



Werner Thiemann, BSc.

Solid Shapeshifter
Entwicklung eines wandelbaren Hüllsystems
aus Vakuumelementen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuerin

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Milena Stavric

Institut für Architektur und Medien

Ass.Prof. Mag.rer.nat. Dr.techn. Albert Wilsche

Zugunsten der besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit darauf verzichtet, Berufs- oder Funktionsbezeichnungen in der männlichen und weiblichen Form explizit anzugeben. Die verwendeten Ausdrücke beziehen sich grundsätzlich auf beide Geschlechter.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

09.05.2016



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen meinen Dank aussprechen, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben. Dabei gilt mein besonderer Dank meiner Familie, die mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch stets unterstützte, meiner Freundin Chiara die mir immer zur Seite stand, auch an Tagen, an denen meine Motivation gelinde gesagt im Keller war, und meinen Betreuern Milena und Albert, welche mit konstruktiver Kritik und inspirierenden Ideen diese Arbeit aktiv begleiteten und immer ein offenes Ohr für meine Fragen und Wünsche hatten.

Danke euch allen!

Kurzfassung

Der SolidShapeshifter ist ein System zur Schaffung von temporären Schalenstrukturen mit der Möglichkeit der Anpassung an verschiedene Formen. Er besteht aus einer Hüllmembran, welche mit einem leichten, druckfesten Granulat gefüllt wird. Durch anschließendes Evakuieren der Hülle verfestigt sich die Struktur und kann für verschiedene Zwecke genutzt werden. Vor allem für temporäre Nutzungen ist das System anwendbar und bietet dabei die Vorteile von gedämmten Bauelementen, da durch die granulare Füllung und das Vakuum gute Wärmedämmeigenschaften erzielt werden. Somit ordnet sich der SolidShapeshifter zwischen Membranbauten und Massivbauten ein. Zwar ist die Struktur schwerer als entsprechende Membranbauten, jedoch sind viele negative Eigenschaften, wie zum Beispiel die schlechten Dämmeigenschaften und die Notwendigkeit von Bodenverankerungen und komplizierten Vorspannsystemen nicht vorhanden. Zudem muss die Struktur nicht durch höheren Innendruck gestützt werden, wodurch keine Druckschleusen benötigt werden, wie es bei Traglufthallen der Fall ist.

Abstract

The SolidShapeshifter is a system to create temporary shell structures which are capable to adapt to different forms. It consists of a membrane filled with lightweight pressure resistant granulate material. Once evacuated the structure solidifies and can be used for various applications. Especially temporary uses benefit from the systems advantages like the thermally insulated enclosure achieved by the granular filling and the vacuum. The SolidShapeshifter classifies between membrane structures and solid constructions. Although the structure is heavier than comparable membrane buildings it offsets some of their negative effects like the barely existing thermal insulation, the need for anchoring and complicated prestress systems. Also there is no need for higher internal pressures and airlocks as is the case with air domes.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	7
1 Geschichte der Pneumatischen Architektur.....	9
1.1 Lanchesters Gedankenblase.....	9
1.2 Auf der Suche nach Leichtigkeit.....	10
1.3 Größer, Weiter, Leichter.....	11
1.4 Vom Leben in der Blase.....	12
1.5 Die Blase platzt.....	14
2 Grundlagen.....	17
2.1 Begriffe und Klassifikationen.....	17
2.2 Tragverhalten.....	27
2.3 Formfindung.....	31
2.4 Zuschnitt.....	35
2.5 Materialien.....	37
2.6 Details.....	48
2.7 Physikalische Eigenschaften.....	59
3 Beispiele.....	64
3.1 PlusMinus von Festo.....	64
3.2 Khan Shatyr von Foster + Partners.....	67
3.3 Airtecture Ausstellungshalle von Festo.....	70
3.4 Pneumocell von Thomas Herzog.....	73

3.5	Mobile Konzerthalle „Ark Nova“ von Kapoor und Isozaki	76
3.6	Vakuumbrücke der Technischen Universität Delft und FH Frankfurt..	79
4	Experiment	82
4.1	Formfindung	82
4.2	Materialfindung.....	87
4.3	Modell.....	88
4.4	Überarbeitung des Materials	90
4.5	Biegeversuch.....	91
4.6	E-Modulermittlung	92
4.7	FEM-Berechnung	93
4.8	Zwischenfazit.....	94
5	Entwicklung der Struktur.....	95
5.1	Die Umkehr	95
5.2	Das Exoskelett	96
5.3	Füllmaterialien	97
5.4	Biegeversuch Unterdruck	98
5.5	E-Modulermittlung Unterdruck.....	101
5.6	FEM-Berechnung mit Vakuumträgern	103
6	Finaler Entwurf	106
6.1	Entwurfsschritte.....	107
6.2	Darstellungen	115

6.3	Modell Mock-Up	118
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	120
7.1	Fazit	120
7.2	Ausblick.....	121
8	Anhang.....	122
8.1	Literaturverzeichnis	122
8.2	Abbildungsverzeichnis.....	124

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
3DS-Max	3D-Modellierungssoftware der Fa. Autodesk, INC., San Rafael, USA, www.autodesk.de
ANSYS	FEM-Software der Fa. ANSYS, INC., Canonsburg, USA, www.ansys.com
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN EN ISO	Deutsche / Europäische / Internationale Norm
EPS	Extrudiertes Polystyrol
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen
FEM	Finite-Elemente-Methode
Grasshopper	Plug-In für Rhino für parametrisches Modellieren
HF	Hochfrequenz
IAM	Institut für Architektur und Medien der technischen Universität Graz
PE	Polyethylen
PE-HD (HDPE)	Polyethylen High density
PE-LD (LDPE)	Polyethylen Low density
Perlite	alterisches, vulkanisches Glas (hier aufgeblähte Form)
PP	Polypropylen

PVC	Polyvinylchlorid
Rhino	Rhinoceros 3D, 3D-Modellierungssoftware der Fa. Robert McNeel & Associates
UV	Ultraviolettes Licht

Einleitung

Die Idee, pneumatische Körper, also Formen mit einem erhöhten Innendruck, für bautechnische Aufgaben einzusetzen, ist bereits knapp einhundert Jahre alt. Trotzdem unterzieht sich diese Thematik nach wie vor einer stetigen Entwicklung.

Wie die meisten Innovationen in den Bereichen der Architektur und des Ingenieurwesens entstand auch die pneumatische Architektur aus einer Symbiose von Phantasie und dem Nutzen neuer Technologien. In diesem Fall ermöglichte erst die Entwicklung von Membranen aus Kunststoffen und technischen Textilien die Umsetzung von luftgestützten Konstruktionen wie wir sie heute kennen.

Die Faszination von Objekten, welche nur durch Luft gestützt werden, begann nicht erst mit der Anwendung in Bauaufgaben. Die Wurzeln der Pneumatik reichen weit zurück bis zu den Hochkulturen der Antike, wo bereits im 3. Jahrhundert v. Chr. der Grieche Ktesibios in Alexandria erste Versuche mit Pneumatik unternahm. So entstanden durch seinen Erfindergeist verschiedenste, mit Druckluft betriebene Geräte wie zum Beispiel die Wasserorgel, eine Wasserpumpe und auch eine mit Druckluft betriebene Ballista.¹

Vitruv, einer der wichtigsten Architekten der Antike und der wohl am häufigsten erwähnte Architekturtheoretiker, beschreibt in den letzten drei Büchern seines Werkes „Zehn Bücher über Architektur“ hauptsächlich Maschinen und Ingenieurslösungen, welche unter anderem pneumatische Elemente verwenden. Darunter fallen Wasserhebeanlagen, Pumpen aber auch Ansätze zu Orgelsystemen und anderen pneumatischen Automaten.²

Erste Anwendungen von aufgeblasenen Membranen gab es bei den Römern. Sie nutzten luftgefüllte Tierhäute als mobile Betten, ähnlich der heutigen Luftmatratzen,

¹ Vgl. Schmidt 2011, 490-494.

² Vgl. Ebda., 496-505.

aber auch zu militärischen Zwecken in Form von Taucherglocken für Soldaten, wie sie Philon von Byzanz, ein Schüler des Ktesibios entwickelt hat.³

Einen wortwörtlichen Aufschwung erlebte die Entwicklung von Membranen im Jahr 1783, als die Gebrüder Montgolfier einen mit Papier ausgekleideten Leinensack mit heißer Luft füllten und aufstiegen ließen. Der vorerst unbemannte Flug wurde nach einer zweiten Vorführung in Versailles vor den Augen des Königs und 100.000 erstaunten Passanten für Menschen zugelassen.⁴ Noch im selben Jahr führten Jaques Charles und Marie-Noël Robert den ersten bemannten Ballonflug in einem Wasserstoffballon durch.⁵ In den darauffolgenden Jahren wurde die Ballontechnik stetig verbessert und brachte neue Formen hervor. Aus dem einst kugelförmigen Gebilde wurden längliche Luftschiffe mit enormen Ausmaßen. Aufgrund der verbesserten Manövrierfähigkeit setzte man sie häufig zu Aufklärungszwecken am Schlachtfeld ein, später sogar als fliegende Artillerie um ganze Landstriche zu verwüsten.

Der Zeppelin LZ 129, besser bekannt als Hindenburg, läutete mit seinem berühmten Absturz im Mai 1937 schließlich das vorläufige Ende der wasserstoffgestützten Luftfahrt ein. Trotz dieser Tragödie war die Faszination für die Leichtigkeit luftgefüllter Konstruktionen ungebrochen und es begann vermehrt das Experimentieren in der Architektur. Immerhin bestand hierbei auch keine Explosionsgefahr.⁶

Die vorliegende Arbeit versucht einen Überblick über das durchaus große Spektrum der pneumatischen Anwendungen in der Architektur zu geben und aufgrund dieser Recherche ein System zu entwickeln, welches einige Nachteile bisheriger Konstruktionen behebt und Raum für Weiterentwicklungen und Forschung anbietet.

³ Vgl. Beck 1910, 64-77.

⁴ Vgl. LeCuyer 2008, 10 f.

⁵ Vgl. Nimführ 2013, 46.

⁶ Vgl. LeCuyer 2008, 12.

1 Geschichte der Pneumatischen Architektur

1.1 Lanchesters Gedankenblase

Der erste auf Papier festgehaltene Versuch Pneumatik im Bauwesen einzusetzen stammt vom englischen Forscher und Ingenieur Frederick William Lanchester. Lanchester, welcher unter anderem auch die Scheibenbremse erfand, beantragte 1917 ein Patent für die Konstruktion eines Feldlazaretts. Dieses kam ganz ohne Gestänge oder Mast aus und wurde nur durch einen geringen Überdruck im Inneren gehalten. Betreten würde man es mittels Luftschleuse um so den Druckverlust zu minimieren. Um das Konstrukt zu stabilisieren sollte ein Seilnetz dienen, das die Membran im Boden verankern würde. Obwohl eine Realisierung aufgrund fehlender technologischer Fortschritte zum damaligen Zeitpunkt noch nicht möglich war, setzte Frederick W. Lanchester mit diesem Patent den Grundstein für die weitere Entwicklung von pneumatischen Konstruktionen im Bereich der Architektur.⁷

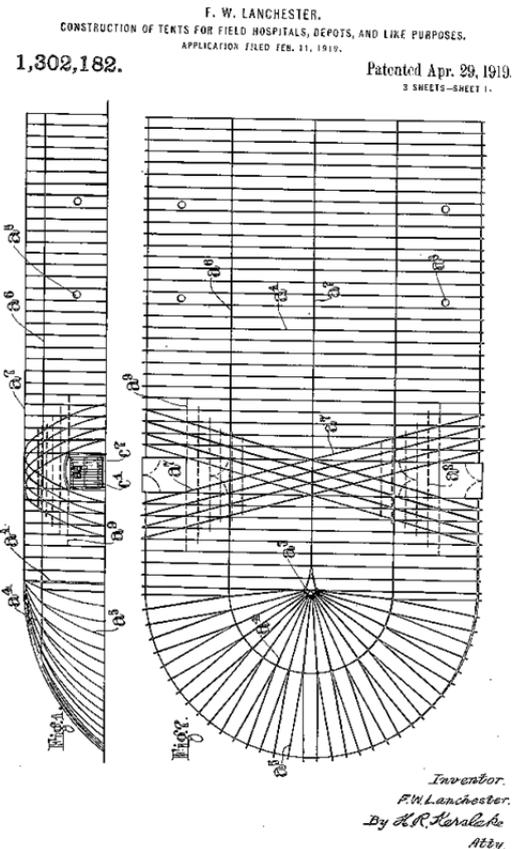


Abbildung 1 Patentschrift für die Konstruktion pneumatischer Zelte

⁷ Vgl. Knippers 2010, 20; LeCuyer 2008, 16; Jeska 2008, 19.

1.2 Auf der Suche nach Leichtigkeit

Richard Buckminster Fuller dürfte jedem Architekten ein Begriff sein. Die von ihm entworfenen Tragwerke sind auch heute noch für viele der Inbegriff von Leichtigkeit und Ökonomie. Fullers Philosophie war die Annahme, dass unsere Erde eigentlich ein großes Raumschiff sei und das harmonische Gleichgewicht zwischen Mensch und Natur von existentieller Bedeutung sei. Im Idealfall sollten Häuser leicht zu transportieren und schnell aufzubauen sein.

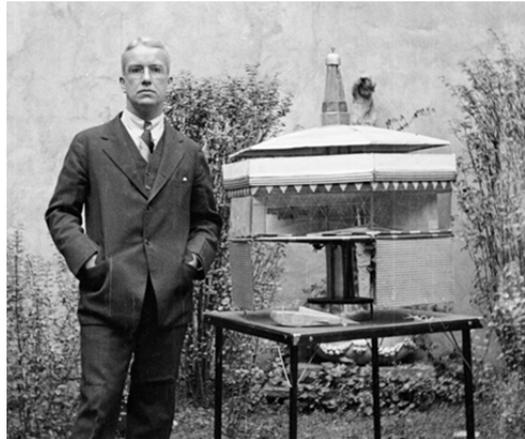


Abbildung 2 Dymaxion House

Man könne somit ganz einfach das gesamte Gebäude per Hubschrauber an die entlegensten Orte verfrachten. Diese Vorstellung manifestierte sich in seinem Entwurf des Dymaxion Hauses. Der erste Entwurf des Hauses von 1927 beinhaltet eine Reihe von pneumatischen Elementen wie luftgefüllte Geschosdecke und Wände, sowie einen mit Pressluft gefüllten, zentralen Aluminiummast von welchem die Geschosse abgehängt werden. Die um 1945 umgesetzten Prototypen in Form des Wichita Hauses basieren zwar auf dem Dymaxion Entwurf, jedoch wurden die pneumatischen Teile verworfen. Fullers Arbeiten entwickelten sich mit der Zeit immer mehr in Richtung von geodätischen Kuppeln. Diese werden nicht mehr von Luft getragen, aber trotzdem als pneumatische Kuppeln konzipiert. Fuller nützt den Begriff der Zellen, um diese großen Raumgebilde zu beschreiben.⁸

⁸ Vgl. LeCuyer 2008, 17; Jeska 2008, 9.

Ein deutscher Architekt welcher ebenfalls an den Anfängen der Membran und Pneumatik Architektur mitwirkte, war Frei Otto. Wie Fuller war auch er ein Visionär im Bereich des architektonischen Leichtbaus. Er versuchte seine Entwürfe aus einem tieferen, biologischen Verständnis heraus zu betrachten.⁹

Eine wichtige Rolle bei Frei Ottos Versuchen spielte die Blase als natürliches Optimum des Volumen/Eigengewicht Verhältnisses. Die einzige, auf diesen Forschungen basierende Umsetzung war das Hochspannungslabor in Köln. Es bestand aus zwei Dreiviertelsphären, welche über ein zusätzliches Spannseil an der Verschnittlinie stabilisiert wurden.

In seinem Buch „Zugbeanspruchte Konstruktionen“ zeigt Frei Otto neue Möglichkeiten des pneumatischen Leichtbaues auf und gibt zudem einen Überblick über bereits entstandene Konstruktionen.

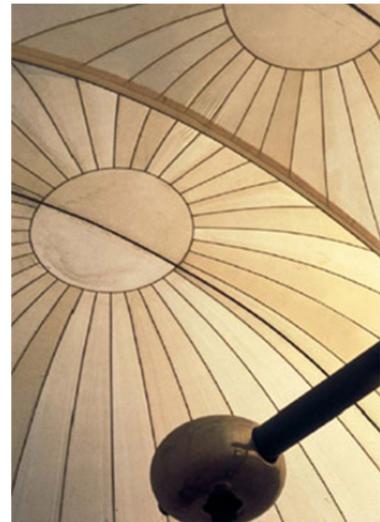


Abbildung 3
Hochspannungslabor Köln

1.3 Größer, Weiter, Leichter

Obwohl Buckminster Fuller und Frei Otto die Pneumatik als Teil ihrer Entwürfe sahen, wurde nur ein kleiner Teil umgesetzt. Ihr Anteil an der theoretischen Entwicklung und Forschung auf diesem Gebiet ist dafür umso größer.

1948 erfolgte der erste Test einer mobilen, aufblasbaren Hülle zum Schutz von Radaranlagen in arktischen Regionen. Für die Konstruktion dieser Hülle war der Ingenieur Walter Bird verantwortlich. Dieser von der US Air Force erteilte Auftrag war für Bird Anstoß weitere pneumatische Hüllen für den zivilen Bereich zu entwickeln. Sein daraufhin gegründetes Unternehmen „Birdair Structures, Inc.“ entwickelte zahlreiche Anwendungen wie Schutzdächer, Lagerhallen und Gewächshäuser.¹⁰ Das LIFE-Magazin ehrte 1957 seine Schwimmbadüberdachung auf der Titelseite und nur drei Jahre später entstand aus der Zusammenarbeit von Architekt Viktor Lundy und Bir-

⁹ Vgl. Knippers 2010, 16 ff.

¹⁰ Vgl. LeCuyer 2008, 21; Knippers 2010, 17 f.

dair der gigantische Pavillon der US Atomic Energy Commission. Diese Hybridkonstruktion aus luftgestützter Halle und luftgefüllter Hülle war 91 Meter lang, 38 Meter breit und 19 Meter hoch und bestand aus mehreren schlauchförmig verschmolzenen Sphären. Damit war der Startschuss für vielfältige Entwicklungen gefallen.¹¹

1.4 Vom Leben in der Blase

In den 60er Jahren wurde die luftgefüllte Hülle immer mehr zu einem Symbol des abgeschlossenen, eigenständigen Ökosystems. Buckminster Fuller begann bereits früh mit der Entwicklung von paradiesähnlichen Utopien, in denen er Teile von Manhattan in eine Klimahülle steckte.

Frei Otto entwarf sogar noch früher ähnliche Szenarien.

„Unsere Großhüllenprojekte für die Arktis oder unsere Schattendächer für die Wüste waren bewusst utopisch, als Nichtbauten geplant. Die ersten stammen von 1951/52. Ich habe sie in extrem unwirtlichen Gegenden angesiedelt, um zu zeigen, dass paradiesische Umfelder auch dort machbar geworden sind.“¹²

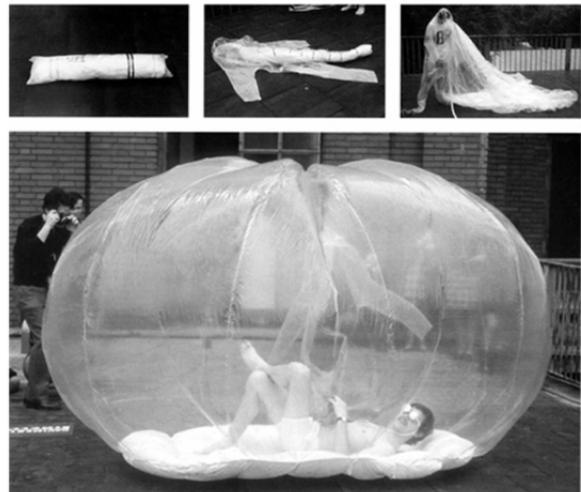


Abbildung 4 Suitaloon

Der Architekturkritiker Reyner Banham griff als einer der ersten die Idee der „environment bubble“ also der Umweltblase wieder auf. Sein Entwurf des „Un-house“ in dem Beitrag „A Home is not a House“ von 1965 propagiert eine Zukunft in der alle Notwendigkeiten eines Hauses auf das Nötigste reduziert und komprimiert Platz in einer aufblasbaren, transparenten Blase finden. Der Einwohner kann seine hochtechnisierte Behausung einfach einpacken, mitnehmen und mit der Natur in Einklang leben.¹³

¹¹ Vgl. LeCuyer 2008, 21; Jeska 2008, 20.

¹² Nerdinger 2005, 114.

¹³ Vgl. Jeska 2008, 20 f.

Eine der bildgewaltigsten Gruppen der damaligen Architekturszene war Archigram. Sie waren inspiriert von Buckminster Fullers Überlegungen zum Leichtbau, aber auch von Popkultur, Comics, Filmstars und ähnlichem. Großen Einfluss hatten zusätzlich die Entwicklungen der NASA, also Raumkapseln, Raketen und alles, was das Überleben des Menschen im Weltall ermöglichte.

Neben den bekannten Großutopien entstanden auch zahlreiche kleine Gebilde wie der „Suitaloon“. Eine Mischung aus Haus und Anzug die je nach Befüllungsgrad unterschiedliche Funktionen erfüllt.¹⁴

Auch in Österreich wurde auf hohem Niveau mit Klimahüllen experimentiert. So entwickelte die Architektengruppe Haus-Rucker-Co diverse pneumatische Hüllen, jede mit eigenen speziellen Eigenschaften. Beispiele sind unter anderem das „Gelbe Herz“, eine pneumatisch pulsierende Raumkapsel für zwei Personen, welche die Intimität fördern sollte, oder auch die noch heute ausgestellte Oase Nr.7.



Abbildung 5 Oase Nr 7

rende Raumkapsel für zwei Personen, welche die Intimität fördern sollte, oder auch die noch heute ausgestellte Oase Nr.7.

¹⁴ Vgl. LeCuyer 2008, 25.

1.5 Die Blase platzt

Die Weltausstellung 1970 in Osaka war der Höhepunkt der Kunststoff und Membranarchitektur zur damaligen Zeit und entführte die erstaunten Besucher in eine futuristische und gleichwohl auch befremdliche Welt, voll von riesigen Traglufthallen, Kunststoffkapseln und Raumgerüsten.



Abbildung 6 Gelände der Weltausstellung 1970

Die wohl beeindruckendsten, pneumatischen Expo-Gebäude waren der Fuji-Pavillon und der Pavillon der USA. Architekt Yutaka Murata und Ingenieur Manoru Kawaguchi entwarfen den Fuji-Pavillon, eine Art schwimmendes Theater, das damals größte pneumatische Gebäude der Welt. Die Struktur bestand aus 16 gleichlangen pneumatischen Bögen, wobei je nach Position der Abstand zwischen den beiden Fußpunkten variierte. Dadurch wurde das Dach an den Enden jeweils höher als in der Mitte des Gebäudes.



Abbildung 7 Fuji Pavillon

Aufgrund der Größe war es sehr wichtig, die Hülle möglichst dicht herzustellen, da der Innendruck höher sein musste als bei kleineren Konstruktionen.¹⁵

Einen weiteren Meilenstein in der Membrankonstruktion setzte der USA-Pavillon. Dieses Großprojekt entstand unter einer Kollaboration der Architekten Brody, Chermayeff, Davis, De Harak und Geismar der Membranfirma Birdair und dem Statiker David Geiger.

Als eine Weiterentwicklung des Entwurfes von Frederick Lanchesters Lazarett überspannte die Konstruktion 142 Meter in der Länge und knapp 84 Meter in der Breite. Stahlseile teilen die Membran in ein rautenförmiges Raster und verankern die Konstruktion in einem Ringfundament, welches die gesamte Fläche umschließt. Durch einen

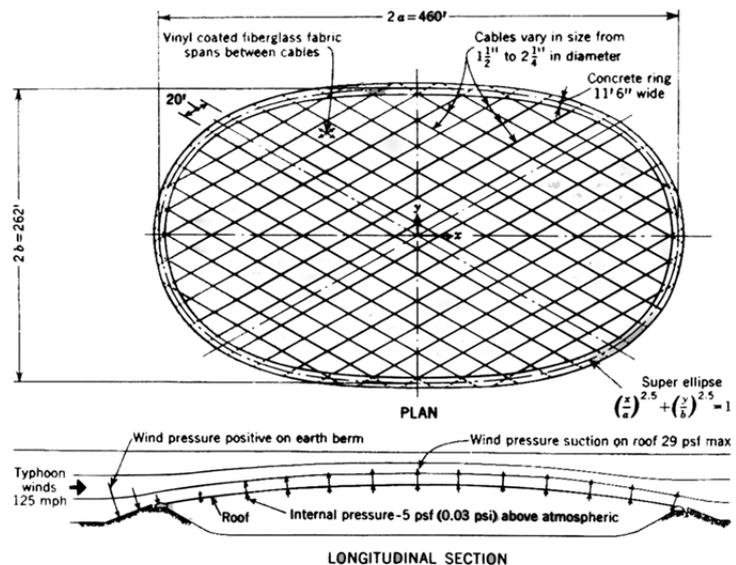


Abbildung 8 USA Pavillon Schnitt und Draufsicht

geringen Überdruck im Inneren der Hülle hebt sich das Dach und bildet eine kissenartige Landschaft. Diese Dachkonstruktion wog mit $4,9 \text{ kg/m}^2$ weniger als alle anderen Leichtbauten zu diesem Zeitpunkt.¹⁶

Die in Osaka prophezeite Zukunft des Bauens stieß bei vielen auf Missgunst und Entsetzen. Was von den Architekten oft als eine Art Utopia bezeichnet wurde, war für andere der totale Verlust des Menschlichen und die Auslöschung des Individuums. Peter Blake etwa bezeichnete in dem Buch „The Inflatable Moment“ den USA Pavillon als „das größte Hühneraugenpflaster der Welt – eine Art Tribut Claes Oldenburgs an Dr. Scholl“.¹⁷

¹⁵ Vgl. Knippers 2010, 18.

¹⁶ Vgl. Ebda., 18f; LeCuyer 2008, 27.

¹⁷ Dessauce 1999, 145.

Nach der Expo '70 gab es vermehrt Entwürfe für überdimensionale Hüllen. So entwarf zum Beispiel Frei Otto zusammen mit Kenzo Tange eine überdachte Stadt in der Arktis mit Platz für 45.000 Bergarbeiter.¹⁸

Ein weiteres Städtebaukonzept, ebenfalls mit Beteiligung von Frei Otto, war das Projekt „58 Degrees North“ der kanadischen Regierung. Büro Happold schlug im Zuge dieses Auftrags eine Traglufthalle vor, welche erstmals mit ETFE-Kissen als Hülle funktionierte.¹⁹

Mit der Ölkrise 1973 anlässlich des Jom-Kippur-Krieges wurde der Kunststoffindustrie ein herber Rückschlag versetzt. Am Bausektor gab es Gegenreaktionen frei nach dem Motto: „Zurück zu den Wurzeln“ und die natürlichen Baustoffe hielten wieder Einzug. Sie sollten im Gegensatz zu den hässlichen Kunststoffen wieder Individualität ermöglichen und ein menschenwürdiges Raumklima schaffen.

Heute finden Kunststoffe wieder vermehrt Anwendung und werden wegen der effizienten Leichtbaulösungen und den vielfältigen Eigenschaften geschätzt. Die neuen Technologien ermöglichen noch ausgefallenerere Membrankonstruktionen und sind bereits fester Bestandteil im Experimentierbaukasten der Avantgarde.

¹⁸ Vgl. LeCuyer 2008, 27 ff.

¹⁹ Vgl. Ebda., 29 f.

2 Grundlagen

Membranbauten gehören zu den vielseitigsten und vielfältigsten Tragwerken. Sie ermöglichen sehr leichte Konstruktionen, welche im Extremfall aus nur einer Lage Folie bestehen und somit leichter sind als alle anderen Leichtbaukonstruktionen. Ein Membranbau setzt sich immer aus den gleichen grundlegenden Komponenten zusammen: der Membran selbst, in einfacher oder auch doppelter Ausführung; einer Vorspannung und einer Lagerung um die Lasten abzutragen. Die Membran (lat. membrāna, ‚Haut‘) ist eine nur auf Zug (und minimal auf Schub) belastbare biege- weiche Schicht eines Materials, welche sich durch die verwendeten Arten der Vor- spannung und der Lagerung in einer bestimmten Form stabilisiert.²⁰

2.1 Begriffe und Klassifikationen

Um nun die große Anzahl verschiedenster Membranbauten genauer klassifizieren zu können, bedient man sich mehrerer Unterscheidungsmerkmale. Je nach Fall unter- scheidet man die Schichtung der Membran (ein- oder mehrschichtig), die Vorspan- nungsart (mechanisch oder pneumatisch), Lagerung, Verbund mit dem Primärtrag- werk aber auch die Geometrie der Membrane.²¹

2.1.1 Membranaufbau Ein- bzw. Mehrschichtig

Membranen werden im Normalfall ein- oder zweischichtig aufgebaut. Seltener kom- men auch dreischichtige Formen zum Einsatz, wobei die dritte Schicht oft Sonder- funktionen wie zum Beispiel den Sonnenschutz erfüllt.

Bei mechanisch vorgespannten Systemen werden fast ausschließlich einschichtige Membranen verbaut.

Pneumatisch vorgespannte Systeme teilt man zusätzlich in mediengestützte und mediengefüllte Membrantragwerke. Walter Bird führte ursprünglich die Begriffe luft- gestützte und luftgefüllte Membranen ein, da als Medium in erster Linie Luft verwen-

²⁰ Vgl. Teutsch 2009, 1.

²¹ Vgl. Gengnagel 2005, 5.

det wird. Es können aber auch andere Gase, Flüssigkeiten oder Granulate zum Füllen einer Membran genutzt werden, weshalb man verallgemeinernd von mediengefüllt und mediengestützt spricht.²²

Mediengestützte Konstruktionen sind für gewöhnlich einschichtige Membranen, welche durch einen Über- oder Unterdruck gestützt einen bestimmten Raum einschließen. Dieser Raum wird über Schleusen betreten um den Druckverlust so gering wie möglich zu halten. Die einschichtigen Konstruktionen sind gleichzeitig auch jene, mit dem geringsten Gewicht, da meist keine zusätzlichen Sekundärtragwerke gebraucht werden. Doppelmembranstrukturen werden, wie der Name schon sagt, aus mindestens zwei Membranschichten gebildet. Im entstehenden Zwischenraum wird ein Über- oder Unterdruck erzeugt und so die gewünschte Form stabilisiert. Die Form kann dann eine tragende Funktion übernehmen. Häufig werden die Elemente auch als nichttragende Teile von Fassaden o.ä. verwendet, beispielsweise als ETFE-Kissen.

Pneumatisch vorgespannte Systeme können noch weiter differenziert werden, nämlich anhand des verwendeten Betriebsdruckes. Man unterscheidet Nieder- und Hochdrucksysteme.²³

²² Vgl. Minke 1971, 502.

²³ Vgl. Ebda., 502.

Bei Niederdrucksystemen treten Differenzdrücke von etwa 0,001 – 0,01 bar (0,1-1 kN/m²) auf. Diese Systeme dienen häufig als Primärtragwerk. Gernot Minke unterscheidet die verschiedenen Bauarten wie folgt:²⁴

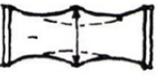
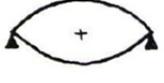
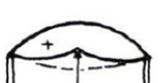
Niederdrucksysteme				
1. flächig unterstützte Einfachmembrantragwerke (mediengestützt)				
	.01 ohne zusätzliche Stabilisierung	.02 mit zusätzlicher "punktförmiger" Stabilisierung	.03 mit zusätzlicher linearer Stabilisierung	.04 mit zusätzlicher punktf. u. linear Stabilisierung
.1 Unterdruck	1.11 	1.12 	1.13 	1.14 
.2 Überdruck	1.21 	1.22 	1.23 	1.24 
2. flächig unterstützte Doppelmembrantragwerke (mediengefüllt)				
	.01 ohne zusätzliche Stabilisierung	.02 mit zusätzlicher "punktförmiger" Stabilisierung	.03 mit zusätzlicher linearer Stabilisierung	.04 mit zusätzlicher punktf. u. linear Stabilisierung
.1 Unterdruck	2.11 	2.12 	2.13 	2.14 
.2 Überdruck	2.21 	2.22 	2.23 	2.24 

Abbildung 9 Niederdrucksysteme nach Minke

²⁴ Vgl. Minke 1971, 502.

Hochdrucksysteme differenziert Minke in anderer Art und Weise als Niederdrucksysteme, da sich ihre statischen und konstruktiven Eigenschaften aufgrund des höheren Druckes stark vom Niederdruck unterscheiden.

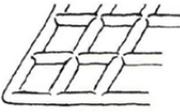
Hochdrucksysteme (Schlauchkonstruktionen)		
	0.1 diskontinuierlich	0.2 kontinuierlich
1. gerade	1.1 	1.2 
2. gebogen	2.1 	2.2 

Abbildung 10 Hochdrucksysteme nach Minke

Hochdrucksysteme treten vor allem in Schlauchform auf und werden von Minke in gerade, gebogen, diskontinuierlich und kontinuierlich aufgeteilt. Schläuche werden bei Bedarf auch in geknickter Form verbaut. Da dies jedoch konstruktive Nachteile mit sich bringt, findet diese Variante hier keine Beachtung. Der gerade Schlauch findet häufig Verwendung als Stütze oder Balken, wohingegen der gebogene Schlauch meist als ein großes Element mit beiden Fußpunkten am Fundament verankert ist. Bei diskontinuierlicher Bauweise werden Stäbe und Bögen unabhängig voneinander als Einzelelemente eingesetzt. Im kontinuierlichen Verbund umschließen die Elemente einen durchgehenden Luftraum.

Gernot Minke unternahm den Versuch der Differenzierung pneumatischer Tragsysteme und der Präzisierung des Begriffes selbst. Laut Minke sollte somit anstatt pneumatischer Konstruktion der Begriff des flächig stabilisierten Membrantragwerkes verwendet werden. Er entwickelte ein System mit elf verschiedenen Merkmalen zur Klassifizierung von Membranbauten.²⁵

²⁵ Vgl. Teutsch 2009, 3.

Jedes Merkmal kann zusätzlich in verschiedenen Ausprägungen auftreten, wodurch sich eine gewisse Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten ergibt.

