

- ▶ Skript zum Semimar



bubble gums

Konstruktiver Entwurf pneumatischer Tragwerke

Dipl.-Ing. Alexander Stahr

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Begriffe und Definitionen	4
3	Grundlagen	5
3.1	Technische Pneus im Hochbau	5
3.2	Luftdruck	5
3.2.1	Allgemeines.....	5
3.2.2	Außen- bzw. Umgebungsdruck.....	6
3.2.3	Innendruck und Membranspannungen	6
3.3	Werkstoffe	7
3.3.1	Allgemeines.....	7
3.3.2	Beschichtete Gewebe	7
3.3.3	Folien	9
3.4	Systeme	10
3.4.1	Lufthallen	10
3.4.2	Schlauchtragwerke.....	11
3.4.3	Überdruckkissen	11
3.4.4	Unterdrucksysteme.....	11
3.4.5	Rotationspneus.....	12
	Tragverhalten	12
3.5.1	Allgemeines.....	12
3.5.2	Lastannahmen	12
3.5.3	Einfluß der Form.....	13
3.5.4	Einfluß der Krümmung.....	14
3.5.5	Einfluß des Innendrucks.....	14
4	Entwurf und Formfindung	15
4.1	Der Entwurf	15
4.2	Der Prozeß der Formfindung.....	15
4.2.1	Experimentelle Formfindung.....	16
4.2.2	Analytische Formfindung	16
4.3	Minimalflächen	17
4.4	Spannungsharmonische Flächen	17
5	Fertigung	18
5.1	Allgemeines	18
5.2	Ermittlung des Zuschnitts.....	18
5.3	Kompensation.....	18
5.4	Sonstiges.....	19
6	Projekte	20
6.1	AIRQUARIUM®.....	20
6.2	AIRTECTURE®	21
6.3	Stierkampfarena Centro Integrado de Vista Alegre, Madrid	22
6.4	Stierkampfarena Nîmes	23
6.5	Humphery Metrodome, Minneapolis	24
7	Verzeichnisse	25
7.1	Literaturverzeichnis	25
7.2	Abbildungsverzeichnis.....	25

1 Einleitung

In großer Arten- und Formenvielfalt sind pneumatische Systeme Teil der lebenden Natur und der Technik. Ihr Funktionsprinzip ist dabei denkbar einfach: ein gasförmiges, flüssiges oder kleinteilig festes (granuliertes) Medium wird von einer dünnen Haut dicht umschlossen. Die Haut bzw. Hülle trennt innen und außen voneinander ab, sie schützt Inhalte, behindert den naturgewollten Ausgleich von Dichte, Druck, Temperatur, usw. und ist in der Lage Kräfte aufzunehmen bzw. weiterzuleiten.

In der lebenden Natur findet man pneumatische Systeme so häufig, daß FREI OTTO nach eingehender Beschäftigung mit dem Thema feststellte: "Der Pneu ist das Konstruktionssystem der lebenden Natur." [1]

Von der Natur abgeschaut wird das konstruktive System des Pneu in der Technik auf vielfältige Art und Weise genutzt (siehe Abb.).

Für die bauliche Umsetzung des Systems bekam F. W. LANCHASTER schon 1917 ein Patent erteilt. Allerdings war es ihm aufgrund der fehlenden, bzw. noch nicht zur Verfügung stehenden Werkstoffe nicht vergönnt, seine Visionen (großtechnisch) in die Realität umzusetzen. Dies blieb dem US-Amerikaner WALTER BIRD vorbehalten, welcher 1946 seinen ersten Radom mit einem Durchmesser von 15 m baute.

Der Bau von Lufthallen nahm anschließend eine stürmische Entwicklung. Das geringe Eigengewicht der Membran ist in Verbindung mit der Nutzung der Luft als "tragenden" Baustoff die Voraussetzung für leichtesten Leichtbau und damit die Überspannung großer Räume. Darüber hinaus prädestinieren die kurze Bauzeit, der einfache Transport und die Verzichtbarkeit auf spezielle Hebezeuge pneumatische Konstruktionen für den Einsatz als beliebig oft wiederverwendbare, temporäre Bauwerke.

Wo Licht ist, da ist auch Schatten. Die relativ starke Anfälligkeit gegenüber Witterungseinflüssen (vor allem Windböen und Schnee), bauphysikalische Probleme (wie Wärmedämmung, Raumakustik und Schallschutz) sowie erhöhte Betriebskosten (infolge der permanent notwendigen Druckregelung) setzen der Anwendbarkeit deutliche Grenzen und haben dazu geführt, daß die großtechnisch - bauliche Nutzung des Konstruktionsprinzips Pneu in den letzten Jahren stark zurückgegangen ist.

Die vorliegende Schrift beschäftigt sich vorrangig mit den Grundlagen, dem Entwurf bzw. der Formfindung und -optimierung luftgestützter Überdrucksysteme. Sie soll den Studenten, welche an der Lehrveranstaltung "bubble gums - Der konstruktive Entwurf pneumatischer Tragwerke" teilnehmen den Einstieg in dieses interessante Randgebiet des Bauens ermöglichen und soll zur Suche nach neuen Anwendungen und Lösungen anregen.

2 Begriffe und Definitionen

Pneu: "aus Gummi hergestellter Luftreifen an Fahrzeugrädern" [3]

"Der **Pneu** ist also der Sammelbegriff für zugfeste, doch biegeeweiche Hüllen, die zusammen mit ihrer (zumeist unter hydrostatischem Druck stehenden) Füllung ein konstruktives System bilden, das in der Regel in der Lage ist, Kräfte mit geringem Materialaufwand weiterzuleiten." [2]

Pneuma: "[gr.; "Hauch, Atem"]" [3]

Pneumatik: "... Teilgebiet der Mechanik, daß sich mit dem Verhalten der Gase beschäftigt ..." [3]

pneumatisch: "... luftgefüllt, mit Luftdruck betrieben, Luft... (techn.) ... " [3]

"Membran und Membrane [lat.] die; ... 2. zarte, *dünne Haut...*" [3]

Die **Vorspannung** ist eine planmäßige Beanspruchung der Konstruktion, welche die aus der Wirkung äußerer Einwirkungen resultierenden Spannungs- und Formänderungszustände positiv beeinflusst.

„**Leichtbau** ist zunächst eine Absichtserklärung: aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das Gewicht zu reduzieren oder zu minimieren, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern oder, was schließlich dasselbe bedeutet: die Tragfunktion ohne Gewichtszunahme zu verbessern.“ [4]



Abbildung 2: Schlauchbeutel



Abbildung 3: Tankballon



Abbildung 1: Hebekissen

3 Grundlagen

3.1 Technische Pneus im Hochbau

Die hochbauliche Umsetzung des konstruktiven Systems Pneu basiert auf vier Grundprinzipien.

1. Es ist eine **dichte, zugfeste Membran** vorhanden, die ein bestimmtes Volumen umschließt.
2. Das vorhandene Volumen wird durch **Luft** aufgefüllt.
3. Die eingeschlossene Luft steht im Vergleich zur Umgebung unter einem (nahezu konstanten) **Überdruck**.
4. Die Membran wird im bzw. am Baugrund oder an anderen Tragwerkselementen **verankert**.

3.2 Luftdruck

3.2.1 Allgemeines

Der Luftdruck ist das tragende Element pneumatischer Konstruktionen. Die Luft ist hier ein aktiver Teil des Tragwerks. Das Verhalten pneumatischer Strukturen basiert auf den in Abbildung 4 [5] dargestellten Wechselwirkungen.

