lüftungswerte  
 $Q_h$  Heizwärmebedarf  
(nach EnEV)  
 $Q_{ce+d+s}$  Anlagenverluste  
insgesamt

Eine abschließende Zusammenfassung der Energiebilanz wird im folgenden Diagramm illustriert. Die Ergebnisse des Heizwärmebedarfs zeigen, dass membranumhüllte Gebäude im Vergleich zum unverhüllten Vergleichsgebäude 50 bis 75 Prozent der Energie einsparen können. Vor allem Varianten E und F weisen die günstigsten Energieverbräuche auf. Sie sind die optimierten Gebäudevarianten.

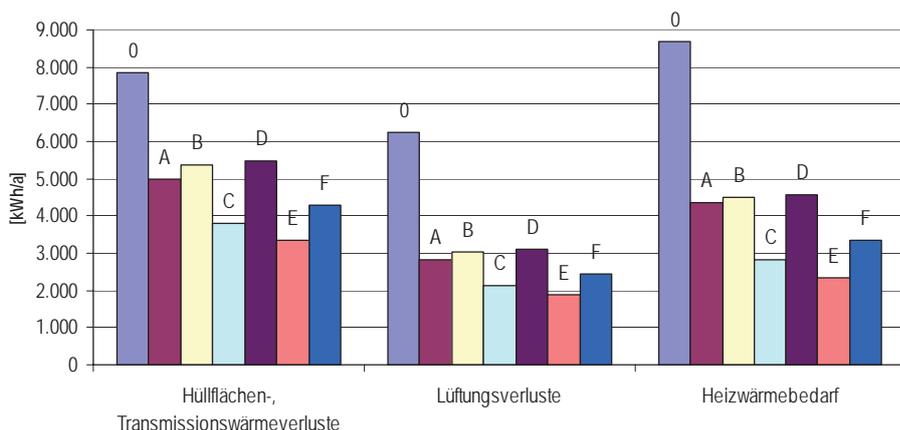


Abb. 70  
Zusammenfassendes  
Balkendiagramm zur  
Energiebilanz der  
Gebäudevarianten

### 2.3. Strömungssimulation

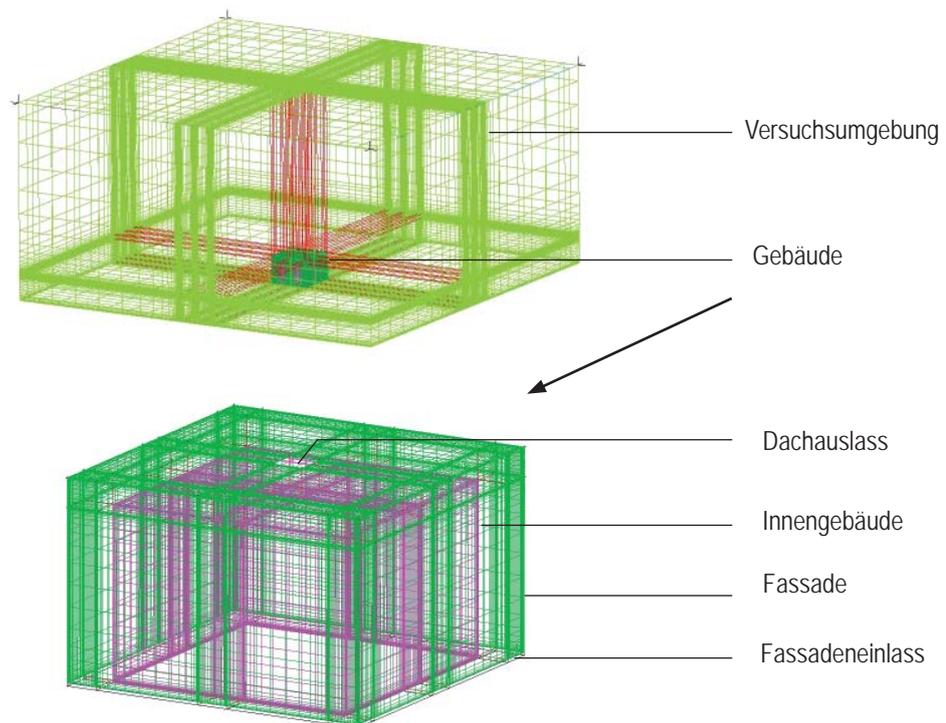
CFD =  
Computational Fluid  
Dynamics

Die folgenden Studien untersuchen das Strömungsverhalten der Luft innerhalb der Zwischenzone des Gebäudes. Hierfür werden CFD-Simulationsberechnungen mit der Software Ansys-CFX zu Luftbewegung, -richtung, Luftdruck und Lufttemperatur durchgeführt. Dank der freundlichen Unterstützung von Prof. Thiele, konnte ich am Fachgebiet für Numerische Methoden der Thermofluidynamik, TU-Berlin diese Parameterstudien durchführen.

#### 2.3.1. Modellbeschreibung

Die Modellbeschreibung erfolgt in dem graphischen Editor Ansys-ICEM. Hier wird die Geometrie festgelegt. Das Versuchsgebäude wurde mit 10x10m Außenmaße angenommen, die Höhe mit 7m festgelegt. Eingestellt ist ein Innengebäude von 8x8x6m, sodass eine Zwischenzone von umlaufend jeweils einem Meter Breite entsteht. Die Öffnung der Außenfassade wurde idealisiert. Der Lufteinlass im Sockelbereich wurde als 10cm hoher Öffnungsspalt angenommen. Der Luftauslass ist mittig im Dach der Außenfassade platziert und wird mit 1x1m festgelegt. Das Gebäude steht in einem virtuellen Versuchsraum, der mit 100x100x50m ausreichend Volumen bietet um ein gleichmäßiges anströmen der Luft auf das Gebäude zu ermöglichen, sowie ein ungestörtes Abströmen simulieren zu können, ohne Störungen durch Randverwirbelungen oder Ähnlichem. Der Windeinlass wird auf der Westseite des Versuchsraumes festgelegt, der Auslass auf der gegenüberliegenden Ostseite.

Abb.71 a,b



Zur Simulation der Strömung wurde im nächsten Schritt das Gesamtvolumen elementiert. Vor allem im Bereich der Zwischenzone wurde eine enge Maschenweite gewählt, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen, ebenso wurden Übergänge, Ränder sowie Ecken der jeweiligen Elemente fein vermascht. Testergebnisse, unter Variation der Maschenfeinheit, ergaben, dass mit 1.226.660 Punkten und 1.163.142 Elementen eine ausreichende Genauigkeit erzielt werden kann. So wurde diese Auflösung zur Grundlage der weiteren Untersuchungsreihen.

Mit Hilfe der Simulationssoftware Ansys-CFX5 werden im nächsten Schritt die Eigenschaften der jeweiligen Elemente beschrieben. Die Umgebung des Gebäudes wird unterschieden in Bodenfläche und Begrenzung des Außenraumes, sowie jeweils einer Windeinström- und -ausströmfläche, dem In- und Outlet. Die Windgeschwindigkeit wird mit 1m/s angenommen, die Boden- und Umgebungstemperatur wird mit 19°C angesetzt (in den Parameterstudien werden diese Werte variiert). Die exakten Parameter können im Anhang B nachgeschlagen werden.

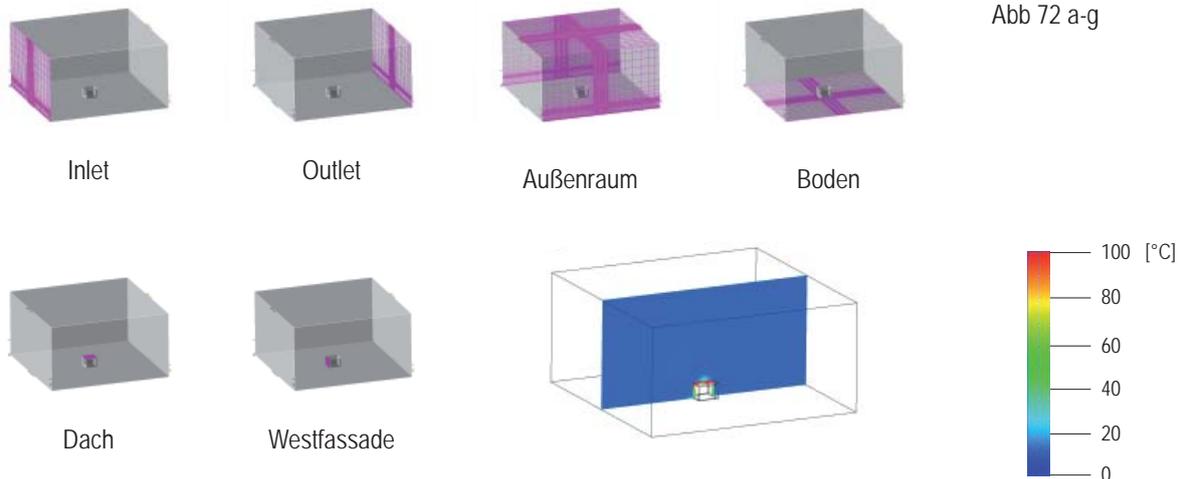


Abb 72 a-g

Das Gebäude selber besteht aus den vier Seitenflächen, Norden, Süden, Osten, Westen und dem Dach. Die Differenzierung ist notwendig, um unterschiedliche Strahlungsintensitäten auf die jeweilige Fläche definieren zu können. So wird auf die Nordfassade eine Strahlung von  $60\text{W/m}^2$  angesetzt, Südfassade und Dach weisen das zehnfache ( $600\text{W/m}^2$ ) auf und West- und Ostfassade werden mit  $300\text{W/m}^2$  beschienen. Diese Strahlung entspricht einem wolkenlosen Sommertag (auch diese Werte werden in den Studien variiert). Die Innenwand wird als gesondertes Bauteil beschrieben. Ihr wird keine Strahlung zugeordnet. Sie erwärmt sich durch den Strahlungseinfall der Außenhülle.

Unter Festlegung dieser und weiterer Randbedingungen, die im Anhang ausführlich aufgelistet sind, wird im Anschluss der Zuweisung die Strömungssimulation gestartet. Die Ergebnisse können danach visualisiert werden und geben Aufschluss über das Fließ- und Strömungsverhalten der Luft in dem virtuellen Raum. Lufttemperatur, Luftdruck, die Luftgeschwindigkeit und Richtung können somit ermittelt werden.

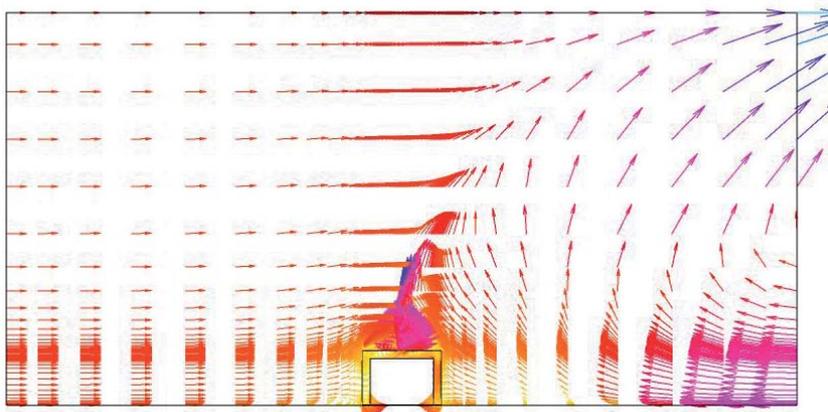
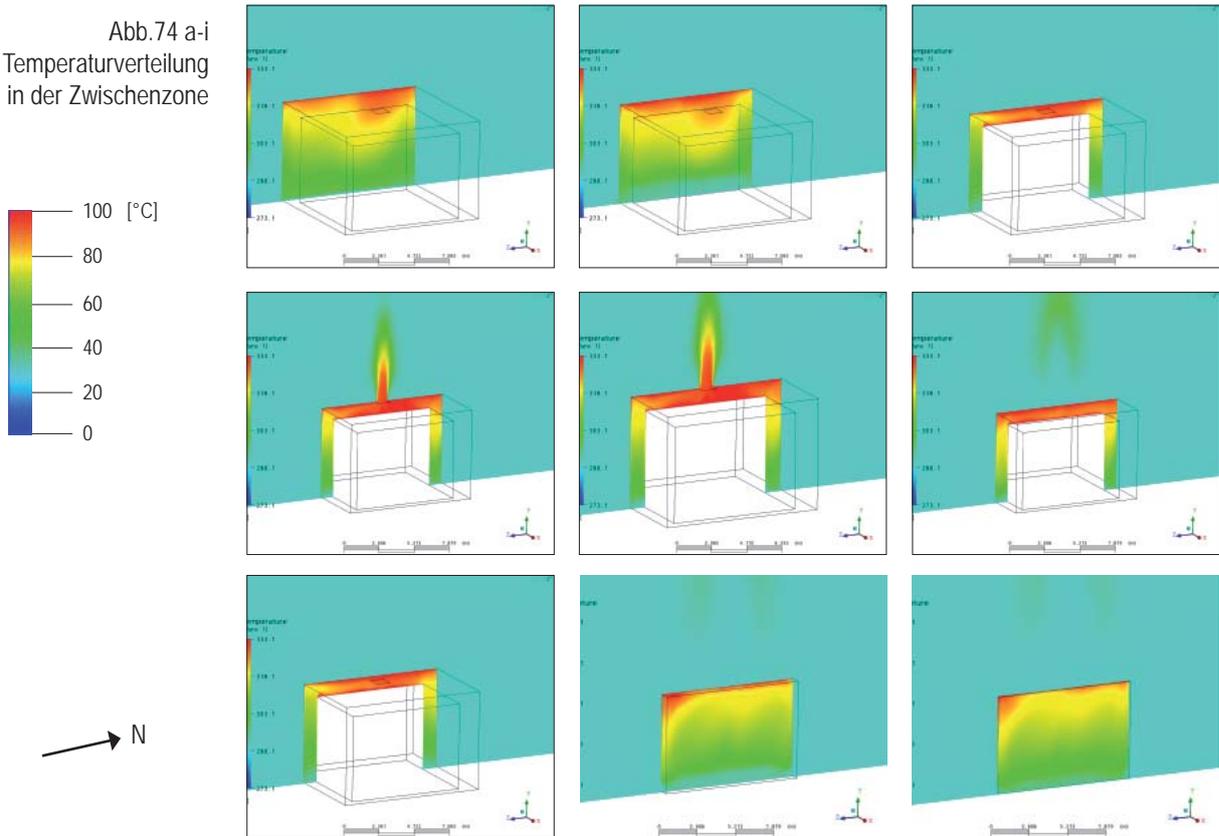


Abb. 73  
Luftbewegung im  
Versuchsraum

Die Parameterstudien müssen im Rahmen dieser Arbeit prototypisch an einem Versuchsgebäude durchgeführt werden. Sie können nur das grundsätzliche Verhalten der Luft beschreiben und qualitative Werte aufzeigen. In den folgenden Studien werden die Flächen der Luftöffnungen die Breite der Zwischenzone, die Gebäudehöhe, die Windgeschwindigkeit und Strahlungsintensität sowie die Außentemperatur variiert, um Aussagen über den Einfluss der jeweiligen Größe auf die Temperaturverteilung der Zwischenzone treffen zu können. Die Temperaturverteilung der Zwischenzone kann dabei in einzelnen Schnitten untersucht werden, wie in den nachfolgenden Beispielen abgebildet:

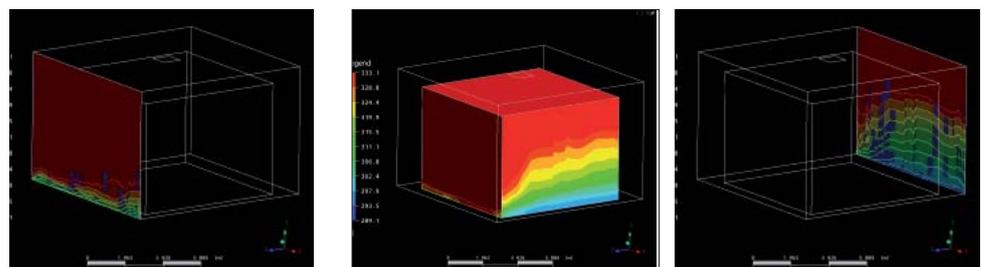
Abb.74 a-i  
Temperaturverteilung  
in der Zwischenzone



Durch einen Spalt im Sockelbereich der Membranhülle gelangt Frischluft in die Zwischenzone. Einfallende Strahlung erwärmt die Luft, sie steigt nach oben. Durch einen Luftauslass im Dachbereich kann die Luft aus der Hülle entweichen. Dieser Ablauf erklärt die vertikale Temperaturverteilung der oben abgebildeten Ergebnisse. Die Temperaturunterschiede der Gebäudeseiten untereinander sind durch die jeweilige Ausrichtung zur Sonne hin erklärbar. Die südlich ausgerichtete Zwischenzone ist höher temperiert als die nördliche. Die Temperierung der Bauteile selber bestätigt diese Verteilung. Dach und Südseite weisen die höchsten Temperaturen auf, sie fallen zur Nordseite hin ab.

Abb. 75 a-c  
qualitative  
Temperaturverteilung

Südfassade  
Innenwand  
Nordfassade



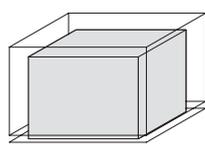
### 2.3.2. Variationen

In den folgenden Studien wird anstelle der hier ausführlich dargestellten Temperaturverteilungen beispielhaft der mittige Temperaturschnitt abgebildet. Er ist jedoch nur als Ausschnitt des Gesamtvolumens zu verstehen.

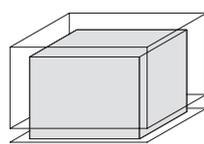
Aufgrund eingeschränkter Simulationsmöglichkeiten der Außenhülle kann die Membran nur mit einem Energiedurchlassgrad von 100% in die Berechnungen einlaufen. Dies führt zu unrealistisch hohen Temperaturen in der Zwischenzone. Die Ergebnisse der nachfolgenden Studien dürfen daher nur qualitativ verstanden werden. Quantitative Aussagen zur Zwischenzonentemperatur wurden im vorherigen Kapitel zum „Energieeinsparpotenzial“ ermittelt.

#### Variation der Öffnung des Lufteinlasses

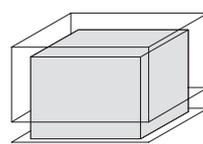
Der Lufteinlass der membranumhüllten Gebäudesysteme befindet sich im Sockelbereich der Fassade. Durch das Öffnen von Lüftungsklappen kann für Zuluft in der Zwischenzone gesorgt werden. Die eingeströmte Luft wird durch die Strahlung erwärmt und steigt nach oben. Die geringe Öffnung des Luftauslasses im Dachbereich der Außenhülle verhindert ein schnelleres Entweichen der Luft, sodass es zu einer Stauung der erwärmten Luft in der Zwischenzone kommt. Je geringer dabei die Öffnung des Lufteinlasses im Sockelbereich ist desto wärmer ist die Luft in der Zwischenzone. Zum Kühlen der Zwischenzone ist ein Öffnen des Lufteinlasses notwendig. Eine kühlere Zwischenzonentemperatur stellt sich ein und der Luftdruck in Richtung Auslass nimmt zu.



1cm ~ 0,4m<sup>2</sup>



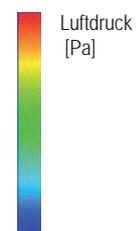
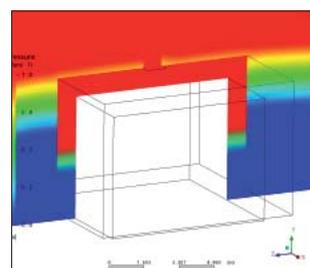
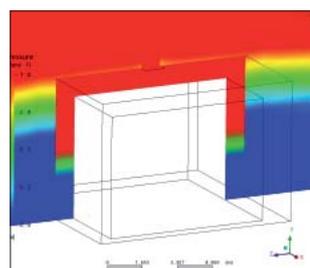
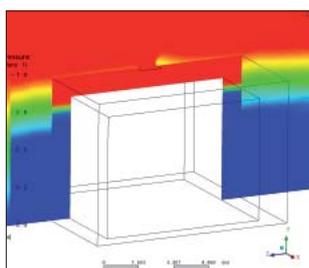
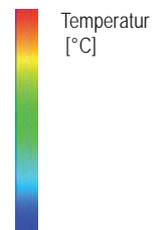
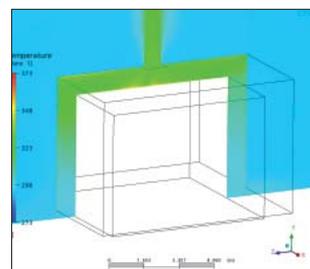
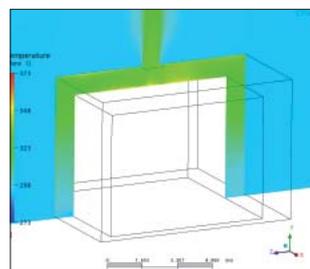
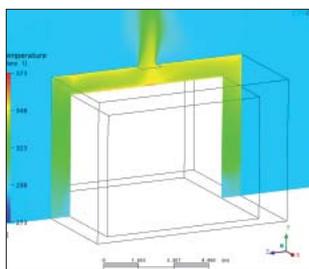
10cm ~ 4,0m<sup>2</sup>



50cm ~ 20m<sup>2</sup>

Abb. 76 a-i

Auslass: 0,25m<sup>2</sup>  
 Einlass: **variierend**  
 Spaltbreite: 1,0m  
 Gebäudehöhe: 8,0m  
 Windgeschw.: 1m/s  
 Strahlung: 600-300-60  
 Temperatur: 19°C

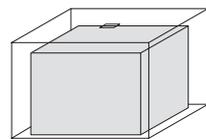
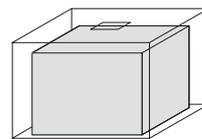
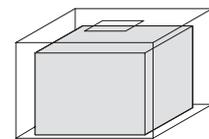
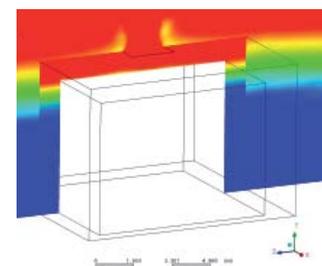
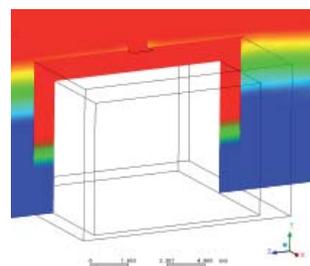
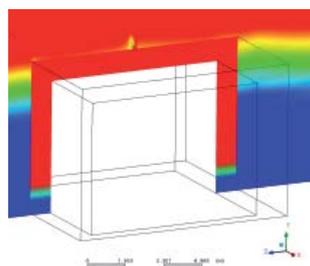
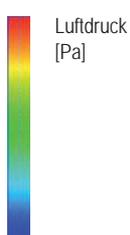
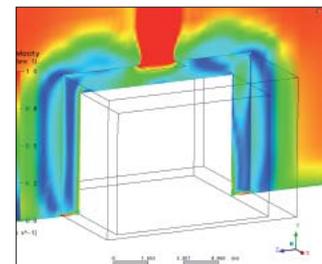
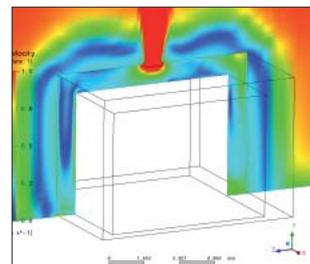
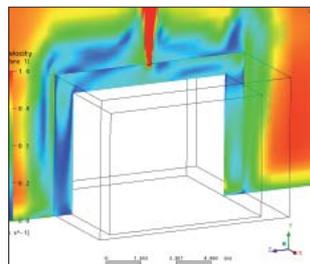
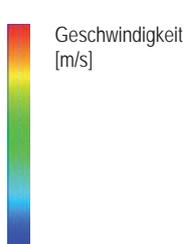
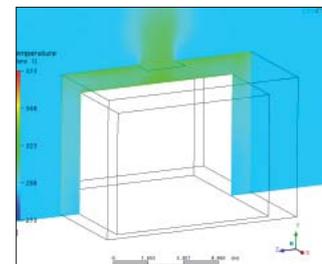
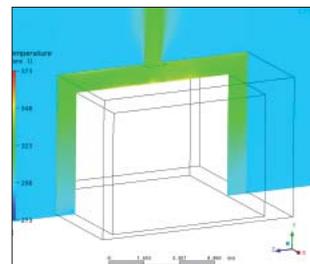
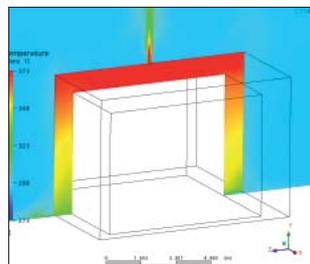
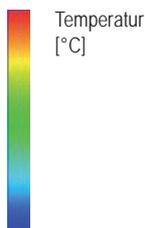


## Variation der Öffnung des Luftauslasses

Zur effektiven Kühlung der Zwischenzone ist jedoch die Öffnung des Luftauslasses wesentlich entscheidender. Dies wird aus der zweiten Studie B2 deutlich, die die Größe des Luftauslasses variiert: Temperaturunterschiede bis zu  $50^\circ$  entstehen vergleicht man Öffnungsgrößen von  $0,04\text{m}^2$  und  $4,0\text{m}^2$  miteinander. Das Nachströmen der Luft ist dabei durch einen Lufteinlass in Form eines  $10\text{cm}$  hohen Spalts konstant gehalten. Durch gleichzeitiges Öffnen und Schließen von Luftein- und -auslass kann die Lüftung optimiert werden und bessere Wirkungsgrade erzielen. Zu beachten ist, dass eine geringe Belüftung der Zwischenzone auch ohne Öffnen von Ein- oder Auslass zustande kommt. Fugenundichtigkeiten führen zu einer permanenten unkontrollierten Fugenlüftung die eine ständige Luftzirkulation in der Zwischenzone erzeugt.

Die Luftgeschwindigkeiten in der Zwischenzone werden kaum durch Größenunterschiede der Ein- und Auslassöffnungen bzw. den daraus resultierenden unterschiedlichen Temperaturen beeinflusst. Maßgebend für die Luftgeschwindigkeit, dies werden auch die weiteren Studien zeigen, ist die für den gesamten Untersuchungsraum angesetzte Windgeschwindigkeit, die für diese Studie bei  $1\text{m/s}$  liegt.

Abb. 77 a-i  
 Auslass: **variierend**  
 Einlass:  $10\text{cm} \sim 4\text{m}^2$   
 Spaltbreite:  $1,0\text{m}$   
 Gebäudehöhe:  $8,0\text{m}$   
 Windgeschw.:  $1\text{m/s}$   
 Strahlung:  $600\text{-}300\text{-}60$   
 Temperatur:  $19^\circ\text{C}$

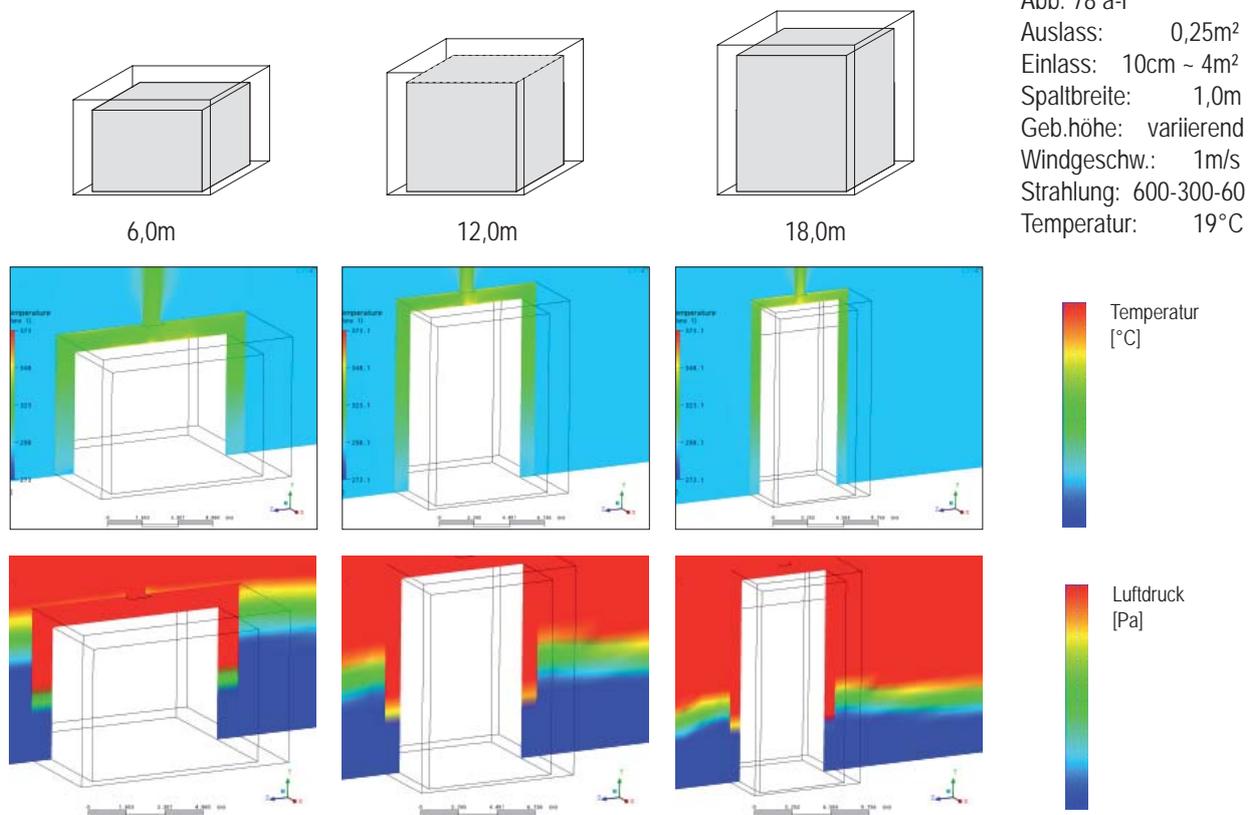
20 cm ~  $0,04\text{m}^2$ 100cm ~  $1\text{m}^2$ 200cm ~  $4\text{m}^2$ 

## Variation der Gebäudehöhe

Die Luft der Zwischenzone wird durch die Sonnenstrahlung erwärmt und steigt nach oben, dadurch entsteht eine Temperaturverteilung, die im Dachbereich Maximalwerte aufweist, im Bodenbereich die kältesten Temperaturen aufweist. Bei Anwendungen der membranen Gebäudehülle bei mehrgeschossigen Gebäuden muss davon ausgegangen werden, dass untere Räume des Gebäudes von den Vorteilen der winterlichen Energieeinsparung nur gering profitieren, höher gelegene Räume des Gebäudes im Sommer den stark erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind.

Dies zeigt die hier abgebildete Studie zur Variation der Gebäudehöhe. Das Innengebäude mit 6m Höhe wird verglichen mit umhüllten Gebäuden, die, bei gleicher Grundrissfläche, 12m bzw. 18m hoch sind. Die Zwischenzone wurde dabei konstant auf 1m Breite gehalten. Die Ergebnisse zeigen ähnliche Temperaturverläufe mit nahezu gleichen Maximal- und Minimaltemperaturen, jedoch wächst die Zone der kühlen Temperatur bei Gebäuden die höher sind als 6m geschoßhoch an und führt zu einer unwirtschaftlichen Temperaturverteilung für das Gebäudesystem.

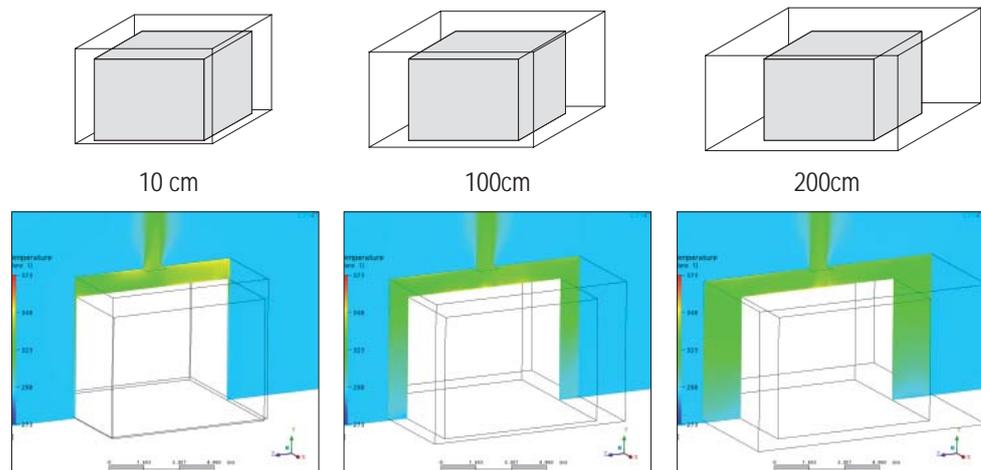
Eine sinnvolle Anwendung der Membranhülle liegt also bei maximal zweigeschossigen Gebäuden, wenn aufwändige Lüftungstechnik vermieden werden soll. Auch die Gliederung der Zwischenzone in einzelne individuell belüftete Schotten könnte eine Lösung für mehrgeschossige Gebäude sein. Diese Lösung wird bei mehrgeschossigen Glasdoppelfassaden verwendet [Com95], führt jedoch zu erheblichen Mehraufwand. Insofern beschränkt sich diese Arbeit im weiteren Verlauf auf Gebäude geringer Höhe.



### Variation der Breite der Zwischenzone

Die Temperaturverteilungen der drei Variationen unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Insofern kann man festhalten, dass enganliegende Membranhüllen, mit einer nur 10cm breiten Hinterlüftung ebenso gut als Solarfalle funktionieren, wie breitere Zwischenzonen. Größere Volumina erfordern jedoch erhöhten Energieaufwand, um gleiche Temperaturen zu erzeugen, sodass das Zwischenzonenvolumen Einfluss auf die Funktionsweise der membranumhüllten Gebäudesysteme hat. Ausschlaggebend für ihre Leistungsfähigkeit ist das Oberflächen-Volumen Verhältnis.

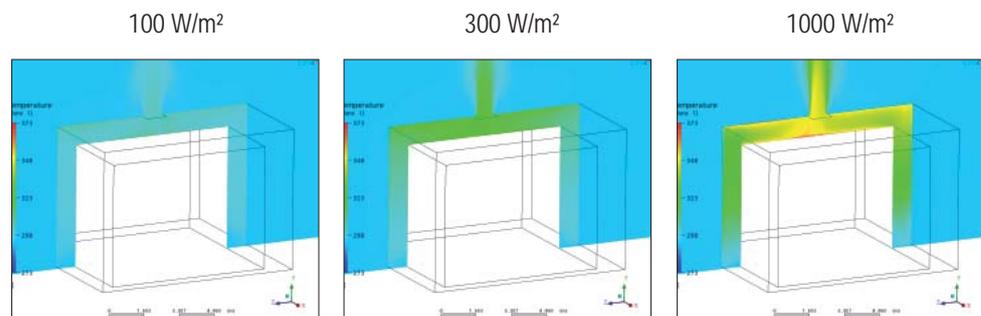
Abb. 79 a-f  
 Auslass: 0,25m<sup>2</sup>  
 Einlass: 10cm ~ 4m<sup>2</sup>  
 Spaltbreite: variierend  
 Gebäudehöhe: 6m  
 Windgeschw.: 1m/s  
 Strahlung: 600-300-60  
 Temperatur: 19°C



### Variation der Strahlung

Wie zu erwarten steigen die Zwischenzonentemperaturen mit der Erhöhung der Solarstrahlungsleistung an. Beachtenswert ist dabei jedoch, dass auch bei geringer Diffusstrahlung die Solarfalle noch funktioniert und Zwischenzonentemperaturen entstehen, die oberhalb der Außenlufttemperatur liegen.

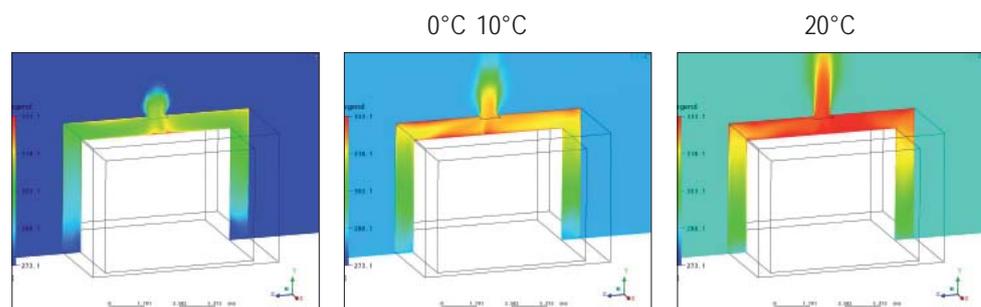
Abb. 80 a-c  
 Auslass: 0,25m<sup>2</sup>  
 Einlass: 10cm ~ 4m<sup>2</sup>  
 Spaltbreite: variierend  
 Gebäudehöhe: 6m  
 Windgeschw.: 1m/s  
 Strahlung: variierend  
 Temperatur: 19°C



### Variation der Temperatur

Abschließend vergleicht die Studie B6 den Temperaturverlauf der Zwischenzone bei wechselnden Außentemperaturen. Die Temperaturdifferenz von Zwischenzone zu Außenluft bleibt dabei konstant.

Abb. 81 a-c  
 Auslass: 0,25m<sup>2</sup>  
 Einlass: 10cm ~ 4m<sup>2</sup>  
 Spaltbreite: variierend  
 Gebäudehöhe: 6m  
 Windgeschw.: 1m/s  
 Strahlung: 600-300-60  
 Temperatur: variierend





### 3. Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranrahmenmodule

#### 3.1. Form, Nutzung und Gestaltung

- 3.1.1. Das Gebäude
- 3.1.2. Die Zwischenzone
- 3.1.3. Die Gebäudehülle
- 3.1.4. Referenzen
- 3.1.5. Das Membranmodul
- 3.1.6. Sattelfläche
- 3.1.7. Buckelfläche
- 3.1.8. Bogenfläche

#### 3.2. Konstruktion und Optimierung

- 3.2.1. Vorspannsysteme
- 3.2.2. Druckschrauben-Rahmenmodule
- 3.2.3. Zugschrauben-Rahmenmodule
- 3.2.4. Zugschrauben-Balkenmodule
- 3.2.5. Konstruktionen zur Auslenkung der Membran
- 3.2.6. Vergleich der Vorspannsysteme
- 3.2.7. Optimierung und Weiterentwicklung  
der Zugschrauben-Rahmenmodule

#### 3.3. Untersuchung des Tragverhaltens

- 3.3.1. Tragverhalten am vereinfachten Rahmen
- 3.3.2. Tragverhalten am Spannbalkenrahmen
- 3.3.3. Einwirkungen
- 3.3.4. Lastfälle und Lagerbedingungen
- 3.3.5. Tragverhalten sattelförmig bespannter Rahmenmodule
- 3.3.6. Tragverhalten buckelförmig bespannter Rahmenmodul
- 3.3.7. Tragverhalten bogenförmig bespannter Rahmenmodule
- 3.3.8. Vergleich des Tragverhaltens der Rahmenmodule



### 3.1. Form, Nutzung und Gestaltung der membranumhüllten Gebäude

Nach den bauphysikalischen Untersuchungen des membranumhüllten Gebäudekonzeptes werden nun Form, Nutzung und Gestaltung dieser Gebäude im Vordergrund stehen. Dabei bilden die Hülle, ihre Unterkonstruktion sowie das Innengebäude die drei Hauptteile des Bauwerks. Das Hauptaugenmerk dieser Untersuchungen wird sich auf die Membran Außenhülle richten.

#### 3.1.1. Das Gebäude

Das Energieeinsparpotenzial ist einer der wichtigen Merkmale, das aus dem konstruktiven Aufwand der Gebäudeumhüllung resultiert. Insofern ist bei der Planung des Gebäudes eine Beachtung der allgemeinen Regeln des energieoptimierten Bauens hilfreich und sinnvoll, um mit allen verfügbaren Gestaltungsfaktoren das Energieeinsparpotenzial des Gebäudes zu erhöhen. Dazu gehört die Wahl kompakter Gebäudekubaturen, die ein günstiges Volumen- Außenflächenverhältnis erzielen und damit die Flächen wärmeverlierender Bauteile im Verhältnis zum umbauten Volumen optimieren. Darüber hinaus ist eine Zonierung der Grundrisse vorteilhaft. Aufenthaltsräume sollten nicht in Nordlage angeordnet sein. Nebenräume und Flure mit geringeren Raumtemperaturen eignen sich besser als Pufferräume zwischen Aufenthaltsraum und kalter Nordseite. Fensteröffnungen sollten auf der Nordseite vermieden, oder minimiert werden, auf Ost- und Westseite nur so groß wie nötig ausfallen und ihr Anteil auf der Südseite bis zu 50% betragen (bei Dreifach-Wärmeschutzverglasung um bis zu 50% mehr). Die Außenwände des Gebäudes sollten hoch gedämmt sein, um Wärmeverluste im Winter zu verhindern und eine Überhitzung im Sommer zu vermeiden. Ein U-Wert von  $\leq 0,3 \text{ kW/m}^2$  sollte mit ihrer Konstruktion erzielt werden. Vorteilhaft ist eine dunkle Farbe der Außenwand, um die Strahlungsabsorption und Speicherfähigkeit der Wand zu erhöhen. Die Anordnung von Speichermassen im Gebäudeinnern ist ebenfalls anzuraten. Die Außenwände können diffusionsoffen gestaltet werden. Wie bereits ausgeführt, ermöglicht die vorgeseetzte Membranhülle erhöhte Temperaturen in der Zwischenzone, die anfallendes Tauwasser in den Gebäudeaußenwänden auch in der kritischen, kalten „Verdunstungsperiode“ abtransportiert. Vertiefende Informationen hierzu sind in [Sie95] [Boh04] angegeben.

#### 3.1.2. Die Zwischenzone

Zwischen Gebäude und äußerer Membranhülle wird eine Zwischenzone aufgespannt. In ihr kann ein künstliches Klima erzeugt werden, indem die Wärmestrahlung des einfallenden Lichts am Herausstrahlen gehindert wird. Dieses Prinzip der Solarfalle erzeugt höhere Temperaturen in der Zwischenzone und schützt das Gebäude vor Wärmeverlusten. Zur Dimensionierung der Zwischenzone wurden im Kapitel 2.3. Aussagen getroffen. Prinzipiell reicht ein schmaler Spalt zwischen Hülle und Gebäudeaußenwand aus, um ein künstliches Klima aufzubauen, ein freies Durchströmen des Spalts muss dabei jedoch gewährleistet bleiben. Eine Verbreiterung der Zwischenzone ermöglicht es, sie auch für andere Zwecke zu nutzen. Sie kann als Eingangsbereich oder Wintergarten genutzt werden. Es eignen sich Nutzungen die entweder saisonal beschränkt sind oder für die stark schwankenden Jahrestemperaturen unproblematisch sind. Die Zwischenzone ist darüber hinaus der Ort, an dem eine Unterkonstruktion angeordnet werden kann. Die Membranhülle kann durch ihre Vorspannung äußere Lasten aufnehmen und gibt

diese an eine Unterkonstruktion ab. Dabei kann die Außenwand des Gebäudes für diese Aufgabe herangezogen werden, bei zunehmender Breite der Zwischenzone wird jedoch eine eigenständige Konstruktion notwendig. Sie leitet die Kräfte, die auf die Fassade wirken in die Fundamente und den Baugrund weiter.

### 3.1.3. Die Gebäudehülle

Die Gebäudehülle ist äußerer Abschluss des Gebäudes. Sie besteht aus biegeweicher Membran, oder Folie, die vorgespannt wird. Die Vorspannung verleiht der Konstruktion Steifigkeit, um äußere Lasten wie Wind, oder Schnee aufnehmen zu können und sie an die Unterkonstruktion weiterzuleiten. Als Material bieten sich die in Kapitel 1.6. aufgelisteten Membran- und Folienwerkstoffe an. Die Membran bzw. Folie wird in der Fassadenhülle doppelagig ausgeführt. Die Anwendung von zweischichtigen Gebäudehüllen führt zu einem besseren Wärmeschutz der Zwischenzone und ist Voraussetzung für eine positive Energiebilanz. Dies haben die bauphysikalischen Studien im vorherigen Kapitel bereits aufgezeigt. Erst die nahezu stehende Luftschicht zwischen den Membran- bzw. Folienlagen ermöglicht eine Isolation, die ausreichenden Wärmeschutz der Zwischenzone bietet. Eine Doppellagigkeit von vorgespannten Membranen und Folien führt allerdings zu einem erhöhten konstruktiven Aufwand. In der konstruktiven Planung, die in Kapitel 3.2. vertieft wird, werden Lösungen vorgeschlagen, wie die Membrankonstruktion auf- und nachspannbar zu realisieren ist.

Als äußeren Abschluss bildet die Membranhülle sowohl vertikale Fassade, als auch horizontales, oder geneigtes Dach des Gebäudes. Sie vereint beide Gebäudeelemente. Zur Bildung einer thermisch aktiven Zwischenzone reicht es allerdings auch aus, lediglich eine Doppelfassade, oder ein doppelagiges Dach auszubilden. Es sind also folgende drei Typen zu unterscheiden: Gebäude mit zweiter Membranüberdachung, Gebäude mit vorgeschalteter Membranfassade sowie die komplett membranumhüllten Gebäude.

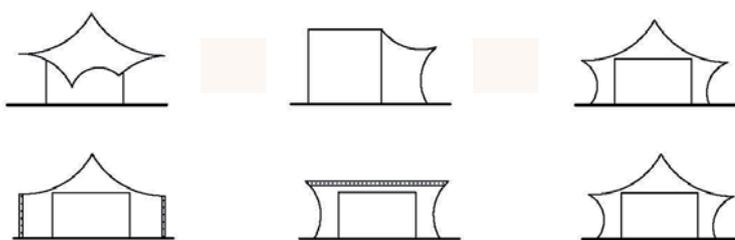
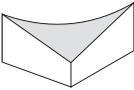
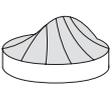
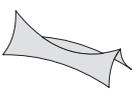


Abb. 82  
Membran als Dach,  
Fassade und Hülle

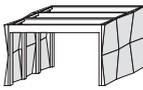
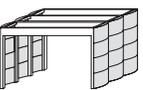
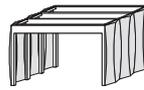
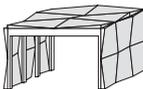
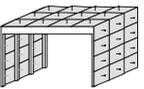
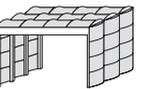
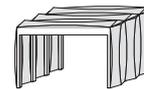
Nach der Lage der Gebäudehülle nun zu ihrer Form: Als mechanisch vorgespannte Membrankonstruktionen unterliegt die Form der Gebäudehülle den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Formfindung, wie sie im Kapitel 1.2. beschrieben wurde. Ihre Formenvielfalt ist groß, bedarf jedoch einer antiklastischen Krümmung. Unter Berücksichtigung dieser gegensinnigen Krümmung der Membran verbleiben die vier Grundtypen der mechanisch vorgespannten Membran als mögliche Form der Gebäudehülle: Sattelfläche, Buckelfläche, Bogenfläche sowie die Grat- und Kehlfläche, samt ihrer Variationen, Kombination und Addition. Ob und wie mit diesen Formen ein Gebäudehülle erstellt werden kann zeigt die nachstehende Tabelle.

Tabelle 3.1.  
Formen der  
Gebäudehülle

Form	Sattelform	Buckelform	Bogenform	Grat- und Kehlflächenform
singuläre Form				
modulare Form				

Mit einer Großform ist es nur schwer möglich effizient eine Gebäudehülle zu bilden. Die gekrümmte Form der Membran kann konstruktiv nur unter großem Aufwand an die rechteckige Gebäudekubatur herkömmlicher Architektur angeschlossen werden, formal kommt es zu unbefriedigenden Ergebnissen. Die Addition von vielen Kleinformen ergibt eine modulare Flächenbildung der Membran, die deutlich einfacher mit rechteckiger Kubatur korrespondiert. Ihre Anwendung im Fassaden- und Dachbereich wird in der nachstehenden Tabelle aufgezeigt.

Tabelle 3.2.  
modulare  
Flächenbildung

Lage		Sattelform	Buckelform	Bogenform	Grat- und Kehlflächenform
zweidimensional, eben	Fassade				
	Dach				
	Dach und Fassade				
räumlich	Hülle				

Der Vorteil der Kleinformen liegt an ihrer flexiblen geometrischen Anpassungsfähigkeit. Herkömmlich, großformatige Membrankonstruktionen sind geprägt durch antiklastische Formensprache und bleiben isoliertes Einzelobjekt. Bei kleinformatischen Rahmenmodulen nimmt sich die antiklastische Membrankrümmung so stark zurück, dass das Gesamterscheinungsbild des Baukörpers einer ganz anderen Formensprache folgen kann. Rechtwinklige aber auch gekrümmte Formen können mit Rahmenmodulen erzeugt werden (vgl. Abb.83a,b).

Abb. 83a,b  
a - Beispiel einer grossformatigen Membranform: Passagierkai Warnemünde [Cov07]  
b- Beispiel einer kleinformatischen, modularen Membranform: BMW CleanEnergy Pavillon Expo Hannover [Cov07]



### 3.1.4. Referenzen

Die Referenzprojekte in Abb. 83a und b verdeutlichen die formale Entwicklung der mechanisch vorgespannten Membranbauten hin zu kleinmaßstäblichen Rahmenmodulen. Die membranbespannten Rahmenmodule in ihrer Anwendung als Gebäudehülle stellen das Untersuchungsobjekt dieser Arbeit dar und werden im weiteren Verlauf auf ihre Gestaltung, Konstruktion und ihr Tragverhalten hin untersucht. Zur Einordnung des Themas soll jedoch vorab ein Exkurs zu Referenzprojekten und aktueller Forschung auf diesem Gebiet, das Thema der Rahmenmodule innerhalb der aktuellen Entwicklungen einordnen.

In der Literatur gibt es zu den einzelnen Aspekten, wie angegeben, ausreichend Informationen. In der Zusammenfassung der Aspekte, innerhalb eines Gebäudesystems, dass durch eine mechanisch vorgespannte membran Doppelhülle gekennzeichnet ist, werden die Angaben jedoch spärlich. Karlotto Schott weist in seinen Ausführungen über „Konstruktionen von Gebäudehüllen mit organischen Formen, die für einen dauerhaften Aufenthalt bestimmt sind“ [Bur04] auf Projekte hin, die in Teilen auf beschriebene Funktionsweisen zurückgreifen. Er erwähnt die Xiamen Public Library in Süd China, geplant von den Architekten PAS Jourdan & Müller, Frankfurt, wobei es sich hier lediglich um eine Dachkonstruktion handelt. Als zweites Beispiel führt er die Bibliothek der Freien Universität zu Berlin an, die anfänglich mit einer zweischaligen Membranhaut geplant war, letztlich, in Kombination mit einer festen Außenfassade, ein Klimapuffer durch eine Innenmembran bekam. „Bei dem vorgestellten Projekt ... konnte die zuerst geplante äußere Gebäudehülle aus einer textilen Membran nicht realisiert werden, weil der geforderte hohe Schallschutz von Außen nach Innen nicht mit Ersatzmaßnahmen erbracht werden konnte. Der ungenügende Wärmeschutz einer textilen Membranhülle und auch der fehlende Brandschutz führten zu einer wärmegeämmten und feuergeschützten Paneelkonstruktion, sodass nur die innere Membran zur Ausführung gelangte.“ [Sch03]. Weitere gebaute Beispiele einer membran Doppelhülle liefern das Designstudio für die Siemens-Design & Messe GmbH, München, geplant von Thomas Herzog und José-Luis Moro (Abb.84a) [Fla01]. Hier aktiviert eine innen liegende, zweiachsig gekrümmte Folienkonstruktion die Dämmeigenschaften des festen, äußeren Daches. Ein Raum-im-Raum Konzept verfolgt auch das von Kazuyo Sejima geplante Wohnhaus in Okayama (Abb.84b) [Sch01]. Dieses Projekt entspricht dem Aufbau der umhüllten Gebäudesysteme mit Außenhülle, Zwischenzone und Innengebäude, jedoch ohne Verwendung von Membranmaterialien.

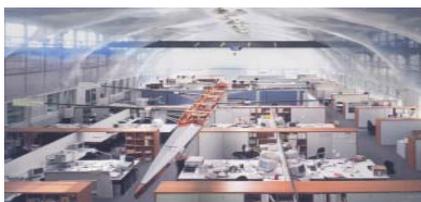
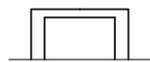


Abb. 84 a,b  
Siemens Designstudio  
Herzog, Moro [Fla01]  
Wohnhaus Okayama,  
Kazuyo Sejima  
[Sch01]

Die Projekte auf der nachfolgenden Seite zeichnen sich alle durch den Einsatz mechanisch vorgespannter Fassaden aus und stehen somit in enger Verbindung zu dem vorgestellten membranumhüllten Gebäudekonzept. Die Fassaden sind jedoch als einfache, nicht als vorgeschaltete zweite Gebäudehülle ausgeführt und

weichen daher von der vorgestellten Fassadendopplung ab. Ihr Erscheinungsbild sowie die konstruktive Detaillierung stehen jedoch in enger Verwandtschaft zu den membranumhüllten Gebäudesystemen und sind damit hilfreiche Referenzen.

Als Beispiel für die transluzente Gebäudehülle sei das Wohnhaus bei Tokio von Shigeru Ban genannt, dessen Innenwand mit einer Kunststoffmembran bespannt wurde (Abb.85a,b) [Sch01]. Das transluzente Material lässt ein diffuses Licht in das Gebäudeinnere. Der transparenter Durchblick und Lüftungsmöglichkeiten werden durch eingesetzte Fenster ermöglicht. Der Einsatz der Kunststoffmembran im Dachbereich zeigt das zweite hier abgebildete Projekt Shigeru Bans (Abb.85c) [Ume00]. Das Wohnhaus in Tokio wird über eine bogenförmig bespannte Membran im Dachbereich abgeschlossen.



Abb. 85 a-c  
a,b) Wohnhaus bei Tokio, Shigeru Ban [Sch01]  
c) Einfamilienhaus Tokio, F.O.B.A. Kioto in [Ume00]



Folgende drei Projekte verdeutlichen den Wandel der Anwendung von Membrankonstruktionen von anfänglich singulären Großformen (Abb.86a) [Ten07], über stärker gegliederte und individueller geformte Segmentierung des Baukörpers (Abb.86b) [Cov07] bis hin zum modularen Einsatz von membranbespannten Bauteilen (Abb.86c) [Sch01].

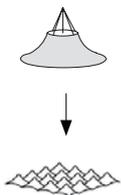


Abb. 86 a-c  
a) TSS-Singapore, Ayrle Architekten  
b) BMW\_Pavillon , IAA 2001 [Cov07]  
c) Wohnhaus bei Tokio, Shigeru Ban [Sch01]



Elementierung und Modularisierung sind Themen die auch bei der Gestaltung der Überdachung der Nordischen Botschaften in Berlin angewendet wurden. Aneinandergereihte, bogenförmig bespannte Membranflächen bilden hier die Dachhaut der Zugangsüberdachung zu den Gebäuden der nordischen Botschaften in Berlin (Abb. 87b). Die Gestaltung des Sony-Center-Daches in Berlin arbeitet gestalterisch mit der Addition von Einzelflächen, die um einen Mittelpunkt rotierend angeordnet sind (Abb. 87c). Die Innenhofschirme, geplant von der Firma Covertex zeigen eine modulare Anwendung von folienbespannten Konstruktionen (Abb.87d). Auch die weiteren Projekte sind aktuelle Referenzen zum Thema der Anwendung von Membran und Folie im Fassaden und Dachbereich: Der Flughafentower in Wien (Abb.87a), der Flughafenterminal Bangkok (Abb.88b), das Hotel Burj El Arab (Abb.88a) und der japanischer Pavillon der Expo Weltausstellung in Hannover 2000, von Shigeru Ban (Abb.88c)

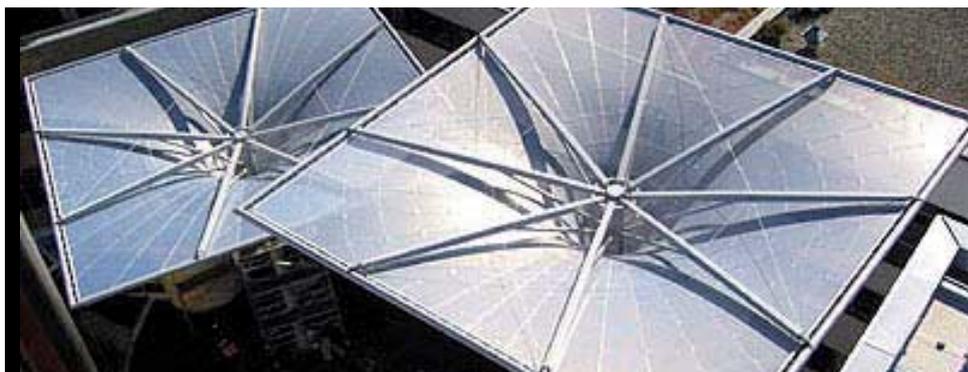
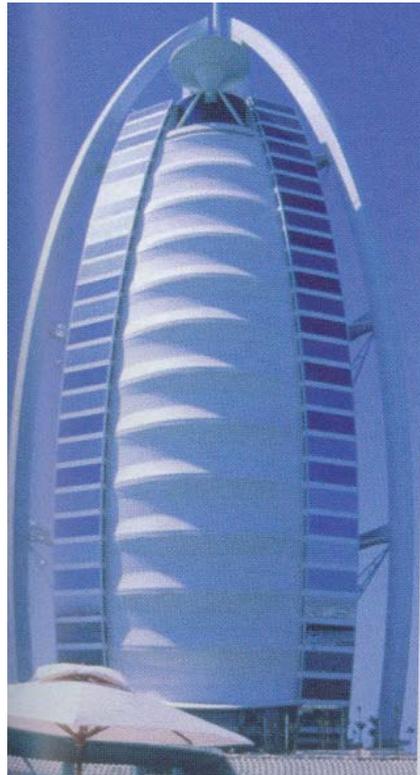


Abb. 87  
a) Flughafentower  
Wien [Cov07]  
b) Nordische  
Botschaften, Berlin  
c) Dachuntersicht Sony  
Center , Berlin  
d) IHK Schirme  
Würzburg [Cov07]



Abb. 88  
 a) Hotel Burj El Arab,  
 Dubai [Ten07]  
 b) Flughafenterminal  
 Bangkok  
 c) Expo Pavillon, 2000,  
 Shigeru Ban



Forschungen auf diesem Gebiet laufen am Fachgebiet Konstruktives Entwerfen und Klimagerechtes Bauen, TU-Berlin, unter der Leitung von Herrn Prof. Hascher, zu Fragestellungen der „Entwicklung von adaptiven Fassadensystemen mit Einsatz von ETFE-Folien“. Zu dem betreut Prof. Hascher die laufende Dissertation zum Thema der „Folien als vorgespanntes Membranentragwerk bei Hochhausfassaden“ von P. Adamczewski. Prof. Steffan leitet am Fachgebiet Gebäudetechnik und Entwerfen, TU-Berlin, Forschungen zum Thema „Greenhouse Climate Control as a Source of Water and Energy“. Das als „Watergy“ benannte, EU-geförderte Projekt resultierte in der Realisierung dreier membranbespannter Prototypen ([www.watergy.de](http://www.watergy.de)). R. Lipcke entwickelt in seiner Dissertation unter Leitung von Prof. Rückert, TU-Berlin „Adaptive Fassaden mit hochtransparenten Folien“. An der Technischen Universität München, am Institut für Entwerfen und Bautechnik, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, werden unter der Leitung von Professor Dr. Thomas Herzog Forschungen zum Thema „Fassade und Dach des Hauses unter dem Gesichtspunkt einer ganzheitlichen Betrachtung“ durchgeführt. Es sei auf die abgeschlossenen Promotionen von: H. Hartwig [Har03], W. Lang [Lan00] und J. Cremers „Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle“ [Cre06] verwiesen sowie auf eine noch laufende Promotion von Lingyun Zhang zum Thema „Untersuchung zu mehrlagigen Membrankonstruktionen im Hinblick auf unterschiedliche Funktionen der Gebäudehülle“. Am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Uni-Stuttgart, unter der Leitung von Prof. Schlaich / Prof. Sobek stellt die Dissertation von A. Bögle einen theoretischen Überblick über die „Morphologie doppelt gekrümmter Flächentragwerke“ dar [Bög04], zur Zeit beschäftigt sich M. Holzbach in seiner laufenden Dissertation mit dem Thema „Adaptive konditionierende Gebäudehüllen“. Die angeführten Projekte und Dissertationen sind eng verwandt mit dem hier vorgestellten membranumhüllten Gebäudekonzept und können als Referenzen zu diesem Thema herangezogen werden.

### 3.1.5. Das Membranmodul

Die kleinmaßstäblichen, modularen Formen des Membranbaus sind also gestalterisch viel flexibler und eignen sich, im Vergleich mit den großformatigen Einzelstrukturen, besser als Element der Gebäudehülle. Als Modul lässt sich diese Konstruktion kostengünstig im Werk herstellen. In Serie gefertigt können große Stückzahlen zu günstigen Preisen hergestellt werden, sodass sich die Rahmenmodule auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten von der teuren Einzelkonfektionierung der individuellen, großformatigen Membrankonstruktionen unterscheidet. Für eine vermehrte Anwendung dieser Bauweise ist die Möglichkeit der Serienfertigung eine entscheidende Voraussetzung.

Das Membranmodul basiert auf einer Rahmenkonstruktion, die auf Ober- und Unterseite, also doppellagig, mit jeweils einer Membranfläche bespannt wird. Bleibt der Rahmen eben, muss die Membran mittig durch Bogen oder Spreize ausgelenkt werden, um eine gegenseitige Krümmung in der Membranfläche zu erhalten. So entstehen Buckel- (Abb.89b) und Bogenfläche (Abb.89c).

Bleibt die Membran dagegen in der Fläche ungestützt muss durch die Auslenkung der Rahmenebene eine Krümmung in die Membran gebracht werden. Es resultiert die Sattelfläche (Abb.89a). Nachstehend die Abbildung der drei Grundformen mechanisch vorgespannter Rahmenmodule. Die Grat- und Kehlfläche, als vierte Grundform wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Die vorherigen Untersuchungen zeigten ihre formalen und konstruktiven Schwierigkeiten auf, die einem wirtschaftlichen Einsatz dieser Form auf kleinmaßstäblichen Modulrahmen entgegenstehen.

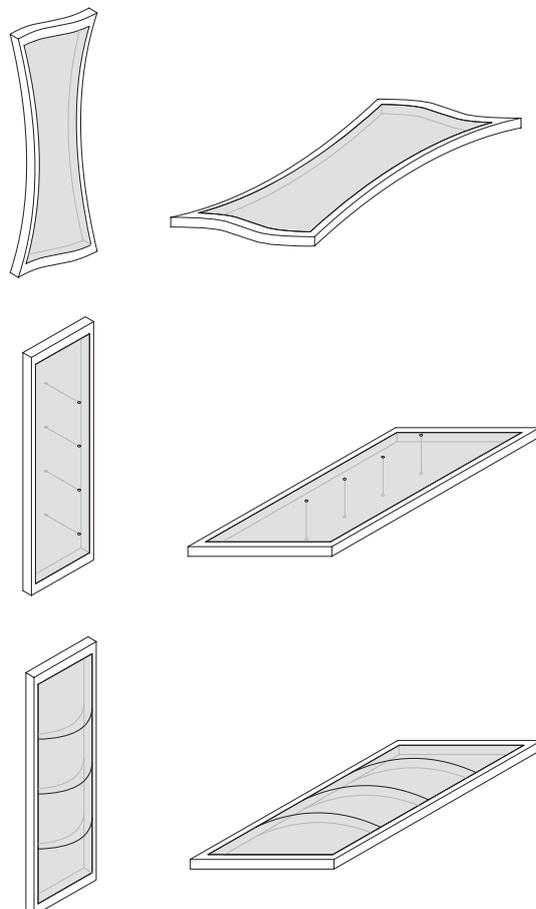
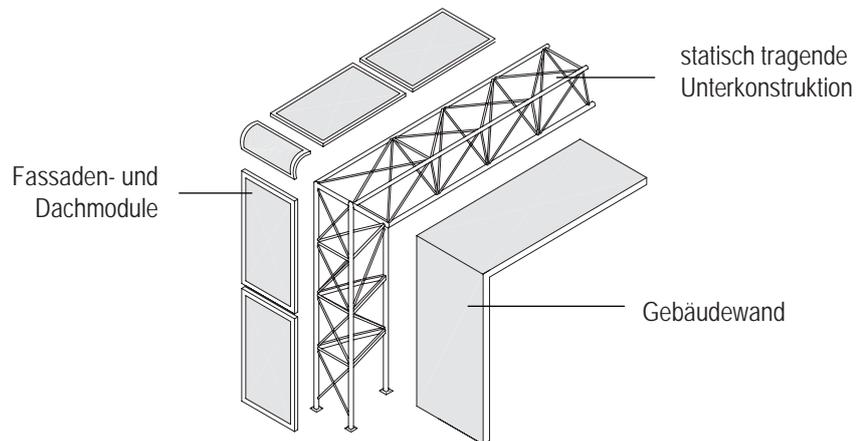


Abb. 89 a-c  
Die drei Grundformen  
der Membranmodule:  
a. Sattelfläche  
b. Buckelfläche  
c. Bogenfläche

Durch horizontale und vertikale Reihung der Membranmodule können entlang der Gebäudekubatur Fassaden und Dächer zusammengefügt werden. So ergeben sie eine Gebäudehülle, die sich in ihrer Form, des Gebäudes flexibel anpassen kann. Die Membranmodule werden direkt auf der Gebäudewand oder auf einer Unterkonstruktion befestigt, die zwischen Hülle und Außenwand platziert ist. Sie nimmt die Fassaden und Dachlasten auf und leitet sie in die Fundamente. Angrenzend die innere Wand, die das Gebäude von der Zwischenzone trennt.

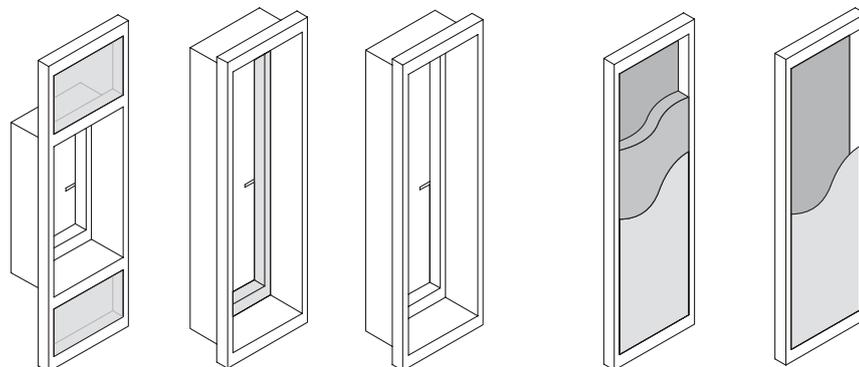
Abb. 90  
schematische  
Fassadenkonstruktion



Innerhalb der Module können auch Sonderelemente problemlos integriert werden. Wie bereits vorgestellt, arbeiten die membranumhüllten Gebäudesysteme mit sogenannten „Sommerfenstern“, die eine direkte Außenluftverbindung des Innengebäudes herstellen. Diese Verbindung, die mittels einer wärmegeprägten Laibung erzielt wird, kann in Form eines Rahmenmoduls hergestellt werden, und somit in die Konstruktion der Gebäudehülle integriert werden.

Variiert werden kann zudem der Aufbau der Gebäudehülle unter Verwendung unterschiedlich bespannter Membranmodule. In dieser Arbeit werden PVC-PE bespannte, aber auch mit ETFE-Folie bespannte Rahmen untersucht werden. Durch das Füllen der doppellagig bespannten Rahmenmodule mit Wärmedämmung kann dem Problem der Überhitzung vorgebeugt und die Dämmeigenschaften der Hülle verbessert werden

Abb. 91  
Sonderformen der  
Rahmenmodule



Die Einbindung der Sonderelemente in die Gebäudehülle wird auf der folgenden Seite in Abb.92a illustriert, wobei neben Fenster- und Türelemente auch Lüftungsclappen in den modularen Aufbau der Gebäudehülle integriert wurden. Durch sie kann die Belüftung der Zwischenzone reguliert werden. Im Sommer sorgen die Clappen für

ein Entweichen der aufsteigenden warmen Luft der Zwischenzone, wobei kühlere erdreichnähere Luft von unten nachgesaugt wird. Im Winter kann die angesaugte Luft in der Zwischenzone vorgewärmt werden und dann über das Öffnen eines „Winterfensters“ das Gebäudeinnere mit vorgewärmter Frischluft versorgt werden.

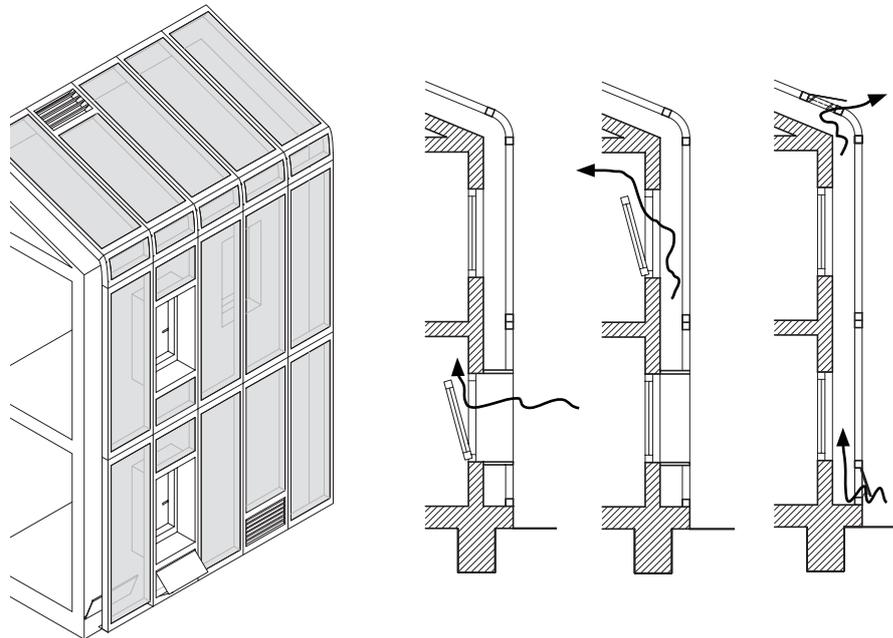


Abb. 92 a-d  
Belüftungskonzept

Neben der Verwendung fest bespannter Rahmenmodule bietet die Verwendung von Modulen mit raffbarer Bespannung oder innen liegenden, beweglichen Sonnenschutz eine Erweiterung der Anwendung der membranen Gebäudehülle. Sie ermöglichen eine Interaktion der Fassade auf wechselnde klimatische Gegebenheiten und führen die sonst starre und bewegungslose Fassade über in eine dynamisch, sich anpassende Gebäudehülle. Bei zweiten Gebäudehüllen ist diese Flexibilität einfacher zu erreichen als bei herkömmlichen Fassaden und Dächern, da die zweite Gebäudehülle von einer Großzahl ihrer Aufgaben durch die dahinterliegende Gebäudewand befreit ist.

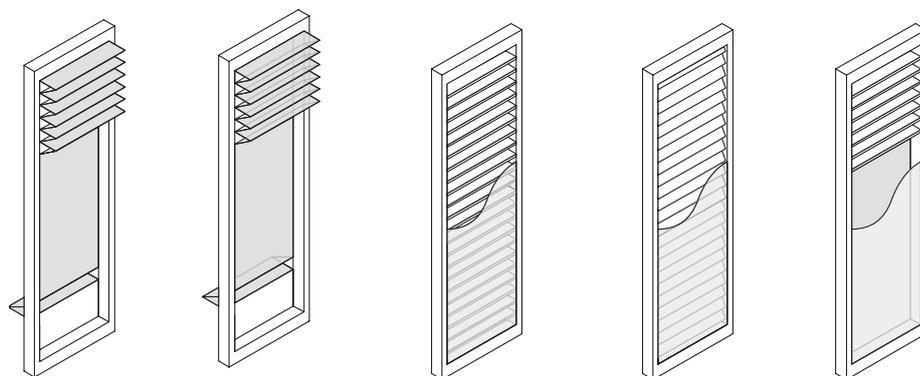
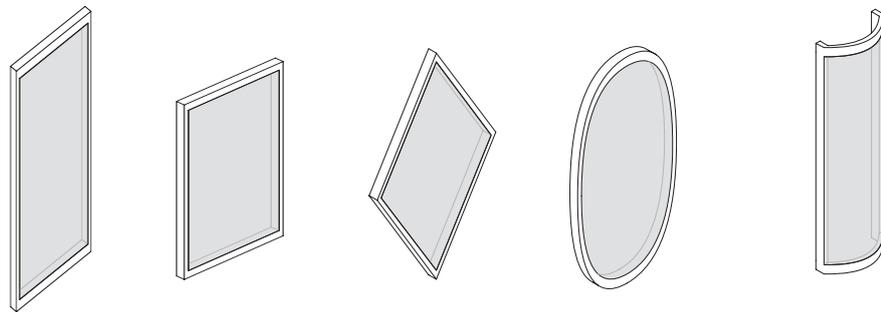


Abb. 93 a-e  
raffbare  
Rahmenmodule  
und Module mit  
innenliegenden  
beweglichem  
Sonnenschutz

Im weiteren Verlauf soll ein Überblick über mögliche Formen der Rahmenmodule gegeben werden. Trotz der Einschränkung der Bespannung auf Sattel- Bogen- und Buckelfläche ergibt sich in ihrer Kombination mit unterschiedlichen Rahmenformen eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten, die im Rahmen dieser Arbeit nur in Ansätzen zusammengestellt werden kann. Neben den bisher gezeigten rechteckigen

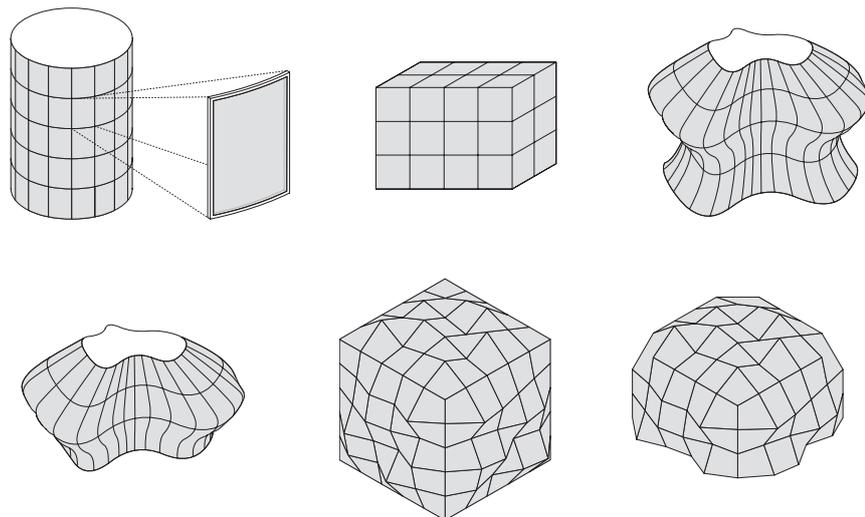
Rahmenformen können auch quadratische, elliptische oder rautenförmige Rahmenformen zum Einsatz kommen (Abb.69 a-d). Jede Grundgeometrie kann daraufhin wieder durch Krümmung einer oder mehrerer Seiten zu neuen Rahmenformen verändert werden (e).

Abb. 94 a-e  
Rahmenmodulformen



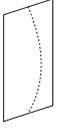
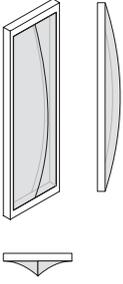
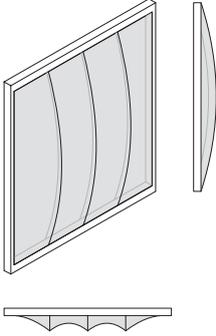
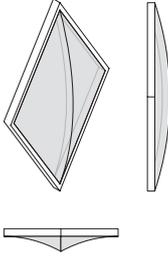
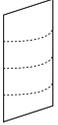
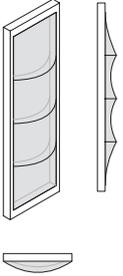
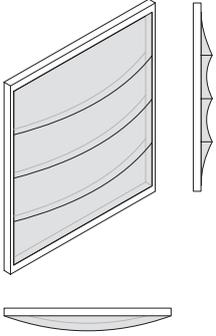
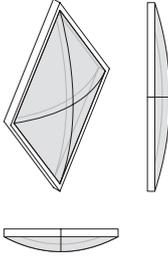
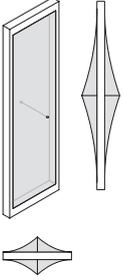
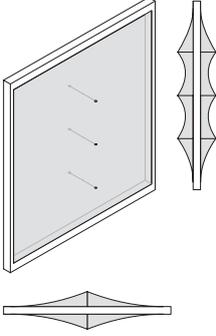
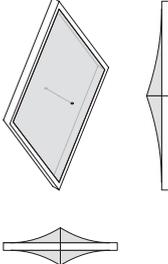
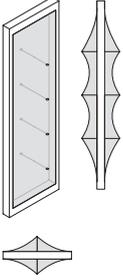
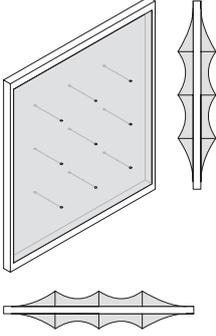
Rahmenmodule mit einseitig gekrümmten Rahmenseiten eignen sich vor allem zum Erzeugen von zylindrischen Körpern (Abb.95a). Rechteckige, oder quadratische Rahmenmodule passen sich gut herkömmlicher, rechtwinkliger Gebäudestrukturen an (Abb.95b). Aber auch beliebige Freiformen können durch individuell geformte Rahmenmodule hergestellt werden (c-g).

Abb. 95 a-g  
Gebäudegeometrien



Die Arbeit wird sich im weiteren Verlauf auf Rahmenmodule beschränken, die rechtwinklige Kubaturen erzeugen. Sie stellen die wirtschaftlichste Form in der Anwendung der Rahmenmodule dar und können mit herkömmlichen, rechtwinkligen Gebäudeformen verbunden werden. Dies ermöglicht ein breites Anwendungsspektrum und führt den Membranbau aus seiner Isolation der klassisch gekrümmten Sonderanfertigungen. Die nachstehenden Tabellen 2.3.a - c untersuchen diese Formen auf Gestaltung und räumliche Wirkung. Hierfür wurde die Formenvielfalt auf rechteckige, quadratische und rautenförmige Module begrenzt. Unterschiedlich bespannt wird ihre Form als Einzelmodul und zusammengesetzt als Fassadenbild dargestellt.

Tabelle 3.3a Formenstudie der Rahmenmodule

Form Variante			
			
			
			
			

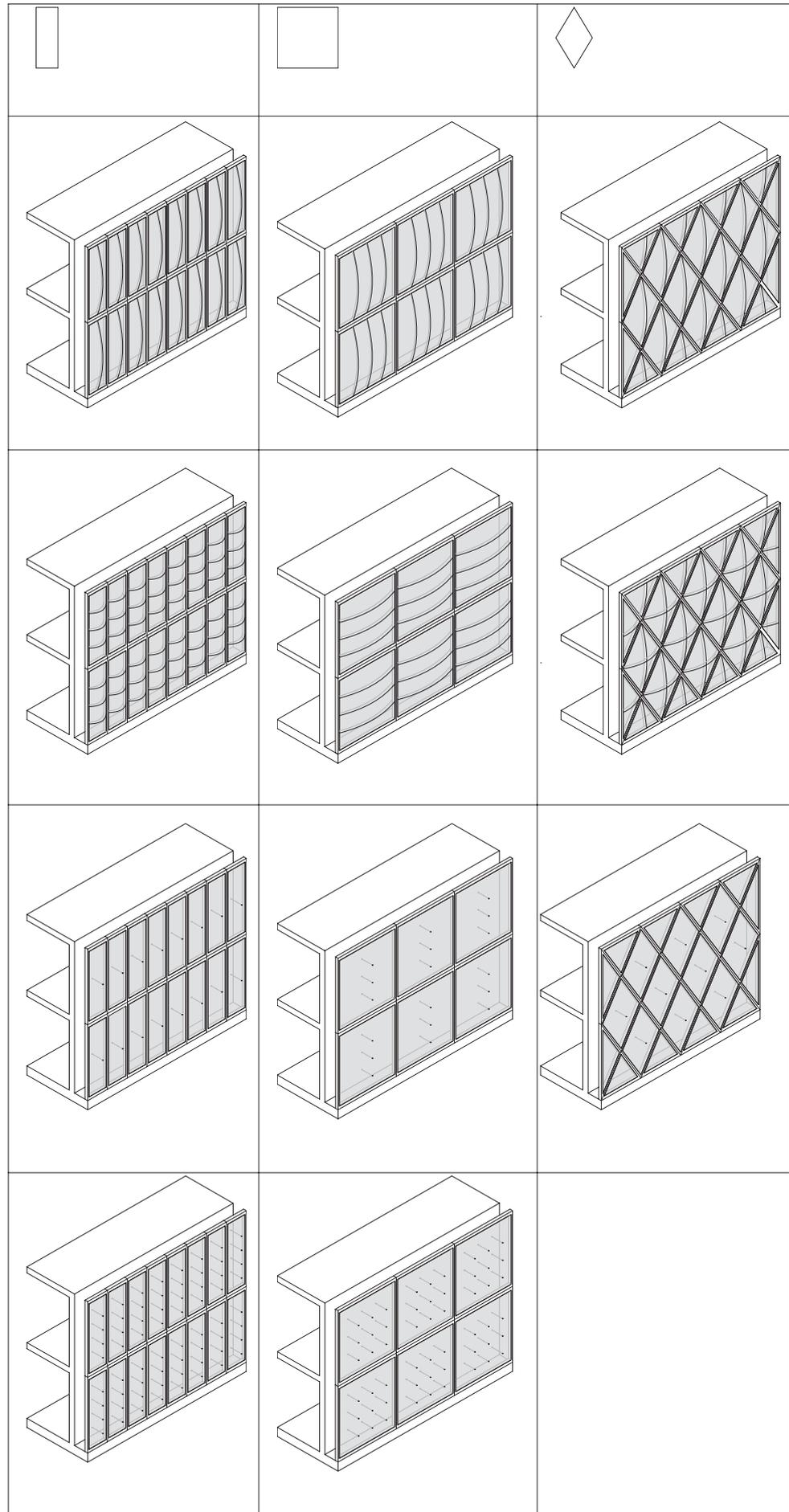
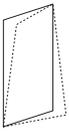
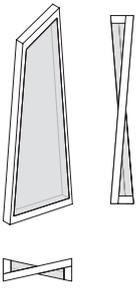
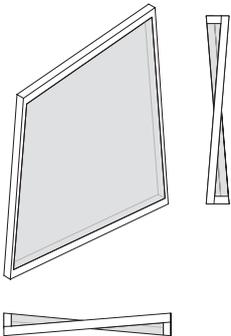
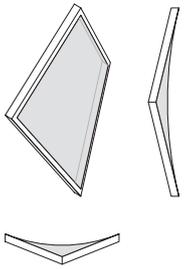
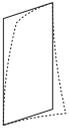
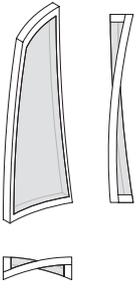
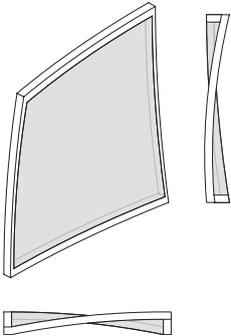
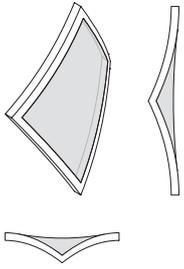
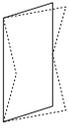
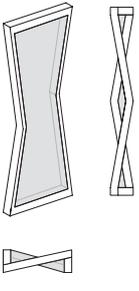
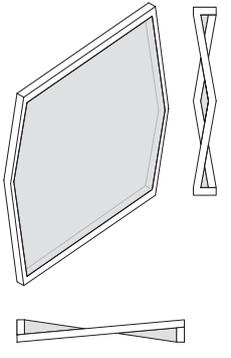
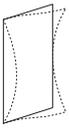
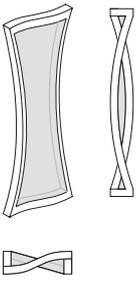
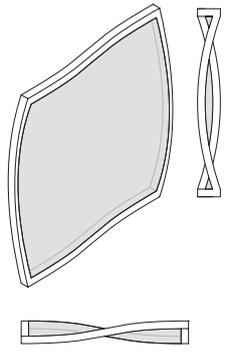


Tabelle 3.3b Formenstudie der Rahmenmodule

Form Variante			
			
			
			
			

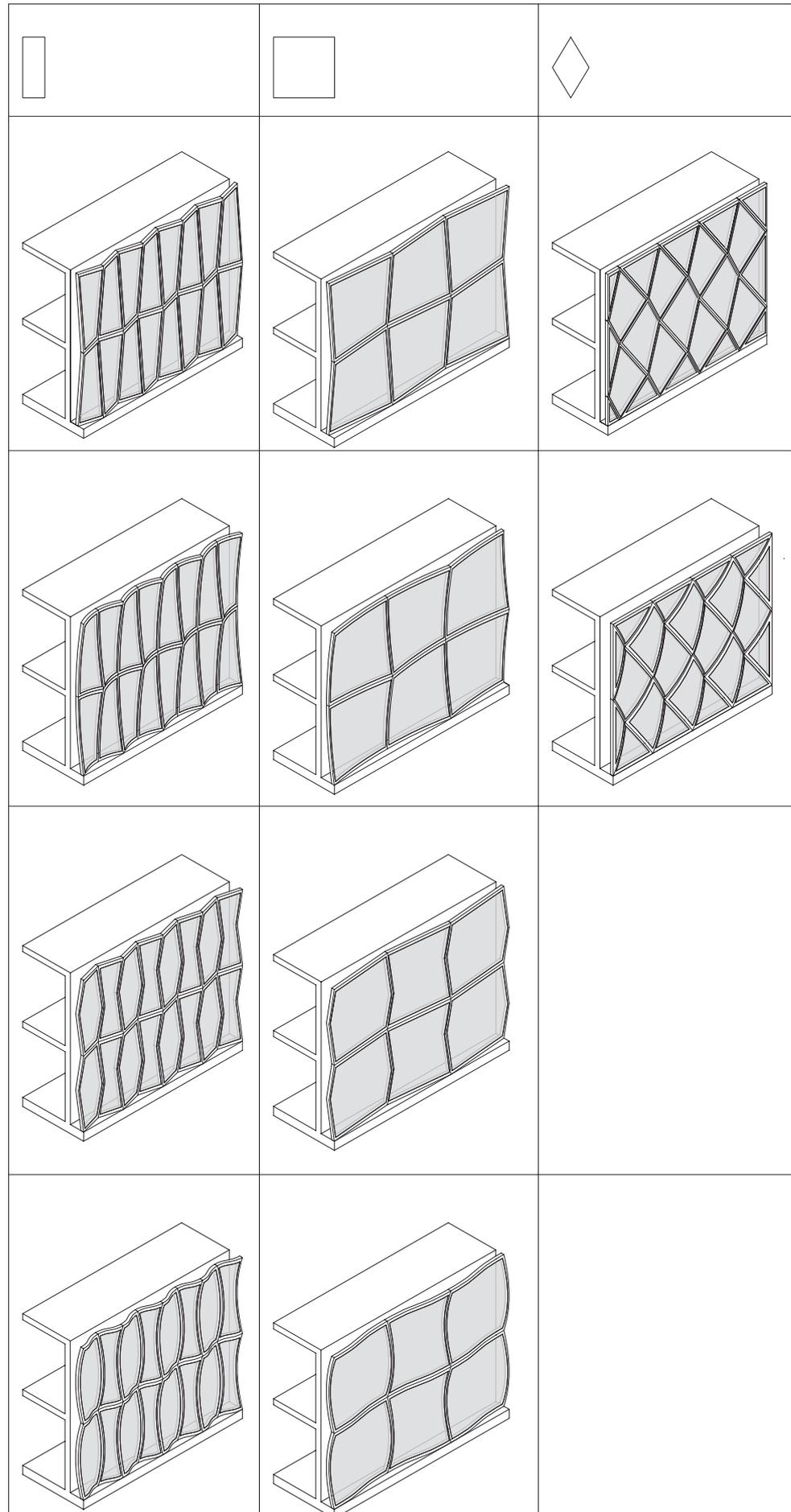
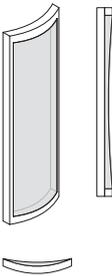
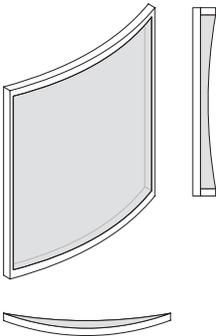
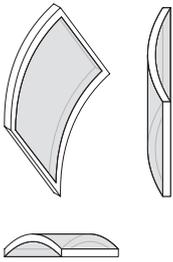
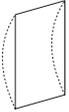
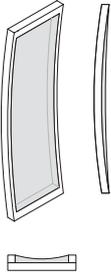
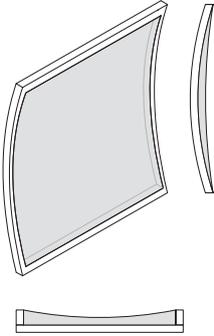
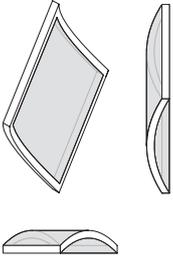
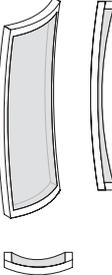
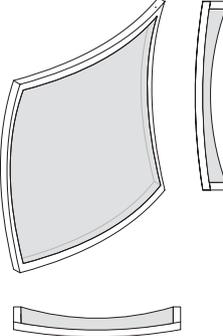
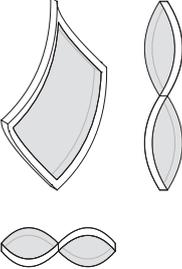
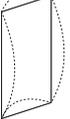
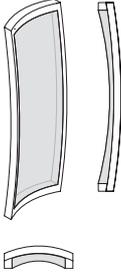
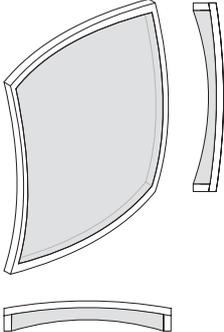
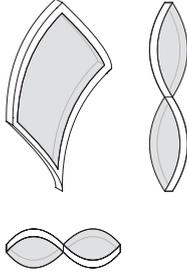
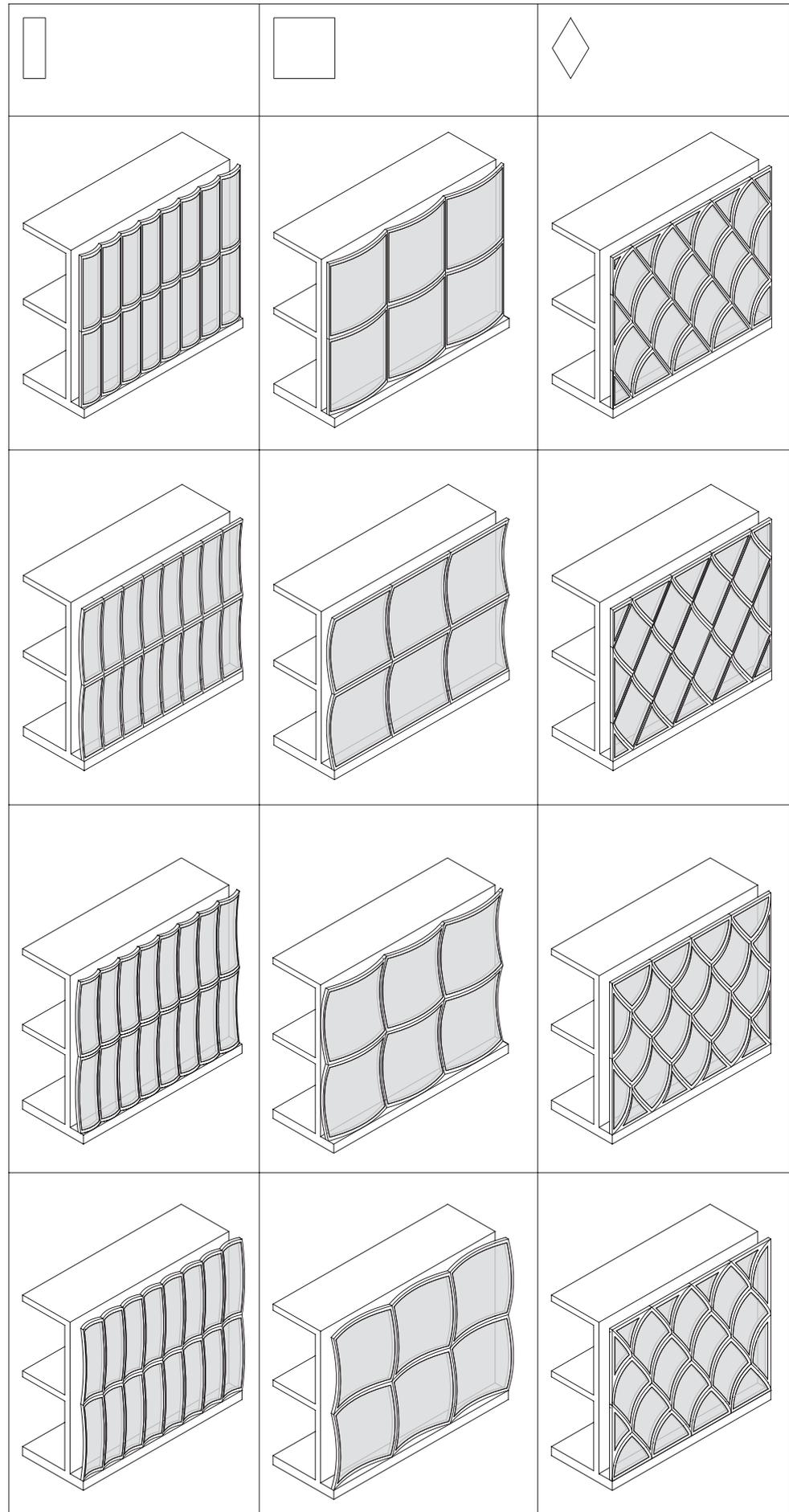


Tabelle 3.3c Formenstudie der Rahmenmodule

Form Variante			
			
			
			
			



### 3.1.6. Sattelfläche

Als Abschluss des Kapitels zu Form, Nutzung und Gestaltung der membranumhüllten Gebäude wird für jedes der drei Membranmodulgrundformen eine beispielhafte Anwendung aufgezeigt. Drei architektonische Entwürfe zeigen unterschiedliche, membranumhüllte Gebäude. Zu Beginn wird eine Ausstellungshalle mit einer sattelförmig bespannten Membranhülle vorgestellt. Die Ausstellungshalle ist ein zweigeschossiger, quadratischer Bau mit einer Seitenlänge von 30m. Ein innenliegender Hof teilt das Gebäude in Ausstellungshalle einerseits und einem Versorgungsriegel, der neben einer Cafeteria im Erdgeschoss, Büro und Verwaltungsfunktionen im Obergeschoß aufnimmt. Das Kellergeschoß dient der Lagerung von Exponaten. Das Museum ist komplett mit einer membran Gebäudehülle überzogen. Membranflächen sind als Fassaden und Dachmodul auf einer geschwungenen Unterkonstruktion befestigt, die eine gegenseitige Krümmung der Membran gewährleisten. Man betritt das Museum über den sich nach Außen hin abzeichnenden innenliegenden Hof. Der Hof ist von der Gebäudehülle überspannt und bildet als Zwischenzone einen klimatischen Übergangsbereich zwischen Innen und Außen. Als Wintergarten bietet er die Möglichkeit Tische und Stühle der Cafeteria aufzustellen und durch Bepflanzung einen Bezug nach Außen herzustellen. Diffuses Licht dringt durch die transluzente Membran und sorgt für natürliche, indirekte Belichtung, Verschattungen für den Sommerfall sind vorgesehen. Die Ausstellungshalle kann über den Hof betreten werden. Das Foyer beinhaltet einen Museumsshop, und ist Empfang und Garderobe zugleich. Ihr Bereich ist durch die darüberliegende Empore gekennzeichnet. Der Besucher betritt dann die zweigeschossige Ausstellungshalle. Sie ist, je nach Thema, frei zu gestalten, und kann durch die Empore auch von oben aus betrachtet werden. Die Ausstellungshalle ist introvertiert und öffnet sich nur zum Innenhof. Licht kann durch die Gebäudehülle von oben in den Raum gelangen und gewährleistet eine helle, aber indirekte Ausleuchtung. Nach dem Rundgang durch die Ausstellung lädt das Museum zum Verweilen im Cafe ein, bevor der Besucher über den Hof das Gebäude wieder verlässt. Die Versorgung des Museums geschieht durch die hintere Hoföffnung. Hier können Exponate direkt angeliefert und in die Ausstellungshalle gebracht werden, oder ein Lastenaufzug befördert sie in die Lagerräume im Untergeschoß. Auch die Cafeteria wird von hier versorgt und bietet direkten Zugang zu Lager und Anrichte. Im Obergeschoß der Versorgungsriegels befindet sich die Museumsverwaltung. Der diesen Räumen vorgeschaltete Laubengang ermöglicht einen Einblick auf Hof und Ausstellungshalle.