Stelle	Merkmal	Zuordnung zu:	Ausprägungen	Varietät: sinnvolle Möglichk.
1	Membranausbildung	Tragwerkssystem	a.) einfach b.) doppelt (Kissen)	2
2	Art der Druckdifferenz		a.) Überdruck b.) Unterdruck	4
3	Art der sekundären Unterstützung		a.) keine b.) punktförmig c.) linear	12
4	Ausbildung der sekundären Unterstützung	Tragwerkstyp	für 3 b: a.) Rosette b.) Ring c.) Buckel für 3 c: d.) Seil e.) Balken f.) Bogen	28
5	Anordnung der sekundären Unterstützung		für 3 b: a.) einzeln, b.) gereiht, c.) gerastert d.) radial/ringförmig, e.) unregelmässig für 3 c: f.) einzeln, g.) einläufig, h.) radial, i.) tangential, k.) zweiläufig, l.) dreiu- mehrläufig, m.) unregelmässig	148
6	Beanspruchung der tertiären inneren Unterstützung		für 3 b, c: a.) keine, b.) Zug, c.) Druck, d.) Biegung	580
7	Dimension der Hauptausdehnungsrichtungen	Tragwerksform	a.) eindimensional, b.) zweidimensional, c.) dreidimensional	1 740
8	Art der Oberflächenkrümmung		a.) einseitig, b.) synklastisch, c.) antiklastisch (in Verbindung mit synklastisch)	5 220
9	Art des Membranmaterials	Tragwerksart	a.) hochelastisch, b.) thermoplastisch, c.) unelastisch/verschiebbar, d.) unelastisch/ fest	20 880
10	Größenordnung der Spannweite		a.) bis 20 m, b.) 20 - 100 m, c.) über 100 m	62 640
11	Art der Addition		a.) keine, b.) einachsig, c.) zweiachsig, d.) drei- und mehrachsig	250 560

Abbildung 11 Klassifizierung pneumatisch stabilisierter Membrantragwerke

Eine andere Herangehensweise zur Klassifikation von Membranstrukturen zeigt Thomas Herzog durch morphologische Charakteristika. Hierbei liegt der Fokus auf der formalen Gestaltung einer Membran, wodurch sich eine Einteilung in vier Merkmale ergibt. Ein Merkmal besitzt immer drei Alternativen und drei beziehungsweise vier Mischformen.²⁶

²⁶ Vgl. Teutsch 2009, 1 f.

Merkmal		mögliche Mischformen			
Art der Membrane, Art des Gebildes	Membrane offen, Gebilde offen	Membrane geschlossen, Gebilde geschlossen	Membrane offen, Gebilde geschlossen	Membrane offen und Membrane geschlossen, Gebilde offen und Gebilde geschlossen	Membrane offen und Membrane geschlossen, Gebilde offen und Gebilde geschlossen
	6 Alternativen	6 Alternativen	6 Alternativen	6 Alternativen	6 Alternativen
Proportion des Gebildes	eine Dimension dominant	drei Dimensionen etwa gleich groß	eine Dimension dominant und zwei Dimensionen dominant	eine Dimension dominant und drei Dimensionen etwa gleich groß	zwei Dimensionen dominant und drei Dimensionen etwa gleich groß
	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen
Art der Oberflächenkrümmung	einfach gekrümmt	gegenseitig doppelt gekrümmt	einfach gekrümmt und gleichsinnig doppelt gekrümmt	einfach gekrümmt und gegensinnig doppelt gekrümmt	gleichsinnig doppelt gekrümmt und gegensinnig doppelt gekrümmt
	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen
Art der Verbindung	keine Verbindung	Additionen	Kombinationen	Additionen und Kombinationen	Additionen und Kombinationen
	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen	7 Alternativen

Abbildung 12 Morphologische Klassifizierung nach Herzog

2.1.2 Vorspannung

Ein weiteres Differenzierungsmerkmal ist die Art der Vorspannung einer Membran. Man unterscheidet zwischen der mechanischen Vorspannung, welche meist bei einlagigen Konstruktionen zum Einsatz kommt und der pneumatischen Vorspannung, die eine Membran durch Über- oder Unterdruck stabilisiert. Die Art der Vorspannung bestimmt wesentlich die Geometrie der Membran. Unterschiede beider Vorspannungsarten werden im Kapitel 4.1.3 Geometrie der Membran genauer dargestellt.²⁷

2.1.3 Lagerung

Grundsätzlich sollte jede Membran über eine umlaufende Stützung verfügen. Nur so ist gewährleistet, dass alle Zugkräfte, welche innerhalb der Membranfläche auftreten, zu den Lagern weitergeleitet werden. Ist das Ableiten der Zugkräfte nicht möglich, kann es zum Reißen der Membran kommen.

Die Stützung einer Membran kann sowohl linienförmig, als auch flächig erfolgen. Eine punktuelle Stützung ist nicht möglich, da die theoretisch unendlich kleine Stützfläche in der Membran unendlich große Spannungen erzeugen und somit zum Zerstören dieser führen würde. Anstatt punktförmiger Stützung verwendet man Formen mit größeren Randlinien, wie etwa Ringe, Schlaufen oder flächige Köpfe. Linienförmige Stützung kann sowohl hart (z.B.: Klemmleisten) als auch weich (z.B.: Seile) sein. Eine flächige Unterstützung erfolgt in der Regel durch eine pneumatische Bauweise. Eine flächige, mechanische Stützung ist selten und wird durch ein flächiges Stützenraster gewährleistet.²⁸

²⁷ Vgl. Herzog 1976, 15.

²⁸ Vgl. Gengnagel 2005, 6 f.

Abbildung 13-15 zeigen die Grundarten der Stützung.
Harte, unflexible Befestigungen werden hier rot dargestellt, weiche grün.

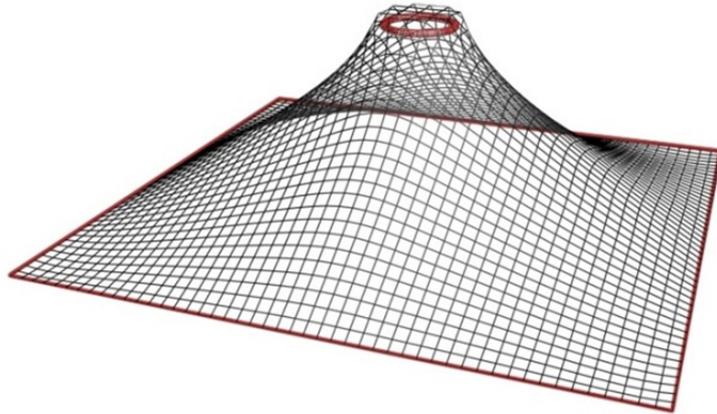


Abbildung 13 Linienförmige Stützung mit harten Kanten und Ringelement

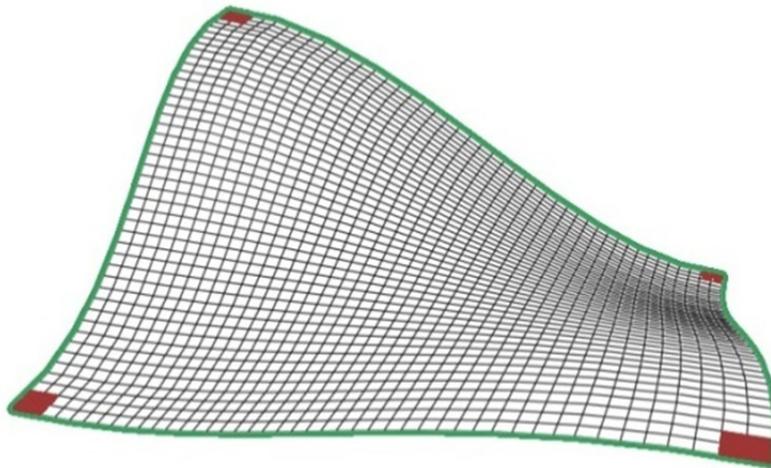


Abbildung 14 Linienförmige Stützung mit weichen Kanten

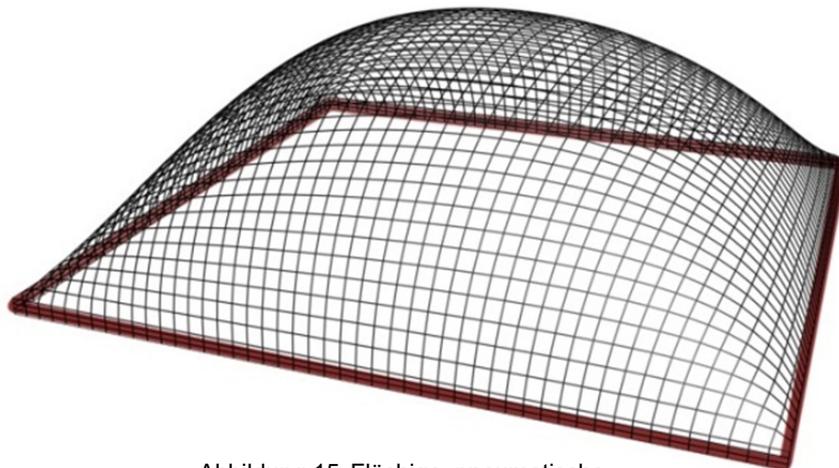


Abbildung 15 Flächige, pneumatische Stützung mit harten Kanten

2.1.4 Geometrie der Membran

Membranen sind flächige Elemente, deshalb kann ihre Geometrie mit Hilfe der Differentialgeometrie beschrieben und analysiert werden. Als Teilgebiet der Mathematik befasst sich die Differentialgeometrie mit der Analyse von Geometrie und gliedert sich dabei in mehrere Kategorien. Wichtig für die Berechnung von Membranflächen sind die Inhalte der Elementaren Differentialgeometrie. Diese beinhaltet Variationsrechnungen zur Analyse von Minimalflächen und betrachtet die Kurven und Krümmungen der Flächen.

Der wichtigste Kennwert zur Bezeichnung von Membranen ist die Gaußsche Krümmung oder auch Gaußsches Krümmungsmaß. Gebildet wird die Gaußsche Krümmung aus dem Produkt der beiden Hauptkrümmungen.²⁹

K *Gaußsche Krümmung*

k_1 *erste Hauptkrümmung*

k_2 *zweite Hauptkrümmung*

r_1 *Radius der ersten Hauptkrümmung*

r_2 *Radius der zweiten Hauptkrümmung*

$$K = k_1 \times k_2 = \frac{1}{r_1} \times \frac{1}{r_2}$$

²⁹ Vgl. Wunsch 1997, 120.

Die Gaußsche Krümmung gibt an in welcher Art eine Geometrie gekrümmt ist. Bei einem Ergebnis kleiner 0 (Null) handelt es sich um sogenannte antiklastische, also gegensinnig gekrümmte Flächen.

Ist das Ergebnis größer 0 (Null) spricht man von synklastischen, gleichsinnig gekrümmten Flächen. Ein Sonderfall mit einer Gaußschen Krümmung gleich 0 (Null) ist die ebene Fläche, welche jedoch aus bautechnischer Sicht keine richtige Verwendung hat.

Synklastische Membranen werden pneumatisch gebildet, wohingegen antiklastische und ebene Flächen mechanisch vorgespannt werden.

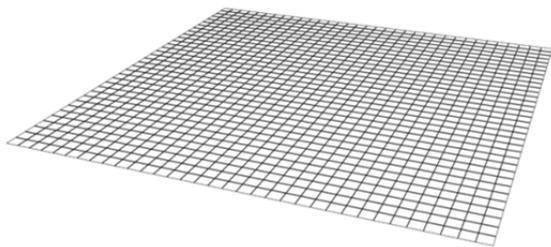


Abbildung 16 Eben

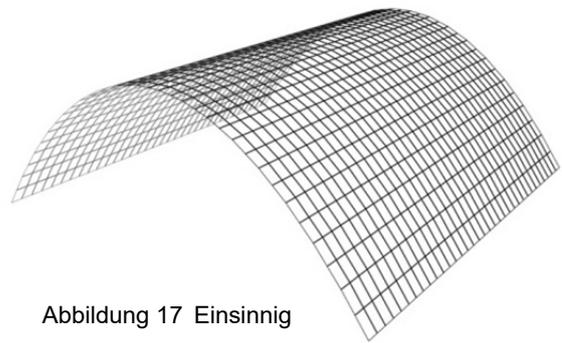


Abbildung 17 Einsinnig

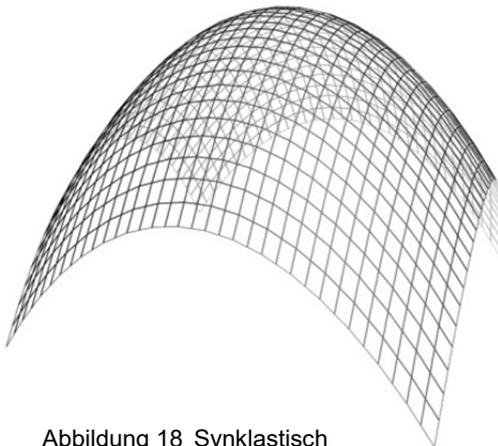


Abbildung 18 Synklastisch

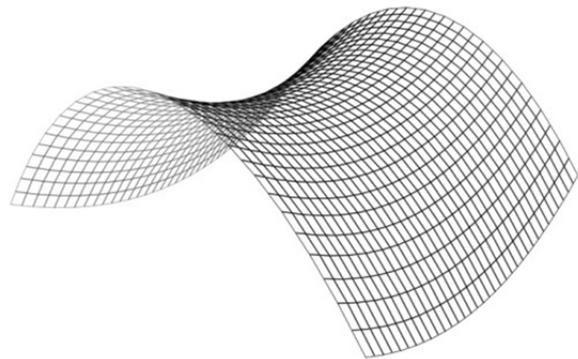


Abbildung 19 Anitklastisch

2.2 Tragverhalten

Da Membranen ein biegeweiches, sehr dünnes Material darstellen, können sie keinerlei Druckkräfte und Biegebeanspruchungen aufnehmen. In einem Membrantragwerk werden die auftretenden Kräfte fast ausschließlich über Zugkräfte abgeleitet. Um einen Lastabtrag zu gewährleisten, bedarf es einer Vorspannung in mechanischer oder pneumatischer (auch hydraulischer oder granulöser) Ausführung. Je höher die durch die Vorspannung aufgebrachte Spannung, desto mehr Kräfte kann eine Membran aufnehmen. Im Gegensatz zu steifen, unbeweglichen Tragwerken ändert die Membran ihre Geometrie beim Lastabtrag, was sich durch Beulen oder Falten bemerkbar machen kann (abhängig von Kraft und Vorspannung).

2.2.1 Mechanische Vorspannung

Bei der mechanischen Vorspannung wird die Membran an den Rändern eingespannt (fest oder weich, siehe Abb. 13,14) und dann vorgespannt. Befinden sich die Ränder nicht in derselben Ebene, führt dies zu einer Krümmung. In den meisten Fällen einer mechanischen Vorspannung tritt eine antiklastische Krümmung (Abb. 19) auf.

Die ebene Einspannung (Abb. 16) wird in der Regel nicht verwendet, da sich die Tragkraft einer Membran erst durch eine Krümmung stark erhöhen lässt. Im ebenen Zustand müsste die Vorspannung ständig erhöht werden, um das Tragvermögen zu verbessern, was schließlich zum Reißen der Membran führen würde.

Zur Erläuterung des Tragverhaltens nehmen wir dennoch zuerst die ebene Einspannung als gegeben an:³⁰

³⁰ Vgl. Gengnagel 2005, 10 f.

Lastfall:

Eine punktförmige Einzellast auf einer ebenen, vorgespannten Membran (Abb. 20).

Um ein Kräftegleichgewicht herzustellen, muss sich der Kraft F eine gleichgroße Gegenkraft F_R entgegenstellen.

F_R ist dabei die Resultierende der beiden Kräfte in Membranebene F_{R1} und F_{R2} . Wenn die Membran der Kraft F nicht durch Verformung entgegenreten könnte, würden die Kräfte innerhalb der Ebene ins Unendliche streben und somit die Membran zerstören (Abb. 21).

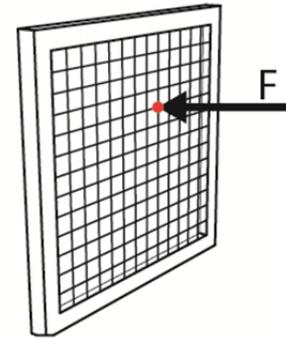


Abbildung 20
Ebene Einspannung

Durch das Auftreten einer Last beginnt die Membran sich zu verformen. Die Teilkräfte F_{R1} und F_{R2} werden durch Bilden der Winkel α und β kleiner. (Abb. 22)

Sobald die Bewegung der Membran stoppt, ist das Gleichgewicht hergestellt. Die Gegenkraft F_R neutralisiert die Kraft F und das System stabilisiert sich bei den resultierenden Winkeln α_2 und β_2 .³¹

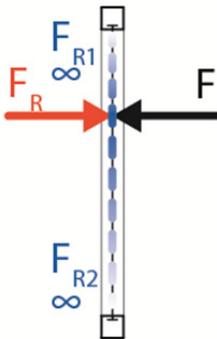


Abbildung 21
Nicht stabiler Zustand

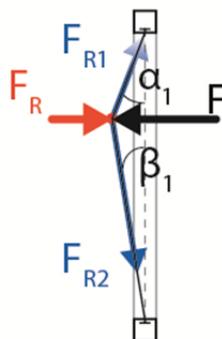


Abbildung 22
Verformungsprozess

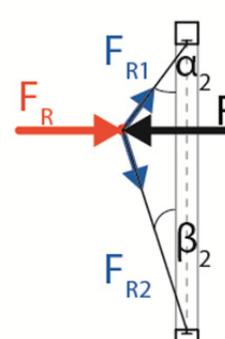


Abbildung 23
Stabiler Endzustand

³¹ Vgl. Moro Bd. 1 2009, 502 ff.

2.2.2 Pneumatische Vorspannung

Die pneumatische Vorspannung wird im Gegensatz zur mechanischen Vorspannung durch eine Veränderung des Innendruckes einer Membran realisiert und funktioniert als flächige Stützung (Abb. 15). Am häufigsten erfolgt die pneumatische Vorspannung durch Aufbringen eines Überdruckes. Dieser führt zu einer Verformung der Membran und somit zu einem vorgespannten Zustand. In der Regel nehmen die pneumatischen Körper eine synklastische Form (Abb. 18) an. Lediglich schmale Bereiche am Rand der Einspannung weisen antiklastische Krümmungen auf und sind bei der Berechnung und Analyse nicht von Bedeutung.

Die Form einer Membran ist ein direktes Abbild des Kräftegleichgewichts. Das heißt wiederum, dass im Lastfall eine dehnungslose Verformung der Membran auftritt, bis zu dem Punkt, an dem das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Dieses Prinzip gilt sowohl für pneumatische, als auch für mechanische Vorspannung.

Aus diesem Grund eignen sich Membrankonstruktionen nur bedingt für Verkehrslasten, da auf jeden Lastwechsel eine Geometrieänderung folgt. Diesen Umstand kennt man zum Beispiel aus Hüpfburgen, welche beim Begehen nachgeben, was zwar spaßig, aber im konstruktiven Sinne unbrauchbar ist.

Im nichtbelasteten Zustand stellt sich im Fall eines quadratischen Pneu-Kissens eine gleichmäßige, synklastische Form ein.

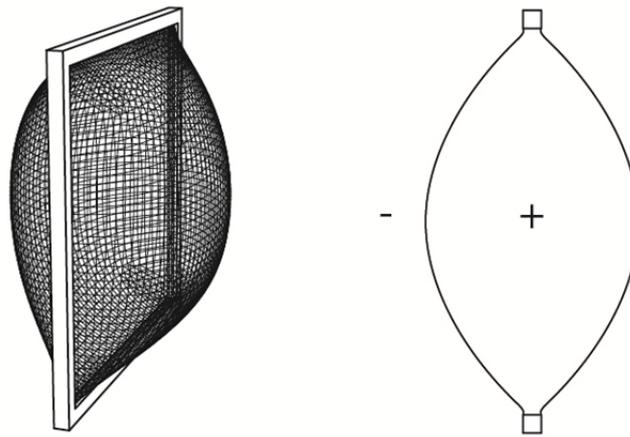


Abbildung 24 Zustand ohne Belastung

Bei einseitiger flächiger Belastung wölbt sich die unbelastete Seite aus, während die belastete Seite eingedrückt wird. Dies geschieht so lange, bis die Wölbung der unbelasteten Seite so groß ist, dass die entstehenden Vorspannungskräfte die Belastung ausgleichen.

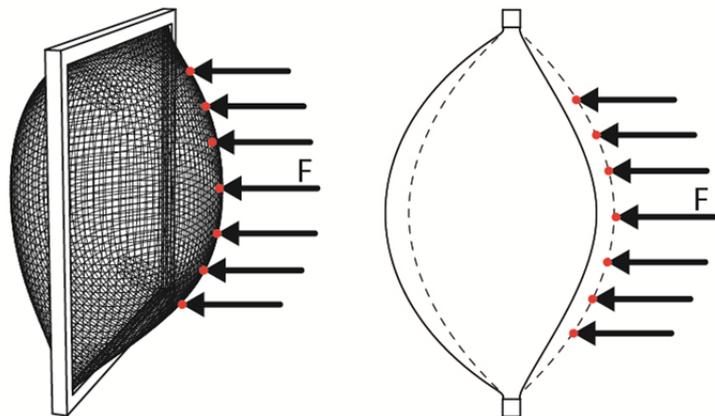


Abbildung 25 Lastfall: gleichmäßige Flächenlast

Wird eine pneumatisch vorgespannte Membran punktuell belastet, kommt es zu größeren Verformungen. Einerseits wird die Membran im Punkt der Belastung eingedrückt, andererseits wölbt sich die Fläche oft beiderseits aus.³²

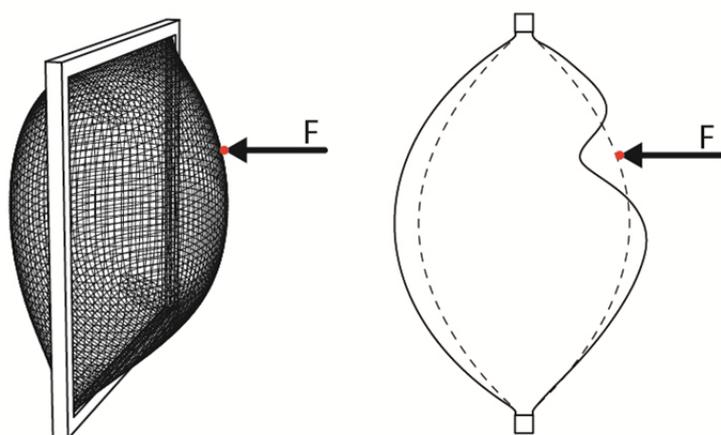


Abbildung 26 Lastfall: Punktlast

³² Vgl. Moro Bd.1 2009, 500 ff.

2.3 Formfindung

Die Formfindung einer Membran gestaltet sich als schwieriger, als man auf den ersten Blick vermutet. Wie bereits erwähnt, ergibt sich die Form aus dem Gleichgewicht aller auftretenden Kräfte. Durch eine inkorrekte Ausführung der erdachten Form ergeben sich unerwünschte Wölbungen, Falten und ungleichmäßige Spannungsverteilung, was im Extremfall zum Versagen der Membran führt. Der Prozess der Formfindung stellt seit Beginn des Membranbaus die wahrscheinlich größte Hürde dar. Im Laufe der Jahre wurden immer komplexere Methoden erdacht, um diesem Problem Herr zu werden.

2.3.1 Minimalflächen

Eine Fläche, die zwischen einer geschlossenen, räumlichen Kurve aufgespannt wird und dabei den kleinsten Flächeninhalt besitzt, nennt man Minimalfläche. Solche Flächen können zum Beispiel mittels einer Seifenhaut gebildet werden (Abb. 27). Hierzu wird die auszufüllende Kurve aus Draht nachgebildet und vollständig in Seifenlauge getaucht. Zieht man das Gebilde nun vorsichtig wieder heraus, spannt sich eine Seifenhaut auf. Gleiches geschieht im Ring eines Seifenblasenstabes. Durch Kontakt mit einer ebenfalls eingeseiften Drahtschleife lässt sich eine Seifenhaut bedingt ziehen und formen. Aus der Bildung einer Minimalfläche lassen sich zwei Eigenschaften ableiten: Erstens ist die Krümmung einer Minimalfläche in Summe stets null. Bei jeder anderen Form, außer der ohnehin nicht gekrümmten Ebene heben sich die positiven und negativen Krümmungsanteile auf. Eine Minimalfläche ist also entweder eben oder doppelt gekrümmt (antiklastisch). Die zweite Eigenschaft besteht darin, dass die Spannung innerhalb der Minimalfläche in jedem Punkt gleich groß ist.³³

³³ Vgl. Gengnagel 2005, 13; Grunwald 2007, 18.

Frei Otto war stark an der Erforschung von Minimalflächen beteiligt und nutzte Experimente mit Seifenhaut für seine Entwürfe. Laut ihm waren die Minimalflächen nicht nur das Optimum an Materialausnutzung, sondern ein Ideal, das es zu erreichen galt, um Eleganz und Ästhetik von Membranbauten zu erreichen.

Leider weichen Minimalflächen von der Realität ab, weshalb man heutzutage kaum noch solche Formfindungsmethoden nutzt. Aufgrund des Eigengewichts des Membranmaterials und dessen Inhomogenität durch Compositmaterialien ist es einfach nicht möglich, eine Spannungshomogenität zu erreichen.

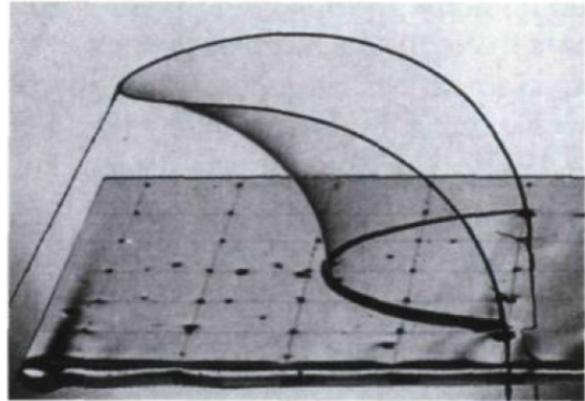


Abbildung 27 Seifenhautmodell

2.3.2 Experimentelle Formfindung

In der Vergangenheit war die oben beschriebene die einzige Methode zur Formfindung von Membranbauten. Aufgrund der oftmals komplexen Geometrie war eine Berechnung nicht möglich, weshalb man sich auf Modelle verlassen musste.

Seifenhautmodelle, Seilnetze oder Nylongewebe wurden häufig verwendet, da diese einer Ausgleichsfläche (Minimalfläche) sehr nahe kamen. Durch Einspannen der Ränder und Aufbringen von Lasten und Spannungen wurden so Membranformen entwickelt, gleichzeitig erhielt man eine gute Vorstellung von der räumlichen Wirkung der Struktur. Je nach Detaillierungsgrad des Modells wurde es auch herangezogen, um die Statik zu berechnen, aber auch zur Festlegung des Zuschnittes. Für spezielle Tests (z.B.: Windkanal) wurden oft Sondermodelle entwickelt, welche nur einen Teil oder ein Funktionsprinzip des Gesamten darstellten.

Auch heute noch ist das Arbeiten mit Modellen ein hilfreicher Prozess, vor allem in der Entwurfsphase. Zum Berechnen der Statik und des Zuschnittes nutzt man heute allerdings Software. Damit erzielt man genauere Ergebnisse in wesentlich kürzerer Zeit.³⁴

³⁴ Vgl. Gengnagel 2005, 13 f; Grunwald 2007, 18 f.

2.3.3 Numerische Formfindung

Für die Berechnung der endgültigen Form wird fast ausschließlich eine numerische Methode genutzt. Das Ergebnis sind digitale, dreidimensionale Modelle, welche dann zur Berechnung und Visualisierung herangezogen werden können. Weitere Vorteile numerischer Formfindung sind die Geschwindigkeit und die Genauigkeit mit denen die Modelle erstellt werden können.

Die numerische Formfindung gliedert sich in die folgenden Teilbereiche.³⁵

2.3.3.1 Finite Elemente

Viele aktuelle FEM-Softwarepakete bieten Formfindungsmethoden für Membranen an. Hierbei wird die Membranfläche in eine definierbare Anzahl von Einzelementen gegliedert, welche an ihren Knotenpunkten zusammenhängen. Die einzelnen Elemente werden anschließend nach den Vorgaben auf Spannung und Verschiebung hin simuliert und ergeben durch den Zusammenhang der Knoten eine Gesamtverformung. Oft wird eine solche Berechnung ohne Materialvorgaben und folglich unter der Annahme einer isotropen Spannungsverteilung durchgeführt, weshalb das Ergebnis mit einer Seifenhaut vergleichbar ist.

2.3.3.2 Kraft-Dichte Methode

Die Kraft-Dichte Methode wurde ursprünglich zur Berechnung von Seilnetzen entwickelt, erlaubt aber durch eine Erweiterung auch die Berechnung von Membranen. Ähnlich der FEM-Methode wird auch hier die Fläche in einzelne Teile gegliedert. Die Fläche wird in ein Netz aus an den Knotenpunkten zusammenhängenden Zugstäben mit einstellbarem Knotenabstand zerlegt. Aus der Annahme heraus, dass für jeden Knotenpunkt ein Kräftegleichgewicht zwischen den vier Zugkräften und der Last des Eigengewichtes herrschen muss, ergibt sich eine nichtlineare Gleichung. Dieses Gleichungssystem wird drastisch vereinfacht und linear, indem man eine neue Variable einführt, die Kraft-Dichte. Diese ist der Quotient der Kraft und ihrer Wirkungslänge (Abstand zum nächsten Knotenpunkt). Die nun linearen Gleichungssysteme

³⁵ Vgl. Gengnagel 2005, 15; Grundwald 2007, 19 ff.

lassen sich schnell und numerisch direkt bestimmen. Das daraus resultierende Gleichgewichtsmodell entsteht in einem einzigen Rechenschritt und benötigt keine Iterationen wie bei der FEM-Methode. Eine Besonderheit dieser Formfindungsmethode besteht darin, dass keine Materialwerte zum Einsatz kommen, wodurch eine Trennung von Form und Material möglich wird. Zur korrekten und endgültigen Form wird in einem zweiten Schritt ein Material aufgebracht.³⁶

2.3.3.3 Dynamische Relaxation

Bei dieser Methode wird eine Ausgangsfläche in finite Elemente unterteilt. Die Angabe der Materialeigenschaften ist notwendig, da die Masse der Fläche sich nach dem Diskretisieren in finite Elemente in den Knotenpunkten konzentrieren muss, um eine Berechnung zu ermöglichen. Durch ein zeitlich begrenztes Aufbringen einer Einzelast wird die Struktur künstlich in Schwingung versetzt und anschließend durch viskoelastische oder kinetische Dämpfung gebremst, wodurch sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Dadurch wird das eigentlich statische Problem künstlich in ein dynamisches überführt und mit dieser Methode lösbar. Die Materialkennwerte der Membran spielen bei der Berechnung eine große Rolle, da neben der Dichte auch Werte wie die Kett- und Schussrichtung des Gewebes einen Einfluss auf die Gliederung in Einzelelemente haben.³⁷

³⁶ Vgl. Gengnagel 2005, 16.

³⁷ Vgl. Gengnagel 2005, 16 f.

2.4 Zuschnitt

Das Resultat des Formfindungsprozesses ist stets eine gekrümmte Fläche (Ausnahme: Ebene) im vorgespannten Endzustand. Um die digitale Form in die Realität umzusetzen, bedarf es allerdings einiger Arbeits- und Denkschritte. Die gespannte, gekrümmte Fläche muss aus ebenen, ungedehnten Bahnen zusammengesetzt werden. Hauptproblem dieses Vorganges ist die Abwickelbarkeit einer Geometrie.

Damit eine dreidimensionale Form abwickelbar ist, muss ihre Gaußsche Krümmung in jedem Punkt null sein. Dies ist nur bei einfach gekrümmten Flächen der Fall, wie zum Beispiel beim Zylinder oder Kegel. Die meisten Membrankonstruktionen besitzen allerdings eine doppelte Krümmung und sind somit nicht eindeutig abwickelbar. Eine Abwicklung (Verebnung) solcher Flächen führt zwangsläufig zu einer Verzerrung der Winkel und Längen. Dieser auch als Verebnung bezeichnete Vorgang ist geschichtlich vor allem aus dem Bereich der Kartographie bekannt. Kleinmaßstäbliche Karten werden stark verzerrt, wenn man das Relief der Erdoberfläche in die Ebene projiziert.

Die am weitesten verbreitete Methode eine Membranfläche abzuwickeln besteht darin, die Fläche mit Hilfe geodätischer Linien in Streifen einzuteilen, deren Maximalbreite die Rollenbreite des Membranmaterials darstellt. Eine geodätische Linie stellt die kürzeste Verbindung zweier Punkte einer beliebig geformten Fläche dar. Vorteil dieser Linien ist, dass sie nur eine einfache Krümmung aufweisen und deshalb in die Ebene abwickelbar sind. Der Membranstreifen zwischen zwei benachbarten geodätischen Linien wird dann auf die Ebene projiziert und weist relativ geringe Verzerrungen auf und minimiert den Verschnitt.

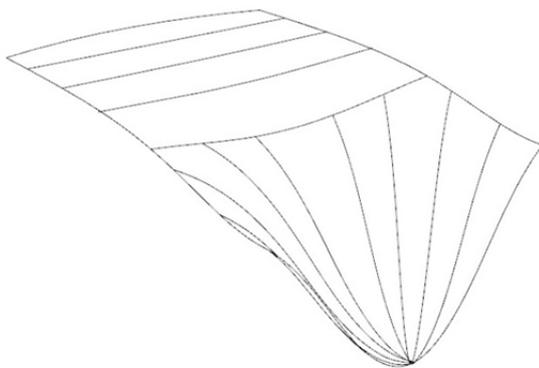


Abbildung 28 Einteilung der Fläche durch geodätische Linien

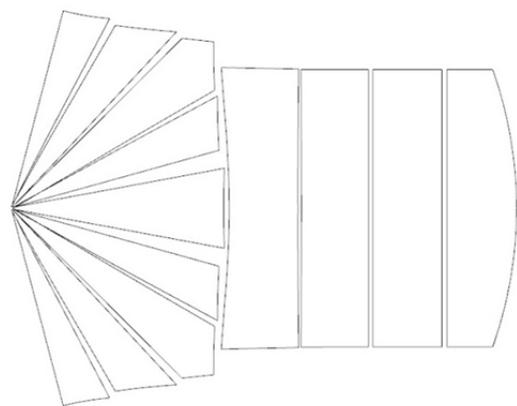


Abbildung 29 Ergebnis der Projektion der Einzelflächen in die Ebene

Um höhere Genauigkeit zu erzielen, beginnt man häufig in der Mitte der Membranfläche damit, die Einteilung durchzuführen. Weiters empfiehlt es sich in Bereichen großer Krümmungen, wie der großen Sicke in Abb. 28, die Streifenbreite zu reduzieren, um die Verzerrungen der Flächen klein zu halten.

Bei Verwendung von Gewebemembranen muss zusätzlich die Kett- und Schussrichtung des Gewebes berücksichtigt werden. Da die Kettfäden in der Regel mehr Zugspannung aufnehmen können, sollten diese in Richtung der Hauptkrümmungen liegen.³⁸

2.4.1 Kompensation

Da die digitale Form bereits im vorgespannten Zustand vorliegt und die Streifen aus der Schnittmustererzeugung aus einem unbelasteten Membranmaterial geschnitten werden, muss die Vorspannung ebenfalls in die Berechnung des Zuschnittes einbezogen werden. Würde dies nicht geschehen, wäre eine Größenänderung, beziehungsweise eine zu geringe Vorspannung und Faltenbildung der fertigen Struktur die Folge. Vor der Kompensation muss in den meisten Fällen ein Randausgleich stattfinden. Die Ränder der Membranstreifen, welche nicht durch geodätische Linien gebildet wurden, erfahren durch die Verebnung eine Verzerrung. Die Ausprägung der Verzerrung ist abhängig von der Stärke der jeweiligen Krümmung und der Breite des Streifens. Dies führt dazu, dass die zu verbindenden Ränder unterschiedlich lang sind, weshalb diese vor dem Zuschnitt aneinander angepasst werden müssen.