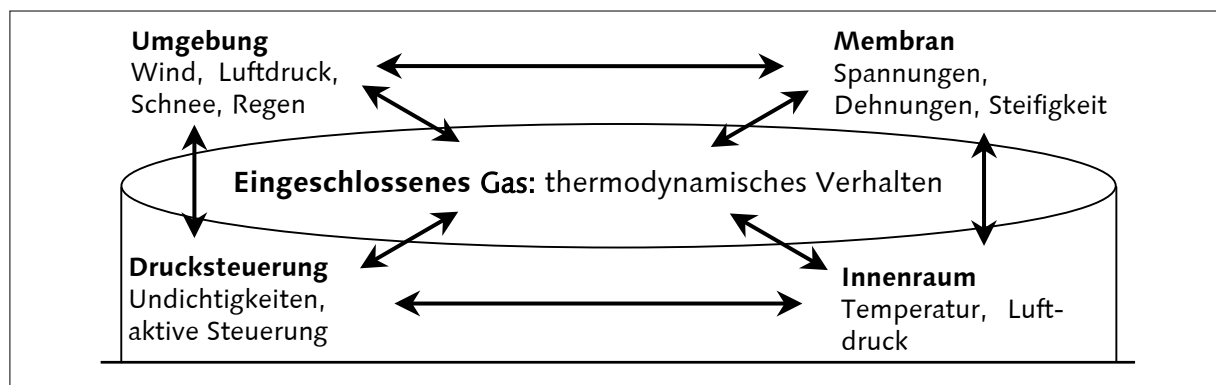


Abbildung 4: Wechselwirkungen pneumatischer Strukturen mit der Umgebung

Einheiten des Drucks:

$$1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar} = 10^{-4} \text{ N/cm}^2 = 1 \text{ kg} / \text{m}^1 \cdot \text{s}^2 \\ = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-7} \text{ kN/cm}^2 = 10^{-6} \text{ N/mm}^2$$

veraltete Einheiten: $1 \text{ bar} = 10^4 \text{ kp/m}^2 = 750 \text{ Torr} \approx 1 \text{ at} \approx 1 \text{ atm} \approx 10^4 \text{ mm WS}$

Der Zustand eines eingeschlossenen Gases lässt sich durch die universelle Gasgleichung beschreiben. Er ist abhängig von Druck (p), Volumen (V), Temperatur (T), Systemmasse (m) und der Gaskonstanten des eingeschlossenen Gases (R).

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad \text{Universelle Gasgleichung}$$

3.2.2 Außen- bzw. Umgebungsdruck

Der Außen- bzw. Umgebungsdruck resultiert aus dem Eigengewicht der darüberliegenden "Luftsäule" und ist demzufolge auf Höhe des Meeresspiegels am größten. Er nimmt mit steigender Höhe (ca. 0,1 mbar/m ü. NN) ab.

Bezugsdruck: 1,01325 bar (\cong 1013 mbar = 10132,5 mm WS) bei $T = 0\text{ °C}$

"mittlerer Durchschnittsdruck": 1000 mbar = 100 kN/m²

"wetterabhängige Schwankung": ± 20 mbar = 2 kN/m²

Vergleich: Verkehrslast Büroräume: 2 kN/m²

zulässige Druckspannung Nadelholz S10 $\sigma_{D,II} = 0,85$ kN/cm²

3.2.3 Innendruck und Membranspannungen

Die Spannungen in der Membran sind direkt abhängig von Innendruck (p) und Radius (r).

Nachfolgend die Gleichungen zur Ermittlung der Membranspannungen für Kugeln und Zylinder.

Kugel:

richtungsfrei: $\sigma_z = \frac{d}{4} \cdot p$ [N/mm²]

- Zugspannung in alle Richtungen gleich!
- gilt auch für Halbkugeln und Kugelsegmente

Zylinder

Ringrichtung: $\sigma_r = \frac{d}{2} \cdot p$ [N/mm²]

Längsrichtung: $\sigma_z = \frac{d}{4} \cdot p$ [N/mm²]

$$\sigma_r = 2 \cdot \sigma_z$$

- gilt auch für Halbzylinder
- Zugspannung in Ringrichtung doppelt so groß
- (die Bockwurst reißt längs auf!)

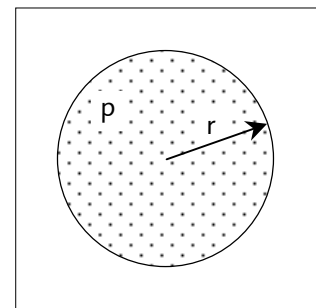


Abbildung 5: Kreisquerschnitt

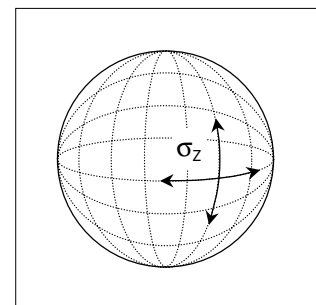


Abbildung 6: Kugel; Membranspannungen

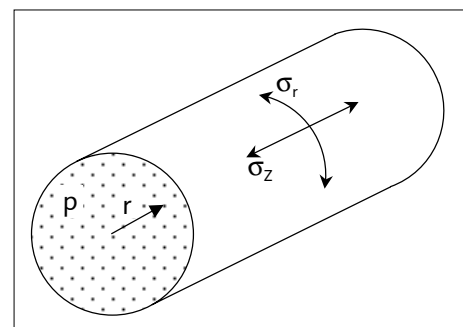


Abbildung 7: Zylinder; Membranspannungen

3.3 Werkstoffe

3.3.1 Allgemeines

Membranwerkstoffe für pneumatische Konstruktionen müssen vielfältigen Anforderungen genügen. So sollen sie bei geringem Eigengewicht eine hohe Zugfestigkeit und Dehnsteifigkeit sowie gute Flexibilität (geringe Schubsteifigkeit) gewährleisten. Darüber hinaus sollen Membranen dauerhaft (beständig gegen UV-Licht, Feuchtigkeit, Mikroorganismen, etc.) sein und gute Verarbeitungseigenschaften (Fügarkeit, Knickunempfindlichkeit, usw.) gewährleisten. In Abhängigkeit der Nutzung werden Anforderungen an die Transluzenz und Dichtigkeit der Werkstoffe gestellt. Nicht zuletzt spielt das Brandverhalten (Feuerwiderstand) eine wichtige Rolle.

Aus den genannten Gründen kommen für pneumatische Konstruktionen grundsätzlich folgende Werkstoffe in Frage:

- Gewebe (technische Textilien) mit Beschichtung,
- thermoplastische Kunststofffolien,
- Metallfolien und dünne Bleche.

Nachfolgend soll auf die beschichteten Gewebe und die Kunststofffolien näher eingegangen werden. Metallfolien und -bleche sind nur für Sonderanwendungen bekannt und werden daher hier nicht behandelt.

3.3.2 Beschichtete Gewebe

Beschichtete Gewebe sind Verbundwerkstoffe. Sie bestehen aus einem Grundgewebe, es steht für Festigkeit, Steifigkeit und Schubnachgiebigkeit, und der Beschichtung, welche Dichtigkeit und Wetterbeständigkeit gewährleistet.

Gewebe sind Strukturen aus systematisch, zumeist orthogonal verflochtenen Fäden. Diese wiederum bestehen aus Naturfasern, mineralischen Fasern, Synthefasern oder metallische Fasern. Für Membranwerkstoffe sind insbesondere die Synthefasern Polyamid, Polyester (z. B. TREVIRA), Aramid (z. B. KEVLAR) und Glasfasern von Bedeutung.

Im textilen Bauen werden vorwiegend PVC – oder PTFE-Beschichtungen eingesetzt.

Sie können die Anforderungen bezüglich des Schutzes des festigkeitsbestimmenden Faserwerkstoffs vor schädigenden Umwelteinflüssen, z. B. Licht (Polyester, Polyamid und insbesondere Aramid) und Feuchtigkeit (Glasfaser) und Dichtigkeit

zuverlässig und dauerhaft erfüllen. PVC-Beschichtungen benötigen jedoch wegen ihrer starken Alterungsempfindlichkeit eine zusätzliche Deckschicht aus Lackierungen bzw. Laminierungen.

