

Tensegrity-Membran-Strukturen

**Eine Studie über Entwicklung und konstruktive
Umsetzung des Tensegrity-Prinzips im Bauwesen**

Dissertation

vorgelegt im Promotionsausschuss der HafenCity Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von Nils Jacobsen (geb. Ratschke) aus Bremen

Tag der mündlichen Prüfung: 01.03.2019

Erstgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Annette Bögle

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter-Matthias Klotz

Vorwort und Dank

Die vorliegende Dissertationsschrift *Tensegrity-Membran-Strukturen - Eine Studie über Entwicklung und konstruktive Umsetzung des Tensegrity-Prinzips im Bauwesen* ist im Rahmen meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Studiengang Bauingenieurwesen an der HafenCity Universität Hamburg entstanden. Während meiner Tätigkeit im Fachgebiet Entwurf und Analyse von Tragwerken bei Prof. Dr.-Ing. Annette Bögle habe ich mich unter anderem mit dem ingenieurmäßigen Entwurf und der numerischen Analyse von leichten Tragstrukturen auseinandergesetzt. In diesem Kontext konnte ich mich mit der Thematik der Tensegrity-Membran-Strukturen intensiv beschäftigen.

Während dieser Zeit haben mir mehrere Personen unterstützend zur Seite gestanden. Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter und Erstgutachterin Prof. Dr.-Ing. Annette Bögle, die mich mit konstruktiven Anregungen und freundschaftlichem Zuspruch bei dem Promotionsvorhaben unterstützt und bestärkt hat.

Ebenso möchte ich Prof. Dr.-Ing. Peter Matthias Klotz für das Zweitgutachten und seine kollegialen Ratschläge in dieser Zeit danken.

Kai Schramme und Dr.-Ing. Wiebke Brahms haben mir, bei unseren regelmäßigen Forschungstreffen, durch anregende Diskussionen und kritische Rückmeldungen immer wieder geholfen den fachlichen Blick zu schärfen, dafür bedanke ich mich.

Auch danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebiets Entwurf und Analyse von Tragwerken für die fachlichen Gespräche und den disziplinenübergreifenden Austausch, in diesem Zusammenhang gilt mein besonderer Dank Jon Lindenberg und Maren Zywiets, die mit ihren Masterthesen einen wertvollen Beitrag in Zusammenhang mit diesem Forschungsvorhaben geleistet haben.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Baulabors danke ich für die Hilfe bei der konstruktiven Umsetzung des Demonstrators.

Bei meiner Familie und meinen Freunden möchte ich für ihren Rückhalt und ihre Unterstützung bedanken. Sie haben mir in den vergangenen fünf Jahren immer aufmunternd und verständnisvoll zur Seite gestanden und mich ermutigt, diese Herausforderung anzunehmen.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Ehefrau Rabea Jacobsen für ihre freundschaftliche Fürsorge, ihre liebevolle Güte und ihren unendlich großen Rückhalt in dieser Zeit.

Hamburg, Oktober 2018

Nils Jacobsen

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit den Herausforderungen der konstruktiven Umsetzung einer besonderen Art räumlicher und raumschaffender Leichtbau-Strukturen, den Tensegrity-Membran-Strukturen. Das gewählte Vorgehen ist in drei Teile gegliedert, erstens eine Literaturstudie, zweitens eine parametergestützte Analyse, basierend auf einer Referenzstruktur und drittens einer abschließenden Realisierung eines multiparametrisch optimierten Ausschnitts der Referenzstruktur.

Anhand der Literaturstudie über Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen wurden strukturelle und gestalterische Kriterien erarbeitet, die eine Einordnung gebauter Projekte in den Kontext des Tensegrity-Prinzips ermöglichen. Es hat sich, abweichend von bisher bestehenden theoretischen Definitionen, gezeigt, dass bauliche Änderungen der Systeme für eine Realisierung erforderlich sind, um beispielsweise eine notwendige Stabilität zu gewährleisten. Ebenfalls wurde dargestellt, dass insbesondere der Einsatz textiler Membranflächen den beschriebenen Strukturen das Potential verleiht, das Tensegrity-Prinzip im Bauwesen zu etablieren. Wobei anzumerken ist, dass die recherchierten Projekte infolge ihrer Materialwahl keine langlebige Umsetzung ermöglichen, oder andernfalls durch ihre konstruktive Ausgestaltung keinen vollständigen Schutzfunktion gewährleisten.

Die prinzipielle parametergestützte Analyse an der Referenzstruktur ermöglichte die Identifikation geometrischer Parameter, zur Beschreibung der tragwerkstechnischen Auswirkungen auf die beteiligte Membran. Es wurde festgestellt, dass Variationen unterschiedlicher Parameter gegensätzliche Auswirkungen auf das Tragverhalten hervorrufen. Zudem wurde ein sich wiederholender Bereich innerhalb der Membran definiert, der ungünstigere Beanspruchungen aufzeigt. Nachfolgend wurde eine Multiparameteroptimierung der Referenzstruktur vorgenommen, bei der eine Systemkonfiguration ermittelt wurde, die einen möglichst idealen zweiachsigen Lastabtrag der textilen Membran gewährleistet.