Die Kompensation wird als letzter Schritt vor dem eigentlichen Zuschnitt durchgeführt und ist im Grunde eine Größenreduktion der Streifen. Die somit eigentlich zu kleinen Elemente erreichen erst nach Aufbringen der Vorspannung ihre vorberechnete Größe. Üblicherweise wird die Reduktion durch die Dehnsteifigkeit des gewählten Materials und der Stärke der Vorspannung bestimmt. Der resultierende Betrag der Kompensation wird für gewöhnlich als Prozentsatz der geplanten Größe angegeben. Aufgrund des Kriechverhaltens von Membranen, also dem unter Dauerbelastung eintretenden, verzögerten Nachlassen der Spannung durch plastische Verformung des Materials, ist es notwendig, die Vorspannung konstant halten zu können. Das ge-

³⁸ Vgl. Seidel 2008, 59 f.

schieht entweder durch Einberechnung des Kriechens in die Kompensation und stärkere Vorspannung oder durch Einplanen einer Möglichkeit zur Nachspannung der Membran.³⁹

2.5 Materialien

Eine Membranstruktur zählt zu den sogenannten Flächentragwerken. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass eine Dimension im Vergleich zu den anderen beiden stets wesentlich kleiner ausfällt. Im Fall von Membranen bewegt sich die Stärke (Dimension der Z-Achse, Höhe) im Bereich von 0,02 – 2mm. Sie bilden somit gemeinsam mit Seilnetzten die leichtesten Vertreter der Flächentragwerke. Grob unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Materialgruppen: den isotropen und den anisotropen Materialien. Isotrope Materialien verfügen in jeder Richtung über dieselben mechanischen Eigenschaften, wohingegen anisotrope Stoffe verschiedene Eigenschaften in ihren Achsen aufweisen.⁴⁰

Diese Arbeit behandelt nur den Bereich der Gewebe und Folien. Weitere textile Halbwerkzeuge wie Vliese, Gestricke und Geflechte kommen im Membranbau eher selten zum Einsatz. Gewebe und Folien bilden den Großteil der Membranmaterialien und sind am besten etabliert, weshalb hierauf der Fokus gelegt wurde.

³⁹ Vgl. Seidel 2008, 60-67.

⁴⁰ Vgl. Ebda., 35 f.

2.5.1 Gewebe-Membran

Spricht man im Membranbau von technischen Textilien, handelt es sich fast ausschließlich um Gewebemembranen. Diese sind Composit-Materialien, setzen sich also aus mehreren Schichten unterschiedlicher Ausgangsstoffe zusammen. Den Kern bildet immer ein Gewebe aus Kett- und Schussfäden, welche den Lastabtrag gewährleisten. Zum Schutz dieser Fäden vor Umwelteinflüssen, wie Feuchtigkeit, UV-Bestrahlung sowie Oxidations- und Fäulnisprozessen und zur Bildung einer geschlossenen homogenen Fläche, wird das Gewebe mit einer Beschichtung aus Kunststoffen versehen. Zudem verbessern die Beschichtungen den Brandschutz und ermöglichen ein Verschweißen beziehungsweise Verkleben des Materials.⁴¹

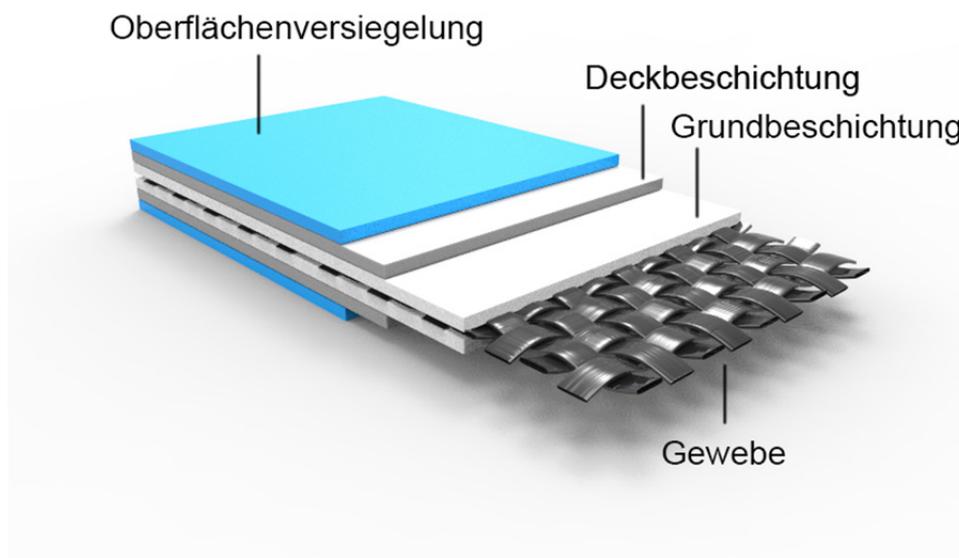


Abbildung 30 Aufbau einer Gewebemembran

⁴¹ Vgl. Seidel 2008, 35.

2.5.1.1 Filamente, Garne, Rovings

Das Ausgangselement eines Gewebes sind Garne oder Rovings. Hauptunterschied dieser beiden ist die Art und Weise wie die Einzelfasern zusammengefasst werden. Garne bestehen aus gedrehten und/oder verzwirnten Einzelfasern.

Rovings stellen einen Sonderfall der Garne dar, da hier die einzelnen Fasern ungedreht und parallel zu einem theoretisch endlosen Bündel zusammengefasst werden. Sie besitzen die höchsten Eigenschaftswerte, weshalb sie häufig in technischen Geweben zum Einsatz kommen.

Die Einzelfasern können aus natürlichen und künstlichen Materialien bestehen. Seit dem Einsetzen der Kunststoffindustrie werden fast ausschließlich Kunstfasern im technischen Bereich verwendet, da sie im Gegensatz zu Naturfasern nicht in ihrer Herstellungslänge beschränkt sind. Die so theoretisch endlosen Fasern werden auch als Filament bezeichnet. Kürzere Fasern, die oft in gestapeltem Zustand verwendet werden (z.B.: Glasfasermatten ohne Gewebe), bezeichnet man als Spinnfasern.

Um eine Angabe über den oftmals schwer zu messenden Querschnitt einer Faser zu machen, wurde 1969 die Einheit Tex gesetzlich geregelt. Dabei wird angegeben, wie schwer ein Garn, eine Faser oder ein Zwirn auf eine bestimmte Länge ist.⁴²

1 tex entspricht 1 Gramm pro 1000 Meter.

Im Handel werden auch noch zusätzliche Informationen nachstehend angegeben wie zum Beispiel die Filamentanzahl oder die Anzahl der Umdrehungen in einer spezifischen Achse (nicht bei Rovings)

Ein Beispiel bei Kohlefasern wäre etwa: Kohleroving 1600 tex 24k

Das bedeutet es handelt sich um ein Roving aus Kohlefasern mit 1600 Gramm pro 1000 Meter und 24.000 Filamenten im Bündel.

Die wichtigsten Fasermaterialien sind im Membranbau aktuell Polyesterfasern (Trevira®, Dacron®, etc.), Polyamid (Nylon®) und Aramid (Kevlar®). Auch Glasfaser wird vor allem im Bereich der transluzenten Membranen verwendet.

⁴² Vgl. Grunwald 2007, 38.

2.5.1.2 Bindungsarten

Gewebe entstehen durch das rechtwinkelige Kreuzen von Garnen oder Rovings. Dabei unterscheidet man die Kett- und die Schussrichtung. Je nach Lage der Kettfäden entstehen so verschiedene Arten der Verwebung. Dieser als Bindung bezeichnete Vorgang hat einen Einfluss auf Festigkeit, E-Modul und Formbarkeit des Gewebes.⁴³ Im Bereich der Membranbauten unterscheidet man fünf Grundlegende Bindungsarten:

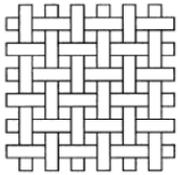
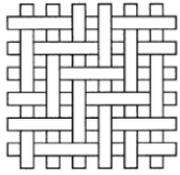
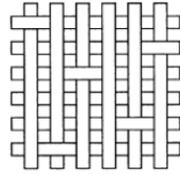
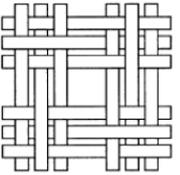
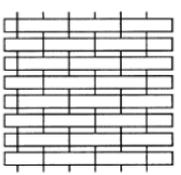
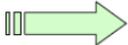
Leinwandbindung	Köperbindung	Satinbindung	Scheindrehergewebe	Gelege
				
Hohe Faserumlenkung		Verbesserte Verformbarkeit, Festigkeits- und Steifigkeitswerte		Geringe Faserumlenkung

Abbildung 31 Häufige Gewebetypen

Am häufigsten zum Einsatz kommt die Leinwandbindung, da die Konstruktion recht simpel ist und eine hohe Formbeständigkeit entsteht, welche vor allem bei ebenen und leichten Krümmungen sinnvoll ist. Ein Sondertyp der Leinwandbindung ist die Panamabindung, bei der Kett- und Schussfäden aus jeweils zwei Fäden anstatt der herkömmlichen Einzelfäden bestehen.

⁴³ Vgl. Gengnagel 2005, 29.

Seit Kurzem kommen auch sogenannte triaxiale Gewebe zum Einsatz. Hier werden drei Fäden in unterschiedlicher Winkelanordnung verwebt, wodurch unter anderem die Weiterreißfestigkeit, welche nach wie vor ein großes Problem des Membranbaus darstellt, verbessert wird.

Auch Rip-Stop Gewebe verbessern die Weiterreißfestigkeit, allerdings durch Einbringen stärkerer Kett- und Schussfäden in bestimmten Abständen, was zu einem Bremsen des Risses führt.⁴⁴

Ein wichtiger Punkt bei der Konstruktion ist das Beachten der Ausrichtung von Kett- und Schussrichtung in der verbauten Membran. Die Richtungen stehen in direktem Zusammenhang mit dem Spannungs-/Dehnungsverhalten des Materials.⁴⁵

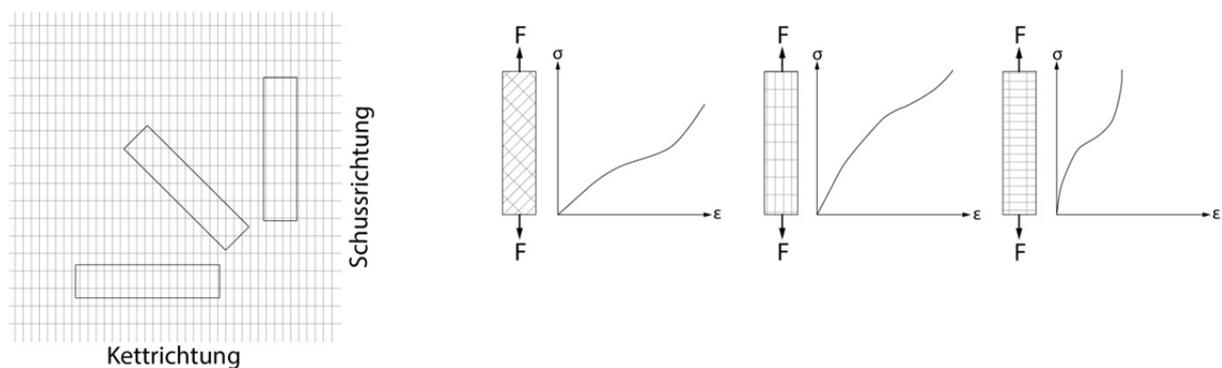


Abbildung 32 Zusammenhang Spannung/Dehnung und Gewebeausrichtung

⁴⁴ Vgl. Gengnagel 2005, 30.

⁴⁵ Vgl. Seidel 2008, 49.

2.5.1.3 Beschichtungen

Zum Schutz des Gewebes besitzen Gewebemembranen eine meist beidseitig aufgetragene Beschichtung aus Thermoplasten (PVC, PTFE) oder Elastomeren (Silikon, Gummi, Kautschuk, Polyurethane). Diese Schutzschicht verhindert ein Beschädigen der empfindlichen Gewebefasern durch Verwitterung (Feuchtigkeit, Pilze, Mikroben) oder Zersetzung durch Chemikalien oder UV-Strahlung. Zudem haben die Beschichtungen großen Einfluss auf das Anschmutzverhalten, die Brandbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften.⁴⁶

Eine wichtige Rolle spielen die aufgetragenen Kunststoffe ebenfalls bei der Fügung der Membran. Unbeschichtete Gewebe können lediglich an den Stößen vernäht werden. Durch die zusätzliche Schicht wird es jedoch möglich, sie zu schweißen oder zu kleben, was das Problem der Durchlöcherung mit Nadel und Faden löst.

Es folgt eine kurze Übersicht der üblichsten Beschichtungsmaterialien:

PVC

Polyvinylchlorid ist die preisgünstigste Beschichtung. Sie ist durch Zugabe von Pigmenten in vielen unterschiedlichen Farben herstellbar. Da reines PVC erst mit Weichmachern, Fungiziden, Stabilisatoren und anderen Hilfsstoffen versetzt werden muss, ist es ökologisch eher bedenklich. Das Recycling gestaltet sich aufwändig und es kommt zu einem Downcycling. Die PVC Schicht ist anfällig gegenüber UV-Strahlung, daher wird eine Deckschicht aus Lacken oder Laminaten aufgetragen.⁴⁷

⁴⁶ Vgl. Seidel 2008, 37 f.

⁴⁷ Vgl. Ebda., 38 ff.

PTFE

Polytetrafluorethylen (bekannt als Teflon®) wird ähnlich wie die Glasur in der Keramikherstellung in einer wässrigen Lösung aufgebracht und anschließend bei 327°C (Schmelzpunkt von PTFE) gesintert. So entsteht durch mehrere Wiederholungen eine ausreichend dicke Schicht. PTFE selbst ist UV-beständig, feuerbeständig und stark antiadhäsiv. Eine Deckschicht wird hier hauptsächlich zum Verbessern der Schweißbarkeit aufgetragen. Ein Nachteil besteht darin, dass durch das Herstellungsverfahren Gewebe mit niedrigerem Schmelzpunkt als PTFE nicht verwendet werden können. Das günstige Polyestergewebe fällt somit weg.⁴⁸

Silikon

Silikone haben im Gegensatz zu den meisten anderen Beschichtungen eine gute Umweltverträglichkeit, zeigen ein vorteilhaftes, relativ ungiftiges Brandverhalten und sind ähnlich PTFE sehr witterungsbeständig. Sie sind jedoch im Vergleich zu den Thermoplasten nicht schweißbar und müssen deshalb geklebt werden. Die Klebeverbindungen zeigen eine wesentlich geringere Stabilität als Schweißverbindungen.⁴⁹

⁴⁸ Vgl. Seidel 2008, 40 f.

⁴⁹ Vgl. Ebda., 41 f.

2.5.1.4 Werkstoffe

Mittlerweile bietet der Markt eine sehr große Auswahl an verschiedensten Gewebemembranen. Die häufigsten sind das PVC-beschichtete Polyestergewebe und Gewebe mit PTFE-Beschichtung. Hier angeführte Beispiele sind die Gewebe der Firma CENO Membrane Technology GmbH, einer Tochtergesellschaft der Sattler AG. Das in Graz gegründete Unternehmen ist seit über 140 Jahren tätig und gehört zu den weltweit führenden im Bereich technischer Textilien.

PVC-beschichtetes Polyestergewebe

Grundgewebe	Polyester
Beschichtungswerkstoff	Kunststoff Acryl-, Fluorpolymer- und PVDF-Lackierung
Gesamtgewicht (g/qm)	von 800 - 1450
Reißfestigkeit /N/5cm)	3000/3000 - 9800/8300
Knickbeständigkeit	gut
UV-Beständigkeit	gut
Schmutzabweisendes Verhalten	gut
Transluzenz	ca. 5 - 15 %
Farbe	Standard weiß, Farbauswahl möglich
Brandklasse	DIN 4102 B1 schwer entflammbar EN 13501-1 B - s", d0

Glasgewebe mit PTFE- oder Silikonbeschichtung

	PTFE-beschichtetes Glasgewebe	Glasgewebe mit Sili- konbeschichtung
Grundgewebe	Glas	Glas
Beschichtungswerkstoff	PTFE	Silikon
Gesamtgewicht (g/qm)	ca. 800 - 1550	1165
Reißfestigkeit (N/5 cm)	4200/4000 - 8000/7000	3000 - 5000
Knickbeständigkeit	ausreichend	gut
UV-Beständigkeit	sehr gut	gut
Schmutzabweisendes Verhalten	sehr gut	gut
Transluzenz	ca. 8 - 15 %	18 - 38 %
Farbe	Nach Ausbleichen: weiß -eingeschränkte Farbauswahl auf Anfrage möglich	weiß Farbauswahl möglich
Brandklasse	DIN 4102 A2 nicht brennbar	DIN4102 B1 Class 0 (UK)

2.5.2 Folien

Folien sind im Gegensatz zu technischen Textilien keine Composit-Materialien. Sie bestehen aus einer dünnen, homogenen Schicht eines bestimmten Materials und besitzen weitestgehend isotrope Eigenschaften. Aufgrund der geringeren Reißfestigkeit werden Folien häufig für kleinere Strukturen bzw. Einzelelemente angewendet, wie zum Beispiel pneumatische Kissen. Mit der Möglichkeit eines hochtransparenten Werkstoffes finden sie häufig überall dort Anwendung, wo ein hoher Tageslichteintrag gewünscht wird (z.B.: Gewächshäuser, Hallenbäder, usw.).

Die Herstellung unterscheidet sich grundlegend von der eines technischen Textils. Der als Monomer vorliegende Rohstoff bildet im Zuge einer Polymerisation (z.B.: Kettenpolymerisation, Polyaddition, usw.) langkettige Polymere (Makromoleküle). Diese Polymere werden zu Granulat weiterverarbeitet und im Anschluss in einer Schnecke aufgeschmolzen und zu einem Formgebungswerkzeug befördert. In der Folienherstellung wird häufig mit einem sogenannten Schmelzkalender gearbeitet. Hierbei wird das geschmolzene Material über mehrere Kalenderwalzen zu einer dünnen Folie ausgewalzt. Durch die Verwendung von speziellen Prägwalzen kann der Folie eine bestimmte Oberflächenstruktur aufgewalzt werden.⁵⁰

⁵⁰ Vgl. Seidel 2008, 43-46.

Im Membranbau hat sich in den letzten Jahren der Einsatz von ETFE-Folie (Ethylen-Tetrafluorethylen) immer mehr durchgesetzt. Es ist höchst antiadhäsiv und selbstreinigend, zeigt ein gutes Brandverhalten und ist recycelbar. Zudem besitzt es eine Transparenz bis zu 97 Prozent und ist damit transparenter als Glas, gleichzeitig auch kostengünstiger. ETFE besitzt eine für Folien sehr hohe Weiterreißfestigkeit und ist somit etwa ein Sechstel so reißfest wie bereits einfache PVC-beschichtete Polyestergewebe. Durch Einfärben oder Bedrucken der Folien können gestalterische Wünsche erfüllt werden. Durch Aufbringen opaker Bereiche ist ein Sonnenschutz realisierbar.

ETFE	
Basismaterial	Fluorpolymer
Gesamtgewicht (g/qm)	175 (bei 100 µm)
Reißfestigkeit (N/mm ²)	Längsrichtung 51 - 58 Querrichtung 53
UV-Beständigkeit	sehr gut
Schmutzabweisendes Verhalten	sehr gut
Transluzenz	ca. 90 %
Farbe	hoch transparent Bedrucken und Einfärben möglich
Brandklasse	DIN 4102 B1 schwer entflammbar EN 13501-1 / B-s1,d0

2.6 Details

Bei der Beschreibung der Konstruktionsdetails beschränkt sich diese Arbeit auf die Ausführung der verschiedenen Füge-techniken und die Ausbildung der Membranränder. Die Arten des Primärtragwerkes sind für jedes Projekt unterschiedlich und werden im Kapitel 5 anhand von Beispielen kurz aufgezeigt, aber nicht im Detail behandelt.

Wichtige Punkte im Membranbau sind die Füge-techniken und die Verbindung der Membranränder mit dem Tragwerk.

2.6.1 Füge-techniken

Füge-techniken bezeichnen die Möglichkeiten, die Membranstreifen miteinander zu verbinden, wobei man zwischen lösbaren und nichtlösbaren Verbindungsarten unterscheidet. Die Verbindungen müssen in der Regel luft- und wasserdicht ausgeführt werden und weisen aufgrund der höheren Materialstärke größere Steifigkeiten auf.⁵¹

2.6.1.1 Lös- bare Verbindungen

Wenn die einzelnen Membranteile zu groß oder zu schwer sind, um sie vorzumontieren, werden lös- bare Verbindungen vorbereitet und die Teile auf der Baustelle zusammengefügt. Die Verbindungselemente müssen im Stande sein, die Kraftübertragung von einem zum anderen Membranstreifen zu gewährleisten. Grob unterscheidet man zwischen geschnürten und geschraubten Verbindungen.

Geschraubte Verbindungen

Geschraubte Verbindungen sind für hohe Belastungen ausgelegt und erreichen ähnliche Festigkeiten wie Schweißnähte. Die zwei üblichen Ausführungen sind der Klemmplattenstoß und die Kederschiene.

⁵¹ Vgl. Gengnagel 2005, 38.

Beim Klemmplattenstoß wird die Membran am Rand um einen Keder (Kunststoff oder nicht rostendes Metall) gelegt und jeweils zwei gegenüberliegende Ränder werden zwischen zwei Aluminium oder Edelstahlplatten geklemmt, welche miteinander verschraubt werden.

Der Keder dient dabei dem Verhindern des Herausrutschens der Membran aus den Klemmplatten.

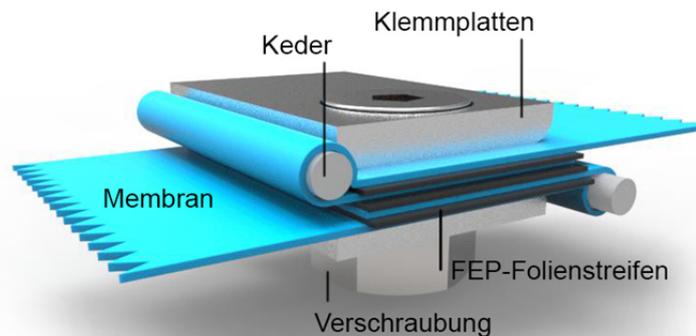


Abbildung 33 Klemmplattenstoß

Eine Kederschiene ist ein Profil aus Aluminium, Edelstahl oder Kunststoff, welches Schlitz für das Einführen der Membran samt Keder besitzt. Je nach Profilaufbau können bis zu vier Membranen in einer Kederschiene zusammengeführt werden.

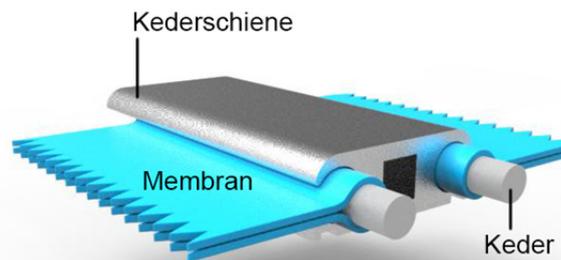


Abbildung 34 Kederschiene

Problematik der geschraubten Verbindungen ist die Montage unter Spannung. Die Gewebeflächen müssen schrittweise vorgespannt werden, um die Verbindung zu ermöglichen, was mitunter mit viel Arbeitsaufwand verbunden ist. Wird die Membran nicht ausreichend gespannt, kann es zu Faltenbildungen kommen. Weiters stellen Klemmplatten und Kederschien ein steifes Element innerhalb des flexiblen Systems dar. Im Bereich von Krümmungen müssen die Verbindungen in kürzeren Teilstücken montiert werden, um der Kurve folgen zu können.⁵²

⁵² Vgl. Seidel 2008, 79.

Geschnürte Verbindungen

Bei weniger stark belasteten Konstruktionen wird häufig auf geschnürte Verbindungen zurückgegriffen. Diese sind schnell und einfach in der Handhabung und erlauben mehr Spielraum bei der Montage. Die einfachste Variante ist dabei eine Zickzackschnürung, welche jedoch auch die geringste Festigkeit und Dichtheit aufweist. Dabei wird die Membran über einen Keder gelegt und so nah an diesem wie möglich wird im Anschluss eine Öse gestanzt. Die Membranflächen können dann mit einer Schnur (meist Polyestersehnüre oder Kunststoffüberzogene Stahlkabel) zusammengezurt werden.⁵³

Die gängigste Form für dichte Schnürungen ist der Kettschnürstoß, bei welchem die Membranlagen übereinander liegen und die Schnur in Schleifenform durch jede Öse gezogen wird. Die dabei ineinandergreifenden Schleifen erhöhen die Tragfähigkeit der Verbindung und sind schnell lösbar. Geschnürte Verbindungen können die Membranbewegungen gut aufnehmen und bieten die Möglichkeit eines schrittweisen Spannsens oder Nachlassens der Verbindung. Die ungeschützten Stöße sollten mit einem Membranstreifen vor Witterung geschützt werden.

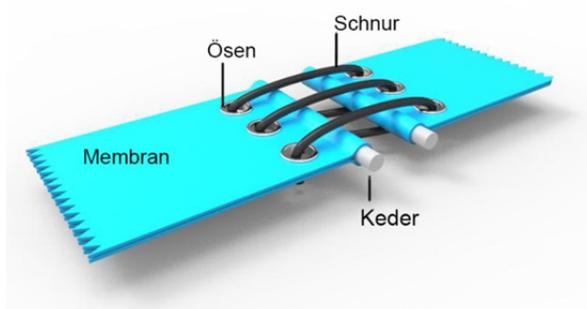


Abbildung 35 Zickzackschnürung

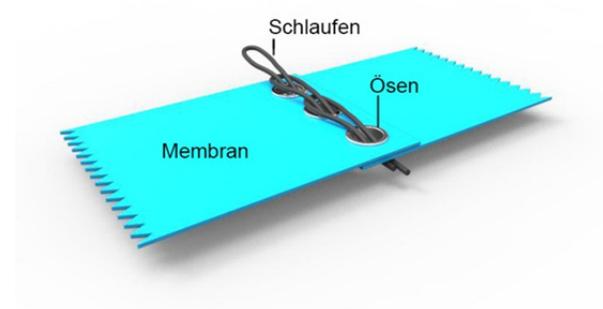


Abbildung 36 Kettschnürstoß

⁵³ Vgl. Seidel 2008, 80.

2.6.1.2 Nichtlösbare Verbindungen

Nichtlösbare Verbindungen werden in der Regel noch im Werk hergestellt und zählen zu den festesten Verbindungsarten. Man unterscheidet dabei genähte, geschweißte, genähte und geschweißte (Kombinaht) und geklebte Verbindungen. Ziel ist es, unabhängig von der Verbindungsart die Kräfte in einer Membranebene kraftschlüssig (bei Geweben auch stoffschlüssig) auf die benachbarten Membranteile überzuleiten. Die nichtlösbaren Verbindungen sind im Gegensatz zu den vorher angeführten lösbaeren Verbindungen biegeweich und können die Deformationen der Membrankonstruktion besser aufnehmen. Dennoch bilden die Verbindungsstellen eine Unstetigkeit in der sonst eher homogenen Spannungsverteilung. Diesem Umstand ist bereits bei der Planung Rechnung zu tragen.⁵⁴

Nähte

Nähte sind die älteste Art Membranen zu verbinden. Dieses Verfahren wird nur für Gewebemembranen angewendet und findet heute nicht mehr viel Verwendung. Hauptproblem der genähten Verbindung ist das Durchlöchern der Membran mit einer Nadel, was zu Undichtigkeiten führt. Im Bereich der pneumatischen Anwendungen wird auf das Nähen grundsätzlich verzichtet, da die Verbindungen nicht luftdicht hergestellt werden können. Zum Schutz der Nähte wird häufig im Zuge der Montage ein Abdichtungsband über die Stöße geschweißt, was zumindest eine gewisse Wasserdichtheit gewährleistet. Im Zeltbau, vor allem in den Ecken und Randbereichen oder beim Anbringen von Gurten, kommt die Fadennaht auch heute fallweise noch zum Einsatz. Gängige Nahtarten sind die Flachnaht (einfachste Variante), die Saumnaht und die Kappnaht (stabilste Variante). Der Stich kann in allen Fällen wahlweise als Zickzack-, Stepp- oder Kettstich durchgeführt werden.⁵⁵

⁵⁴ Vgl. Seidel 2008, 73.

⁵⁵ Vgl. Grunwald 2007, 33 f.

Klebeverbindung

Bei geklebten Membranen entsteht eine dichte, schweißnahtähnliche Verbindung mit geringerer Festigkeit. Diese Variante findet ausschließlich Anwendung bei silikonbeschichteten Geweben. Silikon eignet sich nicht zum Schweißen, weshalb die Teile, ähnlich dem Vulkanisieren von Gummi, erst durch Lösemittel angelöst und anschließend mit vernetzendem Kleber verpresst werden. Wenn beim Klebprozess keine Fehler gemacht werden, erreichen die entstandenen Klebenähte annähernd die Festigkeiten des Grundmaterials.⁵⁶

Schweißverbindungen

Schweißnähte sind mittlerweile die häufigste Verbindungsart für Membranwerkstoffe. Dabei werden die unterschiedlichen Membranteile mittels Erhitzen des Materials miteinander verschmolzen. Dies geschieht ohne Einsatz von Zusatzstoffen.

Der Schweißvorgang wird meist noch im Werk durchgeführt und funktioniert nur bei thermoplastischen Kunststoffen, welche aber als Beschichtung bei fast jedem Membranmaterial zum Einsatz kommen. Es existieren verschiedene Verfahren zum Schweißen von Kunststoffen.⁵⁷

⁵⁶ Vgl. Seidel 2008, 78.

⁵⁷ Vgl. Ebda., 73.

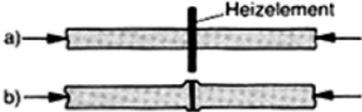
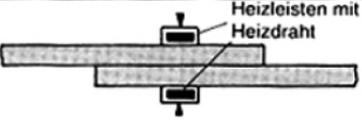
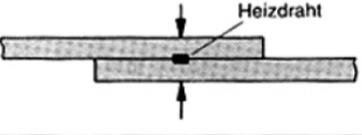
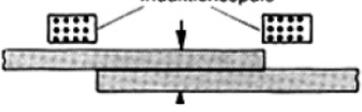
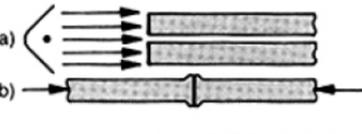
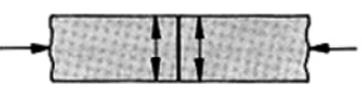
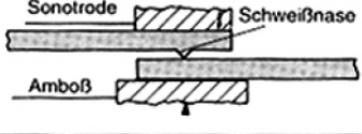
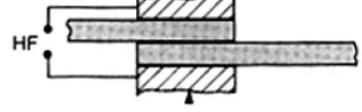
Verfahren	Prinzipdarstellung	Kurzbeschreibung
Heizelementschweißen		a) Die Fügezone wird durch Kontakt an heißen Flächen erwärmt. b) Nach Entfernen des Heizelementes werden sie unter Druck gefügt.
Wärmeimpulsschweißen		Die Erwärmung der Schweißnaht geschieht durch das Material hindurch mit elektrisch geheizten Heizleisten. – Nur für Folien geeignet –
Heizdraht-Widerstandsschweißen		In die Fügezone eingelegter Draht wird mit elektrischem Strom oder auch induktiv erwärmt. Draht verbleibt nach dem Schweißen im Schweißgut.
Induktionsschweißen		Metallstaubgefülltes Schweißhilfsmittel wird induktiv im HF-Magnetfeld erwärmt. – EMA-Schweißen –
Strahlungsschweißen		a) Die Fügeflächen werden mit Strahlung (Dunkelstrahler, Hellstrahler, Laser) erwärmt und b) unter Druck zusammengefügt.
Reibschweißen		Erwärmung der Fügeflächen durch Reibung aneinander unter gleichzeitiger Druckeinwirkung. – Rotation, Vibration –
Ultraschallschweißen		Mechanische Ultraschallschwingungen unter statischem Druck führen zu innerer, teils äußerer Reibung und zur Erwärmung.
Hochfrequenzschweißen		Erwärmung im elektrischen Hochspannungswechselfeld ($f = 27,12 \text{ MHz}$) durch dielektrische Verluste

Abbildung 37 Übersicht der Schweißverfahren

Das Hochfrequenzschweißen hat sich weitestgehend durchgesetzt und führt zu sauberen Nähten mit Festigkeiten bis zu 90% der Materialfestigkeit. Nicht in Abb. 37 angeführt sind zwei weitere Verfahren. Zum einen wäre das Laserstrahlschweißen zu erwähnen. Dies ist ein relativ neues Verfahren, bei dem der Deckkunststoff laserdurchlässig sein muss und der Laser durch diese erste Schicht die zweite aufschmilzt, wodurch es zum Verbund beider Schichten kommt.

Die andere Variante ist das Heißgas- oder Warmgasschweißen. Bei dieser Methode werden die beiden Lagen der Naht aufgeklappt und mit heißer Luft erwärmt. Ist die Schweißtemperatur erreicht, werden die Lagen wieder zusammengeklappt und mit einer Walze verpresst. Diese Schweißmethode ist auch auf der Baustelle anwendbar.

Wichtig bei allen Schweißvorgängen ist, dass im Vorfeld die Decklackierung der Membran (sofern vorhanden) abgeschliffen wird, da diese einen höheren Schmelzpunkt als der Kunststoff aufweist und so ein sauberes Verschweißen verhindert.

Eine weitere Besonderheit von Schweißnähten ist das hitzebedingte Zusammenziehen des Kunststoffes, wodurch sich die Nahtlänge ändert. Dieses Phänomen muss entweder durch Einplanung der Verkürzung oder durch Vorspannung beim Schweißvorgang kompensiert werden.⁵⁸

Kombinähte

Hierbei werden gleichzeitig genähte und verschweißte Verbindungen eingesetzt. Diese Variante kommt zum Einsatz wenn eine höhere Festigkeit erzielt werden muss, ist aber teuer in der Durchführung. Weiters muss auf die Reihenfolge der einzelnen Verfahren geachtet werden, da die Festigkeiten dadurch variieren. Wird erst genäht und im Anschluss über diese Naht geschweißt, lockert sich der Faden durch das Abnehmen der Membranstärke unter der Hitzeeinwirkung. Somit trägt der Faden erst zum Lastabtrag bei, wenn die Schweißnaht weit genug gedehnt wird. Andererseits führt ein nachträgliches Nähen durch die Perforation mit der Nadel zur Schwächung einer Schweißnaht und es entstehen Undichtigkeiten, aber dafür tragen Schweißnaht und faden gleichzeitig Lasten ab.⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Seidel 2008, 73-77.

⁵⁹ Vgl. Grunwald 2007, 34.

2.6.2 Randausbildung

Die Membranränder bilden den Übergang der Membran zum Primärtragwerk und müssen die Lasten in dieses weiterleiten können. Die Ränder können steif oder weich ausgeführt werden und bestimmen mit ihrer Position grundlegend die Geometrie der Membran. Der Anschluss des Membranrandes an die Randkonstruktion kann starr, aber auch in Längsachse verschiebbar oder mit Spannfeder hergestellt werden. Vor allem bei großen Membranflächen sollte der Anschluss leicht montierbar sein, da die Spannungen über weitgespannte Flächen mit jeder Randeinspannung steigen. Viele Randkonstruktionen bieten zudem die Möglichkeit einer Nachspannung der Membran, was sowohl bei der Montage, als auch im späteren Betrieb von Vorteil ist. Bis zu einem gewissen Grad nimmt die Spannung der Kunststoffhaut durch Kriechen ab und verliert Vorspannung. Das kann durch nachträgliches Spannen kompensiert werden.⁶⁰

⁶⁰ Vgl. Seidel 2008, 81 ff.