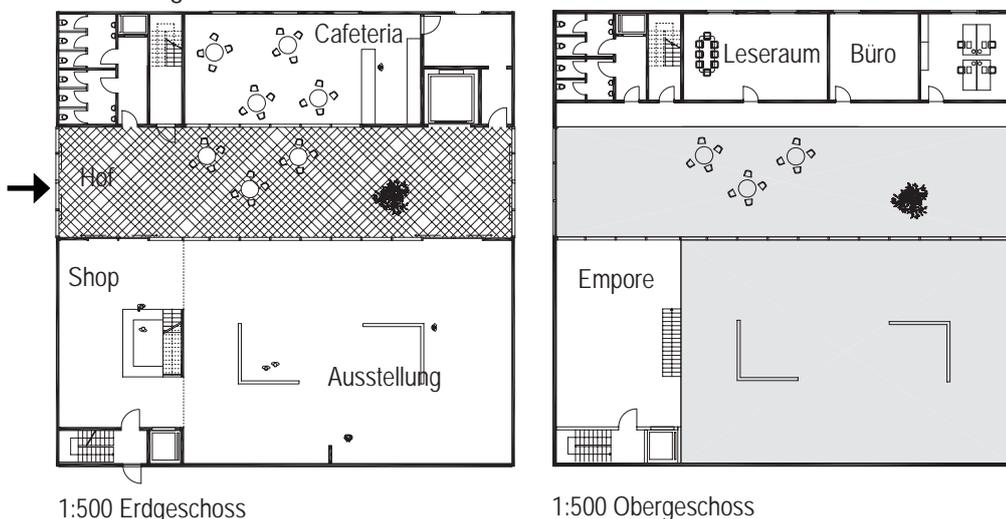


Abb.96  
Grundrisse  
M 1:500

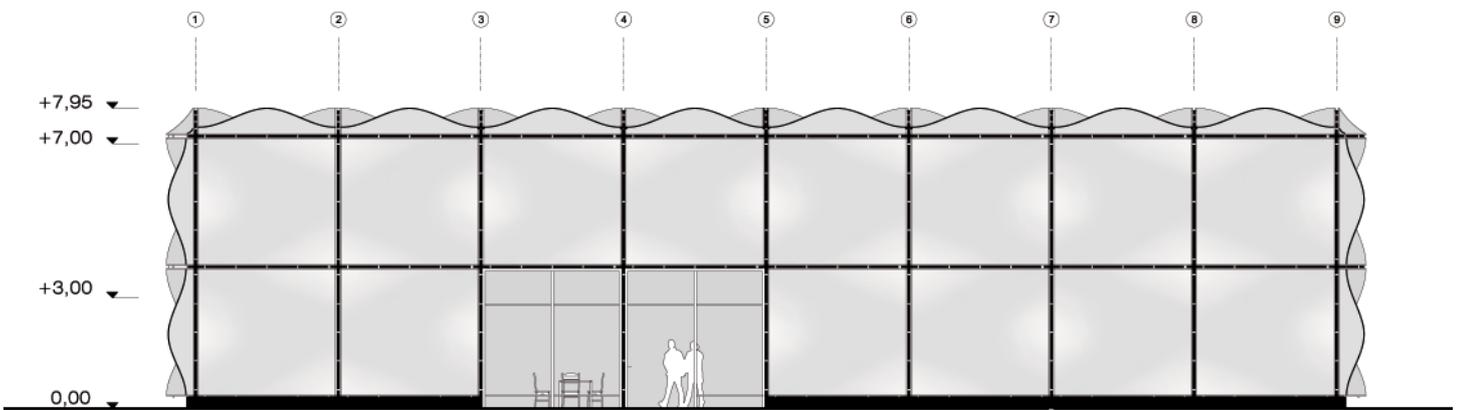


Abb. 97a

1:200 Ansicht West

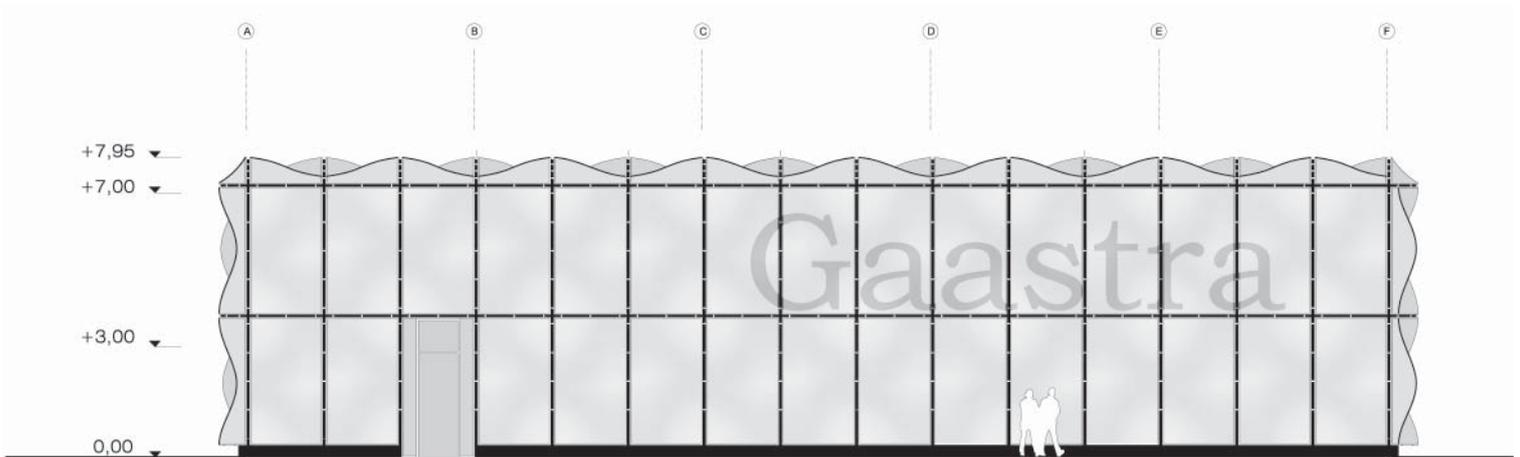


Abb. 97b

1:200 Ansicht Süd

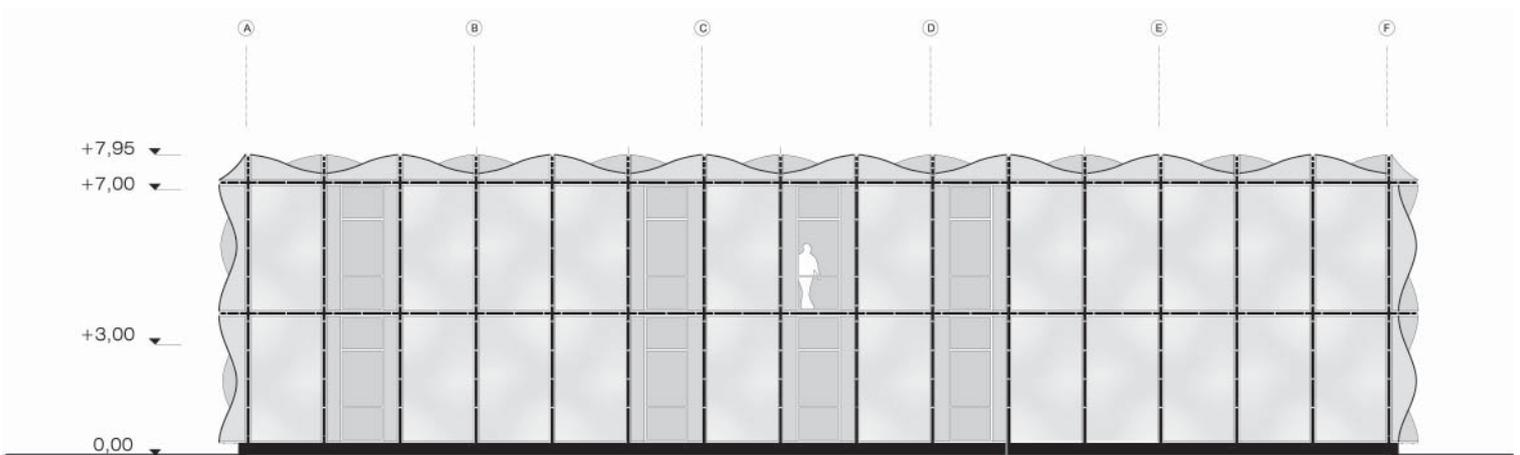


Abb. 97c

1:200 Ansicht Nord

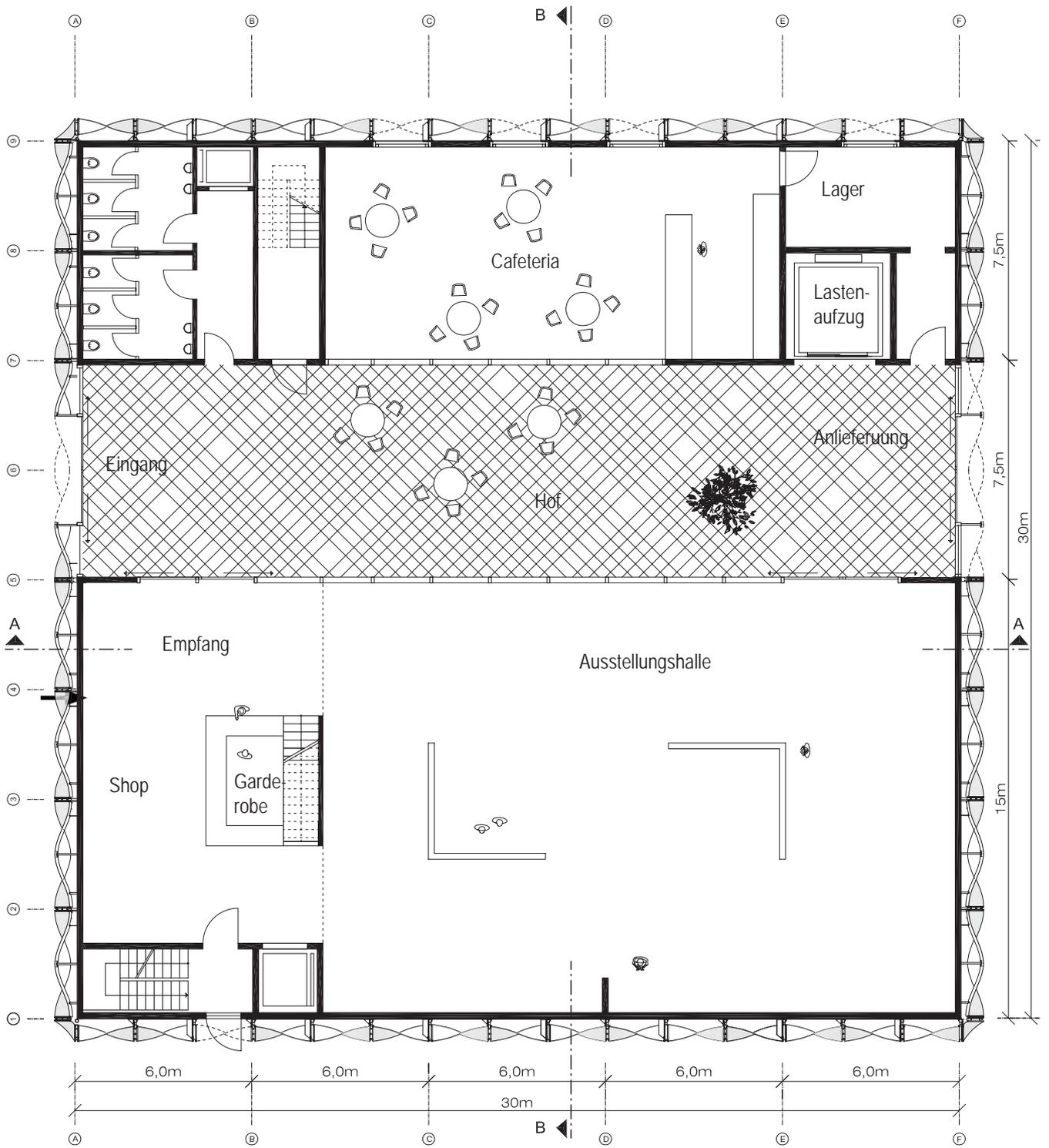


Abb. 98

1:200 Grundriss Erdgeschoss

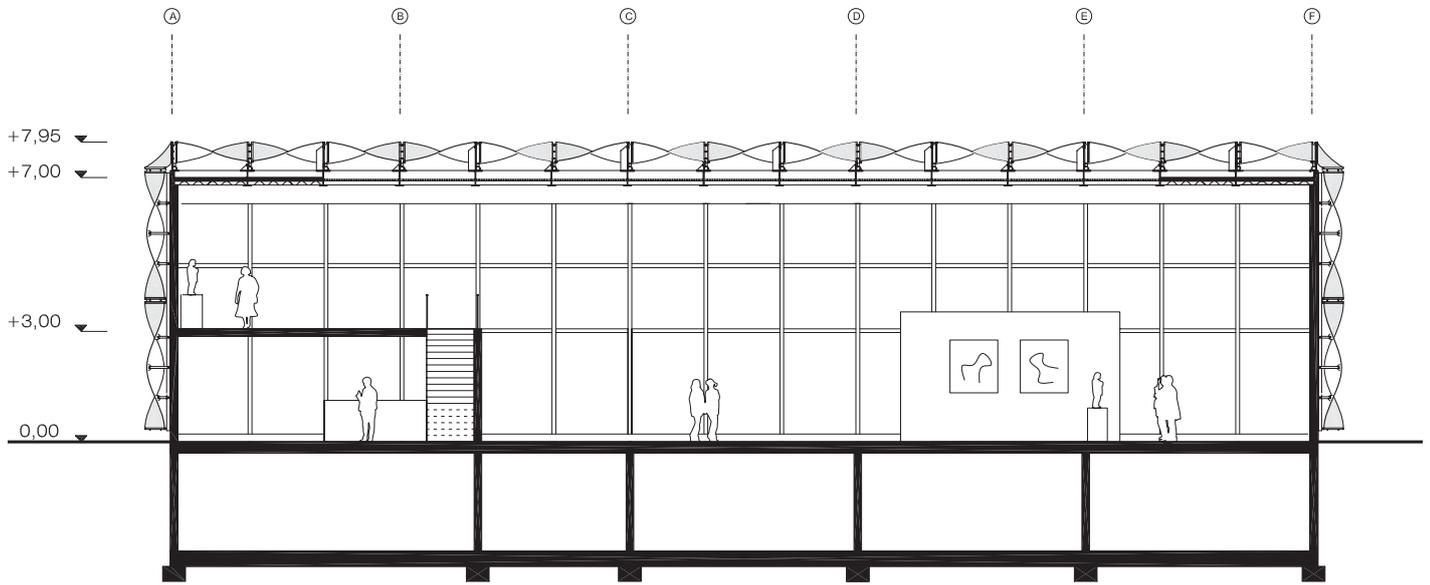


Abb. 99a

1:200 Schnitt A-A

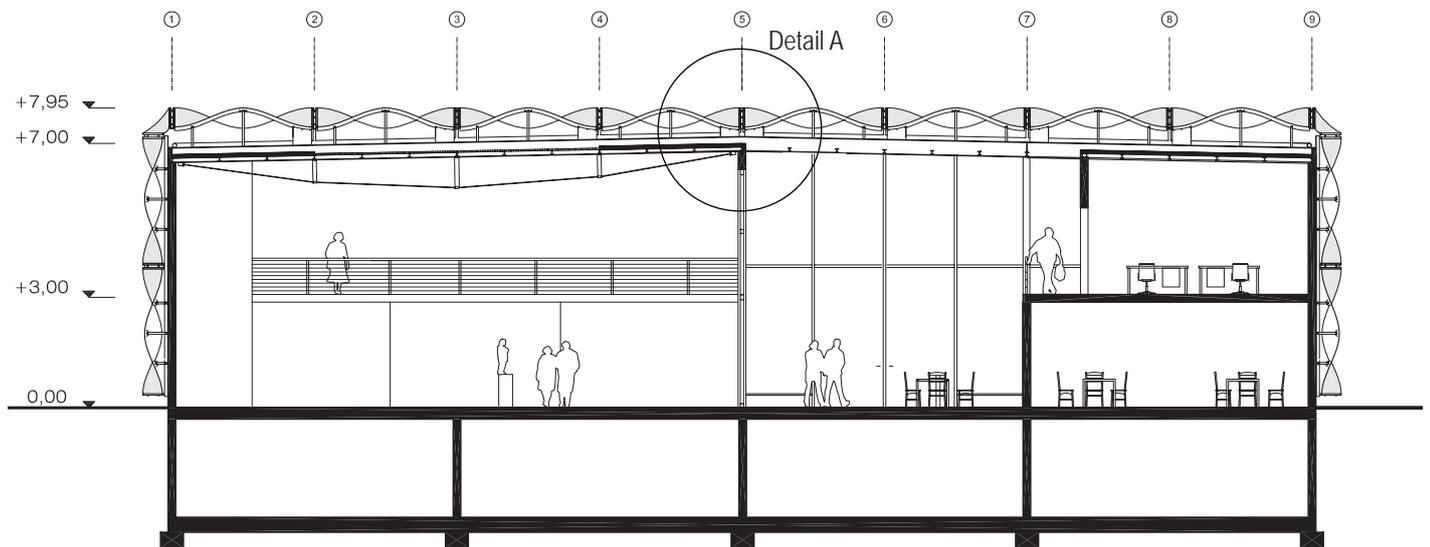


Abb. 99b

1:200 Schnitt B-B

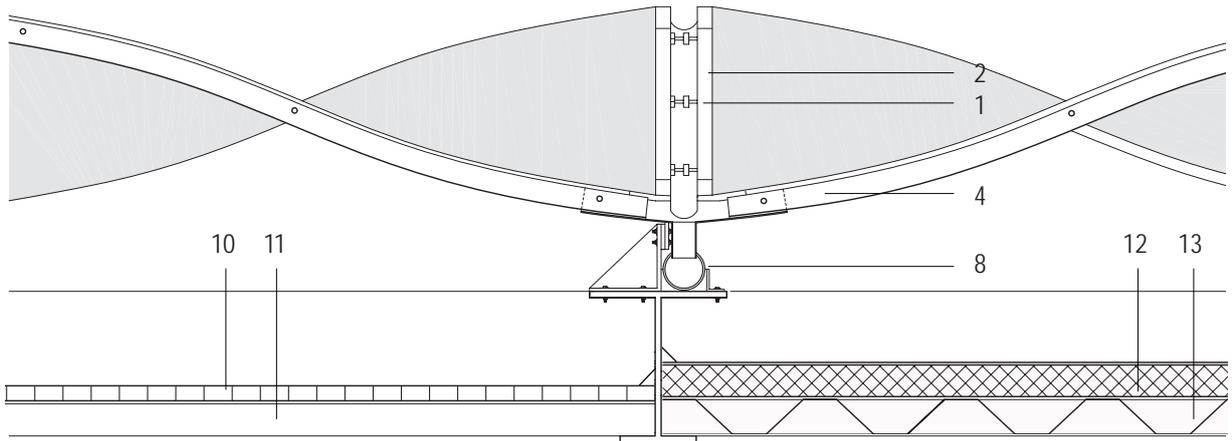


Abb. 76a

1:20 Detail A

Abb. 100 b  
1:5 Detail A

- 1 Spannschraube
- 2 Kederschiene
- 3 Membran / Folie
- 4 Regenrinne PVC/PE
- 5 Klemmschraube
- 6 geschwungenes Halteschwert
- 7 ausgesteifter Winkel
- 8 Regenrohr O 100mm
- 9 IPE-Profil 340mm mit aufgeschweisstem Blech
- 10 Kunststoffpanel, transparent
- 11 IPE-Profil 120mm
- 12 Dämmung 100mm
- 13 Trapezblech
- 14 Keder-Klemmprofil innen
- 15 Keder-Klemmprofil außen

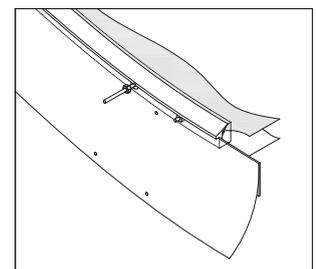
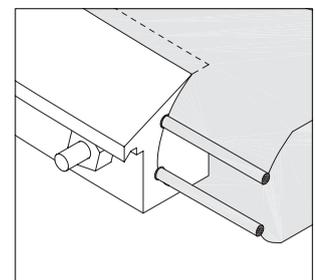
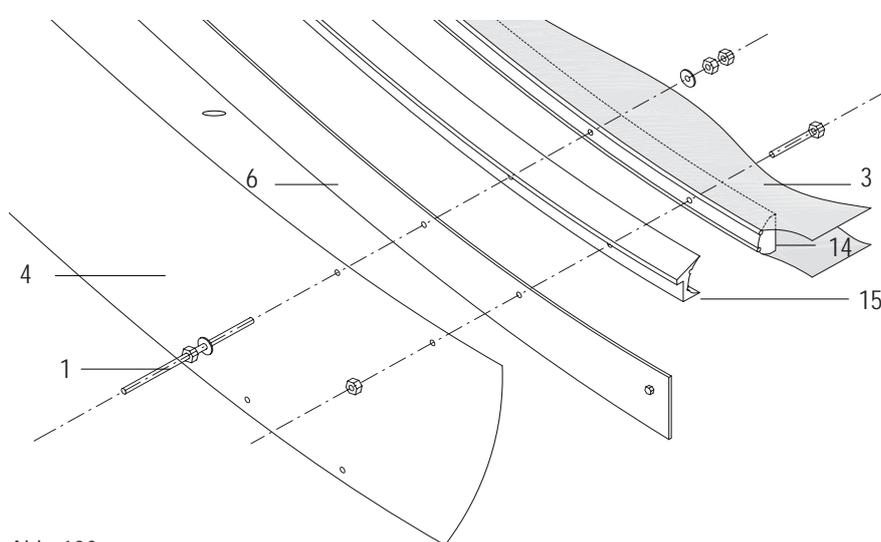
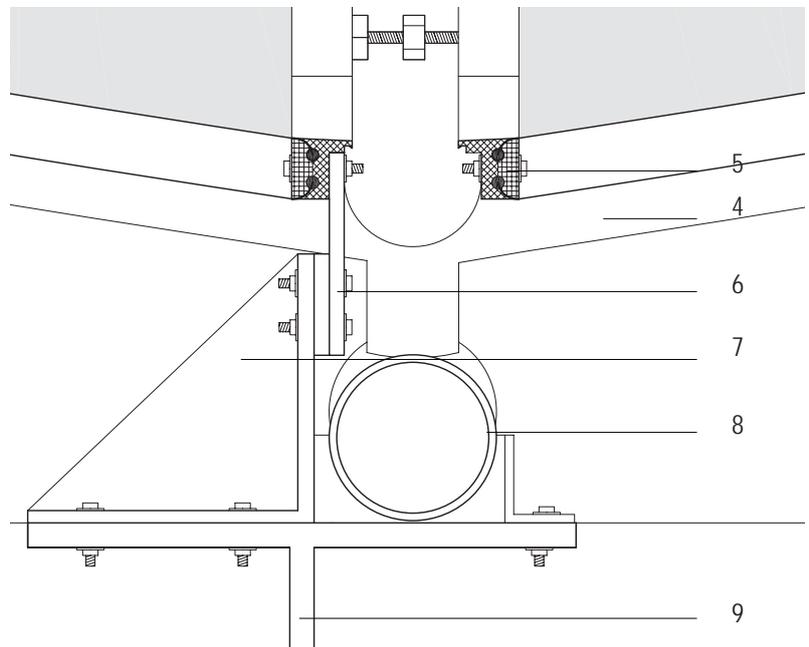
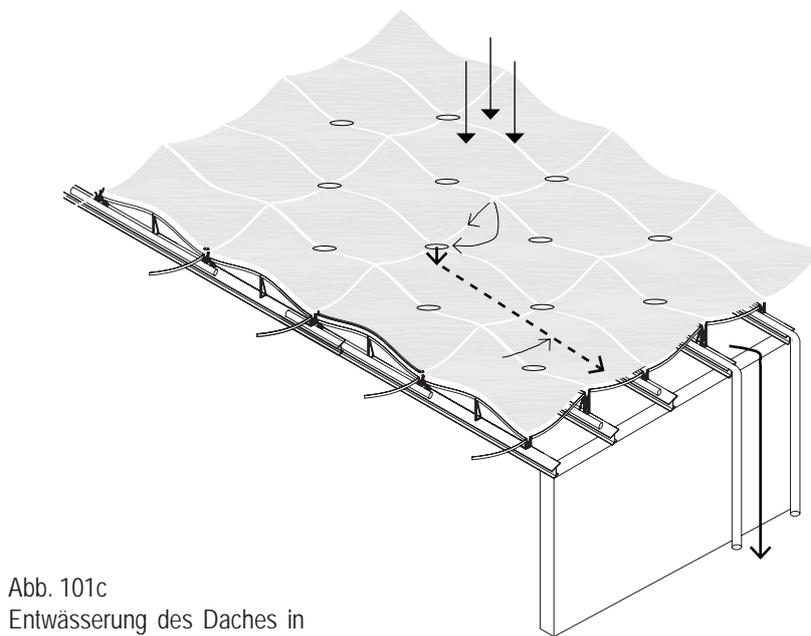
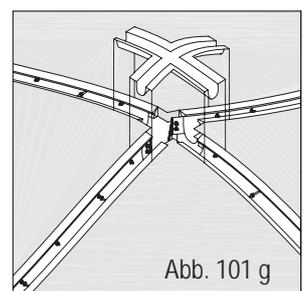
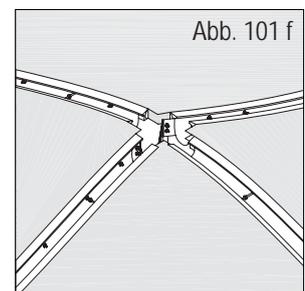
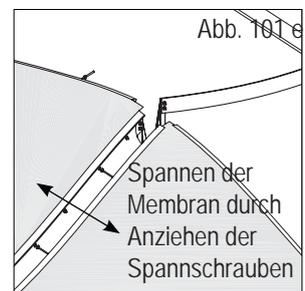
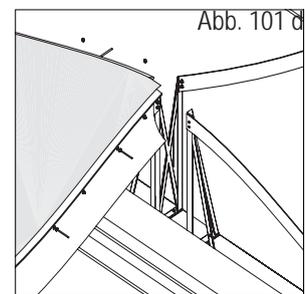
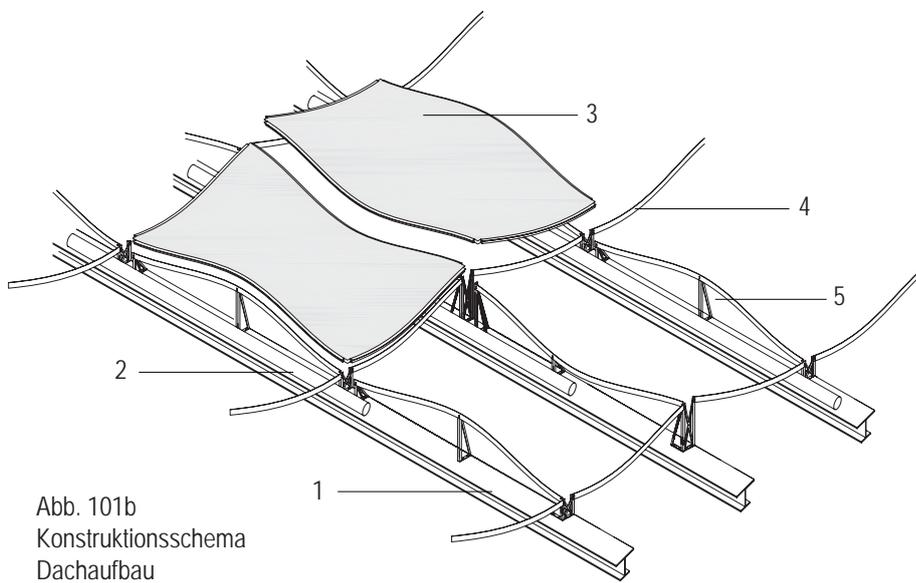
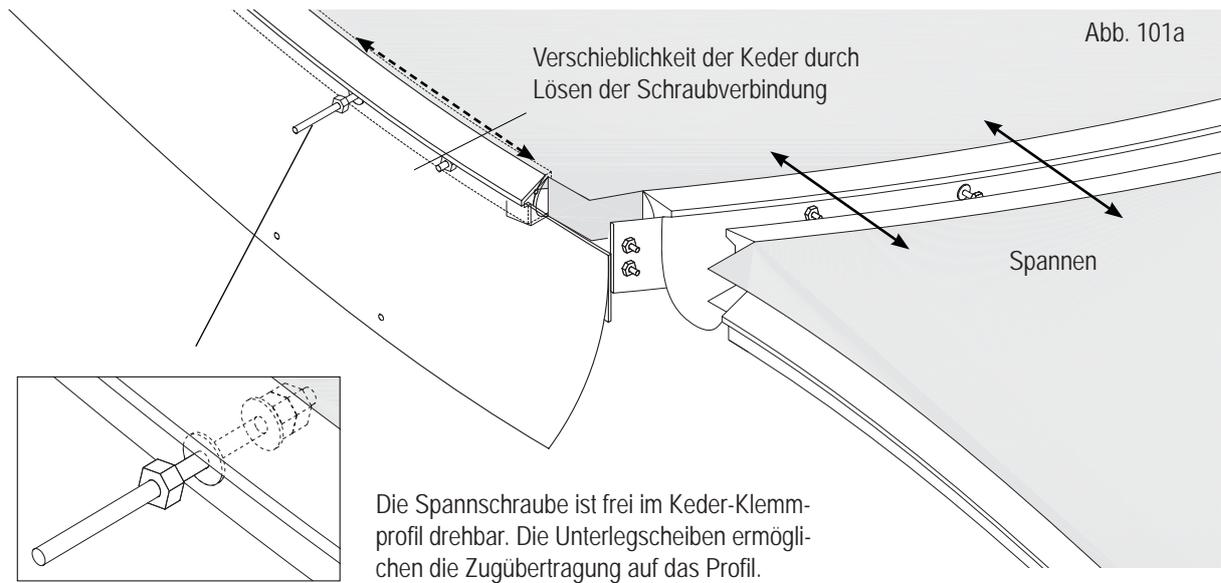


Abb. 100 a-c



---

Als Konstruktionsart der Rahmenmodule ist hier das „Zugschrauben Balkenmodul“ verwendet worden (vgl. Kap.3.2.4). Jedes Membranmodul ist allseitig mit der Keder-Klemmschiene gefasst und wird an jeweils einer Längs- und einer Querseite mit der Führungsschiene der Unterkonstruktion verschraubt. Die Führungsschiene erzeugt die notwendige Krümmung in der Keder-Klemmschiene und bietet dem Membranmodul Halt in alle Richtungen. Die beiden freien Enden des Membranmoduls werden mit den Spannschrauben der benachbarten Module befestigt. Durch das Andrehen der Spannschrauben kann das Membranmodul sowohl in Längs- als auch Querrichtung vorgespannt werden und erhält so die notwendige Vorspannung. Jedes Membranmodul ist einzeln justierbar und kann auch nach Einbau jederzeit nachgespannt werden. Dieses System wird neben zwei anderen Konstruktionsarten im folgenden Kapitel genauer vorgestellt werden.

Die Entwässerung des Daches erfolgt über die Fugen der Membranfelder. Hier nimmt eine Regenrinne aus PVC-PE Membran das Wasser auf und leitet es zum nächstliegenden Tiefpunkt der Konstruktion. In diesem Tiefpunkt treffen jeweils vier Regenrinnen aufeinander. Sie werden durch ein Fertigteil-Kreuzungselement verbunden. Das Fertigteil entwässert mittig in das unter der Dachkonstruktion verlaufende Regenrohr. Es ist auf den IPE-Profilen befestigt und kann durch das Gefälle der Profilträger das Wasser zu den Seiten des Daches ableiten.

Die Tiefpunkte des Daches bergen die Gefahr der winterlichen Schneesackbildung. Auf diese Last muss die Membran und die Konstruktion bemessen werden. Genauere Angaben hierzu werden im Kapitel 3.3. „Untersuchung des Tragverhaltens“ gemacht. Eine weitere zu berücksichtigende Bemessungslast stellt die Begehbarkeit des Daches dar. Für Wartungsarbeiten muss das Membrandach begehbar ausgelegt sein.

Die hier dargestellten Entwürfe sollen vor allem aber die Anwendung der Rahmenmodule im Gebäudekontext sowie ihre Gestaltung klären. Dafür werden abschließend Fassaden- und Gebäudestudien der sattelförmig bespannten Ausstellungshalle gezeigt (Abb. 102,103).

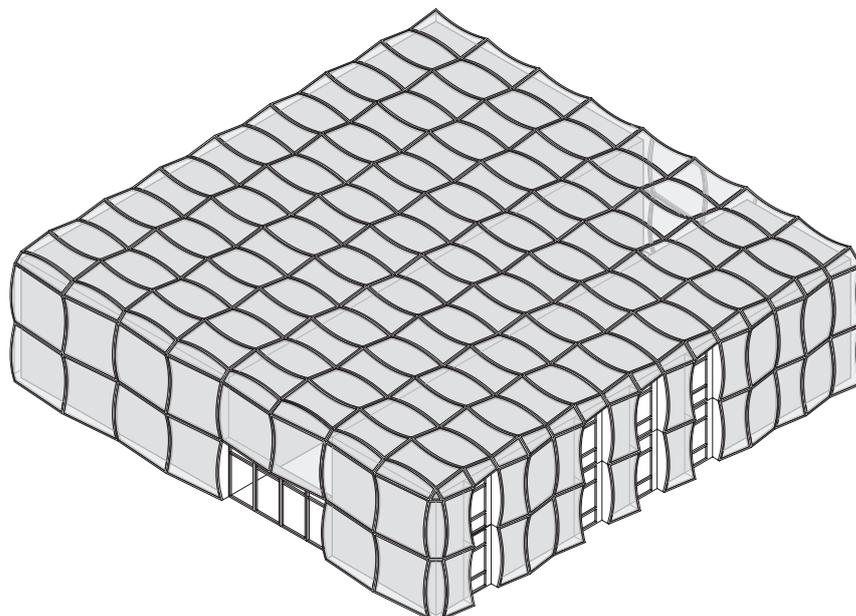
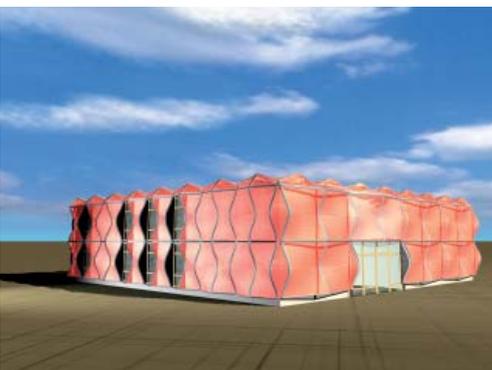
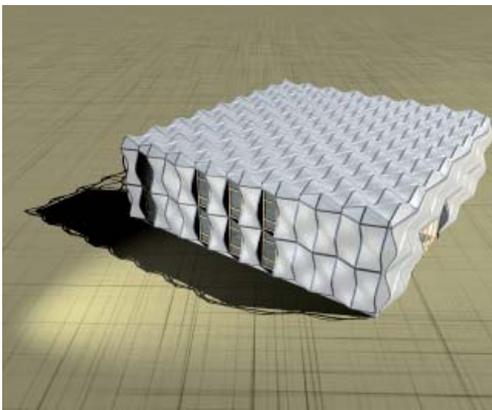
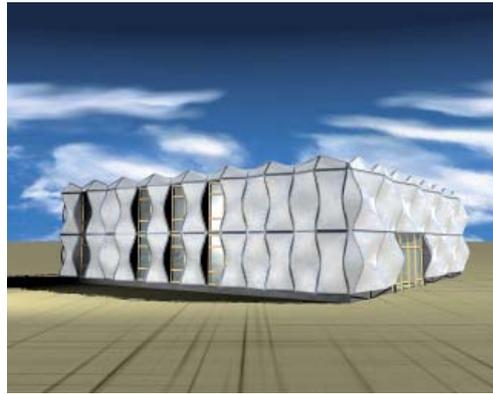


Abb 102  
Isometrie der  
Ausstellungshalle

Abb. 103 a-h



### 3.1.7. Buckelfläche

Als Beispiel für die Anwendung einer Gebäudehülle aus buckelförmig bespannten Rahmenmodulen ist nachfolgend eine Industriehalle dargestellt. Sie besitzt eine komplett freistehende, vom Innengebäude unabhängige Unterkonstruktion, an die die äußere Fassade und Dach angeschlossen werden. Das innere Gebäude ist als länglicher Kubus in die Halle eingestellt worden. In Anlehnung an die Konstruktionsweise des Sainsbury Centers besteht die Unterkonstruktion der Gebäudehülle aus einer Fachwerkrahenkonstruktion. Das Achsmaß zwischen den Rahmen beträgt 6m und ermöglicht eine Gliederung der Fassade mit großen, buckelförmig bespannten Membranmodulen zwischen den Rahmen und schmalen Zwischenelementen, die wahlweise als Glasfensterstreifen oder als ETFE bespannte Folienmodule ausgeführt werden können. Durch diesen transparenten Streifen kann ausreichend Sonnenstrahlung zur Klimatisierung der Zwischenzone in die Halle gelangen, die großen Membranmodule werden mit innenliegender Wärmedämmung ausgeführt und schützen das Gebäude vor zu hohen Energieverlusten. Die Stirnseiten der Halle sind mit großen Rolltoren versehen und ermöglichen so eine flexible Nutzung und das Befahren der Halle.

Im Gegensatz zu den anderen Anwendungsbeispielen ist das Volumen der Zwischenzone in diesem Beispiel deutlich größer als das des innenliegenden Gebäudes. Dabei bleibt ihre Funktionsweise aber erhalten: Das innenliegende Gebäude wird durch das künstlich erzeugte Klima der Zwischenzone geschützt und reduziert seine Energieverluste.

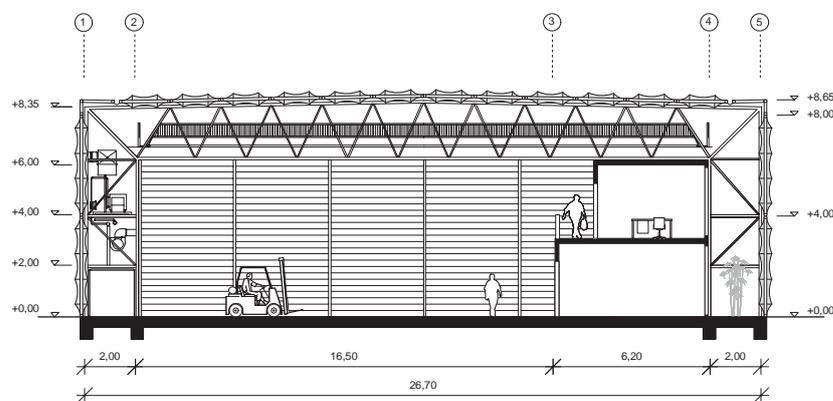


Abb. 104a  
M 1:300  
Schnitt A-A

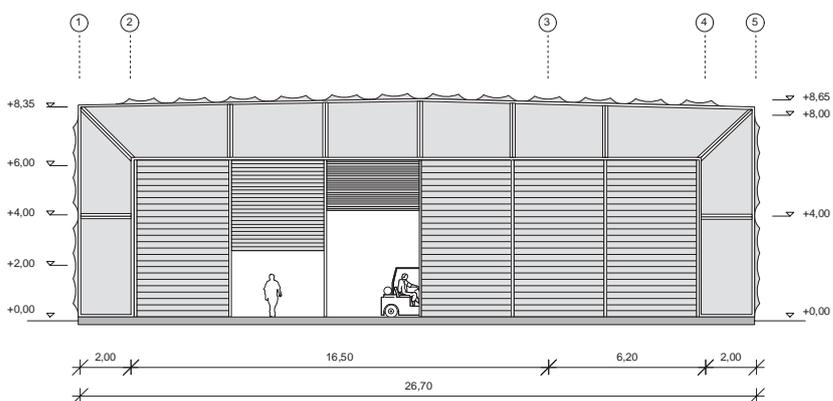


Abb. 104b  
M 1:300  
Ansicht Süd

### 3.1. Membrarahmenmodule - Form, Nutzung und Gestaltung

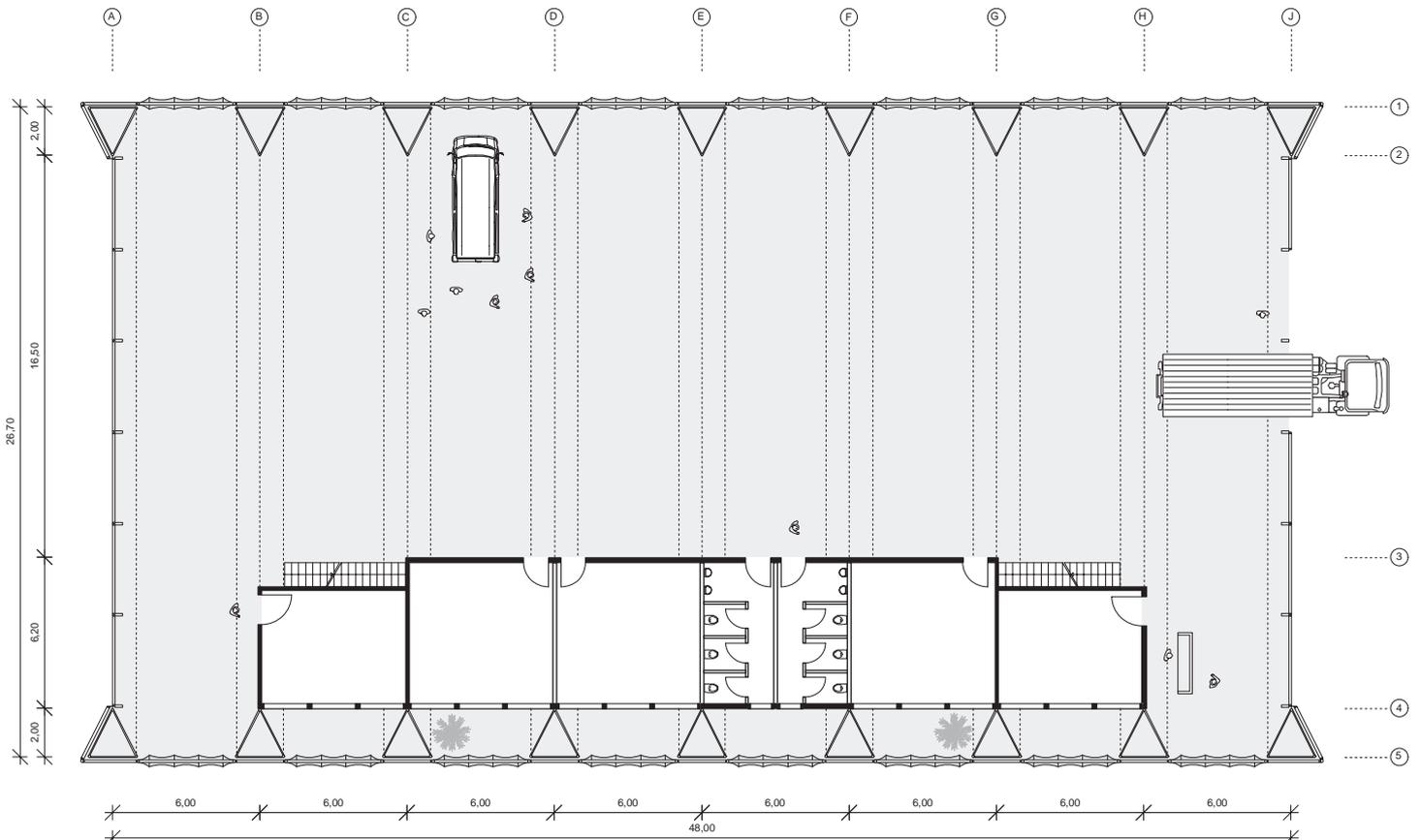


Abb 105a

M 1:300  
Grundriss

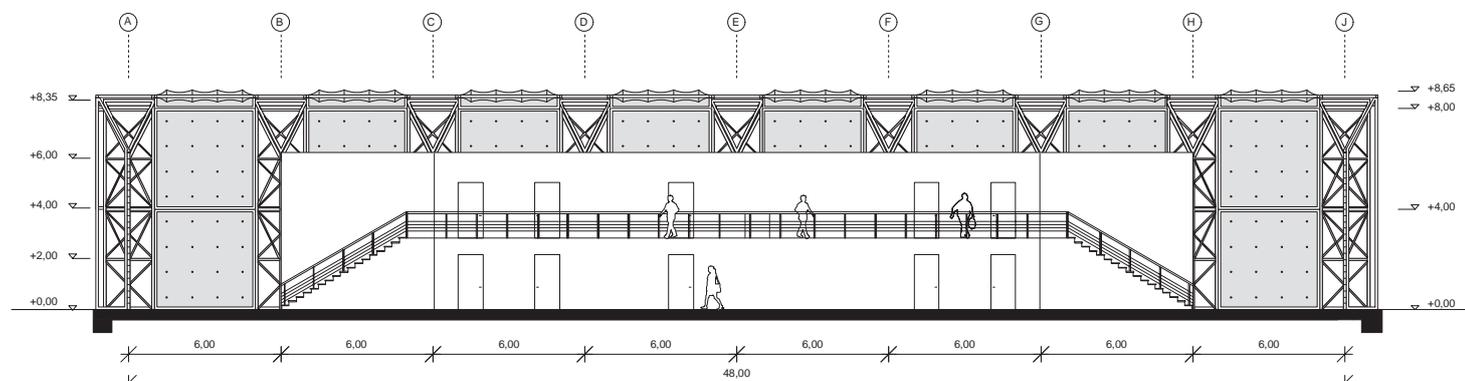


Abb. 105b

M 1:300 Schnitt B-B

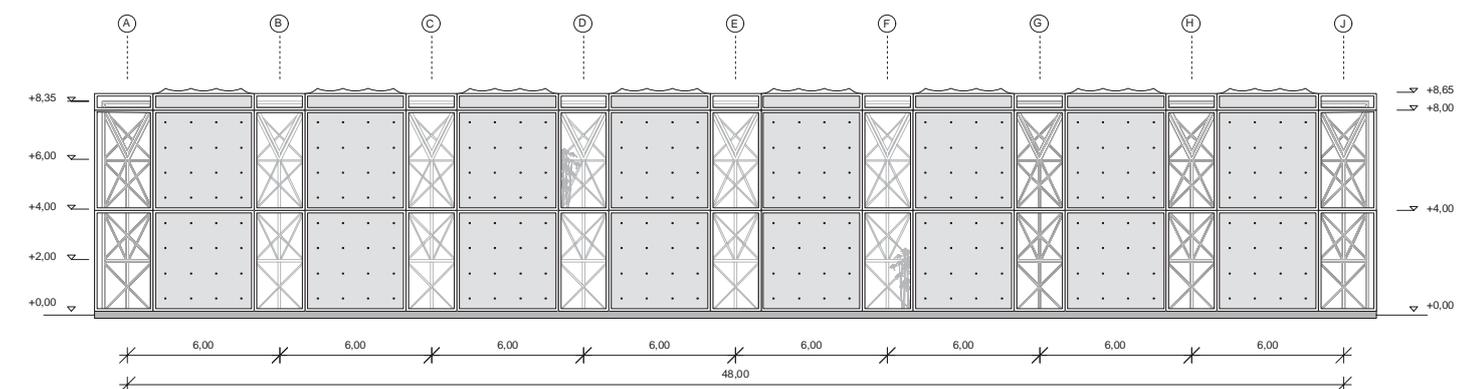


Abb. 105c

M 1:300 Ansicht Ost

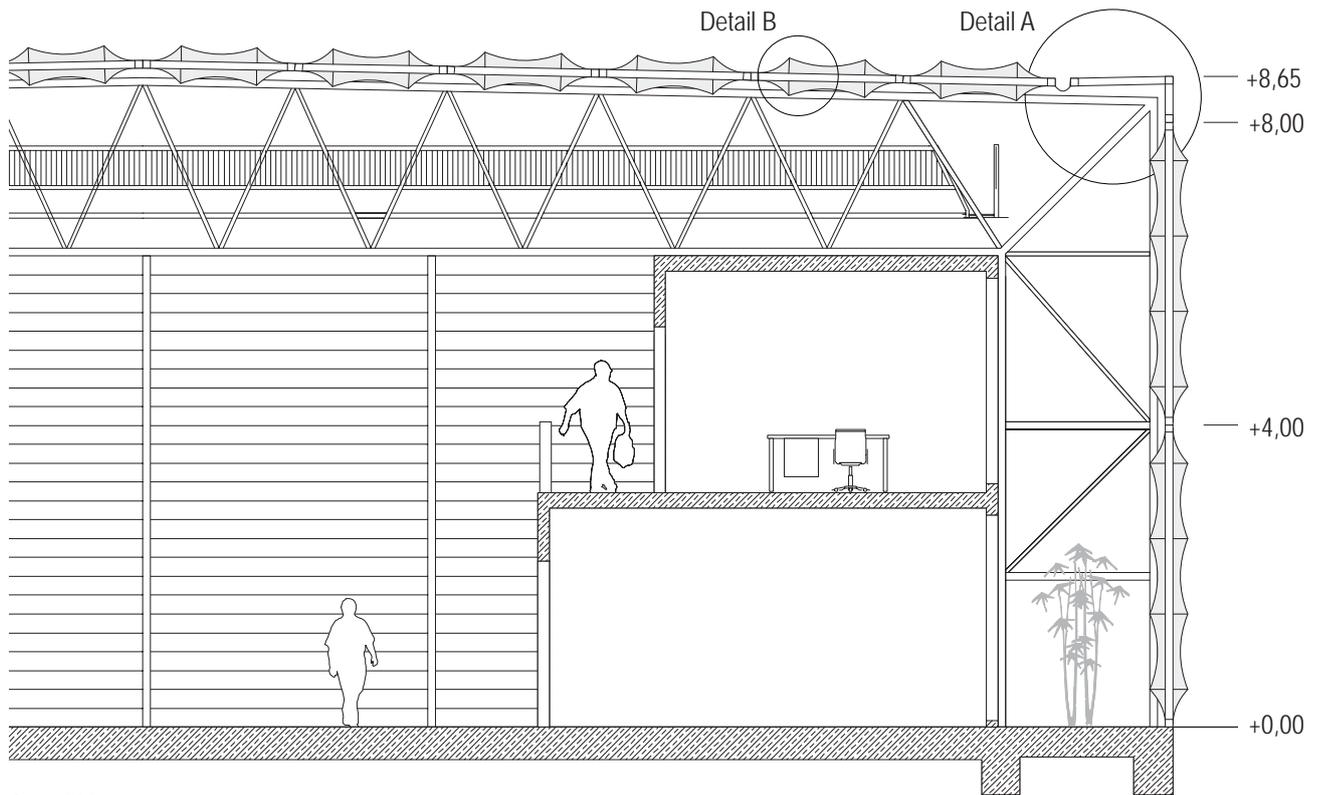


Abb. 106a-e

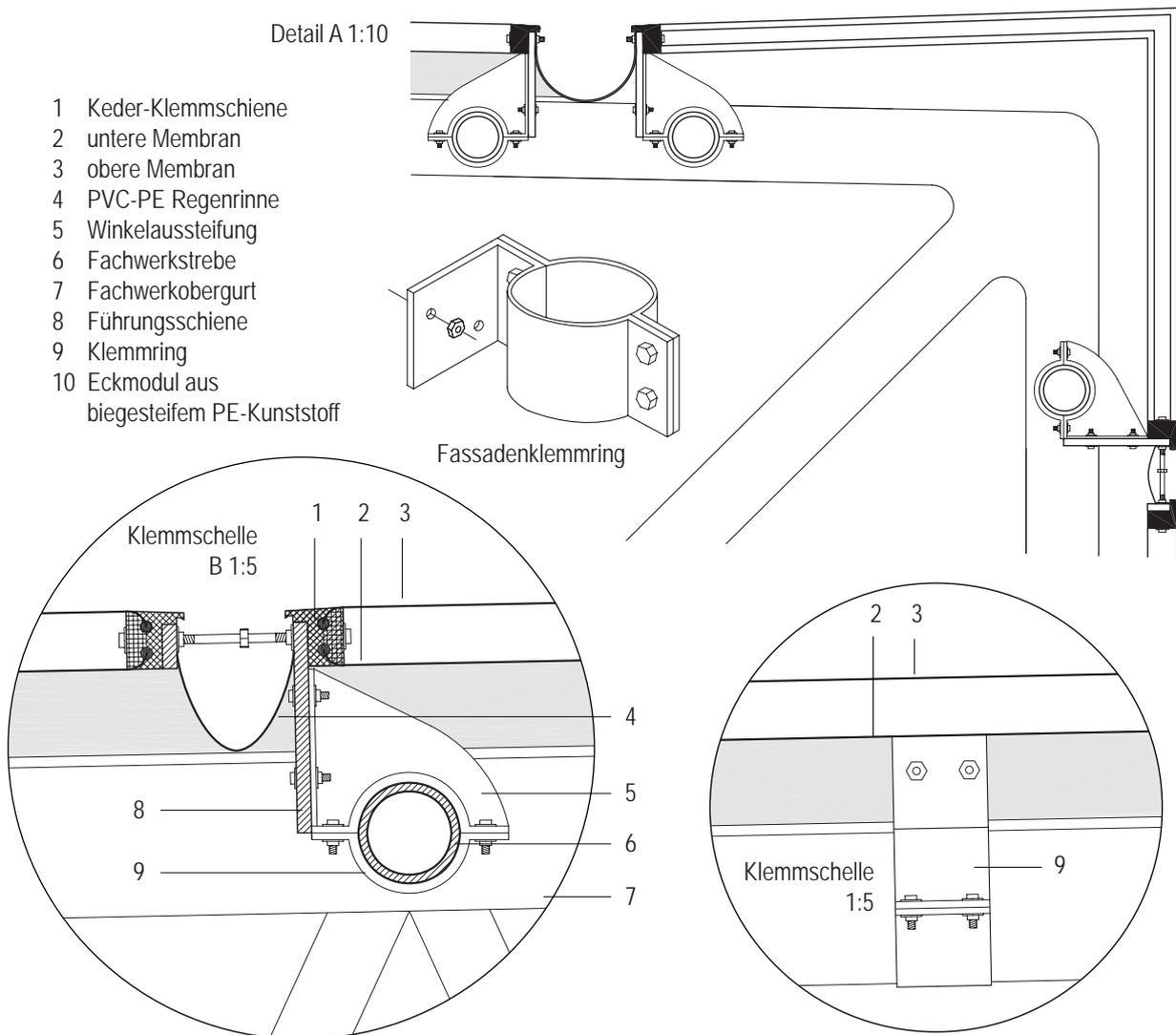
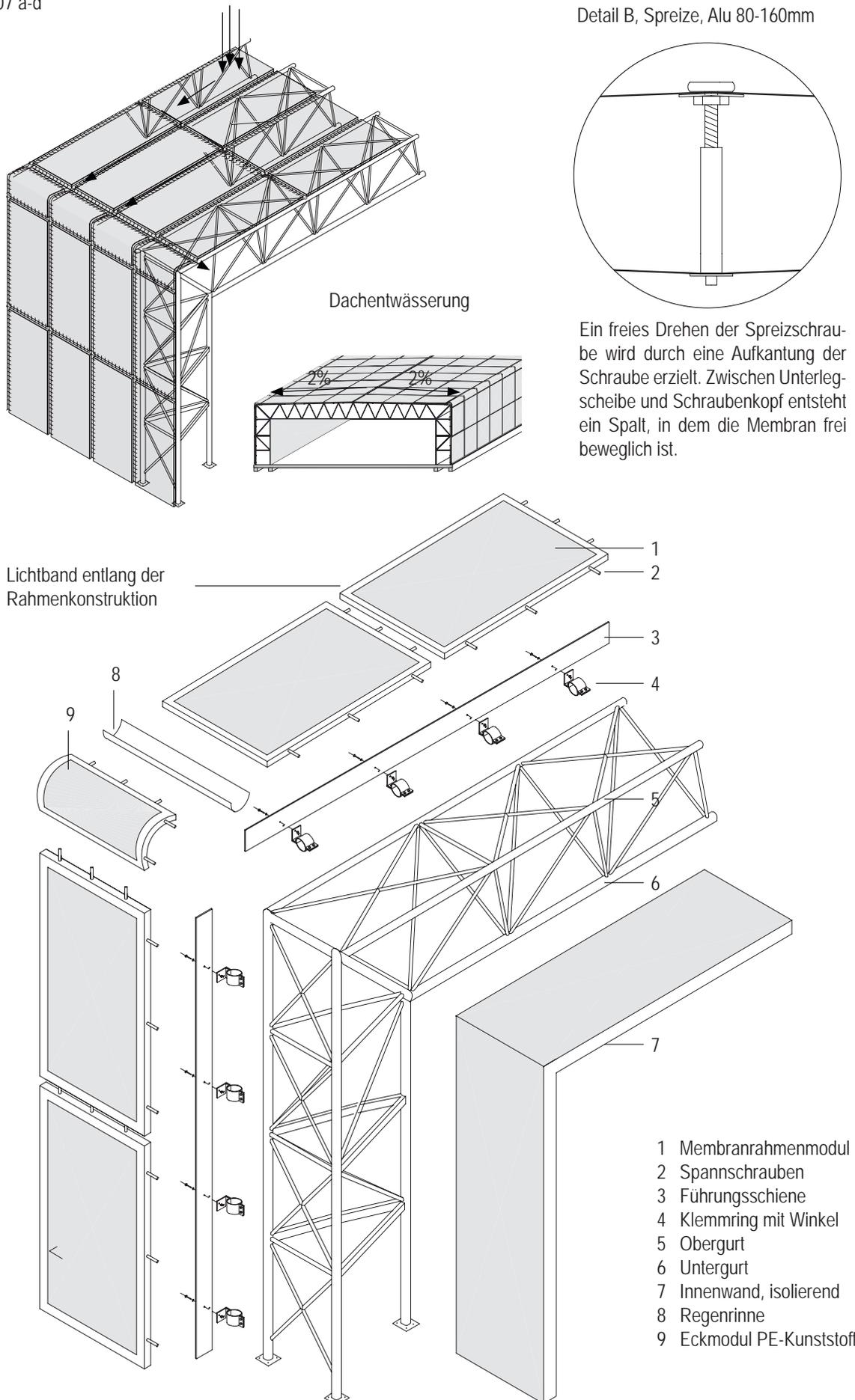


Abb. 107 a-d



Detail B, Spreize, Alu 80-160mm

Dachentwässerung

Ein freies Drehen der Spreizschraube wird durch eine Aufkantung der Schraube erzielt. Zwischen Unterlegscheibe und Schraubenkopf entsteht ein Spalt, in dem die Membran frei beweglich ist.

Lichtband entlang der Rahmenkonstruktion

- 1 Membranrahmenmodul
- 2 Spannschrauben
- 3 Führungsschiene
- 4 Klemmring mit Winkel
- 5 Obergurt
- 6 Untergurt
- 7 Innenwand, isolierend
- 8 Regenrinne
- 9 Eckmodul PE-Kunststoff

Die Industriehalle verwendet im Gegensatz zu den beiden anderen Gebäudeentwürfen großmaßstäbliche Rahmenmodule. Entsprechend dem Nutzen einer Halle sind 4x4m große Rahmenmodule als Fassadengestaltung vorgeschlagen. Dies erfordert entsprechend stark ausgebildete Rahmenquerschnitte, Einzelheiten zur Konstruktion und Dimensionierung folgt im weiteren Verlauf der Arbeit.

Die Membran ist mittig durch 16 Spreizen ausgelenkt und erhält so eine kontinuierliche Stützung und Auslenkung der Fläche. Die Spreize kann zum Nachspannen der Konstruktion verstellbar ausgeführt werden. Wie in Detail B dargestellt verändert die Spreize durch das Herausdrehen aus dem Aluminiumstift mit Innengewinde ihre Länge. Dabei ist ein freies, von der Membran unabhängiges Drehen der Schraube gewährleistet, da die Membran nicht stramm von Innen gegen den Schraubenkopf gepresst wird. Eine Aufkantung des Schraubenschafts führt zu einem Spalt zwischen Schraubenkopf und Unterlegscheibe, indem die Membran liegt. So wird ein Anpressen der Membran auf den Schraubenkopf verhindert und die Drehung der Schraube nicht auf die Membran übertragen.

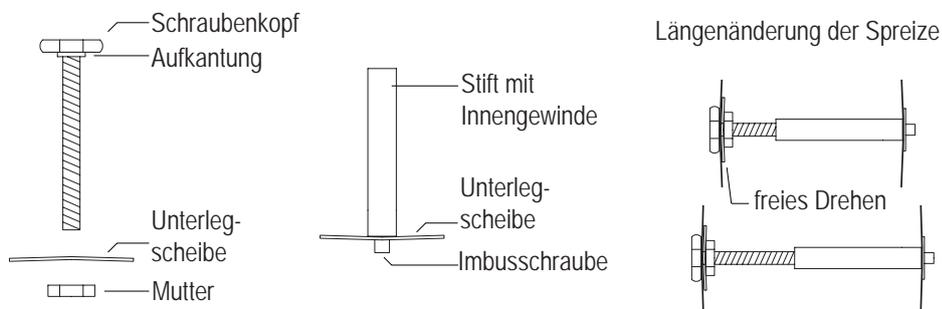


Abb. 108  
Konstruktion Spreize

Die Entwässerung des Daches erfolgt über die Dachneigung von 2%, die durch die Neigung der Obergurte des Fachwerkträgers resultiert. Das Wasser fließt über die Membranflächen in die Regenrinnen, die aus flexiblem PVC-PE Material zwischen die einzelnen Module eingehängt sind. Der Abfluss erfolgt von den Quer- über die Längsrinnen und sammelt sich letztlich in den beiden seitlich angeordneten Hauptentwässerungsrinnen die auf Traufkantenhöhe zu den Querseiten entwässern. Für die Wartung des Daches ist ein Wartungsgang innerhalb der Rahmenkonstruktion vorgesehen, entsprechend verlaufen auf dem Dach Wartungsstege parallel zu den Rahmenriegeln.

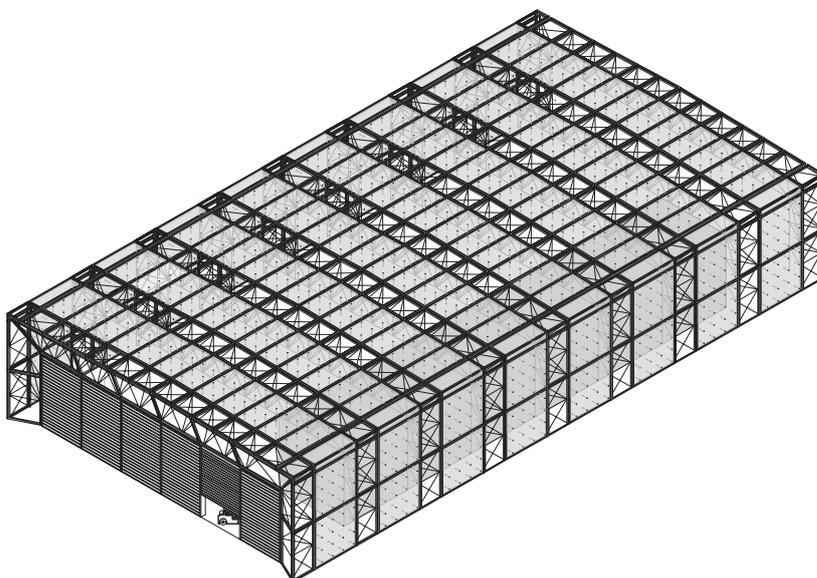
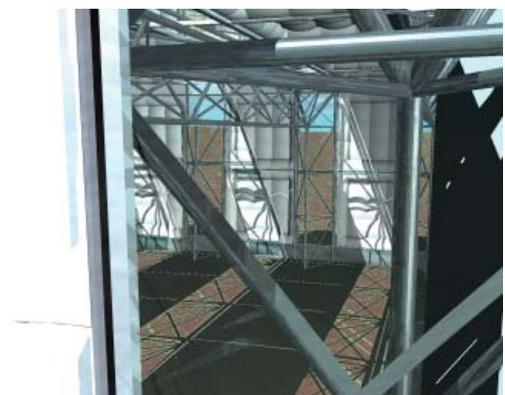
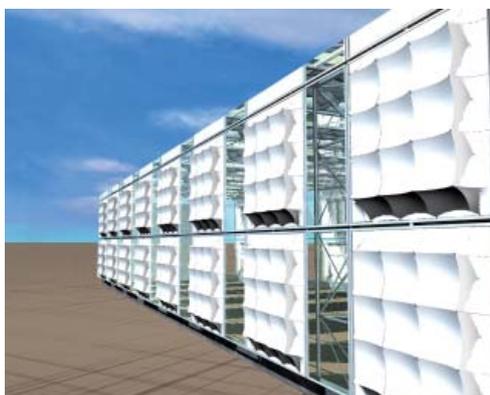
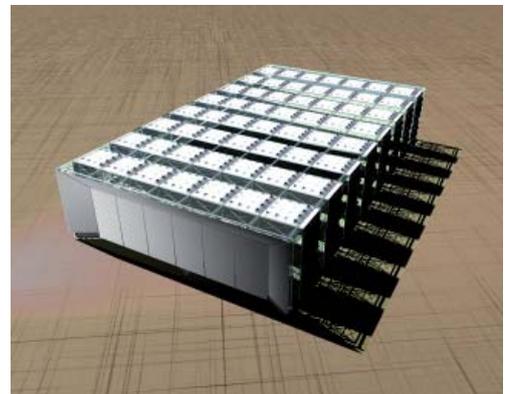
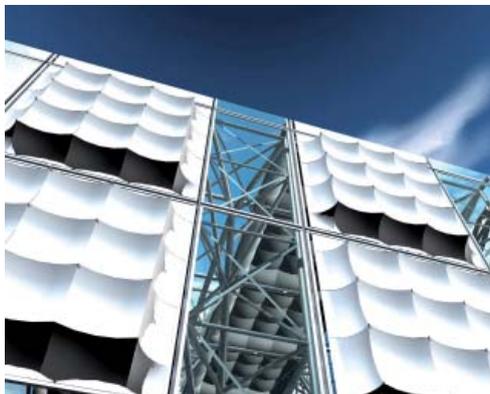
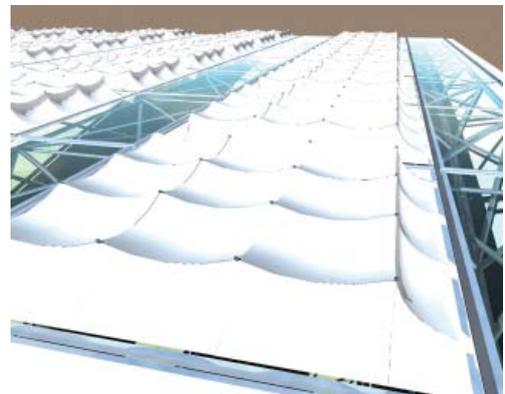
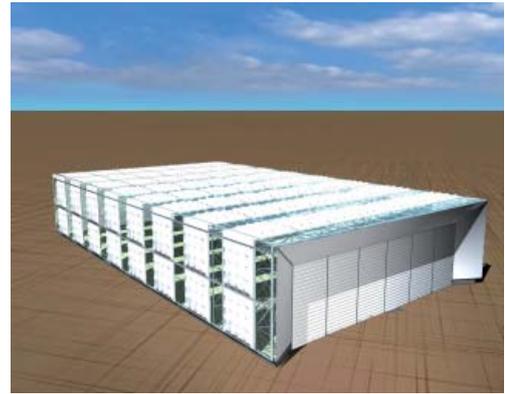
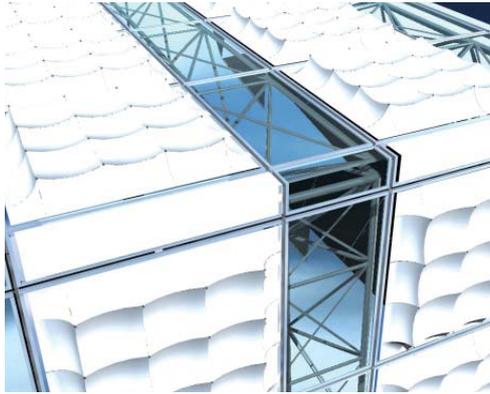


Abb. 109  
Isometrie  
Halle

Abb. 110 a-h



### 3.1.8. Bogenfläche

An einem Einfamilienhaus soll der Einsatz und die Gestaltung der bogenförmig bespannten Rahmenmodule geklärt werden. Das Gebäude wird als Holzrahmenkonstruktion ausgeführt. Es ist zweigeschossig, die Außenmaße betragen 12,6 x 6,25m, bei einer Höhe von 6m. Das Gebäude wird von einer zweiten Hülle umgeben. Auf Nord- und Ostseite ist die Gebäudehülle der Gebäudeinnenwand direkt vorgeschaltet. Zwischen beiden Bauteilen verbleibt ein 10cm breiter Spalt, der Luftzirkulation ermöglicht. Die membran Hülle wird auf Nord- und Ostseite teilweise durch wärmedämmte, holzverkleidete Außenwandflächen ersetzt. Dies führt zu verbessertem Wärmeschutz der Zwischenzone und einer differenzierteren Fassadenansicht.

Auf der strahlungsintensiveren Süd- und Westseite des Gebäudes werden ausschließlich membranbespannte Module eingesetzt. Auf der Westseite rückt die Hülle um 1,25m von der Innenwand ab und spannt so einen Zwischenzonenbereich auf, der als Eingangsbereich, im oberen Geschoß als geschützter Balkonbereich genutzt werden kann. Auf der Südseite des Gebäudes weitet sich die Zone in einen Wintergartenbereich auf. Mit einer Grundfläche von 7,70 x 3,85m bietet er saisonal einen erweiterten Wohnraum.

Das Flachdach des Gebäudes dient als Solarkollektorfläche. Überspannt wird das Dach mit strahlungsdurchlässigem Membran bzw. Folienmaterial, sodass die auf das Dach einfallende Strahlung im Wasser der Kollektoren gespeichert werden kann. Nachfolgend die Ansichten des Gebäudes.

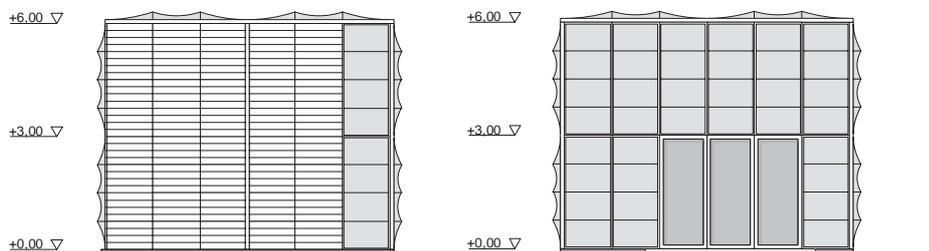


Abb 111 a,b  
M1:200  
Ansicht Nord  
Ansicht Süd

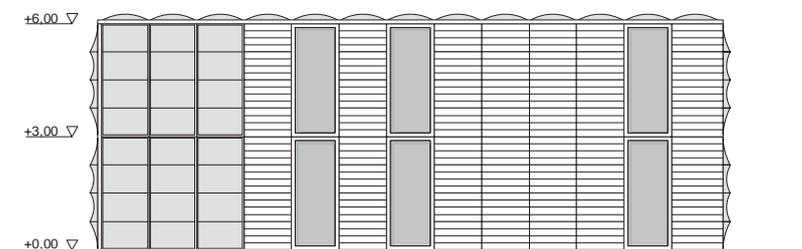


Abb. 111 c  
M 1:200  
Ansicht Ost

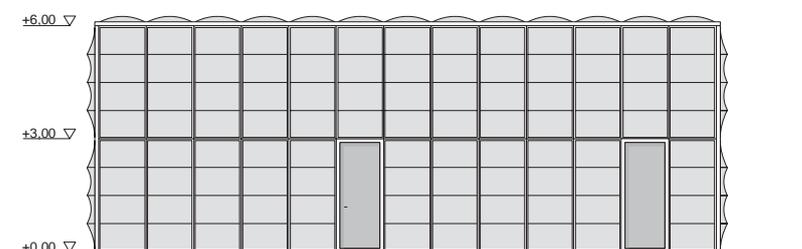


Abb. 111 d  
M 1:200  
Ansicht West

Abb 112 a  
M 1:200  
Schnitt A-A

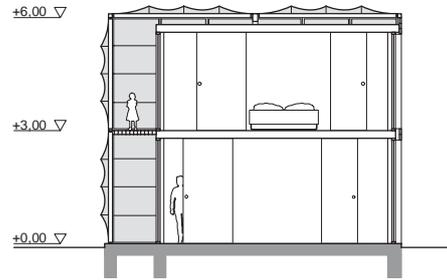


Abb. 112 b  
M 1:200  
Schnitt B-B

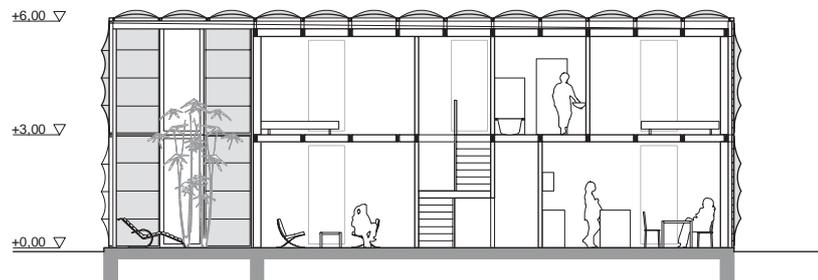
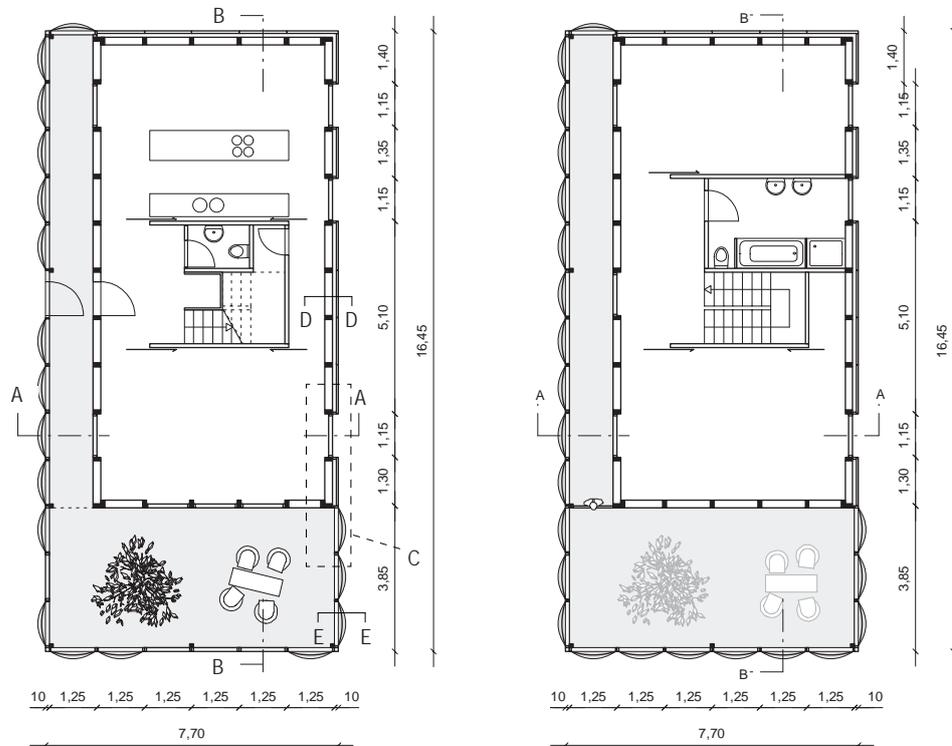


Abb 112 c-d  
M 1:200  
Grundriss EG  
Grundriss OG



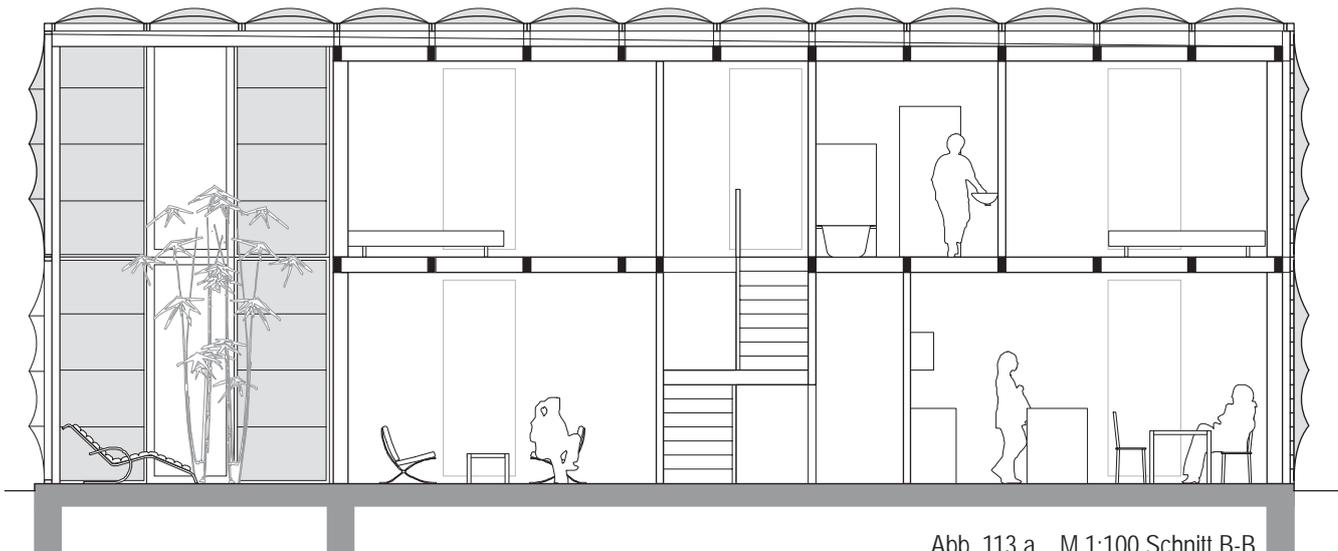


Abb. 113 a M 1:100 Schnitt B-B

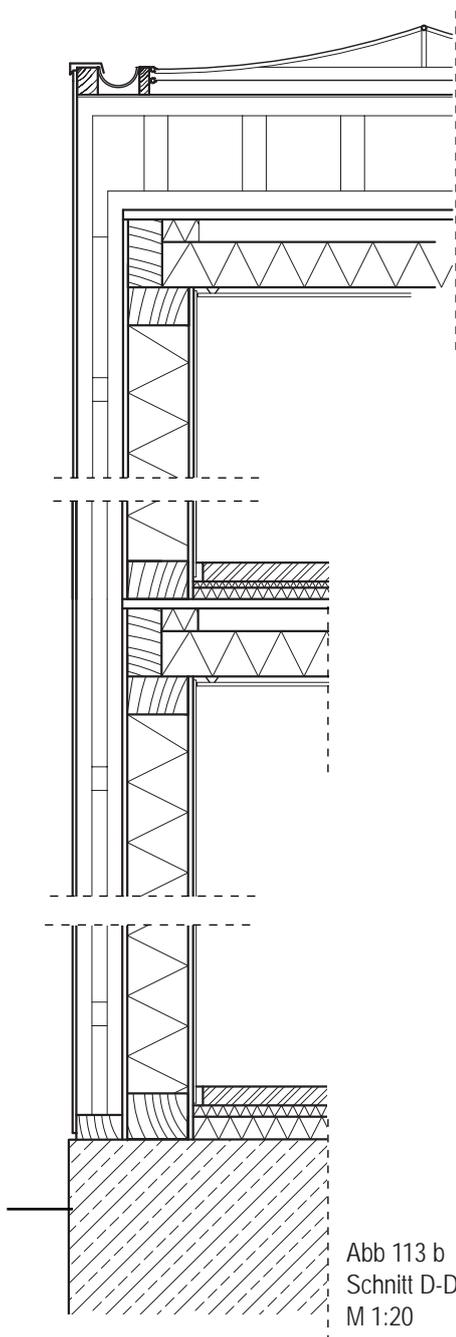


Abb 113 b  
Schnitt D-D  
M 1:20

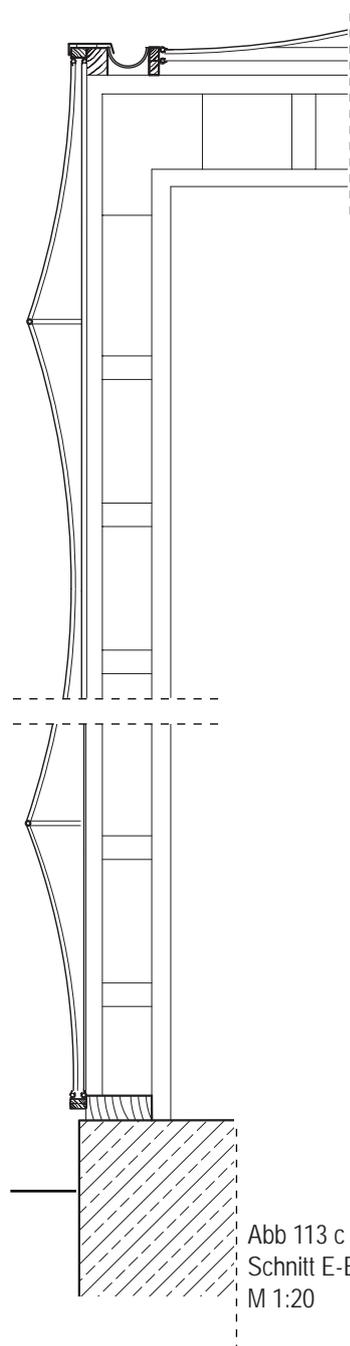


Abb 113 c  
Schnitt E-E  
M 1:20

Dachaufbau  
 Membranrahmenmodule  
 Doppelstegträger  
 Dichtungsbahn  
 Spanplatte 19mm  
 Deckenbalken 80/140 mm  
 Mineralfaserdämmung 140mm  
 Federschiene 27mm  
 Gipskartonbauplatte 15mm

Wohnungsdecke  
 Linoleum-Belag 2mm  
 Zementestrich 45mm  
 PE-Folie  
 Trittschalldämmung 20mm  
 Mineralfaserdämmung 25mm  
 Spanplatte 25mm  
 Deckenbalken 80/180mm  
 Luftraum 100mm  
 Mineralfaserdämmung 80mm  
 Federschiene 27mm  
 Gipskartonplatte 15mm

Außenwand  
 Schalung bzw. Membran  
 Doppelstegstützen  
 Holzwerkstoffplatte 13mm  
 Holzständer 90/120  
 Mineralfaserdämmung 120mm  
 Spanplatte 8mm  
 Gipskartonplatte 12,5mm

EG Bodenaufbau  
 Bodenbelag  
 Zementestrich 50mm  
 PE-Folie  
 Trittschalldämmung 30mm  
 Wärmedämmung PS 60mm  
 PE-Folie  
 Stahlbetonplatte 300mm

Abb. 114 a  
M 1:20  
Fassaden-  
detail C

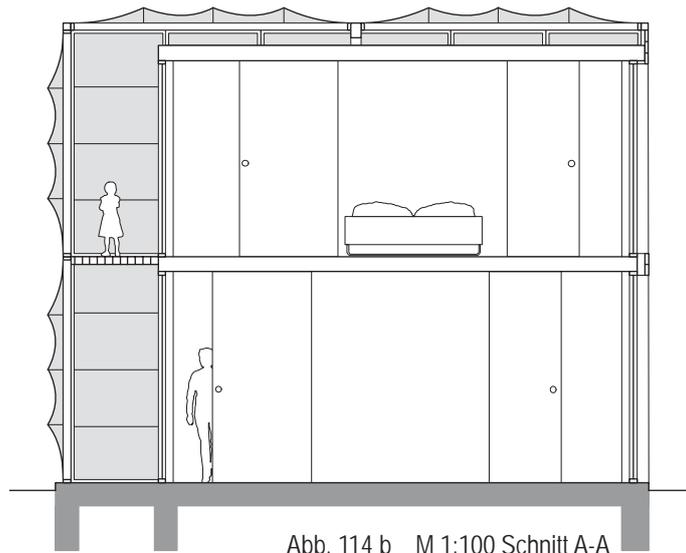
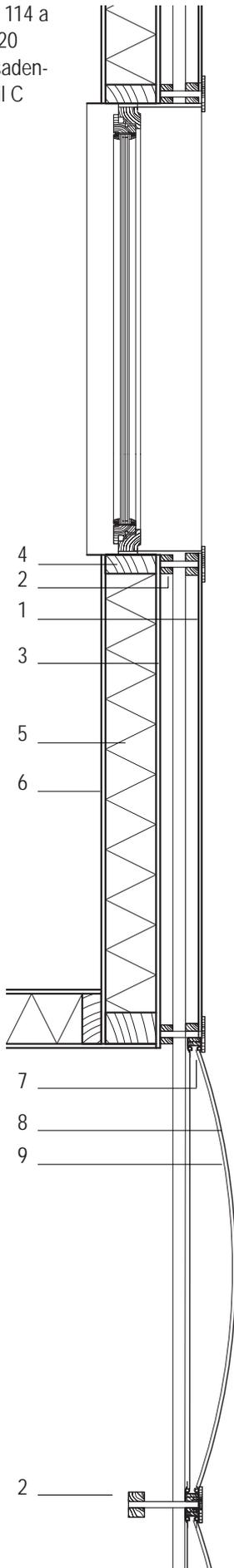


Abb. 114 b M 1:100 Schnitt A-A

Abb. 90c  
Entwässerung des Daches:  
Das Wasser fließt über die  
gewölbten Bogenflächen  
und sammelt sich in den  
seitlichen Rinnen zwischen  
den Rahmenmodulen. Von  
hier gelangt das Regenwasser  
in die mittig liegende oder  
bei Dachgefälle nach außen  
in die seitlich angeordneten  
Haupttrinnen.