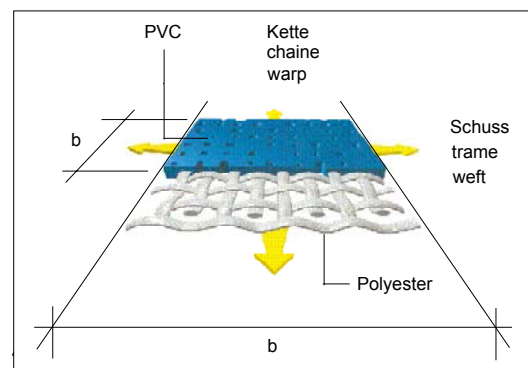


Abbildung 8: Aufbau PES-Gewebe + PVC-Beschichtung

Eine neuartige transparente Beschichtung aus Synthekautschuk wurde von der Firma ContiTech in Zusammenarbeit mit der FESTO AG entwickelt. Der Membranwerkstoff (Gewebe: Glasfaser) ist unter der Bezeichnung **VITROFLEX** auf dem Markt.

Die mechanischen Eigenschaften sind geprägt vom anisotropen Materialverhalten der Membranwerkstoffe. Dieses resultiert aus der Herstellungstechnologie der Gewebe (Kett- und Schußrichtung).

Die Herstellung des Verbundwerkstoffs bietet vielfältige Möglichkeiten (vgl. Abbildung 10). Die Art und die Dicke des Faserwerkstoffs und der Beschichtung richtet sich nach der Nutzung und damit den gewünschten bzw. erforderlichen technischen Eigenschaften.

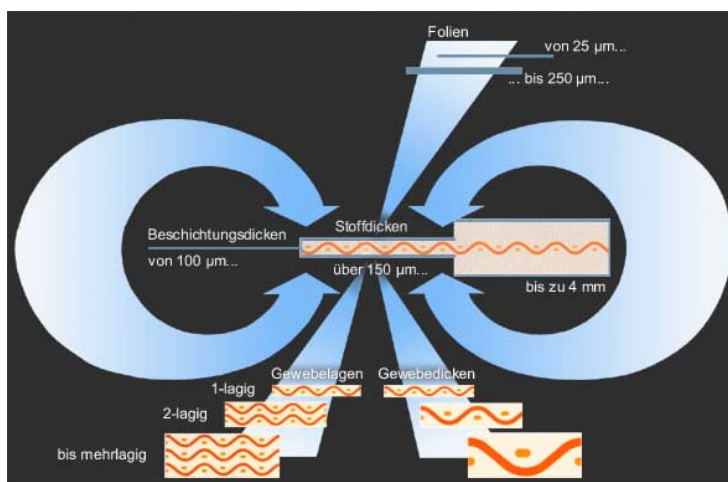


Abbildung 10 : Variable Größen in der Herstellung beschichteter Gewebe

PVC-beschichtete Polyestergerewebe (PES)

- besonders geeignet für Tragwerke mit temporärem Charakter
- sehr gutes Preis – Leistungs - Verhältnis
- sehr guten Verarbeitungseigenschaften (flexibel, gut ffügbar)
- große verfügbare Farbpalette
- knickunempfindlich
- relativ große Bruchdehnung (15 ... 20 %)

Glasfasergewebe (GF) mit Polytetrafluorethylen – Beschichtung (PTFE)

- geeignet für ortsfeste Bauten mit längerer Nutzungsdauer
- höhere Kosten als PES + PVC-Beschichtung
- eingeschränkte Farbpalette
- relativ steifes Material, knickempfindlich
- geringe Bruchdehnung (3 ... 10 %)
- für extreme Temperaturen geeignet (-80 ... +250°C)
- nicht brennbar

Glasfasergewebe (GF) mit **Synthesekautschuk - Beschichtung**

- transparenter / transluzenter Verbundwerkstoff
- einfärbbar
- gute Verarbeitungseigenschaften (verklebbar mit anderen Materialien, nicht schweißbar)
- witterungsbeständig von -20 bis +120 °C
- reißfest
- sehr teuer (ca. 80 €/m², 10 fache Kosten von PES + PVC)
- Marke: **VITROFLEX®**
- Hersteller: ContiTech, Braunschweig [6]

Mechanische Eigenschaften

Material	Typ	Flächengewicht [g/m ²]	Zugfestigkeit [N/5cm]	Reißdehnung [%]	Weiterreißwiderstand [N]	Knickbeständigkeit	UV-Beständigkeit	Transluzenz [%]	Lebenserwartung [a]
PES + PVC	I	800	3000/3000	15/20	350/310	sehr gut	gut	bis ca.4,0	>20
	II	900	4400/3950	15/20	bis 1800/1600				
	III	1050	5750/5100	15/25	580/520				
	IV	1300	7450/6400	15/30	800/950 1400/1100 1800/1600				
	V	1450	9800/8300	20/30					
GF + PTFE		800	3500/3500	7/10	300/300	ausreichend	sehr gut	bis ca.13	>25
		1150	5800/5800	bis	bis				
		1550	7500/6500	2/17	500/500				
Vitroflex		2400	3500/3500	1,8/2,5	550/650	sehr gut	gut	k. A.	k. A.

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften beschichteter Gewebe (k. A. – keine Angabe)

3.3.3 Folien

Grundlagen

Folien sind Einkomponentenwerkstoffe. Sie haben isotrope, das heißt in allen Richtungen nahezu gleiche mechanische Eigenschaften. Aufgrund der im Vergleich zu beschichteten Geweben relativ geringen Reißfestigkeiten ist die maximale Spannweite für lastabtragende Konstruktionen begrenzt. Folien werden im Außenbereich vorwiegend für Kissenkonstruktionen eingesetzt.

ETFE-Folien (Ethylen-Tetrafluorethylen)

- für lastabtragende Anwendungen im Außenbereich geeignet
- begrenzte maximale Spannweiten, wegen relativ geringer Reißfestigkeit
- hochgradig UV-stabil und UV-transparent (ohne chemische Additive)
- extrem langlebig (Lebensdauer über 30 Jahre)
- selbstreinigende Oberfläche durch die extrem hohe Oberflächenspannung
- hohe Schmelztemperatur, daher schwerentflammbar (B1 nach DIN 4102)
- thermisch schweißbar, chemisch inert, recycelbar

THV-Folien

- mit ETFE-Folien vergleichbare Eigenschaften
- aber geringere Reißfestigkeit bei nahezu gleicher Reißdehnung

PVC-Folien

- für lastabtragende Anwendungen im Außenbereich **nicht** geeignet
- geringe Festigkeit und Dehnsteifigkeit
- geringe UV- und Hitzebeständigkeit
- transparent und milchig herstellbar (hohe Transluzenz)
- Innenraumanwendungen (Projektionsflächen, etc.)
- Vorsicht bei der Montage, Knicken erzeugt "Weißbrüche"!