2.6.2.1 Weiche Ränder

Der biegeweiche Rand wird aus einer Membrantasche und einem biegeweichen Zugelement gebildet. Dabei spannt das Zugelement die Membran zwischen zwei Fixpunkten auf. Das Zugelement bildet meistens ein Stahl- oder Polyesterseil oder ein Gurt. In Ausnahmefällen können auch Klemmplatten den Rand der Membran einspannen und die Platten selbst mit einem Spannseil verbunden werden. Dies ermöglicht das Anbringen einer Nachspannvorrichtung zwischen Seil und Klemmplatten.⁶¹

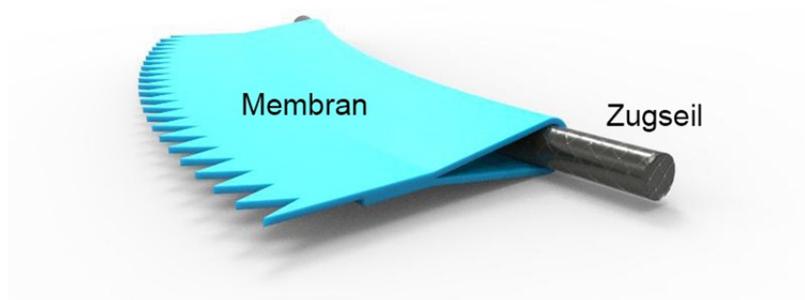


Abbildung 38 Membrantasche mit Zugseil

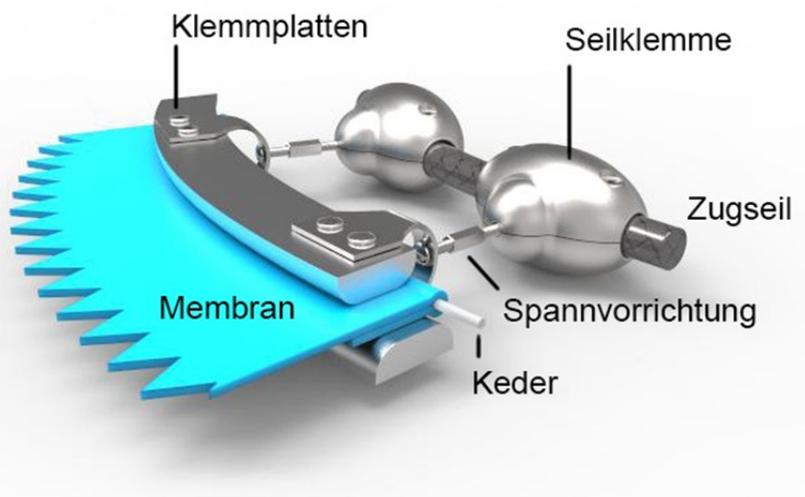


Abbildung 39 Geformte Klemmplatten mit vorgesetztem Spannseil und Nachspanner

⁶¹ Vgl. Seidel 2008, 84 ff.

2.6.2.2 Biegesteife Ränder

Eine biegesteife Randeinfassung ist meist fest mit der Primärstruktur verbunden und erlaubt, wenn überhaupt, nur eine Bewegung der Membranränder in Längsrichtung. Die häufigste Variante der harten Randausbildung ist der Klemmplattenstoß, welcher auch bei der Verbindung zwischen den einzelnen Membranteilen genutzt wird. Die Unterlage der Klemmplatte bildet dabei nicht nur das Gegenstück zur Verschraubung mit der oberen Platte, sondern gleichzeitig die kraftschlüssige Verbindung mit dem Primärtragwerk (Abb. 40).

Auch Kederschienen können als Randausbildung verwendet werden. Sie haben den Vorteil, dass die Membran in Längsrichtung beweglich bleibt und bei Auftreten einer tangentialen Last keine Falten wirft, wie es bei einer Einspannung durch Klemmplatten möglich wäre. Eine solche Faltenbildung ist nicht nur ein ästhetisches Problem, sondern kann auch zu lokaler Überbeanspruchung und Beschädigung der Membran führen.⁶²

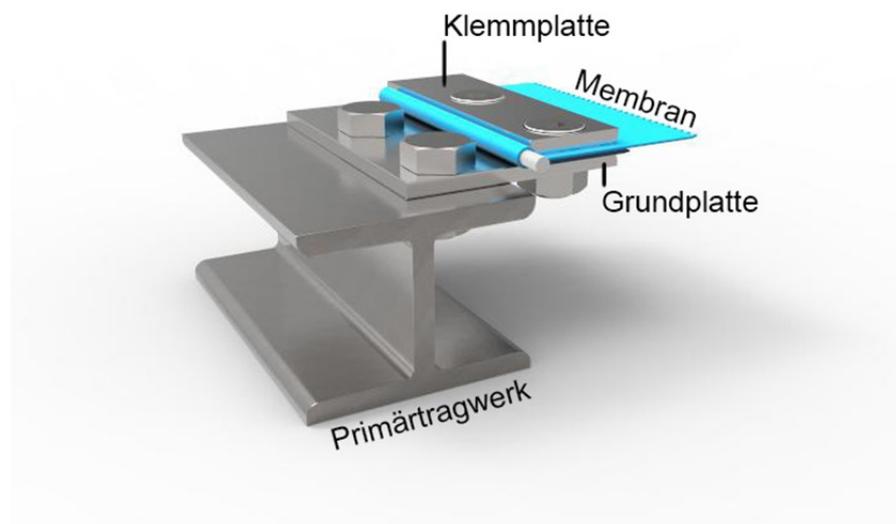


Abbildung 40 Klemmplattenstoß als Randausbildung

⁶² Vgl. Seidel 2008, 87 f.

Eine Sonderform der Kederschiene bildet die Überdachung des Eingangsbereiches des Bundeskanzleramts in Berlin. Die Schienen sind an den Eckpunkten biegesteif verbunden und mit Seilen abgespannt. Gleichzeitig besitzen die Kederschiene eine doppelte Krümmung, um der Membran folgen zu können, was einen erheblichen Produktionsaufwand mit sich brachte. Durch Abstandhalter zwischen den Schienenhälften wird die Membran nicht geklemmt und kann sich in Längsrichtung bewegen (Abb. 41).⁶³

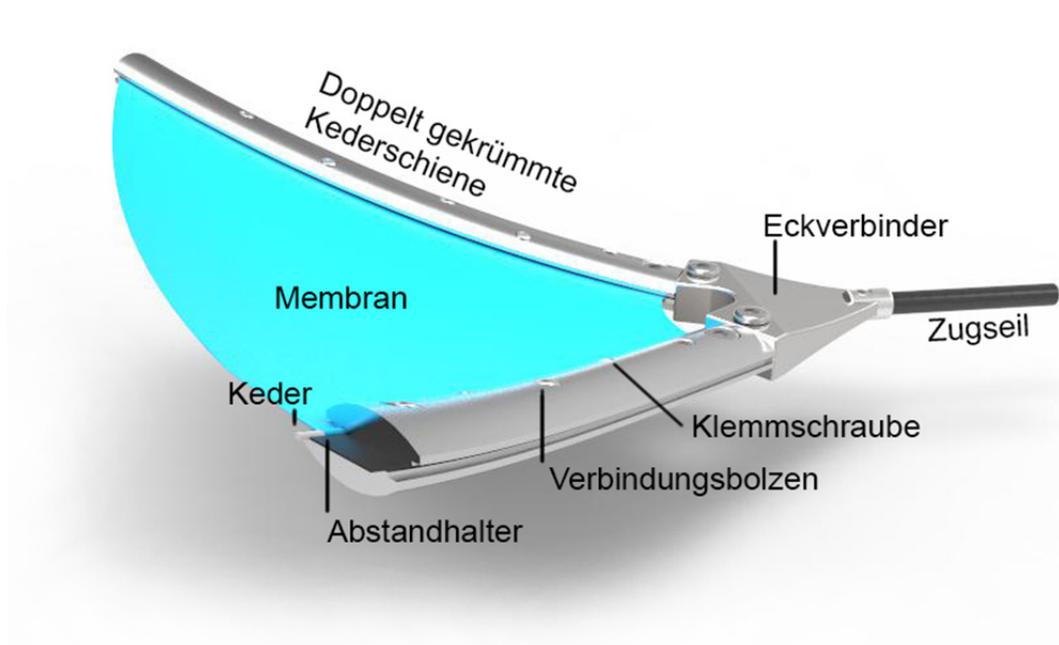


Abbildung 41 Sonderform der Randausbildung mit Kederschiene

⁶³ Vgl. Seidel 2008, 88.

2.7 Physikalische Eigenschaften

Die Eigenschaften von Membranen haben sich im Lauf der Geschichte immer weiter verbessert. Heute gibt es viele verschiedene Produkte für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete. In diesem Kapitel sollen die bauphysikalischen Eigenschaften des Membranbaus genauer untersucht werden.

2.7.1 Wärmeschutz

Wärmeschutz beschreibt die Fähigkeit des Materials, den Wärmefluss durch die Schichten zu behindern bzw. zu bremsen. Umgangssprachlich spricht man hier auch vom Dämmwert. Der sogenannte Wärmedurchgangskoeffizient wird mit dem U-Wert spezifiziert, welcher die Einheit W/m^2K hat. Er beschreibt also den Wärmestrom pro Quadratmeter Fläche und pro Kelvin Temperaturunterschied beider Seiten.

Der Wärmeschutz gestaltet sich im Membranbau meistens sehr schwierig und stellt eines der größten Probleme von geschlossenen Hüllen dar. Wird eine Membran als Sonnensegel oder Überdach genutzt, ist eine Wärmedämmung ohnehin nicht nötig. In geschlossenen Systemen, wie einer Traglufthalle oder hinter Membranfassaden, entstehen allerdings sehr hohe Temperaturen bei direkter Sonneneinstrahlung. Dadurch kommt es zum Erwärmen des Innenraums weit über ein angenehmes Raumklima hinaus. Im Winter kühlen einfache Membranstrukturen sehr schnell aus und es kommt zu Kondenswasserbildung an der Innenseite. Abhilfe schaffen Lüftungssysteme und mehrschichtige Membranen.⁶⁴

Bei mehrschichtigen Aufbauten liegt ein geeignetes Dämmmaterial auf der untersten Ebene und wird auf dieser befestigt. Oft kommen Dornplatten zum Einsatz, die ein Verrutschen der Dämmschicht verhindern sollen. Um anfallendes Kondensat abzutransportieren, welches sich bei mehrschichtigen Systemen im Zwischenraum bildet, sind meist Luftschichten über der Dämmebene eingeplant. Im Bereich der pneumatischen Strukturen gestaltet sich der Wärmeschutz meist etwas unkomplizierter, da die luftgefüllten Systeme bereits eigene wärmedämmende Eigenschaften besitzen. Vor allem Pneukissen sind hier zu erwähnen, welche in 3-lagiger Ausführung oft gute U-

⁶⁴ Vgl. Moro Bd.3 2009, 632.

Werte besitzen. Ein wichtiger gestalterischer Aspekt einer Dämmung im Membranbau ist, dass eine Membran meist transluzent oder gar transparent ist. Eine Dämmschicht kann somit diese Eigenschaft eliminieren, bzw. den unschönen Effekt haben, dass sich die Dämmmaterialien durch Schatten abzeichnen. Es ist daher von großer Wichtigkeit, stets sauber zu arbeiten und exakte Zuschnitte durchzuführen. Deshalb sind auch die pneumatischen Kissen sehr beliebt, da sie Wärmeschutz gewährleisten, aber gleichzeitig ihre hohe Lichtdurchlässigkeit bewahren. So ist es selbst in kaltem Klima möglich, eine Balance zwischen Wärmeverlusten und Wärmegewinn aus solarem Eintrag zu schaffen. Die hohe Transparenz trägt sozusagen zum Treibhauseffekt bei, was vor allem für Nutzungen wie Hallenbäder und botanische Gärten interessant ist.⁶⁵

Ein aktueller Trend im Bereich der Membrandämmung sind hybride Schichtungen anstatt zwei oder mehr Lagen mit großem Abstand für die Dämmebene entwickelt man Kombimembranen, in die eine Wärmedämmung bereits integriert ist. Dabei sind diese Spezialmembranen oft nicht viel dicker als eine einlagige Membran.

Ein Beispiel wäre eine Dämmlösung der Membranengineering Flontex GmbH mit Sitz in der Schweiz. Ihre Lösung beruht auf einem dreischichtigen Aufbau. Zwischen zwei PTFE-Glasgitter-Gewebemembranen liegt eine Schicht aus einem lockeren Glasfaservlies. Damit wird ein U-Wert von 1,1 W/m²K erreicht. Dieser Wert liegt sogar etwas unterhalb von handelsüblichen Fenstern mit Wärmeschutzverglasung. Zudem bleibt eine Lichtdurchlässigkeit von über 50% erhalten.

Die deutsche Firma aeroix GmbH ist hauptsächlich in der Luftfahrt tätig, beschäftigt sich jedoch seit Kurzem mit technischen Textilien und schuf sich somit ein zweites Standbein. Sie entwickelte den Dämmstoff mit der geringsten Dichte weltweit. Das als aerofabrix [iso] bezeichnete Material ist ein Membranbaustoff mit vielen dünnen Schichten. Zwischen jeder Schicht befinden sich rasterförmig angeordnete aufgeflockte Fasern, welche Abstandshalter zur nächsten Schicht darstellen und somit einen Luftspalt bilden.

⁶⁵ Vgl. Moro Bd.3 2009, 636-639.

Diese Membran findet bereits in der Ballonfahrt Anwendung und reduziert den Treibstoffbedarf um beeindruckende 50%. Die ersten Versuche im Membranbau finden bereits statt und man kann auf die weitere Entwicklung gespannt sein.



Abbildung 42 Schichtaufbau des aerofabrix[iso]

2.7.2 Brandverhalten

Das Brandverhalten von Membrankonstruktionen ist etwas schwerer zu beurteilen. Zwar sind die Materialien meist als schwer entflammbar oder nicht brennbar einzustufen, also werden in den europäischen Brandschutzklassen in Klasse B1 beziehungsweise A1/A2 eingeordnet, aber sofern sie als tragende Bauteile festgelegt sind, wird es problematisch. Durch die Hitzeeinwirkung lösen sich die Schweißnähte und die tragende Konstruktion kollabiert. Abgesehen von Traglufthallen sind Membranen im Normalfall keine tragenden Elemente. Im nichttragenden Einsatz bieten sich viele Vorteile. Zum einen brennen die Materialien nur unter wenig Rauchentwicklung und sind meistens nicht tropfend, zum anderen können Membranen auch als Rauchabzug genutzt werden - da sich die Nähte bei Erhitzung lösen, bilden sich Öffnungen durch die Rauchgase abziehen können. Weiters bilden die dünnen Hüllen kein Hindernis in der Brandbekämpfung. Die Feuerwehr kann mit einfachsten Mitteln Öffnungen schaffen und durch das geringe Gewicht besteht keine Gefahr herabstürzender Bauteile. Aufgrund der schweren Entflammbarkeit brennen die meisten Membranwerkstoffe nur unter direkter Flammeneinwirkung und erlöschen wieder, sobald kein direkter Kontakt zu Flammen mehr besteht.⁶⁶

⁶⁶ Vgl. Grunwald 2007, 51 f; Moro Bd.3 2009, 634 f; Zhang 2007, 21 f.

2.7.3 Kondensation / Feuchteschutz

Ein problematischer Nebeneffekt des niedrigen Wärmeschutzes ist die Bildung von Kondenswasser. Vor allem in kühlen Nächten legt sich die Luftfeuchte an die Innenseite der Membran an. Dieses Phänomen trifft in erster Linie auf einschichtige Membranbauten zu. Abhilfe schafft die Verwendung einer zweiten Membranlage, da das Kondenswasser dann auf der Unterseite der äußersten Schicht auftritt und von der zweiten Lage abtransportiert werden kann. Aufgrund der hydrophoben Eigenschaften des Materials kommt es recht schnell zu einem Beschlagen mit Feuchtigkeit. Wird der Abtransport des Kondensats nicht korrekt gewährleistet, kann es langfristig zu Schimmel- und Algenbildung kommen.⁶⁷

2.7.4 Akustik und Schallschutz

Durch den extremen Leichtbau einer Membranstruktur ist eine Schalldämmung durch den Einsatz schwerer Massen nicht möglich. Folglich bieten einlagige Bauweisen sehr geringe Schalldämmwerte im Bereich von 5-10dB. Die Lösung ist auch hier das Verbauen mehrerer Schichten. Die Schalldämmung ist dann abhängig von dem Abstand der Lagen und der Beschaffenheit der Füllung im Zwischenraum. Durch mikroperforierte Folien lässt sich die Absorption von Schall wesentlich verbessern, da sich ein Feder-Masse-System einstellt, welches die Schwingungen dämpft.

Die beste Dämmung erreichen pneumatische Systeme. Hier wurden Dämmwerte um 35dB erreicht, sogar 55dB sind mit hohem konstruktivem Aufwand möglich. Ein wichtiger Punkt ist die Übertragung von Körperschall. Dabei wirkt eine vorgespannte Membran wie die Bespannung einer Trommel.

Durch die richtigen baulichen Maßnahmen können Membranbauten allerdings über sehr gute Schall- und Akustikeigenschaften verfügen. Es gibt sogar Konzerthallen aus Membranstoffen.⁶⁸

⁶⁷ Vgl. Moro Bd.3 2009, 633.

⁶⁸ Vgl. Grunwald 2007, 53 ff; Moro Bd.3 2009, 634; Zhang 2007, 24.

2.7.5 Belichtung und Beleuchtung

Ein großer Vorteil und mit ein Grund an der Faszination der Membranen ist der hohe Lichteintrag. Je nach Material sind die Membranen von opak bis transparent ausführbar. Gewebemembranen sind durch die Zwischenlage des gewebten Stoffes nur in transluzenter Form herstellbar. Folien hingegen sind mitunter transparent und erreichen sogar Transmissionswerte von über 95%. Das macht Folienlösungen vor allem für Gewächshäuser und botanische Gärten interessant, denn neben dem hohen Tageslichteintrag entsteht durch die luftdichte Hülle ein Treibhauseffekt. Ein so hoher Grad an Tageslicht kann bei normalen Nutzungen allerdings eher störend sein. Ein Büroarbeitsplatz soll mit 300-500lx beleuchtet werden, wobei ein bewölkter Tag im Sommer hierzulande etwa 5000-20000lx an Beleuchtungsstärke besitzt. Somit ist eine Lichtdurchlässigkeit der Hülle von 5-10% schon ausreichend, um eine angenehme Ausleuchtung zu erreichen. Nachteil einer transluzenten Hülle könnte sein, dass der Blick nach Draußen nicht gegeben ist und die sehr diffuse, flächige Beleuchtung keine wirkliche Raamtiefe durch scharfe Schattenkanten erzeugen kann.

Ein Problem bei hochtransparenten Folien ist die Absorption beziehungsweise die Reflexion des auftreffenden Lichts. Während PVC-Folien eine recht niedrige Transmission besitzen, ist ihre Fähigkeit zu Reflexion recht hoch. Dadurch ist die eingebrachte Wärmestrahlung relativ gering. Bei ETFE verhält es sich genau andersherum. Die Transmissionswerte sind mit bis zu 95% sehr hoch, aber gleichzeitig ist das Reflexionsvermögen quasi nicht vorhanden. Die Wärmestrahlung kann die Folie also beinahe ungehindert durchdringen und den Innenraum stark aufheizen.

Gestalterisch bieten sich im Beleuchtungsbereich viele Möglichkeiten. Bereits minimal transluzente Membranhüllen sind nachts bei Innenbeleuchtung gut erkennbar. Durch die Verwendung von verschiedener Lichttechnik können Membranflächen beliebig gestaltet werden. Die Fassade der Allianzarena in München nutzt beispielsweise die Pnekissen als Pixel der Medienfassade. So können verschiedene Farben und Muster in großen Maßstäben erzeugt werden und die nötige Technik bleibt in den transluzenten Kissen versteckt.⁶⁹

⁶⁹ Vgl. Grunwald 2007, 56-61.

3 Beispiele

In diesem Kapitel werden einige Beispiele für verschiedenste Membrankonstruktionen angeführt. Der Fokus liegt dabei auf aktuelleren Projekten, da sich im Vergleich zu den Bauten der 70er und 80er die Möglichkeiten in Design und Konfektionierung doch stark erweitert haben. Zudem werden hauptsächlich Beispiele gebracht, welche Einfluss auf die Entwicklung des Entwurfes dieser Masterarbeit hatten.

3.1 PlusMinus von Festo



Abbildung 43 Pneumatische Gitterschale

Das Projekt PlusMinus entstand aus einer Kollaboration zwischen dem Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart und dem Bionic Learning Network der Firma Festo. Die als pneumatische Gitterschale bezeichnete Konstruktion kann nach der Differenzierung von Minke als diskontinuierliches Hochdrucksystem verstanden werden. Ziel war es, eine Schalenkonstruktion durch das Ändern der Materialien leichter zu machen ohne das Verhältnis Tragfähigkeit zu Eigengewicht zu verschlechtern. Bei der Umsetzung wurde ein Gitternetz aus 34 Polyamid-Schläuchen hergestellt, wobei nur zwei davon an beiden Enden mit der Sockelkonstruktion verbunden sind. Die übrigen 32 Schläuche hängen mit einem Ende in

der Luft. Mit einer Wandstärke von 55µm sind die Schläuche sehr leicht und werden in dieser Ausführung als Kunstdarm in der Wurstproduktion eingesetzt. Zur Sicherheit wurden die Schläuche zweilagig ausgeführt, da Polyamidfolienschläuche sehr leicht beschädigt werden können. An den Knotenpunkten werden die in weiterer Folge als Pneu bezeichneten Schläuche mit einer Art Druckknopf miteinander verbunden. Diese Verbindungen blockieren eine Verschiebung, eine Drehbewegung ist aber nach wie vor möglich. Die mit Überdruck beaufschlagten Pneus werden nach ihrer Positionierung mit einer Folie auf Ober- und Unterseite abgedeckt und befinden sich somit in einer luftdichten Hülle. Dieser Foliensack wird dann evakuiert, was zu einem Aneinanderpressen der Pneus führt. Damit ist die Schale einigermaßen stabil.⁷⁰



Abbildung 44 Aufbauvorgang

Die Gesamtstruktur setzt sich aus zwei Sockelelementen, einer Gewebemembran als Boden, den Pneus und der Folienhülle zusammen. Bis auf kleinere Hilfsmittel wie Leitern und Montageplattformen sind sonst keine Hilfskonstruktionen für den Aufbau notwendig. In den Sockeln ist die gesamte Technik untergebracht. Von hier aus werden die Pneus mit Luft versorgt, der Druck wird ständig überwacht und die Folien der Hülle werden im Sockel eingespannt und evakuiert. Zusätzlich können die Pneus mit LEDs von den Ankerpunkten aus beleuchtet werden.⁷¹



Abbildung 45 Sockelkonstruktion

⁷⁰ Vgl. Fischer 2011, 2.

⁷¹ Vgl. Ebda., 2 f.

Technische Daten

Rauminhalt ca.: 270,00 m³

Überbaute Fläche: 112,20 m²

Gewicht pro Quadratmeter: 3,78 kg/m²

Gesamtgewicht: 423,20 kg

Transportvolumen: 2,60 m³

Betriebsdruck: 0,40 und 0,65 bar

Erstaufbauzeit: 25,00 h mit Netzkonstruktion

Weiterer Aufbau: 6,00 h

Fazit

Das Projekt PlusMinus war für mich mit ausschlaggebend, um überhaupt erst den Bereich der Membrankonstruktionen genauer zu untersuchen. Anfangs war ich mir noch nicht genau über das Thema meiner Masterarbeit im Klaren, doch mit umfassenden Projektrecherchen kam ich zum überaus spannenden Membranbau. Mein erster Ansatz und das erste Modell basieren auf dem Projekt PlusMinus. Nach weiteren Tests, Berechnungen und FEM-Simulationen kam ich jedoch zu dem Schluss, dass ich umdenken muss. Genauer ist dies in Kapitel 6 erläutert.

PlusMinus hat einen sehr ausgeprägten Prototypencharakter. Das Evakuieren der Hüllfolie erfolgt mit kleinen Axiallüftern im Sockel, weshalb diese immer laufen müssen, da das Vakuum sonst nicht gehalten wird. Zudem haben die Polyamidfolien-schläuche einen sehr großen Knickradius, weshalb sie für viele Freiformen ungeeignet sind. Diese Gitterschale ist nicht ohne Grund nur synklastisch gekrümmt bei relativ flachen Winkeln. Eine Aussage zur Tragfähigkeit kann nicht getroffen werden, da es keine Angaben dazu gibt und auch keine Aufnahmen vorhanden sind, auf denen die Gitterschale irgendeine andere Last außer der Eigenlast trägt.

3.2 Khan Shatyr von Foster + Partners

Das Khan Shatyr oder zu Deutsch „Königliches Zelt“ ist ein Großprojekt in der kasachischen Hauptstadt Astana. Als Multifunktionsgebäude beinhaltet es zahlreiche Geschäfte, Entertainment Center, Wellnessbereiche, Kinos und Restaurants. Sogar ein eigener Aquapark mit 6000m² Fläche und eigenem Wellenbad sind Teil der über 100.000m² großen Anlage. Mit dieser unglaublichen Grundfläche und einer Höhe von 150m bildet das Khan Shatyr das größte Zelt der Welt.⁷²



Abbildung 46 Khan Shatyr beleuchtet

Das Spannende an diesem Projekt ist eigentlich die Überdachung. Gebildet wird die Dachfläche aus einem Seilnetz und pneumatischen ETFE-Kissen. Die gesamte Konstruktion ist nicht biegesteif und bewegt sich bei Wind und Schneelast, diese Bewegungen sind jedoch aufgrund des hohen Gewichts und der Trägheit der großen Fläche sehr gering.

⁷² Vgl. Foster + Partners 2010, 1.

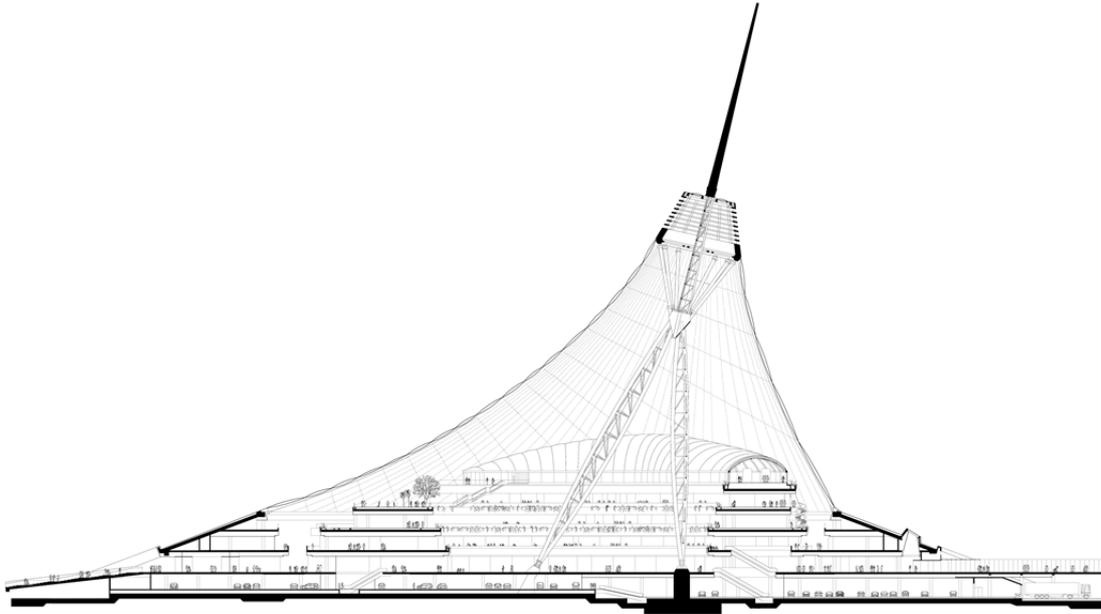


Abbildung 47 Khan Shatyr Schnitt

Im Querschnitt wird ersichtlich, dass die Überdachung nur die äußerste Hülle bildet und die anderen Funktionen ein eigenes Gebäude besitzen. Der Grund für diese doppelte Hülle ist das vorherrschende Klima Kasachstans. Das Temperaturspektrum in Astana reicht von -35°C im Winter bis $+35^{\circ}\text{C}$ im Sommer und ist somit eine Herausforderung für jede Bauaufgabe. Das Zelt dient dazu, ein gemäßigtes Klima im Innenraum zu schaffen. Im Winter werden $+14^{\circ}\text{C}$ im Sommer $+29^{\circ}\text{C}$ bereitgestellt. Durch die enorme Größe existieren auch Laufwege und Möglichkeiten für andere Betätigungen im Freien. Es bildet sich sozusagen ein eigener Freiraum im Inneren. Die eigentlichen Geschäfte und anderen Einrichtungen befinden sich in eigenen Räumen und besitzen ihr eigenes Raumklima. Ein intelligentes Lüftungssystem sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Luftmassen im gesamten Komplex. Kaltluftdüsen an der Basis blasen Frischluft ein, während die Warmluft an der Spitze des Zeltes ausströmt. Die hochgezogene Konstruktion erzeugt einen Kamineffekt am obersten Punkt des Daches, der durch gesteuerte Lüftungsklappen den natürlichen Luftstrom unterstützt. Um eine Eisbildung an der Innenseite im Winter zu verhindern, strömt warme Luft direkt an der Zeltmembran entlang nach oben. Damit wird auch die Entstehung von Kondenswasser unterbunden. Wie im Schnitt in Abbildung 47 zu

erkennen ist, wird die Dachkonstruktion von einem zentralen Element gestützt. Dieses wurde in Form einer Dreibein-Stützstruktur ausgeführt.⁷³

Technische Daten

Überbaute Fläche: 100.000 m²

Gewicht pro Quadratmeter: 23,96 kg/m²

Gesamtgewicht: 2396 t (Dreibeinstütze + Oberer Korb + Seile und Folie + Montage)

Höhe: 150 m

Baukosten: ~260 Mio. US-Dollar

Fazit

Das Khan Shatyr ist neben der Pyramide des Friedens und der Eintracht bereits das zweite Gebäude von Foster + Partners in Kasachstan. Mit seinen gigantischen Ausmaßen bildet das Dach eine der größten Membrankonstruktionen weltweit. Der Aufbau der Gesamtmembran wäre als mechanisch vorgespanntes System zu betrachten, wobei die einzelnen ETFE-Kissen wiederum ein pneumatisches System darstellen. Die Vorzüge des hochtransparenten ETFE werden hier bestens eingesetzt. Der hohe Lichteintrag ermöglicht selbst in kalten Wintern eine angenehme Temperierung und durch die starke antiadhäsive Oberfläche reinigt sich das Dach praktisch von selbst, wodurch teure Reinigungsarbeiten wegfallen. Aufgrund der hohen mechanischen Belastbarkeit und der UV- und Chemikalienbeständigkeit von ETFE werden die Wartungskosten gering gehalten.

⁷³ Vgl. Foster + Partners 2011, 2.

3.3 Airtecture Ausstellungshalle von Festo

Airtecture ist ein Begriff, der sich aus den Wörtern Air (engl. Luft) und Architecture zusammensetzt und steht nicht nur für diese Ausstellungshalle. Vielmehr nutzt Festo den Ausdruck zur Beschreibung eines Gesamtkonzeptes. Ziel ist es, Gebäudeelemente wie Wandscheiben, Säulen und Träger aus luftgefüllten Membranen herzustellen und diese mit Sensoren, Antrieben und Computern auszustatten, um aktiv auf verschiedenste Umwelteinflüsse und deren Änderungen reagieren zu können.⁷⁴



Abbildung 48 Airtecture Ausstellungshalle

Die Airtecture-Halle ist der erste Prototyp einer ganzen Reihe von pneumatischen Gebäuden. Der Architekt Axel Thallemer war verantwortlich für die Planung und den Entwurf der Halle. Aufgrund fehlender Vorgängerbauten galt es, eine grundlegend neue Gestalt zu entwickeln. Einflüsse in den Entwurf hatten jedoch die sehr von Bionik geprägte Firma Festo und der Fuji-Pavillon von Yutaka Murata.

⁷⁴ Vgl. Kronenburg 2008, 60.

Die optisch sonst recht klare Form wird durch große Y-förmige Stützen flankiert, welche auf der Flügelstruktur einer Libelle beruhen. Der eigentliche, nutzbare Raum ist eine rechteckige Fläche mit 375m² Fläche und einer Raumhöhe von 6m. Als Tragsystem kommen 40 der ebenfalls 6m hohen Y-Säulen zum Einsatz, welche mit den waagrechten Lufträgern des Daches verbunden werden.⁷⁵

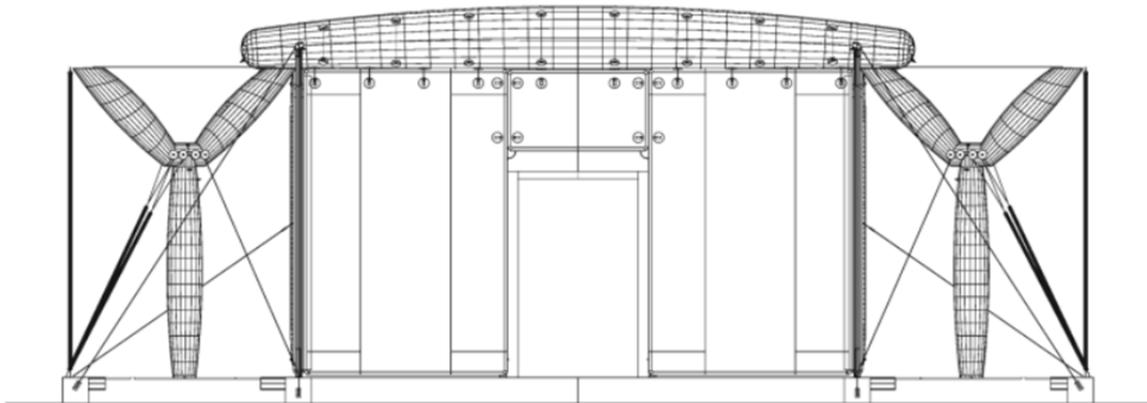


Abbildung 49 Ansicht Front

Ein System aus Stahlseilen und Gurten verbindet Säulen, Träger und Wände und verspannt diese mit dem Fundament. Zusätzliche pneumatische Muskeln, also dünne Luftschläuche aus Silikon mit Gewebeummantelung, welche sich bei Druckerhöhung zusammenziehen, werden an den Y-Säulen angebracht und dienen dem Verändern der Struktur in Abhängigkeit der äußeren Belastung (z.B.: Wind- und Schneelast). Die Wände bestehen aus einer eigens für dieses Projekt entwickelten Membranbauweise. Dabei werden zwei Membranen mittels einer Technik aus der Textilindustrie namens Tufting bei gleichzeitiger Schaffung eines Zwischenraums flächig miteinander verbunden. Wird eine so entstandene Membran mit Luft gefüllt, führt die Spannung der Tuftingfäden zum Ausbilden einer ebenen Oberfläche. Die sonst notwendige Krümmung im Membranbau ist somit nicht nötig.⁷⁶

⁷⁵ Vgl. Kronenburg 2008, 61.