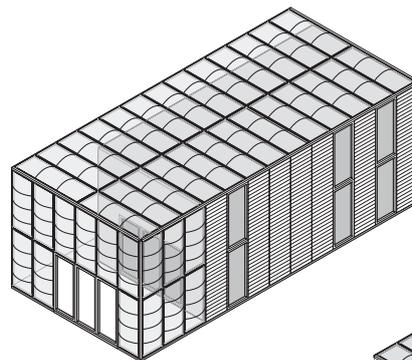
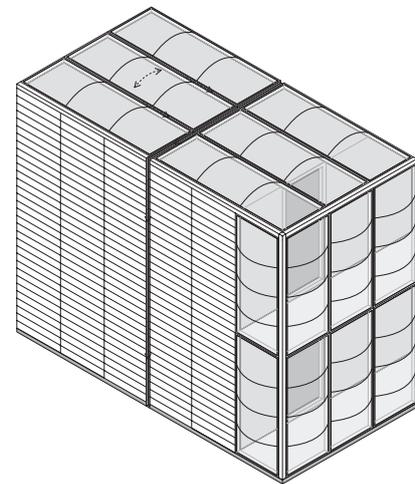
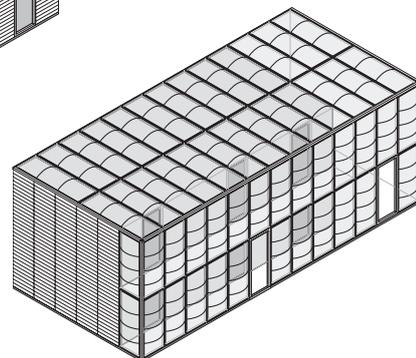


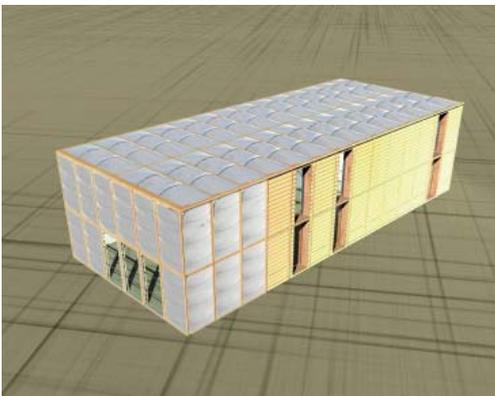
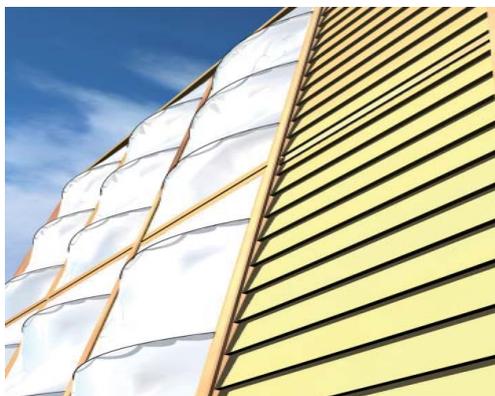
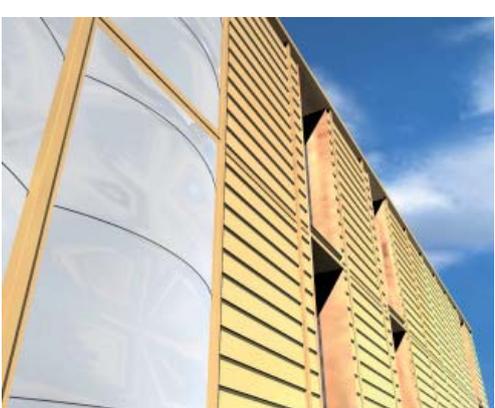
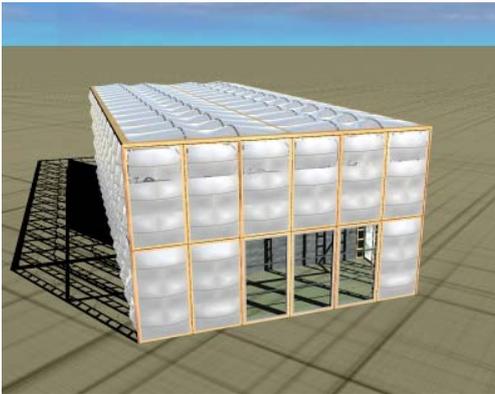
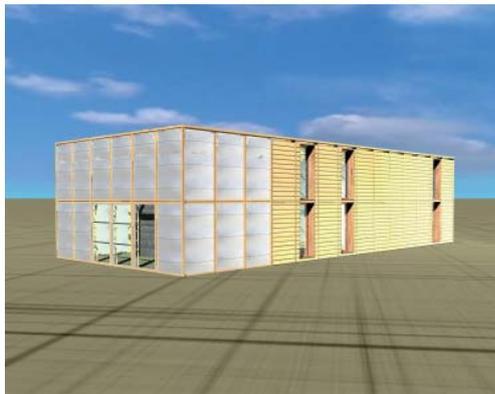
Abb. 114 d,e  
Isometrie Wohnhaus



- 1 Außenbekleidung mit Windsperre
- 2 Doppelstegstütze
- 3 Holzwerkstoffplatte 13mm
- 4 Holzständer 60/160mm
- 5 Wärmedämmung WLG035

- 6 Gipskartonbauplatte 12,5mm
- 7 Membranrahmen
- 8 PVC-PE Membran Typ 3
- 9 Membranbogen, Aluminiumrohr Ø 30mm

Abb. 115 a-h



### 3. Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranrahmenmodule

#### 3.1. Form, Nutzung und Gestaltung

- 3.1.1. Das Gebäude
- 3.1.2. Die Zwischenzone
- 3.1.3. Die Gebäudehülle
- 3.1.4. Referenzen
- 3.1.5. Das Membranmodul
- 3.1.6. Sattelform
- 3.1.7. Buckelform
- 3.1.8. Bogenform

#### 3.2. Konstruktion und Optimierung

- 3.2.1. Vorspannsysteme
- 3.2.2. Druckschrauben-Rahmenmodule
- 3.2.3. Zugschrauben-Rahmenmodule
- 3.2.4. Zugschrauben-Balkenmodule
- 3.2.5. Konstruktionen zur Auslenkung der Membran
- 3.2.6. Vergleich der Vorspannsysteme
- 3.2.7. Optimierung und Weiterentwicklung  
der Zugschrauben-Rahmenmodule

#### 3.3. Untersuchung des Tragverhaltens

- 3.3.1. Tragverhalten am vereinfachten Rahmen
- 3.3.2. Tragverhalten am Spannbalkenrahmen
- 3.3.3. Einwirkungen
- 3.3.4. Lastfälle und Lagerbedingungen
- 3.3.5. Tragverhalten sattelförmig bespannter Rahmenmodule
- 3.3.6. Tragverhalten buckelförmig bespannter Rahmenmodul
- 3.3.7. Tragverhalten bogenförmig bespannter Rahmenmodule
- 3.3.8. Vergleich des Tragverhaltens der Rahmenmodule

### 3.2. Konstruktion der Rahmenmodule

Der Rahmen ist das Grundgerüst des Membranmoduls. Er nimmt die Vorspannkraft der Membran auf und leitet sie in die Unterkonstruktionen weiter. Seine Ecken sind biegesteif ausgeführt. Für den Einsatz als zweite Gebäudehülle wird über den Rahmen doppellagig, auf Ober- und Unterseite, jeweils eine Membranfläche gespannt. Die Doppellagigkeit erzielt, durch den Einschluss einer stehenden Luftschicht, eine bessere Isolation der Hülle und kann dadurch den thermischen Ansprüchen einer zweiten Gebäudehülle gerecht werden.

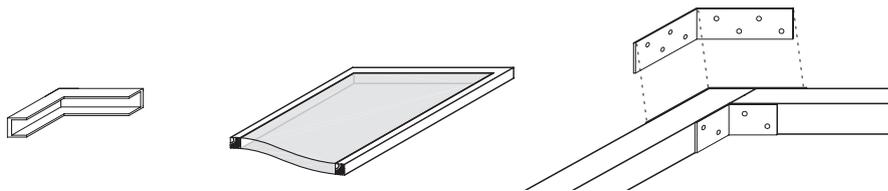


Abb. 116 a-c  
Voraussetzungen:  
biegesteife Ecken,  
Doppellagigkeit

Aufgabe des Rahmens ist es, nach dem Aufspannen der Membranfläche, eine Vorspannmechanik vorzuhalten, die es ermöglicht die Membran erstmalig, im Einbauzustand, ein- und vorzuspannen sowie im eingebauten Zustand nachzuspannen. Die Vorspannung ertüchtigt die Membran äußere Lasten aufzunehmen, der Rahmen muss sie und die Vorspannkkräfte der Membran an die Tragkonstruktion des Gebäudes weiterleiten. Die Vorspannung wird hauptsächlich durch seitliches Dehnen der Membran erzielt. Die Rahmengenometrie muss diese Längenänderung der Membran ermöglichen.

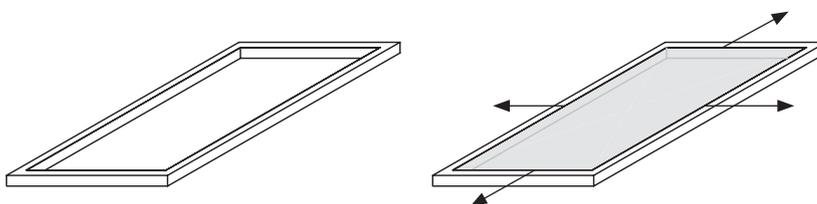


Abb. 117 a,b  
Vor- und  
Nachspannbarkeit

Prinzipiell besteht die Konstruktion aus Rahmen und Spannbalken. Dabei ist der Rahmen der feste, unverschiebliche Teil der Konstruktion. Die Spannbalken stellen dagegen die beweglich, verschieblichen Elemente dar, über die die Membran vorgespannt wird. Als Material eignen sich Holz, Stahl, oder Aluminiumwerkstoffe. Exemplarisch wird die Entwicklung der Rahmenmodule am Beispiel der Holzrahmen durchgeführt, bevor andere Materialausführungen vorgestellt werden. Die nachstehende Zeichnung gibt einen Überblick über die Grundelemente der Konstruktion.

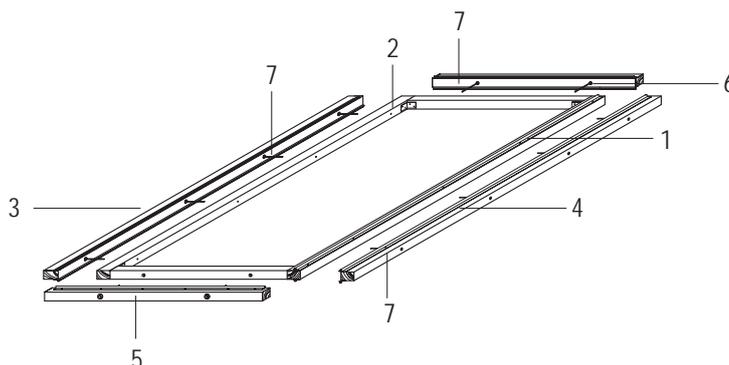
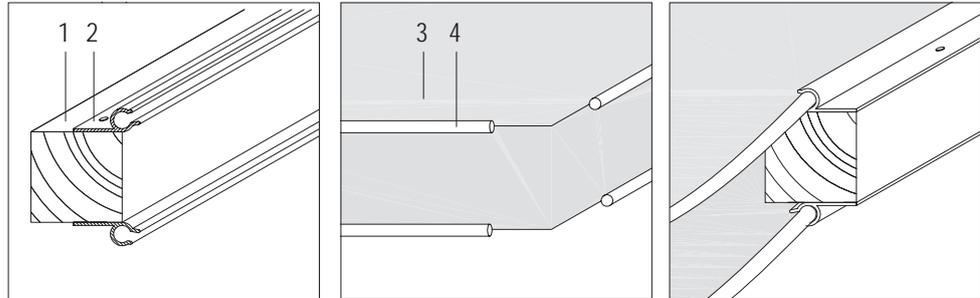


Abb. 118  
1 Rahmen  
2 biegesteife Ecke  
3 linker Spannbalken  
4 rechter Spannbalken  
5 unterer Spannbalken  
6 oberer Spannbalken  
7 Spannschrauben

Die Verbindung der Membran mit dem Rahmen bzw. Spannbalken erfolgt mittels Kederschiene, um eine lineare Kraftübertragung in die Membran zu gewährleisten. Sie ist zudem eine einfache und kostengünstige Verbindung und lässt eine, für das Vorspannen wichtige, einachsige Verschiebung der Membran in der Schiene zu. Die Kederschiene muss auf Ober- und Unterseite der Holzkonstruktion aufgeschraubt werden, um auf beiden Seiten die Membran einzuziehen zu können. Die Membran ist allseitig mit einer Keder konfektioniert.

Abb.119 a-c  
Anschluss Membran,  
Spannbalken

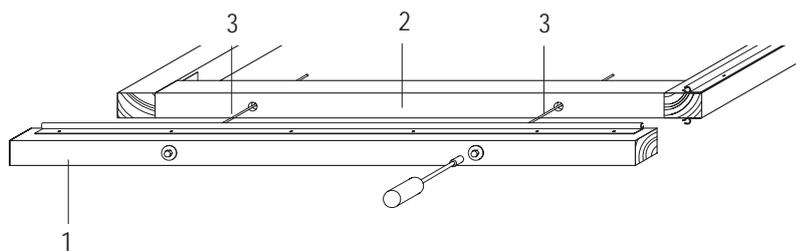
- 1 Spannbalken,  
verschieblich
- 2 Kederschiene
- 3 Membran
- 4 Keder



### 3.2.1. Vorspannsysteme

Nachdem die Membran in die Kederschiene der Spannbalken eingezogen wurde, muss die Membran vorgespannt werden. Dies geschieht durch Spannelemente, wie Schrauben oder Federn, die zwischen Spannbalken und Rahmenkonstruktion platziert sind. Sie verkürzen oder verlängern den Abstand zwischen Balken und Rahmen und können so die Membran vorspannen. Die Profilgrößen von Spannbalken und Rahmen werden in Kapitel 3.3. „Tragverhalten der Rahmenmodule“ ermittelt. Die hier gewählten Querschnitte in den folgenden Zeichnungen liegen zunächst keiner Berechnung zugrunde. Sie berücksichtigen jedoch proportionale Zusammenhänge, wie zum Beispiel die Ausrichtung der Profile in Richtung ihrer größten Belastung, der Zugrichtung der Membran.

Abb. 120  
1 Spannbalken,  
verschieblich  
2 Rahmen  
3 Spannschraube



Im Folgenden werden drei Vorspannsysteme vorgestellt, die mittels Spannschrauben den Spannbalken mit der Rahmenkonstruktion verbinden. Die an dem Spannbalken befestigte Membran wird durch die Verschieblichkeit des Spannbalkens vorgespannt. Zunächst wird ein System vorgestellt, bei dem diese Verschieblichkeit durch eine druckbelastete Spannschraube erfolgt.

#### Druckschrauben Rahmensysteme

Dieses System zeichnet sich durch einen innenliegenden Stützrahmen aus. Der Spannbalken liegt außerhalb der Rahmenkonstruktion und wird über Spannschrauben mit dem Rahmen verbunden. Ein Aufdrehen der Spannschrauben führt zum Vorspannen der Membran und einer Druckbelastung der Schraube.

Die Druckschraube wird durch den Spannbalken gesteckt und mit einer Unterleg-

scheibe und zwei gegeneinander gekonterten Schrauben gegen Herausziehen lagegesichert. Ein freies Drehen der Schraube im Spannbalken bleibt dabei gewährleistet. Die Schraube wird in das Innengewinde der Rahmenkonstruktion geschraubt. Beim Aufdrehen der druckbelasteten Spannschraube weitet sich der Abstand zwischen Spannbalken und Rahmen. Die Unterlegscheibe, die durch die Kontermuttern in ihrer Lage gehalten wird, überträgt die Kraft auf den Spannbalken. Der Spannbalken wird mit dem Herausdrehen der Schraube, vom Rahmen weggedrückt und spannt so die Membran.

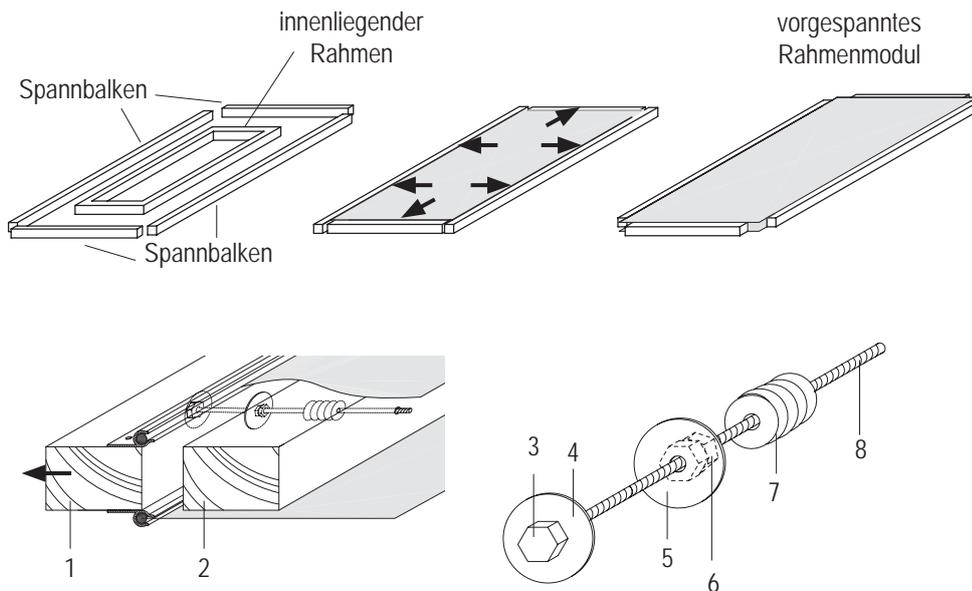


Abb. 121 a-e  
Druckschrauben-  
Rahmensystem

- 1 Spannbalken
- 2 Rahmen
- 3 Schraubkopf
- 4 äußere Unterlegscheibe
- 5 innere Unterlegscheibe
- 6 Kontermuttern
- 7 einschraubbares Gewinde
- 8 Spannschraube

### Zugschrauben-Rahmensystem

Auch das zweite Vorspannsystem basiert auf einem Stützrahmen und einem verschieblichen Spannbalken. Jedoch liegt beim Zugschrauben Rahmensystem der Spannbalken innerhalb der Rahmenkonstruktion. Die Membran wird durch das Heranziehen des Spannbalkens an den Rahmen vorgespannt. Die Spannschrauben sind in diesem Fall zugbelastet.

Die Zugschraube ist über eine Unterlegscheibe und zwei gegeneinander gekonterte Muttern mit dem Rahmen verbunden und gegen Herausziehen gesichert. Ein freies Drehen ist jedoch sichergestellt. Durch das Eindrehen der Zugschraube in das Gewinde des Spannbalkens werden Rahmen und Spannbalken miteinander verbunden. Da sich der Spannbalken bei diesem Vorspannsystem innerhalb des Rahmens befindet wird durch das Eindrehen der Zugschraube der Balken an den Rahmen heran gezogen und damit eine Vorspannung in das mit dem Spannbalken befestigte Membranmaterial gebracht. Die äußere Unterlegscheibe verhindert dabei das Eindrehen des Schraubenkopfes in den Rahmen.

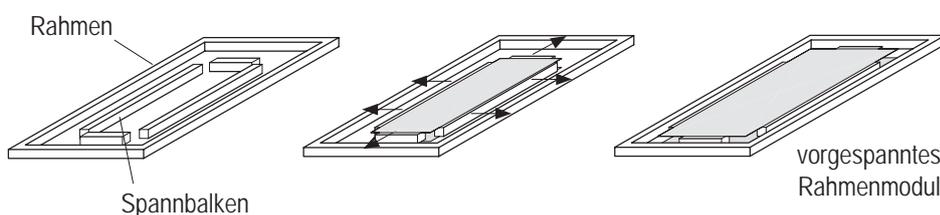
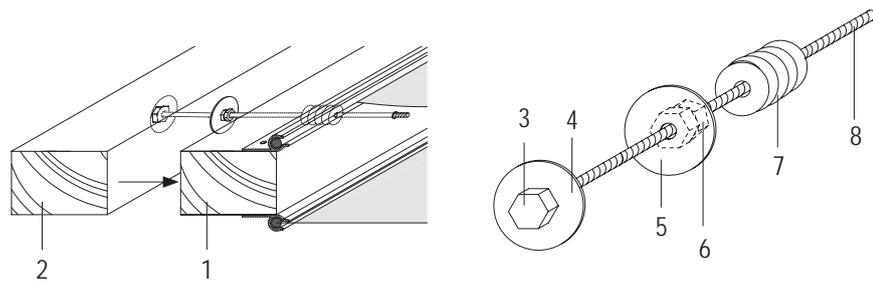


Abb. 122 a-c  
Zugschrauben-  
Rahmensystem

- Abb. 122 d,e
- 1 Spannbalken
  - 2 Rahmen
  - 3 Schraubkopf
  - 4 äußere Unterlegscheibe
  - 5 innere Unterlegscheibe
  - 6 Kontermuttern
  - 7 einschraubbares Gewinde
  - 8 Spannschraube

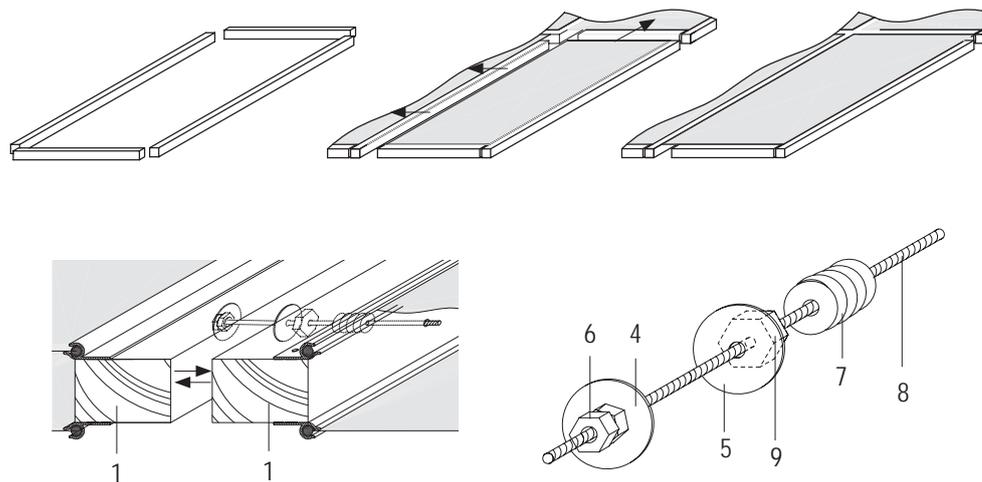


### Zugschrauben-Balkensysteme

Das dritte Vorspannsystem, die zugbeanspruchten Balkenmodule, kommen ohne Rahmensystem aus. Die mit der Membran verbundenen Spannbalken werden durch Spannschrauben nach außen gezogen und leiten die Vorspannkraft in benachbarte Module, bzw. eine Unterkonstruktion ab. Das System beruht also wiederum auf zugbeanspruchten Schrauben, die jedoch nicht Rahmen und Spannbalken miteinander verbinden sondern zwei Spannbalken benachbarter Membranmodule aneinander ziehen.

Für diesen Fall muss die Zugänglichkeit der Spannschraube zwischen den beiden membranbespannten Spannbalken liegen. Dafür werden Zugschrauben mit einer mittig festverschweißten Mutter verwendet. Nachdem Aufziehen einer Unterlegscheibe kann die Schraube durch den Spannbalken gesteckt werden. Eine weitere Scheibe und zwei gekonterte Muttern sichern die Schraube gegen Herausziehen und ermöglichen ihr freies Drehen im Spannbalken. Durch das Eindrehen des freien Endes der Spannschraube in das Gewinde des gegenüberliegenden Spannbalkens können zwei Module miteinander verbunden werden und Vorspannung durch Anziehen der Schraube in die Membranflächen eingebracht werden.

- Abb. 123 a-e
- Zugschrauben-Balkensystem
- 1 Spannbalken
  - 2 Rahmen
  - 3 Schraubkopf
  - 4 äußere Unterlegscheibe
  - 5 innere Unterlegscheibe
  - 6 Kontermuttern
  - 7 einschraubbares Gewinde
  - 8 Spannschraube
  - 9 mittiger Schraubkopf



Die drei Vorspannsysteme unterscheiden sich durch unterschiedliche Beanspruchung der Spannschraube und der Verwendung von Rahmen und/oder Spannbalken und werden deshalb in dieser Arbeit als Druckschrauben-Rahmensysteme, Zugschrauben-Rahmen-Systeme und Zugschrauben-Balken-Systeme bezeichnet. Eine detaillierte Beschreibung ihrer Konstruktion erfolgt auf den folgenden Seiten.

### 3.2.2. Druckschrauben-Rahmenmodule

Das Druckschrauben-Rahmensystem besteht aus einem innen liegenden Rahmen sowie vier Spannbalken (Abb.124a). Die beiden Membranflächen sind allseitig mit einer Keder konfektioniert. Eingeschoben in Kederschienen bieten sie so eine einachsig verschiebliche Verbindung mit dem Rahmen. Die Kederschienen sind sowohl auf Ober-, als auch auf Unterseite der Spannbalken mit Holzschrauben befestigt (b). Um die Membran einzuziehen, werden zuerst die seitlichen Spannbalken mit Hilfe der Spannschrauben an den Rahmen geschraubt (c). So kann die Membran unbelastet in die seitlichen Kederschienen eingeschoben werden. Anschließend lässt sich der untere Spannbalken über die noch freien Stirnseiten der Membran ziehen (d). Um am oberen Ende die Kederschienen in die Membran einzuschieben zu können, muss der untere Spannbalken an die Rahmenkonstruktion geschraubt werden. Das Anschrauben entlastet die Membran und ermöglicht ihr Einziehen und das Anschrauben des oberen Spannbalkens an den Rahmen (e). Das Aufdrehen der Spannschrauben vorgespannt werden (f). Das Aufdrehen der Spannschrauben bewirkt eine Verlängerung des Abstands zwischen Rahmen und Spannbalken und damit eine Vorspannung der Membran.

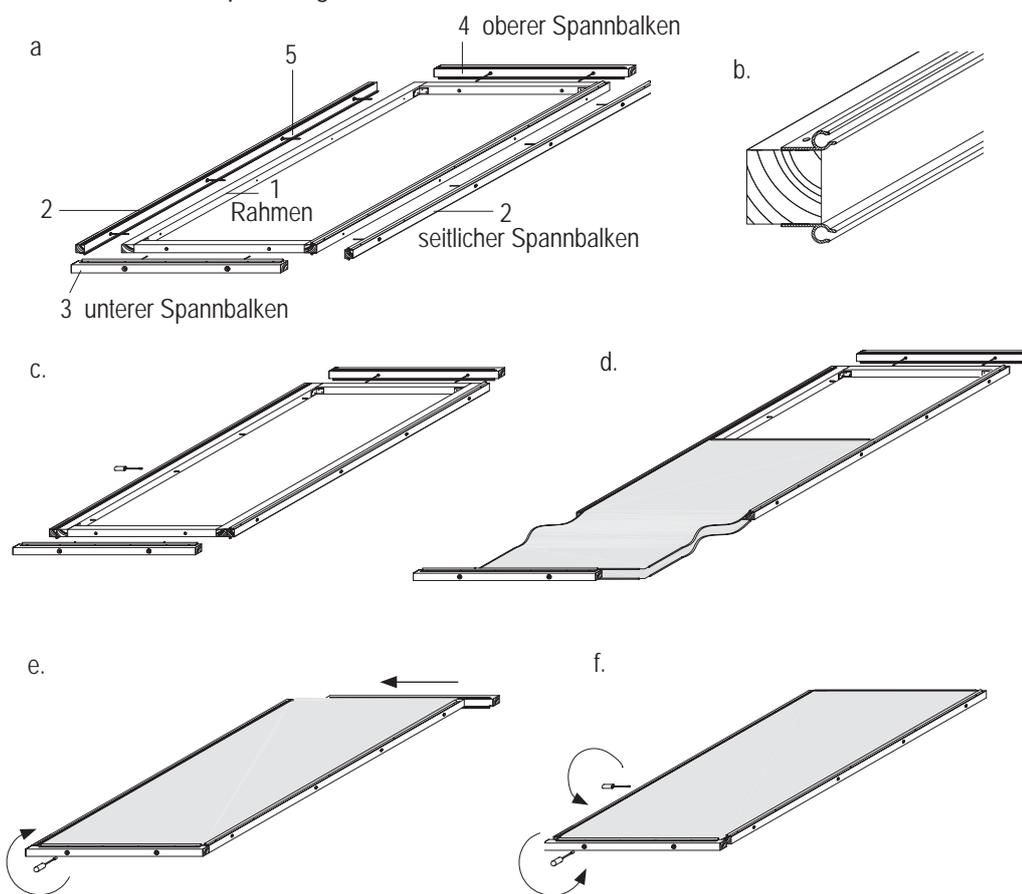


Abb. 124 a-f  
Elemente des druckbeanspruchten Rahmenmoduls.

- 1 Rahmen
- 2 seitl. Spannbalken
- 3 untere Spannbalken
- 4 oberer Spannbalken
- 5 Spannschraube

Einziehen der Membran

Einziehen der oberen Kederschienen, nach Anschrauben des unteren Spannbalkens

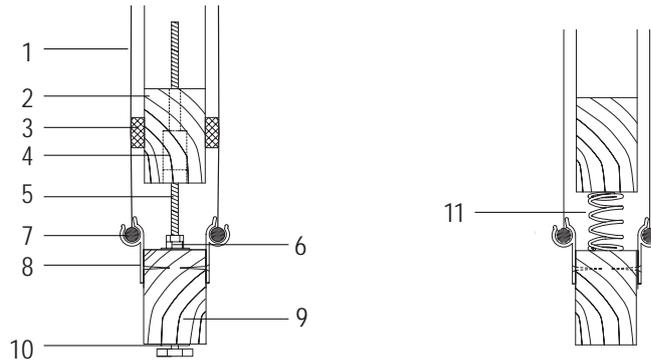
Befestigung der Kederschienen und Vorspannen des Rahmenmoduls.

#### Spannelemente

Druckbeanspruchte Rahmen können mittels Schraubenverbindung oder auch mit Druckfedern ausgeführt werden. In beiden Fällen wird durch Verlängerung des Abstandes zwischen Spannbalken und Rahmen die Membran vorgespannt. Bei der Verwendung der Spannschraube wird durch das Herausdrehen der Schraube aus dem Gewinde des Rahmens der Spannbalken vom Rahmen verschoben.

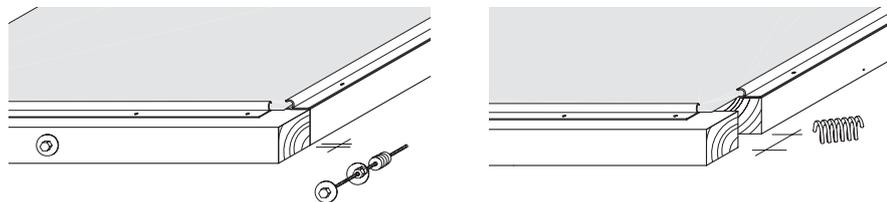
Bei der Verwendung von Druckfedern führt die Federkraft zur Vorspannung der Membran. Sie drückt den Spannbalken vom Rahmen und spannt so die Membran. Beim Einziehen der Membran muss der Spannbalken dicht an den Rahmen herangedrückt werden, um die Membran im unbelasteten Zustand problemlos in die Keder einschieben zu können. Hierfür muss die Druckfeder stark gestaucht werden. Werkzeuge, wie Zwingen oder temporäre Spannschrauben, die für Montagezwecke eingeschraubt werden, sind notwendig, um den Spannbalken an den Rahmen zu ziehen. Anschließend kann die Feder wieder entlastet werden, die Membran wird gespannt.

- Abb. 125 a,b  
 1 Membran  
 2 Holzrahmen  
 3 Abdichtung  
 4 Gewinde M8  
 5 Zugschraube  
 6 Kontermuttern  
 7 Keder  
 8 Kederschiene  
 9 Spannbalken  
 10 Unterlegscheibe  
 11 Druckfeder



Sowohl bei der Verwendung von Schrauben, als auch beim Einsetzen von Federn ist das Spannelement gegen Ausknicken zu bemessen. Druckfedern können durch einen innenliegenden Druckstab gegen Knicken ertüchtigt werden. (vgl. Holzstapel des Schweizer Expo-Pavillon der Weltausstellung 2000, Architekt: Zumthor) [Her03]. Im Vergleich der beiden Spannelemente überwiegen die Vorteile der Spannschraube. Der Spannweg zwischen Spannbalken und Rahmen kann beim Schraubensystem auf Null reduziert werden. Dieser Zustand ist für das Einfädeln der Membran in die Kederschiene wichtig. Anschließend wird durch das Aufweiten des Abstandes zwischen Spannbalken und Rahmen die Vorspannung erzeugt. Bei der Verwendung von Druckschrauben wird jedoch zwischen Spannbalken und Rahmen immer ein konstruktiver Abstand für die Druckschraube auftragen, der ein völliges Anziehen der beiden Elemente verhindert. Der vorzuhaltende Spannweg bei der Verwendung von Druckschrauben ist also deutlich größer.

- Abb. 126 a,b  
 Minimalabstand  
 zwischen Balken und  
 Rahmen



Die zweite negative Eigenschaft der Feder ist, dass ein späteres Nachspannen nicht möglich ist. Relaxation der Membran (vgl. Kapitel 1.3.2) führt zum Abbau der Federkraft und einer Reduktion der Membranvorspannung. Spannschrauben können durch Nachspannen auf diese Eigenschaft der Membran reagieren. Druckfedern hingegen müssen so ausgelegt sein, dass durch anfänglich erhöhte Federkraft nach Materialdehnung noch ausreichend Vorspannung durch die Feder erzielt wird. Dies führt zu anfänglich erhöhten Belastungen und einer notwendigen unwirtschaftlichen Bemessung der Rahmenkonstruktion. Eine mögliche Lösung dieses Problems läge in der Verwendung nachspannbarer Federn.

Die verschieblichen Halteprofile sind eine weitere Form möglicher Spannelemente. Ein Metallwinkel wird auf einer Führungsschiene gehalten. Seitliches Verrutschen verhindert die Aufkantung der Führungsschiene, ein Herausfallen wird durch einen Bolzen unterbunden. Das Langloch des Winkels ermöglicht jedoch ein Verschieben in vertikaler Richtung, das durch Auf- und Zudrehen der Schraube am Rücken des Winkels erreicht wird. Der Kopf des Winkels weitet sich auf, um eine Kederschiene aufnehmen zu können.

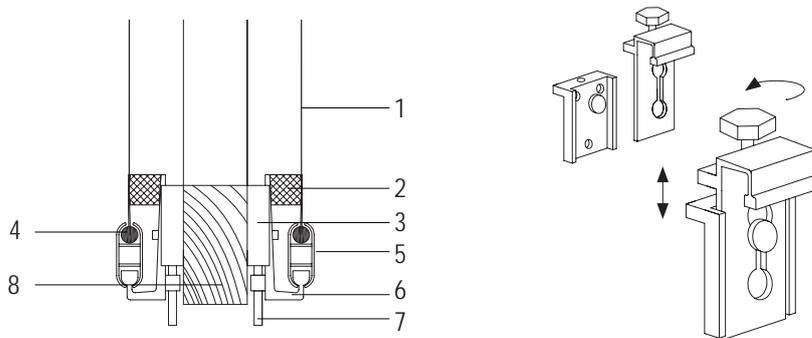


Abb. 127 a,b  
 1 Membran  
 2 Abdichtung  
 3 Grundplatte, Alu eloxiert  
 4 Keder  
 5 2-Kanal Kederschiene  
 6 verschiebl. Winkel, Alu  
 7 Spannschraube  
 8 Holzrahmen

Ein solches System wird von der Firma „Sign-Ware“ angeboten. Diese Wandbefestigung müsste jedoch modifiziert werden, um als Vorspannsystem eines doppellagigen Membranmoduls eingesetzt zu werden. Anstelle der seitlichen Zugänglichkeit, wäre vor allem eine frontale Einstellbarkeit der Spannschraube notwendig. Zudem müssten Lösungen zur Abdichtung der stehenden Luftschicht der doppellagigen Membran gefunden und die Wasserdichtigkeit im Bereich der Kederschiene überprüft werden. Die Arbeit beschränkt sich im weiteren Verlauf auf die Untersuchung von Spannschraubensystemen. Der Einsatz von Federn oder Halteprofilen wird nicht weiter vertieft.

### Abdichtung

Die Befestigung der Membran an Rahmen oder Balken mittels Keder, ist eine effektive und kostengünstige Lösung. Ein großer Nachteil der Kederschiene ist jedoch die Luft- und Wasserundichtigkeit der Konstruktion, die für den Einsatz der Membranmodule im Fassaden- und Dachbereich jedoch erforderlich ist. Um verbesserte Wärmedämmeigenschaften der Membranmodule zu erreichen und die Entstehung von Kondensat innerhalb der beiden Membranlagen zu verhindern, sollte zwischen oberer und unterer Membranfläche eine stehende Luftschicht angeordnet werden. Bei Druckschrauben-Rahmenmodulen entstehen beim Spannen der Konstruktion jedoch Undichtigkeiten in den Ecken: Je stärker die Spannbalken vom Rahmen geschraubt werden, desto größer die Fugenöffnungen der Ecken. Die nachstehende Abbildung illustriert dieses Problem.

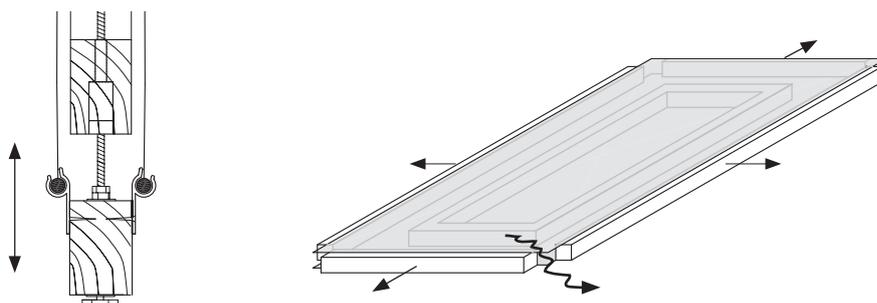


Abb. 128 a,b  
 Das Aufdrehen der Spannschraube führt zur Fugen in den Modulecken

Die Dichtigkeit des Rahmenmoduls wird durch zwei Maßnahmen erhöht. Zum einen wird parallel zu den Kederschiene Dichtungsbänder aufgebracht, über die die Membran gespannt wird. So wird eine lineare Randabdichtung hergestellt. Die Ecken können durch das Aufstecken eines Dichtungswinkels abgedichtet werden. Der Dichtungswinkel ist ein U-Profil in Winkelform. Er ist von Innen mit einem EPDM-Dichtprofil versehen. Das Profil rastet durch die Ausformung einer Nase hinter die Klemmschiene ein. Durch die seitliche Verschiebbarkeit des U-Profiles passt sich der Winkel an jeden Vorspannungs- und Öffnungsgrad des Rahmenmoduls an.

Abb. 129 a,b  
seitliche Abdichtung

- 1 obere Dichtung
- 2 untere Dichtung
- 3 Dichtungswinkel

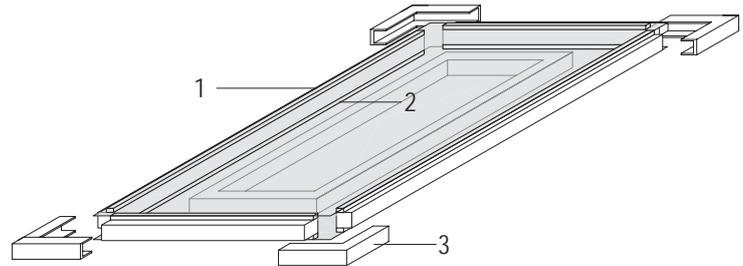
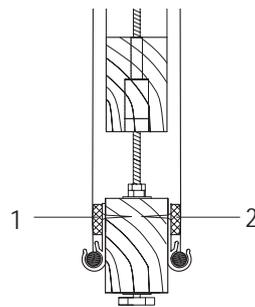
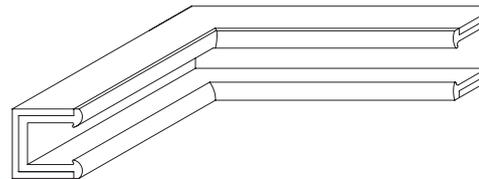
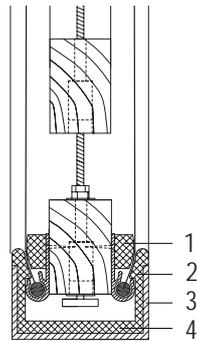


Abb. 129 c,d  
Eckabdichtung mit  
Dichtungswinkeln  
M 1:5

- 1 EPDM- Dichtprofil  
am Spannbalken
- 2 Dichtungsnase zum  
Einklinken in das  
Modul
- 3 U-Stahlprofil
- 4 EPDM-Dichtung im  
U-Profil



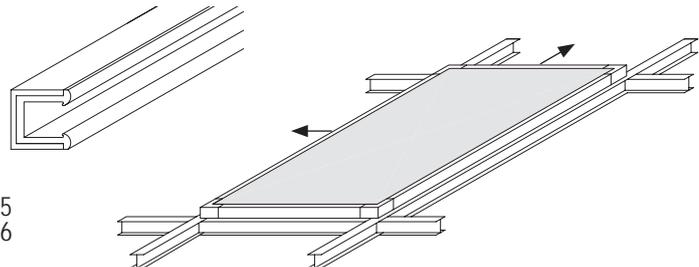
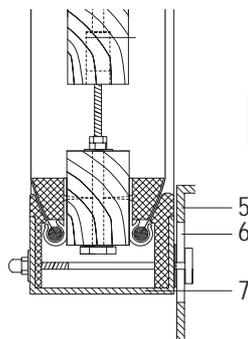
#### Anschluss an die Unterkonstruktion

Wie in der oberen Abbildung illustriert führt das Aufdrehen der Spannschrauben bei Druckschrauben-Rahmensystemen zu Veränderung ihrer Geometrie. Die Maße des Rahmenmoduls nehmen zu, die Seiten längen sich. Diese Seitenverlängerung muss auch nach Befestigung der Membranmodule auf ihre Unterkonstruktion möglich sein, denn ein Nachspannen der Membranmodule ist auch im eingebauten Zustand notwendig vorzuhalten.

Hierfür werden seitliche U-Schienen vorgeschlagen, die dasselbe Profil wie die oben abgebildeten Dichtungswinkel aufweisen. Sie werden zwischen den Eckprofilen auf die Konstruktion gesteckt und mit der Unterkonstruktion verbunden. Eine Schmal- und eine Längsseite muss über eine Langlochverbindung verschieblich ausgeführt werden, um die Geometrieänderungen des Modulrahmens aufnehmen zu können.

Abb. 130 a-c  
Anschluss an die  
Unterkonstruktion mit  
seitlichen U-Profilen

- 5 Unterkonstruktion
- 6 Langloch
- 7 U-Profilwinkel



## Entwässerung

Unzureichende Entwässerung der Membran führt zu ihrer Verschmutzung, Beschädigung und sogar Zerstörung. Insofern muss die Konstruktion so ausgelegt sein, dass anfallendes Wasser sowohl auf den horizontal liegenden Dachmodulen, als auch über die vertikal stehenden Fassadenmodule ungestört abfließen kann. Hierfür ist ein zwei Prozentiges Gefälle der Oberfläche waagrecht eingebauter Dachmodule notwendig. Im Regelfall wird die Krümmung der Membran eine ausreichende Entwässerungsneigung erzeugen, um das Wasser von der Membranfläche ablaufen zu lassen. Im Detail muss der Ablauf des Wassers über die Kederschiene hinweg gelöst werden. Die Verbindungstechnik mittels Kederschiene birgt den Nachteil, dass sich an der Kante der Kederschiene Wasser sammeln kann. Die nachfolgende Zeichnung zeigt diese Problematik.

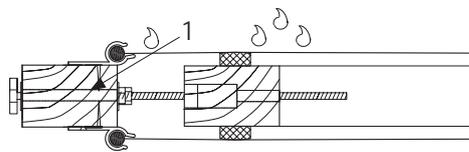


Abb.131  
1 Problemstelle der Entwässerung

Dieses Problem kann durch eine Abdeckung behoben werden. Die Abdeckung wird in Form eines Membranrandstreifens ausgeführt der wenige Zentimeter vor dem Membranrand aufgeschweißt wird. Nach dem Einziehen der Membran auf den Spannbalken und dem Aufstecken der Eckprofile wird der Randstreifen über die Kederschiene auf das Eckprofil geschlagen und hier durch einen Klettverschluss befestigt.

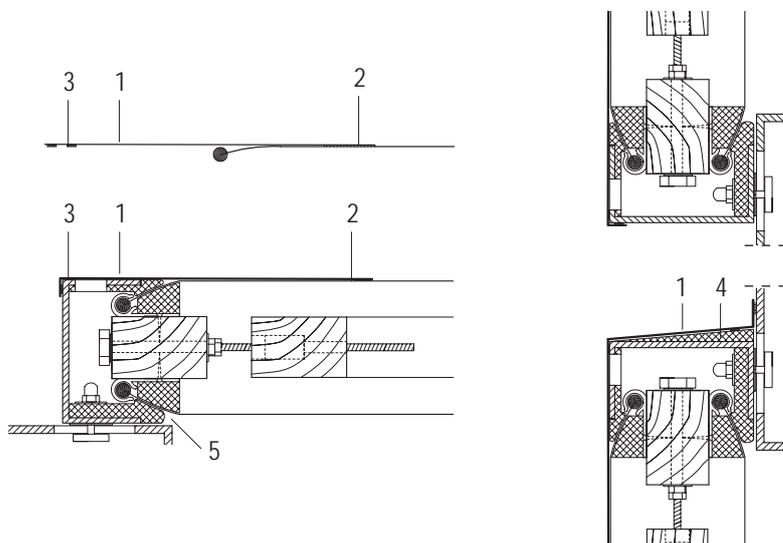


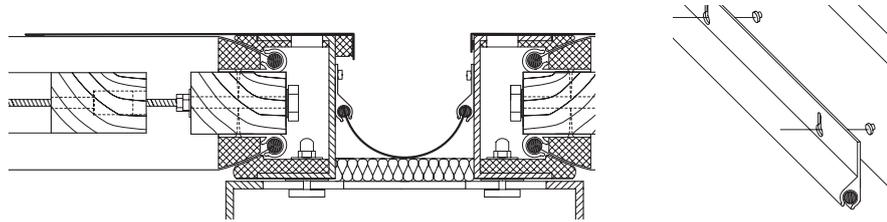
Abb. 132 a-d  
1 Membranstreifen  
2 Schweißnaht  
3 Klettverbindung  
4 Gefälle auf oberen Spannbalken  
5 Aufweitung der Abdichtung für größeren Abstand zur Unterkonstruktion

Für vertikal stehende Fassadenmodule ist diese Art der Abdichtung, wie abgebildet, ausreichend. Waagrecht liegende Dachmodule müssen jedoch an ein Rinnensystem angeschlossen werden. Durch die variierenden Außenmaße des Rahmenmoduls muss die Regenrinne auf die Geometrieänderungen reagieren.

Zwei Lösungen werden im Folgenden vorgeschlagen. Zum einen kann die Rinne aus biegeweichem Membranmaterial hergestellt werden und in die Fuge zweier Membranmodule gehängt werden. Sie wird seitlich durch Kederschiene gehalten die an die Außenkanten der U-Profile gesteckt werden. Das Einhängen der Rinne erfolgt nach der Montage der Module und bietet so die Möglichkeit die Fuge

zwischen den Modulen mit einem Dämmstreifen ausreichend wärmezudämmen. Der Kreuzungspunkt von vier Membranmodulen wird mit einem kreuzförmigen Verbindungselement hergestellt (vgl. S.115).

Abb. 133



Alternativ zu flexiblen Membranrinnen können auch herkömmliche verzinkte Metallrinnen zwischen die Module installiert werden, wenn diese über flexible Membranstreifen mit den Modulen verbunden werden. Dafür wird vor dem Abdecken des Moduls mit dem Membranseitenstreifen, ein zweiter Streifen zwischen Rinnenkante und U-Profil Oberkante gespannt. Der Anschluss wird über einen Klettverschluss realisiert. Abschließend wird dann der Membranseitenstreifen über den gerade aufgebrachtten Rinnenstreifen geschlagen und auf ihm befestigt. So entsteht eine in Fließrichtung des Wassers kantenlose Überlappung von zwei Membranstreifen, die nach dem Vorspannen der Module verstellt werden kann. Das nachfolgende Beispiel zeigt einen Anschluss des Moduls an ein Verbindungselement, dass wiederum an einem Rohrprofil der Unterkonstruktion befestigt ist.

Abb. 134 a  
Rinnenanschluß  
bei geringer  
Membranvorspannung

- 1 Membranstreifen  
an der Rinne fixiert
- 2 Membran
- 3 Membranrandstreifen  
aufgeschweisst
- 4 Verbindungselement
- 5 Winkel zur Halterung  
der Rinne
- 5 Unterkonstruktion  
Rohrprofil

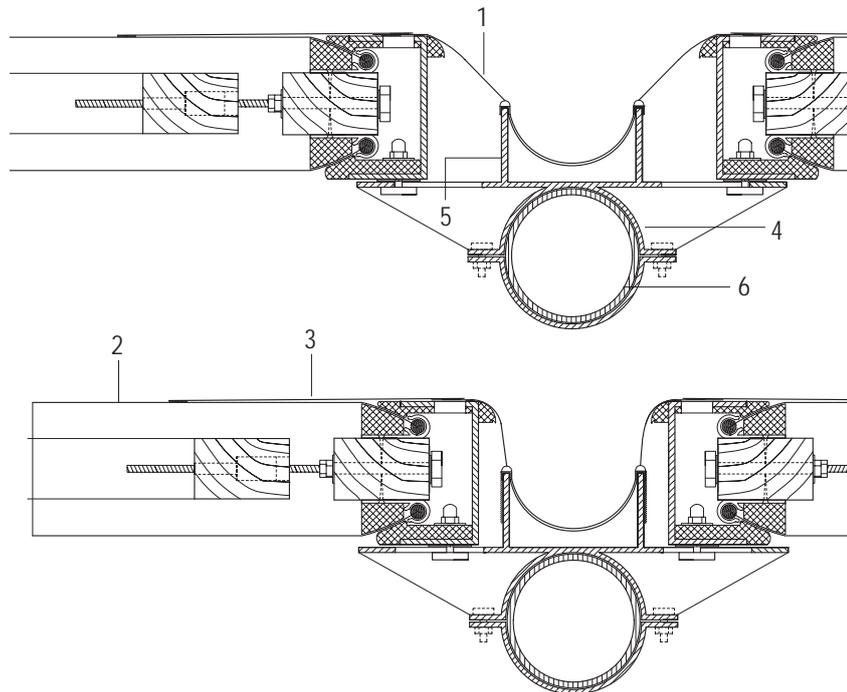


Abb. 134 b  
Rinnenanschluß  
bei hoher  
Membranvorspannung

Die äußerliche Geometrieänderung der druckbeanspruchten Rahmenmodule wird bei allen Detaillierungen zum Problem. Es erfordert komplizierte Verbindungstechniken und führt zu erhöhtem Aufwand, eine wirtschaftliche Anwendung dieses Systems ist nicht gegeben. Wie im nächsten Kapitel zu sehen sein wird, können Details einfacher ausgeführt werden, wenn eine gleichbleibende, unveränderliche Rahmenaußengeometrie vorausgesetzt werden kann. Diese Bedingung erfüllen Zugschrauben-Rahmenmodule, die im folgenden Kapitel genauer vorgestellt werden.

### 3.2.3. Zugschrauben-Rahmenmodule

Die Vorspannmechanik der Zugschrauben-Rahmenmodule beruht auf dem Anziehen der Spannbalken an die Rahmengemetrie. Die Konstruktionselemente des Rahmenmoduls sind Spannbalken und Rahmen (Abb. 135a). In den Rahmen werden Gewinde zur Aufnahme der Spannschrauben eingeschraubt, die Rahmenecken werden biegesteif ausgeführt, Kederschiene und Spannschrauben sind an Rahmen bzw. Spannbalken zu befestigen. Die allseitig mit Keder konfektionierten Membrane (b) werden in die obere und untere Kederschiene der Spannbalken eingezogen (c,d). So entsteht das doppellagige Membranmodul (e), das nun in den Rahmen gelegt und mit den Spannschrauben an den Rahmen geschlossen werden kann. Das Anziehen der Spannschrauben führt zum Vorspannen der Membran (f). Zwischen Rahmen und Spannbalken verbleibt ein Spalt, der eine spätere Nachspannbarkeit durch weiteres Anziehen des Spannbalkens ermöglicht. Er wird durch einen Membranrandstreifen abgedeckt. Nachfolgend wird schematisch der Ablauf der Rahmenbespannung dargestellt.

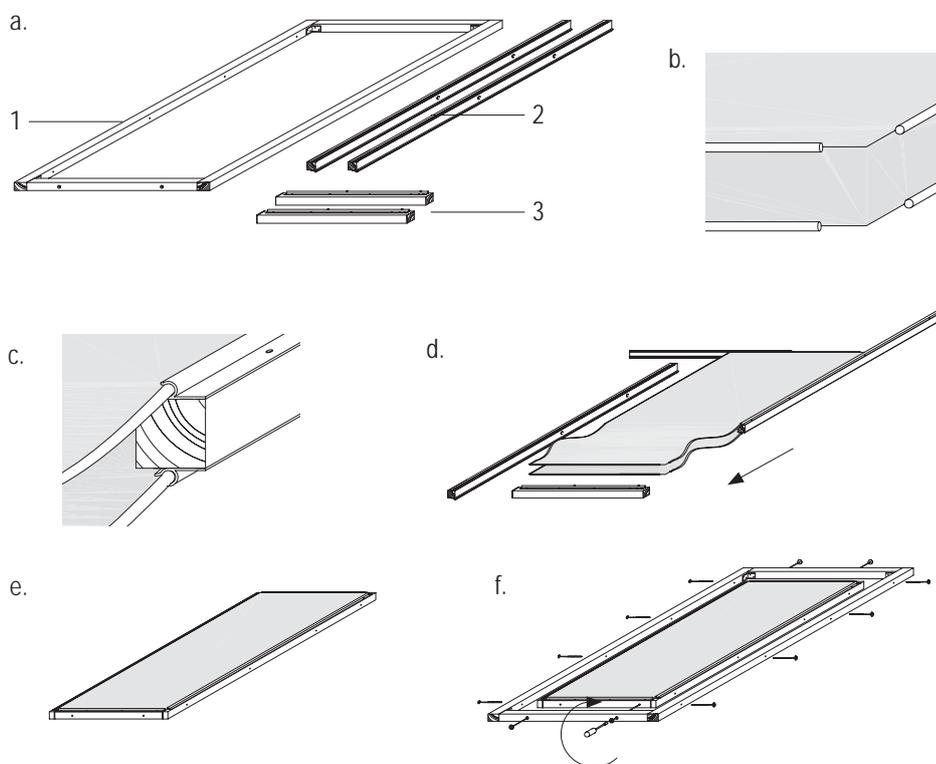


Abb. 135 a-f  
Die Elemente des zugbeanspruchten Rahmenmoduls.  
1 Rahmen  
2 seitl. Spannbalken  
3 untere Spannbalken

Einziehen der oberen und unteren Membran.

Das Modul wird durch Anziehen der Spannschrauben an den Rahmen gezogen.

#### Spannelemente

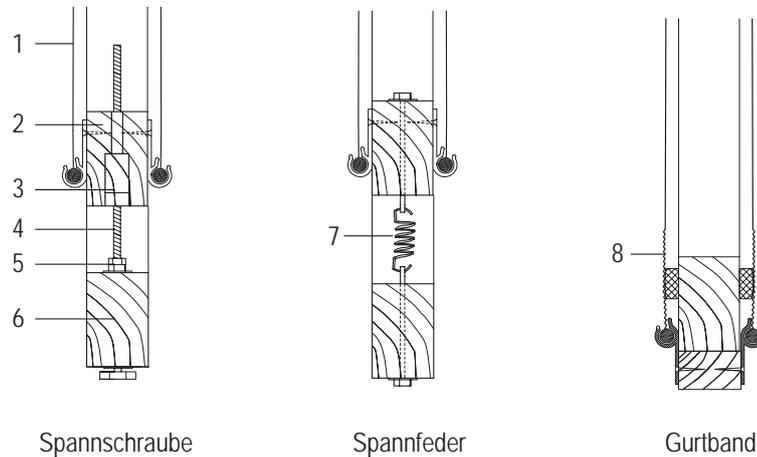
Die Vorspannung der Membranrahmenmodule kann durch Spannschrauben, Spannfedern oder einer Gurtbandkonstruktion erzielt werden.

Die Spannschraubenkonstruktion unterscheidet sich kaum von der bereits vorgestellten Druckschraubenkonstruktion. Anstelle einer Druckbelastung der Schraube wird hier aber durch das Heranziehen des Spannbalkens an den Rahmen die Spannschraube auf Zug belastet. Die Schraube ist dadurch nicht mehr knickgefährdet und kann schlanker dimensioniert werden. Ihr freies Drehen im Rahmen wird durch die lose Befestigung der Schrauben durch Kontermutter gewährleistet.

Alternativ kann die Vorspannung auch über Zugfedern in die Konstruktion eingeleitet werden. Dabei sind die Zugfedern über Schrauben, die durch Rahmen und Spannbalken gesteckt werden gehalten. Die Spannfederkonstruktion ist, wie bereits

für das druckbeanspruchte System beschrieben, problematisch. Die Spannfederkraft reduziert sich bei Membranrelaxation und müsste deshalb nachspannbar ausgeführt werden. Federkonstruktionen erfordern zudem weit mehr Spannweg zwischen Rahmen und Spannbalken. Ein komplettes Zusammenziehen von Rahmen und Balken, wie es bei Schraubkonstruktionen möglich ist, kann durch das konstruktive Auftragen der Feder nicht erreicht werden.

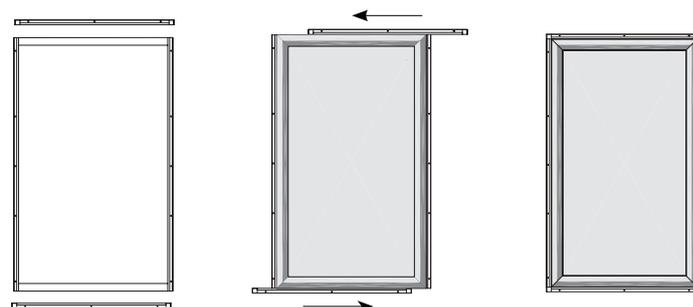
Abb. 136 a-c  
 1 Membran  
 2 Spannbalken  
 3 Gewinde  
 4 Spannschraube  
 5 Kontermuttern  
 6 Rahmen  
 7 Spannfeder  
 8 Gurtband



Die durch elastische Gurtbänder vorgespannte Rahmenkonstruktion ist eine Lösung die beim Einbau ein starkes Dehnen der Membran erfordert. Die Elastizität des Gurtbandes muss derart beschaffen sein, dass die Vorspannung durch das Gurtband nach möglicher Relaxation der Membran nicht komplett abgebaut wird. Dies erfordert, ebenso wie bei Federkonstruktionen, eine hohe anfängliche Vorspannkraft. Hohe Vorspannkraft erfordern unwirtschaftlich große Querschnitte von Rahmen, Balken und Unterkonstruktion, die nach Relaxation des Membranmaterials und der damit verbundenen Reduzierung der Vorspannkraft überdimensioniert wären. Optimierungen von Feder- und Gurtbandkonstruktionen könnten durch den Einsatz von vorgereckten Membranmaterialien entstehen, da die Relaxation des Materials geringer ausfällt. Diese Konstruktion werden jedoch nicht weiter vertieft, da die Vorteile von nachspannbaren Spannschrauben offensichtlich überwiegen.

Auch wenn pneumatische Konstruktionen nicht Teil dieser Arbeit sind soll eine vierte Vorspannungstechnik erwähnt werden, bei der über Pneumatik die Membran mechanisch vorgespannt wird. Ein Membranschlauch wird an den Kanten der beiden Membranflächen verschweißt. Die nach Außen gerichtete Schlauchseite wird mit einer Keder versehen. So kann der Schlauch in die Rahmengeometrie eingefügt werden. Nach Aufnahme des Schlauches in den seitlichen Kederschiene, können oberer und unterer Balken eingeschoben werden.

Abb. 137 a-c



Durch eine Erhöhung des Schlauchinnendrucks, nimmt der Schlauch seine aufgepumpte, runde Form an und spannt damit die innenliegenden Membranflächen vor. Durch Regulierung der Zuluft kann die Vorspannung eingestellt werden. Dieses System wurde erstmalig in [Vri06] vorgestellt und ausführlich beschrieben.

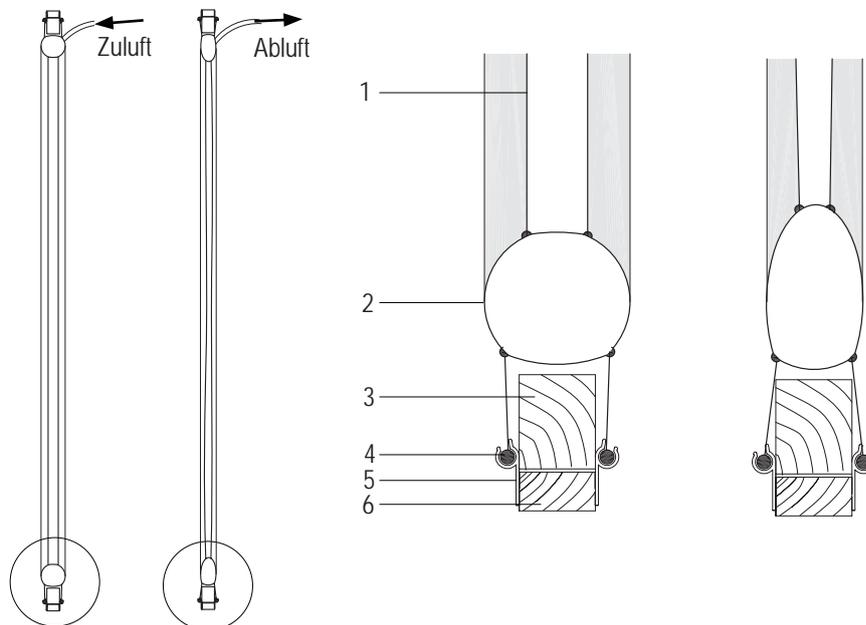


Abb. 138 a-d  
Ansicht M 1:30  
Details M 1:5

a, c - gespannter  
b, d - entlasteter Zustand

Membran 1  
Membranschlauch 2  
Holzrahmen 3  
Keder 4  
Kederschiene 5  
Spannbalken 6

Es stellt eine Sonderlösung zwischen pneumatischer und mechanischer Vorspannung dar und soll für einen kurzen Vergleich dieser beiden Vorspanntechniken dienen. Der große Vorteil der pneumatischen Konstruktionen liegt darin, dass es durch Luftdruck anstatt mit aufwändiger und konstruktiv auftragender Spannmechanik vorgespannt werden kann. So bestehen Module aus Rahmen und Klemmschiene, die auf bewegliche Konstruktionen, wie dem Spannbalken, verzichten können. Das Nachspannen kann zentral über die Regulierung der Lüftung erfolgen, die sogar spontan über Sensoren auf unterschiedliche Wind- und Schneelasten reagieren können.

Mechanisch vorgespannte Membranrahmenmodule müssen dagegen dezentral, direkt am Rahmen eingestellt werden, was deutlich höheren Aufwand erfordert. Vorteile der mechanischen Vorspannung liegen in ihrer Unabhängigkeit von elektrisch betriebenen Lüftungsanlagen, die bei pneumatischen Konstruktionen den notwendigen Innendruck kontinuierlich aufrechterhalten müssen. Darüber hinaus kann auf die Installation von Zu- und Abluftschläuchen verzichtet werden und der Anspruch einer sehr hohen Dichtigkeit, die den Innendruck der pneumatischen Kissen erst ermöglicht, entfällt.

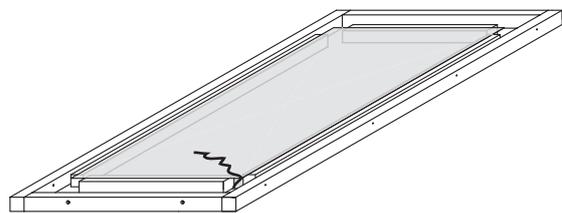
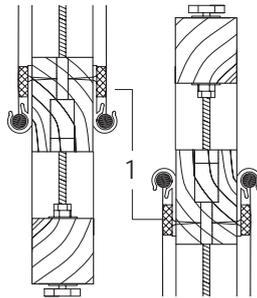
Der direkte Vergleich der beiden Vorspannsysteme liefert eine Erklärung für die anfänglich gestellte Frage, weshalb der pneumatisch, vorgespannte Membranbau in der letzten Zeit innovativen Einsatz erfuhr, mechanisch vorgespannte Membrane jedoch sehr selten Verwendung finden. Pneumatische Rahmenmodule können auf lokale Vorspannmechanik verzichten und dadurch schlanker und leichter ausfallen als mechanisch vorgespannte Rahmenmodule. Ihre zentrale Belüftung ermöglicht die reaktionsschnelle Steuerung der Kissen und kann für weitere Interaktion wie zum Beispiel Verschattung genutzt werden. Mechanische Vorspannsysteme scheinen dagegen unflexibler, schwerer und aufwändiger zu sein. Ein Ziel der Arbeit ist es, dies zu überprüfen.

### Abdichtung

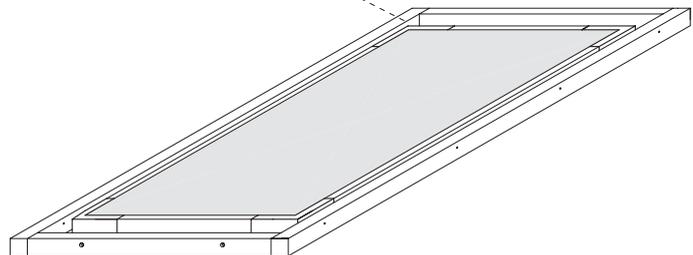
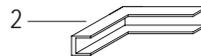
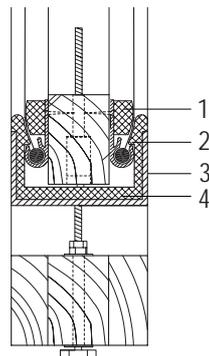
Die Abdichtung der Zugschrauben-Rahmensysteme wird entsprechend der Druckschraubensysteme durch ein Dichtungsband gelöst, das parallel zu den Kederschienen aufgeklebt werden kann. Im vorgespannten Zustand wird die Membran auf die Dichtung gepresst, sodass eine Luftdichtigkeit zwischen den zwei Membranlagen entsteht. Die Fugen in den Ecken der Module werden auch hier wieder mittels U-Profilwinkel geschlossen. Der Winkel wird auf den Rahmen, über die Kederschienen gesteckt und verbindet zwei Spannbalken über Eck miteinander. Durch das einfache Aufstecken der Winkel verbleibt eine Längsverschieblichkeit der Balken, die für ein weiteres Nachspannen gewährleistet sein muss. Die Abdichtung erhöht die Wärmedämmeigenschaften des Moduls und verhindert die Kondensatbildung auf den Membraninnenseiten.

Abb. 139 a-e

Abdichtung des  
Zugschrauben-  
Rahmensystems



- 1 EPDM- Dichtprofil  
am Spannbalken
- 2 Dichtungsnase zum  
Einklinken in das  
Modul
- 3 U-Stahlprofil
- 4 EPDM-Dichtung im  
U-Profil



Das Aufstecken des Winkels führt zu einer Verbreiterung des Rahmenmoduls. Der Winkel drückt von Außen gegen Membran und Dichtungsband und erhöht so den luftdichten Abschluss der Konstruktion.

### Anschluss an die Unterkonstruktion

Die Befestigung der Zugschrauben-Rahmensysteme an eine Unterkonstruktion ist wesentlich einfacher, als beim Druckschraubensystem. Grund hierfür ist, dass der erforderliche Spannweg der Membran innerhalb der äußeren Rahmengenometrie vorgehalten wird. So verändern sich die Außenmaße dieser Rahmenkonstruktion beim Nachspannen des Moduls nicht. Bei ihrer Montage brauchen also keine Geometrieänderungen berücksichtigt werden, das Rahmenmodul kann einfach über seinen festen Außenrahmen an die Unterkonstruktion verschraubt werden.

Die einfachste Verbindungstechnik des Holzrahmens an Wand oder Dach geschieht über vereinzelt Aufständigung des Rahmens durch Holzblöcke. Sie lassen ein Verschrauben des Rahmens unmittelbar in Wand, bzw. Dach zu und ermöglichen eine Luftzirkulation in der Zwischenzone. Die Abbildung auf der nächsten Seite stellt diese Konstruktionslösung dar.

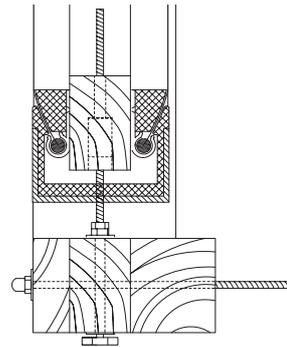
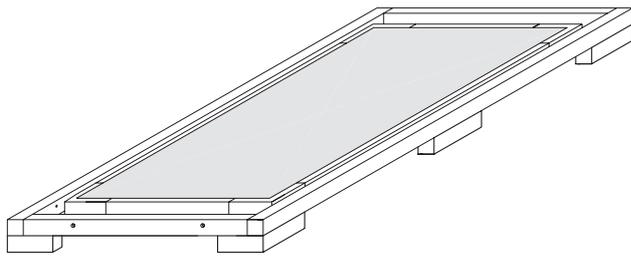
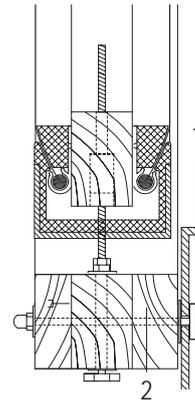
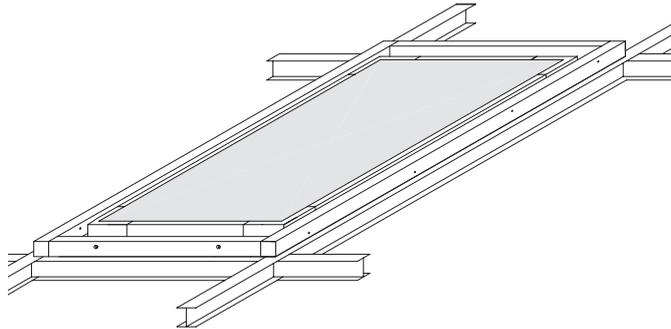


Abb. 140 a-d  
Zugschrauben-Rah-  
mensysteme können  
einfach über ihren  
äußeren Rahmen an  
eine Unterkonstruktion  
geschraubt werden.



Unterkonstruktion 1  
Verbindungsschraube 2

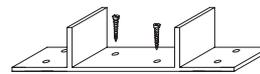
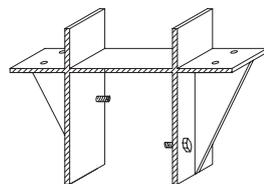
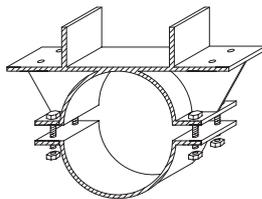


Abb. 140 e-g  
Verbindungselemente

Abhängig von Art, Material und Gestaltung der Unterkonstruktion muss das Verbindungselement gestaltet sein. Für die Anbindung an Stahlrohrquerschnitte eines Fachwerkträgers, wie im Beispiel der Industriehalle gezeigt (vgl. S.114), können zum Beispiel Klemmringe zum Einsatz kommen. Aber auch einfache Winkel können die Verbindung herstellen. Die unveränderliche äußere Rahmengestaltung der Zugschrauben-Rahmensysteme ermöglicht also eine weit einfachere Anbindung der Module an ihre Unterkonstruktion. Die festen Außenmaße werden auch die weiteren Detaillierungen stark vereinfachen.

### Entwässerung

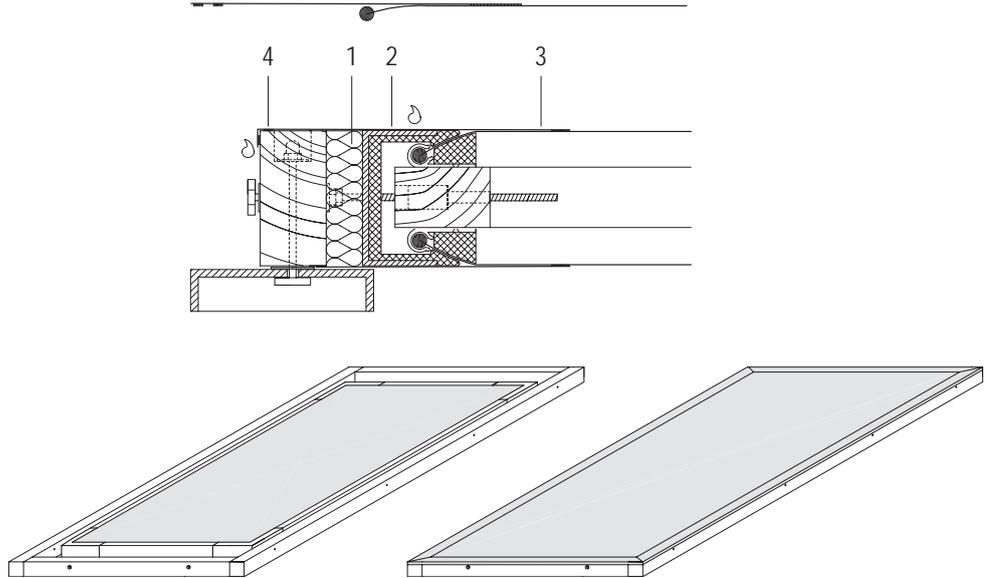
Für die Entwässerung der Rahmenmodule verbindet ein Randstreifen Membran und Rahmen. Über den Membranrandstreifen kann das Wasser ablaufen. Gleichzeitig dient der Randstreifen als Blende. Er verdeckt den Spalt zwischen Rahmen und Spannbalken, der für die Nachspannbarkeit der Membran konstruktiv vorgehalten werden muss. Der Streifen ist mit der Membran verschweißt. Er wird um die Rahmenkante geschlagen und hier mit einem Klettverschluss befestigt. Das Wasser kann ablaufen, der Konstruktionsspalt wird überdeckt. Zur Optimierung der Wärmedämmeigenschaften des Rahmenmoduls kann der Spalt zwischen Spannbalken und Rahmen mit isolierendem Material gefüllt werden. Das Herausfallen des weichen und komprimierbaren Dämmstoffs wird durch den unteren Randstreifen verhindert.

Abb 141 a  
aufgeschweißter Membranrandstreifen.

Abb. 141 b

- 1 Dämmmaterial
- 2 Membranstreifen
- 3 Schweißnaht
- 4 Klettverbindung

Abb 141 c,d  
Das Membranmodul  
seitlich mit einem  
Membranrandstreifen  
abgedeckt.

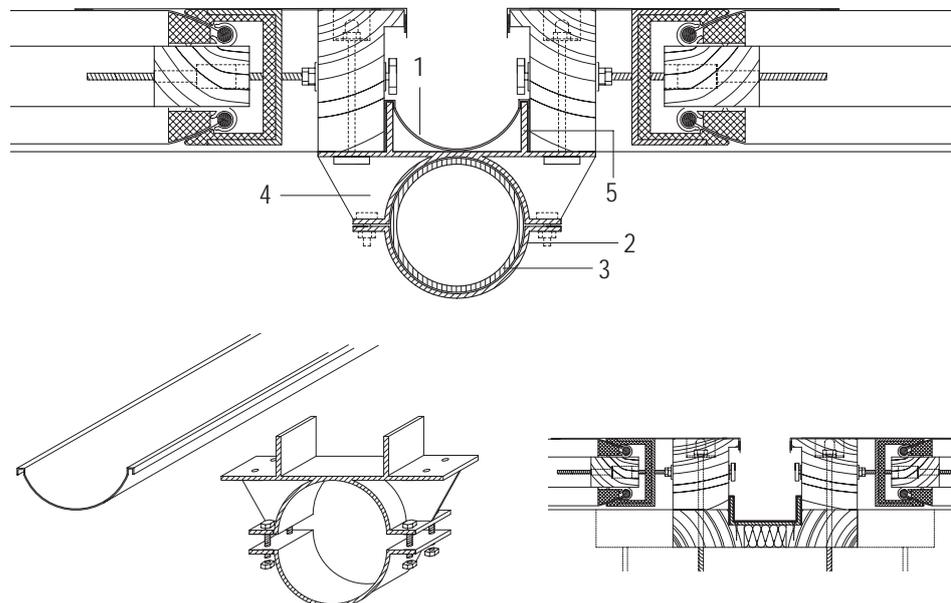


Das Abfließen des Wassers über die Membranfläche wird durch die notwendige Krümmung der Membran erreicht. Sattel-, buckel- oder bogenförmig bespannte Rahmenmodule werden so stark ausgelenkt sein, dass Regenwasser auf ihrer Oberfläche abfließt. Eine ausreichende Neigung der angeschlossenen Rinnen sorgt dann für den weiteren Abfluss. Hierfür sind gegebenenfalls Neigungen im Dach oder der Unterkonstruktion notwendig.

Durch die unveränderliche Außengeometrie der Zugschrauben-Rahmenmodule, kann eine Rinne problemlos zwischen zwei Rahmenmodule eingebaut werden. Kommen Verbindungswinkel zur Befestigung der Rahmen an die Unterkonstruktion zum Einsatz, kann die Regenrinne in diesen Winkel geklemmt werden. Wird das Membranmodul durch einfache Aufständigung an Wand oder Dach geschraubt, ist eine Winkelschiene zwischen den Rahmenprofilen anzuordnen (Abb 142d). Zur Abdichtung ist die Rinne mit thermoplastischem Polyolefin auszukleiden.

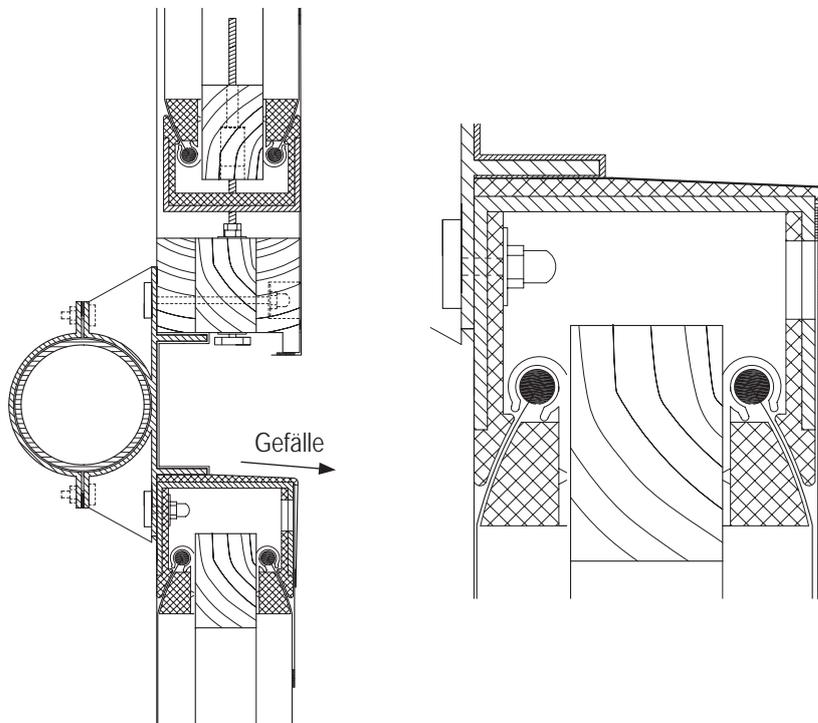
Abb. 142 a-d

- 1 Regenrinne
- 2 Verbindungselement  
Schelle
- 3 Unterkonstruktion
- 4 Aussteifungswinkel
- 5 Aufkantungswinkel



Werden die Membranmodule vertikal als Fassadenelement benutzt, muss für optimale Entwässerung die obere Rahmenkante modifiziert werden. Herabtropfendes Wasser fällt in der Modulfuge auf den umgeschlagenen Membranrandstreifen, der mit einem Gefälle nach außen, das Wasser ableitet.

Abb. 143 a,b  
Regenrinnenanschluss  
bei aufgeständerten  
Modulen M 1:10

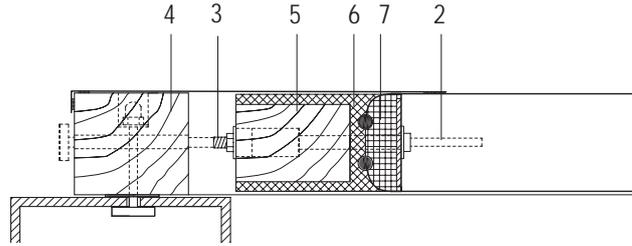


### Membrananschluss

Alternativ zur Verwendung von Kederschienen kann die Membran auch über Klemmschienen an den Spannbalken angeschlossen werden. Klemmschienen bieten den Vorteil einer wasser- und luftdichten Verbindungsmöglichkeit, die vor allem bei pneumatischen Konstruktionen Anwendung findet, um die Luftdichtigkeit der Kissenkonstruktion im Randauflagerbereich herzustellen. Ausführliche Anschlussdetails, auch für gekrümmte Geometrien, werden am Beispiel der Allianz Arena in [Mor05] aufgezeigt.

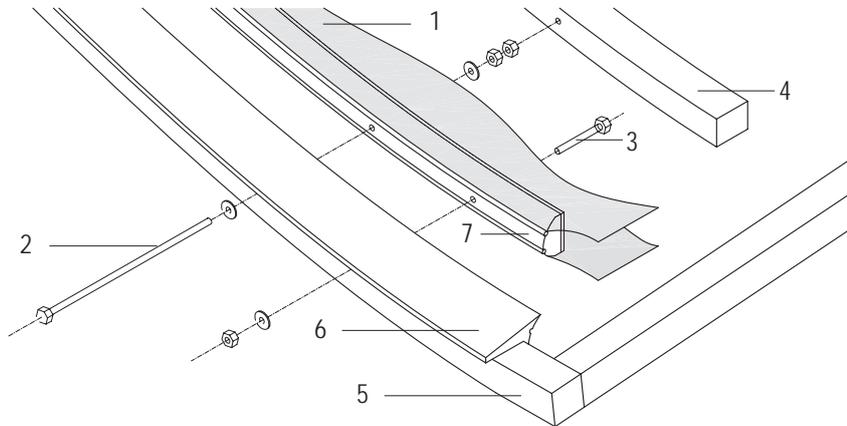
Auch bei Klemmprofilen wird die Dichtigkeit mittels EPDM Kunststoffdichtungsprofile erzielt. Sie nehmen die Keder der Membran auf und klemmen sie durch das Aufschrauben des Gegenstücks ein. Das Wasser fließt über die Membran auf die Abdichtung und kann an der Kante in die Regenrinne abtropfen. Membranmodule mit Klemmschienen benötigen, genauso wie Konstruktionen mit Kederschiene, abdichtende U-Profil Eckwinkel. Der Nachteil von Klemmschienen ist allerdings, dass die Klemmung für ein Nachspannen der Membranmodule gelöst werden müssen, um ein Verschieben der Keder zu ermöglichen. Die auf der nächsten Seite abgebildete Konstruktionszeichnung könnte also als Keder-Klemmschiene bezeichnet werden, weil sie sowohl als Klemme die Membran einspannt, im entlasteten Zustand aber auch als Kederschiene funktioniert. Ihr Vorteil liegt in der Schlankheit der Konstruktion, die dadurch resultiert, dass die „Kederschiene“ innerhalb der Profilhöhe aufgenommen wird und nicht zusätzlich aufragt.

Abb. 144  
Keder- Klemmschiene  
M 1:5



Die Fügung der einzelnen Bauteile ist nachfolgend illustriert. Abweichend zu den Konstruktionen mit Kederschiene finden hier neben den Spannschrauben noch Klemmschrauben Anwendung, die das Anpressen des Profils und damit das Halten der Membran in der Kederschiene ermöglichen. Vor dem Nachspannen der Membran müssen sie gelöst werden, um die Verschieblichkeit der Membran in der Schiene zu ermöglichen.

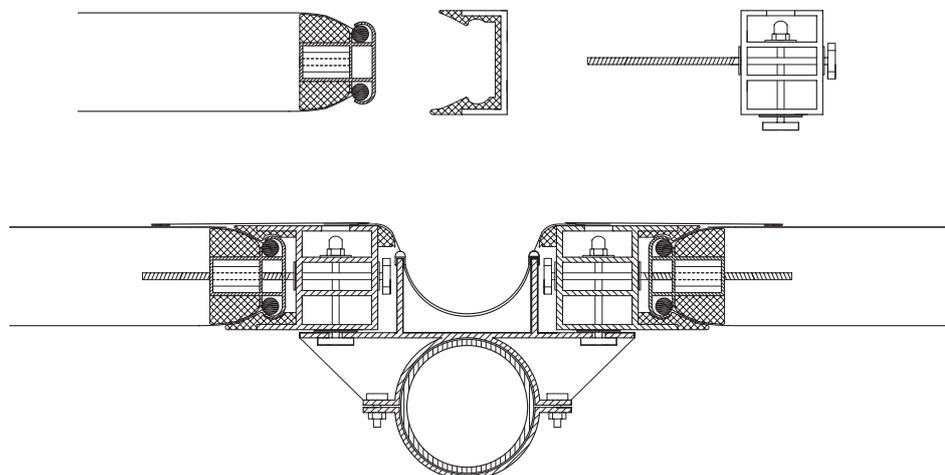
Abb. 145  
Membran 1  
Spannschraube 2  
Klemmschraube 3  
Spannbalken 4  
Rahmen 5  
EPDM Klemmprofil 6  
Klemmprofil Gegenstück 7



### Material

Anstelle einer Holz Ausführung, kann die Konstruktion auch in Aluminium, oder Stahl ausgeführt werden. Die Kederschiene kann bei dieser Ausführung in den Querschnitt des Spannbalkenprofils integriert werden. Durch die höhere Festigkeit des Materials und der Integration der Kederschiene in das Tragprofil entstehen bei Stahl und Aluminiumausführungen schlankere Konstruktionen. Genaue Angaben zur Dimensionierung der Rahmenquerschnitte finden sich in Kapitel 3.3.

Abb. 146 a-d  
Aluminiumprofil  
M 1:5  
1 Rahmen  
2 Spannbalken mit  
Kederschiene  
3 U-Profilsschiene  
4 Verbindungselement  
5 Unterkonstruktion  
Rohrprofil



### 3.2.4. Zugschrauben- Balkenmodule

Das Zugschrauben-Balkenmodul besteht aus vier Spannbalken, Spannschrauben und zwei Membranflächen. Einen Rahmen gibt es bei diesem System nicht. Die Vorspannkraften werden an benachbarte Module oder eine Unterkonstruktion weiter- und abgeleitet. Die Aneinanderreihung von Modulen mit gegenseitigem Verspannen führt zu einem Kurzschließen der horizontalen Vorspannkraften, lediglich an den Rändern muss eine Konstruktion die Vorspannkraft des letzten Moduls aufnehmen. Abweichend von den Spannschrauben der ersten zwei Systeme, muss die Spannschraube für zugbeanspruchte Balkenmodule eine mittig liegende, fest verschweißte Mutter aufweisen, über die die Schraube zu drehen ist (Abb. 147a). Unweit von der Mutter befindet sich zudem, als Abstandhalter eine fest aufgeschweißte Scheibe. Die Schraube wird nun durch den Spannbalken gesteckt, mit einer Unterlegscheibe getrennt und durch zwei gekonterte Muttern gegen Herausziehen gesichert. Ein freies Drehen im Spannbalken bleibt dabei möglich (b). Die Membranflächen werden nun auf die Spannbalken gezogen (c), um ein doppelt bespanntes Membranmodul herzustellen (d). Eine Längs- und eine Querseite des Moduls wird an eine Führungsschiene der Unterkonstruktion zur Lagesicherung geschraubt (e). Die Spannschrauben an den noch unbefestigten Seiten werden in die Gewinde der benachbarten Module geschraubt, um anschließend festgezogen zu werden und so das eingesetzte Membranmodul vorzuspannen (f).