Mechanische Eigenschaften

Material	Dicke	Flächengewicht	Zugfestigkeit	Reißdehnung	Weiterreißwiderstand	Knickbeständigkeit	UV-Beständigkeit	Transluzenz	Lebenserwartung
	[μm]	[g/m^2]	[N/mm^2]	[%]	[N/mm]			[%]	[a]
ETFE	50	87,5	64/56	450/500	450/450	mittel	sehr gut	bis 95	> 25
	80	140	58/54	500/600	450/450				
	100	175	58/57	550/600	430/440				
	150	262,5	58/57	600/650	450/430				
	200	350	52/52	600/600	430/430				
THV	500	980	22/21	540/560	250/250	gut	gut	bis 95	> 20
PVC						gut	mittel	bis 95	< 5

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften Folien

3.4 Systeme

3.4.1 Lufthallen

- Luftgestützte Überdrucksysteme
- Niederdrucktragwerke
- Innendruck: 3 ... 5 mbar
0,3 ... 0,5 kN/m^2
- Lastaufnahme und -abtragung durch permanenten Überdruck im gesamten Innenraum
- Luftschleusen in Ein- und Ausgangsbereichen erforderlich
- großes (zu steuerndes) Luftvolumen

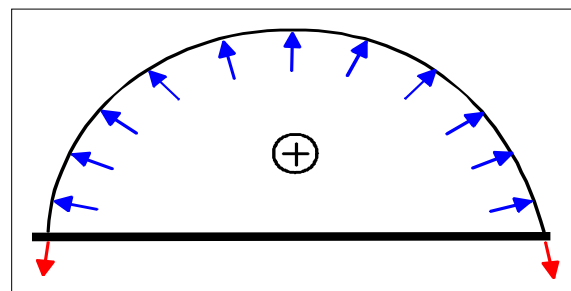


Abbildung 11: Prinzip Traglufthalle

Beispiele:

- Radome
- „klassische“ Traglufthallen
- AIRQUARIUM



Abbildung 12: Tennishalle

3.4.2 Schlauchtragwerke

- Luftgefüllte Überdrucksysteme
- Hochdrucktragwerke
- Innendruck: 500 ... 1000 mbar = 50 ... 100 kN/m²
- lastaufnehmende, druck- und biegetragfähige Tragwerkselemente
- keine Luftschleusen erforderlich
- verhältnismäßig kleines (zu steuerndes) Luftvolumen
- Addition mehrerer Schlauchelemente (und anderer Elemente) erzeugt Primärtragwerk

Beispiele:

FUJI-Pavillon, Expo 1970, Osaka
AIRTECTURE Folienkissen (Eden Projekt)



Abbildung 13: Fuji Pavillon, Expo 1970

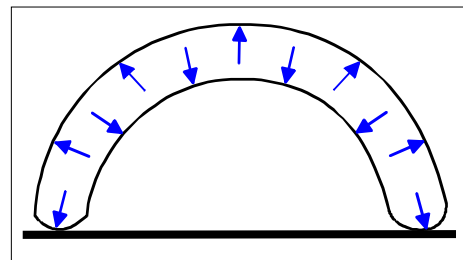


Abbildung 14: Prinzip Schlauchtragwerke

3.4.3 Überdruckkissen

- Überdrucktragwerke
- Innendruck: - 3 ... - 5 mbar
- 0,3 ... - 0,5 kN/m²
- keine Luftschleusen erforderlich
- verhältnismäßig kleines (zu steuerndes) Luftvolumen
- Primärtragwerk erforderlich

Beispiele:

- Gebäudehülle Eden-Projekt, Cornwall (GB)
- „Bedachung“ Elefantenhaus, Zoo Dresden
- „Bedachung“ Papillorama, Marin (CH)

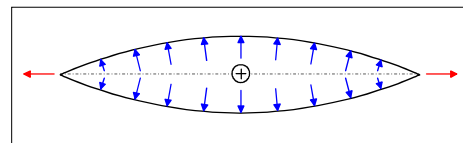


Abbildung 15: Prinzip Unterdruckpneu



Abbildung 16: Eden-Projekt, Cornwall (GB)

3.4.4 Unterdrucksysteme

- Unterdrucktragwerke
- Innendruck: - 3 ... - 5 mbar
- 0,3 ... - 0,5 kN/m²
- nur wenige bautechnische Anwendungen bekannt

Beispiel:

- Projekt AIRTECTURE, Membran zwischen „Airbeams“

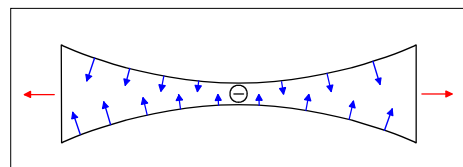


Abbildung 17: Prinzip Unterdruckpneu

3.4.5 Rotationspneus

- offenes, innendruckgestütztes System
- rotierende, scheibenförmige Membran baut sich infolge der wirkenden Fliehkräfte schirmartig auf



Abbildung 19:
Versuchspneus [7]

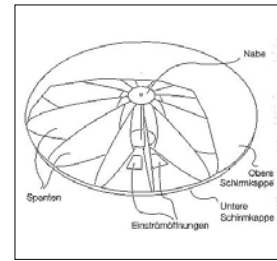


Abbildung 18:
Konstruktionsprinzip
Rotationspneus [7]

3.5 Tragverhalten

3.5.1 Allgemeines

Pneumatische Konstruktionen sind synklastisch gekrümmte, vorgespannte Flächen-tragwerke.

Die verwendeten Membranwerkstoffe haben eine sehr geringe Dicke und sind nur zugfest. Die sehr geringe Dicke ist die Voraussetzung für die Erzeugung gekrümmter Flächen, die Zugfestigkeit ermöglicht die Vorspannbarkeit des Tragwerks.

Die Vorspannung der Membran resultiert aus dem Überdruck im Innenraum des Systems (siehe 3.2.3). Sie muß mindestens so groß sein, daß die aus äußeren Einwirkungen resultierenden Biege- oder Druckbeanspruchungen der Membran jederzeit „überzogen“ werden und ein schlaff werden der Hülle vermieden wird.

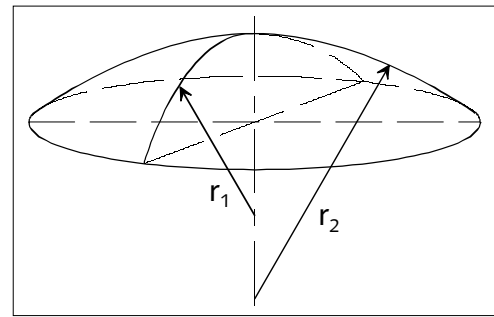


Abbildung 20: Synklastische Krümmung

Bedingt durch die flächige Lastabtragung treten biaxiale Membranspannungen auf. Durch den konstruktiven Entwurf (Formfindung und -optimierung) und den Betrieb (Druckregelung) gilt es an jedem Punkt der Membran unter beliebigen Einwirkungen eine Zugspannung zu gewährleisten um die Gebrauchstauglichkeit der Bauwerke zu sichern.

3.5.2 Lastannahmen

Da pneumatische Konstruktionen aus konstruktiven Gründen keine „steifen“ Bauwerke sind, werden besondere Kenntnisse über die Wirkung und die Größe äußerer Einwirkungen benötigt. Insbesondere die Wirkung des Windes und des Schnees, aber auch die der Temperatur sind hier zu nennen.

Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, gibt es in DIN 1055, Teil 5 und DIN 4134 spezifische Regelungen.

Schneelasten

Schneelasten brauchen nach DIN 1055, T. 5 nicht berücksichtigt zu werden, wenn ein Innenraumtemperatur von 12 °C gemessen am höchsten Punkt der Halle ständig

vorhanden ist, oder eine mechanische Schneeräumung durch ortsfestes Räumgerät gewährleistet werden kann.

Nach DIN 4134 sind jedoch bei mechanischer Schneeräumung in Bereichen mit weniger als 70° Dachneigung 0,25 kN/m² Schneelast bezogen auf die Projektionsfläche anzusetzen.

Windlasten

Der Winddruck ergibt sich aus dem Produkt von Staudruck (q) und Druckbeiwert (c_p). Er darf vereinfacht als konstant über die Bauwerkshöhe angenommen werden. Für zylinder- und kugelsegmentförmige Bauten sind Beiwerte für die Ermittlung der Membranschnittgrößen infolge Wind in der DIN 4134 angegeben. Für abweichende Formen, exponierte Bauwerkslagen, usw. sind Windkanalversuche zur Ermittlung der Windlast erforderlich. Angaben zur Hauptwindrichtung, zu Spitzengeschwindigkeiten etc. sollten ebenfalls in die Planung einbezogen werden. Sie können i.d.R. bei einer standortnahen Wetterwarte erfragt werden.