⁷⁶ Vgl. Ebda., 62.

Zur Stabilisierung der Deckenträger werden diese beidseitig mit einer Membran bedeckt, welche dann durch Verringern des Innendrucks die Träger fixiert.

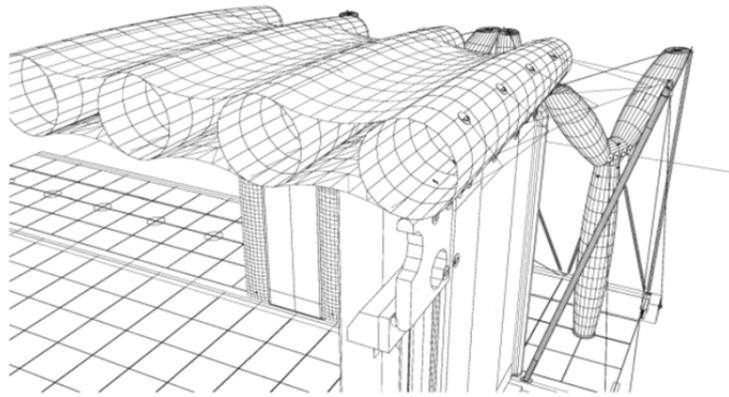


Abbildung 50 Schnitt durch Deckenkonstruktion

Technische Daten

Überbaute Fläche: 800 m²

Davon Nutzfläche: 375 m²

Gewicht pro Quadratmeter: 16 kg/m²

Gesamtgewicht: 6000 kg

Transportvolumen: ein Standard ISO-Container

Betriebsdruck: 0,5 bar (Wände, Träger, Säulen), 0,3 – 1 bar (pneumatische Muskeln)

Aufbauzeit: 4 Tage

Fazit

Aufgrund der insgesamt zehn Steuercomputer, einem Hauptrechner, zahlreicher Sensoren und der pneumatischen Muskeln kann man bei dieser Halle schon fast nicht mehr von einem Gebäude sprechen. Sie gleicht eher einem Organismus, der seine Umgebung wahrnimmt und auf sie reagiert. Seit seiner Aufstellung am Festo-Firmengelände in Esslingen erlebte die Halle bereits Windgeschwindigkeiten von 220 km/h und überstand diese ohne Schaden. Tests mit gelockerten Spannelementen simulierten Windlasten bei 250 km/h und auch bei diesen Bedingungen blieb die Halle standhaft.⁷⁷ Ein Nachteil ist allerdings das schlechte Verhältnis von bebauter Fläche zu Nutzfläche. Die Technik und das voluminöse Tragwerk nehmen mehr Platz ein als die Halle bietet. Zudem ist ein hoher Grad technischen Ausbaus nötig, um die Möglichkeiten der Struktur voll auszuschöpfen.

⁷⁷ Vgl. Kronenburg 2008, 63.

3.4 Pneumocell von Thomas Herzig

Pneumocell ist ein System, welches der Wiener Architekt Thomas Herzig im Jahr 2006 patentieren ließ. Im Grunde besteht das System aus großen pneumatischen Elementen, die im Verbund eine Großstruktur bilden. Durch verschiedene Formen und Größen der pneumatischen Einzelemente können verschiedene Strukturen nachgebildet werden.



Abbildung 51 Größenvergleich Mensch zu Pneuzelle

Die pneumatischen Formen bezeichnet Herzig als Zellen, da biologische Zellen ebenfalls als pneumatische Membranen ausgebildet sind. Bei Pneumocell sind die häufigsten Formen Drei-, Fünf- und Sechsecke, aber auch Quadrate und Rechtecke kommen zur Anwendung. Durch eine Reißverschlussverbindung an den Kanten der Zellen werden diese miteinander verbunden. Ein kurzes Schlauchstück verbindet ebenfalls die einzelnen Körper, wodurch ein zusammenhängendes pneumatisches System entsteht. Die gesamte Struktur wird zunächst am Boden im luftleeren Zustand zusammengesetzt und an den Knotenpunkten werden zusätzliche Klemmscheiben verschraubt. Diese Scheiben besitzen eine Öse und können zum Abspannen und zur Aufhängung von beispielsweise Lampen dienen. Die neueste Ergänzung im Sortiment bilden Großzellen mit zusätzlichen Spanngurten in der

Membrane (Abb. 51) und die Möglichkeit einer Abdunklung der Membranzellen. Diese neue Generation ist kein einfacher pneumatischer Körper mehr sondern besitzt zwei nicht zusammenhängende Lufträume.⁷⁸

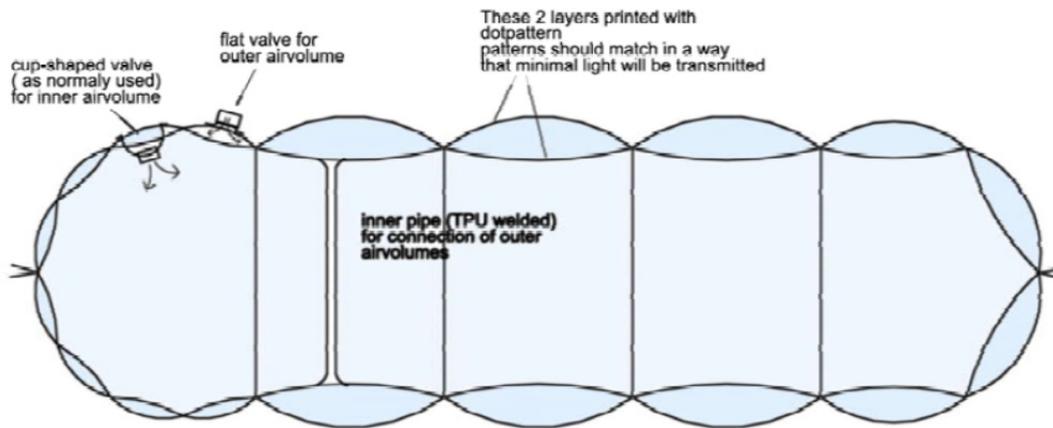


Abbildung 52 Schema einer dreilagigen Zelle

Das große Volumen in der Mitte bildet die eigentliche Form aus und dient zum Lastabtrag.

Die äußere Hülle der Zelle besitzt einen eigenen Luftraum. Wird dieser nun ebenfalls gefüllt, entsteht eine doppelte Haut und wenn die beiden Seiten der äußeren Haut auch noch mit einem Raster bedruckt sind, kann dadurch der Verschattungsgrad eingestellt werden.

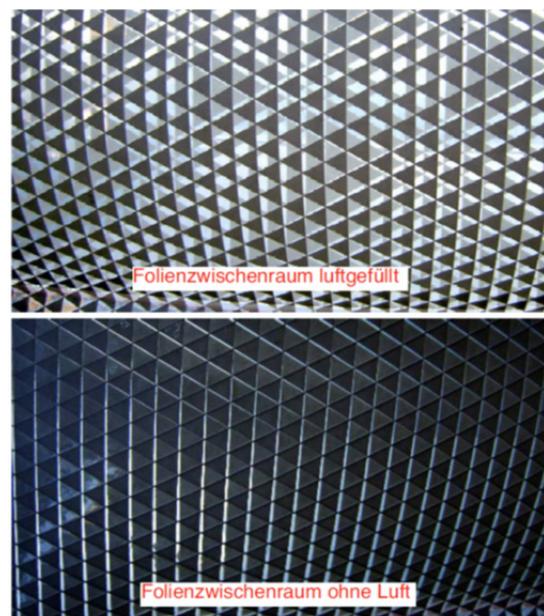


Abbildung 53
Verschiedene Verschattungsgrade

⁷⁸ Vgl. Herzig 2013, 5 f.

Technische Daten

Überbaute Fläche: 7,8 - 700 m²

Gewicht pro Quadratmeter: 4,2 – 7,7 kg/m²

Gesamtgewicht: 44 - 3000 kg

Transportvolumen: 0,27 - 17 m³

Betriebsdruck: 0,1 – 0,3 bar (geschätzt)

Aufbauzeit: 3 - 11 h

Fazit

Wie in den technischen Daten ersichtlich ist, deckt das Pneumocell-System eine große Reichweite von Dimensionen ab. Es bietet einige Vorteile, wie zum Beispiel den einfachen und schnellen Auf- und Abbau, die kleinen Packmaße und die relativ freie Gestaltung der Großform. Alle Zellen besitzen dieselbe Kantenlänge von 213cm, beziehungsweise 604cm bei Großzellen. Zwar gibt es bereits Möglichkeiten zur Verschattung bei den Großzellen, jedoch bietet das System keine Art der Lüftung, außer durch das Weglassen ganzer Zellen. Zudem müssen die Strukturen gegen Wind gesichert werden, da das Gewicht der Großvolumen sehr gering ist. Aus diesen Gründen besitzt das Pneumocell-System eher einen temporären Charakter. Die Zellen bleiben zwar stabil, wenn sie einmal gefüllt sind und bei Beschädigung einer Zelle bleiben die anderen in Form, doch gibt es wenig bis keine Lösungsansätze für die Probleme, die Membrankonstruktionen mit sich bringen, wie etwa Tauwasserbildung, Überhitzung, Schallschutz, et cetera.

3.5 Mobile Konzerthalle „Ark Nova“ von Kapoor und Isozaki

Die Konzerthalle Ark Nova wurde vom Lucerne Festival ins Leben gerufen, vom Englischen Bildhauer Amish Kapoor entworfen und in Zusammenarbeit mit dem japanischen Architekten Arata Isozaki umgesetzt. Sie soll ein Symbol des Wiederaufbaues für jene Regionen von Japan sein, die 2011 vom Tsunami beziehungsweise dem anschließendem Reaktorunglück in Fukushima betroffen waren und noch immer sind. Aus diesem Hintergrund stammt auch der Name, welcher zu Deutsch „Neue Arche“ bedeutet. Die Konzerthalle reist durch alle Teile der zerstörten Gebiete und soll mit Musik und Kunst den Geist des Wiederaufbaus verbreiten und den Menschen Hoffnung spenden.



Abbildung 54 Luftaufnahme der Ark Nova

Mit über 700m² bietet die Konzerthalle Platz für 500 Gäste, eine Bühne und Orchester. Als große amorphe Traglufthalle wird die Ark Nova in nur drei Stunden aufgestellt. Zum Aufbau werden allerdings unter anderem Kräne benötigt, um die sich langsam aufbauende Form in Position zu halten.

Die gesamte Konstruktion findet Platz in einem Standard-Container eines Sattelzuges. Dieser Container dient nach dem Aufbau als Versorgungselement und provisorischer Eingang. Der eigentliche Haupteingang befindet sich auf der linken Seite (aus Sicht vom Container) und wird nach dem fertigen Aufbau montiert. Im geometrischen Sinn könnte man die Form der Ark Nova als einen stark gezerrten Torus bezeichnen. Ein charakteristisches Element ist das Loch, welches sich von der Mitte oben zum unteren Bereich der Rückseite zieht.⁷⁹



Abbildung 55 Innenseite mit Loch

Die Umkehr des Loches wird im Inneren gestalterisch wirksam eingesetzt und bildet einen großen, organisch geformten Strang. Als Bodenbelag dient eine Schiffsbodenkonstruktion aus regionalem Zedernholz.

⁷⁹ Vgl. Ark Nova 2014

Zu Beginn des Aufbauprozesses wird die Bodenkonstruktion hergestellt und die Membran an den Rändern verbunden. Auf Abbildung 56 kann man erkennen, wie klein die Membran zusammengelegt werden kann.



Abbildung 56 Ark Nova Abbau

Technische Daten

Nutzfläche: 720 m²

Transportvolumen: ein Standard ISO-Container

Betriebsdruck: 0,1 – 0,3 bar (geschätzt)

Aufbauzeit: 3 Stunden

Fazit

Die Ark Nova stellt eine organisch geformte Traglufthalle dar und besticht vor allem durch das große Volumen und die spannende Geometrie. Von außen betrachtet wirkt die dunkelviolette Form eher fest und opak. Im Inneren wird vor allem tagsüber die Transluzenz der Membran sichtbar. Dieses Projekt veranschaulicht gut, wie wichtig es ist, bei der Verwendung von transluzenten Membranen auf die Ausrichtung der Nähte zu achten. Die dunkleren Stöße werden im Inneren klar erkennbar und müssen sauber und akkurat geplant sein. Wird dies beachtet, kann man einen Effekt erzielen, der die Geometrie noch stärker betont und bestimmte Bereiche akzentuiert. Zwar gab es vor allem anfangs noch einige Probleme mit der Akustik und der Schalldämmung, mittlerweile wurden diese jedoch durch Verändern der Bodenkonstruktion und andere Maßnahmen verbessert. Die Ark Nova ist ein gutes Beispiel für die Vielseitigkeit und Formenvielfalt im Membranbau.

3.6 Vakuumbrücke der Technischen Universität Delft und FH Frankfurt

Eine etwas andere Herangehensweise an die Membrantechnik zeigen Architekten und Ingenieure der TU-Delft und FH Frankfurt. Sie beschäftigen sich mit den Möglichkeiten der Vakuumtechnik und deren Einsatz im Bausektor. Neben der Entwicklung einiger kleinerer Systemkonzepte entsteht auch die Umsetzung einer frei formbaren Brückenkonstruktion.



Abbildung 57 Vakuumbrücke unter Last

Die Konstruktion der Brücke ist denkbar einfach. Zuerst wird eine Membranhülle in Form eines langen, rechteckigen Blockes gefertigt. Im Anschluss wird dieser Membransack mit Kunststoffbällen gefüllt und verschlossen. Danach muss die biegeaweiche Geometrie in Form gebracht werden und wird mit Vakuumpumpen evakuiert. Durch den Unterdruck presst die Membran die Bälle der Füllung fest aneinander und es entsteht eine belastbare Konstruktion. Die Kunststoffbälle sind in diesem Fall Bubbledeck-Bälle, die eigentlich als Platzhalter in Betonleichtbaudecken zum Einsatz kommen.⁸⁰

⁸⁰ Bilow/Klein/Knaack 2008, 84-87.

Bei genauerer Betrachtung erkennt man die Ballfüllung und auch die Ventile, durch welche die Luft abgesaugt wird. Vorteil der Bubbledeck-Kugeln ist, dass sie stärker belastbar sind als andere Kunststoffbälle. Vorhergehende Tests mit Bällen aus der Spielzeugindustrie zeigten, dass diese weicheren Bälle unter dem Druck der Membran einknicken.



Abbildung 58 Nahaufnahme der Brücke

Das System wird auch als Peanut-Bridge bezeichnet, da die Idee dazu durch ein Päckchen eingeschweißter Erdnüsse kam. Mit insgesamt zehn Metern Spannweite trägt die Brücke mindestens 600kg verteilter Last. Leider wurden weitere Belastungstests, abgesehen von dem Begehen durch Menschen (Abb. 57) nicht durchgeführt, weshalb eine genaue Aussage nicht möglich ist. Der Aufbau der Brücke vor Ort lief nach dem in Abbildung 59 gezeigten Schema ab, mit dem Unterschied, dass die fertig geformte Brücke nicht von Menschen mit Seilen, sondern mit einem Kran aufgerichtet wurde.

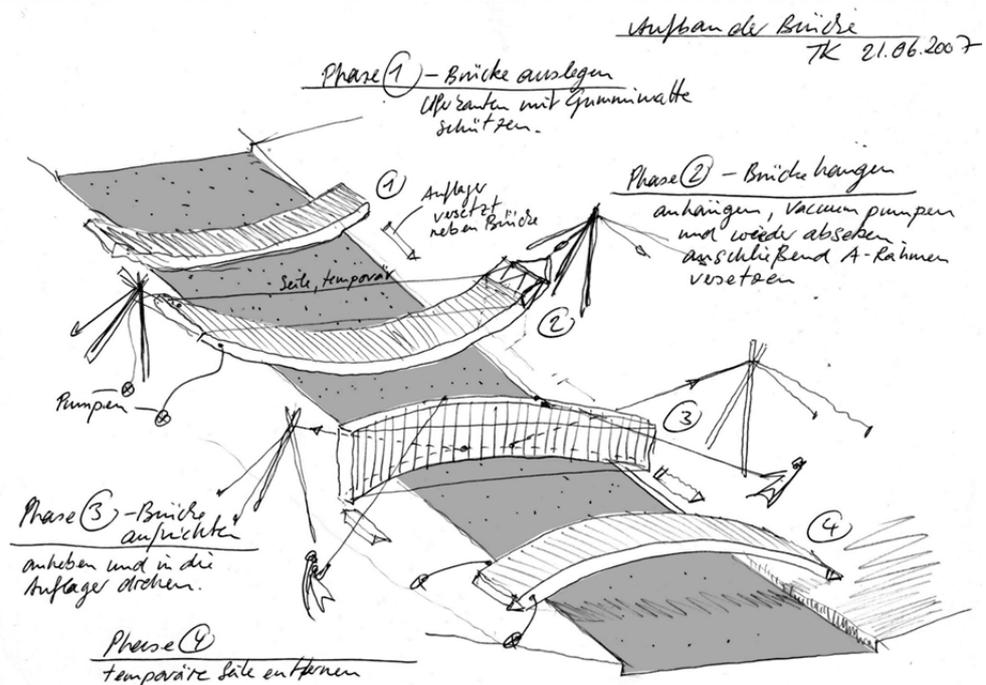


Abbildung 59 Aufbauschema vor Ort

Technische Daten

Spannweite: 10 m

Betriebsdruck: Vakuum

Füllung: Bubbledeck-Bälle

Aufbauzeit: 2 h

Dichte der Füllung $\sim 24 \text{ kg/m}^3$

Gesamtgewicht (bei Annahme von 4m^3 Inhalt mit Membran): $\sim 120\text{kg}$

Fazit

Die Vakuumbrücke soll kein Vorschlag für den Brückenbau der Zukunft darstellen, jedoch verdeutlicht die Konstruktion einer Brücke grundlegende Eigenschaften wie Belastbarkeit, Spannweite und Eigengewicht. Durch die gebogene Form wird die Belastbarkeit erhöht, da die Biegebeanspruchung abnimmt und vermehrt Druckkräfte auftreten, vorausgesetzt die Enden der Brücke sind eingespannt.

Der Einsatz von Unterdruckmembranen hat mich persönlich sehr fasziniert und wurde von mir in weiterer Folge stärker behandelt. Das Spannende an Unterdrucksystemen ist die Formbarkeit und Vielseitigkeit je nach Füllung und Membran, wobei die entstehenden Elemente ein anderes Tragprinzip besitzen als herkömmliche Membrantragwerke. So wird die Tragfähigkeit nicht mehr durch die Vorspannung und die Krümmung bestimmt, sondern durch die Stärke des Vakuums, die Art der Füllung und die Geometrie allgemein.

4 Experiment

Einen wichtigen Schritt in der Entwicklung dieser Arbeit stellt dieses erste Experiment dar. Da ich anfangs noch vom Projekt PlusMinus fasziniert war, versuchte ich einen Entwurf auf dessen Basis umzusetzen und die Konstruktionsmethode nachzuvollziehen. Neben der Entwicklung einer ersten Form wurden auch Tests hinsichtlich einer Biegebeanspruchung und FEM-Simulationen durchgeführt, um die Möglichkeiten der Materialien abzuschätzen.

4.1 Formfindung

Auffällig bei Konstruktionen aus pneumatischen Schläuchen ist, dass die gebildete Großform fast immer eine synklastische Krümmung aufweist. Zudem handelt es sich meist um domförmige Strukturen, also Formen mit einem kreisförmigen Grundriss. Es schien naheliegend, mit einer doppelt gekrümmten Form diese eintönige Palette zu erweitern. Ziel war es, eine Geometrie zu finden, welche eine gerundete Oberfläche besitzt und durch Aneinanderreihung mehrerer gleicher Formen erweitert werden kann. Die gerundeten Flächen sind deshalb wichtig, um geringe Krümmungsradien zu generieren, da vor allem Pneu-Schläuche bei zu starken Kurven zum Knicken neigen. Nach diversen Skizzen und Nachbildungen mit Modelliermasse entstand die erste digitale Grundform. Sie ergibt sich im Grunde aus vier gleich großen Kugelhälften (Abb. 60). Liegen diese in einer quadratischen Anordnung nebeneinander, entsteht in der Mitte ein Zwischenraum. Füllt man diesen Raum auf (Abb. 61) und betrachtet nur ein Viertel der zusammengesetzten Körper, erhält man eine Form, welche ein Aneinanderreihen derselben und damit ein Erweitern ermöglicht (Abb. 62-64).

4.1.1 Grundform

Die Modellierung der Grundgeometrie fand im CAD-Programm Rhinoceros statt.

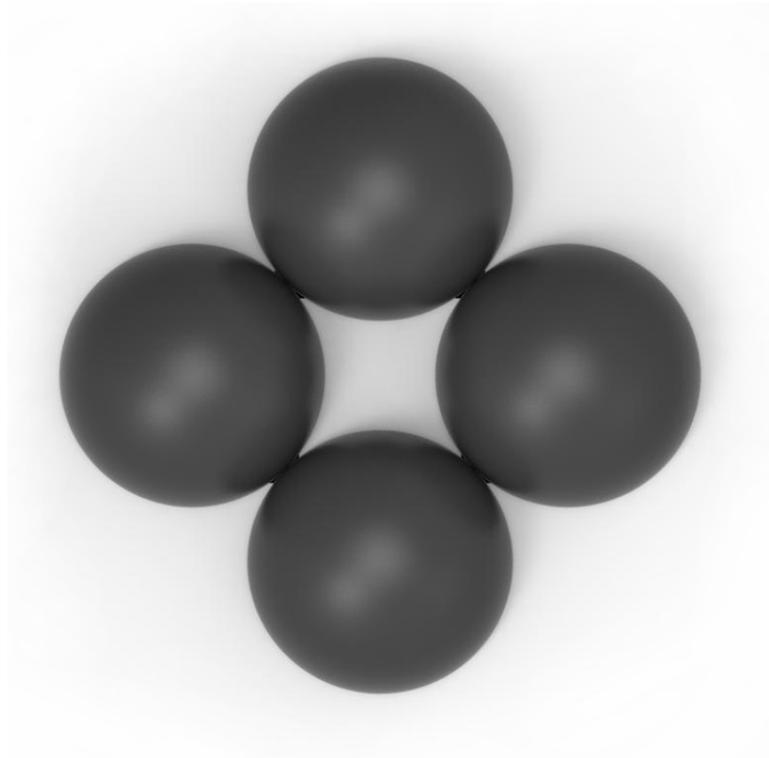


Abbildung 60 Vier Kugelhälften im Quadrat

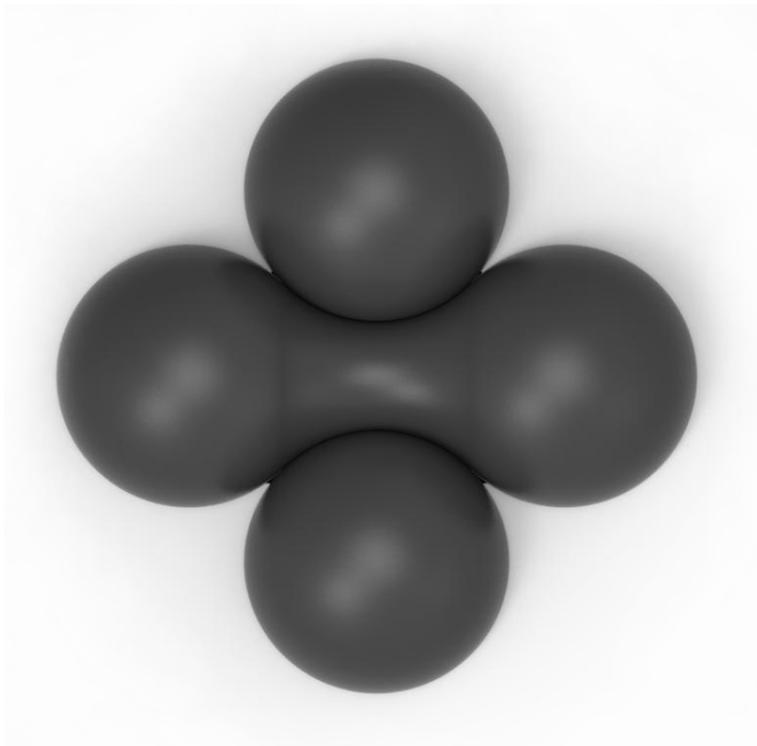


Abbildung 61 Ausfüllen des Zwischenraumes, Verschmelzen zweier Kugeln

Durch das Verschmelzen von zwei gegenüberliegenden Kugeln entsteht eine organische Form.

Wird diese organische Form in der Mitte geteilt, ergibt sich eine Iglu-förmige Geometrie der eine Verschneidung von gleichgroßen Kreisen zu Grunde liegt.



Abbildung 62 Hälfte beider verschmolzenen Kugeln

Eine Möglichkeit der Erweiterung wäre das Verbinden über die ursprüngliche Trennfläche.

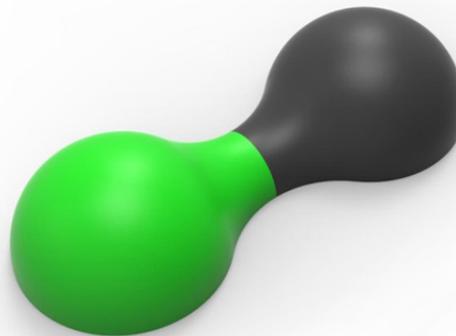


Abbildung 63 Erweiterung Möglichkeit A

Die andere Erweiterungsmöglichkeit besteht in einer Verschiebung zweier Körper.

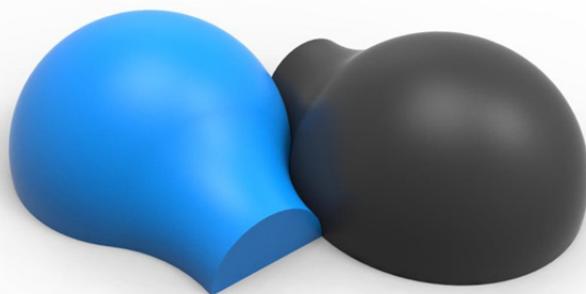


Abbildung 64 Erweiterung Möglichkeit B

4.1.2 Überarbeitete Form

Da die Grundform für mich noch nicht überzeugend genug war, wurde diese noch ein wenig überarbeitet. Die gesamte Form wurde in der Höhe etwas reduziert und die Rundungen geglättet. An der schmalen Seite wurde die Geometrie etwas überhöht und bildet dadurch eine stärkere antiklastische Krümmung aus. Zwar verliert die Form dadurch die Erweiterung im Sinne von Abbildung 64, doch mit dem Hintergedanken an die Struktur aus Schläuchen könnten die Formen sich an allen Stellen gegenseitig durchdringen, da die Oberfläche nicht geschossen ist. Man müsste an den Schnittstellen nur die Schläuche versetzen.



Abbildung 65 Überarbeitete Form

Nach der Überarbeitung wurde die Form organischer und erinnert nicht mehr an eine halbierte Glühbirne, sondern eher an einen halben Heißluftballon. Diese Analogien sind jedoch nicht bewusst gewählt und waren keine Entwurfsgrundlage, sondern entstanden wie so oft in der Architektur erst nach dem Entwurf.

Um die Form unter Anwendung einer Schlauchstruktur zu veranschaulichen habe ich diverse Visualisierungen angefertigt. Die Variationen bestehen in der Anzahl der Schläuche und der Art und Weise der Verlegung. Der Schlauchdurchmesser wurde mit 20cm definiert, was zwar größer ist als die Pneus des Projektes PlusMinus, aber trotzdem eine gängige Folienschlauchkonfektion darstellt.

Die erste Darstellung zeigt die Schläuche in einem orthogonalen Raster angeordnet. Dieses wurde dann von oben auf die Form projiziert. Der Abstand zwischen den meisten Feldern beträgt ca. 83 cm



Abbildung 66 Variante 1

Diese Darstellung zeigt die Schläuche, wenn das Raster nicht projiziert wird, sondern auf der Form selbst durch Unterteilen dieser entsteht. Zusätzlich wurden die Schläuche hier miteinander verwebt.



Abbildung 67 Variante 2

Eine Möglichkeit der Erweiterung der Einzelkörper durch Ineinanderstecken. Hier ist die Verjüngung am Ende der Form von Vorteil.



Abbildung 68 Ineinandergesteckte Erweiterung

4.2 Materialfindung

Der Prozess der Materialfindung bezog sich vorerst nur auf das Material der Schläuche selbst. Wichtig bei der Recherche waren Materialeigenschaften wie Steifigkeit/Dehnbarkeit aber auch Dichte, Verfügbarkeit und Kosten.

Die Wahl fiel auf Polyamid-Folienschläuche. Polyamid besitzt hohe Steifigkeit und Zähigkeit. In der Industrie findet es häufig Einsatz in Form von Fasern bei technischen Textilien oder Gehäusen von Werkzeugen oder elektronischen Geräten. Als Folienschlauch wird Polyamid vor allem als Kunstdarm in der Lebensmittelproduktion eingesetzt, deshalb sind die Schläuche als Massenware in vielen verschiedenen Durchmessern (Kaliber) und Farben erhältlich. Die Kuda Kunstdarm GmbH mit Sitz in der Steiermark lies mir freundlicherweise einige Laufmeter eines Kaliber 21 (21mm Durchmesser) Schlauches zukommen, welchen ich sowohl für Testzwecke, als auch für das Versuchsmodell nutzen konnte.



Abbildung 69 Polyamid-Folienschlauch unter Druck

Als erster Test wurde ein 1m langes Schlauchstück zu einem Ring geschlossen und mit Druckluft beaufschlagt. Mit einem Druck von 1,5 bar (Abb. 69 links) bilden sich Knicke im Schlauch. Erst ab 2 bar (Abb. 69 rechts) bildet der Ring keinen Knick mehr aus. Bei 4,5 bar birst der Schlauch und versagt.

4.3 Modell

Als Versuchs- bzw. Arbeitsmodell beschloss ich die Variante mit dem orthogonalen Raster umzusetzen.



Abbildung 70 Modell mit halbierter Schlauchanzahl

Die Schlauchanzahl wurde halbiert, um den Materialaufwand geringer zu halten. Zum Anschließen der Schläuche wurden trotzdem 29 T-Stücke und 89 Schlauchklemmen verbaut. Dieses Montagematerial wurde ebenso wie der Verteilerschlauch von der Firma Hostra Gummi- und Kunststoffwaren GmbH aus Graz zur Verfügung gestellt.



Abbildung 71 Arbeitsmodell Maßstab 1:10

An gewissen Schläuchen bilden sich kleinere Knickstellen aus, die aber bei Erhöhung des Druckes wieder verschwinden.

Als Hauptproblem der Polyamidschläuche stellte sich ihre Steifigkeit heraus. Polyamid kann bis zu 3,5% Wasser aufnehmen und dadurch verändern sich die Materialeigenschaften. Im trockenen Zustand sind die Folienschläuche sehr knitteranfällig und besitzen eine ähnliche Haptik wie Back- oder Transparentpapier. Durch Anfeuchten oder Wässern wird das Material geschmeidiger und elastischer, jedoch trocknen die Schläuche mit der Zeit und beginnen wieder zu knittern. Ein weiteres Problem von Polyamidfolie ist der geringe Weiterreißwiderstand. Wird die Folie erst einmal verletzt, setzt sich der Riss schnell fort bis schließlich das gesamte System versagt. Aus Sicht des Brandschutzes könnten sich Polyamidschläuche ebenfalls als gefährlich herausstellen. Die Glasstemperatur von Polyamid liegt bei 50-60°C und kann bei steigendem Feuchtigkeitsgehalt sogar unter 0°C liegen. Bei Überschreiten dieser Glasstemperatur wird Polyamid immer weicher und elastischer bis irgendwann der Schmelzpunkt erreicht ist.

Das Foto in Abbildung 71 wurde nach 20-minütigem Einweichen mit Wasser aufgenommen. Ohne genügend Feuchtigkeit bilden sich wesentlich mehr Knicke, welche zu einer Deformation der Gesamtform führen. Da die Montage der Schläuche relativ lange dauert, und somit eine Demontage zum Zweck des Einweichens nicht in Frage kam, wurde das fertige Modell aufgestellt und von oben mit Wasser aufgefüllt.



Abbildung 72 Einweichen der Schläuche beim fertigen Modell

4.4 Überarbeitung des Materials

Aufgrund der Knickproblematik und anderer negativer Eigenschaften wurde nach einer Alternative gesucht. Ein sehr verbreiteter Kunststoff in Form von Folienschläuchen ist Polyethylen, genauer PE-LD, also Polyethylen mit geringer Dichte (Low Density). Häufig werden solche Schläuche in der Verpackungsindustrie genutzt und stehen als Rollenware zur Verfügung. Polyethylenfolie besitzt einen höheren Weiterreißwiderstand und wird in Wandstärken bis 200µm hergestellt. Der Polyamid-schlauch, welcher beim Modell zum Einsatz kam, war mit 20µm wesentlich dünner. Da die Glasstemperatur von PE-LD bei -100°C liegt, ist es bei Zimmertemperatur elastisch und zäh.

Um nicht erneut ein ganzes Modell zu Testzwecken zu bauen, wurden die Folienschläuche im Maßstab 1:1 einem 3-Punkt Biegeversuch unterzogen und die Ergebnisse für eine FEM-Simulation genutzt. Dadurch kann festgestellt werden, ob sich ein Einsatz des Materials lohnt oder ob weitere Alternativen gesucht werden müssen. Hierzu wurde ein Schlauchstück mit 110cm Länge beidseitig mit einem Deckel aus Acrylglas dicht verschraubt. An einem Ende befindet sich dabei ein Ventil zum Anschluss eines Kompressors, am anderen Ende ein Manometer, um den Innendruck festzustellen.

4.5 Biegeversuch

Wie bereits erwähnt, handelt es sich um einen 3-Punkt-Biegeversuch. Dieser ist relativ simpel aufgebaut und ist die am häufigsten eingesetzte Methode zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls. In meiner Versuchsanordnung wird die Werkstoffprobe auf zwei Auflagern positioniert und in der Mitte belastet. Die Durchbiegung wird im Anschluss photogrammetrisch aus den Bildern des Versuches gemessen.