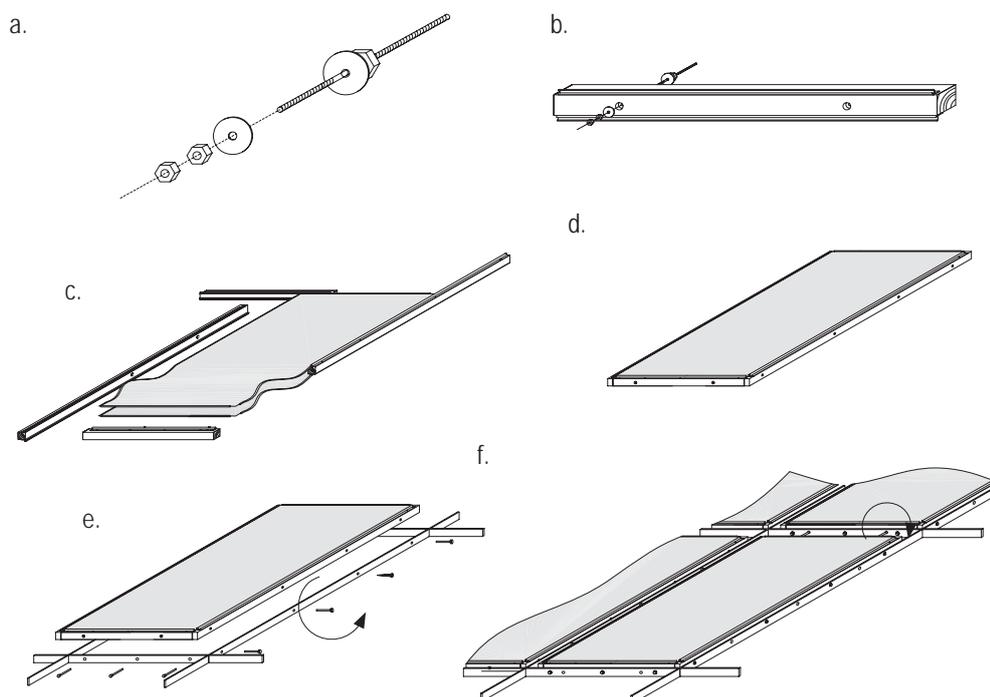


Abb. 147 a-f  
Spannschraube mit  
mittiger Mutter und  
Unterlegscheibe

Mit der Membran  
bespannt  
werden sie durch  
Führungsschienen  
lagegesichert.

Die Vorspannkraft  
wird nach Außen  
an benachbarte  
Module oder eine  
Unterkonstruktion  
abgeleitet.

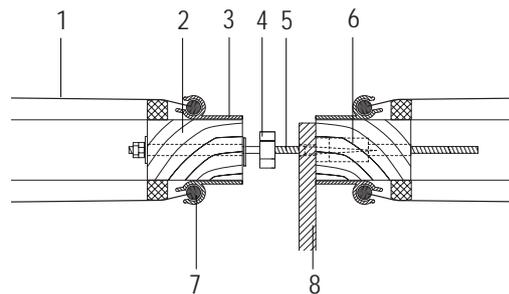
### Spannelemente

Die Funktionsweise der zugbeanspruchten Balkenmodule ist der der zugbeanspruchten Rahmensysteme sehr ähnlich. Konstruktiv unterscheiden sich die beiden Systeme dadurch, dass das Rahmensystem ein in sich geschlossenes System ist und jedes Rahmenmodul für sich aufgebaut und vorgespannt werden kann, die Balkensysteme hingegen nur im Verbund mit benachbarten Modulen, bzw.

einer den Rahmen ersetzenden Unterkonstruktion funktioniert. Der große Vorteil des geschlossenen Rahmensystems liegt in ihrer möglichen Vorfertigung im Werk. Das hier vorgestellte Spannbalkensystem hingegen kann erst auf der Baustelle zusammengebaut werden. Dafür ist es ohne Rahmensystem, das leichteste Modul.

Der Unterschied im Detail liegt in der Erreichbarkeit der Spannschraube. Spannschlüssel setzen nicht außen am Schraubenkopf an, sondern drehen eine mittig aufgeschweißte Mutter, zwischen zwei verbundenen Modulen. Ein Zudrehen der Schraube in das Gewinde hinein bewirkt, dass über den äußeren Schraubenkopf samt Unterlegscheibe die Kraft auf den Spannbalken gebracht wird und ihn in Richtung Nachbarmodul drückt.

- Abb. 148
- 1 Membran
  - 2 Spannbalken
  - 3 Kederschiene
  - 4 Mutter, fest
  - 5 Spannschraube
  - 6 Gewinde
  - 7 Keder
  - 8 Unterkonstruktion

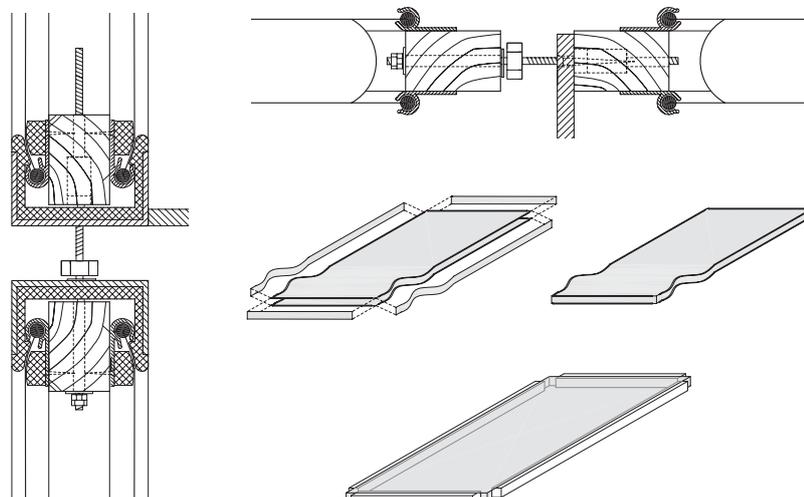


#### Abdichtung

Die Abdichtung der Balkenmodule wird über die Abdichtungsbänder, die parallel zu den Kederschiene geführt werden, realisiert. Die Ecken werden mit U-Profilwinkeln abgedichtet. Dabei darf das freie Drehen der Spannschraube, die zwei benachbarte Module miteinander verbindet nicht behindert werden. Seitliche Löcher an der Stelle der Spannschrauben sind vorzusehen.

Alternativ kann beim Spannbalkensystem Dichtigkeit auch durch Verwendung eines Kissens erzielt werden. Anstatt die beiden Membrane als unverbundene Einzelflächen in die Kederschiene einzuziehen, werden die Flächen zu einem Kissen verschweißt. Die zusätzlichen Seitenflächen verbinden am Rand obere und untere Membran und dichten so das Innenvolumen des Kissens ab. Die mechanische Spannbarkeit der Membran bleibt dabei unberührt und ist auch beim Kissenverbund möglich. Zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften des Moduls kann zusätzlich zwischen Spannbalken und Kissen Wärmedämmung eingelegt werden.

Abb. 149a-e  
Eckabdichtung mit  
Dichtungswinkeln  
M 1:5



### Anschluss an die Unterkonstruktion

Auch beim Zugschrauben Balkensystem führt ein Nachspannen der Module zu einer Änderung der Außenmaße. Insofern gestaltet sich die Anwendung dieses System genauso problematisch wie das der Druckschrauben-Rahmensysteme.

Eine mögliche Anbindung der Spannbalken an eine Unterkonstruktion kann über die bereits vorgestellten, verschieblichen U-Profileschienen realisiert werden.

### Entwässerung

Entwässerungsrinnen können beim Zugschrauben-Balkensystem nur in Form von flexiblen Membranrinnen ausgeführt werden. Nur ein biegeweiches Material lässt ein stufenloses Nachspannen der Membranmodule zu und kann die damit verbundenen Längenänderungen kompensieren. In Abb.133 ist diese Rinne für das Druckschrauben Rahmenmodul bereits dargestellt worden. Für einen störungsfreien Ablauf des Wassers über die Modulkante hinweg sorgt der Membranrandstreifen, der über das U-Profil geschlagen wird.

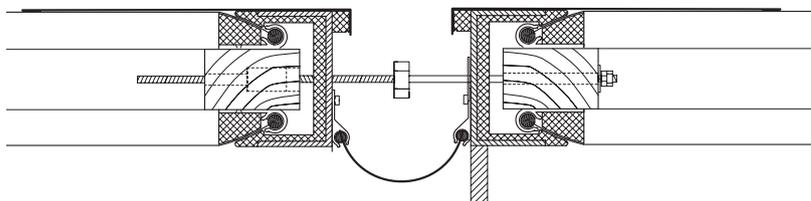


Abb.150  
Entwässerung

### Anschluss an die Unterkonstruktion

Die Unterkonstruktion für die Zugschrauben Balkensysteme dient zur Aufnahme der vertikalen Lasten, sowie als Halterung für die Montage. Die horizontalen Kräfte durch Vorspannung werden über die Nachbarmodule kurzgeschlossen. Nur am Gebäuderand muss Horizontalkraft aus den Randmodulen in die Unterkonstruktion eingeleitet werden. Es empfiehlt sich in den Randbereichen auf Anschlüsse mittels U-Schiene zurückzugreifen, da sie eine lineare Kraftübertragung der Module in die Konstruktion ermöglichen. Die Schienen können dabei fest mit der Unterkonstruktion verschraubt werden, sie brauchen nicht verschieblich ausgeführt zu werden.

### Membrananschluss

Wie in den anderen, bereits vorgestellten Systemen sind Kederschienen das anwendungsfreundlichste und kostengünstigste Verbindungsmittel von Membran und Spannbalken. Auch die Keder-Klemmschienen kann in diesem System eingesetzt werden. Nachteilig ist, wie bereits erwähnt, dass ein Nachspannen der Module nur nach vorherigem Lösen der Klemmschrauben möglich ist. Die linke Abbildung 151a zeigt die Klemmschrauben vor der Spannschraube, in der Abbildung 151b sind die Klemmschrauben durch die Spannschraube verdeckt.

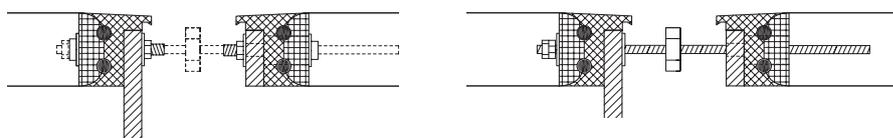


Abb. 151 a,b

### Material

Neben Ausführungen in Holz ist die Spannbalkenkonstruktion auch in Stahl und Aluminium ausführbar. Es sei auf die Abbildung 146 auf Seite 147 verwiesen.

### 3.2.5. Konstruktionen zur Auslenkung der Membran

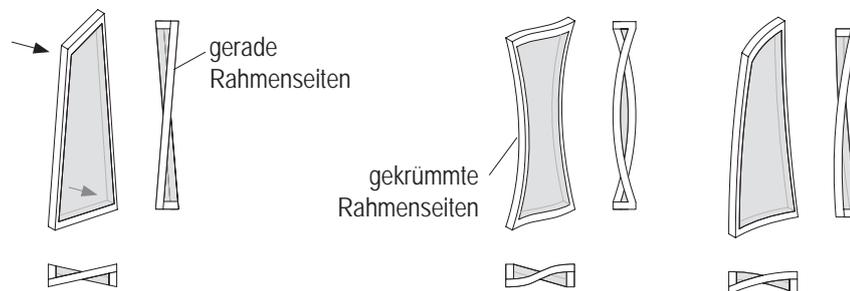
Die Rahmenmodule wurden in den vorherigen Kapiteln vereinfacht als eben gespannten Membran dargestellt. Anwendungen von eben gespannten Membrane sind jedoch nur eingeschränkt möglich. Gerade im Außenbereich können Windlasten zu starken und akustisch lauten Flatterscheinungen der Membran führen, die das Material schwächen und zerstören. Eben gespannte Rahmenmodule werden in dieser Arbeit nicht untersucht. Gegenstand der Untersuchung sind mechanisch vorgespannte, gekrümmte Membranmodule. Die vorgestellten Rahmenkonstruktionen müssen also noch modifiziert bzw. ergänzt werden, damit die Membran gekrümmt in den Rahmen eingezogen werden kann.

Die möglichen Membranformen wurden bereits in Kapitel 1.2.2. vorgestellt. Sattelform, Buckelform und Bogenform erwiesen sich dabei für eine modulare Anwendung als geeignet (Kapitel 3.1, S.95).

#### Sattelform

Die Membrankrümmung der Sattelfläche resultiert aus der Auslenkung der Randgeometrie, also dem Rahmen. Die Rahmenmodule für Sattelflächen können daher nicht eben hergestellt werden, sondern müssen wenigstens eine Auslenkung von zwei Rahmenecken aufweisen. Werden die Rahmenseiten dabei gerade ausgeführt resultiert eine Membranfläche in Hyparform, die einfachste Konstruktion der sattelförmig bespannten Rahmenmodule. Aufwändiger werden Konstruktionen, wenn Rahmenriegel und -stiel bogenförmig gekrümmt ausgeführt werden.

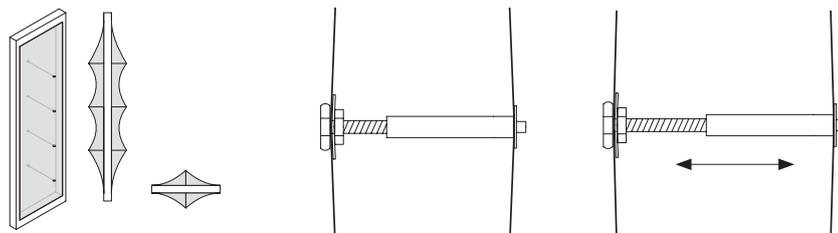
Abb. 152 a-c



#### Buckelform

Bei Buckelformen erfolgt die Membrankrümmung durch Spreizen, die das Material in Flächenmitte auslenkt. Vorteilhaft für die Rahmenkonstruktion ist dabei, dass der Rahmen in der Ebene verbleibt, also einfach hergestellt werden kann. Aufwändiger ist die Herstellung und der Einbau der Spreize.

Abb. 153 a-c



Zu unterscheiden sind nachspannbare, also in ihrer Länge verstellbare Spreizen und feste, unverstellbare Spreizen. Die Konstruktion und Mechanik der oben abgebildeten verstellbaren Spreize wurde bereits im Zusammenhang mit der Entwurfsbeschreibung der Industriehalle vorgestellt (S.122). Durch ihre Verstellbarkeit ist der Einbau

dieser Art Spreize einfach. Im eingedrehten Zustand ist die Spreize klein und kann problemlos mit den Membranflächen in die Rahmenkonstruktion eingezogen werden. Nach erstem seitlichen Vorspannen der Membran kann die Spreize von Außen aufgedreht und damit verlängert werden, um über ein zweites seitliches Spannen der Membran den endgültigen Vorspannungsgrad zu erreichen. Die verstellbare Spreize erfordert jedoch das Ausstanzen eines Lochs im Membranmaterial zum Durchführen der Schraube. Diese lokale Materialschwächung ist problematisch und muss über eine breite Auflagerfläche der Membran unterhalb des Schraubenkopfes kompensiert werden.

Feste, unverschiebliche Spreizen haben den Vorteil, dass für sie die Membran nicht ausgestanzt werden muss, da keine Zugänglichkeit von Außen erforderlich ist. Die feste unverschiebliche Spreize besteht aus einem Stiel der an beiden Enden tellerförmige Scheiben aufweist, über den eine flächige Auslenkung der Membran stattfinden kann. Die Auflagerscheiben werden in einer kreisförmigen Membrantasche gehalten, die auf der Membranninnenseite fest verschweißt wird.

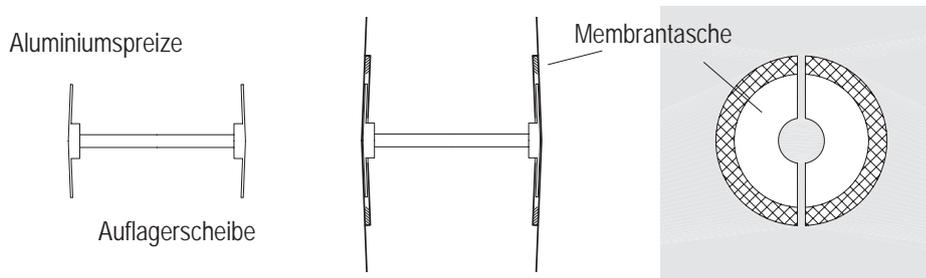


Abb. 154 a-c

### Bogenform

Bei dieser Art der Membrankrümmung wird die Membranfläche durch einen Bogen aus der Ebene ausgelenkt. Der Rahmen verbleibt, wie bei der Buckelfläche eben und ist leicht herzustellen. Der Bogen ist ein Stahlrundrohr und wird auf den Rahmenseiten aufgesteckt und mittels Stift gesichert. Der Bogen wird in Membrantaschen geführt und bildet so eine kraftschlüssige Verbindung mit der Membranfläche.

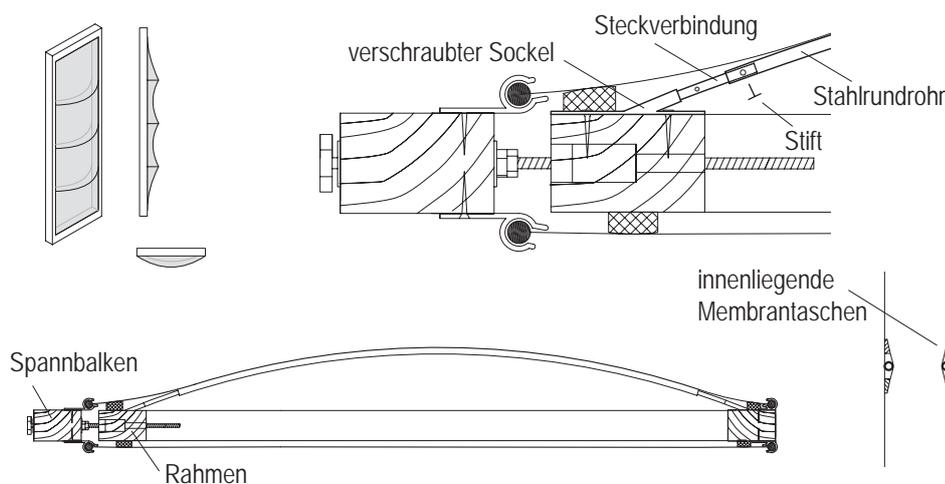
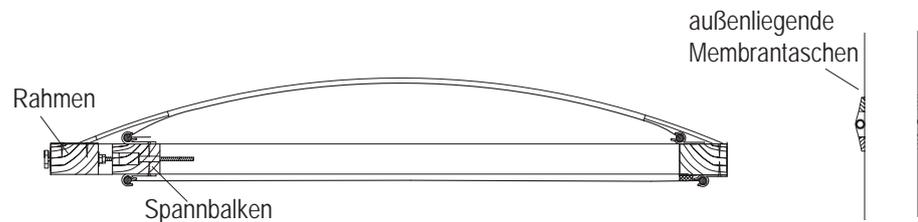


Abb. 155 a-c

Der Bogen wird auf dem festen, unverschieblichen Rahmen befestigt. Eine Befestigung auf dem Spannbalken ist problematisch, da der Bogen die Verschiebung des Spannbalkens behindern würde und zum anderen der Bogen durch ein Auseinanderziehen auf Biegung beansprucht werden würde. Bei der Verwendung von Druckschrauben-Rahmenmodulen, wie oben abgebildet, ist ein Einfügen des

Bogens unterhalb der Membran möglich. Die Membran überspannt den Bogen und kann durch den außen liegenden Spannbalken nachgespannt werden. Diese Überspannung ist bei Zugschrauben-Rahmensystemen nicht möglich, da der Spannbalken bei diesem System innerhalb der Rahmenkonstruktion angeordnet ist. Der Bogen, der auf dem unbeweglichen Rahmen befestigt werden muss, verläuft also oberhalb der Membran. Die Bogenkonstruktion auf einem Zugschrauben-Rahmensystem kann also nur Außen, also vor der Membran platziert sein.

Abb. 156 a-c



### 3.2.6. Vergleich der Vorspannsysteme

Die Wahl der Vorspannsysteme hängt entscheidend davon ab, in welcher Form die Membran vorgespannt und in den Rahmen gezogen wird. Wie gezeigt, eignet sich das Druckschrauben-Rahmensystem vor allem für bogenförmige Membranbespannungen. Zugschrauben-Rahmensysteme stellen das geeignete Vorspannsystem für Sattel- und Buckelformen dar. Beide Systeme zeichnen sich durch ihren Rahmen aus, der die Horizontalkräfte innerhalb der Konstruktion kurzschließt, sodass von einem geschlossenen System gesprochen werden kann. Vorteil der geschlossenen Systeme ist, dass sie komplett vormontiert und vorgespannt im Werk produzierbar sind und fertig auf die Baustelle geliefert werden können. Dagegen ist das Zugschrauben-Balkensystem ein offenes System, das nur vor Ort einbaubar ist. Eine bogenförmige Membranbespannung ist mit diesem System unvereinbar. Auch die Verwendung von Buckelformen scheint problematisch. Dieses System stellt vor allem für Sattelformen eine Konstruktionsvariante dar, die den Vorteil der Gewichtsminimierung bietet. Da auf einen Rahmen verzichtet wird, besteht die Konstruktion lediglich aus den seitlichen Spannbalken. Das Eigengewicht der Zugschrauben-Balkensystemen kann so um ein Drittel reduziert werden.

Im Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Anwendungsfreundlichkeit und Einbau bietet das Zugschrauben-Rahmenmodul deutliche Vorteile gegenüber den anderen beiden Systemen. Durch seinen innenliegenden Spannbalken ist das Zugschrauben-Rahmenmodul in der Lage eine Nachspannbarkeit der Membran zu ermöglichen, ohne dabei, wie es bei den anderen beiden Systemen der Fall ist, die äußeren Rahmenmaße zu verändern. Diese unveränderliche Außengeometrie ist der Grund, weshalb dieses Modul mit geringerem konstruktivem Aufwand eingebaut, genutzt und gewartet werden kann. Der Anschluss des Moduls an eine Unterkonstruktion vereinfacht sich, die Anbindung der Module an ein Rinnensystem zur Entwässerung der Flächen gestaltet sich einfacher, das Zugschrauben-Rahmensystem ist damit wesentlich wirtschaftlicher als die beiden anderen Systeme.

Ein zusammenfassender Vergleich der unterschiedlichen Funktionen der drei Vorspannsysteme wird auf der nächsten Seite in Tabelle 3.4. dargestellt.

## Tabellarischer Vergleich der Vorspannsystem

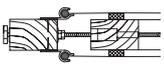
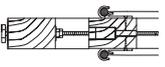
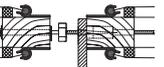
Bewertungs- aspekt	Vorspannsystem			
		Druckschrauben- Rahmenmodule	Zugschrauben- Rahmenmodule	Zugschrauben- Balken- module
Eignung für sattelförmige Bespannung		0	+	+
Eignung für buckelförmige Bespannung		0	+	0
Eignung für bogenförmige Bespannung		+	0	-
Abdichtung der Doppelmembran		+	+	+
Anschluß an die Unterkonstruktion		-	+	-
Entwässerung des Membranmoduls		+	0	+
Anschluss der Regenrinne		-	+	-
Anzahl der Konstruktionselemente		0	0	+
Gewicht der Konstruktion		-	0	+
Kosten für Herstellung und Montage		-	+	-
Visueller Eindruck, Gestaltung		0	+	+
Wartung, Nachspannbarkeit		0	+	-
Montage des Rahmenmoduls		+	+	-

Tabelle 3.4.  
Vergleich der  
Vorspannsysteme

+ gut, geeignet  
0 neutral, möglich  
- schlecht, ungeeignet

Die Vorzüge der Zugschrauben-Rahmensysteme sind leicht ablesbar.

Ihr neutrale Wertung beim Aspekt der Entwässerung beruht darauf, dass der Membranrandstreifen breiter ausfallen muss als bei den anderen beiden Systemen, da mit dem Streifen zum einen der Spalt, zum anderen der Rahmen abzudecken ist. Die Membranbespannung der beiden anderen Systeme kann weiter nach Außen geführt werden, der Membranrandstreifen kann schmaler ausfallen, dies begünstigt die Entwässerung. Darüber hinaus ist das Zugschrauben-Rahmensystem bei der Anzahl der Konstruktionselemente und dem Eigengewicht dem Balkensystem unterlegen. Sein fester Rahmen verursacht das größere Gewicht, wodurch jedoch Vorteile in Wartung, Montage und Nachspannbarkeit resultieren.

Die Zugschrauben Rahmenmodule erweisen sich durch ihre unveränderliche Rahmengeometrie als wirtschaftlichste und anwendungsfreundlichste der drei vorgestellten Vorspannsysteme. Aus diesem Grund beschränken sich die folgende konstruktive Optimierung sowie die sich anschließenden Untersuchungen zum Tragverhalten auf dieses Vorspannsystem.

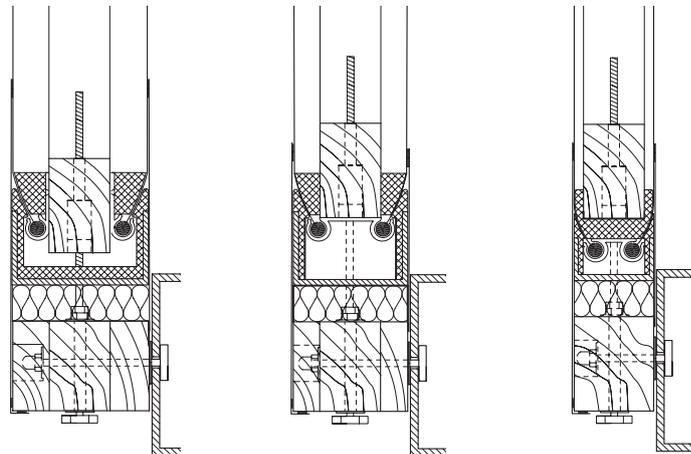
### 3.2.7. Optimierung und Weiterentwicklung der Zugschrauben-Rahmenmodule

Eine konstruktive Optimierung des Zugschrauben Rahmensystems kann durch ein kompakteres Anordnen der Einzelelemente erreicht werden. Die nachstehenden Abbildungen 157a-c zeigen die Verschlankeung des Rahmensystems ausgehend von dem bereits vorgestellten Rahmenquerschnitt, bis hin zu einer Lösung die mit halber Konstruktionshöhe eine optimierte Lösung darstellt.

In der Ausgangsversion des Profils werden die Kederschiene seitlich über Holzschrauben an den Spannbalken geschraubt. Die Membranvorspannung wurde hier über Scherkräfte in den Spannbalken geleitet. Durch den Zusammenschluss der beiden Kederschiene zu einer Schiene ergibt sich die Möglichkeit den Steg der Schiene über die Rückseite des Spannbalkens zu legen und hier mit Holzschrauben zu sichern. Vorspannkräfte werden nun durch Druckkraft gegen die Schiene übertragen. Bei der vollflächigen Auflage der Schiene gewährleistet dies eine optimale Kraftübertragung. Zudem resultiert eine Verschmälerung der Profillbreite um fast ein Drittel gegenüber der Ausgangsversion.

Eine weitere Verschlankeung wird im zweiten Optimierungsschritt erzielt, indem das Auftragen der Kederschiene durch ein Verschieben der Kederschiene hinter das Spannbalkenprofil reduziert wird. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die freie Drehbarkeit der Spannschraube zwischen den Halbrohrprofilen der Kederschiene gewährleistet bleibt. Die Abdichtung der Membran kann hinter den Spannbalken angeordnet werden, womit die Seiten der Spannbalken von aufragender Konstruktion entlastet werden. Die Membran wird bei dieser Anordnung der Elemente gegen die Abdichtung gedrückt. Dies erhöht ihre abdichtende Wirkung und sichert ihre Befestigung am Spannbalken.

Abb. 157 a-c



#### Zweiseitig vorspannbare Rahmenmodule

Die Nachspannbarkeit der Module ist eine Wartungsarbeit, die im Laufe der Zeit anfällt. Sie muss vor Ort und dezentral an jedem einzelnen Modul durchgeführt werden. Wird die Anzahl der Spannschrauben an jedem Modul reduziert, verringert sich der Aufwand des Nachspannens. Die naheliegende Maßnahme, um die Anzahl der Spannschrauben zu reduzieren ist, auf eine beidseitige Spannschraubenanordnung

pro Modul zu verzichten. So kann ein Rahmenmodul anstelle einer vierseitigen Anordnung der Spannschrauben auch durch eine zweiseitige Anordnung vorgespannt werden. Die notwendige zweiachsige Vorspannbarkeit bleibt dabei gewahrt.

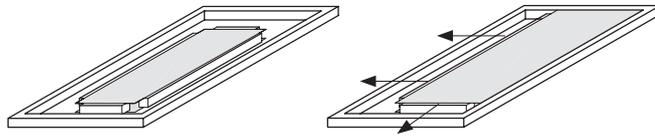


Abb. 158 a,b

Die Konstruktion besteht dafür aus Rahmen und zwei Spannbalken: einem Quer- und einem Längsbalken (Abb. 159a). Die Membran wird seitlich auf den Rahmen eingezogen (b), anschließend wird der seitliche Spannbalken auf der gegenüberliegenden Seite eingezogen (c). Jetzt können die oberen Kederschienen (c) sowie der untere Spannbalken eingeschoben werden (d). Die oberen Kederschienen werden mit Holzschrauben auf dem Rahmen befestigt (e). Abschließend können die Spannschrauben eingedreht und die Membran vorgespannt werden (f).

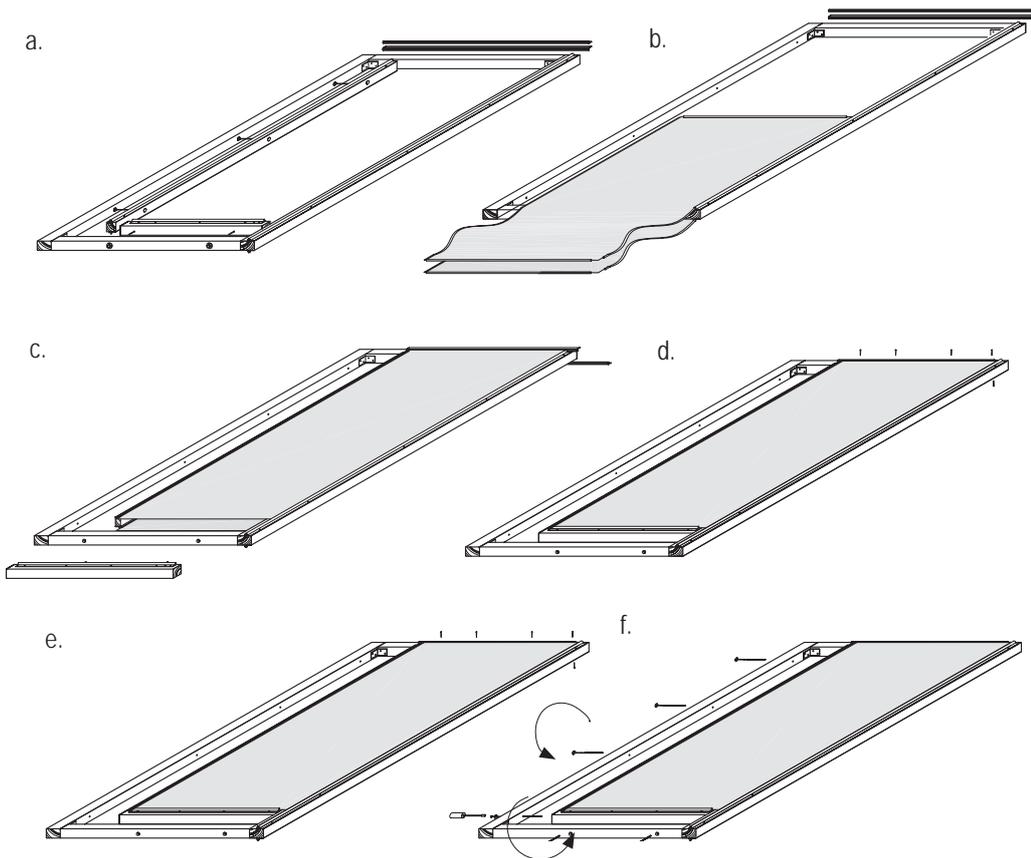
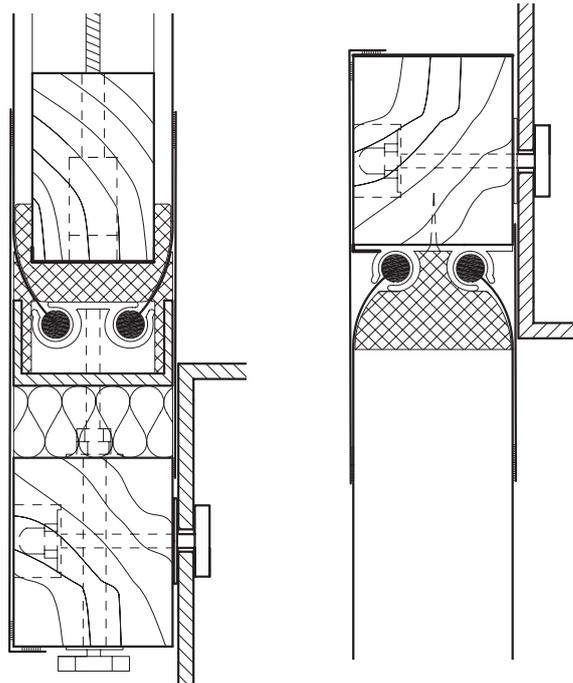


Abb. 159 a-f

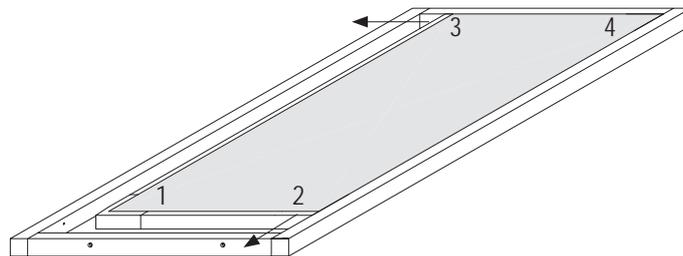
Im Unterschied zu vierseitig vorspannbaren Modulen, können bei zweiseitig vorspannbaren Modulen jeweils eine Quer- und eine Längsseite von Spannelementen entlastet werden. Diese Entlastung bringt Vorteile durch Reduzierung der Konstruktionselemente, des Eigengewichts und der einfacheren Nachspannbarkeit der Module. Unter Berücksichtigung der bereits vorgestellten Optimierung resultieren die folgenden Konstruktionslösungen für zweiseitig vorspannbare Rahmenmodule.

Abb. 160 a,b



Der als günstig beurteilte Lastabtrag von Kederschiene auf Spannbalken im unteren Rahmendetail, kehrt sich auf der gegenüberliegenden, oberen Seite zu einer Zugbelastung um. Kederschiene und Abdichtung werden im unteren Detail gegen den Spannbalken gedrückt, dagegen wird die Kederschiene im oberen Detail auf Zug belastet. Eine entsprechende Schraubverbindung sorgt hier für ausreichende Verbindung an den Rahmen. Die Abdichtung kann zwischen die beiden Halbrohrprofile der Kederschiene geschoben werden, ein Herausfallen ist dadurch unterbunden. Die Reduzierung der Vorspannbarkeit von vier auf zwei Seiten ermöglicht zudem mit nur noch einem einzigen U-Profilwinkel ausreichende Dichtigkeit erzielen zu können.

Abb. 161  
Obere und untere  
Rahmendetail  
für zweiseitig  
vorspannbare  
Rahmenmodule.



Der Winkel verbindet die beiden freien Spannbalkenenden miteinander und dichtet die offene Ecke ab (1). Die gegenüberliegende Ecke (4) ist eine unverschiebliche Rahmenecke die durch die Dichtungsbänder ausreichend abgedichtet wird. An den verbleibenden beiden anderen Ecken (2,3) ist eine ausreichende Abdichtung ebenfalls durch das Dichtungsband gewährleistet, da sich lediglich eine einachsige Verschiebung des Spannbalkens durch Vorspannung einstellt und diese den Abstand von Spannbalken zum Rahmen nicht beeinflusst.

### Einseitig vorspannbare Rahmenmodule

Eine weitere Vereinfachung der Nachspannbarkeit der Rahmenmodule kann durch eine weitere Reduzierung der Spannelemente erzielt werden. Anstelle vier-, bzw. zweiseitiger Nachspannbarkeit sind auch Konstruktionen mit einseitiger Nachspannbarkeit denkbar.

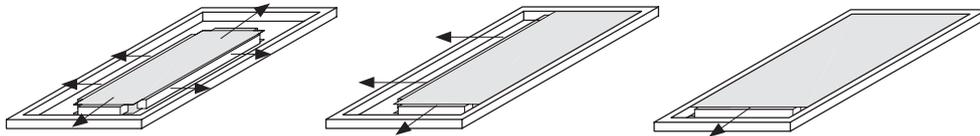


Abb. 162 a,c

Einseitig vorspannbare Rahmensysteme müssen durch das Aufdrehen von Spannschrauben, die nur auf der unteren Rahmenseite angeordnet sind, ein zweiachsiges Vorspannen des Moduls ermöglichen. Das Spannen in Schraubenrichtung, also vertikal kann einfach durch bekannte Spannbalkentechnik realisiert werden. Gleichzeitig muss das Aufdrehen der Spannschraube aber auch ein seitliches, horizontales Vorspannen der Membran zulassen. Hierfür ist eine Vorspannmechanik zu entwickeln, die die senkrechte Bewegung der Spannschraube in eine horizontale Spreizbewegung umlenkt. Die Funktionsweise könnte wie nachstehend skizziert ablaufen.

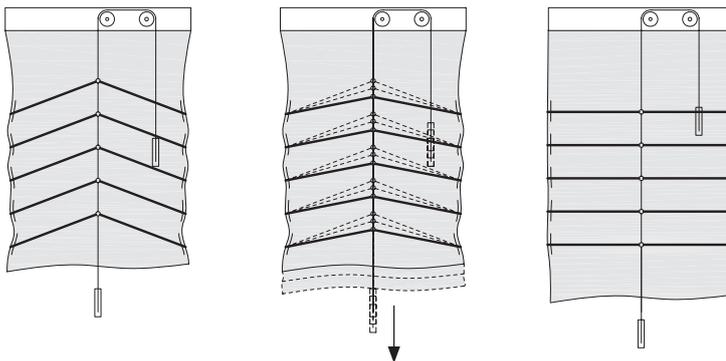


Abb. 163 a,c

Einseitig vorspannbare Rahmenmodule eröffnen die Möglichkeit die Konstruktion raffbar und beweglich auszuführen. In ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle könnten so wandlungsfähige Fassaden erzeugt werden, die auf klimatische Schwankungen mit Öffnen und Schließen der Konstruktion reagieren.

### Sonnenschutzelemente

Technisch einfachere Lösungen, um auf klimatische Schwankungen reagieren zu können stellen Sonnenschutzelemente dar, die in ein Rahmenmodul integriert werden können. Denkbar sind Rahmenkonstruktionen, die eine Jalousiemechanik im oberen Rahmenriegel beinhalten und über bewegliche Lamellen das Licht lenken oder Abschirmen können. Bei gekrümmt bespannten Rahmenmodulen ist diese Anwendung jedoch in Abhängigkeit der Membrangeometrie zu überprüfen.

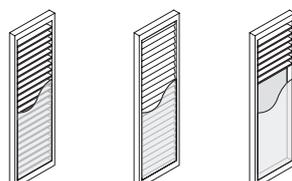


Abb. 164 a,c



Abb 165 a-i) Versuchsmodell

a) Der Holzrahmen wird doppelseitig mit einer Membran überzogen. Sie wird in den seitlichen Kederstreifen gehalten. b) Am unteren Stirnende wird der Spannbalken in die Randkeder der Membran geführt. c) Der Spannbalken wird seitlich über die Keder geschoben, dabei werden die Zugschrauben über den Gewinden positioniert d) Ist der Balken eingeschoben, e) fassen die Zugschrauben in ihre Gewinde und der Spannbalken kann an den Rahmen geschraubt werden. f) Jetzt wird der obere Balken eingeschoben... g) und durch ein Herausdrehen der Spannschrauben am unteren Ende wird die Membran über ihre Längsseite gespannt. h) ein Herausdrehen der Spreize bewirkt eine weitere Vorspannung, jetzt auch in seitlicher Schussrichtung des Gewebes. i) Das Resultat ist eine zweiseitig gespannte und punktuell ausgelenkte ebene Membran.



### 3. Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranrahmenmodule

#### 3.1. Form, Nutzung und Gestaltung

- 3.1.1. Das Gebäude
- 3.1.2. Die Zwischenzone
- 3.1.3. Die Gebäudehülle
- 3.1.4. Referenzen
- 3.1.5. Das Membranmodul
- 3.1.6. Sattelform
- 3.1.7. Buckelform
- 3.1.8. Bogenform

#### 3.2. Konstruktion und Optimierung

- 3.2.1. Vorspannsysteme
- 3.2.2. Druckschrauben-Rahmenmodule
- 3.2.3. Zugschrauben-Rahmenmodule
- 3.2.4. Zugschrauben-Balkenmodule
- 3.2.5. Konstruktionen zur Auslenkung der Membran
- 3.2.6. Vergleich der Vorspannsysteme
- 3.2.7. Optimierung und Weiterentwicklung  
der Zugschrauben-Rahmenmodule

#### 3.3. Untersuchung des Tragverhaltens

- 3.3.1. Tragverhalten am vereinfachten Rahmen
- 3.3.2. Tragverhalten am Spannbalkenrahmen
- 3.3.3. Einwirkungen
- 3.3.4. Lastfälle und Lagerbedingungen
- 3.3.5. Tragverhalten sattelförmig bespannter Rahmenmodule
- 3.3.6. Tragverhalten buckelförmig bespannter Rahmenmodul
- 3.3.7. Tragverhalten bogenförmig bespannter Rahmenmodule
- 3.3.8. Vergleich des Tragverhaltens der Rahmenmodule

### 3.3. Untersuchung des Tragverhaltens der Rahmenmodule

Nachdem im vorherigen Kapitel eine geeignete Konstruktion der Membranrahmenmodule entwickelt wurde, soll diese nun auf ihr Tragverhalten hin untersucht werden. Dabei liegt der Schwerpunkt der Studien auf der Analyse des hybriden Tragverhaltens von Membran und Rahmen.

Das prinzipielle Tragverhalten wird zu Beginn an einfachen Rahmenkonstruktionen durchgeführt, die im Verlauf des Kapitels realitätsnaher und detaillierter modelliert werden sollen. Der Einfachheit halber beziehen sich die ersten Studien auf eine eben gespannte Membran, die lediglich durch Vorspannung den Rahmen belastet. Die Lastfälle Wind und Schnee werden erst im späteren Verlauf berücksichtigt. Zur statischen Berechnung der Membranrahmenmodule wird die Software EASY verwendet, die mit Hilfe des BEAM-Editors eine Möglichkeit bietet, über das Tragverhalten der Membran hinaus auch Untersuchungen am Rahmen durchzuführen, um die gegenseitige Beeinflussung von Membran und Rahmen zu untersuchen [Tec07]. Nach diesen grundsätzlichen Überlegungen sollen im weiteren Verlauf in Parameterstudien die drei Membrangrundformen, Sattel-, Buckel- sowie Bogenfläche auf ihr Tragverhalten hin untersucht werden.

#### 3.3.1. Tragverhalten am vereinfachten Rahmen

Objekt der anfänglichen Untersuchungen ist eine eben gespannte, 0,9mm starke PVC-PE Membran des Typ 3, die in einen Rahmen doppellagig gespannt wird. Die Steifigkeit von Kett- und Schussrichtung ist mit 1400kN/m bzw. 800kN/m angenommen. Die Höchstzugkraft von 5750N/5cm führt zu einer maximal zulässigen Membranspannung von 15kN/m. Dabei ist der Sicherheitsfaktor mit dem Wert 5 angenommen. Die Membran wird mit 2kN/m in Kett- und Schussrichtung vorgespannt und stellt in diesen anfänglichen Studien die einzig angesetzte Belastung für den Rahmen dar. Dieser wird als 2x2m großer Holzrahmen mit biegesteifen Ecken und einem Querschnitt von 10x10cm ausgeführt. Das statische System des Rahmens weist allseitig, in der Symmetrieachse, eine verschiebliche Lagerung auf. Damit bildet das statische System einen Rahmen im vorgespannten aber noch nicht montierten Zustand ab, der die resultierende Verformung des Rahmens in seiner Ebene durch die verschieblichen Lager zulässt.

vgl. Kapitel 1.4.  
Bemessung

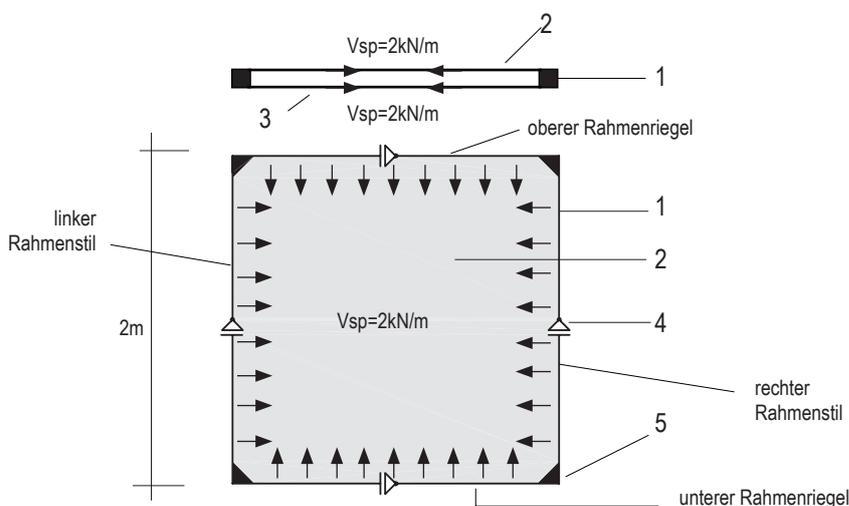
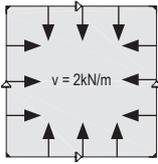


Abb.166  
Modellierung des  
Membranrahmens in  
EASY

- 1 Rahmen
- 2 obere Membran
- 3 untere Membran
- 4 verschiebliches  
Auflager
- 4 biegesteife Ecke
- Vorspannung

Studie S1 untersucht die Schnittkräfte dieses Rahmens, seine Verformung und die Membranspannungsverteilung, die sich unter Vorspannung der Membran einstellen.



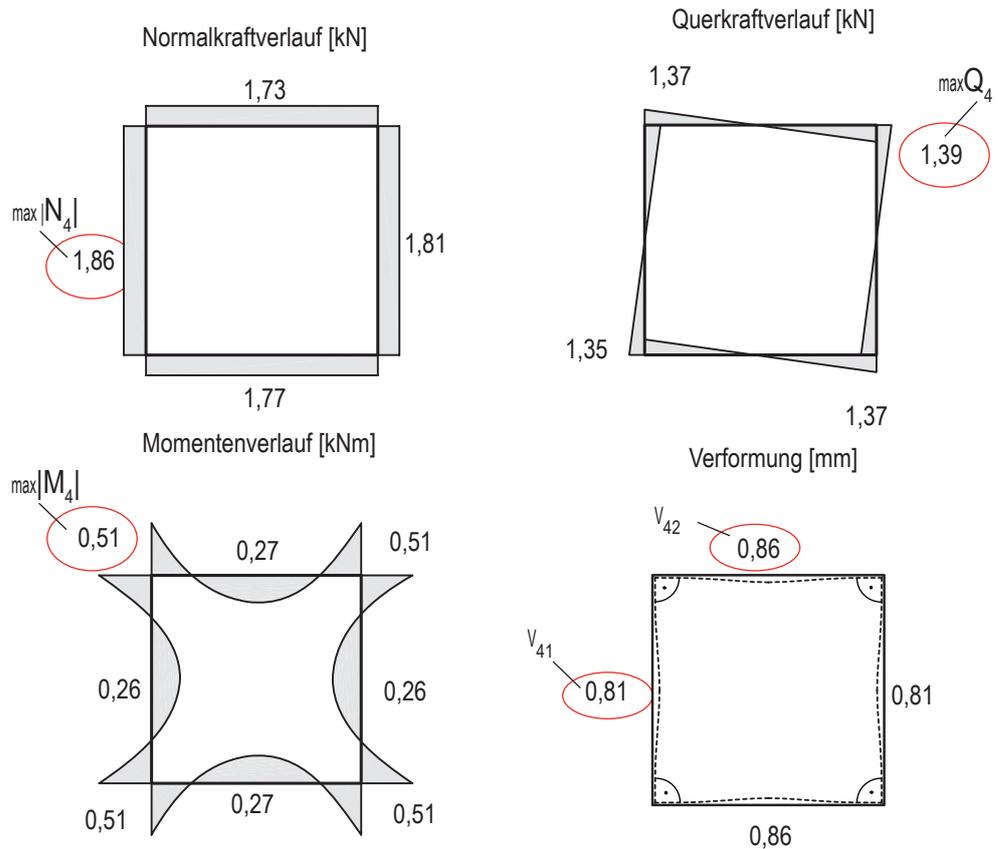
### S1 - Tragverhalten am vereinfachten Rahmenmodul

Rahmen: axb= 2x2m, bxh= 10x10cm, Holz  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt  
 Belastung: Vorspannung wie angegeben

- Tabelle 3.5.  
 Vsp - Vorspannung v [kN/m]
- $V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]
- $M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $N_4$  - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
 $Q_4$  - max. Querkraft Rahmen [kN]  
 $V_{41}$  - max Verformung Rahmen [mm]  
 $V_{42}$  - max Verformung Rahmen [mm]
- $U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]  
 $U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (max Q / Q_{zul}) \times 100$  [%]

Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil					
	Vsp. kN/m	Membran $V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	Rahmen $M_4$ / $N_4$ / $Q_4$   b x h   $U_M$   $U_Q$   $V_{41} / V_{42}$ kNm / kN / kN   cm   %   %   mm			
2 x 2	2	0   2,8 / 1,2	0,51 / 1,95 / 6,8   10x10   4 / 10   0,8 / 0,8			

Abb. 167 a-d  
 Schnittgrößen und  
 Verformung des  
 Rahmens



Für eine bessere  
 Vergleichbarkeit sind  
 die Maßstäbe der  
 Schnittgrößenverläufe  
 für alle Studien dieser  
 Arbeit gleich.

Abb. 167 e  
 Membranspannung

Gewebeausrichtung:  
 Schussrichtung  
 ←→ horizontal  
 Kettrichtung  
 ↑↓ vertikal



Als Ergebnis der ersten Tragstudie kann ein hybrides Tragverhalten des Membranmoduls festgestellt werden, da sich Membran und Rahmen gegenseitig beeinflussen: Die Membranvorspannung bewirkt eine allseitige Rahmenverformung, die wiederum die Vorspannung der Membran reduziert. Nach dem Einstellen eines Kräftegleichgewichts treten die größte Rahmenverformung und die niedrigste Membranspannung in Feldmitte auf. Die Ergebnisse im Einzelnen:

### Rahmen

Eine gleichmäßige Membranvorspannung lässt eine symmetrische Normalkraftverteilung erwarten. Die Ergebnisse weichen geringfügig hiervon ab. Der Grund liegt zum einen in der Anisotropie des Membranmaterials. Die erhöhte Steifigkeit der Kettrichtung (vertikal) resultiert in höherer Rahmenbelastung und größerer Verformung in den oberen und unteren Rahmenriegeln. Diese Vorspannkraft wird als Druckkraft in die seitlichen Rahmenstiele (vertikal) geleitet. Diese Kraft ist größer als die durch die Schussrichtung beanspruchten, oberen und unteren Rahmenriegel. Zum anderen kann durch eine geringfügig asymmetrische Anordnung des recht grob elementierten Membrannetzes eine Differenz in der Normalkraftverteilung entstehen. Dadurch sind voneinander abweichende Werte von Riegel zu Riegel bzw. Stiel zu Stiel erklärbar. Qualitativ liegt die Normalkraft weit unter der Summe aus Vorspannung. Der Rahmenstiel bzw. -riegel wird durch die Doppellagigkeit der Membran durch zweimal jeweils 2kN Vorspannung belastet, also mit 4kN. Die Verformung des Rahmens bewirkt jedoch eine Vorspannungsabnahme, sodass die Normalkraft in Stiel bzw. Riegel entsprechend geringer ausfällt.

Normalkraft

Die Rahmenseiten weisen an ihren Enden, in den Rahmenecken, die maximalen Querkräfte mit jeweils gegensätzlichem Vorzeichen auf. Der Querkraftverlauf verbindet diese Maximalwerte diagonal über die Länge einer Rahmenseite miteinander. In der Mitte ist die Querkraft also Null. Der Verlauf entspricht dem eines Rahmenriegels eines symmetrischen Gelenkrahmens.

Querkraft

Dieser Vergleich trifft auch auf den Momentenverlauf zu. Die biegesteifen Ecken des Rahmens bewirken das Anheben der Momentenparabel. Die unterschiedliche Steifigkeit von Kett- und Schussrichtung führt zu unterschiedlichen Momenten in Feldmitte.

Momente

In der Mitte des Rahmenstiels und -riegels sind die Verformung am stärksten. Die biegesteife Ausbildung der Rahmenecken führt dazu, dass der rechte Winkel in den Ecken auch nach Verformung erhalten bleibt. In Kettrichtung ist die Verformung stärker als in Schussrichtung, infolge ihrer höheren Steifigkeit.

Verformung

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in den Ergebnistabellen protokolliert. Nachstehend die Einträge von maximalem Moment, maximaler Normal- und Querkraft sowie den Rahmenverformungen.  $V_{41}$  gibt dabei die maximale Verformung im Rahmenstiel (vertikal),  $V_{42}$  die maximale Verformung im Rahmenriegel (horizontal) an.

Rahmen $a \times b$ m	rechteckiges Holzprofil					
	$V_{sp}$ kN/m	Membran $V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	Rahmen $M_4$ / $N_4$ / $Q_4$   $b \times h$   $U_M$   $U_Q$   $V_{41}$ / $V_{42}$ kNm / kN / kN   cm   %   mm			
2x2	2		0,51 / 1,95 / 6,8	10x10		0,8 / 0,8

Tabelle 3.6.

**Membran**  
**Membranspannung** Die Interpretation der Membranspannungsverteilung fasst die Ergebnisse dieses hybriden Tragsystems noch einmal zusammen. In Feldmitte, im Bereich der größten Rahmenverformung, ist die Membranspannung am geringsten. Zum Rahmenrand hin ist eine stetige Membranspannungszunahme festzustellen, die mit der geringeren Verformung der Eckbereiche des Rahmens zusammenhängt. Bei der Bemessung der Membran wird also die Feldmitte auf einen möglichen Spannungsausfall hin zu überprüfen sein, der Randbereich auf mögliche Spannungsspitzen, die die zulässige Spannung nicht überschreiten darf.

**Membranverformungen** Bei dem hier untersuchten Lastfall Vorspannung treten keine Membranverformungen senkrecht zur Fläche auf, da Kräfte lediglich in der Flächenebene wirken. Membranverformungen treten auf sobald man Wind oder Schneelasten berücksichtigt. Es gibt keine normierten Begrenzungswerte für Membranverformungen. Jedoch sollte die Gefahr der Wassersackbildung berücksichtigt sowie ein Aneinanderschlagen der oberen und unteren Membran verhindert werden. Diese Problematik wird berücksichtigt, sobald äußere Lasten mit in die Studien einfließen.

Die maximale Membranverformung sowie der Maximal- und Minimalwert der Membranspannung wird in den Ergebnistabellen in der Spalte „Membran“ aufgelistet.

Tabelle 3.7.

Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil					
	V <sub>sp</sub> kN/m	Membran	Rahmen			
		V <sub>1</sub>   σ max / min mm   kN/m	M <sub>4</sub> / N <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> %   %	V <sub>41</sub> / V <sub>42</sub> mm
2 x 2	2	0   2,8 / 1,2	0,51 / 1,95 / 6,8	10x10	4 / 10	0,8 / 0,8

**Nachweise**

Der Holzrahmen muss durch Schub- und Stabilitätsnachweise auf seine Tragfähigkeit hin überprüft werden. Ebenso muss die Membranspannung überprüft werden. Diese Nachweise werden nachstehend für einen 10x10cm großen Holzquerschnitt durchgeführt:

Biegung und Druckkraft:

$$3.1. \quad \sigma = \omega_z \cdot \frac{N}{A} + 0,85 \cdot \frac{M_z}{W_z} \leq \text{zul}\sigma_D = 8,5 \text{ kN/cm}^2$$

Berechnung des Widerstandmomentes:

$$3.2. \quad W_z = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{10 \cdot 10^2}{6} = 166,7 \text{ cm}^3$$

Berechnung des Trägheitsmomentes:

$$3.3. \quad I_z = \frac{b^3 \cdot h}{12} = \frac{10^3 \cdot 10}{12} = 833,3 \text{ cm}^4$$

Ermittlung der Knicklänge in der Rahmenebene:

es wird eine beidseitig gelenkige Lagerung angenommen, so dass β den Wert 1 zugewiesen bekommt. (Damit liegt die Rechnung auf der sicheren Seite)

$$3.4. \quad s_{kz} = \beta \cdot l = 1 \cdot 2 \text{ m} = 2 \text{ m}$$

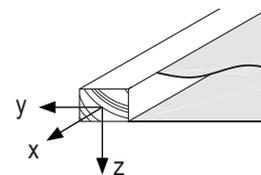


Abb. 168  
lokales Koordinatensystem

Berechnung des Trägheitsradius:

$$i_z = \frac{I_z}{A} = \frac{833,3\text{cm}^4}{100\text{cm}^2} = 2,89\text{cm}$$

Berechnung der Schlankheit:

$$\lambda_z = \frac{s_k}{i_z} = \frac{200\text{cm}}{2,89\text{cm}} = 69$$

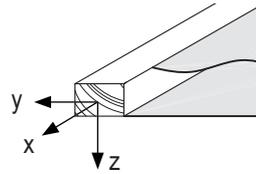


Abb. 169  
lokale Koordinatensystem

Damit ergibt sich ein Omegawert  $\omega_z = 1,85$

$$\sigma = \omega_z \cdot \frac{N}{A} + 0,85 \cdot \frac{M_z}{W_z} = 1,85 \cdot \frac{4,15\text{kN}}{100\text{cm}^2} + 0,85 \cdot \frac{1,27\text{kNm}}{166,7\text{cm}^3} = 0,72\text{kN/cm}^2$$

$$\sigma = 0,72\text{kN/cm}^2 \leq \text{zul}\sigma_D = 8,5\text{kN/cm}^2$$

Der Stabilitätsnachweis ist erfüllt, jedoch kann durch eine Verschlankung des Profils eine wirtschaftlichere Auslastung erreicht werden. Diese Verschlankung wird in der Studie S2 durchgeführt. Nachstehend der Schubspannungsnachweis für Vollholz, NH, S10.

$$\tau = 1,5 \frac{Q_{\max}}{A} \leq \text{zul}\tau = 0,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{1,39\text{kN}}{10\text{cm}^2} = 1,5 \cdot \frac{1390\text{N}}{10000\text{mm}^2} = 0,14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_d = 0,14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \text{zul}\tau = 0,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

In den Ergebnistabellen wird durch die Auslastung  $U_M$  angegeben, wie groß die vorhandene Spannung im gewählten Querschnitt prozentual zur seiner zulässigen Spannung ist.  $U_Q$  gibt die prozentuale Schubspannungsauslastung an.  $U_M$  und  $U_Q$  sind also folgendermaßen definiert:

$$U_{M,N} = \frac{\sigma}{\text{zul}\sigma} \cdot 100\% = \frac{0,72\text{N/mm}^2}{8,5\text{N/mm}^2} = 8,4\%$$

$$U_Q = \frac{\tau}{\text{zul}\tau} \cdot 100\% = \frac{0,14\text{N/mm}^2}{0,9\text{N/mm}^2} = 15,5\%$$

Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil					
	Vsp. kNm	Membran	Rahmen			
		V <sub>1</sub>   σ max / min mm   kN/m	M <sub>4</sub> / N <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub>   b x h kNm / kN / kN   cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub>   %   %	V <sub>41</sub> / V <sub>42</sub> mm	
2 x 2	2	0   2,8 / 1,2	0,51 / 1,95 / 6,8	10x10	4 / 10	0,8 / 0,8

Querschnitt

Auslastung

3.10.  
Membranspannungsnachweis

$$f_{d,Kett} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m \cdot A_{mod}} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3}$$

Wie bereits im Kapitel 1.4. zur Bemessung beschrieben läuft die Bemessung der Membranspannung nach oben dargestellter Formel ab [For04, S.181]. Dabei ist  $f_{t,k}$  die Kurzzeitzugfestigkeit des Materials. Für eine PVC-PE Membran beträgt sie 5750 N/5cm in Kettrichtung und 5100 N/5cm in Schussrichtung.  $\gamma_m$  ist der materialspezifische Teilsicherheitsbeiwert, der hier mit 1,5 angenommen wird.  $A_0$  bis  $A_3$  sind Abminderungsfaktoren, die je nach Lastfall mit unterschiedlicher Gewichtung einfließen. Als Mittelwert wird hier der Faktor 5 zugrunde gelegt. So ergibt sich eine maximal zulässige Membranspannung von:

$$3.11. \quad f_{d,Kett} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m \cdot A_{mod}} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} = \frac{115\text{kN/m}}{1,5 \cdot 5} = 15,3\text{kN/m}$$

$$f_{d,Schuss} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m \cdot A_{mod}} = \frac{f_{t,s}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} = \frac{102\text{kN/m}}{1,5 \cdot 5} = 13,6\text{kN/m}$$

Der ideale Vorspannungsgrad liegt jedoch unter diesen maximal zulässigen Membranspannungen. Er wird zwischen 2,5% und 6% der Kurzzeitfestigkeit angegeben [For04, S.193] und liegt damit zwischen folgenden Werten:

3.12. idealer Vorspannungsgrad

$$\sigma_{ideal,Kett} = 1,5\% \leftrightarrow 6\% = 1,7\text{kN/m} \leftrightarrow 6,9\text{kN/m}$$

$$\sigma_{ideal,Schuss} = 1,5\% \leftrightarrow 6\% = 1,5\text{kN/m} \leftrightarrow 6,1\text{kN/m}$$

In den Ergebnistabellen werden Membranspannungen, die außerhalb des optimalen Vorspannungsbereichs liegen rot markiert. Solange sie unterhalb der zulässigen Membranspannungen liegen können Spannungsspitzen toleriert werden.

Tabelle 3.9.

Rahmen $a \times b$ m	rechteckiges Holzprofil						
	Vsp. kN/m	Membran		Rahmen			
		$V_1$ mm	$\sigma$ max / min kN/m	$M_4 / N_4 / Q_4$ kNm / kN / kN	$b \times h$ cm	$U_M$ %	$U_Q$ %
2x2	2	0	9,8 / 1,2	0,51 / 1,95 / 6,8	10x10	4 / 10	0,8 / 0,8

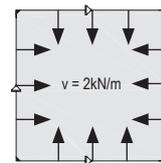
Das Tragverhalten von membranbespannten Rahmenmodulen ist also stark durch die gegenseitige Beeinflussung der beiden Materialien, ihrer Steifigkeiten und dem Grad der aufgebrachtten Vorspannung abhängig. Ein hybrides Tragverhalten liegt vor, dessen Komplexität nicht durch einfache lineare Gleichungen beschrieben werden kann. Im weiteren Verlauf sollen die Studien Aufschluss über ihre Trag- und Gebrauchsfähigkeit geben. Dabei wird die Komplexität schrittweise erhöht durch eine realitätsnähere Modellierung des Spannrahmens, geometrische Auslenkung der bespannten Fläche, dem Wechsel von Vorspannungsgraden, der Anpassung der Rahmenquerschnitte sowie der Berücksichtigung maßgebender Lastfälle wie Schnee- und Windlasten.

Studie S2

Zu Beginn soll jedoch die Studie S1 unter Variation des Rahmenprofils weiter untersucht werden. In den nachfolgenden Studie S2 wird der Rahmen auf 8x10cm, 6x8cm und abschließend auf 4x6cm verschlankt.

## S2 - Studie zum Einfluß der Rahmenquerschnittsgrößen am vereinfachten Rahmen

Rahmen:  $axb= 2x2m$ ,  $b \times h=$  variierend, Holz  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt  
 Belastung: Vorspannung  $V_{sp}= 2kN/m$



Rahmen $a \times b$ m	rechteckiges Holzprofil															
	V <sub>sp</sub> kN/m	Membran	Rahmen						V <sub>sp</sub> kN/m	Membran	Rahmen					
		$\sigma$ max/min kN/m	$M_4 / N_4 / Q_4$ kNm / kN / kN	$b \times h$ cm	$U_M$ %	$U_Q$ %	$V_{41} / V_{42}$ mm	$\sigma$ max/min kN/m		$M_4 / N_4 / Q_4$ kNm / kN / kN	$b \times h$ cm	$U_M$ %	$U_Q$ %	$V_{41} / V_{42}$ mm		
2x2	2	2,8 / 1,2	0,51 / 1,86 / 1,39	10x10	4 / 10	0,8 / 0,8	2	2,7 / 0,1	0,25 / 1,21 / 0,74	6x8	6 / 11	2,2 / 1,6				
	2	2,8 / 0,8	0,42 / 1,62 / 1,14	8x10	4 / 10	1,3 / 1,1	2	2,5 / 0,0	0,10 / 0,81 / 0,37	4x6	9 / 11	2,8 / 1,9				

Tab. 3.10.

V<sub>sp</sub> - Vorspannung v [kN/m]

$V_{41}$  - max Verformung Membran [mm]

$\sigma$  - Membranspannung [kN/m]

$M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]

$N_4$  - max. Normalkraft Rahmen [kN]

$Q_4$  - max. Querkraft Rahmen [kN]

$V_{41}$  - max Verformung Rahmen [mm]

$V_{42}$  - max Verformung Rahmen [mm]

$U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]

$U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (max Q / Q_{zul}) \times 100$  [%]

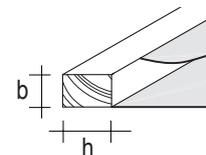
$b \times h$	N	Q	M	V
10x10				
8x10				
6x8				
4x6				

Tab 3.11.

Schnittgrößenvergleich

Abb. 170

Rahmenquerschnitt

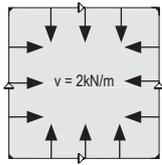


Die Verschlanung des Rahmenprofils beeinflusst die Beanspruchung von Holzrahmen und Membran nicht qualitativ aber quantitativ. Durch die Reduzierung von Breite und Höhe der Rahmenquerschnitte und der damit einhergehenden Reduzierung ihrer Steifigkeit resultiert bei gleicher Membranvaspannung von 2kN/m eine größere Verformung des Rahmens. Ein größerer Membranspannungsabbau ist die Folge. Die auftretende Normalkraft in Stiel und Riegel ist demnach geringer, ebenso Momentenbelastung und Querkraft. Kritische Membranspannungen werden bei Querschnitten von 6x8cm und 4x6cm erreicht. Hier ist die Verformung des Rahmens so stark, dass die in die Membran eingebrachte Vorspannung völlig ausfällt. Faltenbildung wäre die Folge und unter Windbelastung ein Flattern der Membran, das zur Zerstörung des Materials führen würde.

Die Auslastung des Rahmens nimmt bei gleicher Vorspannung mit zunehmender Verschlanung zu. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Auslastung der Rahmen in diesen Studien sehr gering ist. Für diese Rahmenstudie ist also nicht die Biegespannung oder Schubspannung für die Rahmenbemessung ausschlaggebend. Maßgebend ist vielmehr die Verformung des Rahmens und der mit ihr abhängigen Membranspannung.

In den untersuchten Studien wurde Kett- und Schussrichtung der Membran parallel zu Rahmenstiel und -riegel, also orthogonal ausgerichtet, angenommen. Die nächste Studie S3 untersucht Rahmen, bei der das Gewebe der Membran um 45° gedreht ist, um Aussagen zum optimierten Einbau der Membran treffen zu können.

Studie S3



### S3 - Studie zum Einfluß der Kett und Schussausrichtung am vereinfachten Rahmen

Rahmen:  $a \times b = 2 \times 2 \text{ m}$ ,  $b \times h = 6 \times 8 \text{ cm}$ , Holz  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt, Gewebeerorientierung  $45^\circ$   
 Belastung: Vorspannung  $V_{sp} = 2 \text{ kN/m}$

Tab. 3.12.  
 $V_{sp}$  - Vorspannung  $v$  [kN/m]  
 $V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]  
 $M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $N_4$  - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
 $Q_4$  - max. Querkraft Rahmen [kN]  
 $V_{41}$  - max Verformung Rahmen [mm]  
 $V_{42}$  - max Verformung Rahmen [mm]

Rahmen $a \times b$ m	rechteckiges Holzprofil						
	$V_{sp}$ kN/m	Membran		Rahmen			
		$V_1$ mm	$\sigma$ max / min kN/m	$M_4 / N_4 / Q_4$ kNm / kN / kN	$b \times h$ cm	$U_M$ %	$U_Q$ %
2 x 2	2	0   1,9 / 0,0	0,22 / 1,38 / 0,82	6x8	5 / 12	1,7 / 1,7	

$U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]  
 $U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (max Q / Q_{zul}) \times 100$  [%]

Abb. 171 a-d  
 Schnittgrößen und Verformung des Rahmens

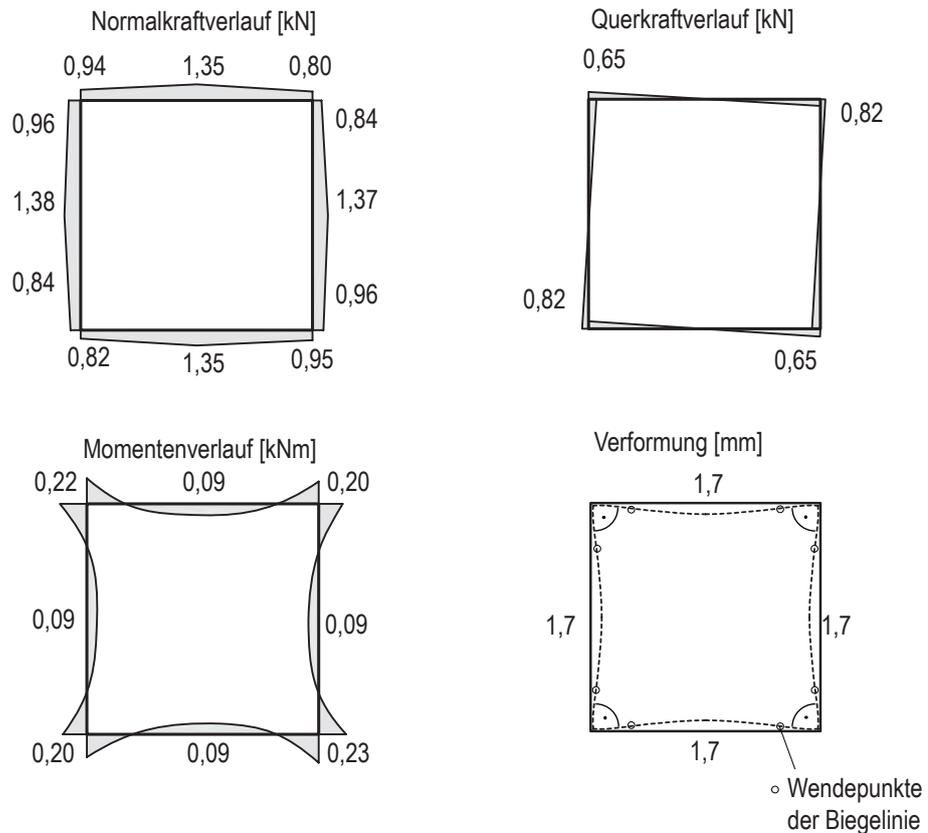
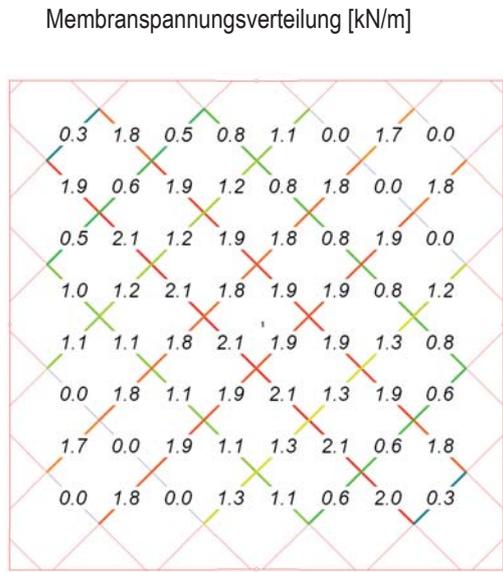


Abb. 171 e  
 Membranspannung

Gewebeausrichtung diagonal ( $45^\circ$ ):  
 ↗ Schussrichtung  
 ↘ Kett-richtung



Die Studie S3 untersucht den Einfluss der Ausrichtung von Kett- und Schussrichtung. Dafür werden zwei Rahmenmodule mit unterschiedlichen Rahmenquerschnitten mit einer Membran bespannt, dessen Geweberichtung um 45° gedreht wurde. Die entstehenden Schnittgrößen unter 2kN/m Vorspannung werden mit den Rahmenmodulen aus Studie S1 und S2 verglichen, bei denen eine orthogonale Kett-Schussausrichtung gewählt wurde.

Rahmen a x b m		rechteckiges Holzprofil																			
		Vsp. kN/m	Studie	Membran		Rahmen						Studie	Membran		Rahmen						
				V <sub>1</sub>   σ max/min mm   kN/m	M <sub>4</sub> / N <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> % %	V <sub>41</sub> / V <sub>42</sub> mm		V <sub>1</sub>   σ max/min mm   kN/m	M <sub>4</sub> / N <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> % %	V <sub>41</sub> / V <sub>42</sub> mm		V <sub>1</sub>   σ max/min mm   kN/m	M <sub>4</sub> / N <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> % %	V <sub>41</sub> / V <sub>42</sub> mm	
2 x 2	2	S1	0   2,8 / 1,2	0,51 / 1,86 / 1,39	10x10	4 / 10	0,8 / 0,8	S3	0   2,2 / 1,0	0,50 / 1,89 / 1,30	10x10	4 / 9	0,8 / 0,8								
2 x 2	2	S2	0   2,7 / 0,1	0,25 / 1,21 / 0,74	6x8	6 / 11	2,2 / 1,6	S3	0   1,9 / 0,0	0,22 / 1,38 / 0,82	6x8	5 / 12	1,7 / 1,7								

Abb. 3.13.

Vsp - Vorspannung v [kN/m]

V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]

σ - Membranspannung [kN/m]

M<sub>4</sub> - max. Moment Rahmen [kNm]

N<sub>4</sub> - max. Normalkraft Rahmen [kN]

Q<sub>4</sub> - max. Querkraft Rahmen [kN]

V<sub>41</sub> - max Verformung Rahmen [mm]

V<sub>42</sub> - max Verformung Rahmen [mm]

U<sub>M</sub> - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]

U<sub>Q</sub> - Auslastung  $U_Q = (Q_{max} / Q_{zul}) \times 100$  [%]

Eine orthogonale Ausrichtung von Kett- und Schussrichtung, wie in den vorangegangenen Studien, folgt der Orientierung der Krafteinleitung und gewährleistet eine direkte Aufnahme der Kraft in das Gewebe. Eine Drehung der Kett- und Schussausrichtung um 45° führt dagegen zu einer stärkeren Dehnung des Gewebes in Querrichtung und somit zu einem schnelleren Ausfall der Membranspannung. Dieser Ausfall ist in den Eckbereichen des Rahmenmoduls in Studie S3 festzustellen. Die oben abgebildete Ergebnistabelle zeigt, dass die orthogonale Ausrichtung von Kett- und Schussrichtung zu höheren Membranspannungen führen. Nur eine direkte Krafteinleitung in horizontal und waagrecht ausgerichtete Kett- und Schussrichtung ermöglicht eine vollständige Ausnutzung der Membranhöchstzugkraft sowie eine Minimierung der Membrandehnung.

Als vorteilhaft an der Gewebedrehung erweist sich dagegen die homogenere Übertragung der Vorspannkraft in gleichen Teilen auf Riegel und Rahmenstil. Dies ist an der gleich verteilten Normalkraft sowie am identischen Verformungsverhalten von Riegel und Stiel in den Studien S3 abzulesen. Die Drehung der Gewebestruktur um 45° führt bei der Membranspannungsverteilung zu einer erhöhten Vorspannung in dem sonst kritischen Bereich der Feldmitte. Dagegen liegen die schwach vorgespannten Bereiche nun in den Ecken der Rahmenmodule. Diese vorteilhafte Verteilung stellt sich aber nur bei quadratischen Rahmenmodulen ein, sobald rechteckig, langgestreckte Formen untersucht werden wird es auch bei einer Gewebedrehung um 45° zu ungleichen und ungünstigeren Belastungsverteilungen kommen.

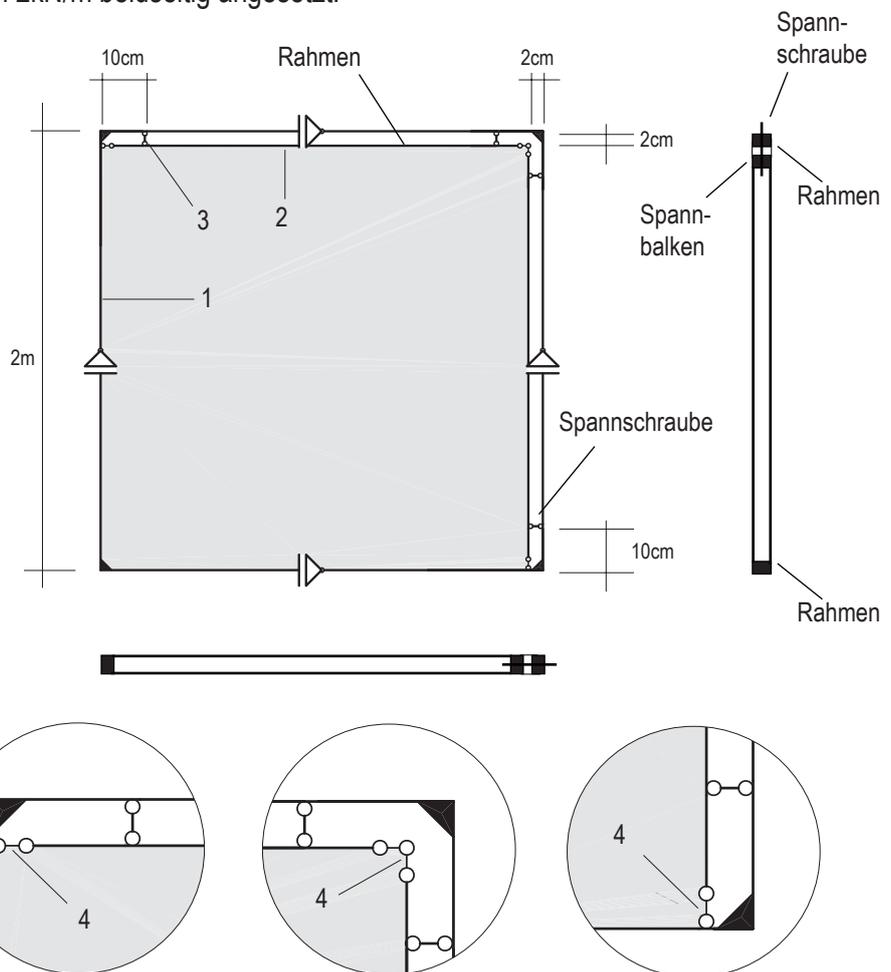
Alles in allem erscheint die Drehung des Membrangewebes um 45° nicht sinnvoll. Hauptargument hierfür ist, dass Kett- und Schussrichtung parallel zu den Hauptvorspannungsrichtungen ausgerichtet sein sollten, um eine optimale Ausnutzung ihrer Zugfestigkeit zu erhalten. Darüber hinaus ist der orthogonale Gewebeeinbau auch wirtschaftlicher: Ein Membranzuschnitt von Membranflächen deren Gewebe um 45° gedreht ist, erfordert mehr Material, da der Verschnitt sehr hoch ist. Aus diesem Grund wird in den weiteren Studien die Membran mit orthogonaler Geweberichtung angenommen.

## 3.3.2. Tragverhalten am Spannbalkenrahmen

Nach der Klärung des Tragverhaltens am vereinfachten Rahmen wird in den nächsten Studien die Konstruktion realitätsnaher modelliert. Dabei werden zweiseitig Spannbalken in den Rahmen eingefügt, die über Spannschrauben mit dem außenliegenden Rahmen verbunden sind. Die Schraubverbindungen werden durch einen beidseitig gelenkigen Anschluss an Rahmen und Balken modelliert. Die Enden der Spannbalken werden über Verbindungselemente an die Rahmengeometrie angeschlossen. Diesen Elementen wird eine unendlich geringe Steifigkeit zugewiesen, sodass sie das Tragverhalten des Systems nicht beeinflussen, aber einen für die Berechnung notwendigen geometrischen Abschluss herstellen. Der Rahmen wird auf jeder Seite mittig in Z- und einer zweiten Achsrichtung gehalten, um den Lastfall Vorspannung im nicht eingebauten Zustand zu simulieren, die Verschieblichkeit einer Achse ermöglicht die Verformung des Rahmens. Als Vorspannung wird eine Kraft von 2kN/m beidseitig angesetzt.

Abb. 172 a-d  
Modellierung des  
Membranrahmens in  
EASY

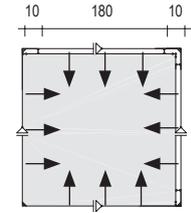
- 1 Rahmen
- 2 Spannbalken
- 3 Spannschraube
- 4 Verbindungselement mit unendlich geringer Steifigkeit



Der Einfachheit halber wird zunächst ein quadratisches Rahmenmodul untersucht mit einer Kantenlänge von 2m, entsprechend den Maßen der vorherigen Studien. Der verstellbare Abstand zwischen Rahmen und Spannbalken wird mit 2cm angenommen. Erneut wird eine PVC-PE Membran vom Typ 3 in die Konstruktion gespannt, wobei die Kettrichtung vertikal, die Schussrichtung horizontal angeordnet wird. Rahmen und Spannbalken bestehen aus Vollholz und weisen ein quadratisches Profil von 10x10cm auf. Studie S4 untersucht einen Rahmen, dessen Spannschrauben in einem seitlichen Abstand von 10cm angeordnet sind. Diese Schraubenposition wird im weiteren Verlauf variiert werden, um eine Idealpositionierung zu finden.

### S4 - Tragverhalten am Spannbalckenrahmen im Vormontagezustand

Rahmen: axb= 2x2m, bxh= 10x10cm, Holz, Schraubenabstand: 10-180-10cm  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt  
 Belastung: Vorspannung v= 2kN/m



Tab 3.14.

Vsp - Vorspannung v [kN/m]

V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]

σ - Membranspannung [kN/m]

M<sub>2</sub> - max. Moment Spannbalcken [kNm]

Q<sub>2</sub> - max. Querkraft Spannbalcken [kN]

V<sub>2</sub> - max Verformung Spannbalcken [mm]

V<sub>22</sub> - max Verformung Spannbalcken [mm]

N<sub>3</sub> - max. Normalkraft Schraube [kN]

M<sub>4</sub> - max. Moment Rahmen [kNm]

N<sub>4</sub> - max. Normalkraft Rahmen [kN]

Q<sub>4</sub> - max. Querkraft Rahmen [kN]

V<sub>41</sub> - max Verformung Rahmen [mm]

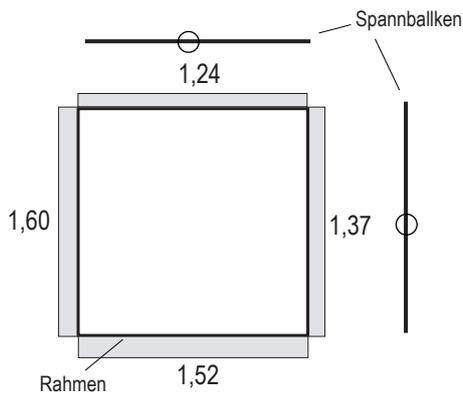
V<sub>42</sub> - max Verformung Rahmen [mm]

U<sub>M</sub> - Auslastung U<sub>M</sub>=(σ<sub>max</sub>/σ<sub>zul</sub>)x100 [%]

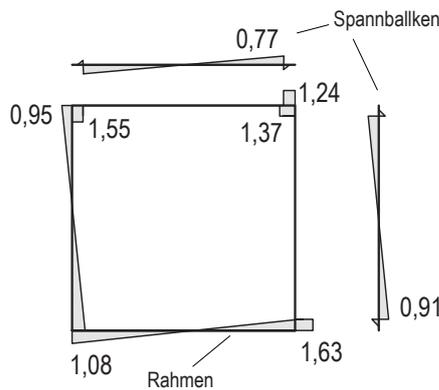
U<sub>Q</sub> - Auslastung U<sub>Q</sub>=(max(Q/Q<sub>zul</sub>))x100 [%]

Rahmen axb m	rechteckiges Holzprofil										
	Vsp. kN/m	Membran V <sub>1</sub>   σ max / min mm   kN/m	Spannbalken M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub> kNm / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> %   %	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub> mm	Schraube N <sub>3</sub> kN	Rahmen M <sub>4</sub> / N <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> %   %	V <sub>41</sub> / V <sub>42</sub> mm
2 x 2	2	0   2,5 / 0,7	0,44 / 0,14	10x10	32 / 1	1,8 / 1,5	1,46	0,44 / 1,60 / 1,79	10x10	3 / 13	0,9 / 0,6

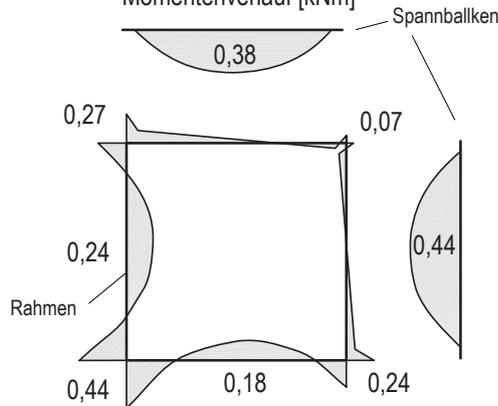
Normalkraftverlauf [kN]



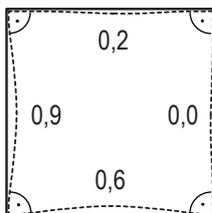
Querkraftverlauf [kN]



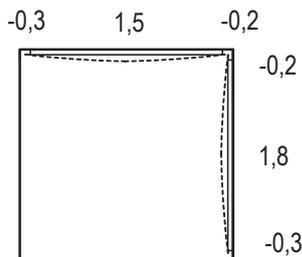
Momentenverlauf [kNm]



Verformung Rahmen [mm]



Verformung Spannbalcken [mm]



Membranspannung kN/m

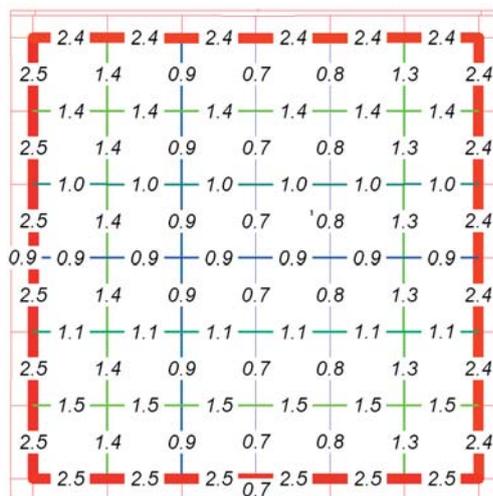


Abb. 173a-e  
Schnittgrößen und Verformung des Rahmens

Abb. 173f  
Membranspannung

Gewebeausrichtung:

Schussrichtung

horizontal ←→

Ketttrichtung

vertikal ↑↓

Als Ergebnis der Untersuchung des Tragverhaltens fällt eine Verschiebung der Normal- und Querkraftverteilung auf. Die mit Spannbalken gedoppelten Rahmenseiten werden schwächer durch Normalkraft beansprucht als die ihnen gegenüberliegenden Rahmenseiten. Beim Querkraftverlauf kommt es hier zu einer lokalen Beanspruchung zwischen Spannschraube und Rahmenecke. Der Spannbalken und die freien Rahmenseiten weisen eine lineare, diagonal verlaufende Querkraftbeanspruchung auf. Sie ist im Vergleich mit den bisherigen Ergebnissen jedoch asymmetrisch.

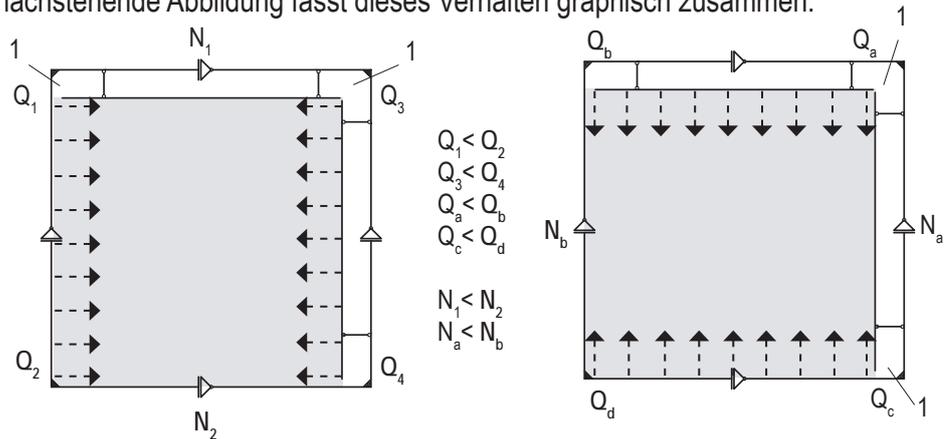
Der Grund für diese ungleich verteilte Belastung liegt in dem mit „1“ gekennzeichneten Spalt zwischen Spannbalken und Rahmen. Dieser Spalt ist nicht membranbespannt und folglich unbelastet. Die Vorspannung wird also nicht über die gesamte Länge der Rahmenseite eingeleitet. Es resultieren größere Querkräfte auf den Seiten, die keinen Spalt aufweisen, also am linken Ende der oberen und unteren Rahmenriegel ( $Q_b, Q_d$ ) sowie am unteren Ende der linken und rechten Rahmenstiele ( $Q_2, Q_4$ ). Diese Querkraftbeanspruchung führt zu einer entsprechenden Normalkraftbeanspruchung in den Rahmenseiten, die um  $90^\circ$  zu der querkraftbeanspruchten Seite gedreht ist. Auf der Seite höherer Querkraft resultieren höhere Normalkräfte ( $N_2, N_b$ ), die Seite niedrigerer Querkraft weist eine schwächere Normalkraft auf ( $N_1, N_a$ ). Die nachstehende Abbildung fasst dieses Verhalten graphisch zusammen:

Querkräft  
Normalkraft

Abb. 174 a,b

Normal- und Querkraftverteilung durch asymmetrische Vorspannung

1 unbelasteter Bereich  
--> Vorspannung



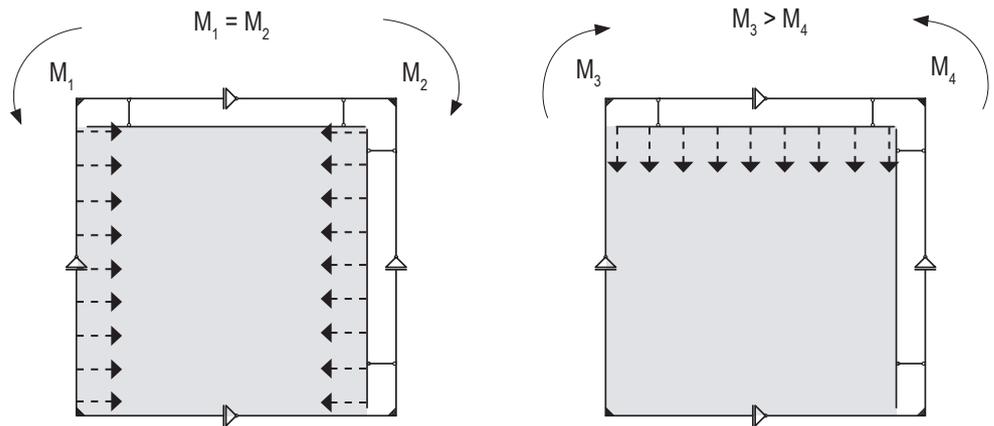
Momente

Abb. 174 c,d

Eckmomente

--> Vorspannung  
↪ Verdrehung der Rahmenecke

Die Asymmetrie der Vorspannungsverteilung erklärt darüber hinaus die unterschiedlich hohen Stützmomente, die im linken Stiel und im unteren Riegel festzustellen sind. Die mit Spannbalken gekoppelten, gegenüberliegenden Seiten weisen jedoch eine völlig andere Momentenverteilung auf. Durch die horizontale Membranvorspannung entstehen an den Ecken zwei gleich große Eckmomente  $M_1$  und  $M_2$ . Dagegen verursacht der unbelastete Spalt auf der rechten Seite, dass die Eckmomente, die aus vertikaler Vorspannung resultieren, unterschiedlich ausfallen.  $M_3 > M_4$ . Die nachstehende Abbildung stellt dieses Tragverhalten dar.