Temperatur

Temperatureinflüsse müssen nach DIN 4134 nicht gesondert berücksichtigt werden. Jedoch gilt es zu beachten, daß thermoplastische Werkstoffe (z. B. PVC und PTFE) bei Temperaturen von über 70 °C weich werden und auch Klebeverbindungen ihre Tragfähigkeit verlieren.

3.5.3 Einfluß der Form

Für das Tragverhalten pneumatischer Konstruktionen ist die Form von ausschlaggebender Bedeutung. Sie ist gleichzeitig und direkt abhängig von der Geometrie des Randes bzw. der Ränder, der vorgegebenen Vorspannung infolge der Luftdruck und den äußeren Einwirkungen. Die Form bestimmt darüber hinaus die Spannungszustände in der Membran und die Größe und Richtung der Auflagerreaktionen.

Wegen der ausgesprochen harmonischen Spannungsverteilung über die gesamte Fläche der Membran stellen alle Rotationskörper (Kugel, Zylinder, Ellipsoid, Kegel) und deren Kombinationen günstige Formen für (luftgestützte) pneumatische Konstruktionen dar. Bei zusammengesetzten oder verschnittenen Formen muß den Übergängen (Fugen) zwischen diesen besondere Beachtung geschenkt werden. Wegen der direkten Abhängigkeit der Membranspannungen vom Innendruck und von der Krümmung der Fläche sollten hier „organische“ (weiche, fließende) Übergänge angestrebt und abrupte, „harte“ Änderungen vermieden werden.

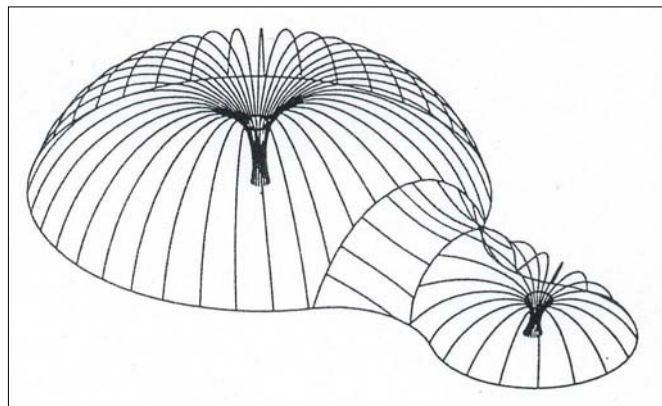


Abbildung 21: Ausstellungshalle (Entwurf) [8]

Die Hüllen pneumatischer Konstruktionen sind biaxial gekrümmte Flächen. Sie haben zwei Hauptkrümmungsradien. Die Form gekrümmter Flächentragwerke kann mit Hilfe der Gauß'schen Krümmung beschrieben werden. Hiernach weisen pneumatische Tragwerke im allgemeinen eine positive Gauß'sche Krümmung ($k > 0$) auf. Sie sind synklastisch gekrümmt.

Eine Gegenkrümmung der Membran ist im Gegensatz zu mechanisch vorgespannten, nicht luftgestützten Tragwerken nicht erforderlich.

3.5.4 Einfluß der Krümmung

Die Krümmung gibt im mathematischen Sinne den reziproken Wert des Krümmungsradius an. Sie kann als ein geometrisches Kriterium zur Beurteilung der Eignung zweiachsig gekrümmter Flächen zur Lastabtragung und zur Verformung der Struktur verwendet werden. Maßgeblich bestimmt die Krümmung den Kräftefluß in der Membran mit.

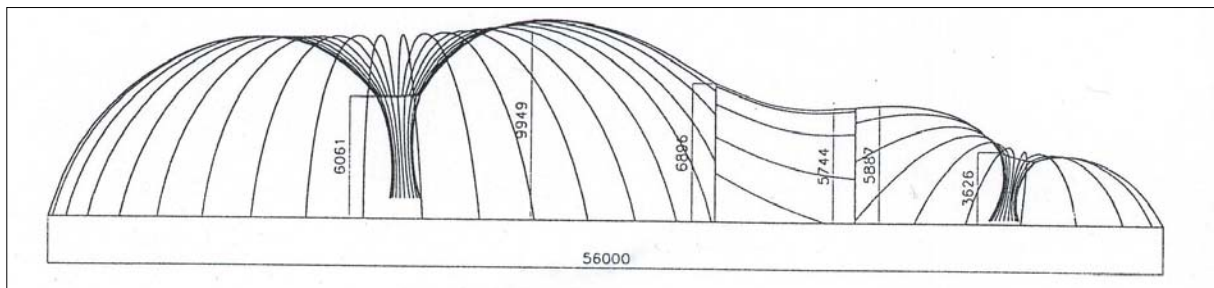


Abbildung 22: Schnitt Ausstellungshalle (Entwurf) [8]

Von der Krümmung der Fläche hängt in starkem Maße die Größe der erforderlichen Vorspannkraft und damit die Größe des zur Stabilisierung der Membran erforderlichen Innendrucks ab. Um einen definierten Vorspannungszustand in der Membran zu gewährleisten, müssen bei geringer Krümmung größere Innendrucke erzeugt werden als bei größerer Krümmung.

Bei luftgestützten Konstruktionen mit großen Spannweiten können zusätzliche Abspannungen zur Minimierung der Krümmungsradien und damit der Membranspannungen erforderlich werden.

3.5.5 Einfluß des Innendrucks

Pneumatische Systeme nutzen die bei Gasen besonders ausgeprägte Eigenheit der Komprimierbarkeit. Wie unter 3.2.3 bereits beschrieben resultieren aus der Druckdifferenz zwischen Innenraum und Umgebung Spannungen in der Membran. Mit Hilfe des Luftdrucks wird also eine Vorspannung in der Membran erzeugt, um der fehlenden Druckfestigkeit und Biegesteifigkeit des Werkstoffs zu begegnen.

4 Entwurf und Formfindung

4.1 Der Entwurf

Der Entwurf pneumatischer Bauwerke muß den gleichen Anforderungen bezüglich Standsicherheit, Brandschutz, Bauphysik, etc. genügen wie ein „steifes“ Bauwerk des üblichen Hochbaus. Darüber hinaus gibt es einige membranbauspezifische Zusammenhänge, welche die „Freiheit des Entwurfs“ in sehr starkem Maße beeinflussen, diese wurden von REIN und WILHELM kurz und prägnant erläutert.

“Die Form von Membranstrukturen kann nicht im herkömmlichen Sinne entworfen werden, ihre Ausbildung entzieht sich der direkten, intuitiven Einflußnahme. Aufgrund der Biegeweichheit des Materials ist die Form vielmehr das Resultat eines Formfindungsprozesses und ergibt sich aus dem Eigenspannungszustand der Membranfläche innerhalb der vom Planer vorgegebenen Randbedingungen. Hierzu gehören neben der Kontur des Randes und der Anordnung möglicher Hochpunkte die Verteilung der Vorspannung in der Membranfläche, die Gewebeausrichtung sowie die Querdehnenschaften des Werkstoffes. Durch sekundäre Elemente wie Unterspannseile oder Gurte kann die Form weiter beeinflußt werden. Aufgrund der ausschließlichen Zugbeanspruchbarkeit des Werkstoffes muß beim Entwurf der Membranfläche darauf geachtet werden, daß die aufgebrachte Vorspannung unter der Einwirkung äußerer Lasten erhöht oder abgebaut werden kann, sich jedoch niemals in eine Druckspannung umkehren darf. Eine Druckspannung würde zu Faltenbildung führen. Da die Vorspannung eine ständig wirkende Vorbelastung des Membranmaterials darstellt, muß sie in angemessenen Grenzen gehalten werden.” [9]

4.2 Der Prozeß der Formfindung

Die Form ist das äußerlich prägende Element pneumatischer Bauten. Sie ist für das Tragverhalten dieser Konstruktionen von ausschlaggebender Bedeutung (vgl. 3.5.3). Daher besitzt die Formfindung oberste Priorität im Entwurfsprozeß.