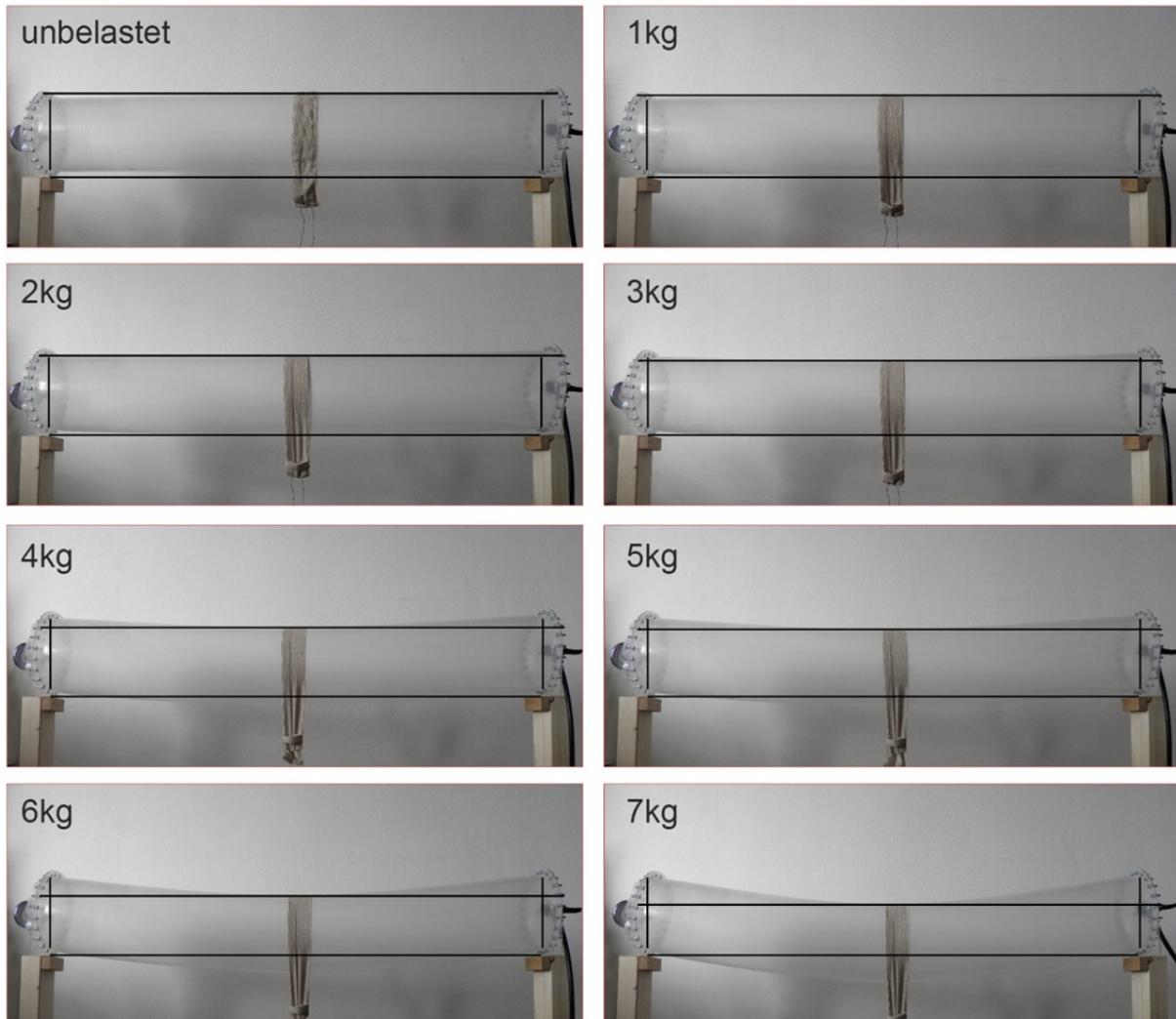


Abbildung 73 3-Punkt-Biegeversuch

4.6 E-Modulermittlung

Aus dem Biegeversuch ergeben sich folgende Daten:

$f = 75,1 \text{ mm}$... maximale Durchbiegung

$D = 159,15 \text{ mm}$... Außendurchmesser des Profils

$F = 0,0686 \text{ kN} \equiv 7 \text{ kg} @ 9,81 \text{ m/s}^2$... Kraft im maximalen Lastfall

$L = 1100 \text{ mm}$... Länge zwischen Auflagerpunkten

$J = \frac{\pi \times D^4}{64} = 31491726,47 \text{ mm}^4$... Flächenträgheitsmoment bei rundem Querschnitt

$E = \frac{F \times L^3}{48 \times J \times f} = 0,000804 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$... E-Modul bei rundem Querschnitt

4.7 FEM-Berechnung

Die errechneten Werte werden als Ausgangsparameter für eine FEM-Simulation genutzt, welche mit der Software ANSYS durchgeführt wurde. Als FEM-Modell wurde dieselbe Geometrie genutzt wie für das Arbeitsmodell. Lediglich die Schlauchanzahl wurde nicht halbiert. Somit bezieht sich die Simulation auf eine Umsetzung im Maßstab 1:1.

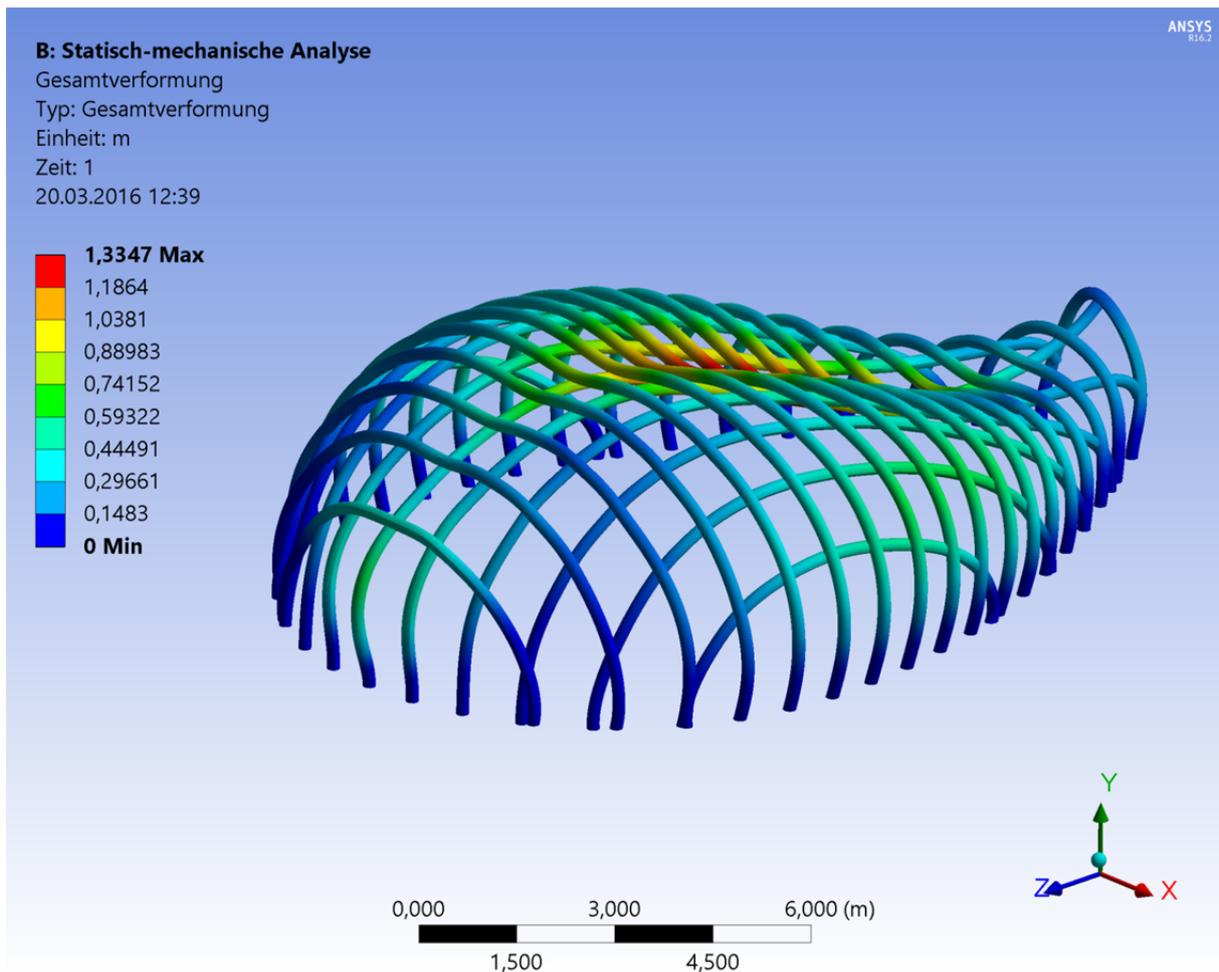


Abbildung 74 Gesamtverformung der Geometrie

Die Knotenpunkte der einzelnen Schläuche wurden als feste Verbindung definiert. Als Last existieren das Eigengewicht und eine Punktlast in der Mitte der Konstruktion mit einem Gewicht von 500kg, als eine Kraft von ca. 4,7kN.

Mit einer maximalen Durchbiegung von 1,33m ist die Verformung sehr groß.

4.8 Zwischenfazit

Die Verformung der Geometrie ist bei der Verwendung von PE-LD Pneus sehr ausgeprägt. Zwar kann man argumentieren, dass die Konstruktion als temporäres Objekt keine Belastung von 500kg tragen muss, doch meiner Meinung nach ist die Standfestigkeit unterdurchschnittlich. Ein Problem, welches ich bei den Versuchen mit Polyethylen feststellte, ist das ungünstige Kriechverhalten des Kunststoffes. Das bedeutet, dass die unter Druck stehenden Schläuche mit einer irreversiblen Dehnung auf den Überdruck reagieren. Dadurch vergrößert sich ihr Durchmesser und die Wandstärke nimmt ab. Wird die Luft abgelassen, behalten die Folienschläuche ihre veränderte Form bei und es ist schwierig, die Leistungsfähigkeit im Dauereinsatz abzuschätzen. Die Idee einer Struktur aus luftgefüllten Schläuchen schien mir nach den Tests und Simulationen als wenig vielversprechend. Man könnte zwar die Leistungsfähigkeit verbessern, indem man selbst Schläuche aus technischem Textil herstellt, doch dann kann man gleich eine herkömmliche Membranstruktur umsetzen. Eine echte Innovation ist damit nicht möglich. Deshalb beschloss ich, umzudenken und eine erneute Materialrecherche durchzuführen.

5 Entwicklung der Struktur

Bei meiner Recherche konzentrierte ich mich auf die Möglichkeiten und Materialien, die es erlauben, freie Formen ohne großen maschinellen Aufwand herstellen zu können. Trotzdem sollte eine ausreichende Stabilität erreicht werden. Ich stieß auf ein Thema, welches man wohl als Randgebiet der experimentellen Architektur bezeichnen könnte: die Stabilisierung von Material durch Vakuum.

5.1 Die Umkehr

Bekannt sind Möglichkeiten der Stabilisierung mit Vakuum eher aus der Lebensmittelindustrie. Häufig werden vor allem kleinteilige Lebensmittel wie Reis oder Nüsse in Kunststoffolie eingeschweißt und evakuiert. Dadurch presst die Hülle den Inhalt mit einer Kraft von maximal 100kn/m^2 zusammen. Durch die Erzeugung eines Vakuums wirkt der Atmosphärendruck auf die Hülle ein, ohne dass ein Innendruck entgegenwirken könnte. Mit einem Gewicht von etwa 10.000kg/m^2 lastet die Atmosphäre auf der Oberfläche. Füllungen unter so hohem Anpressdruck bilden häufig harte, belastbare Körper. Die Anwendungsmöglichkeiten in der Architektur sind bis jetzt weitestgehend unerforscht. Es finden sich lediglich vereinzelte Versuche der Anwendung von evakuierten Hüllen, wie die Vakuumbrücke der TU-Delft/FH Frankfurt. Wie in Kapitel 5.6 bereits erwähnt, zeigt diese Brücke die Möglichkeiten der Vakuumtechnik in Hinblick auf Lastabtragung auf.

Gründe genug, um sich mit dem Thema genauer auseinanderzusetzen.

5.2 Das Exoskelett

Das Wechseln zu Vakuum hat eine grundlegende Änderung des gesamten Systems zur Folge. An Stelle der weichen, flexiblen Schlauchhüllen treten harte evakuierte Elemente. Anstatt einer Membranhaut bildet sich eine feste Schale die das Innere vor physischen Schäden schützt. Solche Systeme kommen in der Natur unter dem Überbegriff der Exoskelette vor und sind bei Gliederfüßern und auch Weichtieren zu finden. Die in den letzten Jahren vor allem in der Architektur viel diskutierten Skelette sind die Exoskelette der Kieselalgen (Diatomeen), aber auch die Endoskelette von Strahlentierchen (Radiolarien). Grund für das Interesse der Architekten und Bauingenieure ist die hohe mechanische Belastbarkeit bei gleichzeitigem Leichtbau. Kieselalgen wurden in Versuchsreihen mit Belastungen von über 700.000kg/m^2 getestet und hielten der Last stand.⁸¹

Zudem sind die Skelette der mikroskopisch kleinen Algen und Einzeller sehr geometrisch aufgebaut. Diese Formen inspirieren Planer und Entwerfer und werden als Baubionik zur eigenen Disziplin.

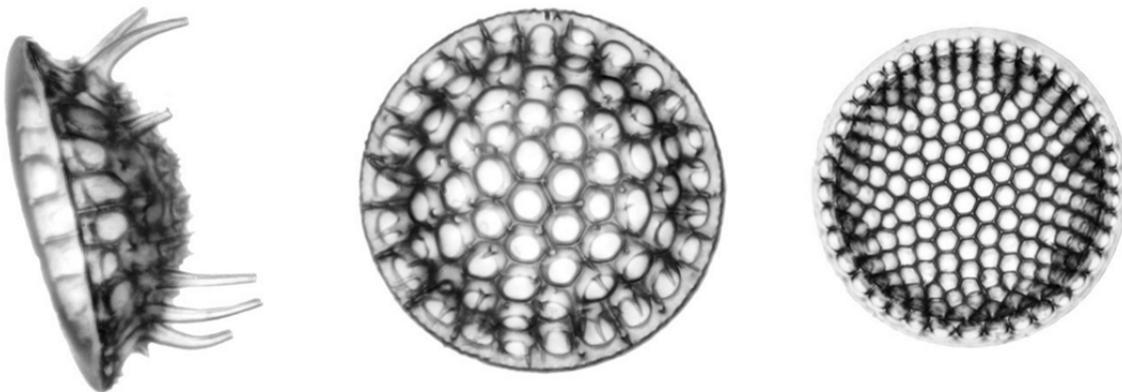


Abbildung 75 Diatomeen unterm Rasterelektronenmikroskop

⁸¹ Vgl. Nachtigall/Pohl ²2003, 140-151.

5.3 Füllmaterialien

In diesem Kapitel werden kurz die Ergebnisse einer Materialstudie vorgestellt. Ein Vakuumsystem besteht im Grunde aus zwei Komponenten: der Membran und der Füllung. Den größeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Systems hat dabei das Füllmaterial. Es muss bestimmte Kriterien erfüllen, um einen Einsatz zu rechtfertigen. Als Füllung kommen vor allem Granulate in Frage, da diese durch ihre Kleinteiligkeit und Rieselfähigkeit eine Formbarkeit ermöglichen. Wird ein granuläres Material in einer Hülle evakuiert, pressen sich die einzelnen Körnchen durch den Druck aneinander und bilden eine feste Einheit. Wie fest das Ergebnis ausfällt, ist abhängig von der Festigkeit des einzelnen Korns, dessen Geometrie und Reibungswiderstand. Ein wichtiger Punkt ist auch die Dichte der Schüttung bzw. die Kornrohichte. In der Regel sind die Granulate mit hoher Dichte auch jene, welche besonders harte Körner besitzen. Eine hohe Dichte bedeutet jedoch gleichzeitig ein hohes Gewicht, was nicht unbedingt im Sinne einer Leichtbaustruktur ist. Es muss wohl überlegt sein, ob die notwendige Festigkeit auch mit leichteren Füllungen erreicht werden kann. Natürlich kann das höhere Gewicht auch vorteilhaft eingesetzt werden, um beispielsweise die Konstruktion im bodennahen Bereich standfester zu machen. Viele Granulate findet man vor allem im Bereich der Dämmungen in Form von Schüttungen. Diese bieten oft den Vorteil einer geringen Dichte und sie sind in großen Mengen bei niedrigen Kosten verfügbar. Wichtig bei der Verwendung von Schüttungen ist auch die Druckbelastbarkeit des einzelnen Korns. Weiche Granulate wie Polystyrolkugeln sind zwar extrem leicht, werden aber bereits bei geringer Last zerdrückt. Dies führt bei einer Umsetzung zum Zusammenziehen der Struktur, da die Füllung sich beim Evakuierungsprozess stark komprimiert. Jedoch ist dies im Fall von Polystyrol nur eine elastische Verformung, die Kugeln gehen also wieder in ihre Form zurück, sobald die Belastung nachlässt. Es gibt aber auch Granulate bei welchen die Körner unter zu viel Druck zerstört werden. Perlite wären so ein Material. Die Körner sind wenig druckbelastbar, brechen unter zu viel Last ein und werden zu einem Pulver. Das ist natürlich für temporäre Zwecke nicht wünschenswert, da bei mehrmaligen Auf- und Abbau die Füllung immer mehr zerfällt.

5.4 Biegeversuch Unterdruck

Bei den folgenden Biegeversuchen handelt es sich erneut um 3-Punkt-Biegeversuche. Die verschiedenen Füllungen wurden jeweils in einen schlauchförmigen Beutel gefüllt und evakuiert. Es muss beachtet werden, dass die ermittelten Werte auch abhängig von der verwendeten Membran sind, da diese unterschiedlich gut Zugkräfte aufnehmen können. Die Ergebnisse dienen einer ersten Berechnung und der Veranschaulichung der Tragfähigkeit der unterschiedlichen Materialien. Verbesserungen sind natürlich möglich.

Perlite

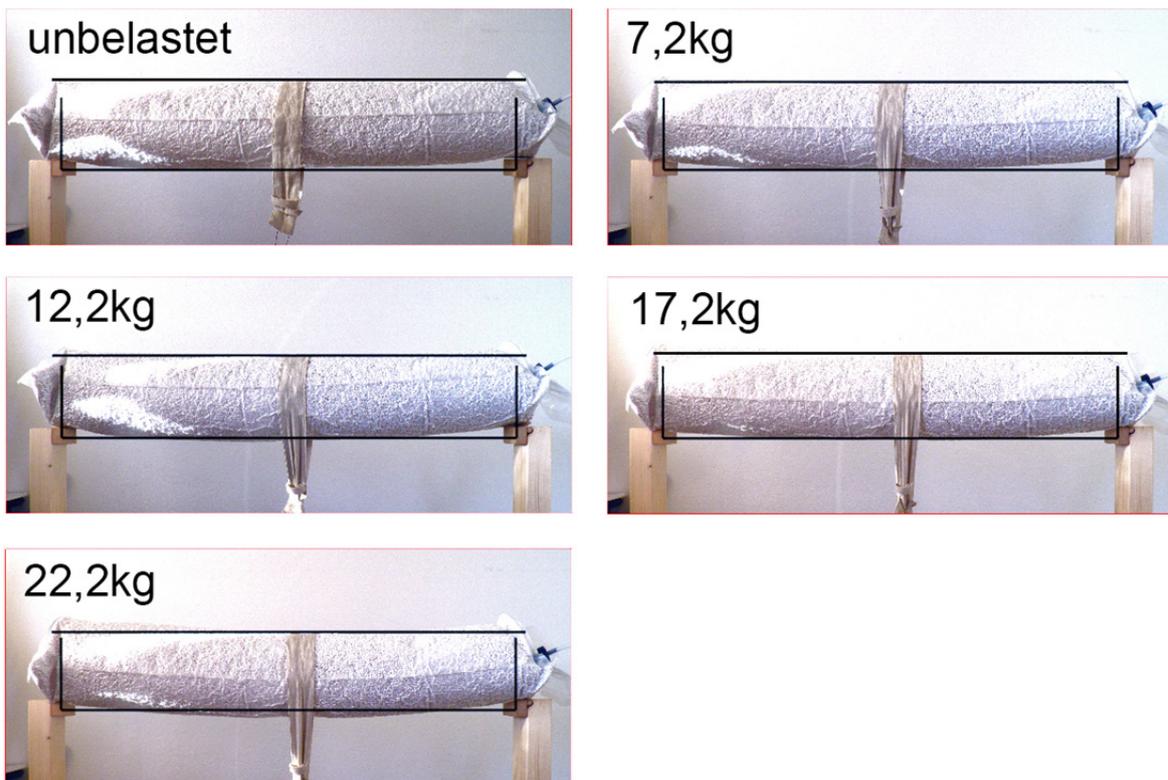


Abbildung 76 Biegeversuch Perlit

Perlite entstehen durch das Aufblähen von Vulkanglas im Glühen eines Ofens bei über 800°C. Mit etwa 85kg/m³ ist es eine sehr leichte Schüttung und wird häufig als Dämmung eingesetzt. Ohne Zusätze ist Perlit nur gering druckbelastbar, was bei mehrmaligem Evakuieren dazu führt, dass die Körner zu Staub zerfallen. Die Tragfähigkeit im Versuch ist zufriedenstellend, aber durch das stetige Brechen der Einzelkörner ist immer ein gewisser Geräuschpegel vorhanden.

Blähton

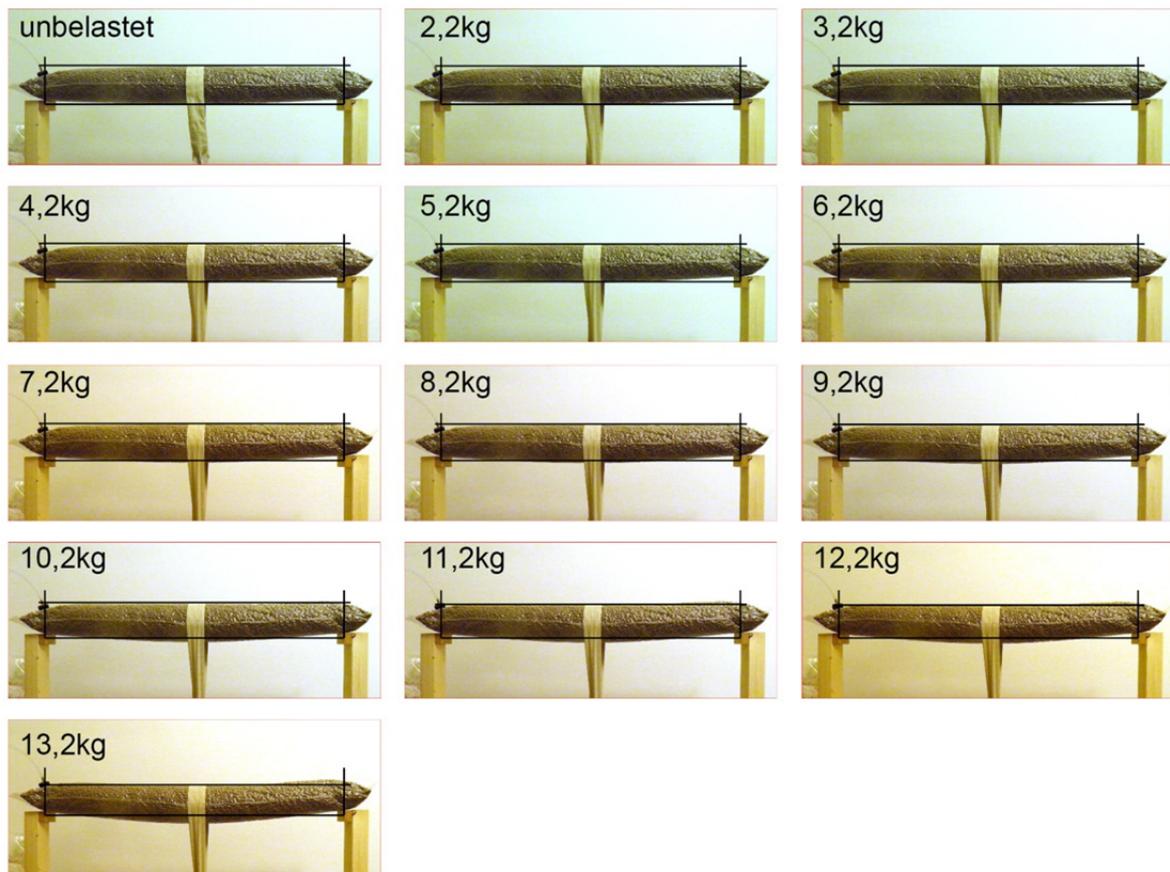


Abbildung 77 Biegeversuch Blähton

Blähton besteht aus gemahlenem Ton mit organischen Bestandteilen. Wird dieser in einem Drehofen gebrannt, verbrennen die organischen Anteile und durch das entstehende Kohlendioxid bläht sich der Ton auf. Die vielseitig einsetzbaren Kugeln besitzen eine Dichte von etwa 400kg/m^3 und sind sehr belastbar. Die Druckfestigkeit liegt bei über 1N/mm^2 . Das hohe Gewicht ist der einzige Nachteil.

Polystyrol-Granulat

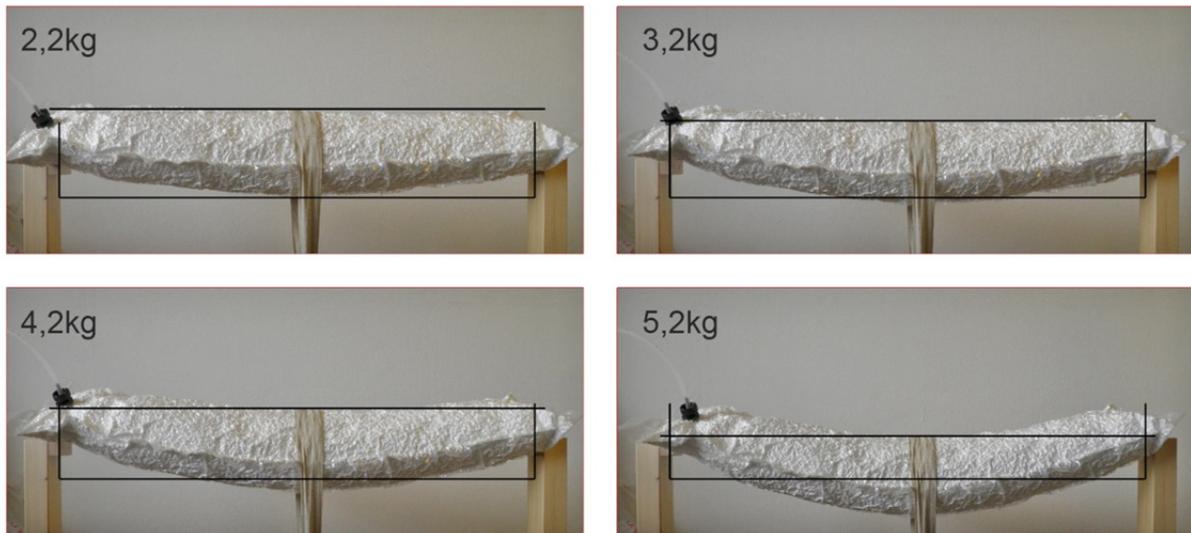


Abbildung 78 Biegeversuch Polystyrol-Granulat

Polystyrolkugeln sind in verschiedenen Größen erhältlich und besitzen eine sehr geringe Dichte. Mit etwa 15kg/m^3 ist dieses Granulat das leichteste der Testreihe. Das geringe Gewicht geht zu Lasten der Druckfestigkeit. Das Einzelkorn besitzt kaum Festigkeit, aber zerfällt unter Druck nicht zu Staub, wie es bei Perlit der Fall ist. Eine zerdrückte Polystyrolkugel nimmt ihre ursprüngliche Form wieder an, sobald die Belastung aufhört. Beim Evakuierungsvorgang macht sich die geringe Belastbarkeit durch ein Zusammenziehen der Probe bemerkbar. Dieses Verhalten kann unter Umständen gestalterisch eingesetzt werden. Die gefüllten Formen sind extrem leicht, können aber keine besonders großen Lasten abtragen.

5.5 E-Modulermittlung Unterdruck

Um die Ergebnisse der Biegeversuche im Sinne einer FEM-Simulation nutzen zu können, müssen erst die jeweiligen Elastizitätsmodule berechnet werden. Wie bereits erwähnt, handelt es sich nicht um exakte Laborwerte. Die gemessenen und berechneten Daten sind Überschlagswerte und sollen im Vergleich untereinander die Unterschiede der einzelnen Materialien verdeutlichen und bei der Entscheidungsfindung helfen.

Folgende Daten werden benötigt.

f ... maximale Durchbiegung

D ... Außendurchmesser des Profils

F ... Kraft im maximalen Lastfall

L ... Länge zwischen Auflagerpunkten

J ... Flächenträgheitsmoment bei rundem Querschnitt

E ... E-Modul bei rundem Querschnitt

Perlite

$f = 22 \text{ mm}$... maximale Durchbiegung

$D = 160 \text{ mm}$... Außendurchmesser des Profils

$F = 0,2177 \text{ kN} \equiv 22,2 \text{ kg} @ 9,81 \text{ m/s}^2$... Kraft im maximalen Lastfall

$L = 810 \text{ mm}$... Länge zwischen Auflagerpunkten

$J = \frac{\pi \times D^4}{64} = 32169908,77 \text{ mm}^4$... Flächenträgheitsmoment bei rundem Querschnitt

$E = \frac{F \times L^3}{48 \times J \times f} = 0,003405767 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$... E-Modul bei rundem Querschnitt

Blähton

$f = 22,7 \text{ mm}$... maximale Durchbiegung

$D = 100 \text{ mm}$... Außendurchmesser des Profils

$F = 0,1294 \text{ kN} \equiv 13,2 \text{ kg} @ 9,81 \text{ m/s}^2$... Kraft im maximalen Lastfall

$L = 810 \text{ mm}$... Länge zwischen Auflagerpunkten

$J = \frac{\pi \times D^4}{64} = 4908738,52 \text{ mm}^4$... Flächenträgheitsmoment bei rundem Querschnitt

$E = \frac{F \times L^3}{48 \times J \times f} = 0,012862123 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$... E-Modul bei rundem Querschnitt

Polystyrol-Granulat

$f = 78,7 \text{ mm}$... maximale Durchbiegung

$D = 130 \text{ mm}$... Außendurchmesser des Profils

$F = 0,0294 \text{ kN} \equiv 3 \text{ kg} @ 9,81 \text{ m/s}^2$... Kraft im maximalen Lastfall

$L = 810 \text{ mm}$... Länge zwischen Auflagerpunkten

$J = \frac{\pi \times D^4}{64} = 14019848,09 \text{ mm}^4$... Flächenträgheitsmoment bei rundem Querschnitt

$E = \frac{F \times L^3}{48 \times J \times f} = 0,000295014 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$... E-Modul bei rundem Querschnitt

5.6 FEM-Berechnung mit Vakuumträgern

Die FEM-Berechnung der Vakuumträger wurde gleich durchgeführt wie die Simulation in Kapitel 6.7. Auch die Geometrie bleibt dieselbe, da dies einen direkten Vergleich möglich macht. Belastungen sind wieder Eigengewicht und 500kg Punktlast in der Mitte der Verbundkonstruktion.

Perlite

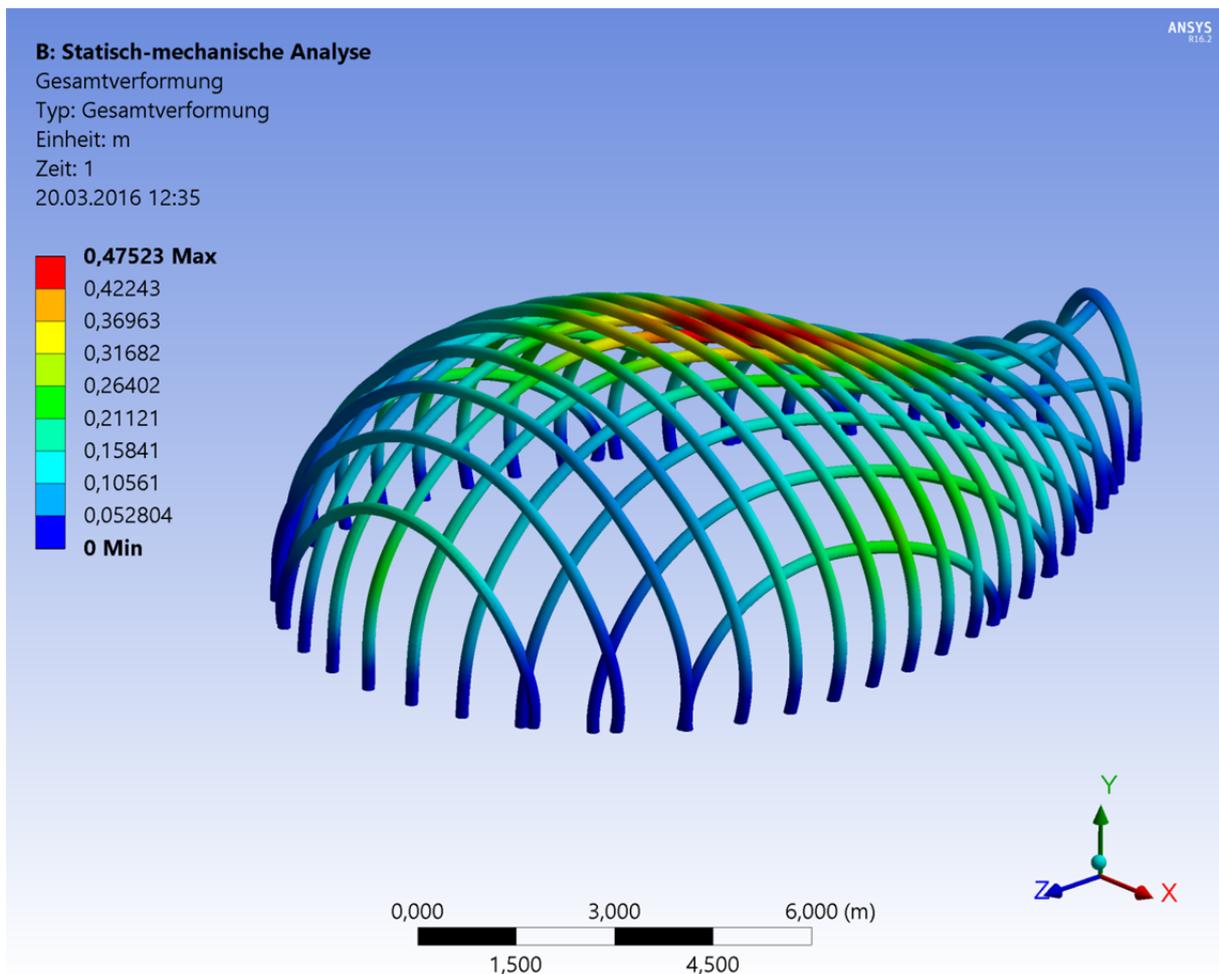


Abbildung 79 Gesamtverformung Perlite

Die Gesamtverformung ist im Vergleich zu den luftgefüllten Schläuchen um mehr als zwei Drittel geringer.