Um nun den resultierenden Momentenverlauf erklären zu können, soll die Momentenverteilung skizziert werden, die sich einstellt, wenn die Eckmomente unterschiedlich groß sind, wobei im ersten Schritt der Einfluss des Spannbalkens außer Acht gelassen wird. Wie in der nachstehenden Skizze illustriert, wird links ein großes Moment aufgetragen, auf der rechten Seite das abgeschwächte, kleinere Moment, die dann linear miteinander verbunden werden können.

Die rechte Skizze zeigt den Momentenverlauf der sich unter Einfluss des Spannbalkens einstellt, wenn die beiden Eckmomente gleich groß sind. An den Stellen der Spannschrauben weist der Momentenverlauf einen Knick auf.



Abb. 175 a,b  
Momentenverlauf

Eine Überlagerung beider Momentenverläufe ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt. Dieser Verlauf kommt dem Ergebnis der Studie nahe. Das Eckmoment rechts ist durch die Asymmetrie des Rahmens größer als das Eckmoment links. Durch den Einfluss des Spannbalkens, der durch Schrauben an den Rahmen gekoppelt ist, kommt es an der Position der Schrauben zu zwei Knicken in der Momentenlinie, die dann schräg abfallend miteinander verbunden werden kann.

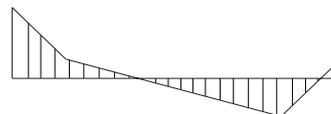


Abb. 175 c  
überlagerter  
Momentenverlauf

Die Bemessung des Rahmens erfolgt wie bereits in den vorherigen Studien mittels Stabilitätsnachweis. Die Ergebnistabellen listen den Grad der Auslastung  $U_M$  des gewählten Querschnitts auf. Darüber hinaus wird die Schubspannung ermittelt und ein Schubspannungsnachweise geführt.  $U_V$  gibt den prozentualen Anteil der vorhandenen Schubspannung zur zulässigen Schubspannung an.

Bemessung des  
Rahmens

Das Tragverhalten des Spannbalkens ist das eines Balkens auf zwei Stützen mit beidseitigem Kragarm. Das maximale Moment liegt in Feldmitte, bzw. an den Stellen der Schrauben. Maximale Querkräfte entstehen an den Stellen der Schrauben. Normalkraft tritt im Spannbalken nicht auf. Grund hierfür ist die verschiebliche Lagerung der Membran in der Kederschiene. Kräfte die parallel zum Spannbalken wirken führen dadurch zu einem Verrutschen der Membran in der Schiene, nicht aber zu einer Einleitung der Normalkraft in den Spannbalken.

Tragverhalten des  
Spannbalkens



Abb. 176 a-c  
Schnittgrößen des  
Spannbalkens

Insofern ist es für die Bemessung des Spannbalkens ausreichend einen einfachen Biege- und Schubspannungsnachweis zu führen.

3.13.  
Biegespannungs-  
nachweis

$$\sigma = \frac{M}{W_z} \leq \text{zul}\sigma \quad \text{zul}\sigma = 10\text{MN/m}^2 \text{ (NH,S10)}$$

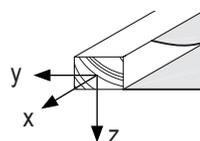


Abb. 177  
lokales  
Koordinatensystem

Verformung	Das Verformungsbild des Rahmens und der Spannbalken aus Studie S4 zeigt, dass größte Verformungen an den Stellen maximaler Feldmomente auftreten, also vorallem an der linken und unteren Rahmenseite, den freien Seiten, die keine Kopplung mit einem Spannbalken aufweisen. Die beiden anderen, mit den Spannbalken gekoppelten Seiten, werden lediglich an ihren Enden, an den Stellen der Spansschrauben durch die Vorspannkraft belastet. Sie weisen in Feldmitte keine, bzw. eine nur sehr geringe Durchbiegung auf. Der Spannbalken ist dagegen über die gesamte Länge durch die vorgespannte Membran belastet. Deshalb ist ihre Verformung größer. Sie treten in Feldmitte auf. Die Kragarme sind in dieser Studie so kurz dass sie eine negative Verformung aufweisen.
Membranspannung	Die Membranspannungsverteilung zeigt ihre geringsten Werte in Bereichen höchster Rahmenverformung, also in Flächenmitte. Die größere Verformung in Kettrichtung führt zu einem höheren Spannungsabbau in Kettrichtung, sodass sich die Spannungen von Kett- und Schussrichtung angleichen, teilweise die Schussrichtung sogar höhere Vorspannungen aufweist.
Ergebnistabelle	Die Ergebnistabelle wurde in dieser Studie an die komplexere Modellierung des Rahmenmoduls angepasst. Neben den charakteristischen Messwerten an der Membran und Rahmen sind zwei Spalten hinzugefügt worden für Untersuchungen des Spannbalkens und der Schraube. Das Maximalmoment des Spannbalkens wird notiert, daneben wird seine maximale Querkraft angegeben. In Abhängigkeit zum gewählten Querschnitt können die Grade der Auslastung ermittelt werden. Abschließend werden dann die Verformungen der Spannbalken angegeben. Zuerst die des rechten Balkens, anschließend die des linken Spannbalkens. In der zweiten Spalte wird die Normalkraft der Schraube angegeben.

Tab. 3.15.

Rahmen $a \times b$ m		rechteckiges Holzprofil										
		Membran		Spannbalken				Schraube	Rahmen			
$V_{sp}$	$\sigma$ max / min	$M_2 / Q_2$	$b \times h$	$U_M$	$U_Q$	$V_{21} / V_{22}$	$N_3$	$M_4 / N_4 / Q_4$	$b \times h$	$U_M$	$U_Q$	$V_{41} / V_{42}$
kN/m	mm   kN/m	kNm / kN	cm	%	%	mm	kN	kNm / kN / kN	cm	%	%	mm
2	0   2,5 / 0,7	0,44 / 0,14	10x10	32 / 1		1,8 / 1,5	1,46	0,44 / 1,60 / 1,79	10x10	3 / 13		0,9 / 0,6

Studie S5 Durch das Einrücken der Schrauben in Richtung Feldmitte, können die Stützmomente des Spannbalkens vergrößert und dem sich dadurch abmindernden Feldmoment angenähert werden. Hierdurch kommt es zu einer Optimierung des Spannbalkens. Die nachfolgende Abbildung skizziert das Anheben der Momentenlinie durch Verschiebung der Auflager, wodurch eine optimierte Verteilung von Stütz- und Feldmoment erreicht werden kann.

Abb. 178 a,b  
Optimierung des  
Momentenverlaufs

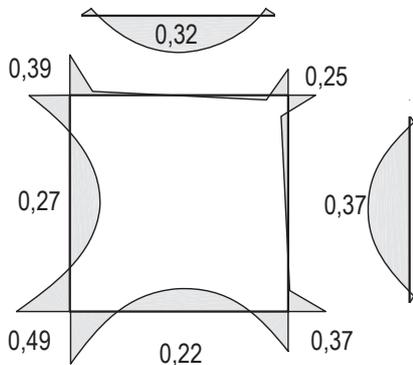


Studie S5 versucht durch das Einrücken der Spansschrauben diese Optimierung zu erzielen. Untersucht werden Schraubenabstände zwischen 20 - 40cm, die mit den Ergebnissen aus Studie S4 verglichen werden, bei der der Schraubenabstand bei 10cm lag.

## S5 - Studie zur Optimierung der Schraubenpositionierung, Vormontagezustand

Rahmen: axb= 2x2m, bxh= 10x10cm, Holz, Schraubenabstand: variierend  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt  
 Belastung: Vorspannung v= 2kN/m

S8 - Momentenverlauf [kNm]



S8 - Membranspannung kN/m

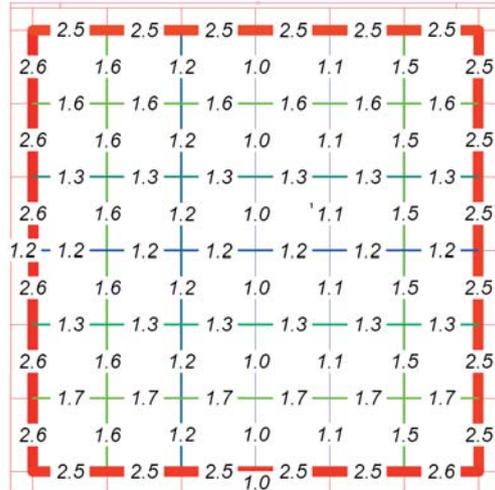
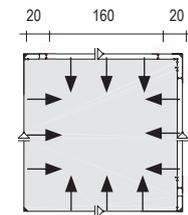
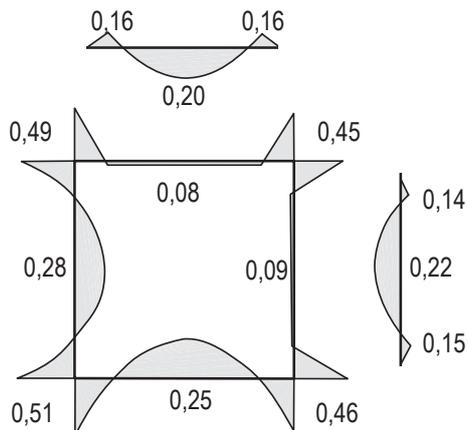


Abb. 179 a-f

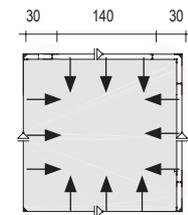
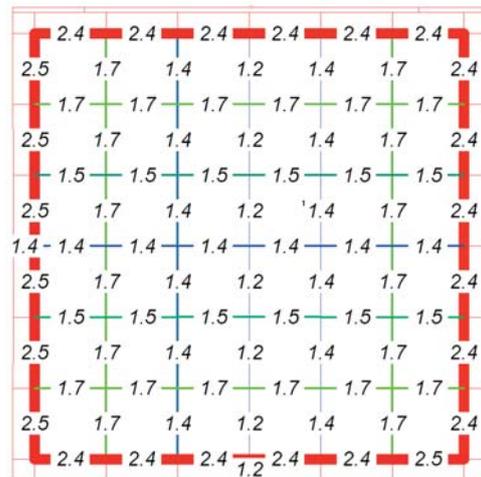


Gewebeausrichtung:  
 Schussrichtung horizontal  
 Kettrichtung vertikal

S9 - Momentenverlauf [kNm]

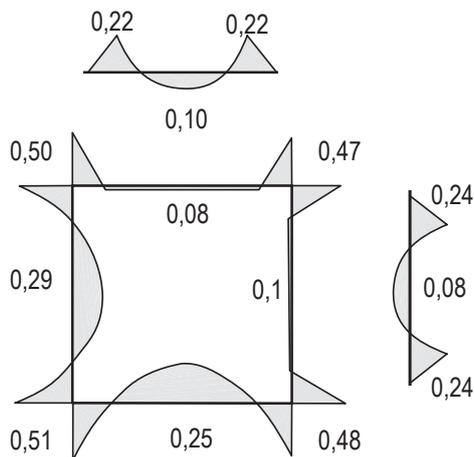


S9 - Membranspannung kN/m

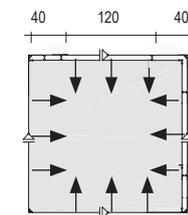
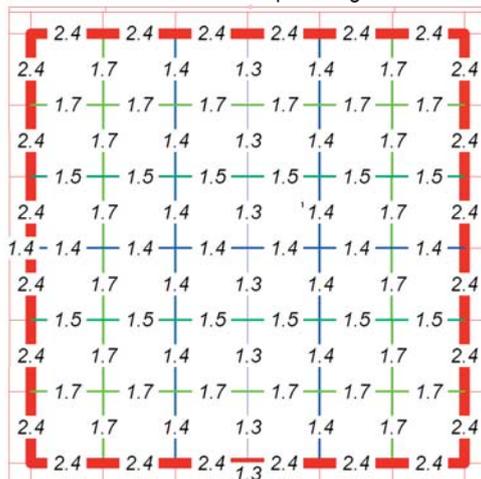


Gewebeausrichtung:  
 Schussrichtung horizontal  
 Kettrichtung vertikal

S10 - Momentenverlauf [kNm]



S10 - Membranspannung kN/m



Gewebeausrichtung:  
 Schussrichtung horizontal  
 Kettrichtung vertikal

In den gezeigten Studien S5 wird die Lage der Spanschrauben variiert. Ihr Abstand wird jeweils in 10cm Schritte von anfänglich 10cm auf 40cm erweitert. Vorspannung, Rahmenquerschnitt und -geometrie bleiben dabei unverändert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in nachstehender Ergebnistabelle zusammengefasst:

- Tab. 3.16.  
V<sub>sp</sub> - Vorspannung v [kN/m]
- V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]  
σ - Membranspannung [kN/m]
- M<sub>2</sub> - max. Moment Spannbalken [kNm]  
Q<sub>2</sub> - max. Querkraft Spannbalken [kN]  
V<sub>2</sub> - max Verformung Spannbalken [mm]  
V<sub>22</sub> - max Verformung Spannbalken [mm]
- N<sub>3</sub> - max. Normalkraft Schraube [kN]
- M<sub>4</sub> - max. Moment Rahmen [kNm]  
N<sub>4</sub> - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
Q<sub>4</sub> - max. Querkraft Rahmen [kN]  
V<sub>41</sub> - max Verformung Rahmen [mm]  
V<sub>42</sub> - max Verformung Rahmen [mm]
- U<sub>M</sub> - Auslastung U<sub>M</sub>=(σ<sub>max</sub>/σ<sub>zul</sub>)x100 [%]  
U<sub>Q</sub> - Auslastung U<sub>Q</sub>=(maxQ/Q<sub>zul</sub>)x100 [%]

Rahmen a x b m		rechteckiges Holzprofil										
		V <sub>sp</sub> kN/m	Schrauben- abstand [cm]	Membran V <sub>1</sub>   σ max / min mm   kN/m	Spannbalken M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub> kNm / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> % %	V <sub>21</sub> /V <sub>22</sub> mm	Schraube N <sub>3</sub> kN	Rahmen M <sub>4</sub> / N <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> % %
2 x 2	2	10	0   2,5 / 0,7	0,44 / 0,14	10x10	32 / 1	1,8 / 1,5	1,46	0,44 / 1,60 / 1,79	10x10	3 / 13	0,9 / 0,6
	2	20	0   2,6 / 1,0	0,37 / 0,95	10x10	27 / 7	1,0 / 1,2	1,69	0,27 / 1,75 / 1,79	10x10	2 / 11	0,9 / 0,7
	2	30	0   2,5 / 1,2	0,22 / 0,74	10x10	16 / 5	0,6 / 0,5	1,37	0,51 / 1,79 / 1,80	10x10	4 / 13	0,9 / 0,7
	2	40	0   2,5 / 1,2	0,24 / 0,69	10x10	15 / 5	0,6 / 0,5	1,72	0,29 / 1,73 / 1,78	10x10	2 / 13	0,9 / 0,7

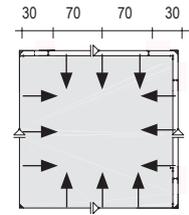
Es ist festzustellen, dass durch die Verschiebung der Spanschrauben das Tragverhalten des Spannbalkens verändert werden kann. Analog zu einem Balken auf zwei Stützen mit seitlichen Kragarmen entlastet der Kragarm die Feldmitte des Balkens. Mit zunehmender Kragarmlänge kann ein Angleichen von Stütz- und Feldmoment erreicht werden. Die damit einhergehende Reduzierung der Verformung des Spannbalkens beeinflusst die Membranspannungsverteilung. Die anfänglich hohen seitlichen Membranspannungen nehmen mit zunehmender Kragarmlänge des Spannbalkens ab. Bei einem Platzieren der Spanschrauben, 30cm von den Ecken versetzt, stellt sich ein homogenes Spannungsverhältnis in der Membran ein. Hohe Werte lassen sich dann in den vormals schwach belasteten Bereichen der Flächenmitte und niedrige Werte in den sonst stark gespannten Randzonen der Membranfläche beobachten. Dieses Optimum geht einher mit einer gleichmäßigen Momentenbeanspruchung des Spannbalkens.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden als Optimierung die Randabstände der Spanschrauben mit 15% der Rahmenkantenlänge angenommen.

Studie S6 Die folgende Studie S6 untersucht abschließend den Einfluss des Einfügens einer dritten, mittig platzierten Spanschraube in das Membranrahmensystem. Es resultieren also Abstände von 30cm von Rahmenecke zu Schraube und jeweils 70cm von Eckschraube zu der neu eingefügten Mittelschraube. Das Ergebnis der Studie hier schon einmal zusammengefasst: Das Einfügen einer dritten Spanschraube in der Mitte der Rahmen erweist sich als nicht optimal. Es wäre anzunehmen, dass eine Spanschraube in Feldmitte zu einer geringeren Verformung und dadurch zu einer Steigerung der Membrankräfte führen würde. Das Gegenteilige ist der Fall, da die Spanschraube in Feldmitte die Verformung des Rahmens auf den Spannbalken überträgt, resultiert in Feldmitte eine größere Verformung als bei Rahmensystemen, die mit dem Spannbalken durch lediglich zwei Spanschrauben verbunden sind.

## S6 Tragverhalten eines Spannbalkenrahmens mit 3 Spanschrauben

Rahmen: axb= 2x2m, bxh= 10x10cm, Holz, Schraubenabstand: 30-70-70-30cm  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt  
 Belastung: Vorspannung v= 2kN/m



Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil											
	V <sub>sp</sub> kN/m	Membran		Spannbalken				Schraube	Rahmen			
		V <sub>1</sub>   σ max / min mm   kN/m	M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub> kNm / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> %	U <sub>Q</sub> %	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub> mm	N <sub>3</sub> kN	M <sub>4</sub> / N <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> %	U <sub>Q</sub> %
2 x 2	2	0   2,4 / 1,3	0,16 / 0,90	10x10	12 / 6	0,5 / 0,4	1,12	0,51 / 1,80 / 1,79	10x10	4 / 13	0,9 / 0,7	

Tab. 3.17.

V<sub>sp</sub> - Vorspannung v [kN/m]

V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]

σ - Membranspannung [kN/m]

M<sub>2</sub> - max. Moment Spannbalken [kNm]

Q<sub>2</sub> - max. Querkraft Spannbalken [kN]

V<sub>2</sub> - max Verformung Spannbalken [mm]

V<sub>22</sub> - max Verformung Spannbalken [mm]

N<sub>3</sub> - max. Normalkraft Schraube [kN]

M<sub>4</sub> - max. Moment Rahmen [kNm]

N<sub>4</sub> - max. Normalkraft Rahmen [kN]

Q<sub>4</sub> - max. Querkraft Rahmen [kN]

V<sub>41</sub> - max Verformung Rahmen [mm]

V<sub>42</sub> - max Verformung Rahmen [mm]

U<sub>M</sub> - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]

U<sub>Q</sub> - Auslastung  $U_Q = (max(Q) / Q_{zul}) \times 100$  [%]

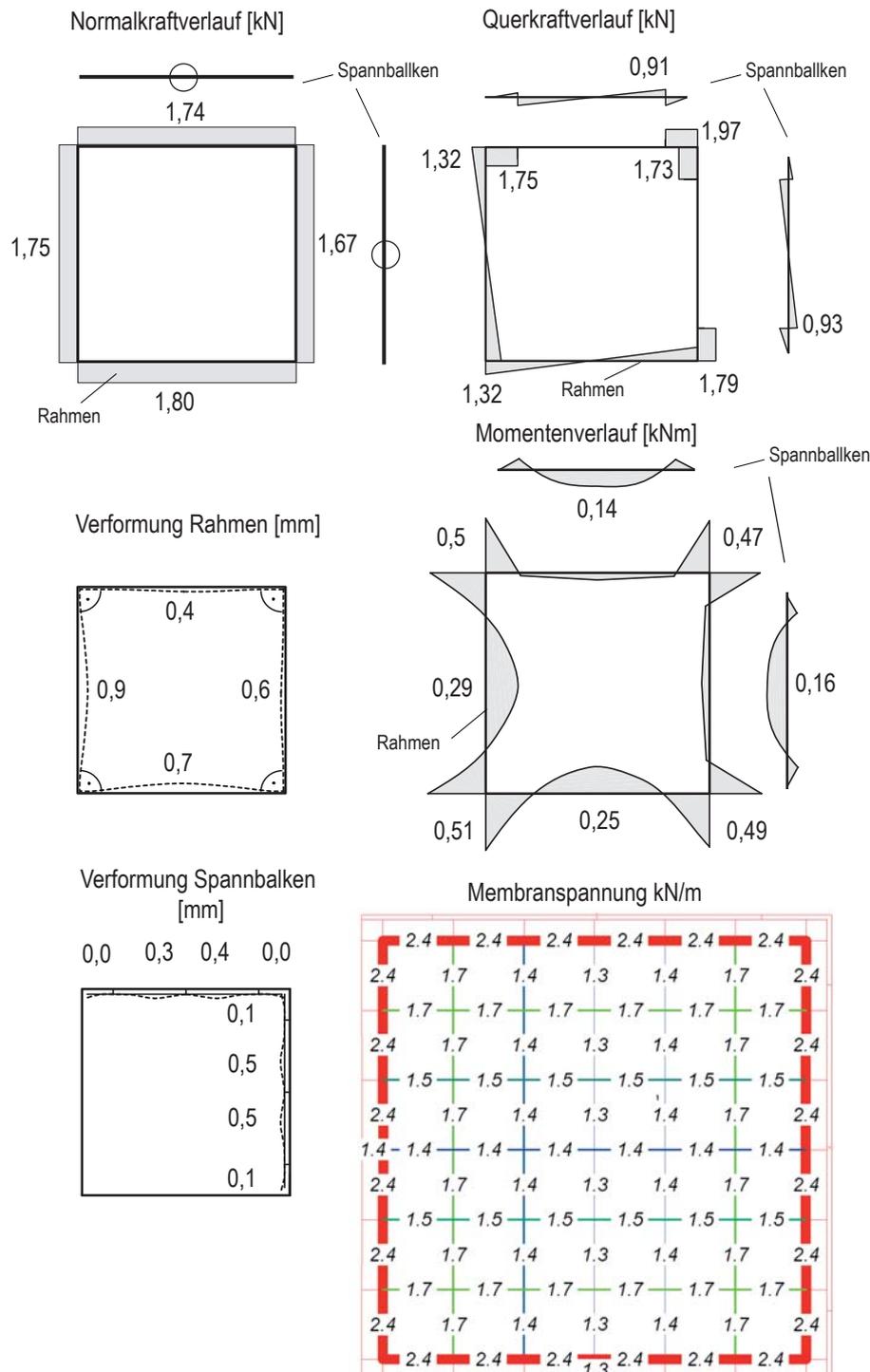


Abb. 180 a-e

Schnittgrößen und Verformung des Rahmens

Abb. 180 f

Membranspannung

Gewebeausrichtung:  
Schussrichtung horizontal

Ketttrichtung vertikal

### 3.3.3. Einwirkungen

Die Einwirkungen der bisherigen Studien beschränkten sich auf die Berücksichtigung der Vorspannung der Membran und den Eigenlasten von Rahmen und Membran. Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen nun Wind- und Schneelasten in die Untersuchungen der Module mit einfließen. Die Ermittlung der Windlasten erfolgt nach DIN 1055, Teil 4 (03.05), Schneelasten werden nach DIN 1055-5 (07.05) angesetzt.

#### Windlasten

Das Ansetzen von Windlasten ist ein sehr komplexes Thema und kann eigentlich nur durch Modellversuche im Windkanal oder CFD-Simulationen am Computer ermittelt werden. Da die hier vorgestellten Studien aber kein Einzelmodell beschreiben, sondern allgemeine Aussagen über den Einsatz von bespannten Rahmenmodulen als Gebäudehülle treffen sollen, werden die Maximalwindlasten, die die DIN 1055-4 vorgibt, als Bemessungsgrundlage herangezogen. Der Winddruck auf die Außenfläche eines Bauwerks wird angegeben mit:

$$3.14. \quad w_e = c_{pe} \cdot q(z_e)$$

Dabei ist  $c_{pe}$  der aerodynamische Beiwert für den Außendruck, der in Abhängigkeit von Gebäudeform und Bauteillage zu ermitteln ist.  $q$  ist der Geschwindigkeitsdruck und wird in Abhängigkeit von  $z_e$ , der Bezugshöhe, die Höhe der Oberkante der betrachteten Fläche über Gelände ermittelt.

Um trotz des Fehlens eines konkreten Gebäudes Aussagen über die Windlast  $w$  treffen zu können, werden einige Parameter für diese Studien festgelegt. Zum einen wird als Standort des Gebäudes Berlin gewählt, die Gebäudehöhe wird auf maximal 10m beschränkt. Damit kann der Geschwindigkeitsdruck  $q$  mit  $0,65\text{kN/m}^2$  festgelegt werden. Der aerodynamische Beiwert  $c_{pe}$  ist abhängig von Gebäudeform und Lage des betrachteten Rahmenmoduls auf dem Gebäude. Mit einem Gebäude von  $35 \times 20\text{m}$  und einer Höhe von  $7\text{m}$  wird in der Veröffentlichung [Wid07a] ein Gebäudevolumen vorgestellt, dass mit seinem Flachdach die in der DIN 1055-4 vorgesehenen höchsten Windbelastungen erfährt. Insofern können die Windlasten an diesem Gebäude als Bemessungsgrundlage für die Studien dieser Arbeit verwendet werden, um damit die Aussagen zur Dimensionierung der Rahmenmodule auf ein breites Anwendungsspektrum ausdehnen zu können. Die vier Abbildungen auf der nächsten Seite aus [Wid07a] illustrieren übersichtlich Lage und Größe des auftretenden Winddrucks bzw. Windsogs. Es ergeben sich folgende Windlastzonen auf dem Gebäude:

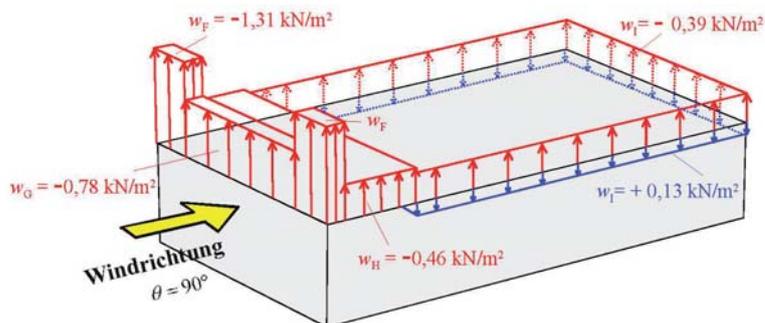
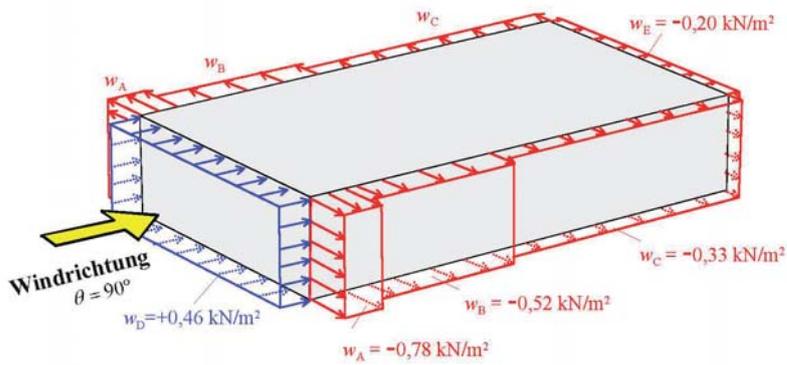
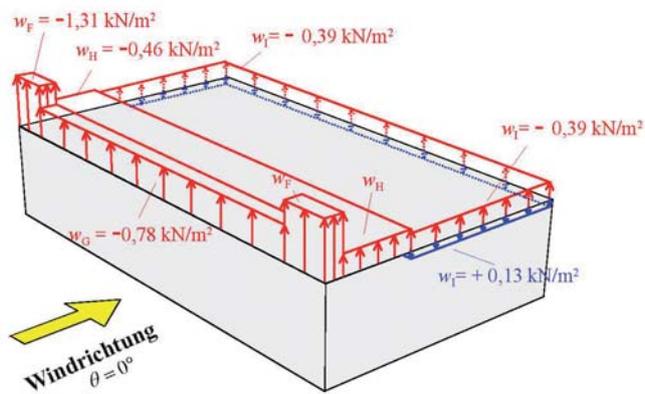
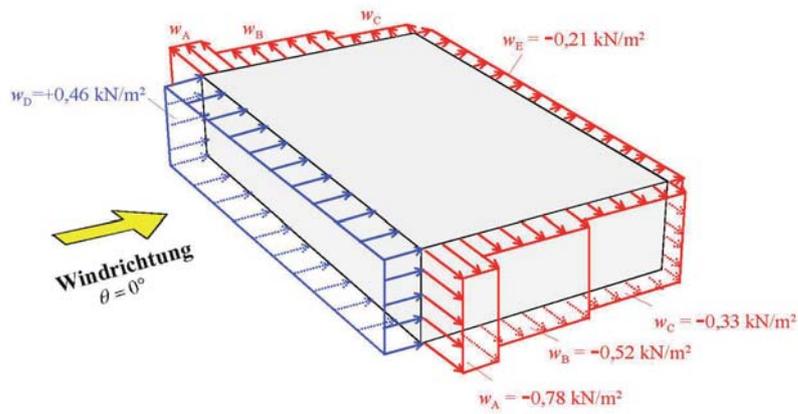
Im Fassadenbereich:

$$\begin{aligned} w_A &= -0,78\text{kN/m}^2 \\ w_B &= -0,52\text{kN/m}^2 \\ w_C &= -0,33\text{kN/m}^2 \\ w_D &= +0,46\text{kN/m}^2 \\ w_E &= -0,20\text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

Im Dachbereich:

$$\begin{aligned} w_F &= -1,31\text{kN/m}^2 \\ w_G &= -0,78\text{kN/m}^2 \\ w_H &= -0,46\text{kN/m}^2 \\ w_{I1} &= +0,13\text{kN/m}^2 \\ w_{I2} &= -0,39\text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

Abb. 181 a-d  
 Windlasten nach DIN  
 1055-4 (03.05) aus  
 [Wid07a]



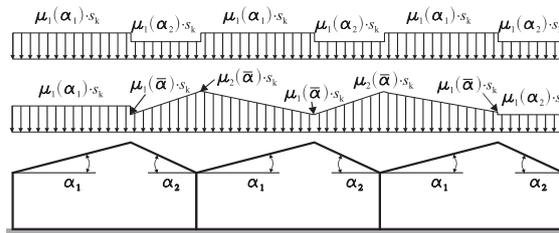
Schneelast

Die Schneelast wird nach DIN 1055-5 berechnet mit  $s_i = \mu_i \cdot s_k$ . Dabei ist  $s_i$  der charakteristische Wert der Schneelast auf dem Dach,  $\mu_i$  ein Formbeiwert entsprechend der vorliegenden Dachform und  $s_k$  der charakteristische Wert der Schneelast auf dem Boden. Auch für die Schneelast müssen zur Berechnung der Werte einige Angaben getroffen werden. Zum einen betrifft dies den Standort, der wiederum mit Berlin und einer Geländehöhe von 50m über dem Meeresspiegel festgelegt wird. Darüber hinaus müssen Aussagen zur Dachform getroffen werden, um die entsprechenden Werte auslesen zu können. Da auf Flachdächern die größten Schneelasten anfallen, soll als Bemessungsgrundlage das Flachdach herangezogen werden. Diese Parameter führen zu einer Schneelast von:

3.15. 
$$s_1 = \mu_i \cdot s_k = 0,8 \cdot 0,85 = 0,68 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Membranbespannte Flachdächer erzeugen zwischen ihren Hochpunkten Senken, in denen es zu erhöhten Schneeanisammlungen kommen kann. Als Beispiel sei auf die Ausstellungshalle in Kapitel 3.1.6. verwiesen. Für die Bemessung der Schneelast auf membranbespannten Flachdächern mit Senken muss eine erhöhte Schneelast angenommen werden. Bemessungsrelevant ist die Höhe der Senke. Bei maximalen Stichhöhen der Membran von 20% der jeweiligen Kantenlänge, resultieren maximale Neigungswinkel von  $\alpha=12^\circ$ . Die DIN geht in dem Abschnitt zu „aneinandergereihte Sattel- und Sheddächer“ auf diesen geometrischen Sonderfall ein, und ermittelt die erhöhte Schneelast wie folgt:

Abb. 182 aus [Wid 07]



3.16. 
$$s_2 = \mu_2 \cdot s_k = 0,8 + \frac{0,8 \cdot \alpha}{30^\circ} \cdot s_k = 0,8 + \frac{0,8 \cdot 12^\circ}{30^\circ} \cdot 0,68 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Der Artikel [Law07] hilft durch eine Anleitung zum Abschätzen der Schneelast diese Werte sinnvoll einzuordnen und zu verstehen. In der ersten Tabelle gibt er Schneelasten pro Kubikmeter Schnee in Abhängigkeit der Schneeart an und ermittelt anschließend exemplarisch die Eigenlast einer 85cm hohen Schneedecke:

Tab. 3.18 aus [Law07]

		mittlere Dichte im $\text{kg/m}^3$
Neuschnee	Die Schicht lässt sich mit der Faust oder der flachen Hand eindrücken	100
Gut gesetzter, verdichteter, trockener oder leicht feuchter Altschnee	Die Schicht lässt sich nur mit einem spitzen Bleistift oder einem Messer eindrücken. Aus dem Schnee lassen sich kompakte Blöcke ausstechen.	300
Stark durchnässter Altschnee	Beim leichten Drücken einer Probe (Schneeball) läuft sofort Wasser heraus.	500
Schnee-Eis (trüb)		800
Wasser-Eis (klar)		900

Schneeart	Mittlere Dichte ( $\text{kg/m}^3$ )	x	Schichtstärke (in m)	=	Auflast ( $\text{kg/m}^2$ )
Neuschnee	100	x	0,30	=	30
Altschnee trocken	300	x	0,50	=	150
Schnee-Eis	800	x	0,05	=	40
Summe:					<b>220</b>

---

Unter Berücksichtigung dieser anschaulichen Werte setzt die DIN als Regelschneelast mit  $s=0,68\text{kN/m}^2$  eine Schneedecke an, die dreimal so hoch ist, wie die oben beschriebene, sie entspricht also einer Höhe von rund 2,5m.

Der Schneeberg der in den maximal 60cm tiefen Senken liegen bleiben kann würde nach Annahme der oben beschriebenen Schneelast ein Zusatzgewicht von  $0,15\text{kN/m}^2$  verursachen. Ein Wert der über dem Lastzuschlag der DIN liegt.

#### Lastfallkombinationen

Für die Bemessung der Rahmenmodule ist die Beachtung von kombinierten Lastfällen notwendig. So muss Lastfall Schnee und Wind gleichzeitig angesetzt werden, sollten hieraus höhere Belastungen für das Gebäude entstehen. Die DIN 1055-100 regelt diese Lastfallkombinationen durch Vorgabe von Abminderungsfaktoren: Wird die volle Windlast angenommen kann die Schneelast mit dem Faktor 0,6 abgemindert werden. Bei voller Schneelast fließt die Windbelastung mit dem Faktor 0,5 ein. Folgende Lastfallkombinationen sind denkbar:

$$\text{LFK}_1 \Rightarrow q_1 = 1 \cdot w_F + 0,6 \cdot s_{i2} = -1,31 + 0,6 \cdot 0,76 = -0,85\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_2 \Rightarrow q_2 = 1 \cdot w_G + 0,6 \cdot s_{i2} = -0,78 + 0,6 \cdot 0,76 = -0,32\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_3 \Rightarrow q_3 = 1 \cdot w_H + 0,6 \cdot s_{i2} = -0,46 + 0,6 \cdot 0,76 = 0\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_4 \Rightarrow q_4 = 1 \cdot w_{i1} + 0,6 \cdot s_{i2} = 0,13 + 0,6 \cdot 0,76 = -0,58\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_5 \Rightarrow q_5 = 1 \cdot w_{i2} + 0,6 \cdot s_{i2} = -0,39 + 0,6 \cdot 0,76 = +0,06\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_6 \Rightarrow q_6 = 1 \cdot s_{i2} + 0,5 \cdot w_F = 0,76 + 0,5 \cdot -1,31 = +0,10\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_7 \Rightarrow q_7 = 1 \cdot s_{i2} + 0,5 \cdot w_G = 0,76 + 0,5 \cdot -0,78 = +0,37\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_8 \Rightarrow q_8 = 1 \cdot s_{i2} + 0,5 \cdot w_H = 0,76 + 0,5 \cdot -0,46 = +0,53\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_9 \Rightarrow q_9 = 1 \cdot s_{i2} + 0,5 \cdot w_{i1} = 0,76 + 0,5 \cdot 0,13 = +0,83\text{kN/m}^2$$

$$\text{LFK}_{10} \Rightarrow q_{10} = 1 \cdot s_{i2} + 0,5 \cdot w_{i2} = 0,76 + 0,5 \cdot -0,39 = +0,57\text{kN/m}^2$$

Durch die Kombination der Lastfälle Wind und Schnee resultieren keine Lastfälle die höher sind als die einfachen nichtkombinierten Lastfälle. Die Windbelastung  $w_F$  ist mit  $1,31\text{ kN/m}^2$  die maximale Sogkraft. Als Druckkraft liegt die Windlast im Fassadenbereich A mit  $w_A=0,78\text{kN/m}^2$  als Höchstbelastung vor.

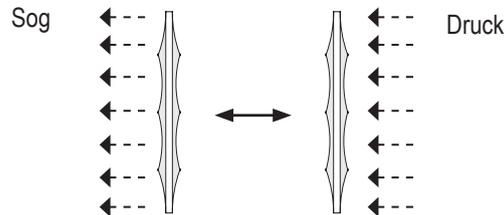
#### Ansetzen der veränderlichen Einwirkungen

Durch die geometrische Symmetrie der Rahmenmodule führen Sogkräfte zu identischen Beanspruchungen in der Membran und im Rahmen wie Druckkräfte der gleichen Größe. Die Skizze auf der folgenden Seite verdeutlicht diese Symmetrie. Die Lasten können, unabhängig ihrer Wirkungsrichtung, als Werte im Betrag angesetzt werden. Ein Rahmen der auf die Last durch Windsog  $w_F = -1,31\text{kN/m}^2$  bemessen wurde, braucht folglich nicht mehr auf die maximale Druckkraft von  $w_A=0,78\text{ kN/m}^2$  bemessen zu werden.

Insofern wird in den Studien als maßgebender Lastfall die Sogkraft von  $1,31\text{ kN/m}^2$  angesetzt. Mit ihr können Aussagen zur Dimensionierung der Rahmenmodule unabhängig ihrer Lage im Dach und Fassadenbereich getroffen werden. Das Ansetzen dieser Maximallast führt allerdings auch zu einer Überdimensionierung der Rahmen, die in weniger belasteten Bereichen des Gebäudes eingesetzt werden. Diese Ver-

einfachung wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch getroffen, um überhaupt Aussagen zur Dimensionierung der Rahmenmodule treffen zu können. Der Grad und Einfluss dieser Überdimensionierung wird im weiteren Verlauf in einer Studie zur Wirtschaftlichkeit genauer untersucht werden.

Abb. 183  
Lastsymetrie



### 3.3.4. Lastfälle und Lagerbedingungen

Die bisher vorgestellten Studien untersuchten Rahmenmodule im noch nicht eingebauten Zustand, also Rahmenmodule, die im Werk vorgefertigt und bespannt sind und bereits ihre endgültige Vorspannung durch das Anspannen der Spannschrauben erhielten. Die so vorgefertigten Module können auf die Baustelle gefahren und montiert werden. Dieser Zustand, der Vormontagezustand, wird durch eine mittige, verschiebliche Lagerung des Rahmens modelliert, der in den vorangegangenen Studien bereits untersucht wurde. Das Ansetzen von Vorspannung und Eigenlast unter Vernachlässigung von veränderlichen, äußeren Lasten ist für diesen Lastfall ausreichend, da Schnee- und Windbelastungen vor der Montage ausgeschlossen werden kann.

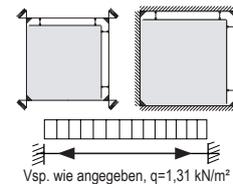
Der zweite zu untersuchende Zustand ist der montierte Zustand der Rahmenmodule. Nach dem Einbau der Module sind sie Wind- und Schneelasten ausgesetzt, sodass diese Einwirkungen bei ihrer Bemessung zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus verändern sich die Lagerbedingungen der Module. Sie richten sich nach Art der Befestigung des Rahmens an die Unterkonstruktion. Je nach Anzahl der Schrauben und ihrer Lage sind viele Lagerungen der Rahmen denkbar. An dieser Stelle muss erneut eine Vereinfachung vorgenommen werden, um die mögliche Vielfalt der Lagerungen überschaubar auf zwei Extremfälle zu reduzieren.

Das eine Extrem der Lagerung entsteht bei der Fixierung des Rahmens direkt auf der Gebäudewand durch eine Vielzahl von Schraubverbindungen. Diese Lagerung wird durch ein allseitiges Halten des Rahmens im statischen Modell abgebildet. Bei dieser Lagerung ist der äußere Rahmen fest mit der Unterkonstruktion verbunden und braucht nur aus konstruktiven Überlegungen heraus dimensioniert werden. Konstruktive Überlegungen sind hierbei notwendige Rahmenbreiten, die eine Aufnahme der Befestigungsmittel unter Einhaltung der vorgeschriebenen Mindestabstände ermöglichen. Nur für Spannbalken und Spannschrauben ist eine Bemessung erforderlich.

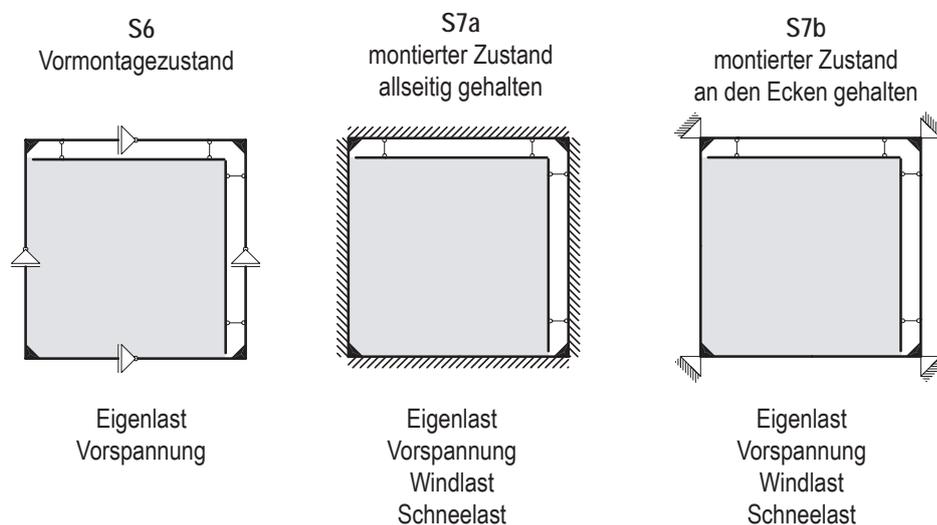
Das andere Extrem in der Lagerung des Rahmens entsteht bei seiner Befestigung des Rahmens an allen vier Ecken. Bei dieser Lagerung ist auch der äußere Rahmen auf Biegung und Schubkraft beansprucht und muss zusätzlich zu den Spannschrauben und Spannbalken bemessen werden. Die nachstehende Studie stellt die unterschiedlich gelagerten Rahmen dar und vergleicht sie.

## S7 Vergleich unterschiedlicher Lagerbedingungen sattelförmig bespannter Rahmenmodulen

Rahmen:  $axb=2x2m$ ,  $bxh=10x10cm$ , Holz, Schraubenabstand: 30-140-30cm  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt  
 Belastung: Vorspannung  $v=2kN/m$ ,  $q=1,31kN/m^2$



Rahmen a x b m		rechteckiges Holzprofil											
		Vsp. kN/m	Stufe	Membran	Spannbalken			Schraube	Rahmen				
				$V_1   \sigma_{max/min}$ mm   kN/m	$M_2 / Q_2$ kNm / kN	$b \times h$ cm	$U_M   U_Q$ %   %	$V_{21} / V_{22}$ mm	$N_3$ kN	$M_4 / N_4 / Q_4$ kNm / kN / kN	$b \times h$ cm	$U_M   U_Q$ %   %	$V_{41} / V_{42}$ mm
2 x 2	2	S6	0   2,5 / 1,2	0,22 / 0,74	10x10	16 / 5	0,6 / 0,5	1,3	0,51 / 1,79 / 1,80	10x10	4 / 13	0,9 / 0,7	
		S7a	71   6,5 / 2,6	0,97 / 3,42	10x10	71 / 25	0,6 / 0,8	4,9	0,0 / 0,00 / 0,0	10x10	0 / 0	0,0 / 0,0	
		S7b	81   5,4 / 2,6	0,77 / 2,90	10x10	56 / 21	1,6 / 2,0	4,3	1,56 / 0,0 / 4,25	10x10	114 / 31	2,1 / 2,5	



Tab. 3.19.

Vsp - Vorspannung v [kN/m]

$V_1$  - max Verformung Membran [mm]

$\sigma$  - Membranspannung [kN/m]

$M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]

$Q_2$  - max. Querkraft Spannbalken [kN]

$V_2$  - max Verformung Spannbalken [mm]

$V_{22}$  - max Verformung Spannbalken [mm]

$N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]

$M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]

$N_4$  - max. Normalkraft Rahmen [kN]

$Q_4$  - max. Querkraft Rahmen [kN]

$V_{41}$  - max Verformung Rahmen [mm]

$V_{42}$  - max Verformung Rahmen [mm]

$U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]

$U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (\max(Q) / Q_{zul}) \times 100$  [%]

Abb. 184  
statische Systeme

Der direkte Vergleich der drei unterschiedlich gelagerten Rahmenmodule gibt Aufschluss welche Lagerung für die Bemessung der Tragelemente maßgebend ist. Es fällt auf, dass aus dem Vormontagezustand keine Maximalbelastungen hervorgehen. Werden die Rahmenmodule also auf Belastungen im montierten Zustande bemessen, deckt diese Bemessung den Vormontagezustand komplett ab.

Der Spannbalken und die Spannschrauben werden im allseitig gehaltenen Zustand des Rahmens am stärksten beansprucht. Im eckgehaltenen Zustand fällt diese Beanspruchung geringer aus. Grund hierfür ist die Verformung des Rahmens, die zu einer Entlastung von Schraube und Spannbalken führt. Diese Verformung wird im allseitig gehaltenen Zustand nicht zugelassen, sodass Schrauben und Spannbalken nicht entlastet werden und die volle Belastung aufnehmen müssen. Für die Bemessung von Spannbalken und Schrauben muss also die allseitige Lagerung berücksichtigt werden.

Der Rahmen hingegen wird im eckgehaltenen Zustand am stärksten belastet. Dabei tritt das maßgebende Moment als Eckmoment in der unteren rechten Rahmenecke auf. Für die Bemessung des Rahmens muss also die eckgehaltene Lagerung berücksichtigt werden.

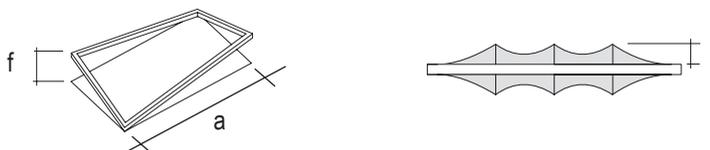
Nach den theoretischen Studien am flach gespannten Rahmenmodul sollen im weiteren Verlauf der Arbeit die drei Grundformen der Rahmenmodule auf ihre Trag- und Gebrauchsfähigkeit hin untersucht werden: Die Sattel- Buckel- und Bogenfläche.

Abb. 185 a-c  
Sattelform,  
Buckelform,  
Bogenform



Die Membran wird durch Auslenkung ihrer Fläche räumlich gekrümmt und erhält so eine geometrische Steifigkeit, die ihr Tragverhalten aktiviert. Die Krümmung wird bei den sattelförmig bespannten Modulen durch eine Auslenkung von zwei sich gegenüberliegenden Rahmenecken erzeugt. Buckel- und bogenförmig bespannte Module besitzen einen ebenen äußeren Rahmen. Die Auslenkung der Membran geschieht in der Fläche durch das Einfügen von Bögen bzw. Spreizen. Die Auslenkung der Membran wird in diesen Studien durch den Stich  $f$  angegeben. Stich  $f$  wird in Prozent angegeben und bezieht sich auf die längere Rahmenkante  $a$  des Moduls.

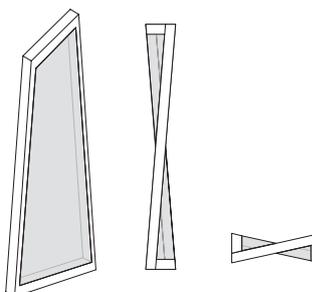
Abb. 186 a,b  
Der Stich  $f$  wird als  
Prozentwert bezogen  
auf die längere  
Rahmenkante  $a$   
angegeben



### 3.3.5. Tragverhalten der sattelförmig bespannten Rahmenmodule

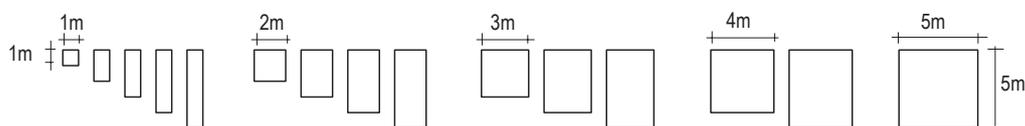
Die Sattelform erhält lediglich aus der Auslenkung der Rahmenecken ihre antiklastische Krümmung. Vorteilhaft dabei ist, dass die Membranfläche nicht mittig unterstützt werden muß und somit sich die Kraftübertragung der Membran auf die lineare Kaderschienenhalterung am Membranrand beschränken kann.

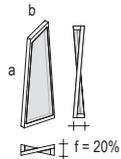
Abb. 187  
Sattelform



Zu Beginn wird das Tragverhalten der Sattelform an zwei Beispielen, einem quadratischen 2x2m großen und einem rechteckigen 2x4m großen Rahmenmodul analysiert und ausgewertet. Vorstudien untersuchen im weiteren Verlauf den Einfluss von Vorspannung und Stichhöhe auf das Tragverhalten der Rahmenmodule. Durch die Analyse und Bemessung der variierend vorgespannten, bzw. variierend gekrümmten Rahmenmodule werden die optimierten Einstellungen der Rahmenmodule ermittelt. Berücksichtigt werden dabei die 15 nachstehend skizzierten Geometrien zwischen 1m und 5m. Abschließend werden die Ergebnisse zu einer Tabelle zur Bemessung sattelförmig bespannter Rahmenmodule zusammengestellt.

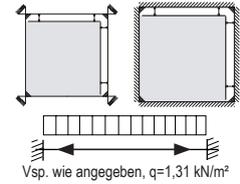
Abb.188  
Geometrivariation  
der Rahmenmodule  
1-5m





### S8 Tragverhalten des sattelförmig bespannten Rahmenmoduls

Rahmen:  $axb=2x2m$ ,  $bxh=10x12cm$ , Holz, Schraubenabstand: 30-140-30cm  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt  
 Belastung: Vorspannung  $v=2kN/m$ ,  $q=1,31kN/m^2$



Rahmen $axb$ m	rechteckiges Holzprofil										
	Vsp. kN/m	Membran	Spannbalken					Schraube	Rahmen		
		$V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	$M_2 / Q_2$	$b \times h$	$U_M$   $U_Q$	$V_{21} / V_{22}$	$N_3$	$M_4 / Q_4$	$b \times h$	$U_M$   $U_Q$	$V_{41} / V_{42}$
			kNm / kN	cm	%   %	mm	kN	kNm / kN	cm	%   %	mm
2x2	4	69   5,7 / 4,8	1,11 / 3,92	10x12	56 / 24	1,9 / 1,6		1,76 / 5,43	10x12	89 / 33	2,7 / 2,2

Tab. 3.20.

Vsp - Vorspannung  $v$  [kN/m]

$V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]

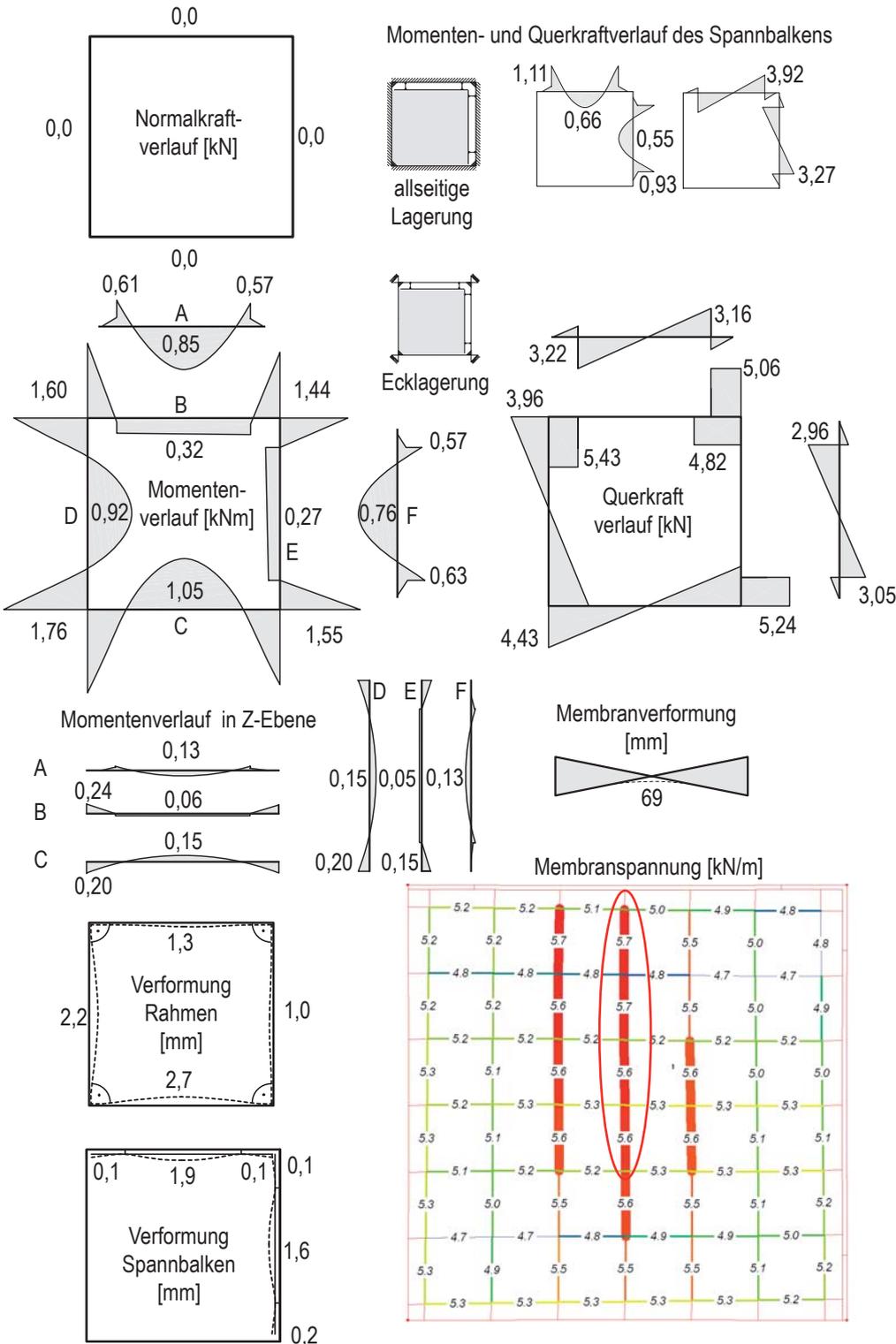
$M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 $Q_2$  - max. Querkraft Spannbalken [kN]  
 $V_2$  - max Verformung Spannbalken [mm]  
 $V_{22}$  - max Verformung Spannbalken [mm]

$N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]

$M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $N_4$  - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
 $Q_4$  - max. Querkraft Rahmen [kN]  
 $V_{41}$  - max Verformung Rahmen [mm]  
 $V_{42}$  - max Verformung Rahmen [mm]

$U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]  
 $U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (max(Q_{zul}) / Q_{max}) \times 100$  [%]

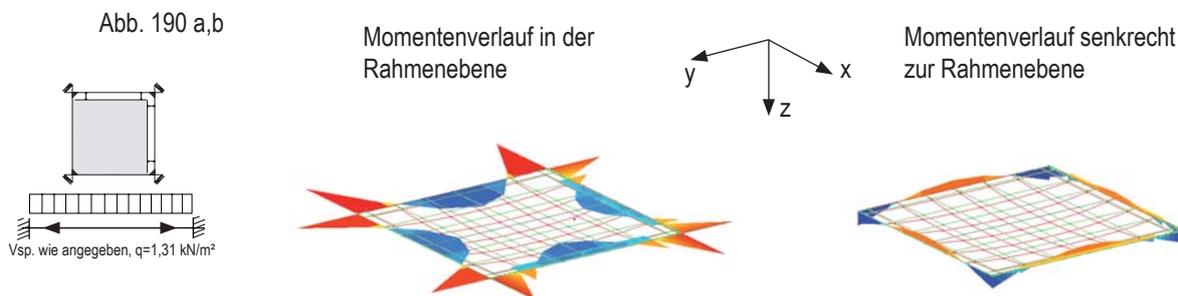
Abb. 189  
 Schnittgrößen,  
 Verformung des  
 Rahmens,  
 Membranspannung



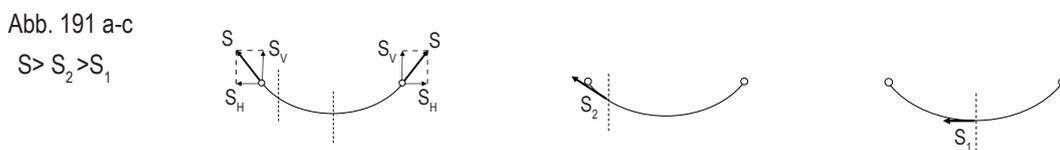
Studie S8 Studie S8 analysiert das Tragverhalten eines quadratischen 2x2m großen sattelförmig gespannten Rahmenmoduls. Die Stichhöhe des Rahmens beträgt 20% der Rahmenkante  $a$ , also 40cm. Der Holzrahmenquerschnitt liegt bei 10x12cm. Vorgespannt ist die PVC-PE III Membran mit 4 kN/m. Belastet wird das Modul mit einer Flächenlast  $q = 1,31 \text{ kN/m}^2$ , womit die auf Seite 179 ermittelte Maximallast  $w_F$  berücksichtigt wird. Für die Bemessung der Spannschrauben und Spannbalken wird die allseitige Lagerung des Rahmenmoduls untersucht, für die Bemessung des Rahmens die eckgehaltenen Lagerung.

Normalkraft Im montierten Zustand treten keine Normalkräfte in Rahmen und Spannbalken auf. Grund hierfür ist, wie zuvor erwähnt, die Lagerung der Membran in einer Kederschiene, durch die parallel zur Rahmenkante keine Kräfte übertragen werden können. Die Membran kann in der Kederschiene verrutschen (die geringfügige Reibung wird hier vernachlässigt). Vorspannung und äußere Lasten greifen also immer nur senkrecht zum Rahmen, bzw. Spannbalken an und führen ausschließlich zu Schub- und Biegebelastungen, die direkt in die Auflager abgeleitet werden.

Momenten- und Querkraftverlauf Querkraft- und Momentenverlauf unterscheiden sich qualitativ nicht von den Verläufen am ebenen Spannbalkenrahmen. Quantitativ ist durch die äußere Belastung  $q$  ein Anstieg der Beanspruchungen zu verzeichnen. Zusätzlich entstehen durch die Last  $q$  Beanspruchungen auch senkrecht zur Rahmenebene, also der Z-Achse. Sie wurden in Studie S8 für jede Rahmen- und Spannbalkenseite einzeln dargestellt. Ihre Größen sind jedoch so gering, dass die Beanspruchung senkrecht zur Rahmenebene durch die Tragreserve, die durch Bemessung in der Rahmenebene erzielt wird, abgedeckt ist. Nachstehend eine Gegenüberstellung der zwei unterschiedlichen Biegebeanspruchungen.



Membranspannung Auch die vorgespannte Membran wird durch den Einfluss der äußeren Last  $q$  höher beansprucht. Die Hauptbeanspruchung liegt sowohl für Kett- als auch für Schussrichtung in Flächenmitte und ist durch einen Anstieg zum Rahmenrand hin gekennzeichnet. (siehe umkreiste Werte der auf der linken Seite abgebildeten Membranspannung) Die Spannungszunahme zum Rand hin kann am einfachsten am Seilmodell erläutert werden. Denn auch hier ist die Seilkraft in Seilmitte geringer als am Rand. In Seilmitte kann das Seil lediglich durch den horizontalen Kraftanteil der resultierenden Auflagerkraft belastet sein. Die Neigung zum Rand hin erhöht die Seilkraft durch eine vertikale Lastkomponente. Sie ist verantwortlich für die Zunahme der Seilkraft am Rand und entspricht der festgestellten höheren Spannung am Membranrand.



---

Die rechts abgebildete Studie S9 ist an einem 2x4m großen Rahmen durchgeführt worden. Die Stichhöhe liegt bei 80cm, entsprechend 20% der Rahmenlänge  $a$ . Der Querschnitt ist mit 14x16cm den gestiegenen Beanspruchungen angepasst. Die Vorspannung wurde auf 3kN/m abgemindert. Die Flächenlast  $q$  liegt unverändert bei 1,31 kN/m<sup>2</sup>.

Studie S9

Die Ergebnisse zeigen vor allem einen quantitativen Anstieg der Beanspruchungen der Tragelemente. Sowohl die Biege- als auch die Schubbeanspruchung sind stark angestiegen. Qualitativ ist die Verteilung vor allem beim Querkraftverlauf identisch zum quadratischen Rahmenmodul. Der Momentenverlauf weicht von dem des quadratischen Rahmens auf oberer und unterer Rahmenseite ab: Die Stützmomente sind so stark angehoben, dass das Feldmoment mit auf die Seite der Stützmomente gezogen wird. Dies bedeutet, dass die oberen und unteren Rahmenseiten keine Wendepunkte mehr im Verformungsverlauf haben, insofern eine nach außen gewölbte Verformung aufweisen.

Momentenverlauf

Die Abbildung des verformten Rahmens bestätigt dieses Verhalten. Sie zeigt darüber hinaus auf, dass der rechte Winkel an den biegesteifen Rahmenecken auch im verformten Zustand erhalten bleibt. An der Nullstelle des Momentenverlaufs der seitlichen Rahmen befinden sich die Wendepunkte des Verformungsverlaufs der Rahmenseiten. Maximale Verformungen entstehen in allen Tragelementen in Feldmitte. Dies trifft auch auf die Membranverformung zu. Sie ist unter der Flächenlast  $q$  in Flächenmitte am größten.

Verformungen

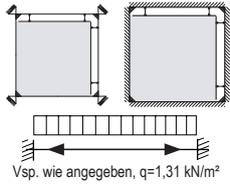
Nachdem exemplarischen Aufzeigen zweier Rahmenmodule unterschiedlicher Größe wird in der Studie S10 der Einfluß verschiedener Parameter auf die Konstruktion für alle Größen zwischen 1m bis 5m untersucht. Die Studie S10 variiert Stichhöhe und Vorspannkraft der Rahmenmodule, bei gleicher Flächenlast  $q = 1,31$  kN/m<sup>2</sup> und konstantem Rahmenquerschnitt von 8x10cm.

Studie S10

Zur Vereinfachung beschränkt sich die Studie S10 vorerst auf das Tragverhalten des Spannbalkens. Die tabellierten Ergebnisse beziehen sich also alle auf eine allseitig gehaltene Lagerung.

Unterhalb der Ergebniswerte aus den Studien PVC-PE bespannter Rahmen, die in schwarz abgedruckt sind, wird in Blau der Vergleichswert für ETFE bespannte Rahmenmodule angegeben. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich dieser beiden unterschiedlichen Materialien. Die für die Studie verwendete Folie ist 0,2mm stark. Ihre Steifigkeit wurde für biaxiales Tragverhalten mit 180 kN/m und für monoaxiales Tragverhalten mit 130 kN/m angenommen.

ETFE-Folie



### S9 Tragverhalten des sattelförmig bespannten 2x4m grossen Rahmens

Rahmen: axb=2x4m, bxh=14x16cm, Holz, Schraubenabstand: 15% der Rahmenlänge  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt  
 Belastung: Vorspannung v= 2kN/m, q= 1,31kN/m<sup>2</sup>

Abb. 3.21.  
 Vsp - Vorspannung v [kN/m]  
 V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]  
 σ - Membranspannung [kN/m]

Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil													
	Vsp, kN/m	Membran		Spannbalken					Schraube	Rahmen				
2 x 2	3	V <sub>1</sub> mm	σ max / min kN/m	M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub> kNm / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> %	U <sub>Q</sub> %	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub> mm	N <sub>3</sub> kN	M <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> %	U <sub>Q</sub> %	V <sub>41</sub> / V <sub>42</sub> mm
		89	6,6 / 3,4	4,16 / 7,68	14x16	85 / 25	11,9 / 1,2		10,5	4,13 / 6,83	14x16	84 / 22		8,9 / 0,7

M<sub>2</sub> - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 Q<sub>2</sub> - max. Querkraft Spannbalken [kN]  
 V<sub>2</sub> - max Verformung Spannbalken [mm]  
 V<sub>22</sub> - max Verformung Spannbalken [mm]  
 N<sub>3</sub> - max. Normalkraft Schraube [kN]  
 M<sub>4</sub> - max. Moment Rahmen [kNm]  
 N<sub>4</sub> - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
 Q<sub>4</sub> - max. Querkraft Rahmen [kN]  
 V<sub>41</sub> - max Verformung Rahmen [mm]  
 V<sub>42</sub> - max Verformung Rahmen [mm]  
 U<sub>M</sub> - Auslastung U<sub>M</sub>=(σ<sub>max</sub>/σ<sub>zul</sub>)x100 [%]  
 U<sub>Q</sub> - Auslastung U<sub>Q</sub>=(maxQ/Q<sub>zul</sub>)x100 [%]

Momenten- und Querkraftverlauf des Spannbalkens

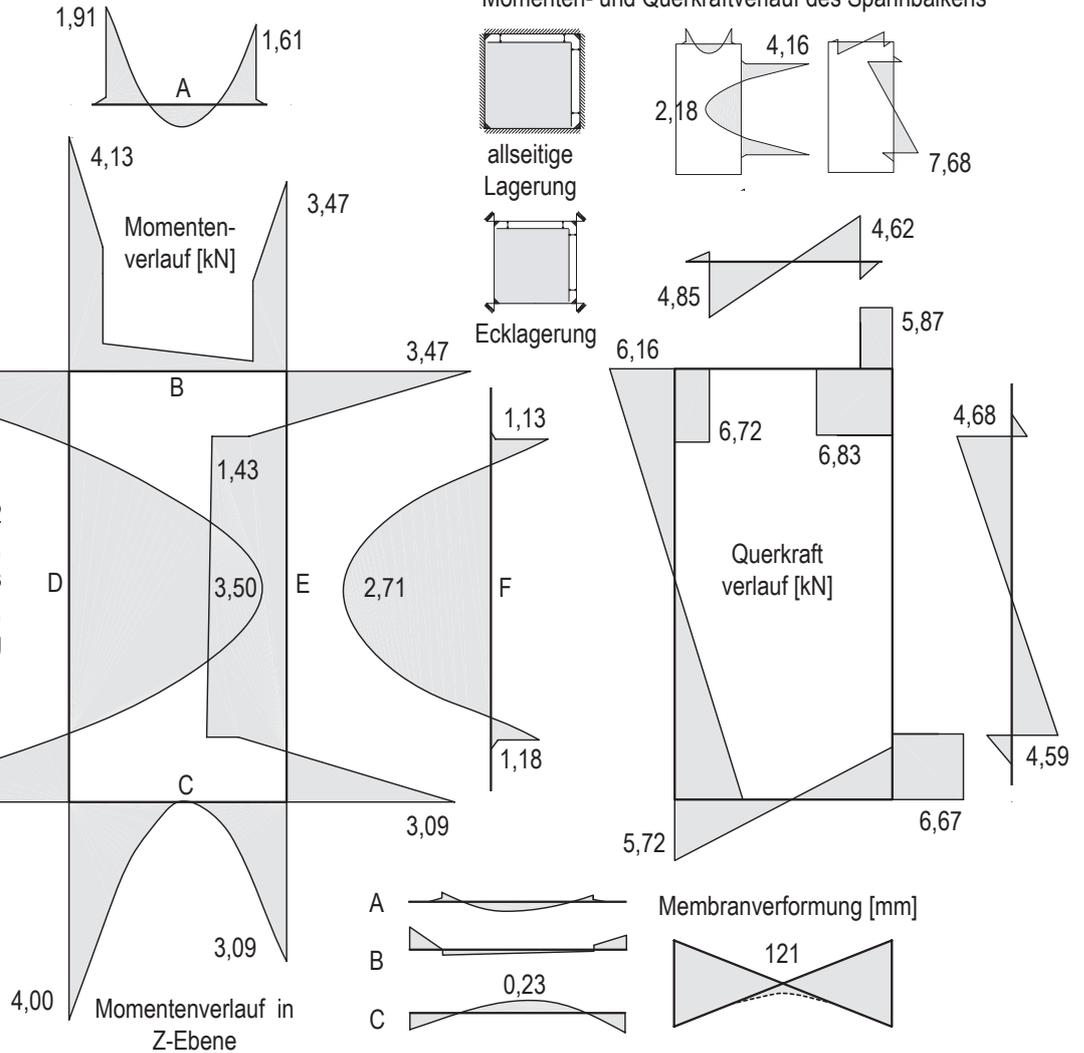
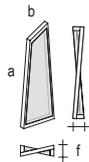
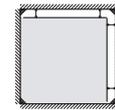


Abb. 192 Schnittgrößen, Verformung des Rahmens, Membranspannung



# S10 Studie zum Tragverhalten der Sattelflächen

Rahmen:  $axb =$  variierend,  $b \times h = 8 \times 10 \text{ cm}$ , Holz, Schraubenabstand: 15%  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, bzw. **ETFE-Folie 0,2mm**, Stich  $f =$  variierend  
 Belastung: Vorspannung  $V = 1 \text{ kN/m}$  bzw.  $2 \text{ kN/m}$ ,  $q = 1,31 \text{ kN/m}^2$



Vsp. wie angegeben,  $q = 1,31 \text{ kN/m}^2$

Rahmen $a \times b$ m	Membranvaspannung 1,0 kN/m							Membranvaspannung 2,0 kN/m								
	Stich f. %	Membran		Spannbalken				Schraube $N_3$ kN	Stich f. %	Membran		Spannbalken				Schraube $N_3$ kN
		$V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	$M_2 / Q_2$ kNm / kN	$b \times h$ cm	$U_M$   $U_Q$ %	$V_{21} / V_{22}$ mm	$V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m			$M_2 / Q_2$ kNm / kN	$b \times h$ cm	$U_M$   $U_Q$ %	$V_{21} / V_{22}$ mm			
1 x 1	5	27   4,1 / 1,3 44   2,1 / 1,1	0,11 / 0,83 0,08 / 0,61	8x10 8x10	10 / 7 7 / 6	0,0 / 0,1 0,0 / 0,0	1,5 0,8	24   4,4 / 1,9 35   2,7 / 1,7	0,13 / 1,01 0,10 / 0,79	8x10 8x10	12 / 9 9 / 7	0,0 / 0,1 30,0 / 30,0	1,7 1,1			
	10	27   4,1 / 1,3 44   2,1 / 1,1	0,11 / 0,83 0,08 / 0,61	8x10 8x10	10 / 7 7 / 6	0,0 / 0,1 0,0 / 0,0	1,5 0,8	24   4,4 / 1,9 34   2,6 / 1,7	0,13 / 1,00 0,11 / 0,79	8x10 8x10	12 / 9 10 / 7	0,0 / 0,1 0,0 / 0,0	1,7 1,1			
	20	27   4,1 / 1,2 44   2,1 / 1,0	0,11 / 0,84 0,08 / 0,61	8x10 8x10	10 / 8 7 / 6	0,0 / 0,0 0,0 / 0,0	1,5 0,8	23   4,4 / 1,8 34   2,6 / 1,6	0,13 / 1,00 0,11 / 0,80	8x10 8x10	12 / 9 10 / 7	0,0 / 0,1 0,0 / 0,0	1,7 1,1			
1 x 2	5	40   3,8 / 1,4 59   2,6 / 1,1	0,59 / 2,16 0,40 / 1,47	8x10 8x10	54 / 19 37 / 13	0,9 / 0,0 0,6 / 0,0	3,0 2,1	36   4,1 / 2,2 48   3,1 / 1,9	0,64 / 2,37 0,47 / 1,74	8x10 8x10	59 / 21 43 / 16	1,0 / 0,0 0,7 / 0,0	3,4 2,7			
	10	39   3,6 / 1,3 59   2,6 / 1,1	0,59 / 2,16 0,40 / 1,48	8x10 8x10	54 / 19 37 / 13	0,9 / 0,2 0,6 / 0,0	2,9 2,1	35   4,1 / 2,2 48   3,1 / 1,9	0,64 / 2,37 0,48 / 1,75	8x10 8x10	59 / 21 44 / 16	1,0 / 0,2 0,7 / 0,0	3,3 2,7			
	20	39   3,7 / 1,0 59   2,6 / 1,0	0,60 / 2,17 0,41 / 1,49	8x10 8x10	55 / 20 38 / 13	0,9 / 0,0 0,6 / 0,0	2,9 2,1	35   4,1 / 2,0 48   3,1 / 1,9	0,66 / 2,38 0,49 / 1,77	8x10 8x10	60 / 21 45 / 16	1,1 / 0,1 0,7 / 0,0	3,2 2,6			
1 x 3	5	49   3,8 / 1,2 68   2,4 / 1,0	1,16 / 2,94 0,81 / 2,00	8x10 8x10	106 / 27 74 / 18	3,9 / 0,0 2,7 / 0,0	4,7 3,4	45   4,2 / 2,1 56   2,9 / 2,1	1,26 / 3,15 0,97 / 2,38	8x10 8x10	115 / 28 89 / 21	4,1 / 0,0 3,2 / 0,0	5,2 3,9			
	10	48   3,9 / 1,1 68   2,4 / 0,9	1,18 / 2,96 0,82 / 2,02	8x10 8x10	108 / 27 75 / 18	3,9 / 0,0 2,8 / 0,0	4,6 3,1	45   4,3 / 1,6 56   2,8 / 1,9	1,26 / 3,15 0,98 / 2,42	8x10 8x10	115 / 28 90 / 22	4,1 / 0,0 8,6 / 0,1	5,0 3,6			
	20	48   4,0 / 0,6 68   2,5 / 0,6	1,19 / 2,98 0,84 / 2,05	8x10 8x10	109 / 27 77 / 19	3,9 / 0,1 2,9 / 0,0	4,3 3,0	45   4,4 / 1,2 56   3,8 / 1,4	1,27 / 3,15 1,02 / 2,50	8x10 8x10	116 / 28 93 / 23	4,2 / 0,1 3,5 / 0,1	4,8 3,6			
1 x 4	5	86   4,3 / 0,9 92   2,5 / 1,0	2,13 / 3,32 1,85 / 2,82	8x10 8x10	195 / 30 169 / 25	18,5 / 0,0 16,8 / 0,0	6,3 4,8	84   4,8 / 1,6 82   3,0 / 1,9	2,19 / 3,46 2,10 / 3,22	8x10 8x10	200 / 31 192 / 29	18,9 / 0,1 18,7 / 0,0	6,9 5,8			
	10	82   4,4 / 1,0 92   2,4 / 0,9	2,18 / 3,38 1,87 / 2,86	8x10 8x10	199 / 31 171 / 26	18,6 / 0,0 16,9 / 0,0	6,2 4,5	80   4,9 / 1,9 80   2,5 / 0,9	2,21 / 3,51 2,12 / 3,27	8x10 8x10	202 / 32 194 / 30	19,0 / 0,1 16,9 / 0,0	6,7 5,1			
	20	83   4,8 / 0,4 90   2,9 / 0,5	2,19 / 3,45 1,88 / 2,99	8x10 8x10	200 / 31 172 / 27	18,5 / 0,1 17,2 / 0,1	5,8 4,1	79   5,6 / 0,8 78   4,2 / 1,0	2,26 / 3,62 2,14 / 3,51	8x10 8x10	207 / 33 196 / 32	19,1 / 0,1 19,6 / 0,0	6,1 4,9			
1 x 5	5	82   4,4 / 1,2 89   2,5 / 1,0	2,13 / 3,35 1,85 / 2,83	8x10 8x10	195 / 30 169 / 26	18,6 / 0,0 16,8 / 0,0	6,6 5,7	80   4,8 / 1,7 79   3,0 / 2,0	2,19 / 3,47 2,10 / 3,23	8x10 8x10	200 / 31 192 / 29	18,9 / 0,1 18,7 / 0,0	6,9 6,8			
	10	82   4,4 / 1,0 89   2,5 / 0,8	2,15 / 3,46 1,87 / 2,89	8x10 8x10	197 / 31 171 / 26	18,7 / 0,1 17,0 / 0,0	6,3 5,3	79   4,8 / 1,7 79   3,1 / 1,6	2,24 / 3,57 2,15 / 3,32	8x10 8x10	205 / 32 197 / 30	19,1 / 0,1 19,0 / 0,0	7,3 6,4			
	20	80   4,0 / 0,6 87   4,9 / 0,2	2,16 / 3,58 1,88 / 3,09	8x10 8x10	198 / 31 172 / 27	18,6 / 0,1 18,8 / 0,0	5,3 5,2	78   8,6 / 0,3 78   9,8 / 0,7	2,27 / 3,71 2,17 / 3,47	8x10 8x10	208 / 33 198 / 31	18,8 / 0,3 18,7 / 0,4	7,0 6,2			
2 x 2	5	78   6,0 / 1,5 130   3,2 / 1,4	0,64 / 2,24 0,46 / 1,63	8x10 8x10	59 / 20 42 / 15	1,0 / 1,4 0,7 / 0,7	4,5 2,4	73   6,2 / 2,7 112   3,6 / 2,6	0,71 / 2,52 0,54 / 1,91	8x10 8x10	65 / 23 49 / 17	1,1 / 1,5 0,8 / 0,8	5,0 3,0			
	10	78   6,0 / 1,4 130   3,1 / 1,4	0,64 / 2,24 0,46 / 1,63	8x10 8x10	59 / 20 42 / 15	1,0 / 1,4 0,7 / 0,7	4,3 2,3	72   6,2 / 2,6 111   3,6 / 2,5	0,72 / 2,52 0,54 / 1,92	8x10 8x10	66 / 23 49 / 17	1,1 / 1,5 0,9 / 0,9	4,9 3,0			
	20	77   6,0 / 1,4 129   3,2 / 1,3	0,65 / 2,26 0,47 / 1,64	8x10 8x10	59 / 20 43 / 15	1,1 / 1,5 0,8 / 0,8	4,0 2,2	72   6,2 / 2,5 111   3,6 / 2,5	0,73 / 2,55 0,55 / 1,93	8x10 8x10	67 / 23 50 / 17	1,2 / 1,6 0,9 / 0,9	4,8 2,8			
2 x 3	5	105   5,9 / 1,8 159   3,6 / 1,3	1,72 / 4,22 1,27 / 3,06	8x10 8x10	157 / 38 116 / 28	5,9 / 1,3 4,4 / 0,6	5,8 4,4	99   6,2 / 2,9 141   3,9 / 2,1	1,82 / 4,46 1,20 / 3,38	8x10 8x10	166 / 40 110 / 31	6,2 / 1,4 4,8 / 0,8	6,4 4,8			
	10	103   5,9 / 1,9 158   4,0 / 1,2	1,74 / 4,30 1,28 / 3,09	8x10 8x10	159 / 39 117 / 28	6,0 / 1,4 6,3 / 1,4	5,6 4,1	99   6,2 / 2,8 139   3,9 / 2,1	1,84 / 4,61 1,22 / 3,46	8x10 8x10	168 / 42 112 / 31	6,3 / 1,4 4,8 / 0,7	6,3 4,2			
	20	103   6,0 / 1,7 158   3,6 / 1,2	1,76 / 4,39 1,30 / 3,19	8x10 8x10	161 / 40 119 / 29	6,2 / 1,6 4,7 / 0,8	5,6 4,1	98   16,7 / 7,3 138   3,5 / 0,4	1,85 / 4,77 1,25 / 3,59	8x10 8x10	169 / 43 114 / 32	6,4 / 4,2 4,5 / 0,6	6,3 3,9			

Tab. 3.22.

Vsp - Vorspannung  $v$  [kN/m]

f - Stich [% von Rahmenkante a]

$V_1$  - max Verformung Membran [mm]

$\sigma$  - Membranspannung [kN/m]

$M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]

$Q_2$  - max. Querkraft Spannbalken [kN]

$N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]

$U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]

$U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (Q_{max} / Q_{zul}) \times 100$  [%]

Werte in Schwarz beziehen sich auf PVC-PE Membran Typ 3

Werte in Blau beziehen sich auf ETFE-Folie 0,2mm

### 3. Membranrahmenmodule - Tragverhalten sattelförmig bespannter Rahmenmodule

axb	f	Membran		Spannbalken				Schraube N <sub>3</sub>	Membran		Spannbalken				Schraube N <sub>3</sub>
		V <sub>1</sub>   σ <sub>max</sub> / min	M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub>	b x h	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub>	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub>	V <sub>1</sub>   σ <sub>max</sub> / min		M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub>	b x h	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub>	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub>			
2x4	5	122   5,2 / 1,5 178   3,4 / 1,1	2,82 / 5,48 2,04 / 3,88	8x10 8x10	258 / 49 187 / 35	15,9 / 1,2 12,0 / 0,5	8,3 5,6	119   5,7 / 2,5 158   3,8 / 2,1	2,91 / 5,67 2,25 / 4,28	8x10 8x10	266 / 51 206 / 39	16,3 / 1,3 13,1 / 0,7	8,8 6,3		
	10	122   5,2 / 1,4 178   3,4 / 1,1	2,83 / 5,50 2,06 / 3,91	8x10 8x10	259 / 50 188 / 35	16,0 / 1,2 12,2 / 0,5	8,1 5,5	118   5,7 / 2,4 158   3,8 / 2,1	2,87 / 5,70 2,27 / 4,32	8x10 8x10	263 / 51 208 / 39	16,4 / 1,3 13,2 / 0,7	8,7 6,2		
	20	121   5,4 / 1,1 176   3,4 / 1,1	2,87 / 5,54 2,33 / 4,00	8x10 8x10	263 / 50 190 / 36	16,5 / 1,6 12,6 / 0,7	7,9 5,2	117   5,9 / 2,3 156   3,8 / 2,1	2,96 / 5,74 2,33 / 4,42	8x10 8x10	271 / 52 213 / 40	16,9 / 1,7 13,8 / 0,9	8,3 5,9		
2x5	5	160   5,5 / 1,5 208   3,4 / 1,1	3,64 / 5,69 2,93 / 4,42	8x10 8x10	333 / 51 268 / 40	31,9 / 1,2 27,1 / 0,5	9,7 6,9	155   5,8 / 2,7 186   3,8 / 1,8	3,71 / 5,83 3,17 / 4,82	8x10 8x10	339 / 53 290 / 44	32,3 / 1,3 29,1 / 0,7	10,3 7,8		
	10	160   5,5 / 1,4 206   3,4 / 1,0	3,65 / 5,71 2,96 / 4,47	8x10 8x10	334 / 52 271 / 40	32,1 / 1,3 27,4 / 0,5	9,6 8,6	155   5,9 / 2,6 186   3,8 / 1,8	3,72 / 5,86 3,20 / 4,86	8x10 8x10	340 / 53 293 / 44	32,5 / 1,4 29,3 / 0,7	10,1 7,7		
	20	159   5,7 / 1,0 205   3,5 / 0,9	3,67 / 5,86 3,02 / 4,55	8x10 8x10	336 / 53 276 / 41	32,7 / 1,9 28,4 / 0,8	8,9 6,4	154   6,3 / 2,0 184   3,9 / 1,8	3,75 / 5,90 3,28 / 4,96	8x10 8x10	344 / 53 300 / 45	33,1 / 2,1 30,4 / 1,0	9,4 7,2		
3x3	5	147   7,4 / 1,2 236   4,0 / 1,4	1,62 / 3,82 1,28 / 3,02	8x10 8x10	148 / 34 117 / 27	5,7 / 8,7 4,6 / 4,6	8,4 4,5	141   7,1 / 2,7 212   4,4 / 2,5	1,87 / 4,45 1,43 / 3,39	8x10 8x10	171 / 40 131 / 31	6,5 / 8,4 5,1 / 5,1	8,8 5,2		
	10	145   7,0 / 1,6 236   4,0 / 1,4	1,74 / 4,10 1,29 / 3,12	8x10 8x10	159 / 37 118 / 28	6,2 / 8,3 4,7 / 4,7	8,1 4,3	138   7,0 / 1,6 236   4,0 / 1,4	1,92 / 4,62 1,48 / 3,51	8x10 8x10	176 / 42 135 / 32	6,2 / 8,3 4,7 / 4,7	8,4 4,9		
	20	143   6,8 / 1,7 225   3,9 / 1,4	1,83 / 4,46 1,31 / 3,27	8x10 8x10	167 / 40 120 / 30	6,2 / 8,4 4,7 / 4,7	7,8 4,3	134   7,0 / 2,5 201   4,3 / 2,2	1,97 / 4,84 1,50 / 3,66	8x10 8x10	180 / 44 137 / 33	6,7 / 8,6 5,2 / 5,2	8,2 4,7		
3x4	5	185   7,2 / 2,5 277   4,4 / 1,4	3,27 / 6,33 2,59 / 4,90	8x10 8x10	299 / 57 237 / 44	18,6 / 8,4 15,2 / 4,3	8,9 6,6	178   7,4 / 3,3 252   4,7 / 2,4	3,40 / 6,60 2,77 / 5,26	8x10 8x10	311 / 60 253 / 47	19,2 / 8,6 16,2 / 4,8	9,6 7,3		
	10	184   7,2 / 2,5 277   4,4 / 1,4	3,29 / 6,35 2,60 / 4,99	8x10 8x10	301 / 57 238 / 45	18,8 / 8,6 15,4 / 4,4	8,9 6,6	176   7,3 / 3,3 252   4,7 / 2,3	3,42 / 6,63 2,79 / 5,29	8x10 8x10	313 / 60 255 / 48	19,4 / 8,8 16,3 / 5,0	9,5 7,2		
	20	183   7,1 / 2,4 276   4,3 / 1,3	3,35 / 6,40 2,61 / 5,12	8x10 8x10	306 / 58 239 / 46	19,5 / 9,3 16,1 / 4,8	8,7 6,4	176   7,2 / 3,1 251   4,6 / 2,2	3,48 / 6,69 2,85 / 5,37	8x10 8x10	318 / 60 261 / 48	20,1 / 9,6 17,1 / 5,4	9,3 7,1		
3x5	5	230   7,5 / 2,4 338   4,1 / 1,3	4,41 / 6,89 3,55 / 5,35	8x10 8x10	403 / 62 325 / 48	38,9 / 8,6 33,3 / 3,7	11,2 8,0	223   7,8 / 3,1 308   4,4 / 2,3	4,51 / 6,37 3,78 / 5,01	8x10 8x10	413 / 64 346 / 52	39,5 / 8,9 35,0 / 4,4	11,9 9,0		
	10	230   7,5 / 2,4 338   4,1 / 1,2	4,43 / 6,90 3,57 / 5,38	8x10 8x10	405 / 62 327 / 49	39,2 / 8,9 33,6 / 3,8	11,0 7,9	223   7,7 / 3,0 308   4,3 / 2,2	4,53 / 6,38 3,80 / 5,02	8x10 8x10	414 / 64 348 / 52	39,8 / 9,3 35,4 / 4,5	11,8 8,9		
	20	230   7,5 / 2,3 337   4,1 / 1,1	4,46 / 6,98 3,61 / 5,46	8x10 8x10	408 / 63 330 / 49	40,2 / 10,3 34,7 / 4,4	10,6 7,7	223   7,7 / 2,9 307   4,3 / 1,9	4,56 / 6,42 3,87 / 5,07	8x10 8x10	417 / 64 354 / 52	40,8 / 10,6 36,7 / 5,2	11,3 8,7		
4x4	5	245   7,6 / 1,8 365   4,7 / 1,5	3,16 / 6,01 2,58 / 4,60	8x10 8x10	289 / 54 236 / 42	20,4 / 25,8 16,5 / 16,5	12,2 6,7	237   7,6 / 2,8 335   5,0 / 2,6	3,50 / 6,37 2,80 / 5,01	8x10 8x10	320 / 58 256 / 45	21,4 / 26,0 17,6 / 17,6	12,6 7,7		
	10	243   7,9 / 1,3 365   4,7 / 1,5	3,18 / 6,09 2,60 / 4,62	8x10 8x10	291 / 55 238 / 42	19,7 / 27,0 16,7 / 16,7	11,8 6,5	237   7,7 / 2,7 335   4,8 / 2,5	3,52 / 6,38 2,81 / 5,02	8x10 8x10	322 / 58 257 / 45	21,6 / 26,2 17,8 / 17,8	12,2 7,6		
	20	243   7,6 / 1,7 363   4,6 / 1,4	3,19 / 6,14 2,62 / 4,75	8x10 8x10	292 / 55 240 / 43	21,5 / 27,0 17,4 / 17,4	11,7 6,4	237   7,7 / 2,6 333   4,9 / 2,4	3,54 / 6,42 2,83 / 5,09	8x10 8x10	324 / 58 259 / 45	22,5 / 27,2 18,6 / 18,6	12,0 7,5		
4x5	5	299   8,1 / 1,7 426   4,8 / 1,6	4,74 / 7,19 4,07 / 6,02	8x10 8x10	434 / 65 372 / 54	27,2 / 34,1 15,8 / 39,1	12,8 9,1	291   8,3 / 2,8 395   5,0 / 2,7	4,88 / 7,46 4,28 / 6,37	8x10 8x10	446 / 67 391 / 58	43,9 / 27,5 40,6 / 17,1	13,3 10,3		
	10	299   8,1 / 1,7 426   4,8 / 1,5	4,74 / 7,22 4,08 / 6,05	8x10 8x10	434 / 65 373 / 55	27,6 / 43,4 16,1 / 39,5	12,7 9,0	291   8,3 / 2,7 395   5,0 / 2,7	4,89 / 7,49 4,29 / 6,42	8x10 8x10	447 / 68 392 / 58	44,2 / 27,9 41,0 / 17,4	13,2 10,2		
	20	299   8,1 / 1,6 424   4,8 / 1,5	4,77 / 6,23 4,12 / 6,12	8x10 8x10	436 / 65 377 / 55	29,2 / 44,6 17,2 / 40,9	12,5 8,9	291   8,3 / 2,6 524   7,9 / 2,7	4,91 / 7,50 4,30 / 6,51	8x10 8x10	449 / 68 393 / 59	45,5 / 29,5 58,9 / 27,1	13,0 10,1		
5x5	5	365   8,8 / 1,9 516   5,2 / 1,6	4,95 / 7,50 4,08 / 6,41	8x10 8x10	453 / 68 373 / 58	45,4 / 54,0 39,8 / 39,8	16,0 9,2	356   9,1 / 3,0 481   5,5 / 2,7	5,15 / 7,86 4,33 / 6,70	8x10 8x10	471 / 71 396 / 60	46,7 / 54,0 41,5 / 41,5	16,8 10,6		
	10	365   8,8 / 1,9 516   5,2 / 1,5	4,96 / 7,51 4,09 / 6,42	8x10 8x10	454 / 68 374 / 58	45,8 / 54,4 40,2 / 40,2	15,8 9,0	356   9,2 / 2,9 481   5,5 / 2,6	5,15 / 7,87 4,34 / 6,72	8x10 8x10	471 / 71 397 / 61	47,0 / 54,0 41,9 / 41,9	16,4 10,4		
	20	363   8,8 / 1,7 514   5,1 / 1,4	5,01 / 7,58 4,10 / 6,45	8x10 8x10	458 / 68 375 / 58	47,4 / 56,0 41,7 / 41,7	15,8 9,0	355   9,1 / 2,7 480   5,4 / 2,5	5,20 / 7,92 4,35 / 6,78	8x10 8x10	476 / 71 398 / 61	48,7 / 56,0 43,5 / 43,5	16,4 10,4		

Nachfolgend eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus Studie S10:

In der linken Spalte wurden Rahmenmodule mit einer Vorspannung von 1kN/m untersucht, in der rechten Rahmenmodule mit einer Vorspannung von 2kN/m. Die Ergebnisse zeigen, dass höhere Vorspannungen zu geringeren Membranverformungen führen, zugleich aber die Membranspannungen ansteigen lassen. Diese Mehrbelastung führt zu höherer Belastung des Spannbalkens sowie der Spansschrauben.