Der Prozeß der Formfindung ist auf das engste mit dem Entwurf verknüpft und beschreibt die Definition der Oberflächengeometrie des pneumatischen Systems. Das Ziel ist dabei die Erzielung eines homogenen Zugspannungszustandes in jedem Punkt der Membran.

REIN und WILHELM erläutern hierzu. “Es ist eine besondere Eigenschaft aller Membranflächen, dass deren Form und Kraftzustand in wechselseitiger Abhängigkeit stehen. Damit ist eine getrennte Betrachtung der Geometrie ohne Einbeziehung der statischen Zusammenhänge nicht möglich. Die Festlegung einer Membranfläche als in der Regel räumlich gekrümmte, [...] ausschließlich auf Zug beanspruchte Fläche stellt den Entwerfer insofern vor besondere Schwierigkeiten. Beim Entwurf von Strukturen mit besonderen statischen Eigenschaften bedient man sich deshalb schon seit langem der Formfindung durch Modelle, wobei sich grundsätzlich die experimentellen und die analytischen Methoden der Formfindung unterscheiden lassen. Während die Form von Membranen und Seilnetzen ursprünglich ausschließlich durch experimentelle Methoden im Modellversuch entwickelt wurde, werden heute aufgrund der zunehmenden Komplexität der Bauaufgaben und der

rasanten Entwicklung der Computertechnologie in erster Linie rechnergestützte, mathematisch-numerische Methoden angewendet." [9]

Die Beschreibung der formgefundenen Fläche legt die Datenstruktur für die weitere Bearbeitung bzw. Berechnung und Fertigung bzw. Konfektionierung fest. Für die Praxis bedeutet dies, daß bereits im frühen Entwurfsstadium eine enge Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur unabdingbare Voraussetzung für das Gelingen eines „pneumatischen Projekts“ ist (vgl.[10]).

4.2.1 Experimentelle Formfindung

Für die experimentelle Formfindung eignen sich besonders Gummi- und Seifenhautmodelle.

Ausführliche Anleitungen dazu sind in mehreren Fachbüchern von FREI OTTO beschrieben worden. Sie bieten eine gute Anschaulichkeit und sind fühlbar bzw. tastbar. Wenn die Ergebnisse einer modellbasierten Formfindung als Grundlage für die weitere Bearbeitung und Realisierung eines Projekts dienen sollen, ist eine hohe Genauigkeit beim Versuch erforderlich, was als Nachteil dieser Methoden zu werten ist.

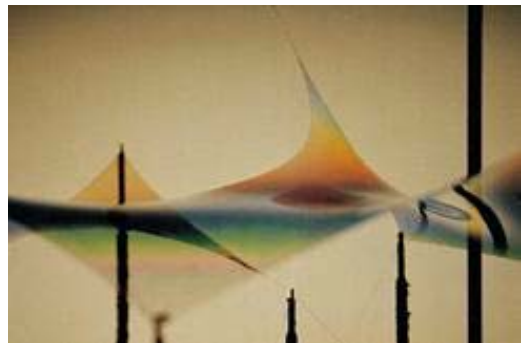


Abbildung 23: Seifenhautmodell

4.2.2 Analytische Formfindung

Die Anwendung numerischer Verfahren, (z. B. Kraftdichtemethode [11]) ist die Basis der analytischen Formgebung. Die Vorgehensweise bei rechnergestützten Methoden ist nachfolgend kurz dargestellt.

1. Festlegung der Geometrie des Randes
2. Generierung eines Netzes
3. Vorgabe der zulässigen Membranspannungen
4. iterative Formfindung durch „rechnerisches Aufblasen der Membran“
5. Übernahme der (grafischen) Ergebnisse in CAD-Programme

Der Vorteil dieser Methode liegt im jederzeit steuerbaren Zusammenhang von Form und Membranspannung(en). Eine günstige Spannungsverteilung kann somit erzwungen werden. Dies wird als spannungskontrollierte Formfindung bezeichnet. Nachteilig wirkt sich die mangelnde Anschaulichkeit aus. Die Modelle sind nur bedingt dreidimensional erlebbar und nicht tastbar.

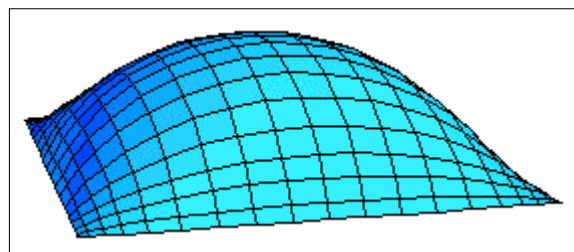


Abbildung 24: FE-Modell Tennishalle (überhöht)

4.3 Minimalflächen

Die kleinste Fläche welche in einen beliebig geformten Rahmen gespannt werden kann wird als Minimalfläche bezeichnet. Räumliche Minimalflächen umschließen ein bestimmtes Volumen mit der kleinstmöglichen Oberfläche. Das Ideal ist die Kugel, das Modell dazu die freischwebende Seifenblase.

Die Form einer Minimalfläche ist mathematisch definierbar. In ihr sind die Membranspannungen an jedem Punkt und in jeder Richtung gleich groß! Es liegt eine vollkommen homogene Spannungsverteilung vor.

Praktisch sind solche Hüllen nur in wenigen Ausnahmefällen baubar. Sie können und sollten aber als wichtiger Ausgangspunkt im Formfindungsprozesses dienen. Konstruktive Abweichungen von der Minimalfläche verschlechtern die "Effizienz" des Systems und sollten deshalb so gering wie möglich ausfallen. Es ist weiterhin zu beachten, daß technische Minimalflächen möglichst für den End- bzw. Dauerzustand der Membran definiert werden.

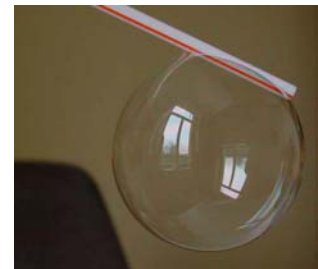


Abbildung 25: Seifenblase am Halm



Abbildung 26: Seifenblase auf dem Tisch

4.4 Spannungsharmonische Flächen

Da bauliche Minimalflächenlösungen nur in wenigen Fällen nutzertechnologisch sinnvoll sind, müssen andere Formen gefunden werden die diesen Mangel nicht aufweisen. Ziel der Planung bzw. des konstruktiven Entwurfs sollte es dabei sein spannungsharmonische Flächen zu schaffen.

In solchen Flächen sind die Hauptspannungen in der Membran also nicht an jeder Stelle in jeder Richtung gleich groß. Durch eine gezielte Formfindung gilt es das Verhältnis eben dieser Hauptspannungen so zu steuern, daß einaxiale Spannungen wegen der zu erwartenden Faltenbildung ebenso wie abrupte Spannungssprünge bei nicht organisch geformten Übergängen an den Schnittlinien von Teilflächen vermieden werden.

FREI OTTO benennt in [2] ein Verhältnis der Hauptspannungen von maximal 1 : 3 als Voraussetzung für spannungsharmonische Flächen über beliebigen Grundrissen.

5 Fertigung

5.1 Allgemeines

Die Planung eines pneumatischen Tragwerks ist mit der Ermittlung einer optimierten formgefundenen Oberfläche nicht beendet. Die Fertigung der Membran ist eine weitere Herausforderung an Planer und Hersteller. An dieser Stelle soll ein kurzer Einblick in die Problematik gegeben werden.

5.2 Ermittlung des Zuschnitts

Um pneumatische Strukturen in „brauchbaren Dimensionen“ fertigen zu können muß das in Bahnen- bzw. Rollenform vorliegende Membranmaterial zugeschnitten und zusammengefügt werden. Dabei treten vor allem zwei Probleme in den Vordergrund.

1. Im Einbauzustand hat die Membran eine räumlich doppelt gekrümmte Form, der Werkstoff liegt jedoch in ebener Form vor.
2. Durch die pneumatische Stützung bzw. Füllung wird die Membran vorgespannt und dehnt sich, das Ausgangsmaterial ist zum Fertigungszeitpunkt jedoch schlaff und ungedehnt.