Blätton

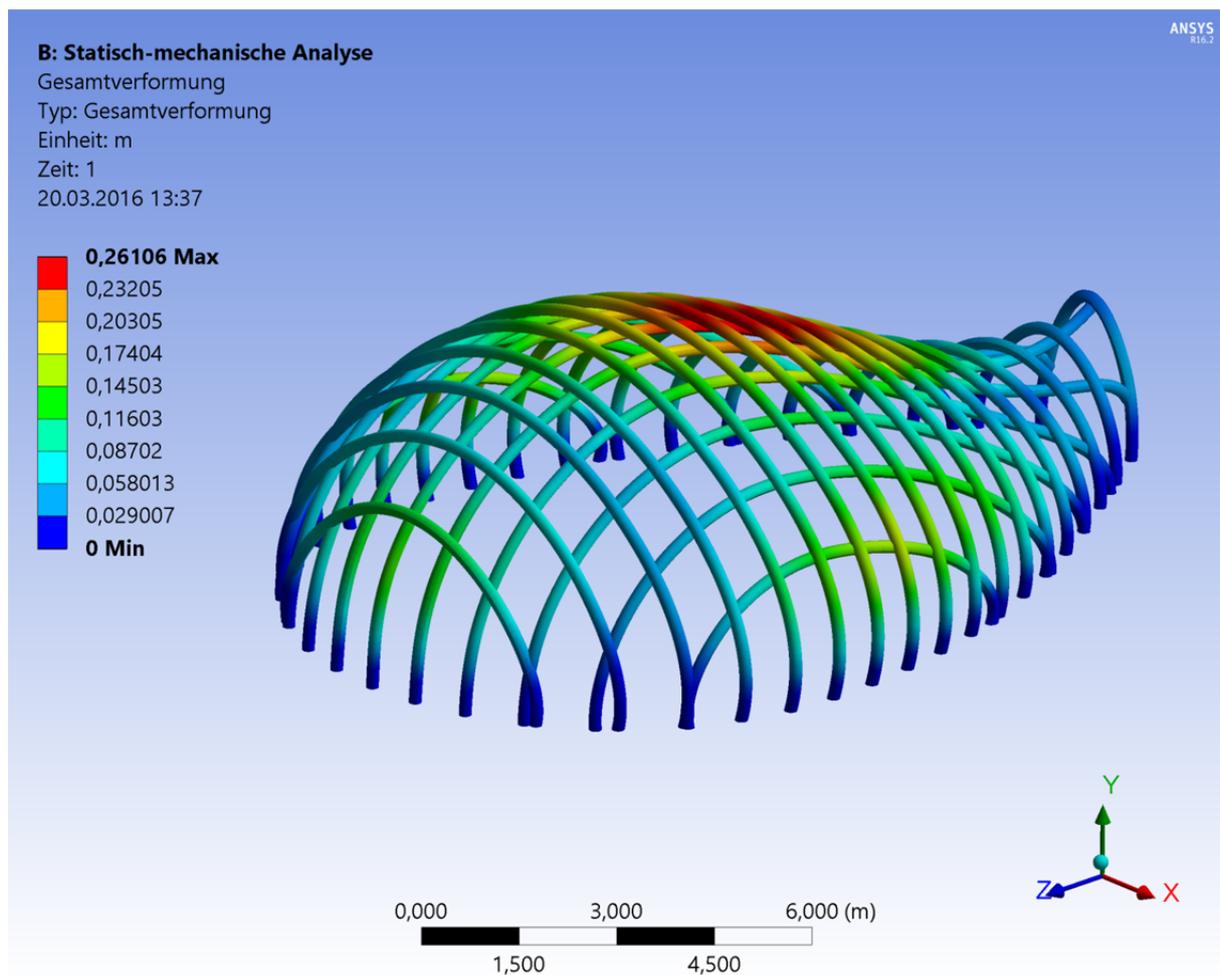


Abbildung 80 Gesamtverformung Blätton

Wie bereits aus den E-Modulberechnungen hervorgeht, ist die Füllung mit Blätton die stabilste Variante. Trotz der höheren Last durch das größere Eigengewicht senkt sich die Konstruktion maximal um 26,1cm ab. Zwar sind die Ergebnisse der Simulation vielversprechend, jedoch ist das hohe Gesamtgewicht der Konstruktion ein großer Nachteil für die Mobilität des Systems.

Polystyrol-Granulat

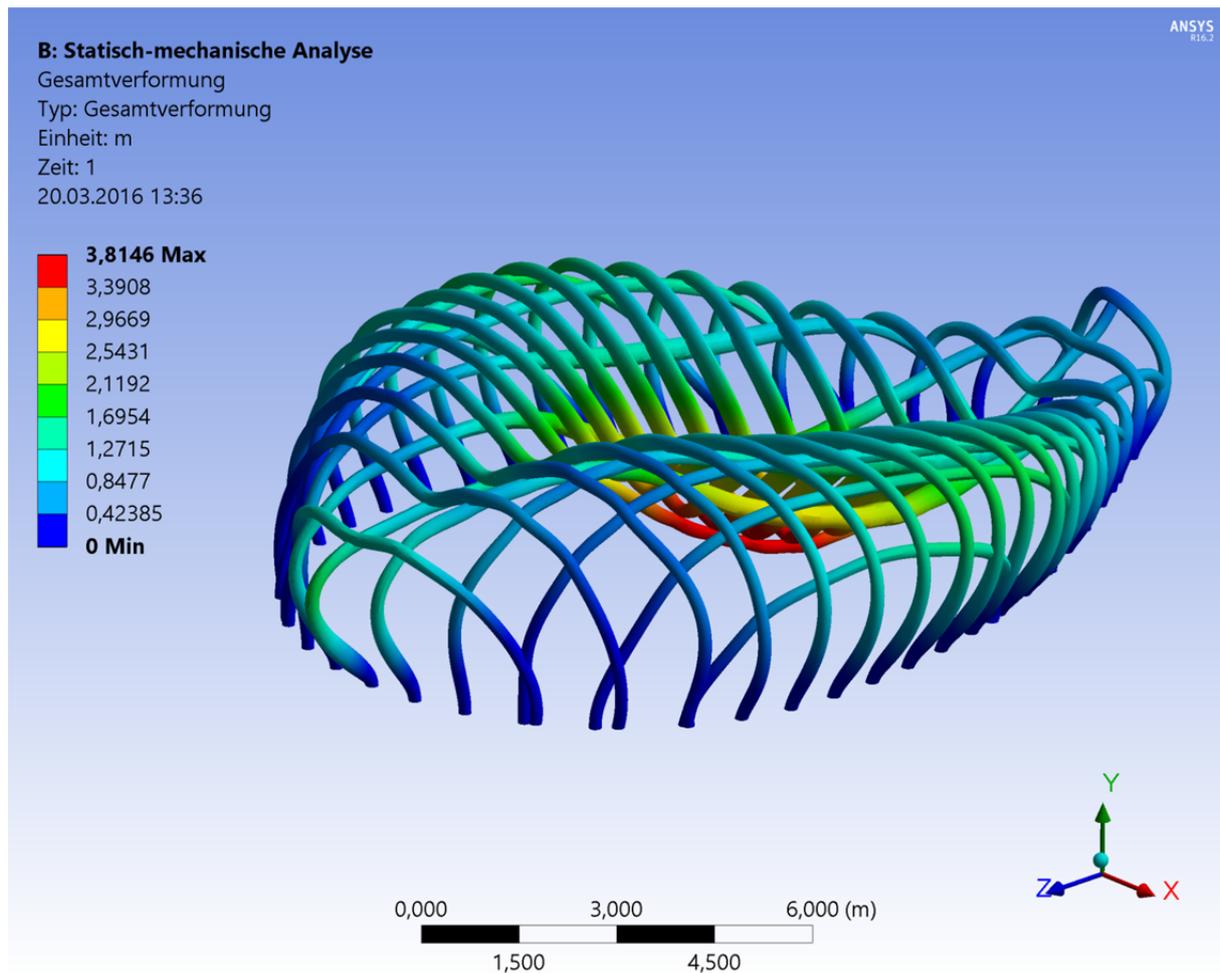


Abbildung 81 Gesamtverformung Polystyrol

Anhand der ermittelten E-Module war bereits ersichtlich, dass die Polystyrol-Füllung die geringste Tragkraft besitzt. In der simulierten Geometrie wäre ein Einsatz also nicht zielführend. Für andere Strukturen oder flächige, gekrümmte Elemente könnte sich die Verwendung dieser überaus leichten Füllung jedoch als vorteilhaft erweisen.

6 Finaler Entwurf

Die Herangehensweise des finalen Entwurfs beruht auf mehreren Grundsätzen. Zum einen soll die Ausgangsform möglichst weiche Kanten besitzen, um ein Zerlegen in Schnittmuster zu vereinfachen und zu große Spannungen zu verhindern. Zum anderen wollte ich den Entwurf so gut es geht parametrisieren, um durch Änderung der Grundform und Parameter schnell zu neuen Ergebnissen zu kommen. Diese Parametrisierung erfolgte in Grasshopper, einem Plug-In für die 3D Modellierungssoftware Rhinoceros. Ziel war es, ein zellenartiges Exoskelett zu entwerfen, welches durch Füllung mit geeigneten Materialien und anschließender Erzeugung eines Unterdrucks stabil wird. Das Skelett selbst wird mit provisorischen Stützen oder pneumatischen Kugelformen vorgeformt, welche nach dem Erhärten des Füllmaterials entfernt werden können. Als Resultat entsteht eine Hülle, welche jedoch bei jedem Aufbau leicht in der Form variiert, was zugleich den Reiz dieser Struktur ausmacht. Es soll der Eindruck der Lebendigkeit und Dynamik entstehen.

Das System ist vielseitig verwendbar, aufgrund des großen Entwicklungsaufwandes beschränkt sich dieser Entwurf auf den Bau eines Pavillons. Dadurch kann die Struktur getestet und begutachtet werden, ohne sie gleich in eine zu konkrete Anwendung zu drängen. Auf den folgenden Seiten werden die Schritte zum Erreichen der Form genauer erläutert und der visuelle Code aus Grasshopper dargestellt. Die Codedarstellungen sind sehr detailliert und können daher nicht alle in einer lesbaren Größe gezeigt werden, sondern dienen einer Verdeutlichung der komplexen Abläufe.

6.1 Entwurfsschritte

6.1.1 Ausgangsform

Das fertige Skelett entwickelt sich aus einer organischen Ausgangsform heraus. Die Grundform besteht aus einem Mesh, welches sogenannte Metaballs abbildet. Diese Metaballs sind ein Ergebnis eines Algorithmus, welcher eine Oberfläche aus der Verschmelzung mehrerer Kugeln erzeugt.

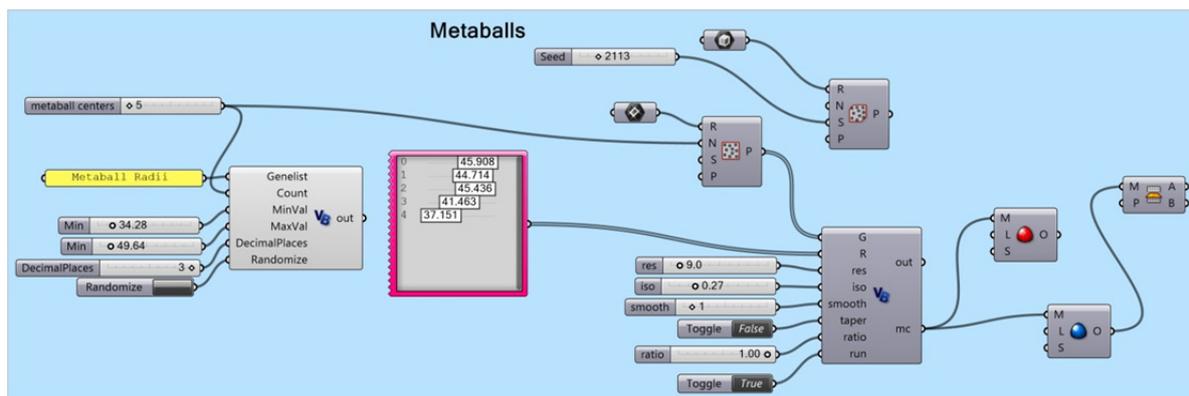


Abbildung 82 Metaball Definition in Grasshopper

Die Definition in Grasshopper erzeugt Metaballs an zufälligen Positionen innerhalb eines definierten Rechteckes. Ein als Genpool bezeichneter Code erzeugt zufällige Werte in einem bestimmten Bereich, welche den Radius der jeweiligen Metaballs bestimmen. Für diesen Entwurf wurden fünf Metaballs mit einem Radius zwischen 34,38 und 49,64 erzeugt. Das Ergebnis des Metaballalgorithmus ist ein Mesh. Dieses wird noch geglättet und mit der Grundebene geschnitten. Die obere Hälfte bildet die Ausgangsgeometrie für die weiteren Schritte.

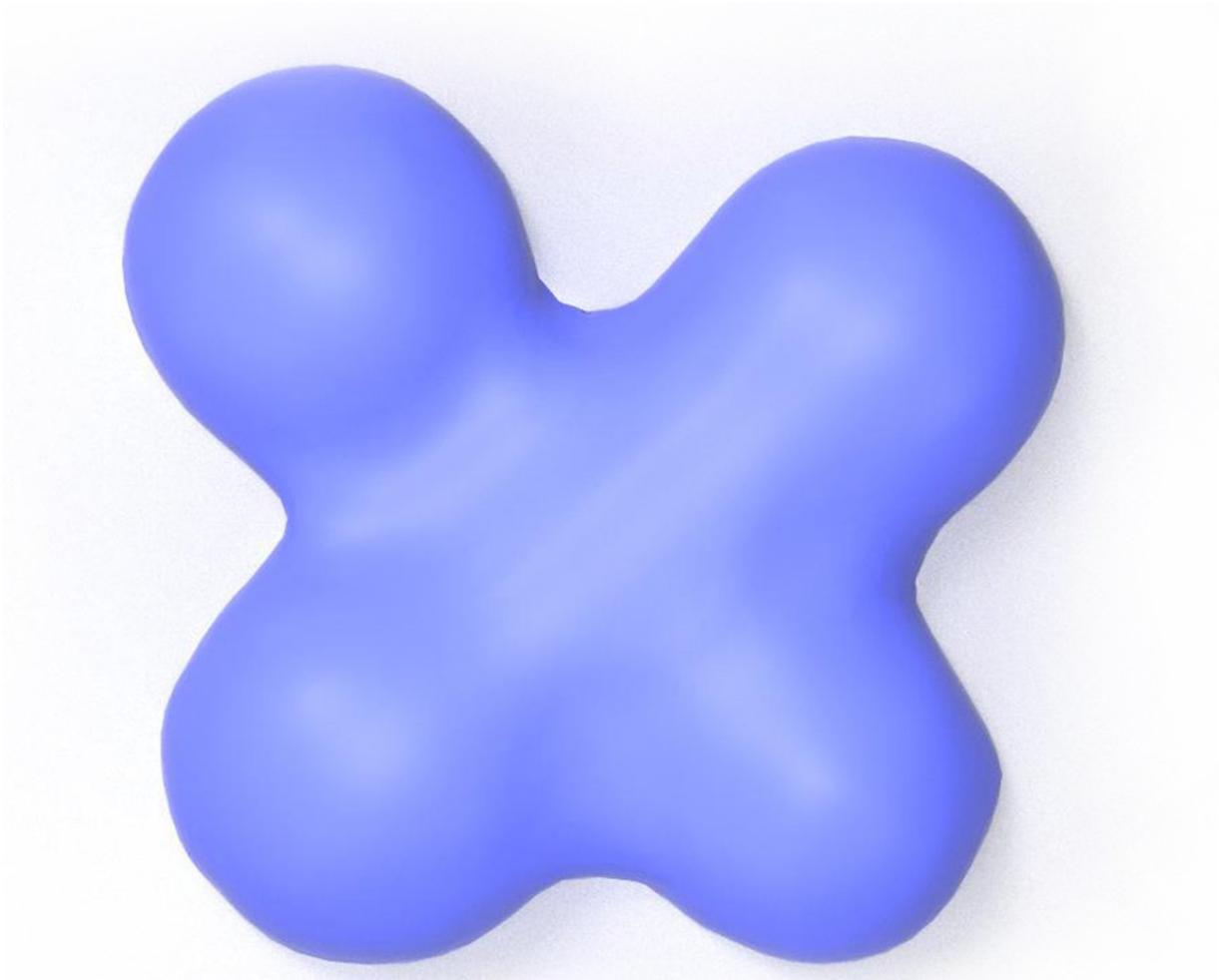


Abbildung 83 Draufsicht des Meshes

Die fünf Metaballs können in der Form erkannt werden. Vier sind eher in den Ecken des begrenzenden Rechteckes positioniert, einer mehr im Zentrum.



Abbildung 84 Perspektive der Form

6.1.2 FEM-Simulation und Neuparametrisierung

Der nächste Schritt ist eine FEM-Simulation der Geometrie. Die dabei berechneten Spannungen werden für eine Neuparametrisierung der Oberfläche genutzt. Hierfür werden Punkte auf der Hülle in Abhängigkeit der auftretenden Spannungen verteilt. Die so entstandene Punktwolke ist ein Abbild der Spannungsverläufe. Je höher die Spannungen, desto dichter liegen die Punkte aneinander.

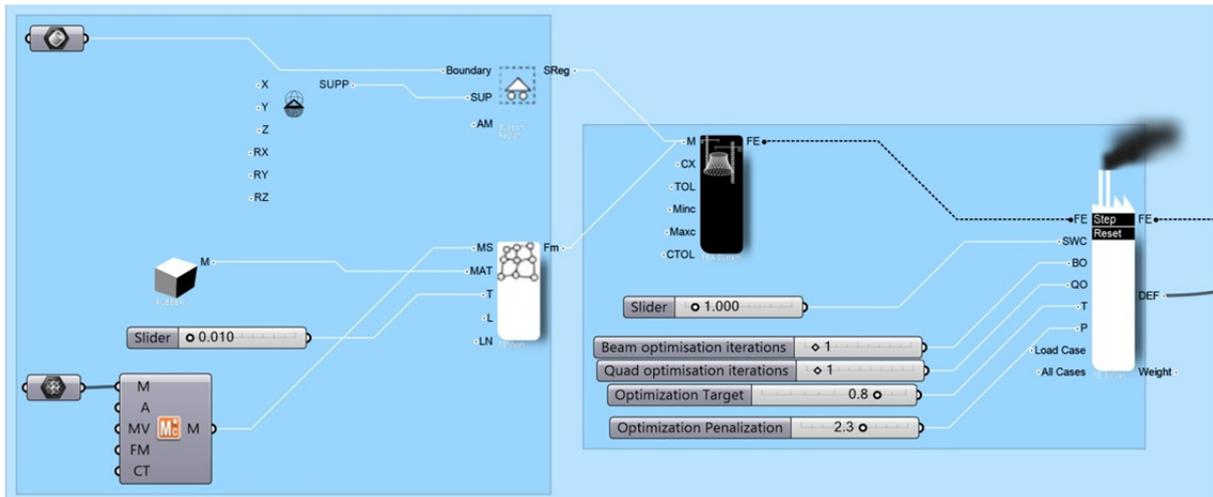


Abbildung 85 FEM-Spannungsberechnung

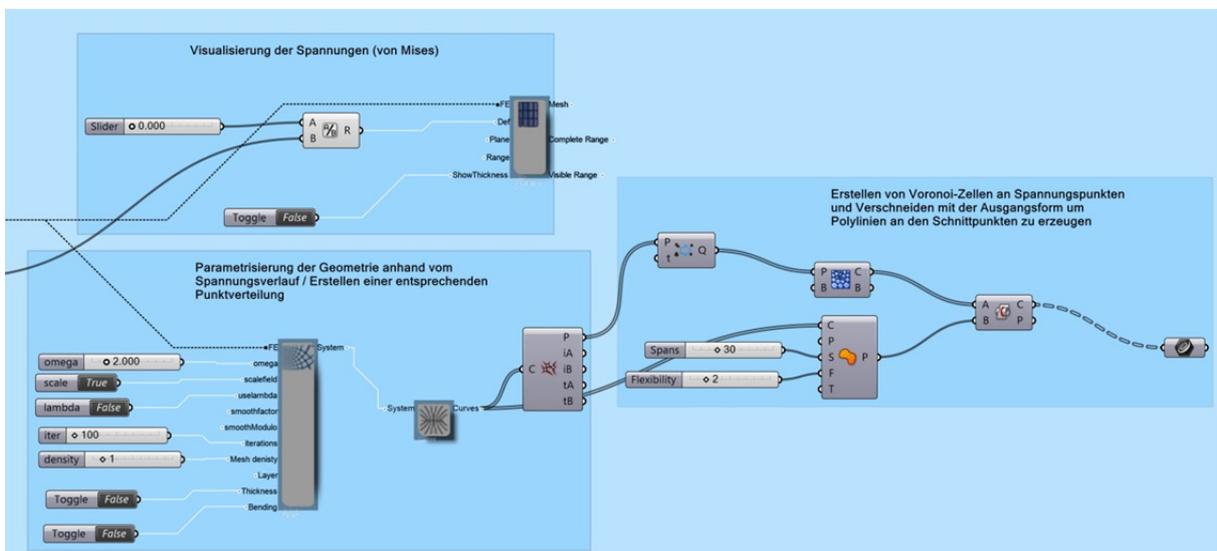


Abbildung 86 Neuparametrisierung der Oberfläche und 3D-Voronoi

Die FEM-Simulation berechnet die von Mises-Vergleichsspannung der Geometrie unter Eigengewichtslast. In der Darstellung bewegen sich die Spannungen zwischen blau (gering) und rot (hoch).

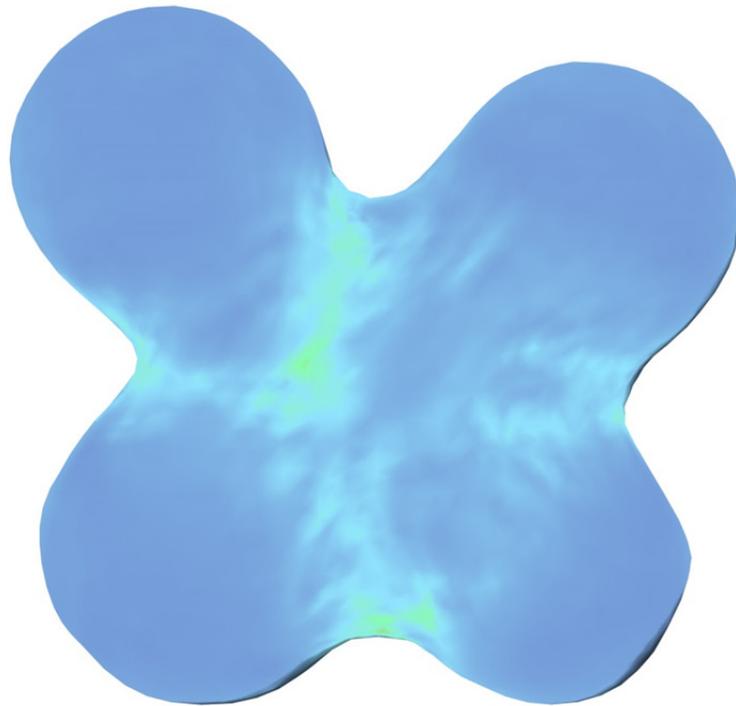


Abbildung 87 Darstellung der von Mises Spannungen

Die Verteilung der Punkte spiegelt die Werte der Spannungen wider. Wo hohe Spannungen auftreten, steigt auch die Konzentration der Punkte.

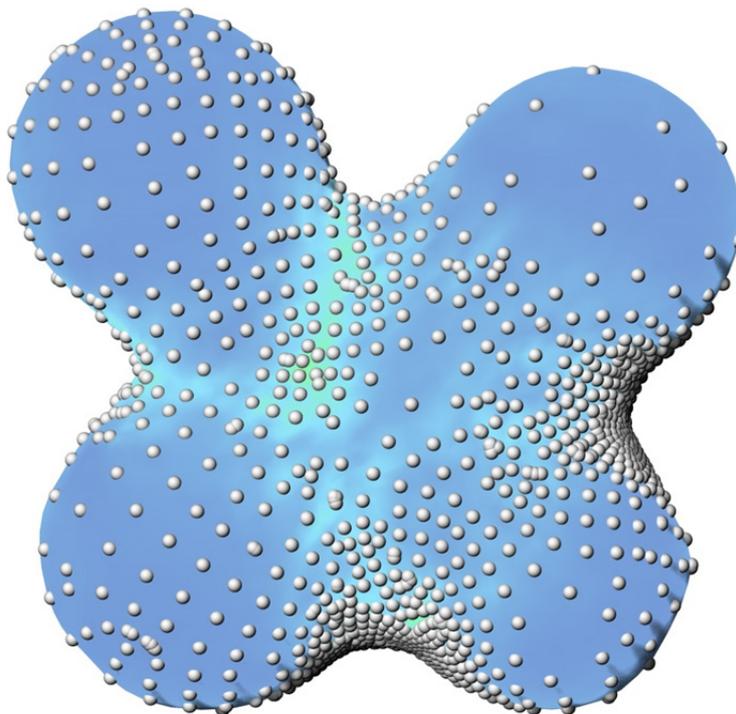


Abbildung 88 Punkteverteilung auf Grundlage der Spannungswerte

Diese Punkte dienen im Anschluss als Eingabeparameter eines 3D-Voronoi Diagramms. Folglich sind auch die Voronoi-Zellen größer, je geringer die Spannungen sind. Dadurch wird gewährleistet, dass Stellen mit hohen Spannungen ein enges Geflecht von Zellen erhalten, welches in weiterer Folge zu einer eher geschlossenen Fläche führt.

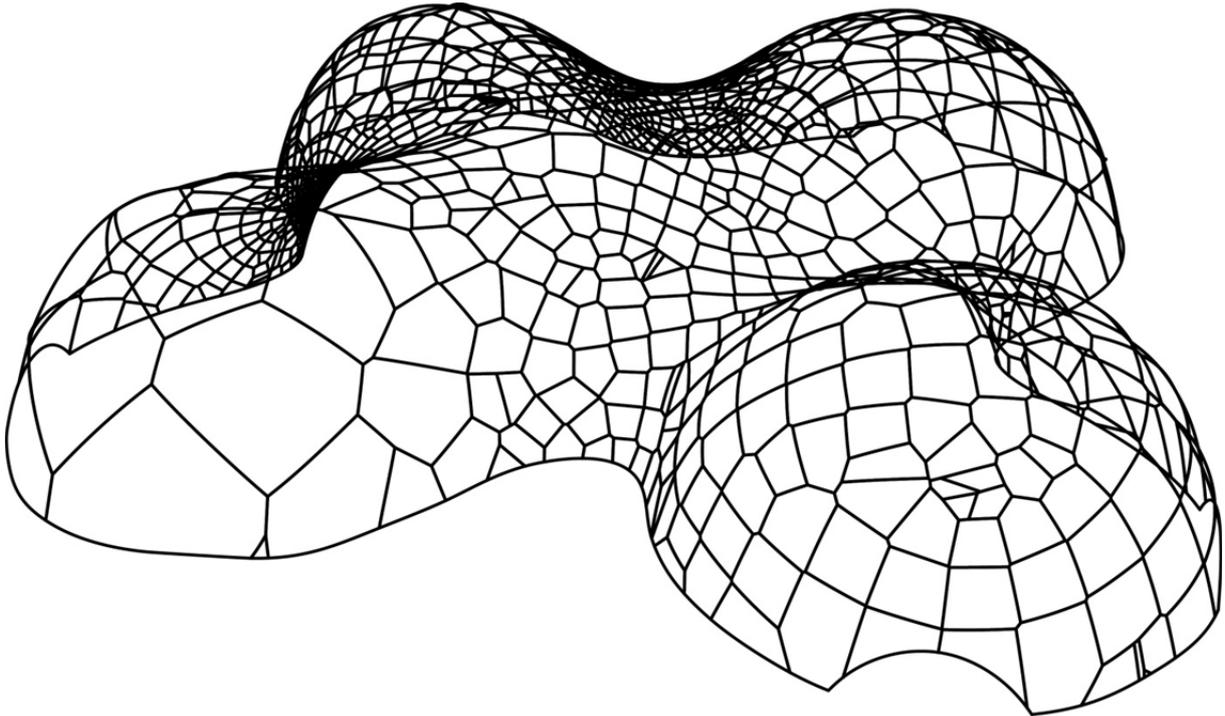


Abbildung 89 Voronoi-Zellen als Liniengrafik

6.1.3 Marching Cubes Algorithmus

Dieser Algorithmus erzeugt Isoflächen, welche sich einem Polygonmodell oder einer anderen Geometrie annähern. Als Eingabegeometrie dient das Drahtgittermodell des 3D-Voronoi. Ein weiterer Zusatzcode definiert den Radius, welchen die gebildete Isofläche an der jeweiligen Stelle besitzt. Ziel ist es, die entstehende Struktur nach oben hin immer filigraner zu machen. Dazu wird der Radius in Abhängigkeit des Abstandes zur Grundfläche berechnet und ist kleiner, je größer dieser Abstand ist.

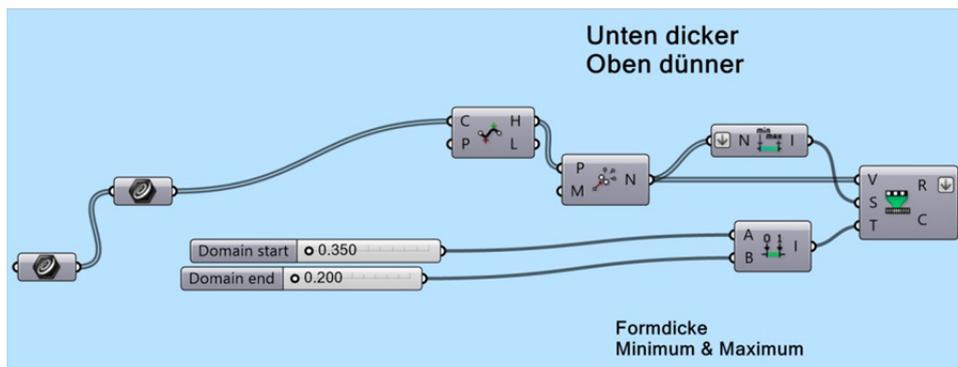


Abbildung 90 Definition der Radiusvarianz

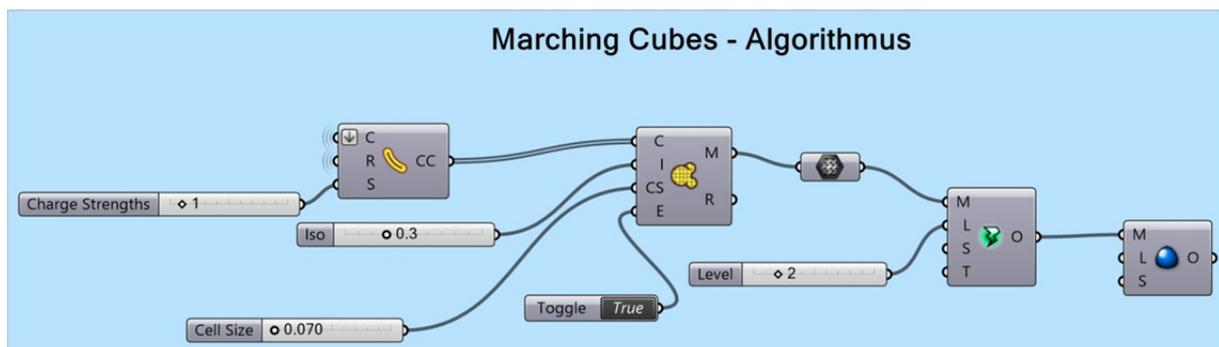


Abbildung 91 Marching Cubes Algorithmus

Das Ergebnis des Marching Cube Algorithmus ist ein Mesh, das noch eine Glättung und Subdivision (Teilung der Einzelflächen – Netz wird genauer) durchläuft. Im Anschluss kann dieses Mesh für die Schnittmustererzeugung, Visualisierung und für 3D-Druck genutzt werden.

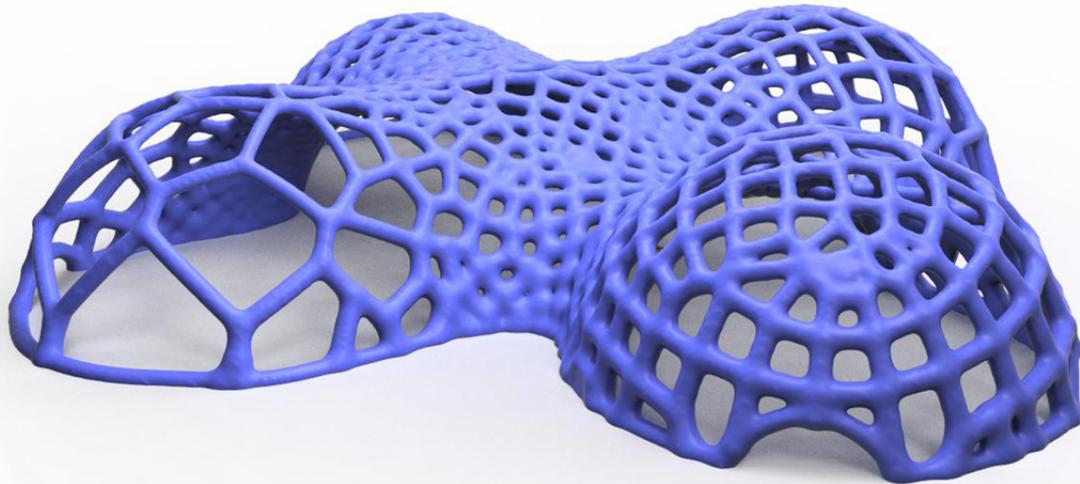


Abbildung 92 Exoskelett

Die so entstandene Struktur ähnelt dem Skelett eines Strahlentierchens sehr, was die Lebendigkeit und den organischen Entwurfsansatz sehr gut transportiert.



Abbildung 93 Skelett eines Strahlentierchens
(Radiolaria), Durchmesser ca. 300µm

6.1.4 Berechnung der Öffnungen

Als letzter Schritt werden noch die Verschlussflächen der Öffnungen berechnet. Das Skelett besteht bis zu diesem Zeitpunkt nur aus der harten Primärstruktur. Für die noch leeren Öffnungen werden Flächen berechnet, um diese später zu verschließen. Aufgrund der Schweißbarkeit von Membranen können hier transparente, transluzente oder opake Flächen in die Öffnungen geschweißt werden. Somit wird eine Steuerung der Belichtung und Verschattung ermöglicht.

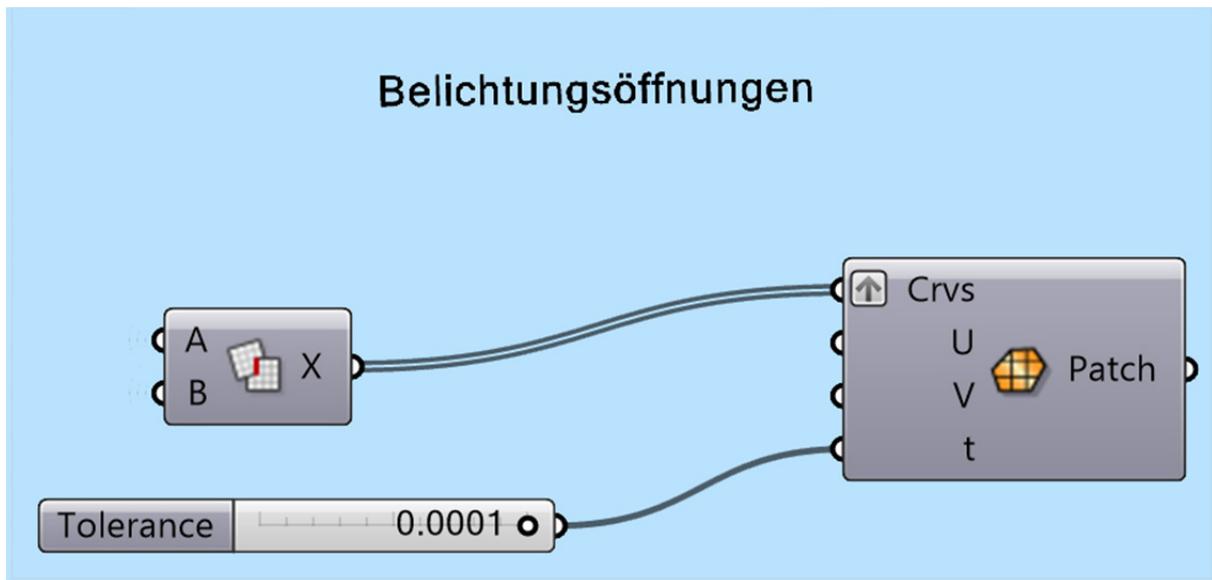


Abbildung 94 Definition zur Berechnung der Öffnungsflächen

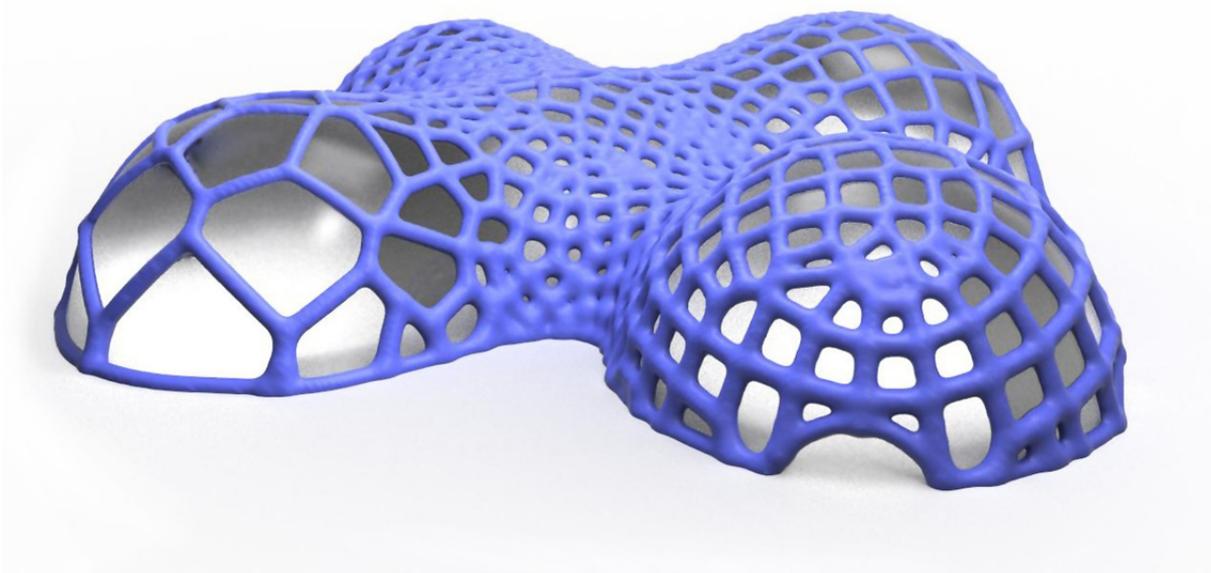


Abbildung 95 Struktur mit teilweise opaken Öffnungen

6.2 Darstellungen

Es folgen einige Plandarstellungen und Visualisierungen, um den inneren Aufbau und die Maßstäblichkeit zu veranschaulichen.