Vorspannung

Auch die Zunahme der Größe der Rahmengenometrien führt zu höherer Belastung von Membran und Rahmen. Vergleicht man eine rechteckige mit einer quadratischen Rahmengenometrie gleicher Flächengröße, so ist eine höhere Leistungsfähigkeit der quadratischen Rahmen festzustellen. Grund hierfür ist, dass bei rechteckigen Rahmenmodulen der Lastabtrag hauptsächlich über die kürzere Seite und damit ungleichmäßiger stattfindet. Dies führt zu höherer Belastung der seitlichen Rahmen. Wirtschaftlicher dagegen ist der gleichmäßige Lastabtrag quadratischer Rahmen, weil die Beanspruchungen der Rahmenseiten ähnlich ist. Auch die resultierende Membranspannung ist homogen und führt zu einer gleichmäßigen Ausnutzung von Kett- und Schussrichtung.

Rahmengenometrie

Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil, Membranvorspannung 1,0 kN/m						
	Stich f. % von a	Membran	Spannbalken				Schraube
		V <sub>1</sub>   σ max / min mm   kN/m	M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub> kNm   kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> %   %	V <sub>21</sub> /V <sub>22</sub> mm	N <sub>3</sub> kN
1x4	20	49   4,0 / 0,6 116   4,9 / 0,2	216 / 3,58 188 / 3,09	8x10 8x10	198 / 31 172 / 27	3,9 / 0,1 2,9 / 0,0	4,3 5,7
2x2	20	77   6,0 / 1,4 129   3,2 / 1,3	0,65 / 2,26 0,47 / 1,64	8x10 8x10	59 / 20 43 / 15	1,1 / 1,5 0,8 / 0,8	4,5 2,3

Tab. 3.23

Der unmittelbare Vergleich zwischen ETFE-Folien- und PVC-PE Membranbespannungen verdeutlicht die verschiedenen Eigenschaften dieser Materialien. Gleiche Belastungen führen bei quadratischen Rahmengenometrien zu 1,5- bis 1,6fach höheren Verformungen der ETFE Folie im Vergleich zu den Membranverformungen. Diese höhere Verformung wiederum verursacht im Vergleich zur Membran geringere Spannungen im Material. Wie beim Seilmodell ein größerer Stich zu geringeren Seilkräften führt, so entstehen durch größere Folienverformungen auch geringere Spannungen in der Folie. Geringere Schub- und Momentenbelastungen im Spannbalken sind die Folge. Zudem wird der Spannbalken durch die Folie schwächer verformt als durch die starke PVC-PE Membran.

Material  
PVC-PE / ETFE

Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil, Membranvorspannung 1,0 kN/m						
	Stich f. % von a	Membran	Spannbalken				Schraube
		V <sub>1</sub>   σ max / min mm   kN/m	M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub> kNm   kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> %   %	V <sub>21</sub> /V <sub>22</sub> mm	N <sub>3</sub> kN
2x2	20	77   6,0 / 1,4 129   3,2 / 1,3	0,65 / 2,26 0,47 / 1,64	8x10 8x10	59 / 20 43 / 15	1,1 / 1,5 0,8 / 0,8	4,5 2,3

Tab. 3.24

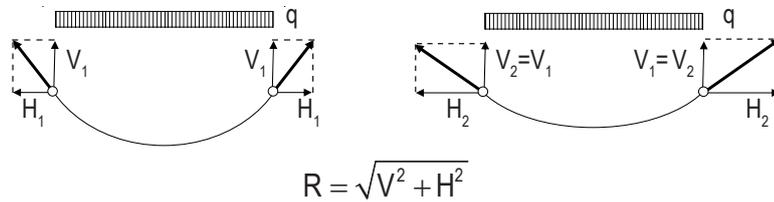
Die Zunahme der Stichhöhe der Membran führt erstaunlicherweise zu nur sehr geringen Ergebnisänderungen. Eine geringe Zunahme der Horizontalbelastung ist als Normalkraft in den Schrauben zu verzeichnen: je geringer der Stich, desto höher fällt die Normalkraft in den Schrauben aus. Dieses Verhalten ist am Seilmodell verständlich zu erklären und wird auf der folgenden Seite skizziert.

Stichhöhe

Die höheren Seilkräfte der schwach gekrümmten Rahmenmodule werden jedoch

durch das Verformungsverhalten der Membran relativiert. Je geringer der Stich, desto größer fällt die Verformung der Membran aus. Höhere Verformung reduziert wiederum den horizontalen Lastanteil in der Membran.

Abb. 193  
Erklärung am  
Seilmodell  
 $V_1 = V_2$   
 $H_1 < H_2$

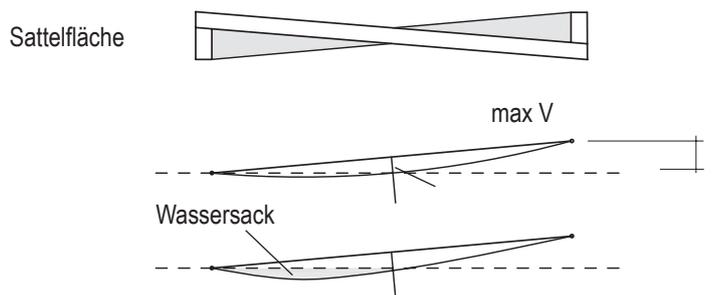


Tab. 3.25

Rahmen a x b m		rechteckiges Holzprofil, Membranvorspannung 1,0 kN/m							Schraube
		Stich f % von a	Membran	Spannbalken					
		$V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	$M_2$ / $Q_2$ kNm   kN	b x h cm	$U_M$   $U_Q$ %	$V_{21}$ / $V_{22}$ mm		$N_3$ kN	
2 x 2	5	78   6,0 / 1,5 130   3,2 / 1,4	0,64 / 2,24 0,46 / 1,63	8x10 8x10	59 / 20 42 / 15	1,0 / 1,4 0,7 / 0,7		4,5 2,4	
	10	78   6,0 / 1,4 130   3,1 / 1,4	0,64 / 2,24 0,46 / 1,63	8x10 8x10	59 / 20 42 / 15	1,0 / 1,4 0,7 / 0,7		4,3 2,3	
	20	77   6,0 / 1,4 129   3,2 / 1,3	0,65 / 2,26 0,47 / 1,64	8x10 8x10	59 / 20 43 / 15	1,1 / 1,5 0,8 / 0,8		4,0 2,2	

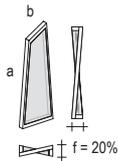
Die Wahl der geeigneten Stichhöhe wird nicht so sehr durch resultierende Membranspannung oder Spannbalkenbelastung beeinflusst: Änderungen der Stichhöhe, das hat die Studie S10 gezeigt, führen nur zu geringen Veränderungen in der Beanspruchung des Rahmenmoduls. Viel entscheidender für die Wahl der geeigneten Stichhöhe ist die Berücksichtigung der Wassersackbildung. Zu schwach gekrümmten Membranen weisen so große Verformungen auf, dass Wasser aus den sich bildenden Mulden nicht mehr ablaufen kann. Dieser Fall besteht bei Verformungen die größer als ungefähr  $f/3$  sind.

Abb. 194 a-c  
Wassersackbildung



Studie S11

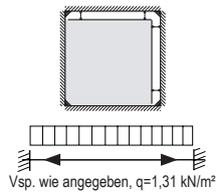
Die Studie S11 untersucht hierfür die Rahmengeometrien zwischen 1 und 5m auf die Gefahr der Wassersackbildung. Die Rahmen sind mit einer allseitig gehaltenen Lagerung modelliert wobei der Spannbalken unter Berücksichtigung der auftretenden Beanspruchungen individuell für jede Geometrie einzeln bemessen worden ist. Die Ergebnisse der linken Spalte beziehen sich auf Module unter Flächenlast  $q=1,31\text{kN/m}^2$  und einer Vorspannung von  $1\text{kN/m}$ , die Ergebnisse der rechten Spalte auf Module unter Flächenlast  $q$  und einer Vorspannung von  $2\text{kN/m}$ .



## S11 Studie zur Variation der Stichhöhe (Wassersackbildung) allseitig gehalten

Reahmen a x b m	Stich f, % von a	Vsp = 1kN/m		Vsp = 2kN/m	
		Membran	Spann- balken	Membran	Spann- balken
		V <sub>1</sub>   σ max/min mm   kN/m	b x h [cm]	V <sub>1</sub>   σ max/min mm   kN/m	b x h [cm]
1 x 1	5	25   2,3 / 1,2 32   1,5 / 0,9	3x5 4x6	24   4,4 / 1,9 23   2,1 / 1,6	3x5 3x5
	10	25   2,3 / 1,1 32   1,5 / 0,9	3x5 4x6	21   2,7 / 1,8 23   2,1 / 1,6	3x5 3x5
	20	25   2,3 / 1,1 32   1,6 / 0,9	3x5 4x6	21   2,7 / 1,7 23   2,1 / 1,6	3x5 3x5
1 x 2	5	33   2,4 / 1,3 45   1,8 / 1,0	6x8 6x8	38   3,0 / 1,4 39   2,4 / 1,8	4x6 4x6
	10	33   2,4 / 1,2 45   1,8 / 1,0	6x8 6x8	39   3,0 / 1,4 39   2,3 / 1,8	4x6 4x6
	20	33   2,5 / 1,0 45   1,8 / 1,0	6x8 6x8	39   3,1 / 1,4 39   2,4 / 1,7	4x6 4x6
1 x 3	5	31   2,6 / 1,4 50   1,7 / 1,0	8x10 8x10	34   3,1 / 2,1 38   2,9 / 2,4	8x10 8x10
	10	34   2,7 / 1,0 50   1,7 / 1,0	8x10 8x10	34   3,3 / 1,8 37   2,9 / 1,8	8x10 8x10
	20	38   2,8 / 0,7 50   1,9 / 0,7	8x10 8x10	34   4,0 / 1,2 37   3,7 / 1,4	8x10 8x10
1 x 4	5	53   2,9 / 1,1 59   1,8 / 1,0	10x12 10x12	50   3,4 / 1,7 46   2,8 / 1,7	10x12 10x12
	10	53   3,0 / 1,0 58   1,8 / 0,9	10x12 10x12	50   3,5 / 1,7 46   2,8 / 1,7	10x12 10x12
	20	52   3,0 / 1,0 57   1,8 / 0,9	10x12 10x12	45   2,8 / 1,7 45   2,8 / 1,7	10x12 10x12
1 x 5	5	51   2,9 / 1,0 58   1,8 / 1,0	10x12 10x12	48   3,4 / 1,5 45   2,8 / 1,7	10x12 10x12
	10	51   3,0 / 1,0 57   1,8 / 1,0	10x12 10x12	48   3,5 / 1,5 45   2,8 / 1,7	10x12 10x12
	20	50   4,8 / 0,0 58   5,2 / 0,2	10x12 10x12	47   9,6 / 0,3 44   10,5 / 0,7	10x12 10x12
2 x 2	5	61   4,0 / 1,4 98   2,2 / 1,3	8x10 10x12	59   3,8 / 2,5 77   2,7 / 2,3	6x8 8x10
	10	61   3,9 / 1,4 97   2,2 / 1,3	8x10 10x12	59   3,8 / 2,5 76   2,7 / 2,3	6x8 8x10
	20	60   4,0 / 1,3 97   2,2 / 1,3	8x10 10x12	59   3,8 / 2,5 75   2,8 / 2,2	6x8 8x10
2 x 3	5	78   4,0 / 1,5 118   2,6 / 1,1	10x12 12x14	76   4,3 / 2,3 97   3,0 / 1,9	8x10 10x12
	10	78   4,0 / 1,5 118   2,7 / 1,1	10x12 12x14	76   4,3 / 2,3 97   3,0 / 1,9	8x10 10x12
	20	78   4,0 / 1,3 117   2,7 / 1,1	10x12 12x14	76   4,3 / 2,3 97   3,0 / 1,9	8x10 10x12

a x b	f	Membran V <sub>1</sub>   σ max/min	Profil b x h	Membran V <sub>1</sub>   σ max/min	Profil b x h
2x4	5	88   3,7 / 1,3 128   2,5 / 1,1	10x12 14x16	79   4,0 / 2,4 105   3,0 / 2,0	10x12 12x14
	10	86   3,7 / 1,3 128   2,5 / 1,1	10x12 14x16	79   4,0 / 2,4 105   3,0 / 2,0	10x12 12x14
	20	88   4,0 / 1,3 129   2,5 / 1,1	10x12 14x16	81   4,1 / 2,4 106   2,9 / 1,9	10x12 12x14
2x6	5	95   3,8 / 1,4 137   2,5 / 0,9	12x14 14x16	88   4,2 / 2,1 116   2,9 / 1,8	12x14 12x14
	10	95   3,9 / 1,4 138   2,5 / 0,9	12x14 14x16	89   4,3 / 2,1 117   2,9 / 1,7	12x14 12x14
	20	96   3,8 / 0,9 137   3,5 / 1,0	12x14 14x16	89   4,4 / 1,9 117   3,0 / 1,7	12x14 12x14
3x3	5	105   5,8 / 1,0 177   2,8 / 1,3	12x14 18x20	98   5,5 / 2,6 148   3,3 / 2,5	12x14 16x18
	10	107   5,3 / 1,4 177   2,8 / 1,3	12x14 18x20	97   5,5 / 2,6 146   3,2 / 2,2	12x14 16x18
	20	102   5,3 / 1,4 168   2,8 / 1,2	12x14 18x20	94   5,5 / 2,3 140   3,2 / 2,1	12x14 16x18
3x4	5	128   5,3 / 2,1 204   3,2 / 1,3	14x16 22x24	118   5,6 / 2,6 173   3,6 / 2,1	14x16 18x20
	10	127   5,3 / 1,8 203   3,2 / 1,2	14x16 22x24	117   5,6 / 2,6 173   3,6 / 2,0	14x16 18x20
	20	127   5,4 / 1,7 202   3,2 / 1,1	14x16 22x24	117   5,6 / 2,5 172   3,6 / 2,0	14x16 18x20
3x5	5	141   5,0 / 1,7 202   3,6 / 2,0	16x18 22x24	134   5,6 / 2,6 202   3,6 / 2,0	14x16 22x24
	10	141   4,9 / 1,7 202   3,6 / 2,1	16x18 22x24	134   5,3 / 2,5 202   3,6 / 2,1	14x16 22x24
	20	140   5,1 / 1,5 200   3,6 / 1,9	16x18 22x24	133   5,4 / 2,4 200   3,6 / 1,9	14x16 22x24
4x4	5	159   6,5 / 1,5 156   7,0 / 1,6	16x18 16x18	148   6,8 / 2,6 148   6,7 / 2,6	16x18 16x18
	10	156   7,0 / 1,6 158   7,0 / 0,9	16x18 16x18	148   6,7 / 2,6 146   7,5 / 1,9	16x18 16x18
	20	158   7,0 / 0,9 156   6,6 / 1,5	16x18 18x20	146   7,5 / 1,9 156   6,7 / 2,6	16x18 16x18
4x5	5	164   6,5 / 1,6 165   6,5 / 1,6	18x20 18x20	155   6,7 / 2,7 156   6,7 / 2,7	16x18 16x18
	10	165   6,5 / 1,6 165   6,6 / 1,5	18x20 18x20	156   6,7 / 2,7 156   6,7 / 2,6	16x18 16x18
	20	165   6,6 / 1,5 213   7,7 / 1,4	18x20 22x24	156   6,7 / 2,6 200   7,9 / 2,5	16x18 22x24
5x5	5	214   7,7 / 1,6 214   7,7 / 1,5	22x24 22x24	202   7,9 / 2,7 202   7,9 / 2,6	22x24 22x24
	10	214   7,7 / 1,6 214   7,7 / 1,5	22x24 22x24	202   7,9 / 2,7 202   7,9 / 2,6	22x24 22x24
	20	213   7,7 / 1,4 213   7,7 / 1,4	22x24 22x24	200   7,9 / 2,5 200   7,9 / 2,5	22x24 22x24



Tab. 3.26.  
Rahmen: Holz, Querschnitt angepasst  
Bespannung: PVC-PE-Membran III,  
bzw. **ETFE-Folie 0,2mm**,  
Stich: variierend  
Belastung: Vorspannung V=1kN/m  
bzw. 2 kN/m, q=1,31kN/m²

Vsp - Vorspannung v [kN/m]  
f - Stich [% von Rahmenkante a]  
V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]  
σ - Membranspannung [kN/m]

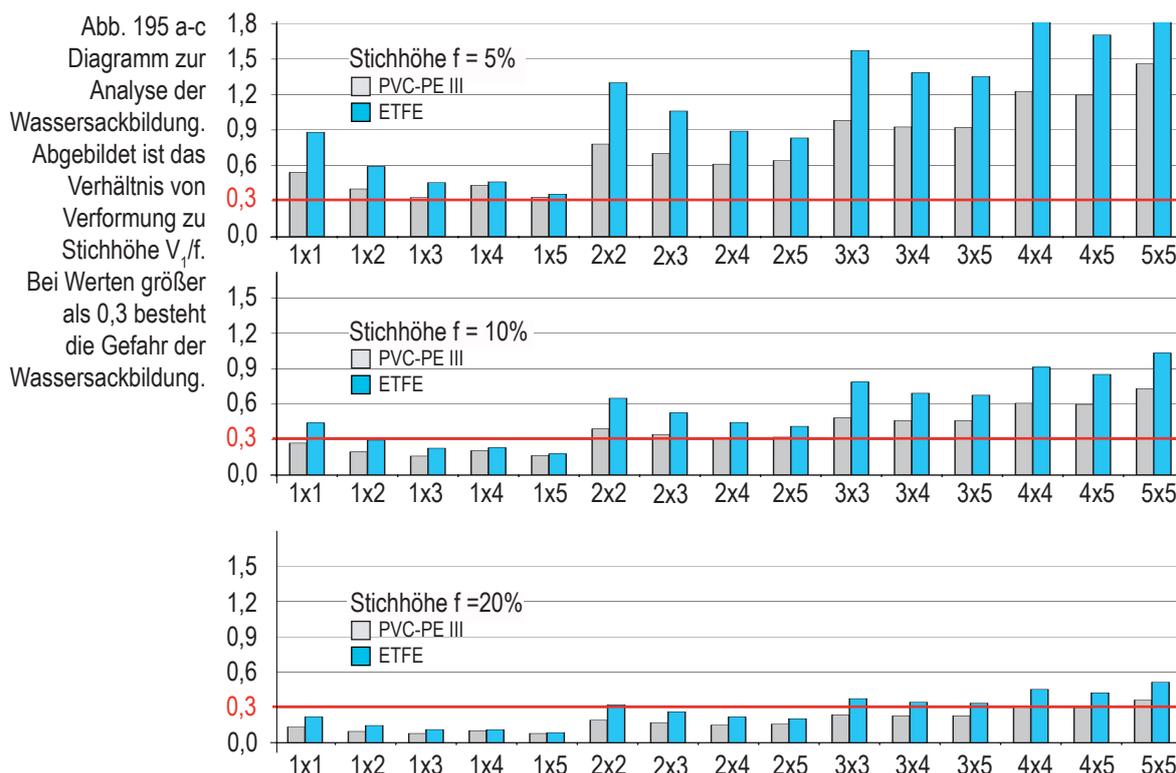
Werte in Schwarz beziehen sich auf  
PVC-PE Membran Typ 3

Werte in Blau beziehen sich auf  
ETFE-Folie 0,2mm

Membranverformungen in Rot  
sind größer als f/2, sodass die Gefahr  
der Wassersackbildung besteht.

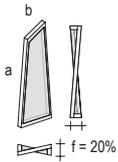
Wie in den Ergebnistabellen zu sehen, besteht die Wassersackbildung vor allem bei Rahmenmodulen, dessen Stichhöhe kleiner als 10% ist. Aber auch zehnpromtente Stichhöhen neigen noch teilweise, vor allem bei zu geringer Vorspannung, zur Wassersackbildung. Das nachstehende Diagramm fasst das Verhältnis von Verformung zu Stichhöhe grafisch zusammen, wobei Verformungen, die über  $0,3 \times f$  liegen, als problematisch anzusehen sind. Die grauen Balken bilden das Verhältnis der Verformung zur Stichhöhe von PVC-PE Membranen ab. Balken in Blau stehen für die Ergebnisse ETFE bespannter Rahmenmodulen.

Verhältnis von Verformung zu Stichhöhe  $V_1/f$  bei einer Vorspannung  $v= 1\text{ kN/m}$



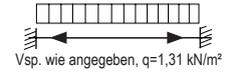
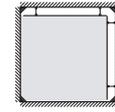
Erst bei einer Stichhöhe von 20% liegen die meisten Ergebnisse bei Werten unter 0,3 und damit in Bereichen, die nicht wassersackanfällig sind. Dieser Nachweis ist im Einzelfall zu prüfen. Anfällige Geometrien können durch Erhöhung des Stiches, oder der Vorspannung aktiviert werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Rahmengenometrien mit 20-prozentigem Stich untersucht. Sie liegen im sicheren Bereich bezüglich der Verformung und können prototypisch als Bemessungsbeispiel auch für leicht variierende Stichhöhen gelten.

Studie S12 Durch die Variation der Vorspannung kann das Tragverhalten der Folien bzw. Membrane wesentlich stärker gesteuert und eingestellt werden als dies durch die Variation der Stichhöhe zu erreichen ist. Insofern wird in der nachfolgenden Studie S12 anstelle der Variation des Stiches die Vorspannung zwischen 1 bis 6kN/m variiert. Die Flächen werden dabei mit einer konstanten Stichhöhe von 20% angenommen. Die Querschnitte des Spannbalkens werden für jede Rahmengenometrie und jede Vorspannkraft optimiert und durch erneutes Berechnen die jeweiligen Belastungswerte ermittelt.



## S12 Studie zur Variation der Vorspannung

Rahmen: axb= variierend, bxh= angepaßt, Holz, Schraubenabstand 15%  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, bzw. **ETFE-Folie 0,2mm**, Stich f= 20%  
 Belastung: Vorspannung wie angegeben, q= 1,31kN/m<sup>2</sup>



Rahmen a x b m		rechteckiges Holzprofil														
		Membran		Spannbalken				Schraube	Membran		Spannbalken				Schraube	
a	b	V <sub>sp</sub> [kN/m]	V <sub>1</sub>   σ <sub>max</sub> / min	M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub>	b x h	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub>	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub>	N <sub>3</sub>	V <sub>sp</sub> [kN/m]	V <sub>1</sub>   σ <sub>max</sub> / min	M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub>	b x h	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub>	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub>	N <sub>3</sub>	
			mm   kN/m	kNm / kN	cm	%   %	mm	kN		mm   kN/m	kNm / kN	cm	%   %	mm	kN	
1 x 1	1	1	32   3,1 / 1,4	0,10 / 0,77	3x5	98 / 37	1,8 / 1,5	1,4	4	19   4,8 / 3,4	0,18 / 1,36	4x6	91 / 41	0,9 / 0,9	2,1	
			46   2,1 / 1,0	0,08 / 0,59	3x5	78 / 28	1,2 / 1,2	0,8		22   4,5 / 3,1	0,17 / 1,32	4x6	86 / 40	0,9 / 0,9	1,9	
			25   3,9 / 1,9	0,13 / 0,97	4x6	66 / 29	0,7 / 0,6	1,6		5	15   5,7 / 3,9	0,23 / 1,68	6x8	44 / 25	0,3 / 0,2	2,6
1 x 1	2	2	36   2,5 / 1,6	0,10 / 0,76	3x5	98 / 37	1,5 / 1,5	1,1	5	17   5,0 / 3,8	0,19 / 1,57	4x6	97 / 47	1,0 / 1,0	2,3	
			22   4,3 / 2,7	0,15 / 1,18	4x6	76 / 36	0,8 / 0,7	1,8		6	13   6,5 / 4,7	0,26 / 1,95	6x8	50 / 29	0,3 / 0,3	3,0
			27   3,3 / 2,3	0,14 / 1,02	4x6	71 / 31	0,7 / 0,7	1,5			14   6,1 / 4,5	0,25 / 1,89	6x8	48 / 28	0,3 / 0,3	2,8
1 x 2	1	1	39   3,8 / 1,2	0,60 / 2,17	8x10	55 / 20	0,9 / 0,1	2,9	4	28   6,0 / 3,9	0,82 / 3,07	8x10	75 / 28	1,3 / 0,1	4,7	
			60   2,5 / 1,0	0,40 / 1,45	6x8	76 / 22	1,8 / 0,1	2,0		32   4,9 / 3,6	0,71 / 2,58	8x10	65 / 23	1,1 / 0,1	4,1	
			35   4,5 / 2,1	0,68 / 2,47	8x10	62 / 22	1,0 / 0,1	3,5		5	25   6,7 / 4,9	0,90 / 3,37	8x10	82 / 30	1,4 / 0,1	5,3
50   3,2 / 1,9	0,46 / 1,78	6x8	88 / 27	2,1 / 0,1	2,6	27   6,1 / 4,5	0,85 / 3,03	8x10	78 / 27		1,3 / 0,1	4,9				
1 x 2	2	2	32   5,2 / 3,0	0,76 / 2,77	8x10	70 / 25	1,2 / 0,1	4,1	6	22   7,5 / 5,8	1,01 / 3,68	8x10	92 / 33	1,5 / 0,1	6,0	
			41   3,8 / 2,8	0,52 / 2,05	6x8	99 / 31	2,5 / 0,2	3,2		23   7,3 / 5,4	0,99 / 3,60	8x10	91 / 32	1,5 / 0,1	5,9	
			Membran	Spannbalken	Schraube	Membran	Spannbalken	Schraube								
1 x 3	1	1	44   3,9 / 0,8	1,27 / 3,21	10x12	65 / 19	1,9 / 0,0	4,5	4	32   8,1 / 2,7	1,77 / 4,38	10x12	90 / 26	2,6 / 0,1	6,6	
			68   2,5 / 0,6	0,84 / 2,05	8x10	77 / 19	2,9 / 0,0	2,8		37   7,2 / 2,8	1,60 / 3,95	10x12	81 / 24	2,4 / 0,0	5,8	
			40   5,3 / 1,4	1,43 / 3,60	10x12	73 / 22	2,1 / 0,0	5,2		5	29   9,5 / 3,4	1,94 / 4,78	10x12	99 / 29	2,8 / 0,1	7,4
56   3,8 / 1,4	1,02 / 2,50	8x10	93 / 23	3,5 / 0,1	3,5	29   9,2 / 3,4	1,91 / 4,67	10x12	97 / 28		2,8 / 0,1	7,0				
1 x 3	2	2	36   6,7 / 2,1	1,60 / 3,99	10x12	81 / 24	2,4 / 0,0	5,9	6	24   11,3 / 4,1	2,35 / 5,75	12x14	73 / 25	1,7 / 0,0	8,8	
			43   5,6 / 2,2	1,30 / 3,18	10x12	66 / 19	1,9 / 0,0	4,6		24   11,0 / 4,2	2,30 / 5,59	12x14	72 / 24	1,7 / 0,0	8,4	
			Membran	Spannbalken	Schraube	Membran	Spannbalken	Schraube								
1 x 4	1	1	55   4,7 / 0,3	3,13 / 4,78	12x14	97 / 21	5,9 / 0,0	6,7	4	38   9,2 / 1,9	4,56 / 6,97	14x16	93 / 22	4,7 / 0,0	10,2	
			70   2,9 / 0,4	2,34 / 3,52	12x14	73 / 15	4,5 / 0,0	4,5		46   6,3 / 1,6	3,64 / 5,49	14x16	74 / 18	3,8 / 0,0	7,2	
			45   5,2 / 0,7	3,77 / 5,71	14x16	77 / 18	4,0 / 0,0	8,1		5	34   11,0 / 2,3	4,90 / 7,60	14x16	99 / 25	5,0 / 0,0	11,2
58   4,7 / 1,0	2,89 / 4,35	12x14	90 / 19	5,5 / 0,0	5,9	33   10,2 / 2,4	5,06 / 7,60	16x18	71 / 19		3,2 / 0,0	10,5				
1 x 4	2	2	41   7,2 / 1,3	4,16 / 6,34	14x16	85 / 20	4,3 / 0,0	9,3	6	28   13,8 / 3,1	6,18 / 9,43	16x18	87 / 24	3,8 / 0,0	14,0	
			45   7,0 / 1,6	3,74 / 5,63	14x16	76 / 18	4,0 / 0,0	7,7		29   11,7 / 2,8	5,68 / 8,55	10x12	80 / 21	3,6 / 0,0	11,8	
			Membran	Spannbalken	Schraube	Membran	Spannbalken	Schraube								
1 x 5	1	1	48   5,5 / 0,0	3,50 / 5,26	14x16	71 / 17	3,8 / 0,0	6,7	4	38   20,7 / 0,9	4,92 / 7,83	14x16	99 / 25	5,0 / 0,0	9,7	
			71   5,3 / 0,1	2,50 / 3,77	12x14	78 / 16	4,8 / 0,0	4,4		35   21,3 / 1,3	5,58 / 8,60	16x18	79 / 22	3,4 / 0,0	9,5	
			45   10,3 / 0,2	3,97 / 6,11	14x16	81 / 20	4,2 / 0,0	7,7		5	30   26,2 / 1,4	9,79 / 6,27	16x18	88 / 25	3,7 / 0,0	11,8
56   9,3 / 0,4	3,44 / 5,25	14x16	70 / 17	3,2 / 0,0	5,9	29   26,6 / 1,6	6,79 / 10,4	16x18	96 / 26		4,1 / 0,0	11,6				
1 x 5	2	2	41   15,4 / 0,6	4,44 / 6,97	14x16	91 / 22	4,6 / 0,0	8,7	6	28   31,4 / 1,8	7,11 / 11,1	16x18	99 / 28	4,2 / 0,0	13,3	
			45   15,9 / 1,0	4,32 / 6,65	14x16	88 / 21	4,4 / 0,0	7,4		24   31,9 / 1,8	8,19 / 12,6	18x20	83 / 25	3,1 / 0,0	14,0	
			Membran	Spannbalken	Schraube	Membran	Spannbalken	Schraube								
2 x 2	1	1	77   6,0 / 1,4	0,65 / 2,26	8x10	59 / 20	1,5 / 1,1	4,4	4	61   6,8 / 4,5	0,92 / 3,25	8x10	84 / 29	1,7 / 1,5	6,0	
			131   3,1 / 1,3	0,47 / 1,62	6x8	90 / 24	2,2 / 2,2	2,3		79   5,5 / 4,2	0,77 / 2,70	8x10	70 / 24	1,2 / 1,2	4,6	
			71   6,3 / 2,4	0,74 / 2,59	8x10	68 / 23	1,5 / 1,2	4,9		5	56   7,1 / 5,5	1,02 / 3,59	8x10	93 / 32	1,8 / 1,6	6,7
106   3,5 / 2,6	0,55 / 1,92	8x10	50 / 17	0,9 / 0,9	3,0	68   6,9 / 5,1	0,91 / 3,18	8x10	83 / 29		1,4 / 1,4	5,5				
2 x 2	2	2	66   6,5 / 3,5	0,83 / 2,92	8x10	76 / 26	1,6 / 1,4	5,4	6	50   8,3 / 6,4	1,16 / 4,10	10x12	59 / 25	0,9 / 0,8	7,6	
			92   4,5 / 3,4	0,65 / 2,36	8x10	59 / 21	1,0 / 1,0	3,8		58   8,2 / 6,0	1,04 / 3,67	8x10	95 / 33	1,6 / 1,6	6,5	
			Membran	Spannbalken	Schraube	Membran	Spannbalken	Schraube								
2 x 3	1	1	99   6,0 / 1,6	1,91 / 4,52	10x12	97 / 27	2,9 / 0,7	5,9	4	78   7,0 / 3,9	2,46 / 5,85	12x14	77 / 25	1,8 / 0,4	8,1	
			155   3,7 / 1,2	1,34 / 3,16	10x12	68 / 19	2,1 / 0,3	4,1		104   5,1 / 3,5	1,88 / 4,50	10x12	96 / 27	2,8 / 0,6	6,5	
			90   6,1 / 2,28	2,07 / 4,90	12x14	64 / 21	1,7 / 0,3	6,4		5	72   7,5 / 4,6	2,65 / 6,33	12x14	82 / 27	1,9 / 0,4	9,0
133   4,0 / 2,1	1,46 / 3,42	10x12	74 / 21	2,3 / 0,5	4,9	89   5,9 / 4,2	2,18 / 5,20	12x14	68 / 22		1,6 / 0,3	7,6				
2 x 3	2	2	84   6,6 / 3,3	2,27 / 5,38	12x14	71 / 23	1,7 / 0,4	7,3	6	66   8,1 / 5,3	2,85 / 6,81	12x14	89 / 29	2,1 / 0,5	9,9	
			119   4,5 / 2,8	1,66 / 3,95	10x12	84 / 24	2,5 / 0,5	5,6		78   6,7 / 5,0	2,47 / 5,91	12x14	77 / 25	1,8 / 0,4	8,8	
			Membran	Spannbalken	Schraube	Membran	Spannbalken	Schraube								

Tab. 3.27.

Vsp - Vorspannung v [kN/m]

f - Stich [% von Rahmenkante a]

V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]

σ - Membranspannung [kN/m]

M<sub>2</sub> - max. Moment Spannbalken [kNm]

Q<sub>2</sub> - max. Querkraft Spannbalken [kN]

N<sub>3</sub> - max. Normalkraft Schraube [kN]

U<sub>M</sub> - Auslastung U<sub>M</sub> = (σ<sub>max</sub> / σ<sub>zul</sub>) x 100 [%]

U<sub>Q</sub> - Auslastung U<sub>Q</sub> = (max(Q<sub>2</sub>) / Q<sub>zul</sub>) x 100 [%]

Werte in Schwarz beziehen sich auf

PVC-PE Membran Typ 3

Werte in Blau beziehen sich auf

ETFE-Folie 0,2mm

Membran- und Folienspannungen in

Rot liegen außerhalb des idealen

Vorspannungsbereichs

Bei Membran- bzw. Folienspannungen in

Rot besteht die Gefahr der Bildung von

Wassersäcken

### 3. Membranrahmenmodule - Tragverhalten sattelförmig bespannter Rahmenmodule

a x b	v	Membran		Spannbalken				Schraube N <sub>3</sub>	v	Membran		Spannbalken				Schraube N <sub>3</sub>
		V <sub>1</sub>   σ <sub>max</sub> / min	M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub>	b x h	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub>	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub>	V <sub>1</sub>   σ <sub>max</sub> / min			M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub>	b x h	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub>	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub>			
2x4	1	100   5,8 / 1,0	3,76 / 7,01	14x16	77 / 23	2,6 / 0,2	9,1	4	83   7,0 / 4,5	4,48 / 8,38	14x16	91 / 27	3,1 / 0,2	11,3		
		150   3,6 / 1,6	2,58 / 4,81	12x14	80 / 21	3,3 / 0,2	6,2		90   7,8 / 4,6	4,19 / 7,93	14x16	86 / 26	3,0 / 0,2	10,8		
	2	95   6,2 / 2,2	4,01 / 7,46	14x16	82 / 24	2,8 / 0,2	9,8	5	75   7,4 / 5,3	4,72 / 8,84	14x16	96 / 29	3,1 / 0,2	12,0		
	3	89   6,6 / 3,4	4,24 / 7,92	14x16	87 / 26	2,9 / 0,2	10,5	6	70   9,1 / 5,5	5,28 / 9,87	16x18	75 / 25	2,2 / 0,2	13,5		
		106   5,8 / 3,7	3,53 / 6,61	14x16	72 / 21	2,5 / 0,2	8,9		64   12,0 / 6,5	5,73 / 10,7	16x18	81 / 27	2,4 / 0,2	15,0		
2x6	1	108   6,0 / 0,8	5,95 / 8,64	16x18	84 / 22	4,0 / 0,1	11,7	4	91   7,3 / 3,9	7,04 / 10,27	16x18	99 / 26	4,7 / 0,2	14,6		
		181   3,6 / 0,9	3,61 / 5,27	14x16	74 / 17	4,1 / 0,1	6,9		122   5,4 / 3,5	5,28 / 7,70	16x18	75 / 19	3,5 / 0,1	10,9		
	2	102   6,4 / 1,8	6,31 / 9,18	16x18	89 / 23	4,2 / 0,1	12,6	5	82   8,0 / 4,7	7,75 / 11,29	18x20	79 / 23	3,3 / 0,1	16,1		
	3	160   4,1 / 1,8	4,07 / 5,93	14x16	83 / 19	4,6 / 0,1	8,0	6	105   6,3 / 4,3	6,03 / 8,83	16x18	85 / 22	4,0 / 0,1	12,3		
		96   7,0 / 2,9	6,67 / 9,72	16x18	94 / 24	4,5 / 0,2	13,6		77   8,7 / 5,5	8,28 / 12,08	18x20	84 / 24	3,5 / 0,1	17,5		
		141   4,6 / 2,6	4,57 / 6,67	14x16	93 / 22	5,1 / 0,2	9,2		94   7,3 / 5,1	6,83 / 9,98	16x18	96 / 25	4,5 / 0,2	14,6		
3x3	1	132   7,6 / 1,7	1,90 / 4,59	10x12	97 / 37	4,0 / 2,8	8,5	4	108   8,6 / 4,3	2,52 / 6,15	12x14	78 / 26	2,2 / 1,8	10,7		
		222   4,0 / 1,4	1,37 / 3,31	10x12	70 / 20	2,1 / 2,1	4,3		155   5,4 / 4,1	1,95 / 4,79	10x12	99 / 29	2,8 / 2,8	7,2		
	2	122   8,1 / 2,5	2,12 / 5,14	12x14	66 / 22	2,0 / 1,5	9,3	5	101   8,9 / 5,2	2,72 / 6,66	12x14	85 / 29	2,3 / 1,9	11,4		
	3	198   4,3 / 2,2	1,53 / 3,72	10x12	78 / 22	2,3 / 2,3	5,1	6	135   6,1 / 5,1	2,23 / 5,49	12x14	69 / 24	1,6 / 1,6	8,5		
		115   8,4 / 3,4	2,32 / 5,65	12x14	72 / 24	2,1 / 1,6	10,0		95   9,3 / 6,2	2,95 / 7,27	12x14	92 / 31	2,4 / 2,1	12,3		
		175   4,8 / 3,2	1,72 / 4,21	10x12	87 / 25	2,5 / 2,5	6,1		119   6,8 / 6,1	2,52 / 6,22	12x14	78 / 27	1,8 / 1,8	9,8		
3x4	1	160   8,0 / 2,1	4,22 / 7,78	12x16	86 / 25	3,0 / 1,2	9,7	4	134   8,9 / 4,2	5,09 / 9,44	16x18	72 / 24	2,1 / 0,8	12,3		
		265   4,7 / 1,2	2,87 / 5,32	12x14	89 / 23	3,7 / 1,0	6,7		187   5,9 / 3,5	3,77 / 7,01	14x14	99 / 26	3,1 / 1,0	9,4		
	2	152   8,3 / 2,9	4,53 / 8,23	14x16	92 / 27	3,1 / 1,2	10,5	5	125   9,4 / 4,9	5,35 / 10,05	16x18	76 / 25	2,2 / 0,8	13,3		
	3	240   5,0 / 2,1	3,11 / 5,77	12x14	97 / 25	4,0 / 1,2	7,4	6	171   6,5 / 4,1	4,18 / 7,80	14x16	85 / 25	2,9 / 1,0	10,6		
		144   8,5 / 3,7	4,71 / 8,73	14x16	96 / 28	3,3 / 1,3	11,2		119   9,7 / 5,3	5,77 / 10,74	16x18	81 / 27	2,4 / 0,9	14,4		
		214   5,5 / 3,1	3,42 / 6,35	14x14	91 / 23	2,8 / 0,9	8,3		152   7,2 / 4,7	4,64 / 8,66	14x16	95 / 28	3,2 / 1,1	11,9		
3x5	1	176   7,6 / 2,2	7,12 / 10,28	16x18	99 / 26	4,9 / 0,7	13,4	4	149   8,6 / 4,3	8,35 / 12,11	18x20	85 / 24	3,5 / 0,5	17,4		
		310   4,4 / 1,2	4,31 / 6,10	12x16	80 / 20	5,1 / 0,5	8,3		213   5,8 / 3,7	5,62 / 8,21	16x16	99 / 23	4,3 / 0,5	12,5		
	2	165   7,8 / 2,6	7,65 / 10,97	18x20	78 / 22	3,3 / 0,5	14,6	5	142   9,0 / 5,2	8,71 / 12,69	18x20	89 / 25	3,6 / 0,5	18,8		
	3	280   4,9 / 1,9	4,73 / 6,81	12x16	97 / 22	5,5 / 0,6	9,3	6	199   6,4 / 4,4	6,26 / 9,15	16x18	88 / 23	4,2 / 0,5	14,3		
		157   8,2 / 3,4	8,01 / 11,54	18x20	81 / 23	3,4 / 0,5	16,0		134   9,4 / 5,8	9,19 / 13,41	18x20	93 / 27	3,8 / 0,5	20,3		
		252   5,3 / 3,1	5,09 / 7,41	16x16	99 / 21	3,9 / 0,4	11,0		178   7,0 / 5,1	6,97 / 10,19	16x18	98 / 26	4,6 / 0,6	16,2		
4x4	1	198   9,8 / 1,6	3,97 / 6,87	14x16	81 / 22	5,0 / 4,0	13,8	4	172   10,5 / 4,9	5,05 / 8,80	16x18	71 / 22	3,0 / 2,2	16,9		
		348   4,9 / 1,4	2,83 / 4,89	12x14	88 / 21	4,0 / 4,0	6,7		258   6,1 / 4,7	3,85 / 6,83	14x16	79 / 22	3,0 / 3,0	10,9		
	2	186   9,7 / 2,6	4,27 / 7,40	14x16	87 / 24	4,5 / 3,3	14,4	5	164   10,7 / 6,0	5,40 / 9,43	16x18	76 / 24	3,1 / 2,4	18,0		
	3	318   5,2 / 2,4	3,09 / 5,38	12x14	96 / 23	4,4 / 4,4	7,9	6	232   7,1 / 5,6	4,27 / 7,67	14x16	87 / 25	3,2 / 3,2	12,6		
		181   10,2 / 3,8	4,70 / 8,17	16x18	66 / 20	2,9 / 2,1	15,9		156   11,0 / 7,1	5,75 / 10,07	16x18	81 / 25	3,1 / 2,6	19,1		
		287   5,6 / 3,6	3,44 / 5,99	14x16	70 / 19	2,7 / 2,7	9,4		210   8,4 / 6,4	4,69 / 8,25	14x16	96 / 27	3,5 / 3,5	14,0		
4x5	1	232   9,8 / 1,6	7,57 / 10,49	18x20	77 / 21	3,4 / 1,7	13,7	4	203   10,5 / 4,7	8,76 / 12,30	18x20	89 / 25	3,9 / 1,8	18,5		
		390   5,5 / 1,7	5,20 / 7,23	16x18	18 / 7,3	3,8 / 1,3	9,6		302   6,7 / 3,8	6,37 / 9,06	16x18	92 / 21	4,4 / 1,6	14,4		
	2	222   10,0 / 2,6	7,96 / 11,11	18x20	81 / 22	3,5 / 1,7	15,3	5	194   10,8 / 5,8	9,16 / 13,00	18x20	93 / 26	4,0 / 1,8	20,1		
	3	360   5,8 / 2,3	7,78 / 5,50	16x18	78 / 20	3,9 / 1,4	11,2	6	239   7,2 / 4,5	6,98 / 9,94	18x18	88 / 22	3,4 / 1,3	16,3		
		213   10,3 / 3,7	8,36 / 11,74	18x20	85 / 24	3,7 / 1,7	16,9		183   11,3 / 6,6	9,80 / 13,92	20x22	74 / 23	2,8 / 1,3	22,0		
		331   6,2 / 3,1	5,88 / 8,33	16x18	92 / 18	4,1 / 1,5	12,7		217   7,8 / 5,3	7,63 / 10,89	18x18	96 / 24	3,7 / 1,4	18,3		
5x5	1	275   11,4 / 1,5	7,00 / 9,95	18x20	71 / 20	3,2 / 2,4	20,2	4	239   12,1 / 5,1	8,70 / 12,20	20x22	66 / 30	3,4 / 2,6	23,6		
		474   5,7 / 1,6	5,10 / 7,04	16x18	72 / 18	3,8 / 3,8	9,5		374   6,9 / 4,9	6,51 / 9,20	16x18	92 / 23	4,6 / 4,6	14,6		
	2	263   11,5 / 2,7	7,71 / 10,70	18x20	78 / 21	3,9 / 2,9	21,3	5	229   12,3 / 6,3	9,19 / 12,01	20x22	69 / 21	3,5 / 2,7	24,8		
	3	440   6,1 / 2,7	5,57 / 7,76	16x18	79 / 19	4,0 / 4,0	11,2	6	341   7,3 / 6,0	6,98 / 9,92	16x18	99 / 25	4,8 / 4,8	16,3		
		252   11,6 / 4,0	7,98 / 11,20	18x20	81 / 22	4,8 / 3,5	21,9		220   12,6 / 7,5	9,69 / 13,73	20x22	73 / 23	3,5 / 2,8	26,0		
		407   6,5 / 3,8	6,04 / 8,48	16x18	85 / 21	4,2 / 4,2	12,9		310   8,0 / 6,8	7,68 / 10,94	18x20	78 / 22	3,3 / 3,3	18,3		

In Studie S12 wurde jede Rahmengeometrie in sechs verschiedenen Vorspannungszuständen zwischen 1 und 6 kN/m untersucht. Dabei ist der Spannbalken auf die jeweils resultierende Beanspruchung bemessen worden und Schnittkräfte unter Verwendung der ermittelten Querschnitte erneut berechnet worden.

Membran- bzw. Folienverformungen bei denen die Gefahr der Wassersackbildung besteht sind in Studie S12 durch Rotdruck hervorgehoben. Da sich die Studie auf Rahmenmodule mit einer Stichhöhe von 20% beschränkt, tritt die Wassersackproblematik lediglich bei sehr großen Rahmengeometrien auf.

Betrachtet man die Maximalquerkraft in der Studie S12 im Vergleich zur zulässigen Querkraft des jeweilig gewählten Querschnitts, so fällt auf, dass die Auslastung des Querschnitts im Schnitt bei 30% liegt. Durch die Bemessung des Querschnitts auf die maximale Biegebeanspruchung resultieren Querschnitte, die die vorhandene Schubbeanspruchung aufnehmen können. Die Querkraft ist also nicht maßgebend und kann in den folgenden Studien für Holzquerschnitte vernachlässigt werden.

Ziel der Untersuchung ist es, individuell für jede Rahmengeometrie die optimierte Vorspannung, sowie die erforderlichen Querschnitte zu ermitteln. Als Kriterium der Optimierung steht dabei die wirtschaftliche Ausnutzung der Membran bzw. der Folie im Vordergrund. Der optimierte Vorspannungsgrad für Folie und Membran liegt etwas unterhalb der zulässigen Spannung. So entstehen die geringsten Verformungen, die Gefahr des Flatterns und der Wassersackbildung ist minimiert und das Material ist wirtschaftlich ausgenutzt. Für die ETFE-Folie liegen die maximal zulässigen Spannungen unter 3,6kN/m. Dies ist die zulässige Spannung für 0,2mm starke ETFE Folien. Für die Membran wird ein Membranspannungszustand angestrebt, der im oberen Idealbereich liegt. Der Idealbereich ist zwischen 2,5 und 6% der Kurzzeitfestigkeit angegeben, für eine PVC-PE III Membran sind also Membranspannungen knapp unter 7,0kN/m ideal.

In Studie S16 wurden Membranspannungen die diesen Idealbereich überschreiten in roter Farbe gedruckt. Es fällt auf, dass bei kleinen Rahmengeometrien die höchsten Vorspannungen eingestellt werden können, ohne dabei die zulässige Idealspannung zu überschreiten. Auch kann der wirtschaftliche Lastabtrag quadratischer Rahmengeometrien in dieser Studie abgelesen werden: Quadratische Rahmengeometrien können höher vorgespannt werden als rechteckige Rahmengeometrien gleicher Fläche. Zusammenfassend kann die Verteilung der Idealvorspannung für Membran (grau) und ETFE-Folie (blau) wie folgt dargestellt werden:

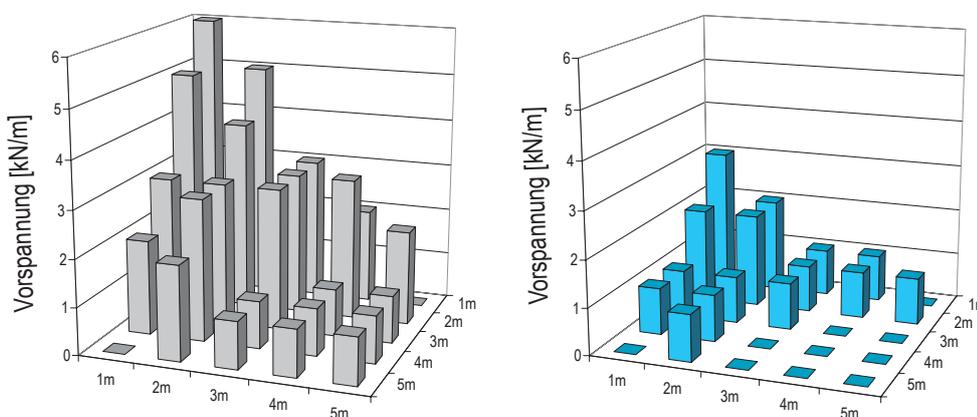


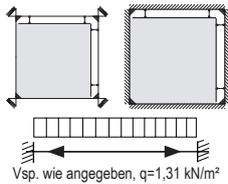
Abb. 196 a,b  
Vorspannungs-  
verteilung

Rahmengeometrien, bei denen die Membran bzw. Folienspannung auch unter Verwendung der geringsten Vorspannung über den zulässigen Materialspannungen liegen sind in den Diagrammen mit einer Vorspannung von Null angegeben. Das

heißt, dass die entsprechende Geometrie für eine Bespannung mit dem jeweiligen Material ungeeignet ist. Zu erkennen ist, dass der Einsatz der ETFE-Folie auf Grund ihrer geringeren Reißfestigkeit auf Geometrien bis maximal 3m beschränkt bleibt und ETFE Folien nur halb so stark vorgespannt werden können wie Membrane.

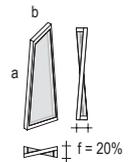
Studie S13

Die nachstehende Tabelle reduziert die Studie S12 auf die ideal vorgespannten Rahmenmodule. Sie stellt also das Ergebnis der Untersuchungen an sattelförmig bespannten Holzrahmenmodulen dar und ergänzt darüber hinaus die Ergebnisse um die Bemessung des Rahmens aus Beanspruchungen die aus eckgehaltener Lagerung resultieren sowie die Auswertung von bespannten Rahmen aus Stahlhohlkastenprofilen.



### S13 Bemessung sattelförmig bespannter Rahmenmodule

Rahmen: Holz, bzw. *Stahlhohlkastenprofile*  
 Bespannung: PVC-PE Membran III, bzw. *ETFE-Folie 0,2mm*, Stich  $f = 20\%$   
 Belastung: Vorspannung wie angegeben,  $q = 1,31 \text{ kN/m}^2$



Tab. 3.28.  
 Vsp - Vorspannung v [kN/m]  
 f - Stich [%] von Rahmenkante a)  
 V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]  
 σ - Membranspannung [kN/m]  
 M<sub>2</sub> - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 N<sub>3</sub> - max. Normalkraft Schraube [kN]  
 M<sub>4</sub> - max. Moment Rahmen [kNm]  
 U<sub>M</sub> - Auslastung U<sub>M</sub> = (σ<sub>max</sub>/σ<sub>zul</sub>)x100 [%]

Werte in Schwarz beziehen sich auf  
 PVC-PE Membran Typ 3  
 Werte in Blau beziehen sich auf  
 ETFE-Folie 0,2mm

Rahmen a x b m	Vsp. kN/m	rechteckiges Holzprofil				rechteckiges Stahlhohlprofil				
		Membran V <sub>1</sub>   σ <sub>max/min</sub> mm   kN/m	Spannbalken M <sub>2</sub>   b x h   U <sub>M</sub> kNm   cm   %	Schraube N <sub>3</sub> kN	Rahmen M <sub>4</sub>   b x h   U <sub>M</sub> kNm   cm   %	Membran V <sub>1</sub>   σ <sub>max/min</sub> mm   kN/m	Spannbalken M <sub>2</sub>   b x h   U <sub>M</sub> kNm   mm   %	Schraube N <sub>3</sub> kN	Rahmen M <sub>4</sub>   b x h   U <sub>M</sub> kNm   mm   %	
1 x 1	6	17   5,7 / 4,2	0,26   6x8   50	3,0	0,45   6x8   86	6	14   6,5 / 4,7	0,26   30x30x4   62	2,9	0,37   30x30x4   88
	3	30   3,0 / 2,1	0,14   4x6   71	1,5	0,24   4x6   46	3	26   3,4 / 2,3	0,14   30x30x4   33	1,5	0,23   30x30x4   55
1 x 2	5	32   6,7 / 3,6	0,90   8x10   82	5,3	1,11   10x12   56	5	28   6,4 / 4,4	0,77   30x50x5   57	4,9	0,78   30x50x5   58
	2	57   2,7 / 2,0	0,46   6x8   88	2,6	0,66   8x10   60	2	50   3,0 / 1,9	0,47   30x50x5   2,6	2,6	0,68   30x50x5   50
1 x 3	3	63   6,6 / 1,7	1,60   10x12   81	5,9	1,47   10x12   75	3	43   6,0 / 2,0	1,33   40x60x5   58	5,2	1,54   40x60x5   67
	1	83   2,0 / 0,8	0,84   8x10   77	2,8	1,16   10x12   59	1	74   2,4 / 0,7	0,77   30x50x5   57	2,8	0,96   30x50x5   71
1 x 4	2	94   6,2 / 1,0	3,77   14x16   77	8,1	3,84   14x16   78	2	62   5,5 / 0,7	2,29   40x80x5   61	7,0	2,06   40x80x5   55
	1	102   2,5 / 0,6	2,34   12x14   73	4,5	3,50   14x16   71	1	75   2,9 / 0,4	2,28   40x80x5   62	4,4	2,19   40x60x5   96
1 x 5										
a x b	v	Membran V <sub>1</sub>   σ <sub>max/min</sub>	Spannbalken M <sub>2</sub>   b x h   U <sub>M</sub>	Schraube N <sub>3</sub>	Rahmen M <sub>4</sub>   b x h   U <sub>M</sub>	v	Membran V <sub>1</sub>   σ <sub>max/min</sub>	Spannbalken M <sub>2</sub>   b x h   U <sub>M</sub>	Schraube N <sub>3</sub>	Rahmen M <sub>4</sub>   b x h   U <sub>M</sub>
2 x 2	4	69   5,6 / 4,7	0,92   8x10   84	6,0	1,76   10x12   89	4	62   6,1 / 4,7	0,42   30x50x5   32	5,9	1,10   30x50x5   82
	2	118   3,4 / 2,5	0,55   80x10   50	3,0	0,92   8x10   84	2	96   4,2 / 3,4	0,63   30x50x5   47	3,7	0,84   30x50x5   62
2 x 3	3	101   7,2 / 2,5	2,27   12x14   71	7,3	2,72   12x14   85	3	95   6,5 / 3,3	1,91   40x60x5   83	6,6	1,94   40x60x5   85
	1	165   3,4 / 1,3	1,34   10x12   68	4,1	1,84   10x12   93	1	166   3,4 / 1,2	1,18   30x50x5   88	3,9	1,31   30x50x5   97
2 x 4	3	121   7,9 / 2,8	4,24   14x16   87	10,5	4,13   14x16   84	3	100   6,2 / 3,6	3,59   50x90x5   72	9,5	3,56   50x90x5   96
	1	171   3,4 / 1,6	2,58   12x14   80	6,2	3,40   14x16   69	1	183   3,4 / 1,1	20,5   40x60x5   90	5,2	2,45   40x80x5   66
2 x 5	2	139   7,5 / 2,4	6,31   16x18   89	12,6	6,20   16x18   88	2	116   6,6 / 2,9	5,46   50x100x5   92	12,2	5,25   50x100x8   88
	1	180   3,6 / 1,4	3,61   14x16   74	6,9	6,12   18x20   86	1	203   3,5 / 0,9	2,98   40x80x5   80	6,4	3,20   40x80   86
3 x 3	1	150   6,2 / 1,8	1,90   10x12   97	8,5	3,72   14x16   76	1	143   6,7 / 4,1	1,80   40x60x5   79	8,0	2,23   40x60x5   98
	1	228   3,8 / 1,4	1,37   10x12   70	4,3	2,37   12x14   74	1	225   3,9 / 1,4	1,34   40x60x5   59	4,2	1,91   40x60x5   84
3 x 4	1	175   8,4 / 2,2	4,22   12x16   86	9,7	5,98   16x18   84	1	171   7,6 / 2,2	3,77   50x90x5   75	9,1	4,12   50x90x5   81
3 x 5	1	204   9,3 / 1,7	7,12   16x18   99	13,4	8,43   18x20   86	1	191   7,7 / 2,0	6,34   60x100x8   93	12,5	6,63   60x100x8   97
4 x 4	1	226   7,8 / 1,7	3,97   14x16   81	13,8	8,31   16x18   84	1	222   8,2 / 1,6	3,70   50x90x5   73	12,6	4,77   50x90x5   94
4 x 5	1	250   9,8 / 1,5	7,57   18x20   77	13,7	11,7   20x22   89	1	251   9,1 / 1,6	6,66   60x120x8   75	12,7	7,55   60x120x8   84
5 x 5	1	281   9,3 / 1,6	7,00   18x20   71	20,2	15,2   22x24   88	1	300   9,5 / 1,5	6,69   60x120x8   75	18,4	8,48   60x120x8   94

Durch das Hinzufügen der Biegebeanspruchung des Rahmens und seiner Bemessung kann in der Studie S13 jetzt für jedes Tragelement des Rahmenmoduls die entsprechenden Querschnittswerte abgelesen werden. Im direkten Vergleich gibt die linke Spalte Auskunft über die Dimensionierung der Elemente, werden sie als Stahlhohlkastenprofil hergestellt.

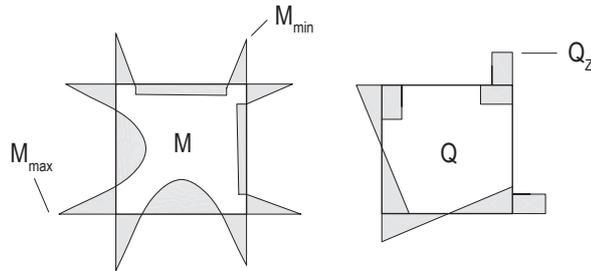
Die Dimensionierung der Stahlhohlkastenprofile unterscheidet sich von der Bemessung der Holzquerschnitte. Der Vollständigkeit halber ist nachstehend die Bemessung der Stahlquerschnitte aufgeführt [Wid07].

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_y} \leq \text{zul}\sigma_B$$

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{\min}}{W_z} \leq \text{zul}\sigma_B$$

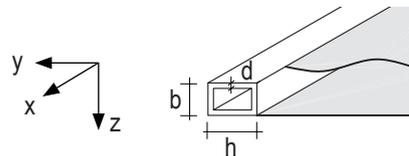
$$\tau_{\max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{Q_y}{d \cdot h} \cdot \frac{1 + 2 \cdot \frac{b}{h}}{1 + 3 \cdot \frac{b}{h}} \leq \text{zul}\tau$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{\min}^2 + 3 \cdot \tau_{\max}^2} \leq \text{zul}\sigma_V$$



3.17. Biegespannungsnachweis [Wid07]

Abb. 197 a-d



3.18. Schubspannungsnachweis [Wid07]

3.19. Vergleichsspannungsnachweis [Wid07]

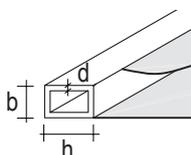
Die Verwendung von Stahlrahmen ermöglicht die Wahl deutlich schlanker Querschnitte. Trotzdem bleiben die Verformungen der Rahmen ähnlich der der Holzrahmen. Die höhere Steifigkeit der Stahlprofile ermöglicht trotz reduzierten Querschnitts die Begrenzung der Verformung auf Größen, die der Verformung der Holzrahmen entsprechen. Die Membranspannung wird in Stahl- und Holzausführung des Rahmens also ähnlich stark abgemindert. In der Tabelle S13 kann dieses Verhalten durch die vergleichbaren Werte der Membranspannungen bei Holz- und Stahlrahmen abgelesen werden. So verwundert es auch nicht, dass die Idealvorspannung für Stahlrahmen dieselben sind, die bereits für die Holzrahmen ermittelt wurden. Höhere Vorspannungen als die hier angegebenen führen auch bei Stahlrahmen zu Membran- und Folienspannungen die außerhalb der Ideal-, bzw. zulässigen Spannung liegen.

Die Grenzen der Bespannung werden vor allem bei der ETFE Folie schnell erreicht. Die ETFE-Folien Bespannung wurde bis maximal 3x3m Rahmengeometrie tabelliert. Bespannungen an größeren Rahmengeometrien in Holz- ebenso wie in Stahlausführung führen zu unzulässig hohen Folienspannungen. Bespannungen mit PVC-Membran sind dagegen möglich, obwohl auch hier Membranspannungen entstehen, die oberhalb des idealen Spannungsbereichs der PVC-PE Membran liegen. Extrem gestreckte Rahmengeometrien eignen sich ebenfalls nicht für Bespannungen mit Membran oder Folie. Bei der Rahmengeometrie von 1x5m fällt die Vorspannung in Längsrichtung auch bei Ansetzen der größt möglichen Vorspannung aus, sodass ein flatterfreies Bespannen dieser Rahmengeometrie weder mit Folie noch mit der PVC-PE Membran möglich ist.

Studie S13 ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bemessung sattelförmig bespannter Rahmenmodule. Die Ergebnisse wurden dafür auf die wichtigsten

Informationen der Bemessung reduziert. So fielen Angaben zur Verformung der Rahmen oder Querkraftgrößen weg, da sie für die Bemessung primär nicht relevant sind. Die nachstehenden Diagramme und Tabellen versuchen durch weiteres Weglassen an Informationen die Ergebnisse auf die Querschnittsbemessung bei optimierter Vorspannung zu reduzieren.

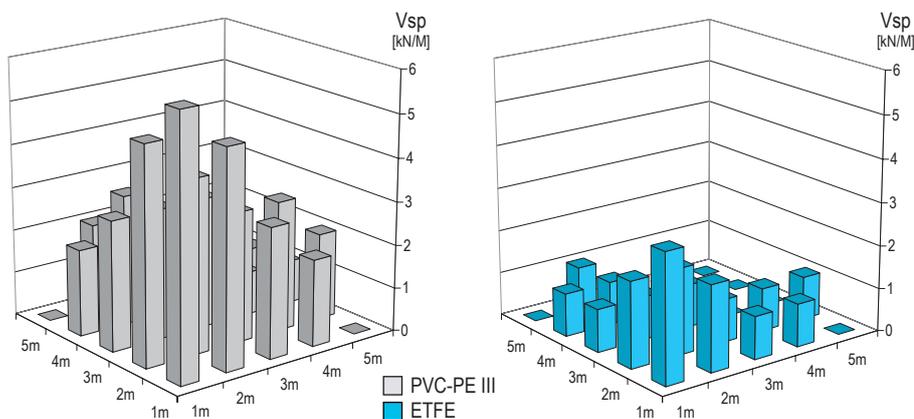
Abb. 198 a-c  
Optimierte  
Vorspannung [kN/m]  
in Abhängigkeit der  
Rahmengenometrie [m]



PVC-PE

Vorspannung

ETFE



PVC-PE

Holzrahmenquerschnitt

ETFE

Abb. 198 d,e  
Erforderliche Höhe  $h$   
[cm] des rechteckigen  
Holzquerschnitts  
des Rahmenmoduls,  
bei eckgehaltener  
Lagerung, in  
Abhängigkeit der  
Rahmengenometrie [m]

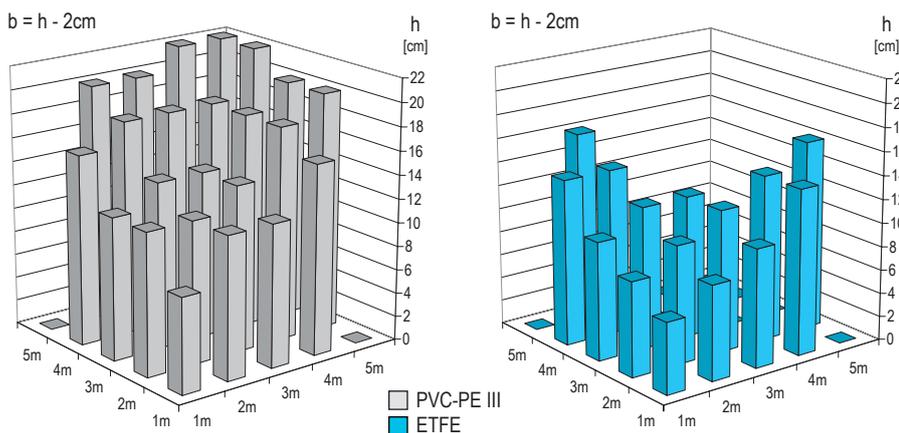
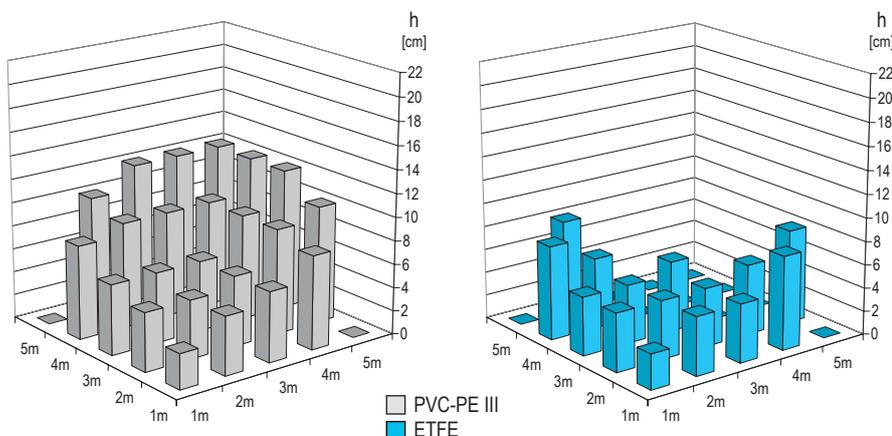
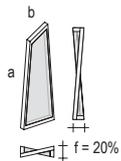


Abb. 198 f,g  
Erforderliche  
Querschnittshöhe  $h$   
[cm] des rechteckigen  
Stahlhohlkastenprofils  
des Rahmenmoduls,  
bei eckgehaltener  
Lagerung, in  
Abhängigkeit der  
Rahmengenometrie [m]

Stahlrahmenquerschnitt

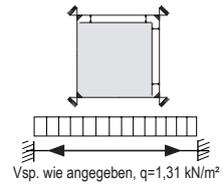


Die Balkendiagramme sind zur Veranschaulichung von Verhältnissen gut geeignet, konkrete Werte sind jedoch leichter aus zweidimensionalen Tabellen abzulesen. Insofern werden dieselben Informationen auf der folgenden Seite so zusammengestellt, dass ein einfaches Herauslesen der Werte möglich ist.



### Querschnitte sattelförmig bespannter Rahmenmodule

Rahmen: Holz, bzw. *Stahlhohlkastenprofile*  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, bzw. *ETFE-Folie 0,2mm*, Stich  $f = 20\%$   
 Belastung: Vorspannung wie angegeben,  $q = 1,31 \text{ kN/m}^2$



Rahmen $a \times b$ [m]	Vorspannung [kN/m]					
	1	2	3	4	5	6
1 x 1				4x6   3x3		6x8   3x3
1 x 2		8x10   3x5			10x12   3x5	
1 x 3	10x12   3x5		10x12   4x6			
1 x 4	14x16   4x6	14x16   4x8				
1 x 5						
2 x 2		10x12   3x5		10x12   3x5		
2 x 3	12x14   4x6		12x14   4x6			
2 x 4	16x18   5x9		16x18   5x9			
2 x 5	18x20   5x10	18x20   5x10				
3 x 3	12x14*   4x6 *					
3 x 4	16x18   5x9					
3 x 5	18x20   6x12					
4 x 4	16x18   5x9					
4 x 5	20x22   6x12					
5 x 5	20x22   6x12					

Tab. 3.29.  
Werte in Schwarz beziehen sich auf PVC-PE bespannte Holzrahmen

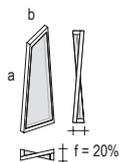
Werte in Schwarz und kursiv beziehen sich auf PVC-PE bespannte Stahlrahmen

Werte in Blau beziehen sich auf ETFE-Folien bespannte Holzrahmen

Werte in Blau und kursiv beziehen sich auf ETFE-Folien bespannte Stahlrahmen

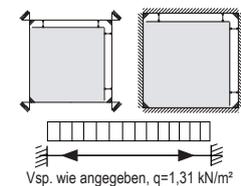
\*Profilangaben für den Rahmen 3x3 gelten sowohl für ETFE, als auch für PVC-PE

Die hier zusammengefassten Daten können als eine Vordimensionierung der Rahmenmodule verstanden werden. Anzumerken ist jedoch, dass eine Vielzahl von pauschalierten Annahmen notwendig war, um solche allgemeingültigen Werte zu ermitteln. Vor allem durch individuelles Ansetzen tatsächlich auftretender Lasten in Abhängigkeit der Lage des Bauteils, können wirtschaftlichere und schlankere Rahmenquerschnitten resultieren. Den Studien liegen zumeist die ungünstigeren Lastannahmen zugrunde, sodass die Werte als Obergrenze möglicher Querschnittsbemessung gelten können. Mit der letzten Studie zu sattelförmig bespannten Rahmenmodulen werden als Einschätzung der Wirtschaftlichkeit der Querschnittsbemessung drei unterschiedlich stark belastete Rahmenmodule miteinander verglichen.



### S14 Studie zur Wirtschaftlichkeit der Bemessung

Rahmen: Holz, bzw. *Stahlhohlkastenprofile*  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, bzw. *ETFE-Folie 0,2mm*, Stich  $f = 20\%$   
 Belastung: Vorspannung wie angegeben,  $q = \text{varierend}$



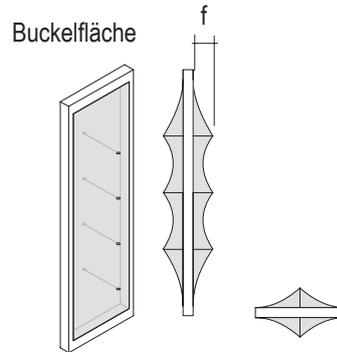
Rahmen [m]		rechteckiges Holzprofil NH				
		Membran	Spannbalken	Schraube	Rahmen	
Leit. [kN]	Vsp [kN/m]	$V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	$M_2$   $b \times h$   $U_M$ kNm   cm   %	$N_3$ kN	$M_4$   $b \times h$   $U_M$ kNm   cm   %	
1 x 3	0,52	3	24   5,7 / 1,9	0,94   8x10   99	3,8	1,22   10x12   62
		1	42   1,9 / 0,7	0,53   8x10   48	1,8	0,77   8x10   70
	0,85	3	27   5,8 / 2,0	1,29   10x12   67	4,8	1,53   10x12   76
		1	55   2,0 / 0,7	0,67   8x10   61	2,3	1,00   8x10   73
	1,31	3	36   6,7 / 2,2	1,57   10x12   81	5,7	1,92   10x12   98
		1	68   2,5 / 0,6	0,84   8x10   77	2,8	1,44   10x12   65

Tab. 3.30.  
 Vsp - Vorspannung  $v$  [kN/m]  
 $V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]  
 $M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 $N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]  
 $M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]

### 3.3.6. Tragverhalten der buckelförmig bespannten Rahmenmodule

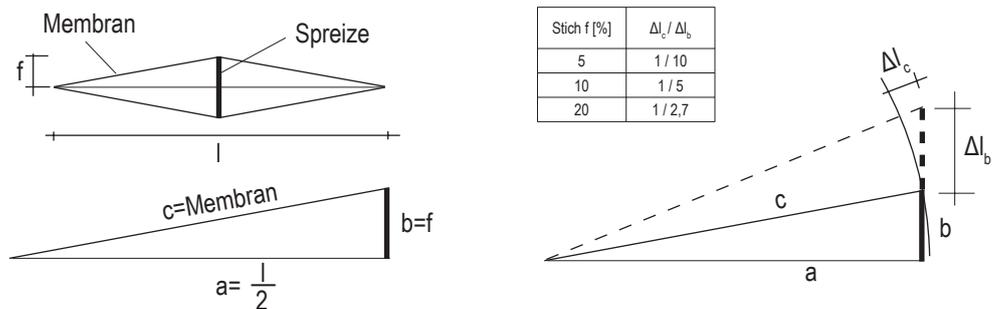
Die Beschreibung des Tragverhaltens der buckelförmig bespannten Rahmenmodule bedarf nicht mehr der Ausführlichkeit des vorangegangenen Kapitels. Viele erarbeitete Grundlagen und Zusammenhänge sind auch für dieses Modul relevant und gültig. Geometrisch liegt der Hauptunterschied dieser Module in der ebenen Ausführung des äußeren Rahmens und einer flächenmittigen, punktuellen Auslenkung der Membran, bzw. der Folie.

Abb. 199  
Buckelfläche



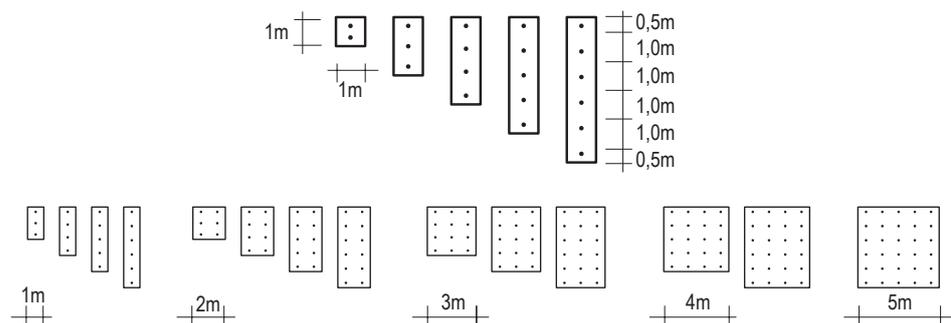
Die mittig eingefügten Spreizen sind von Außen verstellbar und stellen so eine nachträgliche Möglichkeit dar, die Membran bzw. Folie weiter auszulenken und vorzuspannen. Die Längenänderung der Spreize ist jedoch nicht zu Vergleichen mit der Effektivität der Längenänderung, die durch das Anziehen des Spannbalkens bewirkt wird. Betrachtet man die Geometrie der Konstruktion, so kann die Verlängerung der Spreize als Längung der kürzeren Kathetenseite b eines rechtwinkligen Dreiecks betrachtet werden. Für die Erhöhung der Membranspannung ist jedoch die Längung der Hypotenuse c wichtig. Eine Spreizenverlängerung bei Rahmenmodulen mit beispielsweise 10% Stichhöhe führt zu einer effektiven Membranlänge von nur einem Fünftel der Spreizenverlängerung.

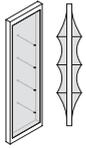
Abb. 200 a-c  
Tab. 3.31.  
Einfluß der  
Verlängerung der  
Spreize auf das  
Einbringen von  
Vorspannung in die  
Membran



Insofern ist weniger die Höhe der Spreize maßgebend, sie wird in den Studien mit 10% der kürzeren Rahmenseite festgelegt. Viel entscheidender ist eine ausreichende Anzahl und Gleichverteilung der Spreizen über die gesamte Fläche. Nachstehend eine schematische Abbildung für die in den folgenden Studien verwendete Verteilung.

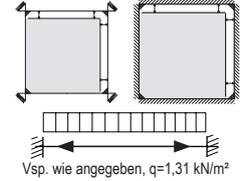
Abb. 201 a,b  
Anordnung der  
Spreizen





### S15 Tragverhalten buckelförmig bespannter Rahmenmodule

Rahmen: Holz; 2m x 2m  
 Bespannung: buckelförmig, Spreize=20cm, PVC-PE Membran Typ3,  
 Belastung: Vorspannung  $v = 2\text{ kN/m}$ ,  $q = 1,31\text{ kN/m}^2$



Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil								
	Vsp. kN/m	Membran	Spannbalken		Schraube	Rahmen			
		$V_1$ / $\sigma$ max / min mm / kN/m	$M_2$ / $Q_2$ kNm / kN	b x h cm	$U_M$ / $U_Q$ %	$N_3$ kN	$M_4$ / $Q_4$ kNm / kN	b x h cm	$U_M$ / $U_Q$ %
1x1	4	64   6,2 / 0,8	1,46 / 5,53	10x12	74 / 33	10,4	2,56 / 9,15	12x14	80 / 39

Tab. 3.32.

Vsp - Vorspannung  $v$  [kN/m]  
 $V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]  
 $M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 $N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]  
 $M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]  
 $U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (Q_{max} / Q_{zul}) \times 100$  [%]

Werte in Schwarz beziehen sich auf PVC-PE Membran Typ 3

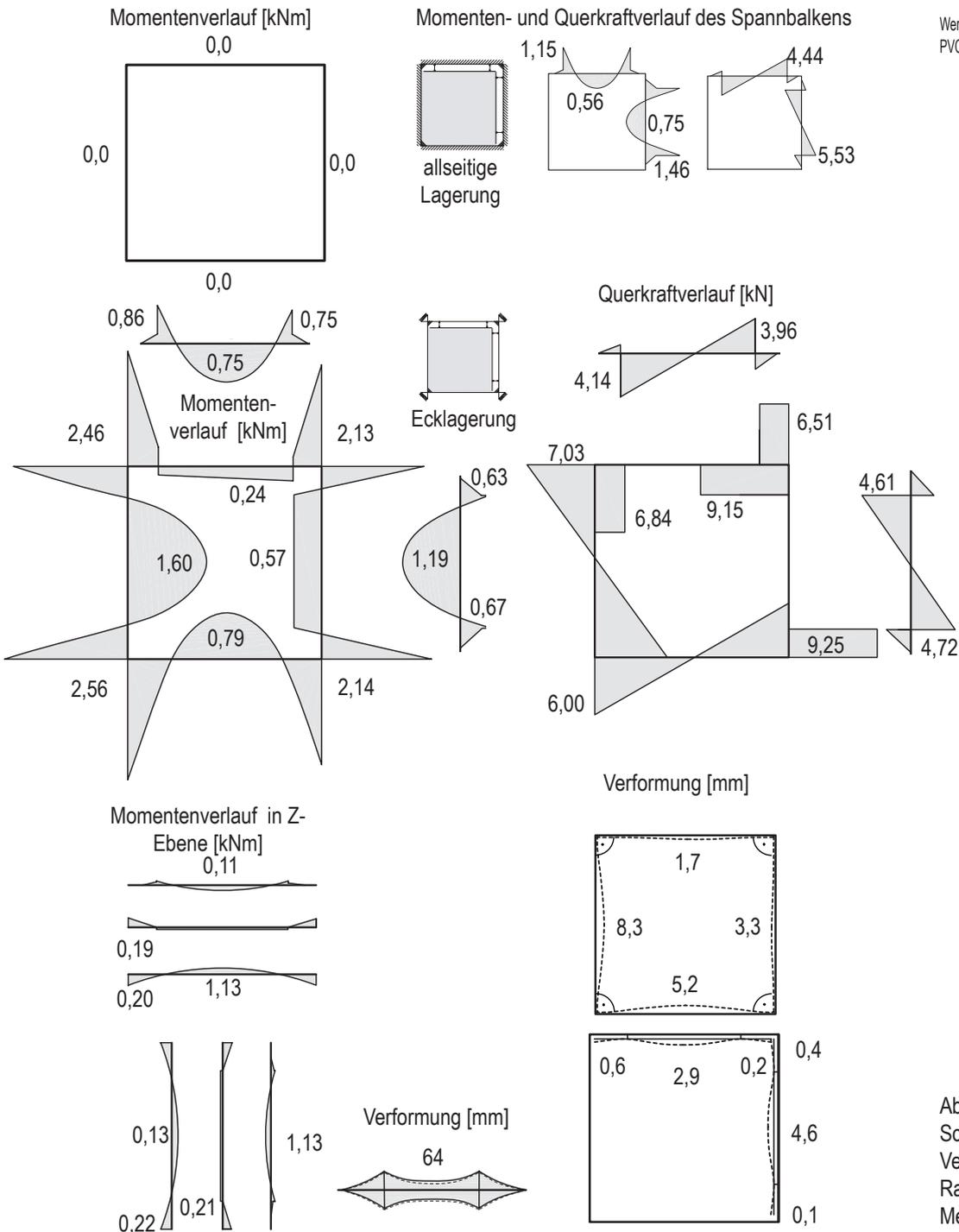
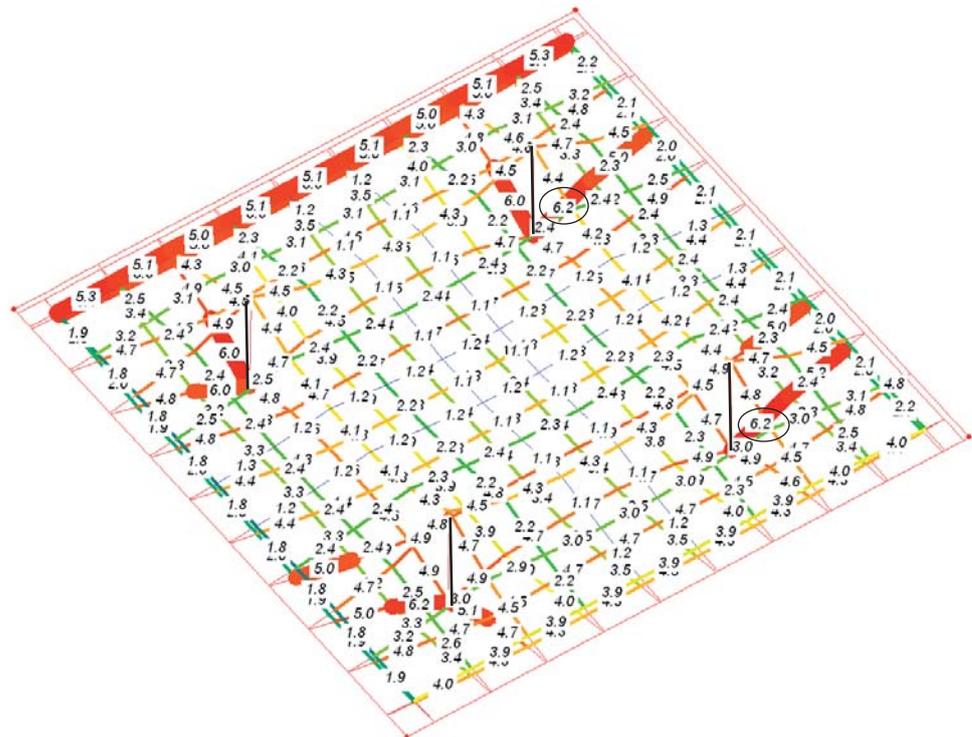


Abb. 202  
 Schnittgrößen,  
 Verformung des  
 Rahmens,  
 Membranspannung

Abb.203  
Membranspannungs-  
verteilung  
[kN/m]



Die auf der linken Seite abgebildete Studie S15 untersucht exemplarisch das Tragverhalten eines 2x2m großen buckelförmig bespannten Rahmens. Die PVC-PE III Membran wird mit 4kN/m vorgespannt und wird einer Flächenlast  $q$  von 1,31kN belastet.

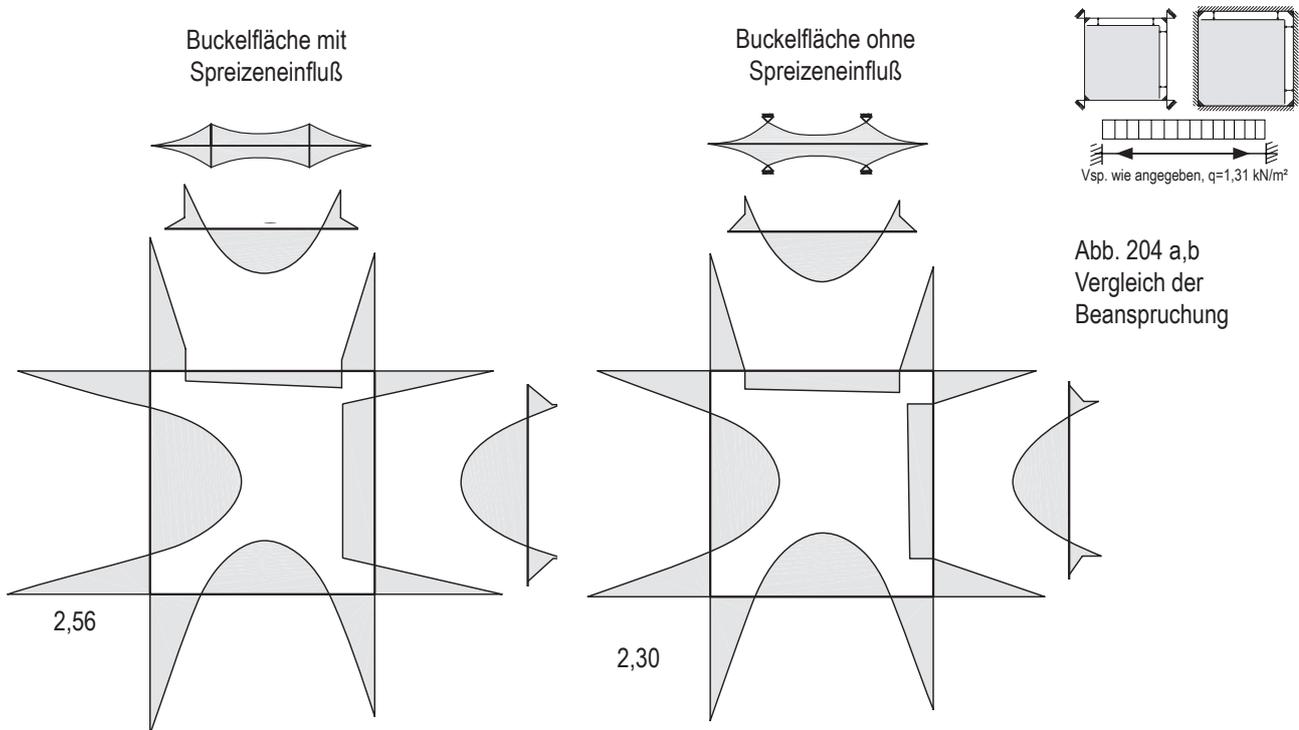
Qualitativ kann das Tragverhalten des Rahmens mit der der sattelförmig bespannten Rahmenmodule verglichen werden. Quantitativ ist eine Belastungszunahme in Membran und Rahmen festzustellen. Das Maximummoment des buckelförmig bespannten Rahmens liegt mit 2,56 kNm um mehr als 1kNm über dem Maximummoment des sattelförmig bespannten Rahmens gleicher Größe und Belastung. Verantwortlich hierfür sind Änderungen im Tragverhalten der Membran. Zum einen ist die Membran lediglich an vier Punkten ausgelenkt, sodass viele Flächenbereiche der Membran eine geringere Krümmung aufweisen, als eine sattelförmig gespannte Membran. Zum anderen entsteht durch die Kopplung von oberer und unterer Membran ein Tragverhalten, dass sich von der einfachen sattelförmigen Bespannung unterscheidet.