Die Lösung der Probleme basiert auf einer diagonalen Verzerrung der nahezu quadratischen Maschen des Trägergewebes. Die Verzerrungswilligkeit ist abhängig von der Steifigkeit der Membran und speziell der Art der Beschichtung. Sie limitiert gleichzeitig die Größe der Zuschnittstücke, welche natürlich zusätzlich durch die Technologie der Herstellung begrenzt ist.

Praktisch bedeutet dies zum einen die Teilung der Fläche entsprechend der Beanspruchung (Größe und Richtung der Hauptspannungen), der Krümmung der Membran und der zur Verfügung stehenden Breite des gewählten Materials sowie zum anderen die Übertragung räumlich gekrümmter Streifen auf ein ebenes Ausgangsmaterial. Bei der Teilung der Fläche und der damit verbundenen Festlegung der Membranstöße gilt es weiterhin die Konsequenzen für den optischen Eindruck der Konstruktion sowohl von innen als auch von außen zu berücksichtigen, den Verschnitt zu minimieren und bei Verwendung beschichteter Gewebe die Kett- und Schußrichtung zu beachten.

5.3 Kompensation

Als Kompensation bezeichnet man die Berücksichtigung der dehnungslosen Verarbeitung und Fügung der einzelnen Zuschnitte. Dabei müssen auch die in der späteren Nutzung zu erwartenden material- und strukturbedingten Relaxationsvorgänge beachtet werden.

Die Komplexität der Zusammenhänge prädestiniert die ausführende Firma für die Zuschnittsermittlung auf der Basis der vom Planer vorgegebenen Geometrie- und Vorspannparameter.

5.4 Sonstiges

Verschiedene Fügeverfahren ermöglichen die Verbindung der einzelnen Zuschnitte. Sie sind nachfolgend aufgelistet. Erläuternde Ausführungen zu diesem Thema wie auch zu anderen vorrangig fertigungs- bzw. montagetechnischen Problemen sind in der einschlägigen Literatur (z. B. [2]) beschrieben.

- Nahtverbindungen
- Klebetechniken
- Schweißtechniken
- Schraubenverbindungen
- Klammerverbindungen

Weitere ausführungsrelevante Problemfelder:

- Randanschlüsse
- Fundamentierung bzw. Verankerung
- Gebläsetechnik,
- Luftdruckmessung
- Montage bzw. Errichtung



Abbildung 27: Doppelte Naht



Abbildung 28: Montagestoß



Abbildung 29: Verankerung

6 Projekte

6.1 AIRQUARIUM®

Bauherr: FESTO AG & Co., Esslingen

Entwurf: Prof. Dipl.-Ing. Axel Thallemer

Tragwerksplaner: FESTO AG & Co.

Konfektionierung: Koch Membranen, Rimsting

Kenngößen: Durchmesser: 32 m
Höhe: 8 m
Innendruck: 200 ... 350 Pa

Idee / Konzept

Es wurde eine mobile Ausstellungshalle als Weiterentwicklung der klassischen Traglufthalle bzw. als Variation des Themas „Heißluftballon“ entworfen und gebaut.

Tragwerk: pneumatisch gestützt
windlastabhängige Druckregelung

Material: synthese kautschukbeschichtetes Gewebe, Vitroflex ®

Fundament: Schlauch(pneu) mit 120 t Wasser gefüllt

Besonderheiten

- komplett mobiles Bauwerk
- verstaubar in zwei 20-ft-Containern
- Container 1: Technik, (Luftaufbereitung, Gebläse, Heizung, Wassertauscher für Kühlung, Notstromaggregat für netzunabhängigen Betrieb über 48 Stunden, Wetterstation, Thermostatsteuerung, Luftdruckregelung)
- Container 2: Kuppelhülle, Fundamentring, Eingangstunnel, Luftschleuse

Quellen

<http://www.zpt.de/Brosch%Fcre.PDF>

<http://www.red-dot.de/>

Detail 6/2000, S. 1088



6.2 AIRTECTURE®

Bauherr: Festo AG & Co., Esslingen

Entwurf: Prof. Dipl.-Ing. Axel Thallemer,
Festo Corporate Design, Esslingen

Tragwerksplaner: Festo AG & Co., Esslingen

Kenngrößen: Grundfläche: 800m²

Nutzfläche: 375m²

Gesamtvolumen: 5.760m³

Gesamtgewicht: 6 t



Idee / Konzept

Entwicklung einer pneumatischen Ausstellungshalle, bei der alle tragenden Elemente aus luftgefüllten schlauchförmigen Membranen bestehen. So entsteht ein fast organisches Gebäude, das arbeitet und atmet.

Tragwerk

- 40 Y-förmige Stützen und 36 planparallele Wandelemente an den Längsseiten
- Zugänge zwischen zwei Wandelementen an den Stirnseiten
- Aufnahme vertikaler Lasten durch im Grundriß V-förmig angeordnete Stützen, welche mit je zwei Wandelementen ein räumliches Tragwerk bilden
- Aufnahme horizontaler (Wind)-Lasten durch ein Raumfachwerk aus Stützen, Wänden und "pneumatischen Muskeln"
- horizontale Dachbinder ("Airbeams") als Biegeträger über 12 m (!)
- Erzeugung einer steifen Dachscheibe durch Wechsel von Unterdruck- (Zwischenkammern) und Überdruckelementen ("Airbeams")

Besonderheiten

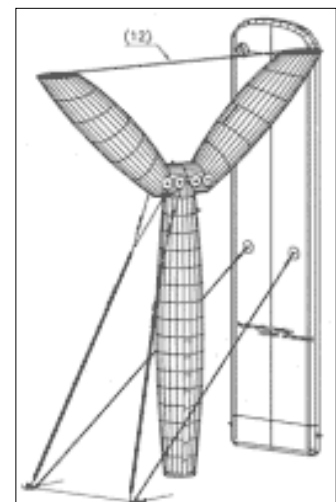
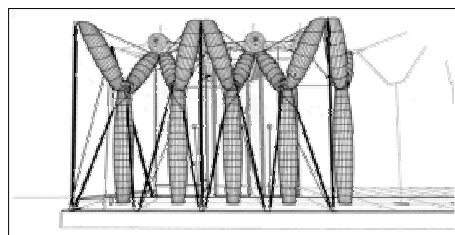
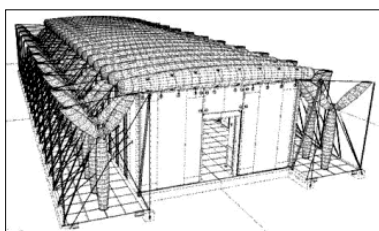
- Atmosphärischer Luftdruck im Innenraum, keine Luftschleusen nicht notwendig
- Pneumatische Muskeln (Kontraktionsschläuche)

Quellen

<http://www.festo.com/>

<http://www.idsa.org/>

<http://www.3sat.de/>



6.3 Stierkampfarena Centro Integrado de Vista Alegre, Madrid

Bauherr:

Palumi, S.A., Madrid

Entwurf und Tragwerksplanung:

Schlaich, Bergemann und Partner, Stuttgart

Dachfläche: 2000 m² (beweglicher Teil)

**Idee / Konzept**

"Auf dem Dach" eines Einkaufszentrums mit Parkhaus befindet sich eine kreisrunde Stierkampfarena. Über diese spannt von einem Membrandach mit 100 m Durchmesser. Der mittlere Teil (50 m Durchmesser) ist beweglich. Dadurch kann die Geruchsbelästigung der Besucher erheblich reduziert und ein gewisses Open-Air-Gefühl erzeugt werden.