6.2.1 Draufsicht

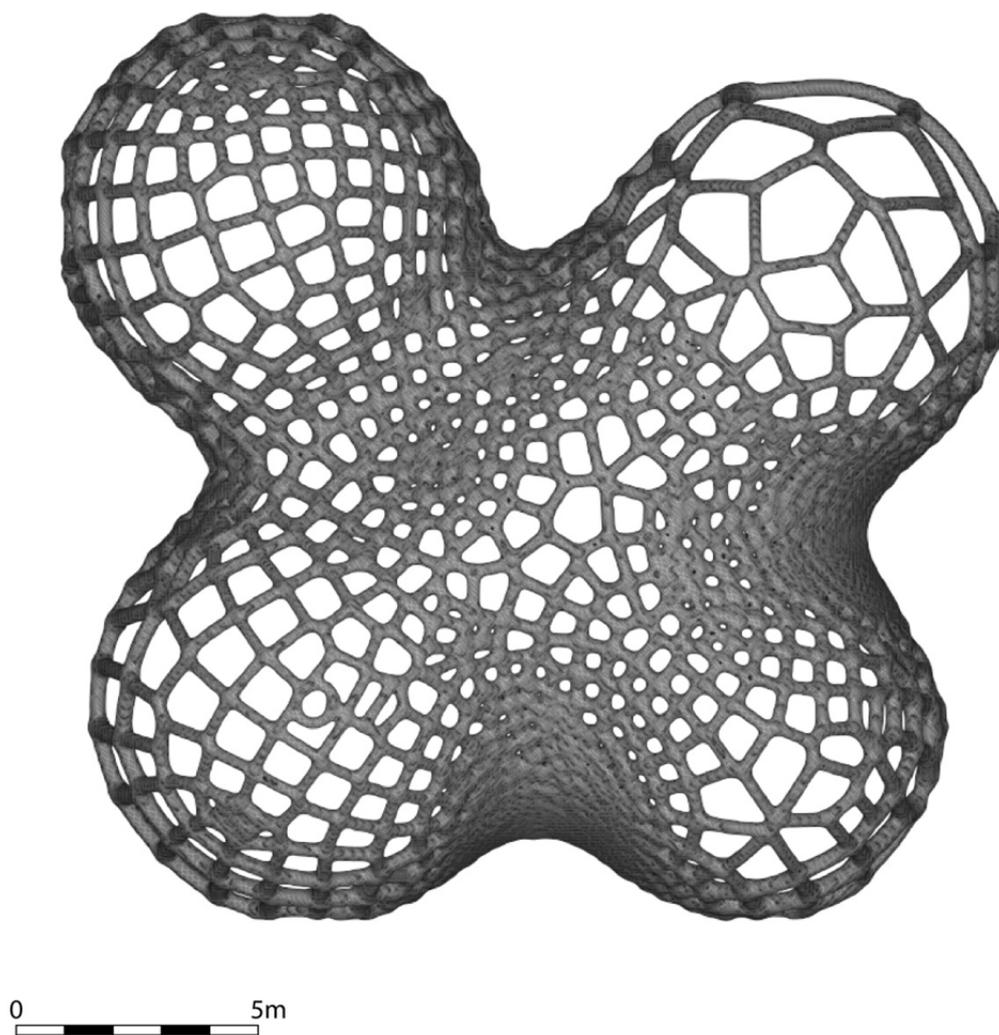


Abbildung 96 Draufsicht

6.2.2 Grundriss

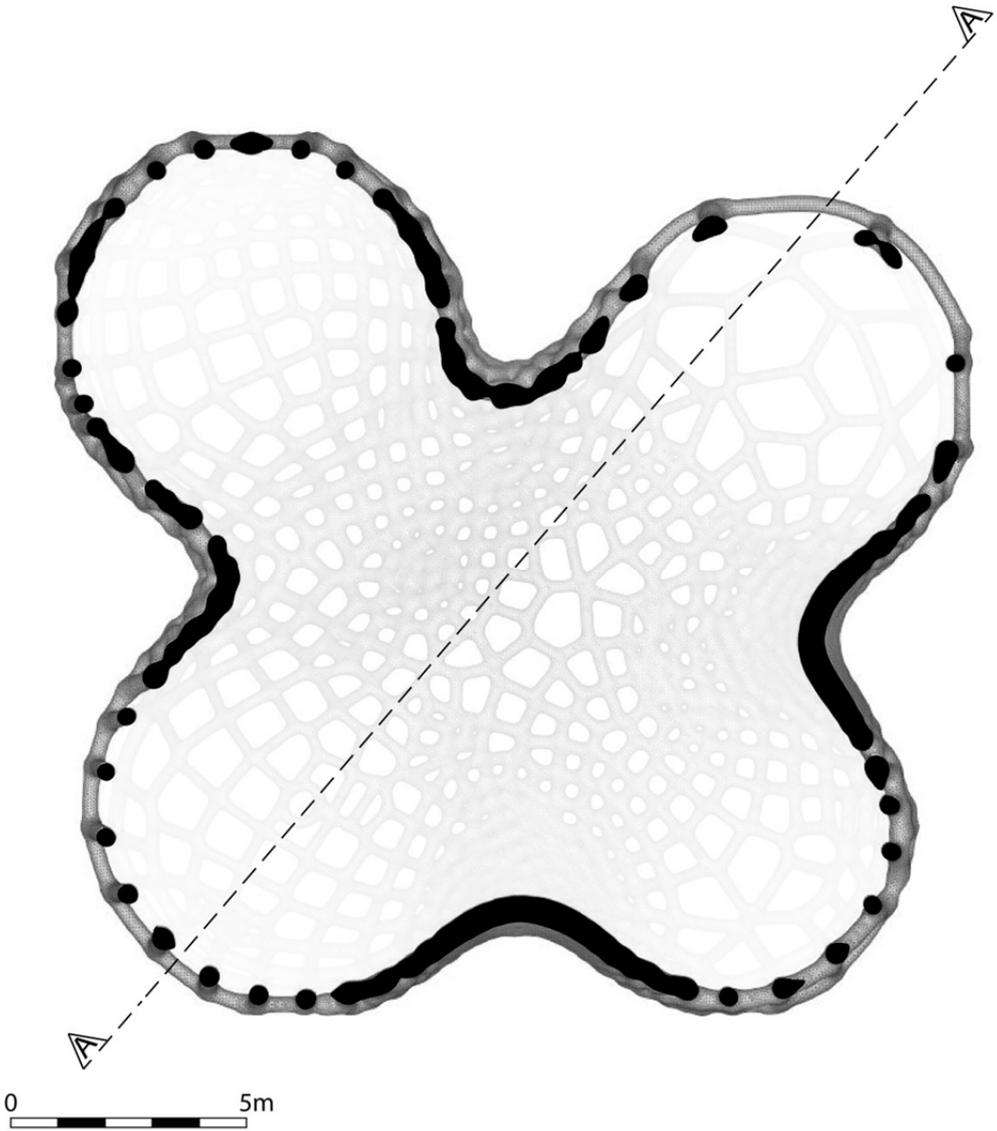


Abbildung 97 Grundriss

6.2.3 Schnitt A-A

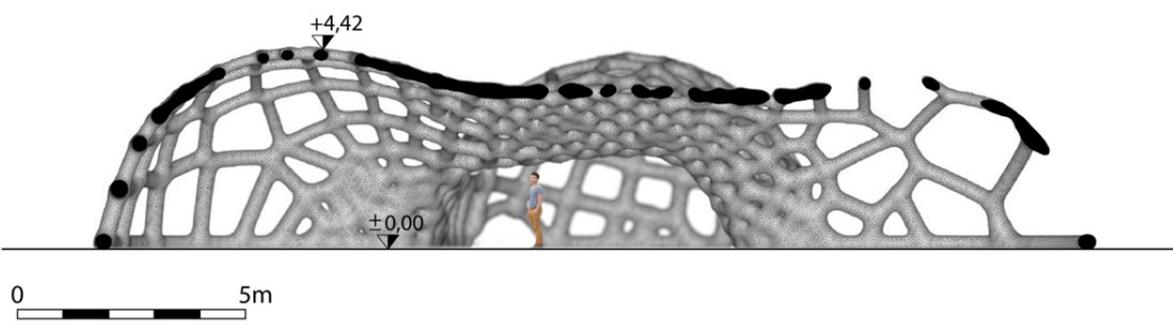


Abbildung 98 Schnitt A-A

6.2.4 Visualisierung



Abbildung 100

Außenraumvisualisierung

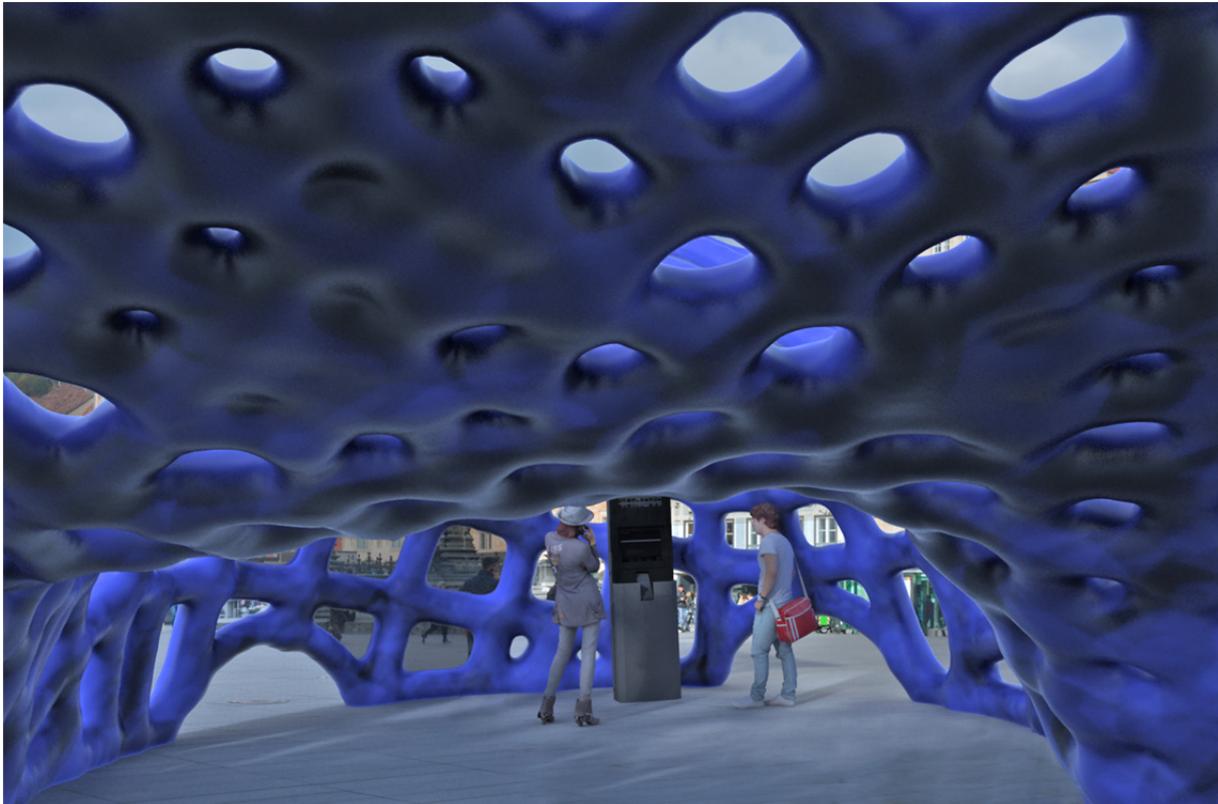


Abbildung 99 Innenraumvisualisierung

6.3 Modell Mock-Up

Das Mock-Up Modell stellt nicht dieselbe Struktur wie in den vorangegangenen Plänen dar, sondern soll die Grundlagen des Systems veranschaulichen. Hierzu wurde eine eigene, kleinere Geometrie generiert, welche die gleichen zuvor beschriebenen Schritte durchläuft. Die so entstandene Struktur besitzt etwa die Ausmaße einer Box mit 1,5m x 1,5m Grundfläche und 2m Höhe. Dadurch wird gewährleistet, dass ein Mensch die Geometrie betreten kann, ohne dass allzu viel Material benötigt wird. Als Membran wurde schwarze PVC-Folie mit 0,5mm Stärke benutzt, da diese sehr preisgünstig und weit verbreitet ist. Zum Schweißen der einzelnen Bahnen konnte die Hochfrequenzschweißmaschine des Instituts für Zeitgenössische Kunst verwendet werden.

Die fertig verschweißte Form wurde mit Polystyrol-Perlen gefüllt und ist nach dem Evakuierungsvorgang standfest. Aufgrund der Formbarkeit des Systems ergeben sich bei jedem Aufbau des Modells neue Variationen der Ausgangsgeometrie.



Abbildung 101

Visualisierung des Modells

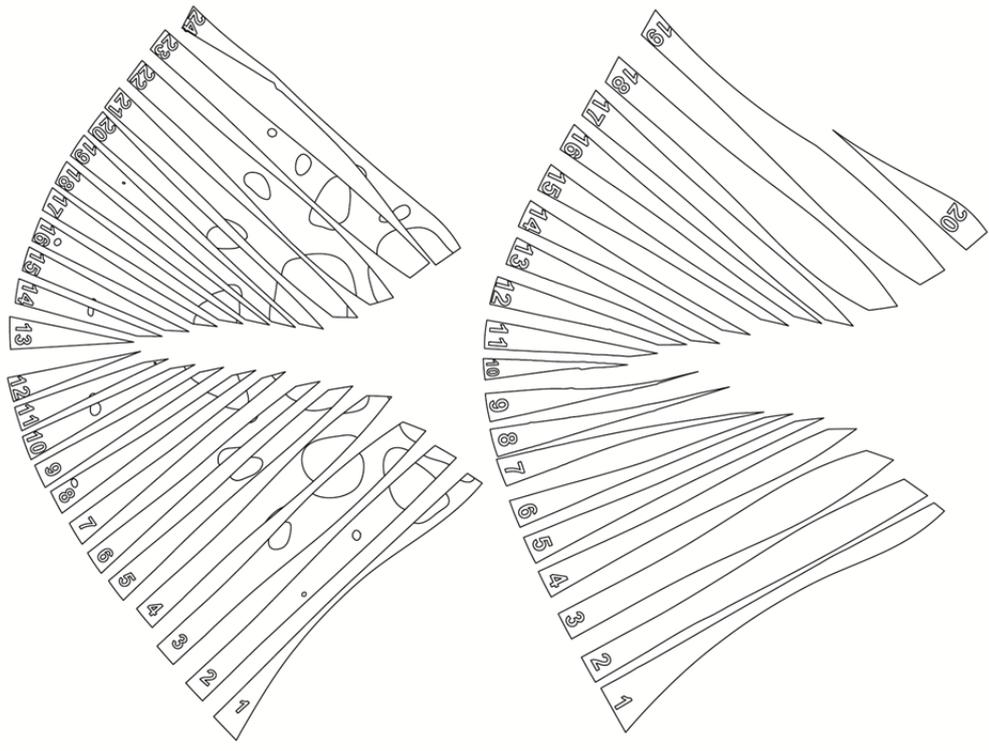


Abbildung 102 Schnittmuster für den Zuschnitt



Abbildung 103 Modellfoto

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Fazit

Das Arbeiten mit Membranen bietet unzählige Anwendungsmöglichkeiten. Durch den Einsatz von Vakuumtechnik wird das Grundkonzept des Membranbaus eigentlich umgekehrt. Zwar gibt es Projekte, die mit Unterdruck eine Membran vorspannen, jedoch bietet dabei kein Medium einen Widerstand gegen die Hülle. Beim SolidShapeshifter steht die textile Haut nur unter geringer Eigenspannung, vielmehr wird sie genutzt, um ein Füllmedium zusammenzupressen, welches sich dadurch verhärtet und den Lastabtrag gewährleistet. Damit ist die endgültige Form nicht vorprogrammiert, wie bei herkömmlichen Systemen, sondern kann in einem gewissen Ausmaß durch die temporären Stützkräfte gesteuert werden.

Das Hauptproblem des Systems ist die Verwendung eines passenden Füllmaterials. Dieses sollte im Optimalfall ein leichtes Granulat sein, dessen Einzelkörner hohe Druckkräfte aushalten und untereinander möglichst hohe Reibung besitzen. Leider sind solche Füllungen schwer zu finden und in der Kürze der Zeit konnten nicht alle Materialien getestet werden. Viele Dämmschüttungen weisen solche Eigenschaften auf, nur meistens sind die Körner nicht besonders druckfest. Somit würde die Füllung nach mehrmaligem Evakuieren immer kleinteiliger, bis schließlich nur Staub übrig bliebe.

Vor allem für temporäre Zwecke ist dieses System sehr interessant, da die Möglichkeit der Formbarkeit einen hohen Grad der Anpassung an die jeweilige Umgebung erlaubt. Ein Vorteil durch die Verwendung von Dämmschüttungen als Füllmedium ist die Bildung eines wärmegeprägten Innenraumes. Die wenigsten temporären Architekturen ermöglichen diesen Komfort. Das Gebiet der Vakuumarchitektur ist noch sehr unerforscht und bietet noch zahlreiche Möglichkeiten für weitere Vertiefung.

7.2 Ausblick

Ein durchaus vorstellbarer Weg für dieses System ist die Umsetzung einer Großform nach einer vorhergehenden weiteren Optimierung und weiteren Tests. Eine so erstellte Struktur könnte bei diversen Veranstaltungen aufgestellt und so der Architekturwelt nähergebracht werden. Während einer Diskussion mit meinen Betreuern kam eine weitere Art der Anwendung auf. Man könnte Vakuummembranen mit einer weichen, formbaren Füllung vorformen und diese nach dem Evakuierungsvorgang als Schalungselemente für Betongussverfahren nutzen. Das Herstellen von Sonderformen als Schalung ist bis heute ein Problem, welches meist mit teuren Einzelanfertigungen einhergeht. Eine Schalung aus Vakuumelementen könnte man einfach durch erneutes Belüften wieder in die weiche Ausgangsform bringen und so weitere Elemente produzieren. Mithilfe eines sogenannten Shape-Changing-Screen lassen sich beliebige dreidimensionale Oberflächen erzeugen, welche als Negativ für ein Vakuumschalungselement dienen könnten. So ließen sich schnell verschiedene Formen zu einer harten Oberfläche transformieren. Da reine Vakuumarchitektur noch sehr experimentelle Strukturen hervorbringt, könnte die Kombination von formbaren Elementen mit herkömmlichen Baumethoden die Lücke zwischen Prototyp und Alltagstauglichkeit schließen.

Sollte die Resonanz groß genug sein, hoffe ich, eine Dissertation über dieses spannende Thema verfassen zu dürfen und im Zuge dessen die Möglichkeiten der Anwendungen mit Industriepartnern auszuloten.

8 Anhang

8.1 Literaturverzeichnis

LeCuyer, Annette: ETFE. Technologie und Entwurf, Basel-Boston-Berlin 2008

Nerdinger, Winfried: Frei Otto. Das Gesamtwerk: Leicht bauen - natürlich gestalten, Basel-Boston-Berlin 2005

Dessauce, Marc: The Inflatable Moment. pneumatics and protest in `68, New York 1999

Jeska, Simone: Transparente Kunststoffe. Entwurf und Technologie, Basel-Boston-Berlin 2008

Seidel, Michael: Textile Hüllen. Bauen mit biegeweichen Tragelementen, Berlin 2008

Knippers, Jan u.a.(Hg.): Atlas Kunststoffe + Membranen. Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion, München 2010

Moro, José Luis: Baukonstruktion. Vom Prinzip zum Detail, Bd. 1, Berlin-Heidelberg 2009

Moro, José Luis: Baukonstruktion. Vom Prinzip zum Detail, Bd. 3, Berlin-Heidelberg 2009

Fischer, Markus: PlusMinus. Pneumatische Gitterschale,
https://www.festo.com/rep/de_corp/assets/pdf/Info_PlusMinus_3001_de_lo.pdf, in:
<https://www.festo.com>, 15.03.2016

Foster + Partners: Khan Shatyr Entertainment Centre,
<http://www.fosterandpartners.com/projects/khan-shatyr-entertainment-centre>, in:
<http://www.fosterandpartners.com>, 15.03.2016

Lucerne Festival: Ark Nova,
<http://www.ark-nova.com/en/index.php>, in: <http://www.ark-nova.com>, 15.03.2016

Herzog, Thomas: Pneumatische Konstruktionen. Bauten aus Membranen und Luft, Stuttgart 1976

Kronenburg, Robert: Mobile Architektur. Entwurf und Technologie, Basel-Boston-Berlin 2008

Schmidt, Wilhelm: Heronis Alexandrini. Opera Quae Supersunt Omnia, Volumen I Pneumatica et automata [Heron von Alexandria. Druckwerke und Automatentheater], Berlin, Boston 2011

Beck, Th.: Philon von Byzanz. (etwa 260-200 v. Chr.), in: Matschoß, Conrad (Hg.): Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie. Jahrbuch des Vereines Deutscher Ingenieure, Berlin-Heidelberg, 1910

Nimführ, Raimund: Leitfaden der Luftschiffahrt und Flugtechnik. in gemeinverständlicher Darstellung und mit besonderer Berücksichtigung der historischen Entwicklung, Barsinghausen 2011

Gengnagel, Christoph: Mobile Membrankonstruktionen, Diss., München 2005

Teutsch, Uwe: Tragverhalten von Tensairity Trägern, Diss., Zürich 2009

Minke, Gernot: Pneumatische Konstruktionen, in: Pfau, Adolf/Pfau, Gilbert (Hg.): Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home: internationale Zeitschrift, Zürich 1971

Wünsch, Volkmar: Differentialgeometrie. Kurven und Flächen, Leipzig 1997

Grunwald, Gregor: Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranmodule in ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle, Diss., Berlin 2007

Zhang, Lingyun: Untersuchung zu mehrlagigen Membrankonstruktionen im Hinblick auf unterschiedliche Funktionen von Gebäudehüllen, Diss., München 2007

Herzig, Thomas: Pneumocell-Katalog 2013, Wien 2013

Bilow, Marcel/Klein, Tillmann/Knaack, Ulric: imagine 02 – Deflateables, Rotterdam 2008

Nachtigall, Werner/Pohl, Göran: Bau-Bionik. Natur-Analogien-Technik, Berlin-Heidelberg 2003

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildungen ohne Quellenangabe wurden vom Autor dieser Arbeit extra angefertigt.

Abbildung 1 Patentschrift für die Konstruktion pneumatischer Zelte, aus: https://patentimages.storage.googleapis.com/pages/US1302182-0.png , Stand: 11.02.2016	9
Abbildung 2 Dymaxion House, aus: http://archpaper.com/news/articles.asp?ii=4672 , Stand: 11.02.2016	10
Abbildung 3 Hochspannungslabor Köln, aus: http://freiotto-architekturmuseum.de/PRPROJEK/projekt81.htm , Stand: 11.02.2016	11
Abbildung 4 Suitaloon, aus: http://architecturewithoutarchitecture.blogspot.co.at/2012_12_01_archive.html , Stand: 12.02.2016	12
Abbildung 5 Oase Nr 7, aus: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commonc/7/71/Museum_f%C3%BCr_Kunst_und_GewerGe_Hamburg.jpg , Stand: 13.02.2016.....	13
Abbildung 6 Gelände der Weltausstellung 1970, aus: https://betterarchitecture.files.wordpress.com/2012/10/2774380237_c83d98abcf_o.jpg , Stand: 15.02.2016	14
Abbildung 7 Fuji Pavillon, aus: http://www.kawastruc.com/projects/projepro_0302_e.htm , Stand: 15.02.2016	14
Abbildung 8 USA Pavillon Schnitt und Draufsicht, aus: http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/0489-21.jpg , Stand: 15.02.2016	15

Abbildung 9	Niederdrucksysteme nach Minke, Gernot Minke, Niederdrucksysteme, 1971, Tabelle mit Grafiken, aus: Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home : internationale Zeitschrift, Zürich: Bauen + Wohnen 1971, 501. ...	19
Abbildung 10	Hochdrucksysteme nach Minke, Gernot Minke, Hochdrucksysteme, 1971, Tabelle mit Grafiken, aus: Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home: internationale Zeitschrift, Zürich: Bauen + Wohnen 1971, 501.	20
Abbildung 11	Klassifizierung pneumatisch stabilisierter Membrantragwerke, Gernot Minke, Klassifizierung pneumatisch stabilisierter Membrantragwerke, 1972, Übersicht über die Systeme und Typen der pneumatisch stabilisierten Membrantragwerke, Proceedings of the International Symposium on Pneumatic Structures, Delft 1972, S. GMI 1-29.....	21
Abbildung 12	Morphologische Klassifizierung nach Herzog, Thomas Herzog, Morphologische Klassifizierung, 1976, aus Pneumatische Konstruktionen. Bauten aus Membranen und Luft, Stuttgart: Hatje Cantz Verlag 1986.	22
Abbildung 13	Linienförmige Stützung mit harten Kanten und Ringelement.....	24
Abbildung 14	Linienförmige Stützung mit weichen Kanten.....	24
Abbildung 15	Flächige, pneumatische Stützung mit harten Kanten	24
Abbildung 16	Eben	26
Abbildung 17	Einsinnig.....	26
Abbildung 18	Synklastisch	26
Abbildung 19	Anitklastisch	26
Abbildung 20	Ebene Einspannung	28
Abbildung 21	Nicht stabiler Zustand.....	28
Abbildung 22	Verformungsprozess	28
Abbildung 23	Stabiler Endzustand	28

Abbildung 24	Zustand ohne Belastung	30
Abbildung 25	Lastfall: gleichmäßige Flächenlast	30
Abbildung 26	Lastfall: Punktlast	30
Abbildung 27	Seifenhautmodell, 1991, aus: ARCH+ 107: Textile Architektur, Aachen: ARCH+ Verlag 1991, 68.....	32
Abbildung 28	Einteilung der Fläche durch geodätische Linien	35
Abbildung 29	Ergebnis der Projektion der Einzelflächen in die Ebene	35
Abbildung 30	Aufbau einer Gewebemembran.....	38
Abbildung 31	Häufige Gewebetypen, Prof. Dr. Paolo Ermanni, Häufig eingesetzte Gewebetypen, 2004, aus: Skript zu Composites Technologien ETH Zürich, ETH Zürich IMES-ST 2007, 239.	40
Abbildung 32	Zusammenhang Spannung/Dehnung und Gewebeausrichtung	41
Abbildung 33	Klemmplattenstoß	49
Abbildung 34	Kederschiene	49
Abbildung 35	Zickzackschnürung.....	50
Abbildung 36	Kettschnürstoß	50
Abbildung 37	Übersicht der Schweißverfahren, Adolf Franck, Übersicht der Verfahren zur Verschweißung zweier Kunststoffteile aus demselben thermoplastischen Werkstoff, 2000, Werkbild RÖHM, aus Kunststoff-Kompodium, München: Heinrich Vogel Verlag 2000.	53
Abbildung 38	Membrantasche mit Zugseil	56
Abbildung 39	Geformte Klemmplatten mit vorgesetztem Spannseil und Nachspanner	56
Abbildung 40	Klemmplattenstoß als Randausbildung	57

Abbildung 41	Sonderform der Randausbildung mit Kederschienen	58
Abbildung 42	Schichtaufbau des aerofabrix[iso], aus: http://www.ofroom.at/wp-content/uploads/2015/04/P4280410_1_gross1.jpg Stand: 13.03.2016	61
Abbildung 43	Pneumatische Gitterschale, Foto: Walter Vogel, aus: Fischer 2011, 3.	64
Abbildung 44	Aufbauvorgang, Foto: Walter Vogel, aus: Fischer 2011, 2.	65
Abbildung 45	Sockelkonstruktion, Foto: Walter Vogel, aus: Fischer 2011, 4.	65
Abbildung 46	Khan Shatyr beleuchtet, 2010, aus: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Khan_Shatyr_Entertainment_Centre.jpg Stand: 15.03.2016	67
Abbildung 47	Khan Shatyr Schnitt, aus: http://www.fosterandpartners.com/media/Projects/1438/drawings/img3.jpg Stand: 15.03.2016	68
Abbildung 48	Airtecture Ausstellungshalle, aus: http://www.hightexworld.com/fileadmin/Redaktion/Images/Projects/Festo/hightex-festo-hall-01.jpg Stand: 17.03.2016	70
Abbildung 49	Ansicht Front, aus: Mobile Architektur: Entwurf und Technologie, Basel-Boston-Berlin: Birkhäuser Verlag 2008, 62.....	71
Abbildung 50	Schnitt durch Deckenkonstruktion, aus: Mobile Architektur: Entwurf und Technologie, Basel-Boston-Berlin: Birkhäuser Verlag 2008, 63.	72
Abbildung 51	Größenvergleich Mensch zu Pneuzelle, aus: http://www.pneumocell.com/news/CELL600/burgiinnen960.jpg , Stand: 17.03.2016	73
Abbildung 52	Schema einer dreilagigen Zelle, aus: Pneumocell Katalog, Wien Thomas Herzig, 13.	74
Abbildung 53	Verschiedene Verschattungsgrade, aus: Pneumocell Katalog, Wien Thomas Herzig, 13.	74

Abbildung 54	Luftaufnahme der Ark Nova, aus: http://www.ark-nova.com/en/images/archive2013/39.jpg , Stand: 17.03.2016	76
Abbildung 55	Innenseite mit Loch, aus: http://www.ark-nova.com/en/images/archive2014/20.jpg , Stand: 18.03.2016	77
Abbildung 56	Ark Nova Abbau, ARK NOVA - Traveling Concert Hall, Japan 2015, Online unter: https://www.youtube.com/embed/plwZCVg_eB0 , Stand: 18.03.2016.	78
Abbildung 57	Vakuumbrücke unter Last, aus: http://40.media.tumblr.com/tumblr_l3584nGPJQ1qc3brzo9_r1_1280.jpg , Stand: 18.03.2016	79
Abbildung 58	Nahaufnahme der Brücke, aus: Bilow, Marcel / Klein, Tillmann / Knaack, Ulrich: Deflateables, Rotterdam 2008, 86	80
Abbildung 59	Aufbauschema vor Ort, aus: Bilow, Marcel / Klein, Tillmann / Knaack, Ulrich: Deflateables, Rotterdam 2008, 84	80
Abbildung 60	Vier Kugelhälften im Quadrat	83
Abbildung 61	Ausfüllen des Zwischenraumes, Verschmelzen zweier Kugeln	83
Abbildung 62	Hälfte beider verschmolzenen Kugeln	84
Abbildung 63	Erweiterung Möglichkeit A	84
Abbildung 64	Erweiterung Möglichkeit B	84
Abbildung 65	Überarbeitete Form	85
Abbildung 66	Variante 1	86
Abbildung 67	Variante 2	86
Abbildung 68	Ineinandergesteckte Erweiterung	86
Abbildung 69	Polyamid-Folienschlauch unter Druck	87
Abbildung 70	Modell mit halbierter Schlauchanzahl	88

Abbildung 71	Arbeitsmodell Maßstab 1:10.....	88
Abbildung 72	Einweichen der Schläuche beim fertigen Modell.....	89
Abbildung 73	3-Punkt-Biegeversuch.....	91
Abbildung 74	Gesamtverformung der Geometrie.....	93
Abbildung 75	Diatomeen unterm Rasterelektronenmikroskop, aus: https://www.flickr.com/photos/picksfromoutthere/16575151746 , Stand: 20.03.2016	96
Abbildung 76	Biegeversuch Perlit.....	98
Abbildung 77	Biegeversuch Blähton.....	99
Abbildung 78	Biegeversuch Polystyrol-Granulat.....	100
Abbildung 79	Gesamtverformung Perlite.....	103
Abbildung 80	Gesamtverformung Blähton.....	104
Abbildung 81	Gesamtverformung Polystyrol.....	105
Abbildung 82	Metaball Definition in Grasshopper.....	107
Abbildung 83	Draufsicht des Meshes.....	108
Abbildung 84	Perspektive der Form.....	108
Abbildung 85	FEM-Spannungsberechnung.....	109
Abbildung 86	Neuparametrisierung der Oberfläche und 3D-Voronoi.....	109
Abbildung 87	Darstellung der von Mises Spannungen.....	110
Abbildung 88	Punkteverteilung auf Grundlage der Spannungswerte.....	110
Abbildung 89	Voronoi-Zellen als Liniengrafik.....	111
Abbildung 90	Definition der Radiusvarianz.....	112
Abbildung 91	Marching Cubes Algorithmus.....	112

Abbildung 92	Exoskelett.....	113
Abbildung 93	Skelett eines Strahlentierchens (Radiolaria), Durchmesser ca. 300µm, aus: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Radiolaria-sp2_hg.jpg , Stand: 25.02.2016.....	113
Abbildung 94	Definition zur Berechnung der Öffnungsflächen	114
Abbildung 95	Struktur mit teilweise opaken Öffnungen	114
Abbildung 96	Draufsicht	115
Abbildung 97	Grundriss.....	116
Abbildung 98	Schnitt A-A	116
Abbildung 99	Außenraumvisualisierung	117
Abbildung 100	Innenraumvisualisierung.....	117
Abbildung 101	Visualisierung des Modells	118
Abbildung 102	Schnittmuster für den Zuschnitt.....	119
Abbildung 103	Modellfoto.....	119