Eine Druckbelastung auf die Oberseite der buckelförmig bespannten Fläche wird zum größten Teil über die obere Membranfläche direkt in den Rahmen abgeleitet. Lasten die im Umkreis der Spreize auf die obere Membran wirken, werden durch die Spreize hindurch in die untere Membran geleitet und gelangen von da aus in den Rahmen. Diese Belastung der unteren Membran führt zu hohen Membranspannungen, dies wird in der perspektivisch dargestellten Abbildung zur Membranspannungsverteilung deutlich. Das kombinierte Tragverhalten von oberer und unterer Membran führt zu höheren Beanspruchungen des Rahmens als sie unter gleicher Beanspruchung bei sattelförmig bespannten Rahmen auftreten.

Zur Abschätzung des Einflusses der Spreize wird der Rahmen aus Studie S15 mit einem Rahmen verglichen, der ebenfalls buckelförmig bespannt ist, jedoch keine Spreizenverbindung zwischen oberer und unterer Membran besitzt. Die Auslenkung der Buckelfläche erfolgt beim zweiten Rahmen durch ein äußeres Festhalten der Membranhochpunkte. So entsteht die gleiche Form der Membranbespannung jedoch ohne die untere Membran in das Tragverhalten mit einzubinden.

konstruktive Lösungen  
der Spreize werden im  
Kapitel 3.1. vorgestellt.

Im Vergleich der resultierenden Beanspruchung aus Vorspannung und äußerer Last können Aussagen über die Spreize getroffen werden. Der Momentenverlauf beider Rahmen stellt sich wie folgt ein:

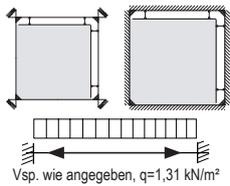


Ohne Spreizenkopplung von oberer und unterer Membran kommt es bei gleicher Belastung zu etwas geringeren Rahmenbeanspruchungen. Dies zeigt der rechte Momentenverlauf des Rahmens, bei dem die Spreize durch äußeres Festhalten der Membran ersetzt wurde. Die Spreizen erhöhen also durch die Einbindung der unteren Membran in den Lastabtrag die Gesamtbelastung. Die in Studie S15 festgestellte Mehrbelastung im Vergleich zu sattelförmig bespannten Rahmen ist also zum einen auf den Einfluss der Spreizen, vor allem aber auf ihre ungünstigere, in vielen Bereichen zu schwach gekrümmten Membranform zurückzuführen, denn auch ohne Spreize ist die Rahmenbelastung deutlich höher als die der Sattelform.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die buckelförmige Bespannung von Rahmenmodulen nicht die wirtschaftlichste Form der Rahmenmodule darstellt. Sie führt zu erhöhten Membran- und Rahmenbeanspruchungen. Gleichzeitig kommt es zu einer sehr unhomogenen Beanspruchung der Membran mit lokalen Spannungskonzentrationen, die für Membran und Folie ungünstig sind. Konstruktiv muss die Spreize mit einer großflächigen Auflagerfläche ausgeführt werden, um ein Durchstanzen der Membran unter Belastung zu vermeiden.

In Studie S16 wird wieder beispielhaft am 2x4m grossen Rahmen der Unterschied zwischen quadratisch und rechteckig geformten Rahmengenometrien aufgezeigt. Wie bereits bei der Sattelform beobachtet wird die Beanspruchung der langen Rahmenseiten so gross, dass die Verformung der oberen und unteren Rahmenseite nach außen schlägt. Dieses Verhalten spiegelt sich im Momentenverlauf wieder, der sich komplett auf die Seite der Stützmomente verschoben hat und keine Nullstellen mehr aufweist.

Studie S16



Vsp. wie angegeben,  $q=1,31 \text{ kN/m}^2$

Tab. 3.33.

Vsp - Vorspannung  $v$  [kN/m]

$V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]

$M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 $Q_2$  - max. Querkraft Spannbalken [kN]  
 $V_2$  - max Verformung Spannbalken [mm]  
 $V_{22}$  - max Verformung Spannbalken [mm]

$N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]

$M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $N_4$  - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
 $Q_4$  - max. Querkraft Rahmen [kN]  
 $V_{41}$  - max Verformung Rahmen [mm]  
 $V_{42}$  - max Verformung Rahmen [mm]

$U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]  
 $U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (max Q / Q_{zul}) \times 100$  [%]

### S16 Tragverhalten des buckelförmig bespannten 2x4m grossen Rahmens

Rahmen:  $a \times b = 2 \times 4 \text{ m}$ ,  $b \times h = 14 \times 16 \text{ cm}$ , Holz, Schraubenabstand: 15% der Rahmenlänge

Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 0%, eben gespannt

Belastung: Vorspannung  $v = 2 \text{ kN/m}$ ,  $q = 1,31 \text{ kN/m}^2$

Rahmen $a \times b$ m	rechteckiges Holzprofil										
	Vsp. kN/m	Membran $V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	Spannbalken $M_2 / Q_2$   $b \times h$   $U_M$   $U_Q$   $V_{21} / V_{22}$ kNm / kN   cm   %   %   mm	Schraube $N_3$ kN	Rahmen $M_4 / Q_4$   $b \times h$   $U_M$   $U_Q$   $V_{41} / V_{42}$ kNm / kN   cm   %   %   mm						
2 x 2	3	154   6,3 / 0,1	4,19 / 9,08   14x16   86 / 29   7,0 / 1,0	12,2	5,65 / 9,86   16x18   80 / 25   9,4 / 1,2						

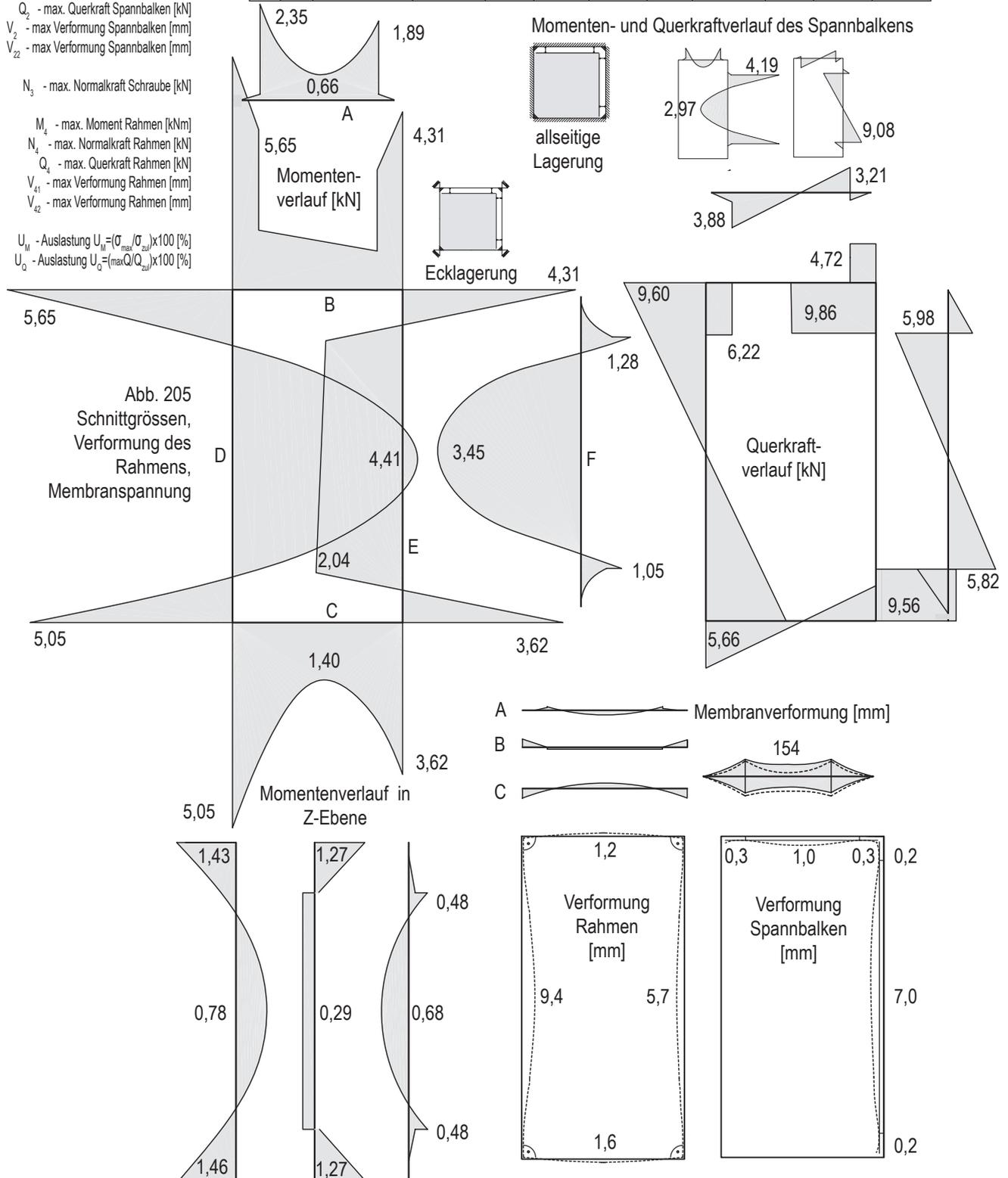
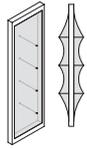
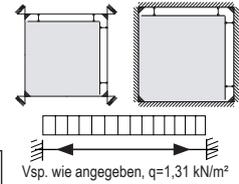


Abb. 205  
Schnittgrößen,  
Verformung des  
Rahmens,  
Membranspannung



## S17 Bemessung buckelförmig bespannter Rahmenmodule

Rahmen: Holz, bzw. Stahlhohlkastenprofil  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, bzw. **ETFE-Folie 0,2mm**, Stich  $f = 10\%$   
 Belastung: Vorspannung: wie angegeben,  $q = 1,31\text{kN/m}^2$



Vsp. wie angegeben,  $q = 1,31\text{kN/m}^2$

Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil					rechteckiges Stahlhohlprofil				
	Vsp. kN/m	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$ mm   kN/m	Spannbalken $M_2   b \times h   U_M$ kNm   cm   %	Schraube $N_3$ kN	Rahmen $M_4   b \times h   U_M$ kNm   cm   %	Vsp. kN/m	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$ mm   kN/m	Spannbalken $M_2   b \times h \times t   U_M$ kNm   mm   %	Schraube $N_3$ kN	Rahmen $M_4   b \times h \times t   U_M$ kNm   mm   %
1 x 1	5	7   7,6 / 2,5	0,50   6x8   95	6,8	0,76   8x10   70	5	67   7,5 / 1,8	0,48   30x50x5   36	6,6	0,64   30x50x5   47
	2	21   3,2 / 1,4	0,18   4x6   91	2,2	0,35   6x8   67	2	22   3,1 / 1,2	0,17   30x30x4   40	2,2	0,33   30x30   78
1 x 2	4	26   6,9 / 1,0	1,43   10x12   73	8,7	1,47   10x12   75	4	31   6,4 / 0,4	1,07   30x50x5   79	8,5	1,23   30x50x5   91
	2	50   2,9 / 1,4	0,62   8x10   57	4,1	0,89   10x12   81	2	55   2,9 / 0,5	0,53   30x50x5   39	3,7	0,55   30x50x5   41
1 x 3	3	34   5,2 / 0,6	2,25   12x14   70	10,1	2,41   12x14   75	2	44   4,6 / 0,3	1,28   40x60x5   56	10,0	1,63   40x60x5   71
	1	73   2,7 / 0,8	1,13   10x12   57	5,0	1,67   10x12   85	1	91   2,4 / 0,5	1,03   40x60x5   45	4,8	1,14   40x60x5   50
1 x 4	2	42   5,1 / 0,4	3,07   14x16   63	11,4	3,34   14x16   68	2	56   5,0 / 0,4	1,49   40x60x5   66	11,1	1,85   40x60x5   81
	1	97   2,8 / 0,5	1,96   12x14   61	6,1	2,50   12x14   78	1	116   2,6 / 0,1	1,54   40x60x5   67	5,5	1,66   40x60x5   73
1 x 5	1	63   5,0 / 0,2	4,43   16x18   63	11,7	4,55   16x18   64	1	97   5,1 / 0,1	2,32   40x80x5   62	11,5	2,88   40x80x5   77
	1	101   2,8 / 0,3	2,98   14x16   61	7,4	3,74   14x16   76	1	135   2,6 / 0,1	2,34   40x80x5   63	6,6	2,47   40x80x5   66
a x b	v	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$	Spannbalken $M_2   b \times h   U_M$	Schraube $N_3$	Rahmen $M_4   b \times h   U_M$	v	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$	Spannbalken $M_2   b \times h \times t   U_M$	Schraube $N_3$	Rahmen $M_4   b \times h \times t   U_M$
2 x 2	3	64   6,2 / 0,8	1,46   10x12   74	10,4	2,56   12x14   80	3	108   6,0 / 0,8	1,34   40x60x5   59	9,8	1,93   40x60x5   84
	2	135   3,9 / 1,0	0,75   8x10   69	4,9	1,57   10x12   80	2	149   3,8 / 0,9	0,74   30x50x5   56	4,2	1,48   40x60x5   65
2 x 3	2	148   6,6 / 0,5	2,35   12x14   73	10,8	3,52   14x16   72	2	153   6,0 / 0,3	2,18   40x80x5   59	10,3	2,84   40x80x5   76
	1	196   4,1 / 0,6	1,51   10x12   77	5,3	2,25   12x14   70	1	235   4,0 / 0,3	1,43   40x60x5   63	5,2	1,80   40x60x5   79
2 x 4	1	154   6,3 / 0,1	4,19   14x16   86	12,2	5,65   16x18   80	1	160   5,9 / 0,2	3,25   50x90x5	11,8	3,75   50x100x8
2 x 5	1	169   5,8 / 0,1	6,33   16x18   89	13,6	7,09   18x20   72	1	184   5,5 / 0,1	6,03   60x100x8   89	13,2	6,21   60x100x8   91
a x b	v	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$	Spannbalken $M_2   b \times h   U_M$	Schraube $N_3$	Rahmen $M_4   b \times h   U_M$	v	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$	Spannbalken $M_2   b \times h \times t   U_M$	Schraube $N_3$	Rahmen $M_4   b \times h \times t   U_M$
3 x 3	1	143   6,5 / 0,7	2,47   12x14   77	8,4	4,50   14x16   92	1	190   5,9 / 0,6	2,36   40x80x5   63	8,3	3,82   50x90x5   75
	1	168   6,9 / 0,3	4,82   14x12   98	12,1	6,90   18x20   70	1	187   6,3 / 0,2	4,52   50x90x5   89	11,9	5,60   50x100x8   93
3 x 5	1	184   7,1 / 0,2	7,79   18x20   79	15,7	9,78   20x22   74	1	225   6,6 / 0,1	7,44   60x120x8   83	15,5	8,41   60x120x8   94
a x b	v	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$	Spannbalken $M_2   b \times h   U_M$	Schraube $N_3$	Rahmen $M_4   b \times h   U_M$	v	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$	Spannbalken $M_2   b \times h \times t   U_M$	Schraube $N_3$	Rahmen $M_4   b \times h \times t   U_M$
4 x 4	1	215   7,6 / 0,6	4,98   16x18   70	14,3	8,96   18x20   91	1	230   6,7 / 0,5	4,91   50x100x5   82	14,2	7,31   60x120x8   81
	1	251   8,2 / 0,4	8,46   18x20   86	16,8	12,4   22x24   72	1	276   8,0 / 0,3	8,36   60x120x8   93	16,6	11,79   80x120x8   86
a x b	v	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$	Spannbalken $M_2   b \times h   U_M$	Schraube $N_3$	Rahmen $M_4   b \times h   U_M$	v	Membran $V_1   \sigma_{\text{max/min}}$	Spannbalken $M_2   b \times h \times t   U_M$	Schraube $N_3$	Rahmen $M_4   b \times h \times t   U_M$
5 x 5						1	290   9,2 / 0,4	10,1   80x120x8   74	18,7	13,5   100x150x8   52

VTab. 3.34.

sp - Vorspannung  $v$  [kN/m]

$V_1$  - max Verformung Membran [mm]

$\sigma$  - Membranspannung [kN/m]

$M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]

$N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]

$M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]

$U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{zul}}) \times 100$  [%]

Werte in Schwarz beziehen sich auf

PVC-PE Membran Typ 3

Werte in Blau beziehen sich auf

ETFE-Folie 0,2mm

Membran- und Folienspannungen in

Rot liegen außerhalb des idealen

Vorspannungsbereichs

Studie S17 stellt Beanspruchung und Bemessung sämtlicher Rahmengenometrien dar. Durch die hohen lokalen Spannungsspitzen in Membran und Folie eignen sich maximal 2x3m große Rahmengenometrien für die Bespannung mit ETFE. Größere Geometrien führen zu unverträglich hohen Spannungen für dieses Material. Auch bei der PVC Membranbespannung übersteigen die Spannungen bereits ab 3x3m großen Geometrien den Idealbereich. Da diese Spitzen jedoch unterhalb der zulässigen Spannung liegen, können sie toleriert werden. Die Werte oberhalb des Idealbereichs sind rot hervorgehoben.

Auf der rechten Seite folgt die graphische Zusammenfassung der Querschnittshöhen der Rahmen in Abhängigkeit von Geometrie und Vorspannung. Die Querschnittstabelle fasst diese Ergebnisse noch einmal zweidimensional zusammen.

Abb. 206 a,b  
erforderliche Höhe  $h$  [cm] des rechteckigen Holzquerschnitts des Rahmenmoduls, in Abhängigkeit der Rahmengenometrie [m]

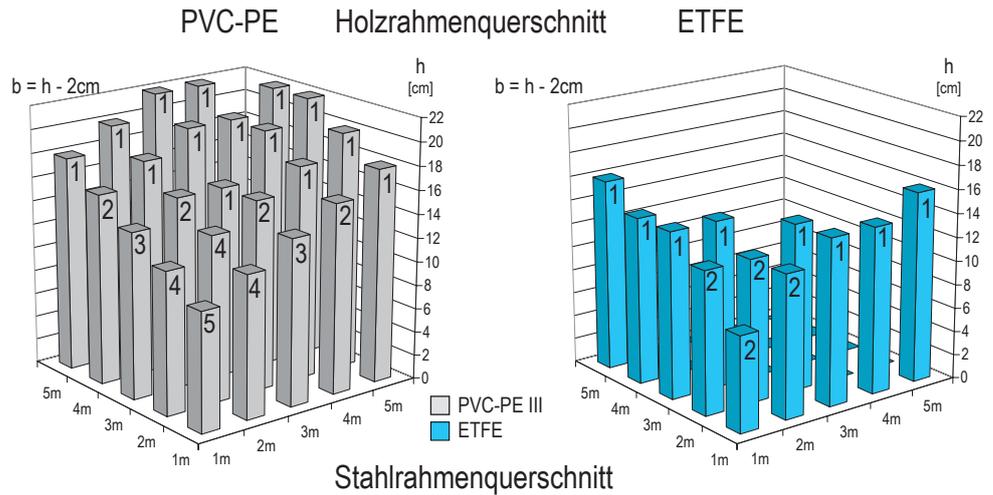
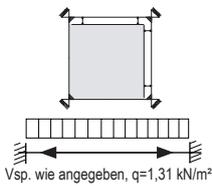
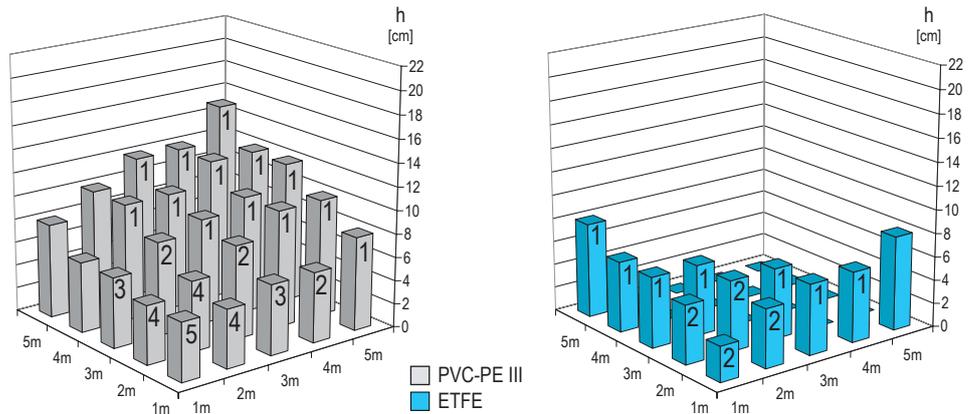
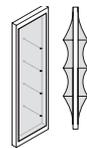


Abb. 206 c,d  
erforderliche Höhe  $h$  [cm] des rechteckigen Stahlhohlkastenprofils des Rahmenmoduls, in Abhängigkeit der Rahmengenometrie [m]



Querschnitte buckelförmig bespannter Rahmenmodule

Rahmen: Holz, bzw. *Stahlhohlkastenprofile*  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, bzw. *ETFE-Folie 0,2mm*, Stich  $f=10\%$   
 Belastung: Vorspannung wie angegeben,  $q=1,31\text{kN/m}^2$



Tab. 3.35.  
 Werte in Schwarz beziehen sich auf PVC-PE bespannte Holzrahmen  
 Werte in Schwarz und kursiv beziehen sich auf PVC-PE bespannte Stahlrahmen  
 Werte in Blau beziehen sich auf ETFE-bespannte Holzrahmen  
 Werte in Blau und kursiv beziehen sich auf ETFE bespannte Stahlrahmen

Rahmen $a \times b$ [m]	Vorspannung [kN/m]					
	1	2	3	4	5	6
1 x 1		6x8   3x3			8x10   3x5	
1 x 2		10x12   3x5		10x12   3x5		
1 x 3	12x14   4x6		12x14   4x6			
1 x 4	12x14   4x6	14x16   4x6				
1 x 5	16x18   4x8 14x16   4x8					
2 x 2		10x12   4x6		12x14   4x6		
2 x 3	12x14   4x6	14x16   4x8				
2 x 4	16x18   5x10					
2 x 5	18x20   6x10					
3 x 3	14x16   5x9					
3 x 4	18x20   5x10					
3 x 5	20x22   6x12					
4 x 4	18x20   6x12					
4 x 5	22x24   8x12					
5 x 5	10x15					

### 3.3.7. Tragverhalten der bogenförmig bespannten Rahmenmodule

Als dritte Form möglicher Rahmenbespannungen wird hier die bogenförmige Bespannung analysiert und untersucht. Anstelle einer punktuellen Auslenkung der Membran wird durch das Einfügen von Bögen mit einer linearen Auslenkung die notwendige doppelte Krümmung in die Membran gebracht. Dabei kann der äußere Rahmen, wie auch bei den sattelförmigen Rahmenmodulen, in einer Ebene verbleiben. Die konstruktive Detaillierung wurde bereits in Kapitel 3.1. vorgestellt.

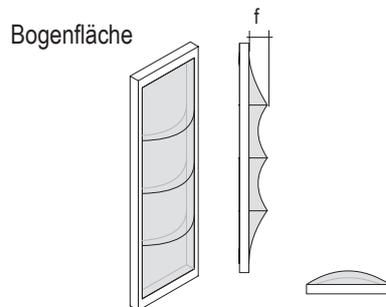


Abb. 207  
Bogenfläche

Im Gegensatz zu den buckelförmig ausgelenkten Rahmenmodulen wird im Falle der Bogenfläche nur die obere Membran-, bzw. Folienfläche für den Lastabtrag herangezogen. Die untere Membran, bzw. Folie ist dagegen flach gespannt und dient als Zugband des Bogens. Der Bogen ist in einer Membrantasche mit der Membran kraftschlüssig verbunden. Es entsteht ein hybrides Tragverhalten, bei der die Membran den Bogen gegen Ausknicken sichert. Die Stichhöhe des Bogens und die Ausrichtung und Anzahl der Bögen pro Rahmen sind entscheidende Faktoren für die Bemessung der Rahmenmodule. Sie werden wie folgt definiert: Die Bögen werden waagrecht, also parallel zur Schussrichtung zwischen den Rahmen eingefügt. Der Stich beträgt 10% der kürzeren Rahmenseite. Es wird konstant ein Stahlrundrohrprofil ( $d=42\text{mm}$ ,  $t=2,6\text{mm}$ ) für die Bemessungen der Rahmenmodule angenommen. Der Abstand von Bogen zu Bogen beträgt  $1\text{m}$ , der Abstand von Bogen zu Rahmenrand beträgt  $0,5\text{m}$ . Damit ergeben sich die unten abgebildeten Aufteilungen der Bogenflächen.

Bogenflächen eignen sich vor allem für rechteckige, langgezogene Rahmengeometrien, bei denen der Membranspannungsausfall über die lange Seite durch das bogenförmige Auslenken der Membran verhindert werden kann. Der Bogen kann dabei über die kürzere Seite spannen und relativ schlank dimensioniert werden. Dagegen ist der Einsatz des Bogens bei quadratischen oder großen Spannweiten weniger sinnvoll. Quadratische Rahmengenometrien führen zu einem gleich verteilten Membranspannungsverhältnis, dass nicht notwendigerweise durch Bögen aktiviert werden muss und zu große Spannweiten führen zu grossen Rohrquerschnitten des Bogens. Insofern wird in dieser Arbeit die Bogenfläche beschränkt auf Rahmenbreiten bis maximal  $2\text{m}$ . Nachstehend ein schematischer Überblick:

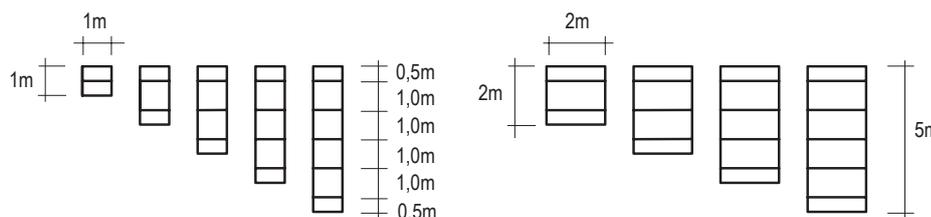
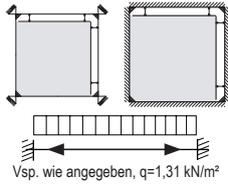


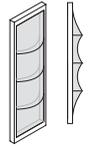
Abb. 208

Die nachfolgende Studie S19 untersucht das Tragverhalten der bogenförmig bespannten Module am Beispiel eines  $2 \times 2\text{m}$  großen Rahmens. Die gewählte Vorspannung beträgt  $4\text{kN/m}$ , die Flächenlast  $q= 1,31\text{ kN/m}^2$ .



### S18 Tragverhalten bogenförmig bespannter Rahmenmodule

Rahmen:  $axb=2x2\text{m}$ ,  $bxh=10x12\text{cm}$ , Holz, Schraubenabstand: 15% von a  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 10%  
 Belastung: Vorspannung  $v=4\text{kN/m}$ ,  $q=1,31\text{kN/m}^2$  als Drucklast



Tab. 3.36.  
 Vsp - Vorspannung  $v$  [kN/m]

$V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]

$M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 $Q_2$  - max. Querkraft Spannbalken [kN]  
 $V_2$  - max Verformung Spannbalken [mm]  
 $V_{22}$  - max Verformung Spannbalken [mm]

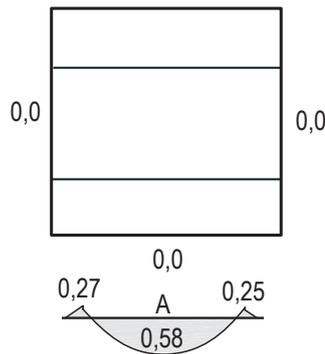
$N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]

$M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $N_4$  - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
 $Q_4$  - max. Querkraft Rahmen [kN]  
 $V_{41}$  - max Verformung Rahmen [mm]  
 $V_{42}$  - max Verformung Rahmen [mm]

$U_M$  - Auslastung  $U_M=(\sigma_{max}/\sigma_{zul})\times 100$  [%]  
 $U_Q$  - Auslastung  $U_Q=(maxQ/Q_{zul})\times 100$  [%]

Rahmen $axb$ m	rechteckiges Holzprofil											
	Membran	Spannbalken					Schraube	Rahmen				
$V_{sp}$ kN/m	$V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	$M_2$ / $Q_2$ kNm / kN	$b \times h$ cm	$U_M$ %	$U_Q$ %	$V_{21}/V_{22}$ mm	$N_3$ kN	$M_4$ / $Q_4$ kNm / kN	$b \times h$ cm	$U_M$ %	$U_Q$ %	$V_{41}/V_{42}$ mm
2x2	4	23   6,4 / 0,1	1,36 / 5,04	10x12	69 / 30	1,0 / 4,2	8,7	1,08 / 4,41	8x10	97 / 40		1,1 / 3,4

Normalkraftverlauf [kN]



Momenten- und Querkraftverlauf des Spannbalkens

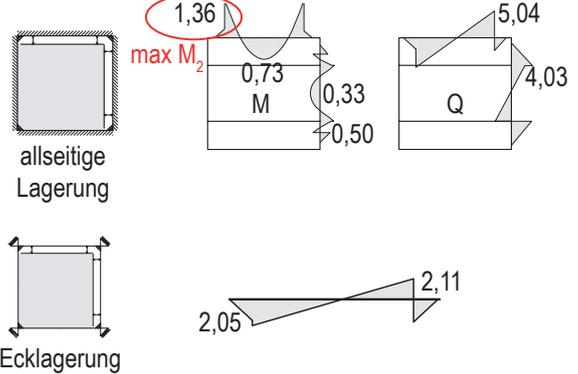
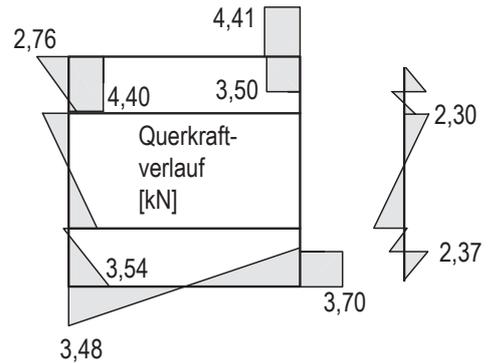
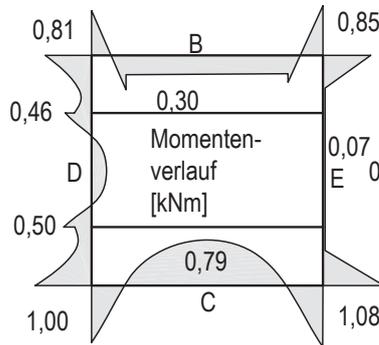
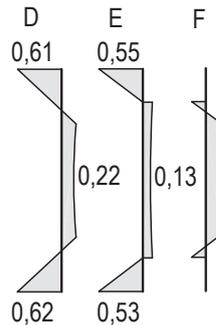
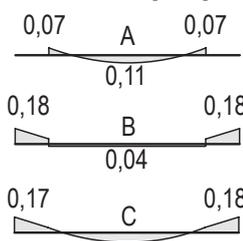


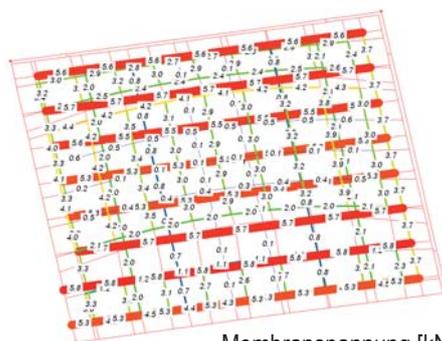
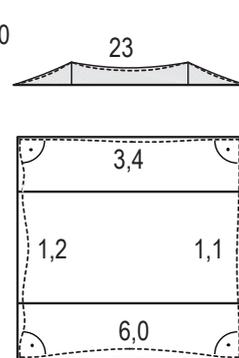
Abb. 209  
 Schnittgrößen,  
 Verformung des  
 Rahmens,  
 Membranspannung



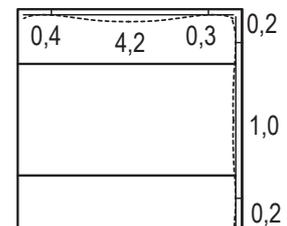
Momentenverlauf in Z-Ebene [kNm]



Verformung [mm]



Membranspannung [kN/m]



Die obere und untere Rahmenseite verlaufen parallel zu den eingefügten Bögen und werden deshalb nicht direkt im Tragverhalten durch die Bögen beeinflusst. Deshalb entspricht der Momentenverlauf qualitativ dem der sattelförmig bespannten Rahmenmodule. Dagegen weichen Quer- und Momentenverläufe von den Verläufen bei Sattelflächen ab. Grund ist der Einfluss der Bögen. Die Bögen werden durch die Vorspannung der Membran und der Flächenlast gestaucht. Sie stützen sich gegen den äußeren Rahmen, bzw. den Spannbalken und reduzieren die Biegebeanspruchungen der Rahmen sowie ihre Verformungen. Der Momentenverlauf auf der linken Rahmenseite verändert sich von dem eines Rahmenriegels hin zu dem Verlauf eines Einfeldträgers mit zwei Kragarmen. Der drückende Einfluss der Bögen zieht das Moment an der Stelle des Bogenaufagers als Stützmoment nach oben und verringert dabei gleichzeitig das Feldmoment. Gleiches geschieht beim gegenüberliegenden Spannbalken. Durch den Einfluss der Spannschrauben und den auskragenden Enden des Spannbalkens kommt es zu der Abweichung des Momentenverlaufs im Vergleich zur gegenüberliegenden Rahmenseite. Auch der Querkraftverlauf zeigt, durch Versprünge an den Stellen der Bogenaufleger, die entlastende Wirkung der Bögen auf seitlichen Rahmen und Spannbalken.

Im Gegensatz zu den sattelförmigen Rahmenmodulen führen Winddruck- und Soglasten bei den bogenförmig bespannten Rahmenmodulen nicht zu identischen Rahmenbeanspruchungen. Deshalb muss bei der Bemessung der bogenförmig bespannten Rahmenmodule zwischen Druck- und Soglast unterschieden werden. Die nachstehende Momentenbeanspruchung des bogenförmig bespannten Rahmens aus Studie S18 unter Sogbelastung zeigt, dass der Lastfall Soglast zu Maximalbeanspruchungen im Rahmen führt, insofern maßgebend ist. Der Spannbalken, dessen Maximalbeanspruchung aus der allseitigen Lagerung hervorgeht wird jedoch bei Drucklast am stärksten beansprucht. Darüber hinaus ist festzustellen, dass unter Soglast die entlastende Wirkung der Bögen erhalten bleibt. Die Membranvorspannung drückt auch weiterhin die Bögen gegen den Rahmen. Maximale Membranspannungen entstehen bei Soglast auf der gekrümmten oberen Membran, wogegen die Maximalspannungen bei Drucklast in der stark beanspruchten unteren Membran auftreten.

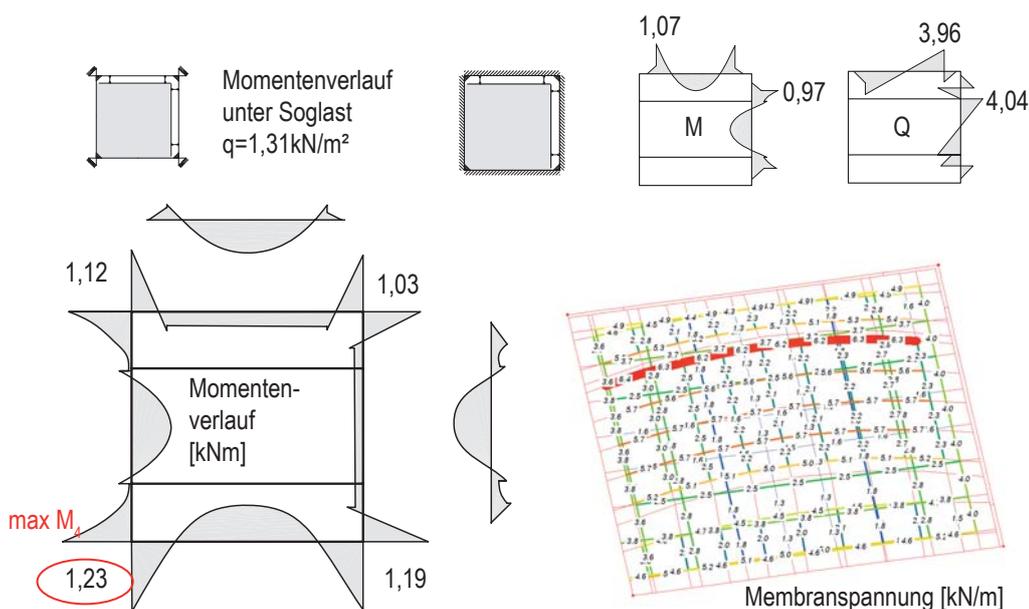
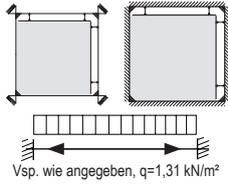


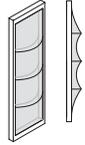
Abb. 210  
Vergleichsstudie:  
Das bogenförmig  
bespannte  
Rahmenmodul unter  
Sogbelastung  
 $q=1,31 \text{ kN/m}$

Es folgt die Studie S19 eines 2x4m großen Rahmenmoduls unter Sogbelastung.



### S19 Bogenförmig bespannter, 2x4m grosser Rahmen

Rahmen: axb= 2x4m, bxh= 10x12cm, Holz, Schraubenabstand: 15% von a.  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, Stich: 10%  
 Belastung: Vorspannung wie angegeben, q= 1,31kN/m² als Soglast



Tab. 3.37.  
 Vsp - Vorspannung v [kN/m]

V<sub>1</sub> - max Verformung Membran [mm]  
 σ - Membranspannung [kN/m]

M<sub>2</sub> - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 Q<sub>2</sub> - max. Querkraft Spannbalken [kN]  
 V<sub>2</sub> - max Verformung Spannbalken [mm]  
 V<sub>22</sub> - max Verformung Spannbalken [mm]

N<sub>3</sub> - max. Normalkraft Schraube [kN]

M<sub>4</sub> - max. Moment Rahmen [kNm]  
 N<sub>4</sub> - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
 Q<sub>4</sub> - max. Querkraft Rahmen [kN]  
 V<sub>41</sub> - max Verformung Rahmen [mm]  
 V<sub>42</sub> - max Verformung Rahmen [mm]

U<sub>M</sub> - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]  
 U<sub>Q</sub> - Auslastung  $U_Q = (max Q / Q_{zul}) \times 100$  [%]

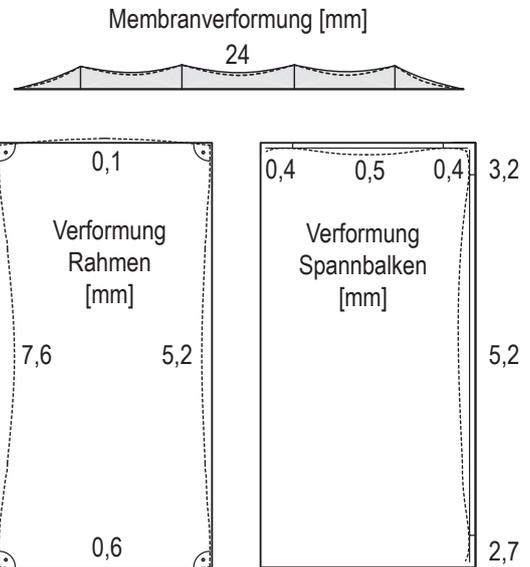
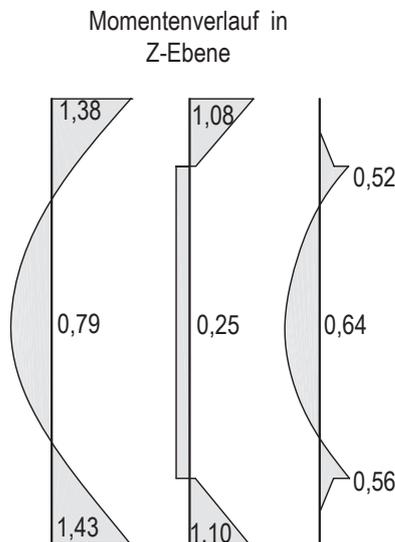
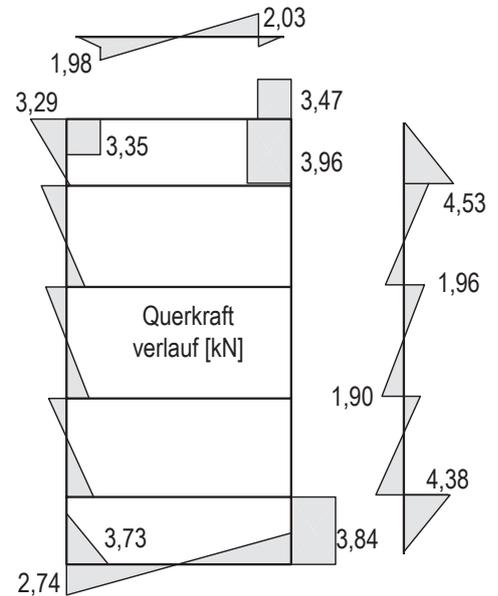
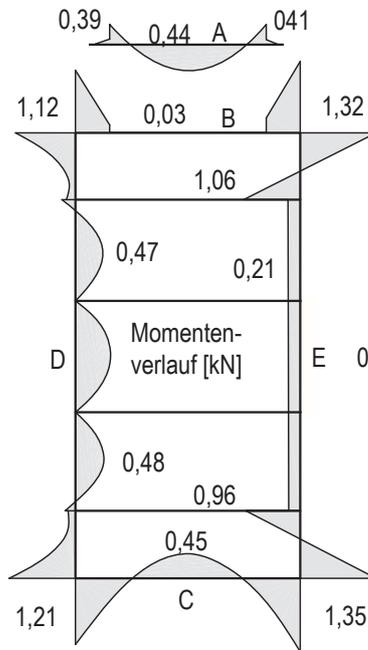
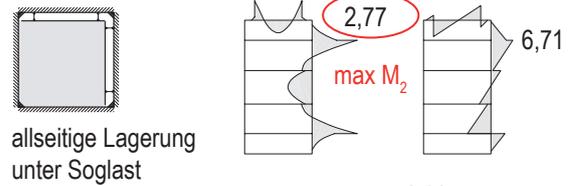
\* Belastung in Z-Richtung

Abb. 211  
 Schnittgrößen,  
 Verformung des  
 Rahmens,  
 Membranspannung

Rahmen ax,b m	rechteckiges Holzprofil											
	Vsp. kN/m	Membran V <sub>1</sub>   σ max / min mm   kN/m	Spannbalken M <sub>2</sub> / Q <sub>2</sub> kNm / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> %   %	V <sub>21</sub> / V <sub>22</sub> mm	Schraube N <sub>3</sub> kN	Rahmen M <sub>4</sub> / Q <sub>4</sub> kNm / kN	b x h cm	U <sub>M</sub> U <sub>Q</sub> %   %	V <sub>41</sub> / V <sub>42</sub> mm	
2 x 2	4	24   5,5 / 0,64	2,77 / 6,71	12x14	86 /	6,0 / 1,2	9,8	1,72* / 4,03*	12x10	87 / 24	4,0 / 2,8	



Momenten- und Querkraftverlauf des Spannbalkens



Gerade bei rechteckigen Rahmengeometrien wird die Entlastung der seitlichen Rahmen und Spannbalken deutlich. Studie S19 zeigt die Beanspruchung des Rahmens in Ecklagerung unter Soglast. Durch die Membranvorspannung werden die Bögen auch bei Soglast weiterhin auf die Rahmenseiten gedrückt, sodass die entlastenden Eigenschaften der Bögen erhalten bleiben. Der Momentenverlauf hängt sich zwischen die Bögen und weist eine annähernde Gleichverteilung zwischen Stütz- und Feldmoment auf. Lediglich an der Stelle der Spannschrauben weist der Spannbalken eine maximale Biegebeanspruchung auf, die aus der Kragarmbelastung resultiert.

Betrachtet man die Biegebeanspruchung in Z-Richtung, so fällt auf, dass sie die Maximalmomente, die in Rahmenebene auftreten, überschreiten. Die Beanspruchung der Z-Achse steigt also mit zunehmend gestreckten Geometrien und kann nicht mehr einfach durch die Bemessung der X-,Y- Achse abgedeckt werden.

Auch diese Rahmengeometrie soll im Vergleich auf ihre Beanspruchung unter Winddruck untersucht werden. Nachfolgend die Momentenverteilung.

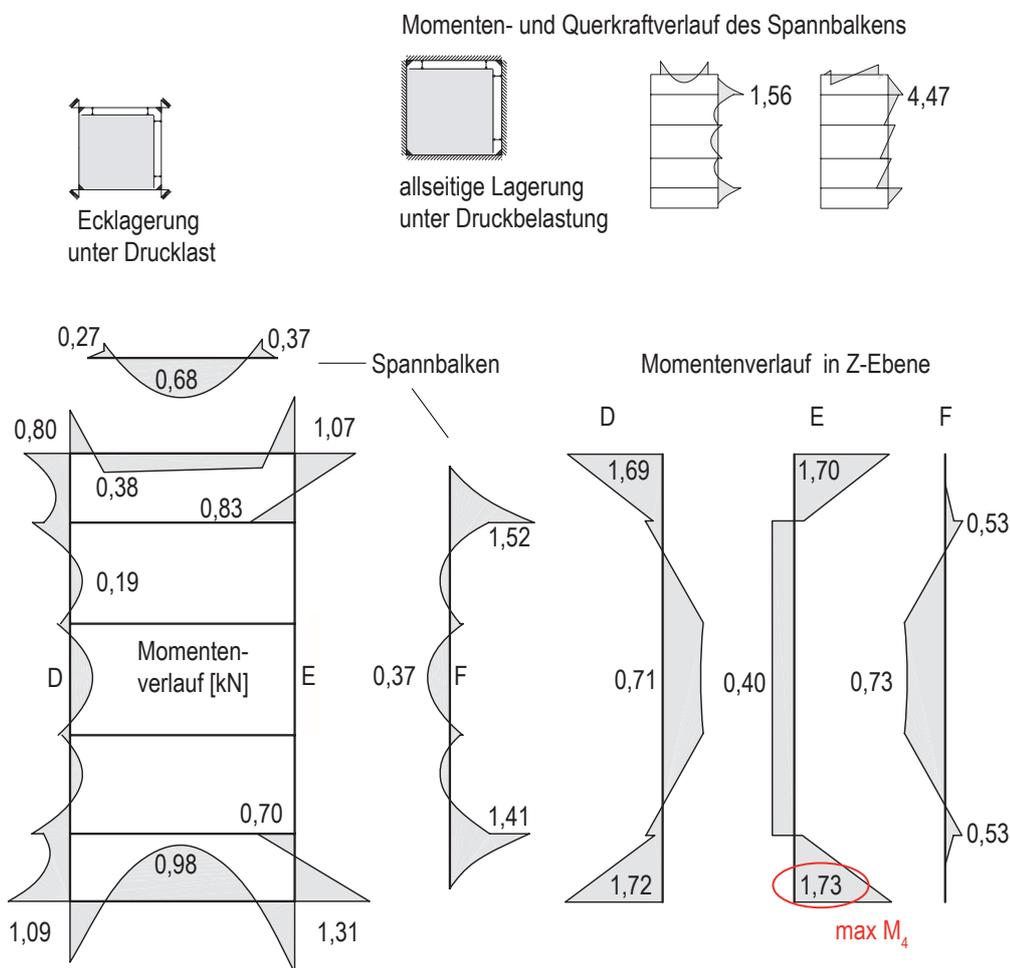
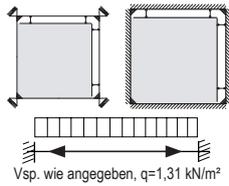


Abb. 212  
Das 2x4m große  
Rahmenmodul unter  
Drucklast

Studie S20

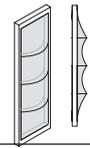
Maximale Biegebeanspruchung des Spannbalkens resultiert bei rechteckigen Rahmenmodulen unter Sogbelastung. Maximalmomente am Rahmen treten unter Drucklast in Z-Richtung auf.

Studie S20 listet abschließend die Beanspruchung und Dimensionierung der bogenförmig bespannten Rahmenmodule zwischen 1x1m bis 2x5m auf.



### S20 Bemessung bogenförmig bespannter Rahmenmodule

Rahmen: Holz, bzw. Stahlhohlkastenprofil  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, bzw. **ETFE-Folie 0,2mm**, Stich 10%  
 Belastung: Vorspannung: wie angegeben,  $q = 1,31 \text{ kN/m}^2$



Tab. 3.38.  
 Vsp - Vorspannung v [kN/m]  
 $V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]  
 $M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 $N_3$  - max. Normalkraft Schraube [kN]  
 $M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]  
 Werte in Schwarz beziehen sich auf  
 PVC-PE Membran Typ 3  
 Werte in Blau beziehen sich auf  
 ETFE-Folie

Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil				rechteckiges Stahlhohlprofil					
	Vsp. kN/m	Membran $V_1   \sigma_{max/min}$ mm   kN/m	Spannbalken $M_2   b \times h   U_M$ kNm   cm   %	Schraube $N_3$ kN	Rahmen $M_4   b \times h   U_M$ kNm   cm   %	Vsp. kN/m	Membran $V_1   \sigma_{max/min}$ mm   kN/m	Spannbalken $M_2   b \times h \times t   U_M$ kNm   mm   %	Schraube $N_3$ kN	Rahmen $M_4   b \times h \times t   U_M$ kNm   mm   %
1 x 1	4	9   6,7 / 1,2	0,25   6x8   48	3,7	0,38   6x8   72	4	12   6,8 / 0,1	0,33   30x30x5   78	3,7	0,29   30x30x5   69
	2	12   2,6 / 1,5	0,19   4x6   97	2,0	0,27   6x8   51	2	14   2,6 / 1,3	0,24   30x30x5   57	1,9	0,22   30x30x5   52
1 x 2	4	8   6,3 / 1,9	0,83   8x10   76	8,2	0,54   8x10   49	4	7   6,5 / 1,6	0,57   30x50x5   42	6,2	0,45   30x50x5   33
	2	19   3,2 / 1,2	0,27   6x8   51	2,1	0,29   6x8   55	2	19   3,2 / 1,3	0,28   30x30x5   66	2,1	0,29   30x30x5   69
1 x 3	3	11   5,6 / 1,3	0,94   8x10   86	9,5	0,58*   10x8   53	3	13   5,5 / 1,3	0,71   30x50x5   53	8,2	0,44*   50x30x5   33
	1	34   2,2 / 0,7	0,20   6x8   38	2,2	0,39*   8x6   74	1	35   2,2 / 0,7	0,28   30x30x5   66	2,2	0,40*   30x30x5   95
1 x 4	2	11   5,5 / 0,6	1,05   8x10   96	6,7	0,86*   10x8   79	2	14   5,6 / 0,6	0,96   30x50x5   71	5,6	0,82*   50x30x5   61
	1	35   2,3 / 0,4	0,33   6x8   63	2,7	0,70*   10x8   64	1	37   2,3 / 0,4	0,31   30x30x5   74	2,3	0,70*   50x30x5   52
1 x 5	3	9   3,6 / 0,5	1,45   10x12   74	8,4	1,19*   12x10   60	3	18   3,7 / 0,7	1,27   40x60x5   56	7,9	1,14*   60x40x5   50
	2	36   2,6 / 1,5	0,55   8x10   50	3,0	1,15*   12x10   58	2	36   2,6 / 1,5	0,54   30x30x5   40	2,9	1,12*   60x40x5   49
2 x 2	4	23   6,4 / 1,2	1,36   10x12   69	8,7	1,08   8x10   97	4	28   5,5 / 0,1	1,06   30x50x5   79	7,6	0,75   30x50x5   56
	3	38   3,6 / 1,8	1,04   8x10   95	6,5	1,13   8x10   99	3	44   3,5 / 1,15	0,95   30x50x5   71	6,2	0,89   30x50x5   66
2 x 3	3	18   5,0 / 1,8	2,22   12x14   69	10,7	1,09*   12x10   55	3	19   5,7 / 0,1	1,42   40x60x5   62	7,1	1,05*   50x30x5   78
	1	44   2,7 / 0,3	1,21   10x12   61	4,1	1,01*   12x10   51	1	44   2,7 / 0,2	0,88   30x50x5   65	3,2	0,99*   50x30x5   73
2 x 4	3	24   5,5 / 0,6	2,77   12x14   86	9,8	1,72*   12x10   87	3	21   5,6 / 0,1	1,82   40x60x5   80	8,8	1,66*   60x40x5   73
	1	49   2,3 / 0,5	1,39   10x12   71	4,1	1,65*   12x10   84	1	45   2,3 / 0,3	1,14   40x60x5   50	5,9	1,59*   60x40x5   70
2 x 5	2	20   5,7 / 0,5	2,01   12x14   63	8,7	2,54*   14x12   79	2	26   5,7 / 0,3	1,35   40x80x5   73	5,3	2,49*   80x40x5   67
	1	47   2,3   0,5	1,45   10x12   74	4,5	2,50*   14x12   78	1	37   2,2 / 0,2	1,22   40x60x5   53	3,8	2,44*   80x40x5   65

Wie bereits in den Studie S18 und S19 ersichtlich muss für die Bemessung der bogenförmig bespannten Rahmenmodule zwischen Druck- und Sogbelastung differenziert werden. Die Untersuchung sämtlicher Rahmengenometrien zeigt, dass quadratische Rahmengenometrien andere Trageigenschaften aufweisen, als langgestreckt, rechteckige. Bei quadratischen Rahmengenometrien tritt die höchste Rahmenbelastung unter Drucklast und in der Ebene auf. Bei gestreckten Geometrien wird jedoch das Moment unter Drucklast, aber in Z-Achse, also senkrecht zur Rahmenebene maximal und bemessungsrelevant. Die in der Ergebnistabelle mit \* gekennzeichneten Momente sind daher als Momente in Z-Achse zu verstehen, folglich ist das Profil entsprechend der Belastungsrichtung gedreht.

Der Spannbalken der quadratischen Rahmen bemisst sich nach der Beanspruchung, die bei allseitiger Lagerung in der Ebene aus Drucklast resultiert. Bei gestreckten Geometrien treten unter Sogbelastung Maximalmomente in der Ebene auf. Die Abminderung der Spannbalkenbelastung fällt jedoch schwächer aus als die Rahmenentlastung. Grund hierfür ist, dass der Kragarm des Spannbalkens nicht durch einen Bogen entlastet wird und insofern weiterhin ein großes Moment an der Stelle der Spannschrauben verursacht. Deshalb fallen Beanspruchung und folglich die Querschnitte für den Spannbalken, abweichend von Sattel- und Buckelfläche größer als die des Rahmens aus.

Generell kann die bogenförmige Bespannung des Rahmenmoduls, vor allem in der eckgehaltene Lagerung schlank ausgeführt werden. Die Entlastung der Rahmen durch das Einwirken der Bögen verursacht eine deutliche Abminderung der Beanspruchung und führt zu schlanken Holzquerschnitten und Stahlhohlkastenprofilen. Durch den starken Einfluss der Belastung in Z-Richtung ist der Unterschied in der Bemessung der Querschnitte zwischen ETFE-Folie und Membran in dieser Studie gering.

Nachstehend die Ergebnisse der Studie S20 als graphische Zusammenfassung. Die Werte im Diagramm beziehen sich auf die erforderliche Querschnittsbreite  $b$ .

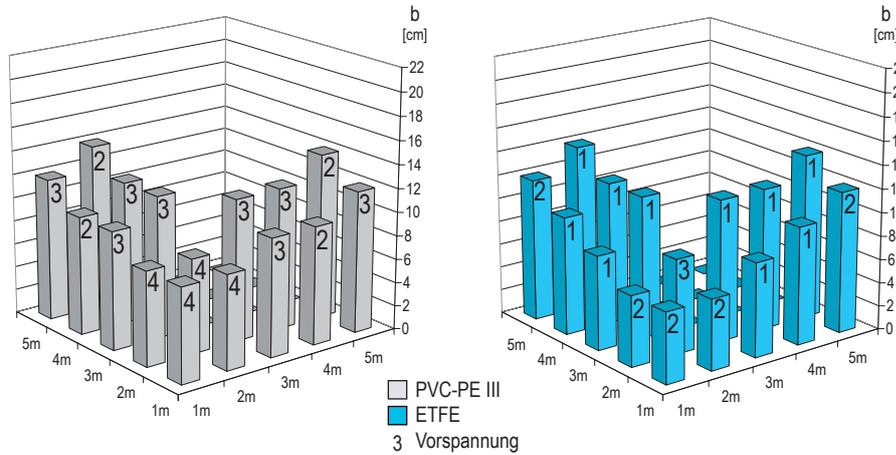


Abb. 213 a,b  
Erforderliche Breite  $b$  [cm] des rechteckigen Holzquerschnitts des Rahmenmoduls, bei eckgehaltener Lagerung, in Abhängigkeit der Rahmengeometrie [m]

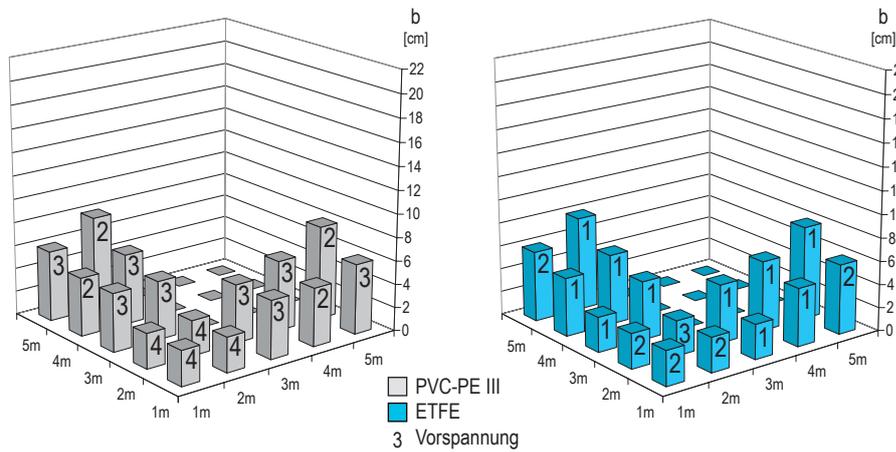
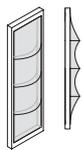
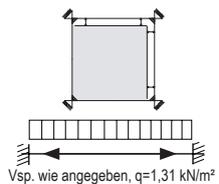


Abb. 213 c,d  
Erforderliche Querschnittsbreite  $b$  [cm] des rechteckigen Stahlhohlkastenprofils des Rahmenmoduls, bei eckgehaltener Lagerung, in Abhängigkeit der Rahmengeometrie [m]



**Querschnitte bogenförmig gespannter Rahmenmodule**

Rahmen: Holz, bzw. *Stahlhohlkastenprofile*  
 Bespannung: PVC-PE Membran Typ3, bzw. *ETFE-Folie 0,2mm*, Stich  $f= 10\%$   
 Belastung: Vorspannung wie angegeben,  $q= 1,31\text{kN/m}^2$



Rahmen $a \times b$ [m]	Vorspannung [kN/m]					
	1	2	3	4	5	6
1 x 1		6x8   3x3		6x8   3x3		
1 x 2		6x8   3x3		8x10   3x5		
1 x 3	8x6   3x3		10x8   5x3			
1 x 4	10x8   5x3	10x8   5x3				
1 x 5		12x10   6x4	12x10   6x4			
2 x 2			8x10   3x5	8x10   3x5		
2 x 3	12x10   5x3		12x10   5x3			
2 x 4	12x10   6x4		12x10   6x4			
2 x 5	14x12   8x4	14x12   8x4				

Tab. 3.39.  
Werte in Schwarz beziehen sich auf PVC-PE bespannte Holzrahmen

Werte in Schwarz und kursiv beziehen sich auf PVC-PE bespannte Stahlrahmen

Werte in Blau beziehen sich auf ETFE-bespannte Holzrahmen

Werte in Blau und kursiv beziehen sich auf ETFE bespannte Stahlrahmen

### 3.3.8. Vergleich des Tragverhaltens der Rahmenmodule

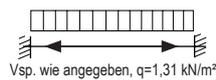
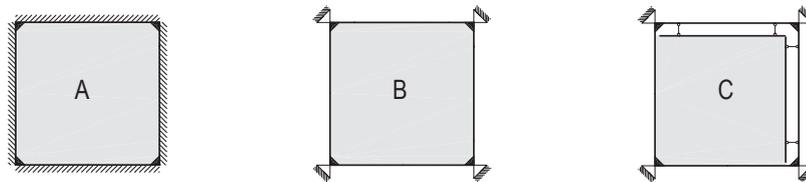
Nach den Studien zum Tragverhalten der drei unterschiedlich bespannten Rahmenmodule, sollen zum Abschluss dieses Kapitels die Ergebnisse miteinander verglichen und vergleichend bewertet werden.

#### Hybrides Tragverhalten, statisches System

Die Berücksichtigung des hybriden Tragverhaltens, also der gegenseitigen Beeinflussung von Membran, Spannbalken und Rahmen in ihrem Tragverhalten stellt den wichtigsten Aspekt in der Untersuchung der Rahmenmodule dar. Die Steifigkeiten von Rahmen und Spannbalken sind ebenso entscheidende Parameter in dem Rahmenmodulsystem, wie die Trageigenschaften von Membran oder Folie. Erst in ihrem Wechselspiel stellt sich ein Gleichgewicht der Kräfte innerhalb des Systems ein, deren Ergebnisse wesentlich realitätsnäher sind, je genauer das statische System modelliert wird. Der nachfolgende Vergleich von drei Untersuchungen an unterschiedlich aufwändig modellierten statischen Modellen zeigt, wie stark die Ergebnisse voneinander abweichen.

Untersuchung A spannt die Membran in einen allseitig fest gehaltenen Rahmen ein, Untersuchung B lagert diesen vereinfachten Rahmen in den Ecken. Untersuchung C modelliert das Rahmensystem wie in den durchgeführten Studien, als Spannbalkenrahmen in eckgehaltener Lagerung.

Abb. 214 a-c statische Systeme



Tab 3.40. Vsp - Vorspannung v [kN/m]

$V_1$  - max Verformung Membran [mm]  
 $\sigma$  - Membranspannung [kN/m]

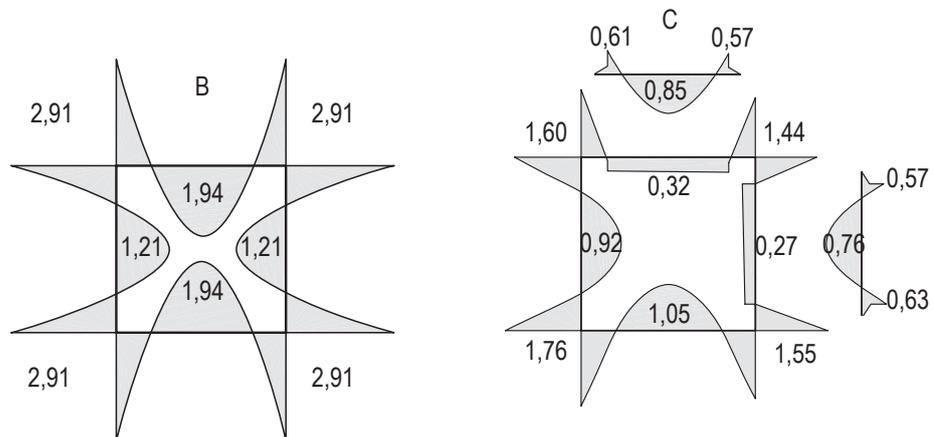
$M_2$  - max. Moment Spannbalken [kNm]  
 $Q_2$  - max. Querkraft Spannbalken [kN]  
 $V_2$  - max Verformung Spannbalken [mm]  
 $V_{22}$  - max Verformung Spannbalken [mm]

$M_4$  - max. Moment Rahmen [kNm]  
 $N_4$  - max. Normalkraft Rahmen [kN]  
 $Q_4$  - max. Querkraft Rahmen [kN]  
 $V_{41}$  - max Verformung Rahmen [mm]  
 $V_{42}$  - max Verformung Rahmen [mm]

$U_M$  - Auslastung  $U_M = (\sigma_{max} / \sigma_{zul}) \times 100$  [%]  
 $U_Q$  - Auslastung  $U_Q = (max Q / Q_{zul}) \times 100$  [%]

Abb. 215 Momentenverlauf [kNm]

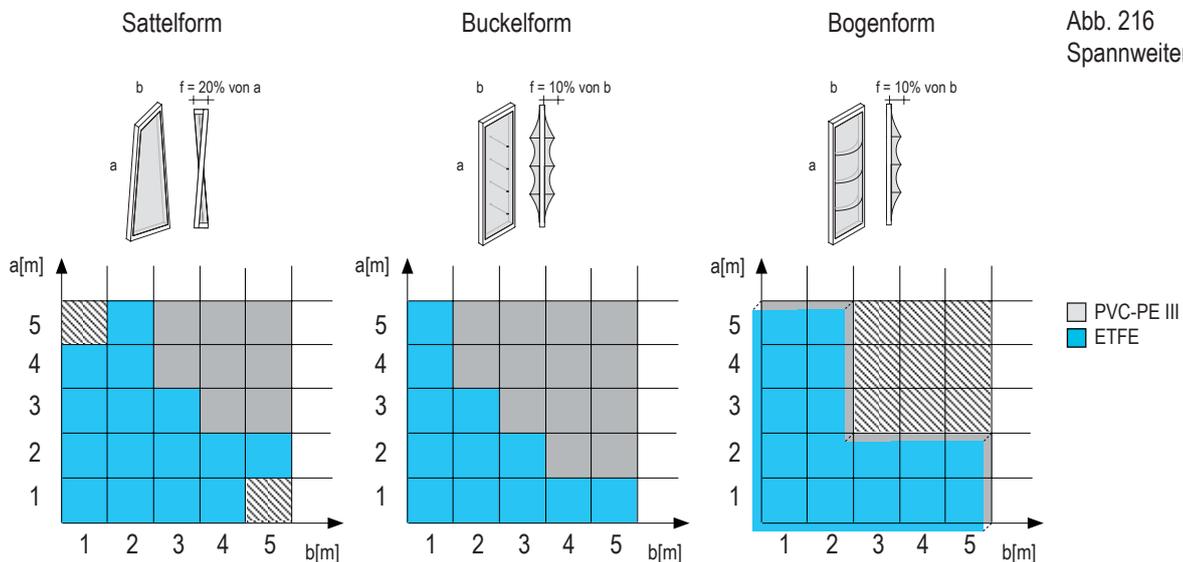
Rahmen a x b m	rechteckiges Holzprofil												
	Studie	Vsp. kN/m	Membran		Spannbalken				Rahmen				
			$V_1$   $\sigma$ max / min mm   kN/m	$M_2$ / $Q_2$ kNm / kN	b x h cm	$U_M$   $U_Q$ %   %	$V_{21}$ / $V_{22}$ mm	$M_4$ / $N_4$ / $Q_4$ kNm / kN / kN	b x h cm	$U_M$   $U_Q$ %   %	$V_{41}$ / $V_{42}$ mm		
2 x 2	A	4	62   8,9 / 2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	4	86   7,1 / 2,9	-	-	-	-	2,91 / 2,45 / 6,69	10x10	213 / 48	6,6 / 2,6		
	C	4	69   5,7 / 4,8	1,11 / 3,92	10x12	56 / 24	1,9 / 1,6	1,76 / 5,43	10x12	89 / 33	2,7 / 2,2		



Die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse erreichen durch die Modellierung als Spannbalkensystem eine hohe Realitätsnähe und schaffen es der Wirklichkeit sehr nahe zu kommen. Sie können als Vordimensionierung für Rahmenmodule verstanden werden.

### Spannweiten

Das Spannbalkensystem findet Anwendung für sattelförmig, buckelförmig und bogenförmig bespannte Rahmenmodule. Der Einfluss der Bespannungsart wird in dem Vergleich der möglichen Spannweiten von Membran und Folie deutlich. Die nachstehenden Diagramme bilden das Spannweitenspektrum der drei Grundformen ab. Dabei sind die Kantenlängen der Rahmenmodule auf den Diagrammachsen aufgetragen, die gefärbten Bereiche bilden somit die möglich bespannbare Fläche ab. Grau steht dabei für Rahmenbespannungen mit 0,9mm starker PVC-PE Membran, Blau für 0,2mm starke ETFE-Folienbespannung. Sie überlagert im Diagramm die graue Fläche.



Sattel- und Buckelformen weisen ein größeres Spannweitenspektrum auf als die Bogenformen. Eine sinnvolle Anwendung für Bogenformen liegt im Bereich der langgestreckten schmalen Rahmengenometrien. Breitere Module führen zu unverhältnismäßig groß dimensionierten Bögen und wurden deshalb in den Untersuchungen nicht berücksichtigt. Für quadratische Rahmengenometrien eignen sich die Buckel- und Sattelformen besser. Für PVC-PE-Membranbespannungen wurden die Untersuchungen bis 5x5m durchgeführt. Sowohl in sattelförmiger, als auch in buckelförmiger Bespannungen sind diese Dimensionen realisierbar.

Die Grenzen des Einsatzes von ETFE Folie sind dagegen enger. Aufgrund der geringeren Reißfestigkeit der Folie liegen die maximalen Flächengrößen bei 3x3m als Sattelform, bei 2x3m als Buckelform. Dies veranschaulicht, dass die Sattelform die günstigere Form der Bespannung ist. Durch die Homogenität der Flächenspannung innerhalb der Sattelfläche können mit dieser Form größere Spannweiten erzielt werden als mit Buckel oder Bogenformen, bei denen mittige Flächenauslenkungen lokale Spannungsspitzen erzeugen.

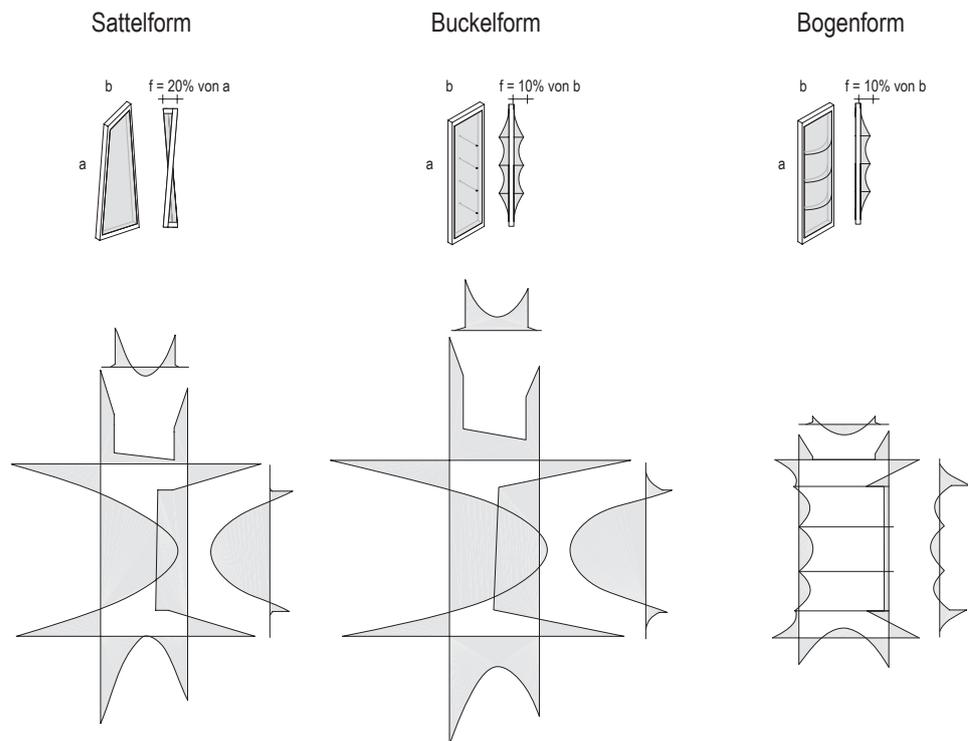
Die Grenzen der sattelförmig bespannten Rahmenmodule liegen in extrem langgestreckten Geometrien. 1x5m große Rahmenmodule können nicht mehr wirtschaftlich vorgespannt werden. Um einen Spannungsausfall in der gestreckten,

langen Achse, also der Ketttrichtung zu verhindern bedarf es derart hoher Vorspannung, dass die Membranspannung über die kurze Seite, also in Schussrichtung maximal zulässige Werte übersteigt. Kompensiert werden kann dieses Problem durch eine Differenzierung der Vorspannung von Kett- und Schussrichtung. Unterschiedliche Vorspannung ist bei ETFE-Folienkonstruktionen jedoch nicht empfehlenswert, PVC-PE Membranen können bis zu einem Verhältnis von maximal 1:3 unterschiedlich vorgespannt werden (vgl. Kap1.3.1.).

#### Beanspruchung von Rahmen und Spannbalken

Die Werte über mögliche Spannweiten allein reichen noch nicht aus, um Aussagen über Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit der Rahmenmodule treffen zu können. Die Spannweiten müssen in Zusammenhang mit den auftretenden Rahmen- und Spannbalkenbeanspruchungen betrachtet werden, die Grundlage der Bemessung ihrer Querschnitte sind. Dafür ein Vergleich der Momentenverläufe der drei unterschiedlich gespannten Rahmenmodule unter gleicher Belastung und einem Vorspannungsgrad, der zu optimaler Ausnutzung der eingezogenen Membran, bzw. Folie führt.

Abb. 217  
Vergleich der Beanspruchung



Für alle untersuchten Module ist das Maximalmoment bemessungsrelevant. In den überwiegenden Fällen handelt es sich dabei um die Eckmomente der „freien“ nicht mit Spannbalken aufgedoppelten Rahmenseiten. Durch den Einfluss der Bögen wird der Momentenverlauf der bogenförmig gespannten Rahmenkonstruktion stark abgemindert. Bei Bogenformen kann die Beanspruchung senkrecht zur Rahmenebene größer ausfallen als in der Rahmenebene und muss als maßgebender Wert bei der Bemessung der Querschnitte berücksichtigt werden.

Die Bogenform weist auch unter Berücksichtigung der Beanspruchung senkrecht zur Rahmenebene die geringste Beanspruchung von Rahmen und Spannbalken auf. Unter diesem Gesichtspunkt ist sie mit Abstand die wirtschaftlichste Form der Bespannung der Rahmenmodule.

## Querschnittsgrößen von Rahmen und Spannbalken

Mit den Werten der maximalen Beanspruchungen der Rahmenmodule kann die Bemessung der Querschnitte erfolgen. Entsprechend fallen dabei die Querschnittsgrößen für Bogenformen am geringsten aus. Für die Darstellung wurde das dreidimensionale Balkendiagramm gewählt, bei dem, in Abhängigkeit der Rahmengeometrie, die Höhe der Balken die erforderliche Querschnittshöhe  $h$  angibt. (Für Bogenformen die Querschnittsbreite  $b$ ) Die der Bemessung zugrundeliegende Höhe der Vorspannung wird durch den Zahlenwert im Balken angegeben.

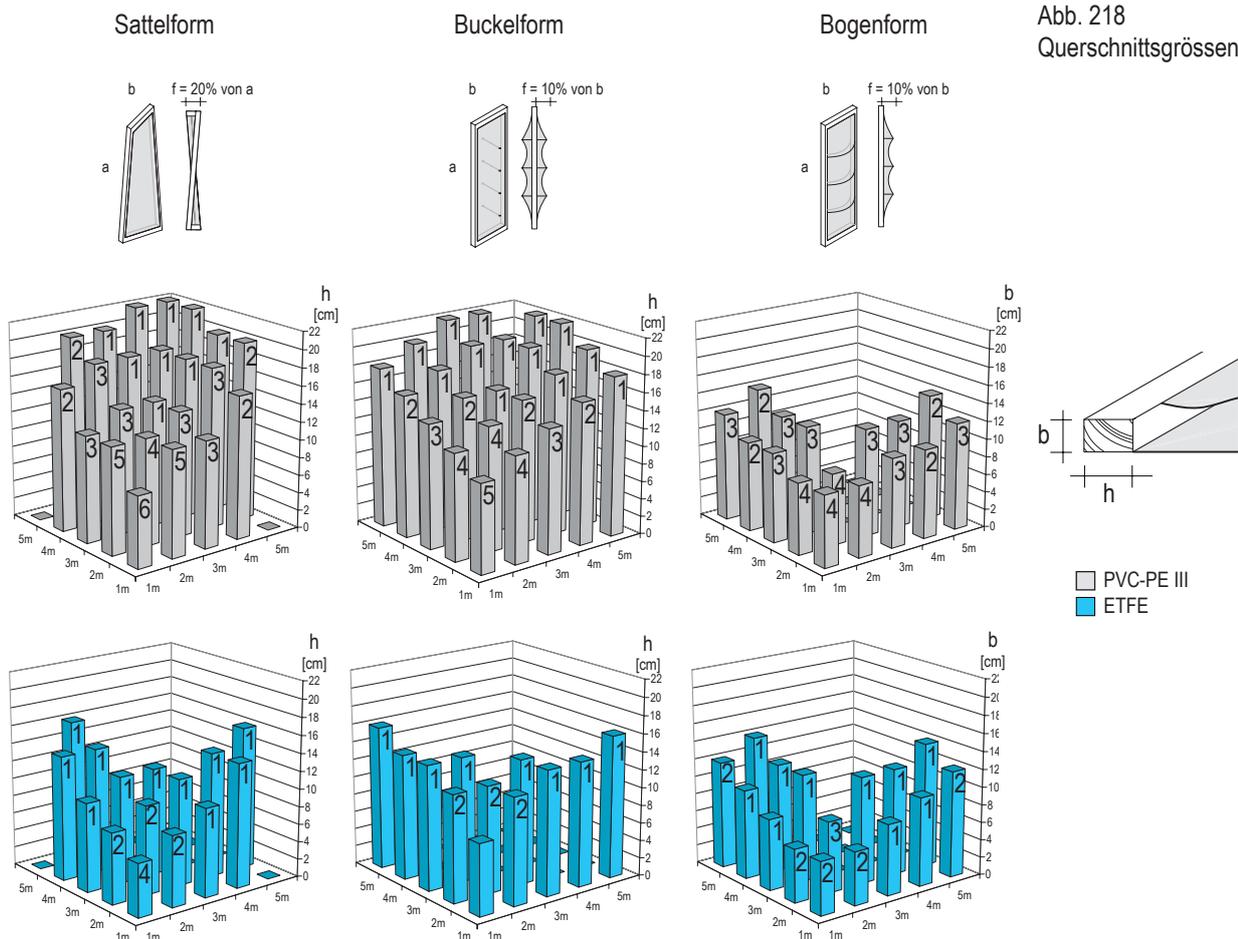


Abb. 218  
Querschnittsgrößen

Neben den bereits erwähnten schlankeren Querschnitten für bogenförmig bespannte Rahmenmodule ermöglicht das Einfügen von Bögen darüber hinaus erhöhte Vorspannungen in Membran bzw. Folie. Vergleicht man die langgestreckten rechteckigen Geometrien mit denen der Sattel- und Buckelfläche fällt gerade bei 1x4m, 1x5m, 2x4m und 2x5m großen Rahmen auf, dass die bogenförmig bespannten trotz geringerer Querschnitte höher vorgespannt werden können. Höhere Vorspannungen führen zu größeren Sicherheiten gegen Membranausfall in der Konstruktion, können also als positiv gewertet werden, da sie, wie nachgewiesen, zulässige Membran- bzw. Folienhöchstspannungen nicht überschreiten.

Im Vergleich der Querschnitte von Sattel- und Buckelform bestätigt sich die Wirtschaftlichkeit der Sattelform. Bei höheren Membranvorspannungen kann Rahmen und Spannbalken schlanker dimensioniert werden als bei der Buckelform. Der homogenere Spannungsverlauf bei Sattelflächen führt zu geringeren Rahmenbeanspruchungen.

Material der Bespannung: PVC-PE / ETFE

Die geringere Reißfestigkeit der ETFE Folie erfordert eine schwächere Vorspannung als die der Membran. Bei gleicher Belastung führt dies zu höherer Verformung der Folie. Es resultieren geringere Flächenspannungen und schwächere Rahmenbeanspruchungen. Insofern fallen die Querschnitte von ETFE bespannten Rahmenkonstruktionen wesentlich schlanker aus. Gleichzeitig ist das Spannweitenspektrum der ETFE-Folie eingeschränkter.

Material des Spannbalkens und Rahmens

Bei Ausführungen in Stahl und Aluminium können die Querschnitte schlanker ausfallen, als es Holzkonstruktionen ermöglichen. Durch die Integration von Keder-schiene innerhalb des Stahl-, bzw. Aluminiumprofils tragen diese Ausführungen auch konstruktiv geringer auf (vgl. S.147). Abgesehen von den höheren Materialkosten erscheinen die Ausführungen in Stahl bzw. Aluminium vorteilhafter.

Doppellagigkeit

Die Doppellagigkeit ist nicht nur aus bauphysikalischen Gesichtspunkten eine vorteilhafte Konstruktion der Rahmenmodule. Neben der Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften des Rahmenmoduls wird die Sicherheit des Tragverhaltens der Rahmenmodule erhöht.

Bei extremen Belastungen der oberen Membran wird die Verformung der Membran so groß, dass obere und untere Membran sich berühren. Von da an wirken obere und untere Membran gemeinsam, die untere Membran unterstützt den Lastabtrag. Im Falle einer Beschädigung oder dem Ausfall der oberen Membranlage, können Lasten über die zweite, untere Membran-, bzw. Folienlage abgeleitet werden.

Bei buckelförmig bespannten Rahmenmodulen wird diese Sicherheit durch die Kopplung von oberer mit unterer Membran durch Spreizen aufgehoben.

Abschliessend gibt die nachstehende Tabelle einen Überblick über die Vorzüge und Nachteile des Tragverhaltens der drei betrachteten Formen der Bespannung.

Tabelle 3.41.  
Vergleich des  
Tragverhaltens der  
unterschiedlichen  
Formen der  
Bespannung

+ gut, geeignet  
0 neutral, möglich  
- schlecht, ungeeignet

Form der Bespannung			
Bewertungsaspekt	Sattelform	Buckelform	Bogenform
grosse Spannweite	+	0	-
geringe Beanspruchung der Spannbalken und Rahmen	0	-	+
Eignung für hohe Vorspannung	0	-	+
Eignung für PVC-PE Bespannung	+	0	+
Eignung für ETFE-Folienbespannung	+	-	0
Eignung für rechteckige, gestreckte Rahmengenometrien	-	0	+
Eignung für quadratische Rahmengenometrien	+	+	-



## Inhalt

### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Anhang:       Projektsammlung  
                  EnEV Berechnungsbeispiel

---

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit entwickelt aus der Betrachtung des Membranbaus heraus eine Anwendungsmöglichkeit für mechanisch vorgespannte Konstruktionen, mit deren innovativen Eigenschaften das stark eingeschränkte Formen- und Funktionsspektrum dieser Strukturen erweitert und ihre Verwendung gesteigert werden kann.

In Kapitel 2 wird dafür das membranumhüllte Gebäudekonzept entwickelt. Sein modulares, mechanisch vorgespanntes, doppelagiges Membranrahmenmodul wird anschließend in Kapitel 3 unter statischen und konstruktiven Gesichtspunkten vertiefend untersucht.

Nachdem sich die Arbeit von allgemeiner Fragestellung über das Gebäudekonzept den detaillierten Lösungsvorschlägen genähert hat, erfolgt als Abschluss dieser Arbeit eine bewertende Zusammenfassung. Sie wird in umgekehrter Reihenfolge, vom Detail zurück zur Ausgangsfragestellung, die Ergebnisse zusammenfassen.

##### Kapitel 3: Membranrahmenmodule

Das Rahmenmodul besteht aus zwei sich gegenseitig beeinflussenden Elementen: Zum einen der Rahmen, zum anderen die durch ihn vorgespannte Membran. Als geeignete Rahmenkonstruktion konnte das Zugschrauben-Rahmensystem ermittelt werden. Mit seinem außen liegenden Rahmen wird in diesem System der Vorspannweg innerhalb des Rahmens vorgehalten, sodass beim Nachspannen der Membran die äußeren Rahmenmaße unveränderlich bleiben. Dadurch vereinfachen sich Montageanschlüsse und Entwässerungsdetails und ermöglichen einen kostengünstigen Einbau.

Als geeignete Bespannungsform konnte die Bogenform ermittelt werden. Die bogenförmige Bespannung führt zu deutlich geringeren Rahmen- und Spannbalkenbeanspruchungen als Sattel- oder Buckelform, sodass ihr Rahmen und Spannbalken entsprechend schlanker dimensioniert werden kann. Grund hierfür ist die entlastende Wirkung des Bogenschubes auf die Rahmenseiten. Konstruktive Gesichtspunkte relativieren jedoch die Vorteile der bogenförmigen Bespannung. Werden Bogenformen in Zugschrauben-Rahmensystem eingesetzt, müssen die Bögen außerhalb der Membranfläche angeordnet werden. Diese Lösung ist gestalterisch unbefriedigend und führt zu erhöhter Verschmutzung der Fläche, durch die vorgeschalteten Bögen in ihren Membrantaschen. Hinter der Membranfläche, also innen liegend, können die Bögen nur auf den Druckschrauben-Rahmensystemen angeordnet werden. Druckschrauben-Rahmenmodule erfordern jedoch hohen Planungsaufwand aufgrund ihrer veränderlichen Außengeometrie.

Diese Schwierigkeiten treten bei einer sattelförmigen Bespannung nicht auf. Sattelformen können problemlos in Zugschrauben-Rahmensysteme eingezogen werden. Dadurch, dass die Membran- bzw. Folienfläche mittig nicht ausgelenkt wird, entfallen aufwändige Bogen- bzw. Spreizenkonstruktionen. Die Fläche wird gleichmäßig über den linearen Zug der Spannbalken zweiachsig vorgespannt, sodass eine gleichmäßig verteilte Membran- bzw. Folienbeanspruchung resultiert. Spannungsspitzen entstehen nicht und die Bespannung wird optimal über ihre gesamte Fläche ausgelastet. Dies macht die Sattelfläche zu einer leistungsfähigen und günstigen Form der Bespannung. Es verbleibt der konstruktive Aufwand, den Rahmen so aus der Ebene auszulenken, dass die Sattelfläche eine ausreichende

antiklastische Krümmung erhält. Dieser Aufwand ist jedoch geringer als die Herstellung der mittigen Membranauslenkung in Form von Spreizen und Bögen, sodass das sattelförmig bespannte Zugschrauben-Rahmenmodul als das wirtschaftlichste Modul bewertet werden kann.

Lediglich bei langgestreckten, schmalen Modulen kann der Einsatz bogenförmiger Bespannung sinnvoll sein, denn bei extremen Längenunterschieden der Rahmenseiten sind sattelförmige Bespannungen nicht mehr wirtschaftlich spannbar. In diesem Fall können Bögen die schwache lange Seite durch geometrische Auslenkung stabilisieren.

Buckelförmige Bespannungen sind dagegen für alle Rahmengeometrien problematisch. Zum einen erweist sich die Kopplung von oberer und unterer Membran im Tragverhalten als nachteilig, zum anderen führt die punktuelle Stützung der Fläche, auch wenn sie konstruktiv über große Auflagerteller ausgeführt wird, zu ungünstig hohen, lokalen Membran- bzw. Folienbeanspruchungen.

Im Vergleich der beiden untersuchten Materialien PVC-PE Membran und ETFE-Folie sind große Unterschiede festzustellen. Die Folie ist wesentlich verformungsfreudiger, Temperatur empfindlicher, weiterreißfester und mit einer Bruchdehnung von 400% sehr zäh. Sie weist ein isotropes Materialverhalten auf und hat ein veränderliches E-Modul. Die Reißfestigkeit der Folie liegt bei rund einem Fünftel gegenüber der PVC-PE III Membran und kann infolge dessen nur über geringere Distanzen und mit schwächerer Vorspannung gespannt werden.

Folien stellen in ihrem Tragverhalten also keine Alternative zur Membran dar, zu stark differiert ihre Leistungsfähigkeit. Folien können vielmehr als Alternative zu Glas verstanden werden: Wenn hohe Transparenz, Licht und UV-Strahlung erwünscht werden, können ETFE-Konstruktionen eine sinnvolle Anwendung darstellen, die vor allem durch ihr geringes Eigengewicht einen entscheidenden Vorteil gegenüber herkömmlichen Glaskonstruktionen bieten. Die Leichtigkeit der Konstruktion macht sie daher auch für Anwendungen in erdbebengefährdeten Gebieten interessant. Weitere Qualitäten liegen in der Möglichkeit, anstelle von eben-transparenten Flächen wie bei Glaskonstruktionen, räumlich-transparente Wirkungen durch die Folienbespannung zu erzielen, ein Gestaltungsaspekt der durch hohe Plastizität und räumliche Tiefe eine neue Formensprache aufzeigt.

Für Anwendungen, die keine Transparenz erfordern, ist die Membran vorzuziehen. Sie ist durch das innenliegende Gewebe weitaus reißfester und damit höher beanspruchbar und in ihrem Tragverhalten gutmütiger als Folien. Folie und Membran sollten also als zwei völlig verschiedene Werkstoffe angesehen werden.

#### Kapitel 2: membranumhüllte Gebäudesysteme

Als zweite Gebäudehülle wurden die Rahmenmodule auf ihre Anwendung im Fassaden- und Dachbereich hin untersucht. Die höhere Belastung der Dachmodule sowie das Problem der horizontalen Dachentwässerung erschweren die Planung und Herstellung der Dachmodule. Vor allem bei ETFE-bespannten Konstruktionen ist die Anwendung im Dachbereich nur eingeschränkt möglich. Die größte Gefahr besteht in der Bildung von Wassersäcken, die zu einer derartigen Gewichtszunahme führen kann, dass die Konstruktion kollabiert. Bei einer Bruchdehnung von 400% reißt die ETFE Folie erst so spät, dass das Wasser nicht vorzeitig ablaufen kann und eine gefährliche Wasseransammlung ermöglicht wird. Die Ausbildung ausreichender

---

Flächenkrümmung ist also besonders wichtig, um die Flächenentwässerung zu gewährleisten und die Bildung von Wassersäcken zu verhindern. Die Zweilagigkeit der Rahmenmodule bietet darüber hinaus eine Tragsicherheit, da im Falle zu hoher Lasten die untere Folien bzw. Membranlage in den Lastabtrag eingebunden wird. Vertikale Fassadenelemente sind im Gegensatz zu den Dachelementen wesentlich einfacher und damit auch kostengünstiger zu realisieren.

Der bespannte Rahmen ist das modulare Element der zweiten Gebäudehülle. Die Gebäudehülle erzeugt ein künstliches Klima in der Zwischenzone und verbessert damit die Energiebilanz des Gesamtgebäudes. Es entsteht ein symbiotisches Zusammenspiel von biegeweicher, lichtdurchlässiger und räumlich gekrümmter Außenhülle mit innenliegender, fester und wärmedämmender Gebäudewand, durch die die Schwierigkeiten und Schwächen von Membran bzw. Folie im Außenbereich kompensiert werden können. So wird beispielsweise die Wärme- und Schallisolation oder der statische Lastabtrag des Gebäudes durch die festen Gebäudewände ermöglicht, Winddichtigkeit, Transluzenz oder Strahlungsoffenheit ist durch die Folie bzw. Membran hergestellt.