Tragwerk

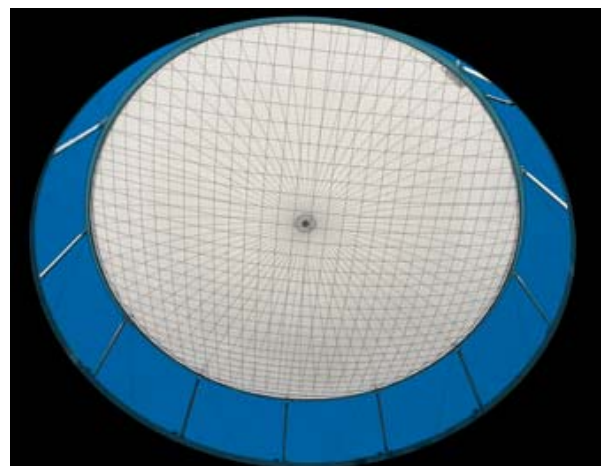
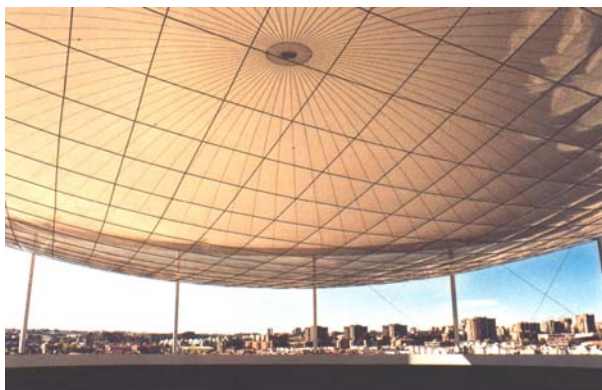
- Pneumatisches Überdruckkissen zwischen rundem Stahl-Druck-Ring
- untere Membran seilnetzstabilisiert und vollkommen transparent
- radiale Zugkräfte aus Überdruck-Vorspannung der Membran stabilisieren den umlaufenden Stahlring
- Lagerung auf 12 Stützen, welche auf dem festen Teil des Daches stehen
- Aussteifungen durch Auskreuzungen zwischen allen Stützen

Besonderheit

- Innendach um 10 m anhebbar

Quellen

<http://www.sbp.de>
Informationsmaterial Fa. Pfeifer



6.4 Stierkampfarena Nîmes

Bauherr: Stadt Nîmes

Entwurf: Finn Geipel, Stuttgart
Nicolas Michelin, Paris

Tragwerksplaner:

Schlaich, Bergemann und Partner

Grundfläche: 5000 m² (ca. 60 x 90 m)

Kissendruck: 0,4 ... 0,55 kN/m²

Idee / Konzept

Die denkmalgeschützte, antike Arena sollte während der Wintermonate in Ermangelung einer Stadthalle für Konzerte und andere kulturelle sowie sportliche Veranstaltungen nutzbar sein. Das Dach sollte von außen nicht sichtbar sein. Es wurde ein vollkommen zerlegbares pneumatisches Kissentragwerk mit extrem niedrigem Gewicht entworfen und ausgeführt.



Tragwerk

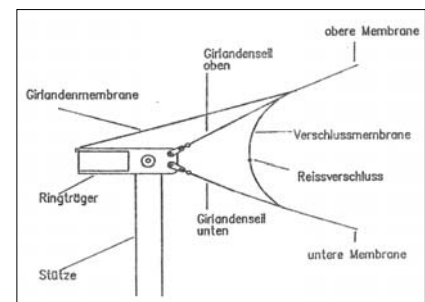
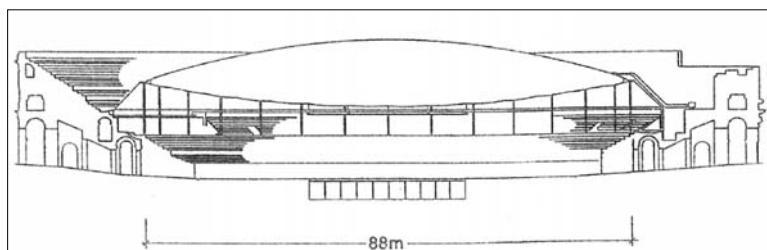
- Pneumatisches Überdruckkissen zwischen elliptischem Stahl-Druck-Ring
- radiale Zugkräfte aus Überdruck-Vorspannung der Membran stabilisieren den äußerst flexiblen Stahlring
- obere Membran: Stich 8,20 m
- untere Membran: Stich 4,20 m, seilnetzstabilisiert
- Lagerung auf 30 Stützen mit gelenkigen Fußpunkten
- Aussteifungen in den Scheitelpunkten der Ellipse

Besonderheit

- Dach komplett demontierbar

Quellen

Informationsmaterial Fa. Pfeifer
Bauingenieur 67 (1992), S. 213-220



6.5 Humphery Metrodome, Minneapolis

Bauherr:

Minneapolis City, USA

Architekten:

Skidmore, Owings & Merrill;
Setter, Leach & Lindstrom

Tragwerksplaner:

Geiger-Berger Associates

Kenngrößen:

Umfang: 565 m
Dachfläche: 24.342 m²
Spannweiten: 180 x 150 m
Dacheigenlast: 7 N/m²
Stich der Membrankuppel: 16 m
Bauzeit: 1979 - 1981



Tragwerk

- pneumatisch gestützt und diagonal über den Grundriß gegen einen Stahlbeton-druckring seilverspannt

Membran

- Aufbau: 2 lagig (Verbesserung des Wärmeschutzes)
- außen: teflonbeschichtetes Glasfasergewebe
- innen: schallabsorbierendes Material

Druckring

- Aufnahme horizontaler Auflagerkräfte aus Vorspannung
- tangential ausgerichtet in Bezug auf die angeschlossene Membran

Besonderheiten

- federnde Lagerung des Stahlbetonrings auf stählernen Rundstützen ermöglicht horizontale Verschieblichkeit (max. 8 cm) unter großer Windlast
- Stützen wirken wie Rückholfedern (selbstjustierendes System, druck- und zugbeanspruchbar)

Quelle

<http://www.columbia.edu/>



7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

- [1] Otto, Frei: IL 35 Pneu und Knochen, Karl Krämer, Stuttgart, 1995
- [2] Otto, Frei: IL 15 Lufthallenhandbuch, Karl Krämer, Stuttgart, 1983
- [3] DUDEN, Fremdwörterbuch, 5. neu bearb. u. erw. Aufl., Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1990
- [4] Wiedemann, J.: Leichtbau 2: Konstruktion, 2. Aufl., Springer, 1996
- [5] Wagner, R.; Raible, T.: Wann trägt Luft wirklich?, in Bauen mit Textilien, 3/2000
- [6] <http://www.contitech.de>
- [7] Baumüller, D.: Rotationspneu, in DETAIL 6/2000
- [8] Ayrlle, H.: Transparente Traglufthallen, in das bauzentrum 2/97
- [9] Rein, A.; Wilhelm, V.: Das Konstruieren mit Membranen, in DETAIL 6/2000
- [10] Koch, K. M.: Bauen mit konstruktiven Membranen – Budgetierung, technische Bearbeitung und Ausführung, in Bauingenieur 70 (1995), S. 523-528
- [11] Linkwitz, K., Schek, H.-J.: Einige Bemerkungen zu Berechnung von vorgespannten Seiltragwerken, Ingenieurarchiv 40 (1971), S. 145-158

7.2 Abbildungsverzeichnis

- 1 <http://www.indutex.de>
- 2 A. Stahr, Weimar
- 3 <http://www.indutex.de>
- 8 Infomaterial Fa. FERRARI
- 10 <http://www.contitech.de>
- 12 A. Stahr, Weimar
- 16 <http://www.foiltec.de>
- 23 <http://www.uni-stuttgart.de>
- 24 <http://www.sofistik.de>
- 25 P. Voigt, Weimar
- 26 P. Voigt, Weimar
- 27 A. Stahr, Weimar
- 28 A. Stahr, Weimar
- 29 A. Stahr, Weimar