Die Membranhülle verbessert den Energiehaushalt des Gebäudes dahingehend, dass mit ihr Gebäude im Niedrigenergiehausstandard hergestellt werden können. Dabei wird auf aufwändige Belüftungstechnik verzichtet. Das Gebäudekonzept sieht einfache Fensterlüftungen vor. Über sogenannte „Winterfenster“ wird in der kalten Jahreszeit vorgewärmte Frischluft ins Gebäudeinnere geführt. Wasserdampfdiffusion kann durch den Verzicht von Dampfsperren ganzjährig durch die feste Gebäudewand stattfinden und erzeugt ein gesundes Raumklima.

Die Strömungssimulationen und bauphysikalische Untersuchungen zeigen die Grenzen dieses Systems auf: Bei zwei- und mehrgeschossigen Gebäuden funktioniert das Gebäudehüllenkonzept nicht mehr wirtschaftlich. Die Temperaturdifferenzen innerhalb der Gebäudehülle führen zu ineffektiver Verteilung der Energie, sodass das membranumhüllte Gebäudekonzept auf eingeschossige Gebäude, Hallen oder ähnlich niedrige Gebäudetypen beschränkt bleibt.

Bei der Verwendung der Rahmenmodule entstehen Gebäudeoberflächen, die durch die Flächenkrümmung der Folie bzw. Membran hohe Plastizität und Leichtigkeit aufweisen und zu dynamischen Gebäudeansichten führen. Auch unter Verwendung von Kunstlicht oder bei Bedruckung oder farblicher Gestaltung der Oberfläche ergeben sich neue gestalterische Möglichkeiten. Membranumhüllte Gebäudesysteme führen also zu einer neuen Formensprache, die sich durch das Auflösen der Fläche zugunsten einer bewegten, plastisch modellierten Struktur auszeichnen. Damit verlässt der Membranbau den eng gefassten Kanon antiklastisch geformter Strukturen und ermöglicht die Verwendung der Konstruktion auch für andere Formgestaltung. Als modulares System kann das Rahmenmodul im Werk vorgefertigt werden und somit ein standardisiertes, kostengünstiges Bauelement werden.

#### Kapitel 1: Der Membranbau

Gestalterisch könnte der mechanisch vorgespannte Membranbau also ähnliche Wirkungen erzielen, wie sie pneumatische Kissenkonstruktionen zeigen. Der Vorteil der mechanisch vorgespannten Konstruktionen liegt dabei in ihrer Unabhängigkeit

von Druckluftzufuhr und Luftdichtigkeit der doppellagigen Kissenkonstruktion. Ein einfacher Riss oder ein Loch in der Membran oder Folie hat für Kissenkonstruktionen erhebliche Folgen: die vorspannende Luft entweicht, das Kissen fällt in sich zusammen, Wasser sammelt sich in dem durchhängenden Modul. Die Zähigkeit des Materials verhindert ein Reißen der unteren Membran bzw. Folie, sodass das Wasser nicht abfließen kann und mit seinem Gewicht zu einer hohen Gefahr für die Gesamtkonstruktion wird. Mechanisch vorgespannte Konstruktionen sind dagegen robuster. Ein Loch oder Riß ist bei diesem System unproblematisch, die Gefahr der Wassersackbildung kann durch sorgfältige Planung ausgeschlossen werden.

#### Ausblick

Gut 50 Jahre sind vergangen seitdem unter Frei Otto der moderne, vorgespannte Membranbau Einzug in Wissenschaft und Technik fand. Im Bereich des mechanisch vorgespannten Membranbaus zeigte sich nach anfänglich euphorischer Anwendung Stagnation und Stillstand in der Weiterentwicklung dieser Konstruktionsweise. Diese Arbeit soll ein Beitrag sein, aufzuzeigen, dass der mechanisch vorgespannte Membranbau nicht am Ende seiner Möglichkeiten angekommen ist und in dem Funktionskanon des textilen Sonnenschutzes verhaftet bleibt, sondern vielmehr eine große Anzahl von Anwendungspotenzialen besitzt und sich erst am Anfang seiner Entwicklung befindet.

Es wird wichtig sein die scheinbar unausweichliche Kopplung des mechanisch vorgespannten Membranbaus von Form und Tragverhalten zu überwinden, um den Membranbau aus seinem eingeschränkten Formenkanon zu führen. Als kleinmaßstäbliches Modul wird die Bespannung auch weiterhin den physikalischen Gesetzen der zugbelasteten Vorspannung folgen und zu herkömmlicher Formenwelt führen. Die Gesamtform des membranbespannten Gebäudes kann so aber viel freieren Formen folgen und sich damit an den gestalterischen Zeitgeist anpassen. Eine Anbindung des Membranbaus an orthogonale, rechteckige Gebäudekörper ist beispielsweise möglich, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden. Aber auch freie Formen, können durch das Aneinanderreihen der individuell geformten Rahmenmodule erreicht werden. In beiden Fällen entzieht sich die resultierende Form der herkömmlichen Gestaltung mechanisch vorgespannter Konstruktionen und ordnet sich einer völlig anderen Gesamtform unter. Damit schwindet die visuell überstrapazierte Dominanz der antiklastischen Formen mechanisch vorgespannter Konstruktionen und eröffnet der Konstruktion den Einzug in eine neue Gestaltungswelt.

Damit können die Qualitäten des Membranbaus, bestehend aus seiner Leichtigkeit, Transluzenz und der dynamischen Plastizität seiner Oberfläche in weiten Teilen der Architektur Verwendung finden. Eine Zunahme der Anwendung wird zu einer gesteigerten Entwicklung dieser Bauweise und seines Materials führen.

Vor allem in der Materialforschung liegen entscheidende Potenziale. Weiterentwicklungen in der Materialforschung könnten das Gewebe und die Folie zu intelligenten, veränderbaren Materialien gestalten, die durch Farbgebung und Schrift einen Beitrag zur multifunktionalen Medienwand bzw. -fassade leisten könnten. Damit würden die frühen Visionen Buckminster Fullers über die organischen Eigenschaften architektonischer Häute weiterverfolgt werden [Kro04] und eine Renaissance

---

der „textilen Wand“, die nach Gottfried Semper am Anfang allen Bauens stand, stattfinden [Sem51]. „Kulturfortschritt in der Architektur wird sich zunehmend in der Dominanz von Materialien mit textilen Qualitäten erweisen. Gemeint ist ... die dem Textil immanente Verwandtschaft zu Ornament und Schrift, die es zum Medium einer neuen Art der Kommunikation im urbanen Raum und in der Privatsphäre werden lässt. Einerseits in engster Verknüpfung mit der Computertechnologie, die die Prognose einer Synthese von elektronischen und textilen Geweben nahe legt, und andererseits in innigster Verbindung mit der Biotechnologie, die schon zu den ersten Verbindungen von natürlichen und künstlichen Häuten geführt hat...“ [Bru05] Da heraus werden sich Membran und Folie als „iTextil“ zu „einem Hauptbestandteil zukünftiger Architektur entwickeln“.



---

## Literaturverzeichnis

- [Ack02] Acker mann, G.: *Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen* [TKB] Entwurf, Bemessung und Konstruktion. Diskussionsentwurf, BÜV (Bauüberwachungsverein), Fassung Oktober 2002  
[www.bvpi.de/bvpi-content/aktuelles/news2002/Kunststoff\\_Empf.pdf](http://www.bvpi.de/bvpi-content/aktuelles/news2002/Kunststoff_Empf.pdf)
- [Bac02] Bachmann, H.: *Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden*, BBL Vertrieb Publikationen, Bern, 2002
- [Bar71] Barnes, Michael R.: *Prestressed cable networks*.  
in: *Construction Research and Development Journal* (1971), Nr. 3.
- [Bar94] Barnes, Michael R.: *Form and Stress Engineering of tension structures*.  
in: *Structural Engineering Review* (1994), Nr. 6, S. 175 - 202.
- [Bau06] Baumüller, D.: *Rotationspneu*, Projektgruppe Sulloon,  
[www.beyond-gravity.com/rotpneu.html](http://www.beyond-gravity.com/rotpneu.html)
- [Blä04] Bläsi, Walter: *Bauphysik*, 5. Auflage, Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2004
- [Ble00] Bletzinger, K-U., Ziegler R.: *Theoretische Grundlagen numerischer Formfindung von Membrantragwerken und Minimalflächen*, Beton Kalender 2000, Ernst&Sohn, Berlin, 2000
- [Blu02] Blum, Dr.-Ing. Habil. R.: *Bericht über die Denkmaleinhausungen in Clemenswerth und Weikersheim. Projekt „Winterzelt“*.  
Epublications in [www.echn.net/](http://www.echn.net/)
- [Blu90] Blum R.: *Zeltbaumaterialien*, in: *Leicht und Weit*, S.200 ff,  
VCH-Verlagsgesellschaft, 1990
- [Boh04] Bohne, Dirk: *Glasdoppelfassaden, Ökologische Gebäudetechnik*, Kohlhammer Verlag, 2004, Stuttgart
- [Boh04] Bohne, Dirk: *Ökologische Gebäudetechnik*, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2004
- [Bru05] de Bruyn, Gerd; Mauler, Henrik: *Haut und Hülle* in: *Das Bauzentrum BAUKULTUR* 4/2005 Seite 16-18
- [Bub97] Bubner E.: *Membrankonstruktionen- Verbindungstechniken*, Selbstverlag, Essen, 1997.
- [Bur00] Burkhardt, Berthold: *Geschichte des Zeltbaus* in Detail 6/2000
- [Bur04] Burgard, R. (Hrsg.), Schott, K.: *Konstruktion von Gebäudehüllen mit organischen Formen, die für einen dauerhaften Aufenthalt bestimmt sind*. in *Kunststoffe und freie Formen*, Springer Verlag, Wien, 2004
- [Bög04] Bögle, A.: *Morphologie doppelt gekrümmter Flächentragwerke*, Dissertation an der Uni Stuttgart, 2004
- [Com95] Compagno, A.: *Intelligente Glasfassaden*, Birkhäuser Verlag, Berlin, 1995
- [Cov07] [www.covortex.com](http://www.covortex.com), Covortex GmbH, Obing
- [Cre06] Cremers, Jan: *Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle - Technologische, bauphysikalische und architektonische Aspekte*. Dissertation an der TU-München 2006
- [Dib87] Deutsches Institut für Bautechnik, *Zulassungs-Richtlinien für vorgespannte Membranbauten*. Berlin, 1987
- [DIN 4102] DIN 4102 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*,  
Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen (A1, A2, B1, B2, B3)  
Teil 2: Bauteile; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen  
Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile  
Teil 7: Bedachungen; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- [DIN 4108] DIN 4108-7: 2000-00 Punkt 3.1: *Wärmeschutz im Hochbau*
- [DIN 4109] DIN 4109 *Schallschutz im Hochbau*
- [DIN1055] DIN 1055 *Einwirkungen auf Tragwerke*, Deutsches Institut für Normung e. V.
- [DIN4008-2] *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden-T2*.  
Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, 2003-04, Beuth-Verlag Berlin.

- [DIN4134] DIN 4134: *Tragluftbauten*. Berechnung, Ausführung und Betrieb. Februar 1983, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- [Dob99] Dobida, E.: *Membranen*, Internetveröffentlichung, 1999  
<http://www.gra-pa.at/projects/NeueBaustoffe/index2.html>
- [Dwd06] Deutscher Wetterdienst,  
[www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/index\\_monatswerte.htm](http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/index_monatswerte.htm)
- [EC1] Eurocode 1 - *Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf die Tragwerke*. Teil 2-3: Einwirkungen auf Tragwerke - Schneelasten. Februar 1995 Teil 2-4: Einwirkungen auf Tragwerke - Windlasten. Februar 1995
- [EnEV04] *Energieeinsparverordnung (EnEV)* in der Fassung von 2004
- [Fas03] Fasold, W: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2. Aufl., Berlin, Huss- Medien, 2003.
- [Fis01] Fisch, N., Möws, B., Zieger, J.: *Solarstadt*, Kohlhammerverlag, Stuttgart, 2001
- [Fla01] Flagge I., Herzog-Loibl V., Meseure A.: *Designstudio: „Thomas Herzog, Architektur + Technologie“*, Prestel Verlag, München, 2001
- [Foi07] [www.foiltec.de](http://www.foiltec.de), Foiltec GmbH, Bremen
- [For04] Forster B., Mollaert, M.: *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, TensiNet, Brüssel, 2004
- [Fra01] Franken, Bernhard: *BMW\_Pavillon, IAA2001* in: *Deutsches Architektenblatt 11/2001 „Form follows force“* S. 17-18
- [Gen05] Gengnagel, Christoph *Mobile Membrankonstruktionen*, Dissertation, TU-München, 2005
- [Grü00] Gründig, Prof. Dr. L.: *Computational Modelling of Lightweight Structures*, Tagungsband der Textile Roof Konferenz, Berlin, 2000
- [Grü76] Gründig L.: *Die Berechnung von vorgespannten Seilnetzen und Hängernetzen unter Berücksichtigung ihrer topologischen Eigenschaften und der Ausgleichsrechnung*, Dissertation an der Universität Stuttgart, DGK Reihe C Nr. 216 1976 und SFB Mitteilungen 34/1976
- [Grü98] Grützmann, B.: *Niedrigenergiehäuser aus Holz*, Callwey, München, 1989
- [Har03] Hartwig H.: *Konzepte für die Integration selbstregelnder, thermotroper Schichten zur passiven Nutzung der Sonnenenergie in modernen Gebäudehüllen*. Dissertation an der TU-München, 2003
- [Hau04] Hausladen, G.: *ClimaDesign*, München: Callwey, 2006
- [Hau06] Hausladen, G.: *ClimaSkin*, München: Callwey, 2006
- [Hee06] Heeg, Manfred: *Suvarnabhumi International Airport Bangkok. Engineering, Konfektion und Montage des Membrandaches*, in Detail 7/8 2006, Institut für internationale Architekturdokumentation, München, 2006
- [Her03] Herzog, Natterer, Schweitzer, u.a.: *Holzbauatlas* S.279, Birkhäuser Verlag, Basel, 2003
- [Her76] Herzog T.: *Pneumatische Konstruktionen - Bauten aus Membranen und Luft*, Verlag Gerd Hatje, Stuttgart, 1976
- [Her77] Herzog T.: *Pneumatic Structures*, Crosby Lockwood Staples, London, 1977
- [Heu07] Heusler, W: Schüco International KG, Bielefeld, [www.schueco.de](http://www.schueco.de)
- [Hol05] Holschemacher, K. (Hrsg.): *Entwurfs- und Konstruktionstabellen für Architekten*, Kapitel 7b, Wagner, R.: Seil- und Membrantragwerke, Berlin, Bauwerk Verlag, 2005
- [Höl99] Höller, Ralf: *Formfindung*. Mähringen: Verlag Dr. Thomas Balistier, 1999
- [Hop98] Hoppe, Diether S.: *Freigespannte Textile Membrankonstruktionen*, Dissertation, TU-Wien, Wien 1998
- [IGM07] Institut Grundlagen moderner Architektur und Entwerfen,  
[www.uni-stuttgart.de/igma](http://www.uni-stuttgart.de/igma)
- [Ims02] I.M.S., Institut für Membran- und Schalentechnologien, [www.ims-institute.org](http://www.ims-institute.org)
- [Ipl03] IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH (Hrsg.): *zum 1. Konstanzer Leichtbau Symposium*
- [Ker07] Kern, Andreas: Software: DÄMMWERK, Kern-Ingenieurkonzepte, Berlin,  
[www.bauphysik-software.de](http://www.bauphysik-software.de)

- 
- [Koc04] Koch, Klaus-Michael: *Bauen mit Membranen*. Der innovative Werkstoff in der Architektur, Prestel Verlag, München 2004
- [Kro04] Krohn, C.: *Buckminster Fuller und die Architekten*, Dietrich Reimer Verlag, Hamburg 2004
- [Law07] Lawinenwarnzentrale im bayrischen Landesamt für Umwelt, <http://www.baurechtsexperte.de/die-norm-und-die-last-mit-dem-schnee/>
- [Lan05] Lang, W: *Experimentelle Untersuchung zur Konstruktion von Doppelfassaden unter besonderer Berücksichtigung ihrer Bedeutung für den Energiehaushalt und der Möglichkeiten zur Nutzung von Umweltenergien*, Dissertation an der TU-München, 2005
- [Leo 73] Leonhardt, F. und Schlaich, J.: *Vorgespannte Seilnetzkonstruktionen - Das Olympiadaach in München*. Stahlbau 42 (1973), Heft 2, S.51-58, Heft 3, S.80-86, Heft 4, S.107-115, Heft 6, S.176-185
- [Leo68] Leonhardt, F., Egger, H. und Haug, E.: *Der deutsche Pavillon auf der Expo '67 Montreal - eine vorgespannte Seilnetzkonstruktion*. Stahlbau 37 (1968), Heft 4, S.97-105, Heft 5, S.138-145
- [Lin96] Linkwitz K., Ströbel D., Singer P.: *Die Analytische Formfindung*, in: *Prozess und Form - „Natürliche Konstruktionen“* - Sonderforschungsbereich 230; Ernst&Sohn, Berlin 1996
- [Llo05] Llorens, J.: *Fabric Roof Design, Tagungsband Textile Roof*, Berlin, 2005
- [Mar04] Marquardt, Helmut: *Energiesparendes Bauen*, Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2004
- [Mef78] Meffert, B.: *Mechanische Eigenschaften PVC-beschichteter Polyesterwebstoffe*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1978
- [Mey01] Meyer, R.: *Das Energieeinsparhaus - die neue Generation des Bauens*, Blotner Fachverlag, Taunusstein, 2001
- [Min81] Minte, J., *Das mechanische Verhalten von Verbindungen beschichteter Chemiefasergewebe*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1981
- [Mol03] Mollaert M., Haase J., u.a.: *Designing Tensile Architecture, Proceedings of the TensiNet Symposium*, Sep. 19th – 20th, Brüssel: TensiNet, 2003
- [Mor00] Moritz K.: *Membranwerkstoffe im Hochbau*, Detail 6/2000. S. 1050-1058
- [Mor03] Moritz K., Barthel R.: *Bauen mit ETFE Folien* in *Detail Praxis: Transluzente Materialien*, Edition Detail, München, 2003 S.70
- [Mor05] Moritz, K.: *Die Stadionhülle der Allianz Arena*, in *Detail 9/2005 Stadien*, S.976, Verlag: Institut für internationale Architektur Dokumentation GmbH, München, 2005
- [Oes01] Oesterle: *Doppelschalige Fassaden - ganzheitliche Planung*, Callway Verlag, 2001
- [Orp00] Orpana M., Houtman R., *Materials for Membranestructures*, Beitrag zum Workshop „Textile Roof“ Technet GmbH, Berlin 2000
- [Ott54] Otto, Frei: *Das hängende Dach. Gestalt und Struktur*. Berlin: Bauwelt Verlag der Ullstein A.G., 1954
- [Ott62] Otto, Frei: *Zugbeanspruchte Konstruktionen*, Band 1 und 2, Berlin: Verlag Ullstein GmbH, 1962
- [Ott83] Otto, Frei: *Lufthallenhandbuch*, Institut für leichte Flächentragwerke, Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 1983
- [Ott95] Otto, Frei: Rasch, Bodo: *Gestalt finden*, Edition Axel Menges, 1995
- [Pah99] Pahl, Jürgen: *Architekturtheorie des 20. Jahrhunderts*, Prestel Verlag, München, 1999
- [Pea02] Pearson, David: *Zelte, Tipis, Jurten*, AT Verlag, Aarau, Schweiz, 2002
- [Qui62] Quitzsch, Heinz: *Die ästhetische Anschauungen Gottfried Semper*, Akademie Verlag, Berlin, 1962
- [Sch00] Schlaich, J. (2000): *Editorial: Leichtbau* in: Stahlbau 69 (2000), Heft 8, S.581-583
- [Sch01] Schittich, Christian: *Gebäudehüllen*, Edition Detail Birkhäuser Verlag, Basel,

- Boston, Berlin, 2001
- [Sch04] Schmid G.: *Bauen mit Membranen*, in Architektur Fachmagazin, Heft 3, 2004
- [Sch04a] Schöne, L.: *Florale Transparenz: Das neue Dach über dem Innenhof der IHK in Würzburg*. Stahlbau 73, 2004, Heft 11, S. 879-885.
- [Sch97] Schock, Hans-Joachim: *Segel, Folien und Membranen. Innovative Konstruktionen in der textilen Architektur*, Birkhäuser Verlag, Basel 1997
- [Sem51] Semper, Gottfried: *Die vier Elemente der Baukunst*, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1851
- [Sie95] Sieber, Heinz G.: *Energie*, Reader zur Vorlesung, RWTH-Aachen, Technischer Ausbau und Entwerfen, Fakultät Architektur, Aachen, 1999
- [Sob95] Sobek W., Speth, M.: *Textile Werkstoffe*, in Bauingenieur 70 (1995), S.243-250
- [Sol07] Das Internetportal zur Sonnenenergie, [www.solarserver.de](http://www.solarserver.de)
- [Tec06] Technet-GmbH, *Tagungsband Textile Roof*, Berlin, 2006
- [Tec07] Technet-GmbH: Software EASY, Release 8, [www.technet-gmbh.com](http://www.technet-gmbh.com), Berlin, Stuttgart
- [Tei96] Teichmann K. (Hrsg.), Linkwitz K.: Ströbel D., Singer P.: *Die Analytische Formfindung in Prozeß und Form Natürlicher Konstruktionen*, Sonderforschungsbereich 230, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 1996
- [Tem04] Temme, D., Gahr, P.: Fokus: *ETFE-Folien- ein neuer Werkstoff für transparente Stadionüberdachungen*, in Baumeister 1/2004, S.26-28
- [Ten07] Tensinet, [www.tensinet.com](http://www.tensinet.com), Datenbank: [www.tensinet.com/database](http://www.tensinet.com/database)
- [Tra04] Trautz, Martin: *Formfindung versus Formgebung*, in Bauwelt 21/2004, S.12-18
- [Tra06] Trauernicht, H.: *Luftdichtheit*, <http://www.luftdicht.de>
- [Ume00] Umebayashi, Katsu: *Einfamilienhaus in Tokio* (F.O.B.A. Architekten, Kioto) in Detail 6/2000, *Bauen mit Membranen*, S. 1009-1011
- [Vog06] Vogler, A.: *Desert Seal – a tent with active cooling*, in Tensi-News, newsletter of the european based network for the design and realisation of tensile structures, Ausgabe 10, April 2006, S. 4
- [Wid07] Widjaja, E.: *Baustatik- einfach und anschaulich*, Bauwerkverlag, Berlin, 2007
- [Wid07a] Widjaja, E.: *Lastannahmen nach neuen Normen*, Bauwerkverlag, Berlin, 2007
- [Wil85] Wilhelm, K., Otto, F.: *Portrait Frei Otto*, Quadriga Verlag, Berlin 1985
- [Zel05] Zellinger M.: *Zur Formfindung, Berechnung und Konstruktion von Membrantragwerken*, Dissertation an der TU-Graz, 2005

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildungen ohne Autorenverweis sind von mir selber erstellte Zeichnungen oder Fotos. Ihre Inhalte werden in den Überschriften unmittelbar neben der Abbildung angegeben. Nachstehend ein Verzeichnis aller verwendeten Abbildungen, deren Urheberrechte nicht bei mir liegen.

- 1 a Atelier Van der Meeren, Sterrebeek, Belgien, 1968, [Ten07]
- 1 b PricewaterhouseCooper Brussel, Belgien, 2003, [Ten07]
- 2 a Traglufthalle [Ten07]
- 2 b Allianz Arena, München, 2005, [Cov07]
- 3 a BMW Pavillon, IAA 1999, Österreichischer Stahlbauverband, [www.stahlbauverband.at](http://www.stahlbauverband.at)
- 3 b BMW Pavillon, IAA 2001, [Cov07]
- 17 c Innenhofüberdachung Rathaus Wien, [Cov07]
- 18 c Überdachung Baernau, [www.kochmembranen.com](http://www.kochmembranen.com)
- 19 c Festo Airquarium, [www.kochmembranen.com](http://www.kochmembranen.com)
- 20 c Addition von Sattelflächen: Sail Island, Jeddah, Saudi Arabien, [Ten07]
- 21 c Amt für Abfallwirtschaft, München, in Detail 6/2000 Seite 1030-1033
- 22 c Dach des SonyCenters, Berlin [Ten07]
- 23 c Nordische Botschaften, Berlin [Ten07]
- 24 c Garden Eden Project, Cornwall, [www.grimshaw-architects.com](http://www.grimshaw-architects.com)
- 25 b IHK Schirme Würzburg [Cov07]
- 26 b Butlins Skyline Pavilions, [Ten07]
- 27 b Umbrella - Saudi arabia, SL-Rasch GmbH [Ten07]
- 28 b Shopping Center, Saudi Arabien [Cov07]
- 29 b The Machine Tent [Ten07]
- 30 b Tent for the Horse Fair in Jerez de la Frontera [Ten07]
- 31 b Il Grand Bigo [Ten07]
- 32 c Pavillon, Athen zur Olympiade 2004 [Cov07]
- 33 c Überdachung Stadtplatz Magdeburg [Ten07]
- 34 Curtain House, Shigeru Ban, [www.vestaldesign.com](http://www.vestaldesign.com)
- 39 Spannungs-Dehnungs Diagramm ETFE [Sch04a]
- 40 a Schwimmbad Velbert, Schnitt durch die Dachkonstruktion [Ipl03]
- 40 b Schwimmbad Velbert, Außenansicht [Ipl03]
- 41 a-c Befestigung der Dämmung am Beispiel der Schwimmhalle Velbert [Ipl03]
- 42 a Freizeizbad Rülzheim, [Cov07]
- 42 b Desert Seal, Studie der Europäischen Raumfahrt Behörde aus Tensi News Nr. 10, April 2006, [Ten07]
- 42 c Buddy Holly Musical, Hamburg [Ten07]
- 42 d Gaudi Musical, Köln [Ten07]
- 42 e Papageno Theater, Frankfurt [Ten07]
- 42 f Sporthalle Jeddah [Ten07]
- 43 a,b Akustiksegel Hauptschule Bobingen [Ims02]
- 44 a,b Flughafenterminal Bangkok in Detail 7/8 2006
- 83 a Passagierkai Warnemünde [Cov07]
- 83 b BMW Clean Energy Pavillon Expo Hannover [Cov07]
- 84 a Siemens Design Studio, Herzog, Moro [Fla01]
- 84 b Wohnhaus Okayama, Kazuyo Sejima [Sch01]
- 85 a,b Wohnhaus bei Tokio, Shigeru Ban [Sch01]
- 85 c Einfamilienhaus Tokio, F.O.B.A. Kioto [Ume00] in Detail 6/2000
- 86 a TSS-Singapore, Ayrl Architekten [Ten07]
- 86 b BMW Pavillon, IAA 2001 [Cov07]
- 86 c Wohnhaus bei Tokio, Shigeru Ban [Sch01]
- 87 a Flughafentower Wien [Cov07]
- 87 d IHK Schirme Würzburg [Cov07]
- 88 a Hotel Burj El Arab, Dubai [Ten07]
- 88 b Flughafenterminal Bangkok, [www.ruegenmagic.de/blog](http://www.ruegenmagic.de/blog)
- 88 c Expo Pavillon, 2000, Shigeru Ban, Detail 6/2000

**Anhang:**Parameter zur EnEV Berechnung  
Kapitel 2.2., Seite.69ff.

<b>Standort, Datum</b>	Berlin, 21.Dezember,
Minimal-, Maximaltemperatur	-1,0 + 3,5
Himmelsfarbe	3 = weißlich
Relative Luftfeuchte	70%
Reflexionsgrad (Albedo) der Erdoberfläche	0,0
<b>Geometrie</b>	siehe oben
Hüllfläche	$4 \times 70 \text{m}^2 + 1 \times 100 \text{m}^2 = 380 \text{m}^2$
Volumen Innenhaus-Pufferzone	$384 \text{m}^3 - 316 \text{m}^3$
<b>Hülle transparent</b> , Anteil an der Fassade, Fläche	ETFE-Folie, 100%
U-Wert	variierend
Transmissionsgrad für Direktstrahlung (g-Wert)	90%
Rahmenanteil	10%
Reflexionsgrad der inneren Oberfläche r	0,08
innerer, konvektiver Wärmeübergang hci	2,5 W/m <sup>2</sup> K
Emissionsgrad der inneren Oberfläche e	0,84
äußerer, konvektiver Wärmeübergang hce	8,0 W/m <sup>2</sup> K
äußerer Wärmeübergang für Wärmestrahlung hre	5,5 W/m <sup>2</sup> K
Korrektur für Abstrahlung zum Himmel qer	0,0
Absorptionsgrad für Solarstrahlung, aussen a	0,02
<b>Hülle opak</b> , Anteil an der Fassade, Fläche	Keine, 0%
U-Wert	
Reflexionsgrad der inneren Oberfläche r	
innerer, konvektiver Wärmeübergang hci	
Emissionsgrad der inneren Oberfläche e	
äußerer, konvektiver Wärmeübergang hce	
äußerer Wärmeübergang für Wärmestrahlung hre	
Korrektur für Abstrahlung zum Himmel qer	
Absorptionsgrad für Solarstrahlung, aussen a	
<b>Innenwand</b> , Fläche	Holzständerwand, gedämmt, 280m <sup>2</sup>
U-Wert	0,19 W/m <sup>2</sup> K
Reflexionsgrad der inneren Oberfläche r	0,3
innerer, konvektiver Wärmeübergang hci	0,7 W/m <sup>2</sup> K
Emissionsgrad der inneren Oberfläche e	0,9
äußerer, konvektiver Wärmeübergang hce	5,0 W/m <sup>2</sup> K
äußerer Wärmeübergang für Wärmestrahlung hre	0,0
Korrektur für Abstrahlung zum Himmel qer	0,0
Absorptionsgrad für Solarstrahlung, aussen a	0,0
Temperatur im Innenraum	20°C
<b>Dach</b> , Fläche	Holzdach, Dämmung 2876, 64m <sup>2</sup>
U-Wert	
Reflexionsgrad der inneren Oberfläche r	0,3
innerer, konvektiver Wärmeübergang hci	0,7 W/m <sup>2</sup> K
Emissionsgrad der inneren Oberfläche e	0,9
äußerer, konvektiver Wärmeübergang hce	5,0 W/m <sup>2</sup> K
äußerer Wärmeübergang für Wärmestrahlung hre	0,0
Korrektur für Abstrahlung zum Himmel qer	0,0
Absorptionsgrad für Solarstrahlung, aussen a	0,0
Temperatur im Innenraum	20°C

**Berechnung des Heizwärme- und Primärenergiebedarfs**

Maßgebende Normen und Verordnungen:  
 Energieeinsparverordnung 2004 (EnEV)  
 DIN V 4108-6:2003, Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs  
 DIN V 4108-2:2003, Mindestanforderungen an den Wärmeschutz  
 DIN V 4701-10:2003, Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen  
 DIN V 4701-12:2004, Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen im Bestand  
 DIN EN 832:2003, Berechnung des Heizenergiebedarfs, Wohngebäude  
 DIN EN ISO 6946:2003, Bauteile - Wärmurchlaßwiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient  
 DIN EN ISO 13789:1999, Spezifischer Transmissionswärmeverlustkoeffizient  
 DIN EN ISO 13370:1998, Wärmeübertragung über das Erdreich  
 DIN EN ISO 10077-1:2000, Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen

Nachweisverfahren **MB-V** für den öffentlich-rechtlichen Nachweis  
 Monatsbilanzverfahren, EnEV und DIN V 4108-6, Anhang D

Flächen und Längenangaben beziehen sich auf die Außenmaße.

Standort **Potsdam**, 52°23' Region 4, T<sub>air(m, Jahresmittel)</sub> = 8,7°C  
 abweichend von EnEV / DIN V 4108-6 (Standort Deutschland)

Sollinnentemperatur = 19,0 °C

Wärmebrückeneinflüsse werden pauschal berücksichtigt L<sub>D</sub> = A\*(U<sub>Fx</sub>+0.05)

**Spezifische Wärmeverluste des beheizten Bereichs**

Hüllfläche	A [m²]	U [W/m²K]	F <sub>x</sub> [-]	Anmerkung	L <sub>D</sub> [W/K]
<b>Fallmodell 1</b>					
<b>Deckflächen</b>					
1 F 0103 FD	64,0	0,247	1,00	FD	51
<b>Außenwände</b>					
2 F 0100 FAW Süd	44,9	0,192	1,00	FAW	51
3 F 0102 FAW Ost	44,9	0,192	1,00	FAW	51
4 F 0104 FAW West	43,7	0,192	1,00	FAW	51
5 F 0105 FAW Nord	48,0	0,192	1,00	FAW	51
<b>Öffnungen / Fenster</b>					
6 A 0100 FF Süd	3,1	1,375	1,00	FF	51 02
7 A 0102 FF Ost	3,1	1,375	1,00	FF	51 02
8 A 0104 FF West	2,0	1,375	1,00	FF	51 02
9 T 0104 FAW West, Tür	2,3	1,010	1,00	FAW	51
<b>Grundflächen</b>					
10 F 0101 FG	64,0	0,349	0,60	FG	51 25 14

Σ A [m²] = 320,0 Σ L<sub>D</sub> + H<sub>U</sub> + L<sub>G</sub> [W/K] = 93,5  
 Bodenplattenmaß B' = A<sub>G</sub> / (0,5 P) = 64 / 16 = 4,00 m (DIN V 4108-6, E.3)

**Anmerkungen**

- 01 Fx-Werte nach DIN V 4108-6, Tab.3 (Regelfall)
- 02 Die solaren Gewinne werden gesondert ermittelt (siehe unten).
- 14 Bodenplatte auf Erdreich ohne Randdämmung.
- 25 Fx-Tabellenwert für das Bodenplattenmaß B' = 64,00 / 16,00 = 4,00.
- 51 Der Einfluss der Wärmebrücken wird mit einem U-Wert-Zuschlag von 0,05 W/m²K pauschal berücksichtigt. Die Konstruktionsweise nach DIN 4108, Bbl.2 werden eingehalten.

spezifischer Transmissionswärmeverlust (DIN 4108-6, Gl.28)  
 HT = Σ U<sub>i</sub> \* A<sub>i</sub> + H<sub>U</sub> + L<sub>S</sub> + H<sub>WB</sub> + ΔHT<sub>FH</sub> = **93,5 W/K** (0,29 W/m²K)

Bauteil	U-Wert [W/m²K]	Fläche A [m²]	Wärmeverlust [W/K]
Dachdecke	0,247	64 20 %	19 20 %
Außenwand	0,192	182 57 %	44 47 %
INNENFenster	1,375	8 3 %	12 12 %
Ausentür, PU-Kern	1,010	2 1 %	2 3 %
Decke	0,349	64 20 %	17 18 %
		320 100 %	94 100 %

**Beheiztes Gebäude- und Luftvolumen**

Bezeichnung	Volumenermittlung	V [m³]
1 [Gebäudevolumen] V <sub>e</sub>	384,00	384,0

Beheiztes Gebäudevolumen (EnEV A1, 1.3) V<sub>e</sub> = 384 m³  
 Gebäudenutzfläche A<sub>N</sub> = 0,32 \* V<sub>e</sub> = 123 m²  
 beheiztes Luftvolumen V<sub>L</sub> = 0,76 \* V<sub>e</sub> = 292 m³

**Lüftungswärmeverluste**

Luftvolumen	Netto-Luftvolumen V <sub>N</sub> = V <sub>L</sub> = 292 m³
Lüftung	freie Lüftung, n = 0,70 h <sup>-1</sup>

Spezifischer Lüftungswärmeverlust H<sub>V</sub> = 0,34 \* n \* V<sub>N</sub> = **69,5 W/K** (DIN V 4108-6, 6.2)

**Interne Wärmegewinne**

Nutzfläche	A <sub>N</sub> = 0,32 * V = 123 m²
Wärmeleistung	Wohngebäude (Anhang D.3), q <sub>M</sub> = 5,0 W/m²

Brutto-Wärmegewinne Φ<sub>1,M</sub> = q<sub>M</sub> \* A<sub>N</sub> = **614 W** (DIN V 4108-6, 6.3)

**Solare Wärmegewinne**

Effektive Kollektorflächen A<sub>s</sub> für Potsdam, nördliche Breite 52°,23'

Kollektorfläche A [m²]	g <sub>L</sub>	F <sub>F</sub>	F <sub>C</sub>	F <sub>H</sub>	F <sub>O</sub>	F <sub>F</sub>	λ <sub>08</sub>
<b>Fenster</b>							
6 A 0100 FF Sü	3,1	Süd	90°	0,60	0,70		1,2
7 A 0102 FF Os	3,1	Ost	90°	0,60	0,70		1,2
8 A 0104 FF We	2,0	West	90°	0,60	0,70		0,8

A<sub>s</sub> [m²] = A \* 0,90 \* g<sub>L</sub> \* F<sub>F</sub> \* F<sub>C</sub> \* F<sub>H</sub> \* F<sub>O</sub> \* F<sub>F</sub> \* F<sub>L</sub> (DIN V 4108-6, Gl.54)  
 F<sub>L</sub> berücksichtigt den Rahmenanteil der Fenster. Abminderungskoeffizient F<sub>C</sub> für permanente Sonnenschutzvorrichtungen, Teilstrahlungsfaktoren F<sub>H</sub> für Horizontwinkel der Verbauung, F<sub>O</sub> für horizontale Überhänge und F<sub>F</sub> für seitliche Abschattungsflächen nach DIN V 4108-6, Tab.7 ff.

[W/m²]	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr
- 0°	182	120	71	33	18	26	54	93	151
Süd 90°	127	110	90	53	30	41	80	95	115
West 90°	114	78	48	23	12	18	40	62	97
Nord 90°	69	47	28	14	8	12	22	37	58
Ost 90°	113	77	49	23	12	18	39	63	98

Kollektorfläche	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr
<b>Fenster</b>							
6 A 0100 FF Süd	104	61	35	47	93	110	133
7 A 0102 FF Ost	57	27	14	21	45	73	113
8 A 0104 FF West	37	18	9	14	31	48	75
<b>solare Wärmeströme ΣQ<sub>D</sub> [W]</b>							
	198	106	58	82	168	231	321
<b>ΣΦ<sub>B</sub> + t [kWh]</b>							
	147	76	43	61	113	172	231

Die solaren Wärmegewinne werden monatlich berechnet (sh. unten).

**Wirksame Wärmespeicherfähigkeit (DIN V 4108-6, 6.5.2)**

Vereinfachter Ansatz für leichte Gebäude ohne massive Innenbauteile oder mit abgehängten Decken

C<sub>wirk</sub> = 15,0 [Wh/m³K], C<sub>wirk</sub> \* V<sub>e</sub> = 5.760 [Wh/K]  
 Parameter a = a<sub>0</sub> + C<sub>wirk</sub> / (H \* t<sub>0</sub>) = 1 + C<sub>wirk</sub> / (H \* 16) = 1 + 360 / H (Gl.75, monatlich)

**Heizunterbrechung**

Abgesenkter Heizbetrieb während der Nachtstunden (DIN V 4108-6, Anhang C)

Nachtabenkung für t<sub>0</sub> = 7,0 Stunden  
 Mindest-Innentemperatur θ<sub>0,ab</sub> = 15,0°C  
 Heizungsanlage mit Nennleistung Φ<sub>pp</sub> = 1,5 \* (H<sub>T</sub> + H<sub>V</sub>) \* 31 = 6.657 W

Abschaltbetrieb  
 Interne Gewinne während der Nachtabenkung Φ<sub>0</sub> = 614 W  
 Wirksame Wärmespeicherfähigkeit C<sub>wirk,Heizunterbrechung</sub> = 12,0 \* V<sub>e</sub> = 4.608 Wh/K

	θ <sub>e</sub> °C	θ <sub>inh</sub> °C	θ <sub>il</sub> °C	t <sub>nh</sub> h	t <sub>ab</sub> h	t <sub>bh</sub> h	θ <sub>co</sub> °C	θ <sub>c1</sub> °C	θ <sub>c2</sub> °C	θ <sub>c3</sub> °C	AQ <sub>ij</sub> kWh	AQ <sub>il</sub> kWh
Jan	-0,9	-0,9	14,5	6,0	1,0	2,5	18,7	15,3	15,0	17,5	3,1	95
Feb	0,2	0,2	14,8	6,5	0,5	2,2	18,7	15,3	15,1	17,5	2,9	81
Mär	3,7	3,7	15,6	7,0	0,0	1,4	18,7	15,8	15,8	17,4	2,2	69
Apr	8,0	8,0	16,5	7,0	0,0	0,5	18,8	16,7	16,7	17,3	1,5	45
Mai	13,2	13,2	17,7	7,0	0,0	0,0	18,9	17,8	17,8	17,8	0,8	24
Jun	16,6	16,6	18,5	7,0	0,0	0,0	19,0	18,5	18,5	18,5	0,3	10
Jul	17,9	17,9	18,8	7,0	0,0	0,0	19,0	18,8	18,8	18,8	0,1	5
Aug	17,5	17,5	18,7	7,0	0,0	0,0	19,0	18,7	18,7	18,7	0,2	6
Sep	13,9	13,9	17,9	7,0	0,0	0,0	18,9	17,9	17,9	17,9	0,7	21
Okt	9,4	9,4	16,8	7,0	0,0	0,2	18,8	17,0	17,0	17,3	1,3	40
Nov	4,2	4,2	15,7	7,0	0,0	1,3	18,8	15,9	15,9	17,4	2,1	64
Dez	0,7	0,7	14,9	6,8	0,2	2,1	18,7	15,3	15,2	17,5	2,8	87

Reduzierung der Wärmeverluste durch eine Heizunterbrechung  
 ΔQ<sub>0ij</sub> = Hsb<sub>1</sub>(θ<sub>0</sub>-θ<sub>0,inh</sub>)<sup>t<sub>ab</sub></sup> + (θ<sub>0</sub>-θ<sub>0,ab</sub>)<sup>t<sub>bh</sub></sup> + (θ<sub>0</sub>-θ<sub>0,pp</sub>)<sup>t<sub>bh</sub></sup> - C \* ζ<sub>1</sub>(θ<sub>0</sub>-θ<sub>c1</sub>+θ<sub>c2</sub>-θ<sub>c3</sub>)  
 Reduzierung der Wärmeverluste in einem Monat ΔQ<sub>0i</sub> = ΔQ<sub>0ij</sub> \* T<sub>0</sub>  
 Reduzierung der Wärmeverluste in einem Jahr Q<sub>NA</sub> = ΣΔQ<sub>0i</sub> = 545,1 kWh/a

H<sub>V</sub> Spezifischer Lüftungswärmeverlust während der Heizunterbrechung = 0,34 \* 0,50 \* V<sub>L</sub> = 50 W/K  
 H<sub>sb</sub> Spezifischer Wärmeverlust während der Heizunterbrechung = H<sub>T</sub> + H<sub>V</sub> = 143 W/K  
 H<sub>c</sub> Spezifischer Wärmeverlust zwischen den Bauteilen und dem Innenraum = 4 \* A<sub>N</sub> \* 0,13 = 3.781 W/K  
 H<sub>v</sub> Spezifischer Wärmeverlust aller leichten Bauteile (60 kg/m³)  
 H<sub>w</sub> = 19,0 + 4,4 + 4,4 + 2,9 + 0,1 = 31 W/K  
 H<sub>0e</sub> Spezifischer Wärmeverlust zwischen den Innenbauteilen und außen  
 H<sub>0e</sub> = H<sub>c</sub> \* (H<sub>sb</sub> + H<sub>w</sub> + H<sub>v</sub>) / (H<sub>c</sub> + H<sub>sb</sub> + H<sub>w</sub> + H<sub>v</sub>) = 64 W/K  
 ζ<sub>1</sub> Wirksamer Anteil der Wärmespeicherfähigkeit = H<sub>0e</sub> / (H<sub>0e</sub> + H<sub>0e</sub>) = 0,98  
 ζ<sub>2</sub> Verhältniswert = H<sub>0e</sub> / (H<sub>0e</sub> + H<sub>w</sub> + H<sub>v</sub>) = 0,98  
 τ<sub>p</sub> Reaktionszeit der Bauteiltemperatur auf einen Wechsel der Heizleistung = ζ<sub>1</sub> \* C / (H<sub>0e</sub> + H<sub>0e</sub>) = 32,33  
 τ<sub>T</sub> Ansprechzeit der Bauteiltemperatur auf einen Wechsel der Lufttemperatur = ζ<sub>1</sub> \* C / (H<sub>0e</sub> + H<sub>0e</sub>) = 1,18

θ<sub>0</sub> Außentemperatur  
 θ<sub>0,inh</sub> niedrigste, erreichbare Innentemperatur (im Abschaltbetrieb θ<sub>0e</sub>, abgesenkt θ<sub>0</sub>\*Φ<sub>pp</sub>/H<sub>sb</sub>)  
 θ<sub>0,pp</sub> höchstmögliche Innentemperatur (θ<sub>0</sub> + (Φ<sub>pp</sub>+Φ<sub>0</sub>)/H<sub>sb</sub>)  
 θ<sub>1</sub> Innentemperatur am Ende der Nichtheizphase ohne Regelphase = θ<sub>0,inh</sub> + ζ<sub>1</sub>(θ<sub>0</sub>-θ<sub>0,inh</sub>)<sup>exp(Dw/(t<sub>nh</sub>\*τ<sub>p</sub>))</sup>  
 t<sub>nh</sub> Zeit in der nicht geheizt wird (Gl. C.18, 20, 23)  
 t<sub>0</sub> Zeit mit (abgesenktem) Regelbetrieb (Gl. C.26)  
 t<sub>0,2</sub> Zeit der Aufheizphase (Gl. C.29 / EN 832 J.28)  
 θ<sub>0,2</sub> Bauteiltemperatur zu Beginn der Absenkung (θ<sub>0</sub> + ζ<sub>1</sub>(θ<sub>0</sub>-θ<sub>0,2</sub>))  
 θ<sub>1</sub> Bauteiltemperatur am Ende der Nichtheizphase (Gl. C.21, 25)  
 θ<sub>0,2</sub> Bauteiltemperatur am Ende der Regelphase (Gl. C.28)  
 θ<sub>0,3</sub> Bauteiltemperatur am Ende der Aufheizphase (Gl. C.31)  
 ΔQ<sub>0ij</sub> Reduzierung des Wärmeverlustes infolge intermittierender Beheizung [kWh] (Gl. C.32)

**Heizwärmebedarf**

Gebäudestandort	Potsdam					
Transmissionsverluste	Q <sub>t</sub> = (ΣL <sub>D</sub> )*ΔT*d - ΔQ <sub>0i</sub>					
Bauteilverluste	ΣL <sub>D</sub> = 94 W/K					
Heizunterbrechung	ΔQ <sub>0i</sub> monatlich					
Lüftung	H <sub>V</sub> = 69 W/K					
Interne Gewinne	Φ <sub>1,M</sub> = 614 W					
Solare Gewinne	Φ <sub>2</sub> [W] (monatlich)					
Ausnutzungsgrad	η = (1 - γ <sup>0</sup> ) / (1 - γ <sup>n</sup> ) (a sh. C.wirk)					
	γ = Q <sub>0</sub> / Q <sub>i</sub> (monatlich, DIN V 4108-6, 6.5)					
t <sub>A</sub> [°C]	Q <sub>t</sub> [kWh]	H <sub>V</sub> *ΔT*d [kWh]	Φ <sub>1</sub> * η * d * η [kWh]	Φ <sub>2</sub> * d * η [kWh]	η	Q <sub>h</sub> [kWh]
Jan -0,9	1.290	1.028	454	61	0,99	1.803
Feb 0,2	1.101	878	409	112	0,99	1.458
Mär 3,7	996	791	447	168	0,98	1.173
Apr 8,0	696	550	412	215	0,93	619
Mai 13,2	379	300	333	207	0,73	139
Jun 16,6	152	120	167	97	0,38	8
Jul 17,9	72	57	78	50	0,17	
Aug 17,5	98	78	109	65	0,24	1
Sep 13,9	323	255	319	144	0,72	115
Okt 9,4	628	496	426	137	0,93	561
Nov 4,2	933	740	435	75	0,98	1.163
Dez 0,7	1.187	946	454	43	0,99	1.636
	8,7	7.856	6.238	4.042	1.373	8.678

Jahres-Heizwärmebedarf Q<sub>h</sub> = **8.678 kWh/a** (q<sub>h</sub> = 70,6 kWh/m²a)

Heizzeit vom 27. September bis 10. Mai (225 Tage, Gl.27)  
 erforderliche Heizleistung, Richtwert 7 kW

Berechnungsgang für den Monat Januar  
 Q<sub>t</sub> = (93,5)\*19,9\*31\*24/1000 - 95,2 = 1289,1 kWh  
 H<sub>V</sub>\*ΔT\*d = 69,5 \* 19,9\*31\*24/1000 = 1029,0 kWh  
 Φ<sub>1,M</sub>\*d = 614,4 \* 31\*24/1000 = 457,1 kWh  
 Φ<sub>2</sub>\*d = 82,1 \* 31\*24/1000 = 61,1 kWh  
 γ = (457,1+61,1) / (1289,9+1028,4) = 0,22 a = 1+5760 / (93,5 + 69,5)/16 = 3,21  
 η = (1 - γ<sup>0</sup>) / (1 - γ<sup>n</sup>) = 0,994 - 0,989 - 0,977 - 0,931 - 0,728 - (Jan - Feb - Mrz - Apr - Mai)

**Wärmebedarf für Warmwasserbereitung**

pauschaler Ansatz 12,5 kWh/m²a (öffentlich-rechtlicher Nachweis)

Q<sub>hw</sub> = A<sub>N</sub> \* q<sub>hw</sub> = 123 \* 12,5 = 1.536 kWh/a

**Anlagentechnik (DIN V 4701-10)**

Anlagen-Aufwandszahl aus der Anlagenberechnung (siehe Haustechnik)  
 Heizung: Elt-Wärmepumpe, freie Lüftung, Warmwasser: Heizungs-WP ohne Zirkulation - Energieträger: [Strom]

Anlagen-Aufwandszahl  $e_p = 0,88$

Gesamt-Endenergie ohne Hilfsenergie, lokal  $Q_{WE,E} = 3.419 \text{ kWh/a}$  (27,8 kWh/m<sup>2</sup>a)  
 Hilfsenergie, lokal  $Q_{HE,E} = 657 \text{ kWh/a}$  (5,3 kWh/m<sup>2</sup>a)

**Anforderungen**

vorh.  $Q_p'' = 73,3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (9.006 kWh/a, siehe Haustechnik)

Anforderungen an Wohngebäude

A/V = 0,83	zulässig	vorhanden
1) $Q_p''$ [kWh/m <sup>2</sup> a]	125,3	73,3 (58,5 %)
2) $H_T''$ [W/m <sup>2</sup> K]	0,48	0,29 (60,9 %)

1) zulässiger Primärenergiebedarf  $Q_p''$  nach EnEV, A1, Tab.1, Anforderungen an Wohngebäude

2) Spezifischer Transmissionswärmeverlust  $H_T'' = (\sum L_D + \sum L_{D,WB}) / \sum A = 94 / 320 = 0,29$   
 (DIN V 4108-6, Tab. D.1, zul.  $H_T''$  nach EnEV, A1, Tab.1)

Erfüllt die EnEV, Anhang 1.

**KfW-Energiesparhaus**

Die Förderprogramme der Kreditanstalt für Wiederaufbau zur CO<sub>2</sub>-Minderung durch Energiesparhäuser sind an die Einhaltung / Unterschreitung der nachfolgend aufgeführten Grenzwerte gebunden (Stand 12/2003). Die Unterschreitung der Grenzwerte für Passivhäuser muß nicht unbedingt bedeuten, dass auf eine Heizungsanlage verzichtet werden kann.

Kriterium / KfW-Programm	KfW60	KfW40	Passivhaus	vorhanden
Primärenergiebedarf $Q_p''$	60,0	40,0	40,0	73,3 kWh/m <sup>2</sup> a
Jahres-Heizwärmebedarf $Q_H$			15,0	70,6 kWh/m <sup>2</sup> a
Wärmeverlustrückkoeffizient $H_T''$	0,336	0,264		0,292 W/m <sup>2</sup> K
	nein	nein	nein	

CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Jahres-Heizwärmebedarf  $Q_H = 71 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Energieträger / Heizungssystem	$\alpha$ [%]	CO <sub>2</sub> -Faktor	E [kg CO <sub>2</sub> ]
Erzeuger I		100	
		0	
		CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg / m <sup>2</sup> +Jahr]	-----

**Sommerlicher Wärmeschutz**

Die wärmeübertragenden Umfassungsflächen enthalten 192 m<sup>2</sup> Fassadenflächen, davon 184 m<sup>2</sup> Wandflächen und 8 m<sup>2</sup> Fensterflächen.  
 Der Fensterflächenanteil beträgt 4%.

Ein Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes ist nach EnEV §3 nicht erforderlich. Beachten Sie DIN 4108-2 in der gültigen Fassung.

**Längen, Flächen, Volumen**

Flächenberechnung (Flächen2.REB)

Fallmodell 1  
 Deckflächen  
 1 F 0105 FD : 8,00\*8,00 = 64,00  
 Außenwände  
 2 F 0100 FAW Süd : 48,00 - [A 0100] = 48,00  
 3 F 0102 FAW Ost : 6,00\*8,00 - [A 0102] = 48,00  
 4 F 0104 FAW West : 6,00\*8,00 - [A 0104] - [T 0104] = 48,00  
 5 F 0105 FAW Nord : 48,00 = 48,00  
 Öffnungen / Fenster  
 6 A 0100 FF Süd : 1,01\*1,01\*3 = 3,06  
 7 A 0102 FF Ost : 1,01\*1,01\*3 = 3,06  
 8 A 0104 FF West : 1,01\*1,01\*2 = 2,04  
 9 T 0104 FAW West, Tür: 1,14\*2,01 = 2,29  
 Grundflächen  
 10 F 0101 FG : 8,00\*8,00 = 64,00  
 [Grundflächen]  
 [AGF 1] 0101 FG <1>: 8,00\*8,00 = 64,00  
 [Bodenplattenmaß A] (nur Grundflächenprojektion): [AGF 1] = 64,00  
 [Grundflächenumfang]  
 [UGF 1] 0101 FG <1>: 8,00+8,00+8,00+8,00 = 32,00  
 [Bodenplattenmaß P] (nur Grundflächenprojektion): [UGF 1] = 32,00  
 [Bodenplattenmaß B]: 2 \* [Bodenplattenmaß A] / [Bodenplattenmaß P] = 4,00  
 [Umbaute Räume]  
 [Vol 1] Fallmodell 1 <1>: 8,00\*8,00\*4,00 = 384,00  
 [Gebäudevolumen]  $V_e$ : [Vol 1] = 384,00  
 [0,32 \*  $V_e$ ] AN: 0,32 \* [Gebäudevolumen] = 122,88  
 für Berechnungen nach DIN V 18599 nach Gebäudezonen  
 [Nettogrunderflächen]  
 [NGF 1] 0101 FG <1>: [AGF 1] - (0,29\*8,00 + 0,29\*8,00 + 0,29\*8,00 + 0,29\*8,00) = 54,72  
 [NGF Summe]: [NGF 1] = 54,72  
 [Nettonutzflächen ANGF = Zonensumme (NGF \* Geschosshöhe)]  
 [Nettonutzflächen]  
 [ANGF 1] Zone 1: + [NGF 1] = 54,72  
 [Bruttoraumvolumen  $V_e$ , Außenmaße, ggf. gegenseitig Abzüge  
 (Bruttoraumvolumen)  
 [Ve 1]: + [Vol 1] = 384,00  
 [Nettoraumvolumen  $V_i = V_e * 0,8$  (alternativ:  $V_i = ANGF * \text{Geschosshöhe}$ )  
 (Nettoraumvolumen)  
 [Vi 1] Zone 1: [Ve 1] \* 0,8 = 307,20

**Haus- und Anlagentechnik**

**Ermittlung der Anlagen-Aufwandszahl  $e_p$**

Tabellenverfahren nach Anhang C.3

Heizung: Elt-Wärmepumpe, freie Lüftung, Warmwasser: Heizungs-WP ohne Zirkulation - Energieträger: [Strom]

Aufwandszahlen  $e_e$  und Energieverluste der Erzeugung, Speicherung und Verteilung, Wärmegutschriften, Hilfsenergiebedarf, Deckungsanteile  $\alpha$  und Primärenergiefaktoren  $f_p$ .  
 Verwendete Indizes: P-Primärenergie, E-Endenergie, HE-Hilfsenergie, TW- Trinkwarmwasser, L-Lüftung, H-Heizung  
 Detailliert berechnete Anlagen-Kenngrößen liegen nicht vor.

**Trinkwasserbereitung**

mit Trinkwarmwasser versorgter Bereich  $A_N = 123 \text{ m}^2$

Trinkwasserwärmebedarf  $q_{TW} = 12,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Anlagenteil	Aufwandszahl [-]	Verlust [kWh/m <sup>2</sup> a]	Gutschrift [kWh/m <sup>2</sup> a]	Hilfsenergie [kWh/m <sup>2</sup> a]	$\alpha$ [%]	$f_p$	Anm.
Erzeuger I	0,27			0,3	60	3,0	59
Speicher		4,7	2,1	0,1			30
Verteilung		4,7	2,1				21
Erzeuger II	1,00			0,9	40		904
		9,3	4,2	1,3	100		

59) Heizungs-Wärmepumpe Erdreich/Wasser, Aufwandszahl  $e_{TW,g}$  und Hilfsenergiebedarf  $q_{TW,g,HE}$  nach DIN V 4701-10, Tab. C.1-4d [Strom]  
 30) Indirekt beheizter Speicher innen, Wärmeverlust  $q_{TW,s}$ , Wärmegutschrift  $q_{H,TW,s}$  und Hilfsenergiebedarf  $q_{TW,s,HE}$  nach DIN V 4701-10, Tab. C.1-3a  
 21) Gebäudeszentrale TW-Verteilung ohne Zirkulation, weniger als 10 m Verteilungen außen, Steigleitungen im nicht belüfteten Schacht, Wärmeverlust  $q_{TW,d}$ , Wärmegutschrift  $q_{H,TW,d}$  und Hilfsenergiebedarf  $q_{TW,d,HE}$  nach DIN V 4701-10, Tab. C.1-2a / C.1-2b  
 904) Sonnenkollektoren, Speicher und Verteilung innen, ohne Zirkulation, Kollektorfächchen und Deckungsanteile nach DIN V 4701-10, Tab. C.1-4a, Hilfsenergiebedarf  $q_{TW,g,HE}$  nach Tab. C.1-4e [solar],  $A_C = 4,2 \text{ m}^2$

**Primär- und Endenergiebedarf für Trinkwasserbereitung**

Gl. 4.2-3, Aufwandszahl * Primärenergiefaktor $\sum(e_{TW,g,i} * \alpha_{TW,g,i} * f_{p,i})$	0,49
Gl. 4.2-3, Primärenergiebedarf $q_{TW,P} = (12,5 + 9,3) * 0,49$	10,6 kWh/m <sup>2</sup>
Gl. 4.2-4, Heizwärmegutschrift $q_{H,TW} = 4,2$	4,2 kWh/m <sup>2</sup> a
Gl. 4.2-5, Hilfsenergiebedarf $q_{TW,HE} = 0,2+0,1+0,3$	0,6 kWh/m <sup>2</sup>
Gl. 4.2-5, Hilfsenergiebedarf $q_{TW,HE,P} = 0,6 * 3$	1,9 kWh/m <sup>2</sup> a

Endenergiebedarf  $Q_{TW,E} = (12,5 + 9,3) * (0,16 + 0,40) * 123$   
 Hilfsenergiebedarf  $Q_{TW,HE,E} = 0,6 * 123$   
 77 kWh/a

**Heizung**

beheizter Bereich  $A_N = 123 \text{ m}^2$   
 Heizwärmebedarf  $q_H = 70,6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Anlagenteil	Aufwandszahl [-]	Verlust [kWh/m <sup>2</sup> a]	Hilfsenergie [kWh/m <sup>2</sup> a]	$\alpha$ [%]	$f_p$	Anm.
Erzeuger I	0,23		1,2	100	3,0	193
Erzeuger II						
Speicher		0,1	0,5			207
Verteilung		0,7	3,0			225
Übergabe		0,4				259
		1,2	4,7	100		

193) Elektro-Wärmepumpe Erdreich/Wasser, 35/28°C, Aufwandszahl  $e_H$  und Hilfsenergiebedarf  $q_{H,HE}$  nach DIN V 4701-10 Tab. C.3-4c [Strom]  
 217) Pufferspeicher des Wärmereizers innen, Systemtemperatur 35/28°C, Wärmeverlust  $q_{H,S}$  und Hilfsenergiebedarf  $q_{H,S,HE}$  nach DIN V 4701-10, Tab. C.3-3  
 225) horizontale Verteilung innen, Steiger innenliegend Systemtemperaturen 35/28°C, geregelte Pumpe, Wärmeverluste der Verteilungen  $q_{d,H}$  und Hilfsenergiebedarf  $q_{d,H,HE}$  nach DIN V 4701-10, Tab. C.3-2  
 259) Fußboden- und andere Flächenheizungen, elektronische Regelleinrichtung mit zeit- und temperaturabhängig arbeitendem PI-Regelverhalten und Optimierungsfunktionen (z.B. Fensteröffnungs- oder Präsenzerkennung), Wärmeverlust  $q_{d,H}$  nach DIN V 4701-10 Tab. C.3-1

**Primär- und Endenergiebedarf für Heizung**

Gl. 4.2-18, benötigte Heizwärme $q_{H,0} = q_H - q_{H,TW} - q_{H,L} = 70,6 - 4,2$	66,4 kWh/m <sup>2</sup>
Gl. 4.2-18, Aufwandszahl * Primärenergiefaktor $\sum(e_{H,g,i} * \alpha_{H,g,i} * f_{p,i})$	0,69
Gl. 4.2-18, Primärenergiebedarf $q_{H,P} = (66,4 + 1,2) * 0,69$	46,6 kWh/m <sup>2</sup>
Gl. 4.2-19, Hilfsenergiebedarf $q_{H,HE,P} = (1,2+0,5+3,0) * 3$	14,2 kWh/m <sup>2</sup>

Endenergiebedarf  $Q_{H,E} = (66,4 + 1,2) * (0,23 + 0,00) * 123$   
 Hilfsenergiebedarf  $Q_{H,HE,E} = 4,7 * 123$   
 580 kWh/a

**Anlagen-Aufwandszahl**

$Q_p = (10,6 + 1,9) * 123 + (46,6 + 14,2) * 123$   
 9.006 kWh/a  
 Heizwärmebedarf  $Q_H = q_H * A_N = 70,6 * 123$   
 8.678 kWh/a  
 Trinkwasserwärmebedarf  $Q_{TW} = q_{TW} * A_N = 12,5 * 123$   
 1.536 kWh/a

Anlagen-Aufwandszahl  $e_p = Q_p / (Q_H + Q_{TW}) = 9.006 / (8.678 + 1.536)$

**0,88**

Primärenergie  $Q_p = 9.006 \text{ kWh/a}$  (73,3 kWh/m<sup>2</sup>a)  
 Endenergie ohne Hilfsenergie, lokal  $Q_{WE,E} = 1.509 + 1.910 = 3.419 \text{ kWh/a}$  (27,8 kWh/m<sup>2</sup>a)  
 Hilfsenergie, lokal  $Q_{HE,E} = 77 + 580 = 657 \text{ kWh/a}$  (5,3 kWh/m<sup>2</sup>a)

**Energiekosten und Wirtschaftlichkeit**

**Projekt**

**Bauteile der Gebäudehülle**

Bauteil	U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Fläche A m <sup>2</sup>	Wärmeverlust W/K
Dachdecke	0,247	64	20 %
Außenwand	0,192	182	57 %
INNENFenster	1,375	8	3 %
Aussentür, PU-Kern	1,010	2	1 %
Decke	0,349	64	20 %
		320	100 %
			94
			100 %

**Energiebedarf des Gebäudes**

Zusammenstellung der Wärmeverluste, Wärmegewinne, Anlagenkennwerte ... und Vergleich mit Berechnung VarianteA

Heizung: Elt-Wärmepumpe, freie Lüftung, Warmwasser: Heizungs-WP ohne Zirkulation - Energieträger: [Strom]  
 ... und Vergleich mit Berechnung VarianteA, Heizung: Elt-Wärmepumpe, freie Lüftung, Warmwasser: Heizungs-WP ohne Zirkulation - Energieträger: [Strom]

	VarianteA	Variante0
Standort	Vari-A	Potsdam
Umbauter Raum	384	384 m <sup>3</sup>
Gebäudenutzfläche $A_N$ (EnEV)	123	123 m <sup>2</sup>
Heizwärmebedarf $Q_H$	4.369	8.678 kWh/a
Warmwasserwärmebedarf $Q_{TW}$	1.536	1.536 kWh/a
Anlagenaufwandszahl $e_p$	1,02	0,88
		- 13,7 %
Verluste der Warmwasserbereitung	1.149	1.149 kWh/a
Verluste der Heizungsanlage	142	142 kWh/a
Gutschriften aus Anlagenverlusten	-516	-516 kWh/a
Hilfsenergiebedarf [Strom], $Q_{HE,E}$	657	657 kWh/a
Endenergiebedarf $Q_{WE,E}$	2.428	3.419 kWh/a
		+ 40,8 %
Energiebedarf [Strom]	1.354	2.345 kWh/a
Energiebedarf [solar]	1.074	1.074 kWh/a
		+ 73,2 %

Der Endenergiebedarf  $Q_{WE,E}$  beinhaltet auch den Aufwand der Wärmeerzeugung.

**Energiekosten**

	VarianteA	Variante0
Hilfsenergie [Hilfsenergie Strom]	657	657 kWh/a
Kosten je kWh	0,180	0,180 €/kWh
Stromkosten	118	118 €/a
Energiebedarf [Strom]	1.354	2.345 kWh/a
Kosten je kWh		
Energiekosten		+ 73,2 %
Energiebedarf [solar]	1.074	1.074 kWh/a
Kosten je kWh		
Energiekosten		
andere, jährliche Kosten		
Energiekosten	118	118 €/a

## Anhang B

### CFX Programmcode Strömungssimulationen Kapitel 2.3. Seite 83ff.

```
+-----+  
|  
|           CFX Command Language for Run  
|  
+-----+
```

```
EXECUTION CONTROL:  
RUN DEFINITION:  
  Definition File = Auslass050.def  
  Run Mode = Full  
END  
PARALLEL HOST LIBRARY:  
HOST DEFINITION: blasius  
  Host Architecture String = intel_p4.sse2_linux2.3.4  
  Installation Root = /opt/cfx/CFX-%v  
END  
END  
SOLVER STEP CONTROL:  
PARALLEL ENVIRONMENT:  
  Start Method = Serial  
END  
END  
END  
LIBRARY:  
MATERIAL: Air at 25 C  
  Material Description = Air at 25 C and 1 atm (dry)  
  Material Group = Air Data, Constant Property Gases  
  Option = Pure Substance  
  Thermodynamic State = Gas  
PROPERTIES:  
  Option = General Material  
  Thermal Expansivity = 0.003356 [K^-1]  
ABSORPTION COEFFICIENT:  
  Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]  
  Option = Value  
END  
DYNAMIC VISCOSITY:  
  Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]  
  Option = Value  
END  
EQUATION OF STATE:  
  Density = 1.185 [kg m^-3]  
  Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]  
  Option = Value  
END  
REFRACTIVE INDEX:  
  Option = Value  
  Refractive Index = 1.0 [m m^-1]  
END  
SCATTERING COEFFICIENT:  
  Option = Value  
  Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]  
END  
SPECIFIC HEAT CAPACITY:  
  Option = Value  
  Reference Pressure = 1 [atm]  
  Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]  
  Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]  
  Reference Temperature = 25 [C]  
  Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]
```

```
  Specific Heat Type = Constant Pressure  
END  
THERMAL CONDUCTIVITY:  
  Option = Value  
  Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m^-1 K^-1]  
END  
END  
END  
END  
FLOW:  
DOMAIN: Domain 1  
  Coord Frame = Coord 0  
  Domain Type = Fluid  
  Fluids List = Air at 25 C  
  Location = Assembly  
BOUNDARY: boden  
  Boundary Type = WALL  
  Location = SF BODEN  
BOUNDARY CONDITIONS:  
HEAT TRANSFER:  
  Fixed Temperature = 18 [C]  
  Option = Fixed Temperature  
END  
THERMAL RADIATION:  
  Diffuse Fraction = 1.  
  Emissivity = 1.  
  Option = Opaque  
END  
WALL INFLUENCE ON FLOW:  
  Option = No Slip  
END  
WALL ROUGHNESS:  
  Option = Smooth Wall  
END  
END  
BOUNDARY: inlet  
  Boundary Type = INLET  
  Location = SF INLET  
BOUNDARY CONDITIONS:  
FLOW REGIME:  
  Option = Subsonic  
END  
HEAT TRANSFER:  
  Option = Static Temperature  
  Static Temperature = 18 [C]  
END  
MASS AND MOMENTUM:  
  Normal Speed = 1 [m s^-1]  
  Option = Normal Speed  
END  
THERMAL RADIATION:  
  Option = Local Temperature  
END  
TURBULENCE:  
  Option = Low Intensity and Eddy Viscosity Ratio  
END  
END  
BOUNDARY: outlet  
  Boundary Type = OPENING  
  Location = SF OUTLET  
BOUNDARY CONDITIONS:  
FLOW DIRECTION:  
  Option = Normal to Boundary Condition  
END  
FLOW REGIME:  
  Option = Subsonic  
END  
HEAT TRANSFER:  
  Opening Temperature = 18 [C]  
  Option = Opening Temperature  
END  
MASS AND MOMENTUM:
```

```

Option = Opening Pressure and Direction
Relative Pressure = 0 [Pa]
END
THERMAL RADIATION:
Option = Local Temperature
END
TURBULENCE:
Option = Low Intensity and Eddy Viscosity Ratio
END
END
END
BOUNDARY: wand
Boundary Type = WALL
Location = SF WAND
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Option = Adiabatic
END
THERMAL RADIATION:
Diffuse Fraction = 1.
Emissivity = 1.
Option = Opaque
END
WALL INFLUENCE ON FLOW:
Option = No Slip
END
WALL ROUGHNESS:
Option = Smooth Wall
END
END
END
BOUNDARY: aussen
Boundary Type = WALL
Location = SF AUSSEN
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Fixed Temperature = 17.9 [C]
Option = Fixed Temperature
END
THERMAL RADIATION:
Diffuse Fraction = 1.
Emissivity = 1.
Option = Opaque
END
WALL INFLUENCE ON FLOW:
Option = Free Slip
END
END
END
BOUNDARY: norden
Boundary Type = WALL
Location = SF H NORDEN 1,SF H NORDEN 2
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Option = Adiabatic
END
THERMAL RADIATION:
Diffuse Fraction = 1.
Emissivity = 1.
Option = Opaque
END
WALL INFLUENCE ON FLOW:
Option = No Slip
END
WALL ROUGHNESS:
Option = Smooth Wall
END
END
BOUNDARY SOURCE:
SOURCES:
RADIATION SOURCE: Radiation Source norden
Option = Isotropic Radiation Flux
Radiation Flux = 60 [W m^-2]
END
END
END
Option = Opening Pressure and Direction
Relative Pressure = 0 [Pa]
END
END
BOUNDARY: oben
Boundary Type = WALL
Location = SF H OBEN 1,SF H OBEN 2
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Option = Adiabatic
END
THERMAL RADIATION:
Diffuse Fraction = 1.
Emissivity = 1.
Option = Opaque
END
WALL INFLUENCE ON FLOW:
Option = No Slip
END
WALL ROUGHNESS:
Option = Smooth Wall
END
END
BOUNDARY SOURCE:
SOURCES:
RADIATION SOURCE: Radiation Source oben
Option = Isotropic Radiation Flux
Radiation Flux = 600 [W m^-2]
END
END
END
BOUNDARY: sueden
Boundary Type = WALL
Location = SF H SUEDEN 1,SF H SUEDEN 2
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Option = Adiabatic
END
THERMAL RADIATION:
Diffuse Fraction = 1.
Emissivity = 1.
Option = Opaque
END
WALL INFLUENCE ON FLOW:
Option = No Slip
END
WALL ROUGHNESS:
Option = Smooth Wall
END
END
BOUNDARY SOURCE:
SOURCES:
RADIATION SOURCE: Radiation Source sueden
Option = Isotropic Radiation Flux
Radiation Flux = 600 [W m^-2]
END
END
END
BOUNDARY: osten
Boundary Type = WALL
Location = SF H OSTEN 1,SF H OSTEN 2
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Option = Adiabatic
END
THERMAL RADIATION:
Diffuse Fraction = 1.
Emissivity = 1.
Option = Opaque
END
WALL INFLUENCE ON FLOW:
Option = No Slip
END

```

```

WALL ROUGHNESS:
  Option = Smooth Wall
END
BOUNDARY SOURCE:
  SOURCES:
    RADIATION SOURCE: Radiation Source osten
    Option = Isotropic Radiation Flux
    Radiation Flux = 60 [W m^-2]
  END
  END
  END
BOUNDARY: westen
Boundary Type = WALL
Location = SF H WESTEN 1,SF H WESTEN 2
BOUNDARY CONDITIONS:
  HEAT TRANSFER:
    Option = Adiabatic
  END
  THERMAL RADIATION:
    Diffuse Fraction = 1.
    Emissivity = 1.
    Option = Opaque
  END
  WALL INFLUENCE ON FLOW:
    Option = No Slip
  END
  WALL ROUGHNESS:
    Option = Smooth Wall
  END
  BOUNDARY SOURCE:
    SOURCES:
      RADIATION SOURCE: Radiation Source westen
      Option = Isotropic Radiation Flux
      Radiation Flux = 300 [W m^-2]
    END
  END
  END
DOMAIN MODELS:
  BUOYANCY MODEL:
    Buoyancy Reference Temperature = 10 [C]
    Gravity X Component = 0 [m s^-2]
    Gravity Y Component = -9.81 [m s^-2]
    Gravity Z Component = 0 [m s^-2]
    Option = Buoyant
  BUOYANCY REFERENCE LOCATION:
    Option = Automatic
  END
  DOMAIN MOTION:
    Option = Stationary
  END
  REFERENCE PRESSURE:
    Reference Pressure = 1 [atm]
  END
  END
FLUID MODELS:
  COMBUSTION MODEL:
    Option = None
  END
  HEAT TRANSFER MODEL:
    Option = Thermal Energy
  END
  THERMAL RADIATION MODEL:
    Option = Discrete Transfer
  SCATTERING MODEL:
    Option = None
  END
  SPECTRAL MODEL:
    Option = Gray
  END
  END
  TURBULENCE MODEL:
    Option = k epsilon
  BUOYANCY TURBULENCE:
    Option = None
  END
  END
  TURBULENT WALL FUNCTIONS:
    Option = Scalable
  END
  END
  END
INITIALISATION:
  Option = Automatic
  INITIAL CONDITIONS:
    Velocity Type = Cartesian
  CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:
    Option = Automatic
  END
  EPSILON:
    Option = Automatic
  END
  K:
    Option = Automatic
  END
  RADIATION INTENSITY:
    Option = Automatic
  END
  STATIC PRESSURE:
    Option = Automatic
  END
  TEMPERATURE:
    Option = Automatic
  END
  END
  END
OUTPUT CONTROL:
  RESULTS:
    File Compression Level = Default
    Option = Standard
  END
  END
SIMULATION TYPE:
  Option = Steady State
  END
SOLUTION UNITS:
  Angle Units = [rad]
  Length Units = [m]
  Mass Units = [kg]
  Solid Angle Units = [sr]
  Temperature Units = [K]
  Time Units = [s]
  END
SOLVER CONTROL:
  ADVECTION SCHEME:
    Option = Upwind
  END
  CONVERGENCE CONTROL:
    Length Scale Option = Conservative
    Maximum Number of Iterations = 100
    Timescale Control = Auto Timescale
  END
  CONVERGENCE CRITERIA:
    Residual Target = 1.E-4
    Residual Type = RMS
  END
  DYNAMIC MODEL CONTROL:
    Global Dynamic Model Control = On
  END
  END
  COMMAND FILE:
    Version = 10.0
    Results Version = 10.0
  END

```

```

+-----+
| Solver                                     |
+-----+
| ANSYS CFX Solver 10.0                    |
|                                           |
| Version 2005.10.25-23.30 Tue Oct 25 23:48:58 BST 2005 |
|                                           |
| Executable Attributes                    |
| single-32bit-optimised-supfort-noprof-nospag-lcomp |
|                                           |
| Copyright 1996-2005 ANSYS Europe Ltd.    |
+-----+
| Job Information                           |
+-----+

Run mode:  serial run

Host computer:  blasius
Job started:  Wed May 3 09:41:46 2006

+-----+
| Memory Allocated for Run (Actual usage may be less) |
+-----+

Data Type  Kwords  Words/Node  Words/Elem  Kbytes  Bytes/Node
Real       265187.9  216.19   227.99   1035890.3  864.75
Integer    121190.0    98.80   104.19   473398.4   395.19
Character   2445.5     1.99    2.10    2388.2     1.99
Logical     40.0        0.03    0.03    156.3      0.13
Double     1208.0     0.98    1.04    9437.5     7.88

+-----+
| ***** Notice *****                  |
| Wall Heat Transfer Coefficient written to the results file uses |
| „Wall Adjacent Temperature“ for the bulk temperature. If you want |
| to override the bulk temperature then set the expert parameter |
| „tbulk for heat tran coef = <value>“    |
+-----+
| Radiation Coarsening Information         |
+-----+

Domain Name : Domain 1

Target coarsening rate = 64
Number of fine grid elements = 1163142
Number of radiation elements = 27283
Actual coarsening rate = 42

+-----+
| Total Number of Nodes, Elements, and Faces |
+-----+

Domain Name : Domain 1

Total Number of Nodes = 1226660

Total Number of Elements = 1163142
Total Number of Hexahedrons = 1163142

Total Number of Faces = 135964

+-----+
| Buoyancy Reference Information           |
+-----+

Domain Group: Domain 1

Buoyancy has been activated. The absolute pressure will include
hydrostatic pressure contribution, using the following reference
coordinates: ( 5.00000E+01, 2.50000E+01, 3.78418E-07).

```

```

+-----+
| Average Scale Information                 |
+-----+

Domain Name : Domain 1
Global Length = 7.9350E+01
Minimum Extent = 5.0000E+01
Maximum Extent = 1.0000E+02
Density = 1.1850E+00
Dynamic Viscosity = 1.8310E-05
Velocity = 1.0000E+00
Advection Time = 7.9350E+01
Reynolds Number = 5.1354E+06
Thermal Conductivity = 2.6100E-02
Specific Heat Capacity at Constant Pressure = 1.0044E+03
Thermal Expansivity = 3.3560E-03
Prandtl Number = 7.0462E-01
Total Extinction Coefficient = 1.0000E-02
Optical Thickness = 7.9350E-01

```

```

+-----+
| Checking for Isolated Fluid Regions      |
+-----+

```

No isolated fluid regions were found.

```

+-----+
| The Equations Solved in This Calculation |
+-----+

```

Subsystem : Momentum and Mass

```

U-Mom
V-Mom
W-Mom
P-Mass

```

Subsystem : Thermal Radiation

I-Radiation

Subsystem : Heat Transfer

H-Energy

Subsystem : TurbKE and Diss.K

```

K-TurbKE
E-Diss.K

```

CFD Solver started: Wed May 3 09:44:44 2006

-----  
**Convergence History**  
 -----

=====

Timescale Information

-----

Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	2.38049E+01
V-Mom	Auto Timescale	2.38049E+01
W-Mom	Auto Timescale	2.38049E+01
H-Energy	Auto Timescale	2.38049E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	2.38049E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	2.38049E+01

-----

=====

OUTER LOOP ITERATION = 1 CPU SECONDS = 1.060E+02

-----

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.00	1.2E-03	1.4E-02	2.7E-02 OK
V-Mom	0.00	3.0E-02	2.1E-01	1.2E-04 OK
W-Mom	0.00	2.6E-12	1.8E-10	3.9E+07 F
P-Mass	0.00	2.9E-03	3.0E-02	43.4 1.3E+00 F
I-Radiation	#Its	Vol Chg	Sur Chg	%Lost %Imbal
Gray	1	0.0E+00	0.0E+00	0.07 3.67
H-Energy	0.00	8.2E-03	2.2E-01	5.7 3.0E-03 OK
K-TurbKE	0.00	7.5E-03	4.1E-01	5.7 2.7E-06 OK
E-Diss.K	0.00	9.5E-03	1.0E+00	7.9 1.2E-06 OK

-----

=====

OUTER LOOP ITERATION = 2 CPU SECONDS = 9.620E+02

-----

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	10.60	1.3E-02	1.7E-01	4.1E-03 OK
V-Mom	0.22	6.7E-03	1.1E-01	9.2E-03 OK
W-Mom	99.99	2.7E-03	1.4E-01	4.9E-01 ok
P-Mass	1.10	3.2E-03	3.8E-01	9.5 3.7E-02 OK
I-Radiation	#Its	Vol Chg	Sur Chg	%Lost %Imbal
Gray	1	0.0E+00	0.0E+00	0.07 3.61
H-Energy	0.74	6.1E-03	1.7E-01	5.7 3.9E-03 OK
K-TurbKE	2.29	1.7E-02	2.5E-01	5.7 1.0E-04 OK
E-Diss.K	0.42	4.0E-03	9.9E-01	14.7 5.9E-06 OK

-----

=====

OUTER LOOP ITERATION = 3 CPU SECONDS = 1.425E+03

-----

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.56	7.0E-03	8.4E-02	1.9E-03 OK
V-Mom	1.05	7.0E-03	3.5E-01	2.8E-03 OK
W-Mom	0.70	1.9E-03	1.3E-01	2.8E-02 OK
P-Mass	0.19	6.2E-04	4.1E-02	13.7 7.0E-02 OK
I-Radiation	#Its	Vol Chg	Sur Chg	%Lost %Imbal
Gray	1	0.0E+00	0.0E+00	0.07 3.61
H-Energy	0.83	5.0E-03	1.4E-01	5.8 7.2E-03 OK

-----



V-Mom		
Boundary : aussen		-1.2925E+05
Boundary : boden		-1.4714E+04
Boundary : inlet		-8.5271E-04
Boundary : norden		-4.5207E-02
Boundary : oben		-5.3364E+02
Boundary : osten		-9.7843E-02
Boundary : outlet		-1.2862E+04
Boundary : sueden		-1.0198E-01
Boundary : wand		2.8936E+02
Boundary : westen		-8.2062E-02
Domain : Domain 1		1.5662E+05

Domain Imbalance : -4.5473E+02  
Domain Imbalance, in %: -0.2903 %

W-Mom		
Boundary : aussen		-3.2057E+01
Boundary : boden		-6.2475E-02
Boundary : inlet		6.9420E-06
Boundary : norden		1.3286E+02
Boundary : oben		1.7571E-02
Boundary : osten		1.6751E-03
Boundary : outlet		3.3567E+01
Boundary : sueden		-1.3154E+02
Boundary : wand		-2.1576E+00
Boundary : westen		-1.5520E-02

Domain Imbalance : 6.1436E-01  
Domain Imbalance, in %: 0.0004 %

P-Mass		
Boundary : inlet		5.9249E+03
Boundary : outlet		-5.9248E+03

Domain Imbalance : 6.4941E-02  
Domain Imbalance, in %: 0.0011 %

I-Radiation		
Boundary : aussen		2.3258E+05
Boundary : boden		1.0280E+05
Boundary : inlet		6.2797E+04
Boundary : norden		3.5231E+03
Boundary : oben		1.0581E+05
Boundary : osten		2.5768E+03
Boundary : outlet		7.1791E+04
Boundary : sueden		7.1366E+04
Boundary : wand		-3.8617E+04
Boundary : westen		3.2112E+04
Domain : Domain 1		-6.4662E+05

Global Imbalance : 1.1450E+02  
Global Imbalance, in %: 0.0177 %

H-Energy		
Boundary : aussen		-5.5559E+02
Boundary : boden		-7.6553E+01
Boundary : inlet		-4.1658E+07
Boundary : norden		4.5575E+03
Boundary : oben		1.2730E+04
Boundary : osten		5.1105E+03
Boundary : outlet		4.0929E+07
Boundary : sueden		1.1649E+04
Boundary : wand		3.8340E+04
Boundary : westen		9.3687E+03
Domain : Domain 1		6.4634E+05

Domain Imbalance : -1.1487E+03  
Domain Imbalance, in %: -0.0028 %

### Wall Force and Moment Summary

Note: Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter ,include pref in forces = t'.

Pressure Force On Walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Domain 1			
aussen	0.0000E+00	-2.7770E+06	3.2004E+01
boden	-1.2593E-13	-2.8729E+06	2.7406E-14
norden	0.0000E+00	0.0000E+00	-1.3285E+02
oben	0.0000E+00	5.3358E+02	0.0000E+00
osten	1.1263E+02	0.0000E+00	0.0000E+00
sueden	0.0000E+00	0.0000E+00	1.3150E+02
wand	6.0994E+00	-1.4425E+04	2.1643E+00
westen	-9.8110E+01	0.0000E+00	0.0000E+00

Domain Group Totals 2.0624E+01 -5.6638E+06 3.2814E+01

Viscous Force On Walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Domain 1			
aussen	0.0000E+00	2.0922E+00	-1.9897E-04
boden	-3.9774E+00	6.0344E-11	6.2476E-02
norden	-5.6009E-02	4.5207E-02	6.1417E-11
oben	-6.1207E-02	7.3893E-12	-1.7571E-02
osten	-1.9821E-10	9.7843E-02	-1.6751E-03
sueden	-8.0055E-02	1.0198E-01	-3.2495E-11
wand	-1.5149E-02	2.3329E-01	9.9513E-03
westen	8.8161E-11	8.2062E-02	1.5520E-02

Domain Group Totals : -4.1898E+00 2.6526E+00 6.8502E-02

Pressure Moment On Walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Domain 1			
aussen	-2.8066E+03	3.6073E+02	-5.3467E+05
boden	-1.1765E+03	1.4305E-13	1.4195E+05
norden	-6.8837E+02	-2.5771E+01	0.0000E+00
oben	-1.4753E+00	0.0000E+00	-4.3694E+01
osten	0.0000E+00	-1.1147E+00	-6.3125E+02
sueden	6.8920E+02	2.4588E+01	0.0000E+00
wand	5.7910E-01	-1.6455E-01	-7.3770E+00
westen	0.0000E+00	1.6694E+00	5.7104E+02

Domain Group Totals -3.9832E+03 3.5994E+02 -3.9283E+05

Viscous Moment On Walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Domain 1			
aussen	1.2290E+00	7.1371E-03	8.3227E+01
boden	-3.8651E-10	-2.2842E+00	1.1969E-09
norden	2.2604E-01	2.8004E-01	1.3048E-01
oben	-1.2300E-01	-5.3883E-02	4.2845E-01
osten	-1.2864E-01	8.3756E-03	4.8921E-01
sueden	-5.0990E-01	-4.0027E-01	1.3702E-01
wand	-4.4695E-01	-2.7491E-03	-1.4205E-01
westen	-5.1281E-02	7.7602E-02	-4.1031E-01

Domain Group Totals : 1.9522E-01 -2.3680E+00 8.3860E+01

Locations of Maximum Residuals				
Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	1001250	-1.513E+00	4.036E-01	4.837E+00
V-Mom	1097873	2.987E+00	1.946E+00	-4.344E+00
W-Mom	890424	-4.990E+00	1.000E-01	-4.956E+00
P-Mass	1023997	-1.990E+00	6.000E+00	3.990E+00
H-Energy	1010615	-3.990E+00	6.000E+00	-1.990E+00
K-TurbKE	985516	-2.510E+00	1.000E-01	4.990E+00
E-Diss.K	300450	-1.990E+00	1.000E-01	5.000E+00

Peak Values of Residuals			
Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	2	1.25574E-02	5.92041E-04
V-Mom	1	3.00103E-02	1.55519E-03
W-Mom	2	2.68726E-03	5.93606E-04
P-Mass	2	3.24035E-03	2.48582E-05
H-Energy	1	8.19204E-03	1.86573E-03
K-TurbKE	4	6.52163E-02	1.07934E-03
E-Diss.K	4	7.68325E-02	1.35581E-03

False Transient Information		
Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	6.15166E+02
V-Mom	Auto	6.15166E+02
W-Mom	Auto	6.15166E+02
H-Energy	Auto	6.15166E+02
K-TurbKE	Auto	6.15166E+02
E-Diss.K	Auto	6.15166E+02

Average Scale Information	
---------------------------	--

Domain Name : Domain 1

Global Length	= 7.9350E+01
Minimum Extent	= 5.0000E+01
Maximum Extent	= 1.0000E+02
Density	= 1.1850E+00
Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05
Velocity	= 7.5165E-01
Advection Time	= 1.0557E+02
Reynolds Number	= 3.8601E+06
Thermal Conductivity	= 2.6100E-02
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	= 1.0044E+03
Thermal Expansivity	= 3.3560E-03
Prandtl Number	= 7.0462E-01
Temperature Range	= 8.8630E+01
Rayleigh Number	= 4.3025E+15
Buoyancy Time	= 6.8085E+00
Total Extinction Coefficient	= 1.0000E-02
Optical Thickness	= 7.9350E-01

Variable Range Information		
----------------------------	--	--

Domain Name : Domain 1

Variable Name	min	max
Thermal Expansivity	3.36E-03	3.36E-03
Density	1.18E+00	1.18E+00
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	1.00E+03	1.00E+03
Dynamic Viscosity	1.83E-05	1.83E-05
Thermal Conductivity	2.61E-02	2.61E-02
Static Entropy	-3.42E+01	2.35E+02
Total Absorption Coefficient	1.00E-02	1.00E-02
Total Scattering Coefficient	0.00E+00	0.00E+00
Radiation Intensity	9.99E+01	5.92E+02
Velocity u	-2.52E+00	4.89E+00
Velocity v	-9.72E-01	3.66E+00
Velocity w	-2.17E+00	2.09E+00
Pressure	-3.81E+00	1.44E+01
Turbulence Kinetic Energy	5.14E-07	5.45E-01
Turbulence Eddy Dissipation	1.46E-08	1.15E+01
Eddy Viscosity	3.94E-07	6.18E-02
Temperature	2.88E+02	3.77E+02
Static Enthalpy	-1.00E+04	7.90E+04

CPU Requirements of Numerical Solution		
--	--	--

Subsystem Name	Discretization (secs. %total)	Linear Solution (secs. %total)
Momentum and Mass	1.26E+04 44.5 %	3.14E+03 11.1 %
Thermal		
Radiation	3.27E+02 1.2 %	4.43E+02 1.6 %
Heat Transfer	2.60E+03 9.2 %	9.90E+02 3.5 %
TurbKE and Diss.K	3.16E+03 11.2 %	2.63E+03 9.3 %
Subsystem Summary	1.87E+04 66.1 %	7.21E+03 25.5 %
Variable Updates		7.08E+02 2.5 %
Miscellaneous		1.66E+03 5.9 %
Total		2.82E+04

Job Information	
-----------------	--

Host computer: blasius  
 Job finished: Wed May 3 18:48:34 2006  
 Total CPU time: 2.827E+04 seconds  
 or: ( 0: 7: 51: 12.227 )  
 ( Days: Hours: Minutes: Seconds )  
 Total wall clock time: 3.281E+04 seconds  
 or: ( 0: 9: 6: 48.000 )  
 ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

End of solution stage.  
 This run of the CFX-5 Solver has finished.