Basierend auf der optimierten Struktur wurde ein Ausschnitt zur Realisierung gewählt. Dieser wurde anhand eines entwickelten Konzeptes detailliert geplant und konstruktiv umgesetzt. Es hat sich gezeigt, dass die entwickelten konstruktiven Lösungen, unter strukturellen und funktionalen Gesichtspunkten, eine erfolgreiche Realisierung ermöglichen, wohingegen die optischen Kriterien, insbesondere durch mangelnde handwerkliche Routine, nicht zufriedenstellend umgesetzt wurden. Zudem wurde erstmals eine belastbare FEM-basierte Berechnung einer Tensegrity-Membran-Struktur durchgeführt, was anhand eines Vergleichs der berechneten Verformungsfigur und der aufgemessenen gebauten Struktur bestätigt wurde.

Die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die konstruktive Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen können als

Tensegrity-Membran-Strukturen

Eine Studie über Entwicklung und konstruktive Umsetzung des Tensegrity-Prinzips im Bauwesen

Grundlage für die weitere Entwicklung und die Etablierung des Tensegrity-Prinzips im Bauwesen genutzt werden.

Abstract

This thesis deals with the challenges of construction of a special kind of spatial and space-creating light-weight structures, the tensegrity-membrane-structures. The chosen procedure can be divided into three parts, a literature study, a parametric analysis based on a reference project, and a final realization of a multiparametric optimized section of a reference project.

Based on the literature study on tensegrity- and tensegrity-membrane-structures, structural and design criteria were developed that allowed the classification of built projects in the context of the tensegrity-principle. It has been found, deviating from theoretical definitions, that structural changes of the systems are essential for an implementation, for example to ensure a necessary stability. It has also been shown that the use of textile membrane surfaces in particular gives the structures the potential to establish the tensegrity-principle in architecture, whereby the researched projects do not permit long-lasting implementation due to the choice of materials or otherwise do not guarantee complete protection due to the constructive detailing.

The fundamental parametric analysis on the reference project made it possible to identify geometric parameters, to describe the structural effects on the membrane involved. It has been found that variations in different parameters create conflicting effects on structural behavior. In addition, a repeating area within the membrane was defined, which indicates less favorable stresses. Subsequently, a multiparametric optimization of the reference project was carried out, in which a system configuration was determined, which ensures an ideal two-axis load transfer of the textile membrane.

Based on the optimized structure, a section was selected for implementation and, based on a developed concept, planned in detail and implemented constructively. It has been shown that the structural solutions developed, from a structural and functional point of view, enabled a successful realization, whereas the optical criteria were not satisfactorily implemented due to a lack of craftsmanship. In addition, a reliable FEM-based calculation of a tensegrity-membrane-structure was performed for the first time, which was confirmed by a comparison of the calculated deformation figure and the measured built structure.

The findings gained in the present work on the construction of tensegrity-membrane-structures can serve as a basis for the further development and establishment of the tensegrity-principle in architecture.

Tensegrity-Membrane-Structures

A study on development and construction of the tensegrity-principle in architecture

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Das Tensegrity-Prinzip	9
2.1	Entwicklung der Tensegrity-Strukturen	10
2.1.1	Erste Periode: Entdeckung und Experimente	11
2.1.2	Zweite Periode: Wissenschaftliche Auseinandersetzung	19
2.1.3	Dritte Periode: Erste praktische Anwendungen.....	22
2.2	Charakteristik von Tensegrity-Strukturen	28
2.2.1	Strukturelle-Ästhetik	28
2.2.2	Strukturelle Eigenschaften.....	28
2.2.3	Vor- und Nachteile	32
2.3	Definition von Tensegrity-Strukturen	34
2.3.1	Definitionen der ersten Periode	34
2.3.2	Definitionen der zweiten Periode.....	35
2.3.3	Definitionen der dritten Periode	37
2.3.4	Eigene Definition des Tensegrity-Prinzips.....	40
2.4	Klassifizierung von Tensegrity-Strukturen.....	42
2.4.1	Ansätze aus der Literatur	42
2.4.2	Das Verständnis der Geiger Domes in Bezug auf Tensegrity-Strukturen	46
2.4.3	Klassifikation gebauter Beispiele.....	47
3	Tensegrity-Membran-Strukturen	53
3.1	Entwicklung der Tensegrity-Membran-Strukturen	54
3.1.1	Frühe Konzepte und Visionen	54
3.1.2	Erste Experimentalbauten	55
3.2	Charakteristik von Tensegrity-Membran-Strukturen.....	63
3.2.1	Tragverhalten Textiler Membrane	63
3.2.2	Strukturelle Ästhetik.....	65
3.2.3	Strukturelle Eigenschaften.....	65
3.2.4	Synergieeffekte in Tensegrity-Membran-Strukturen.....	67
3.3	Definition von Tensegrity-Membran-Strukturen.....	70
3.4	Klassifizierung von Tensegrity-Membran-Strukturen	74
4	Referenzstruktur Pavillon MOOM.....	81
4.1	Auswahl der Referenzstruktur	81
4.2	Temporärer Pavillon MOOM.....	84
4.2.1	Geometrie und Struktur	84

4.2.2	Tragverhalten	85
4.2.3	Montage.....	87
4.2.4	Gestalterischer Ausdruck	88
5	Parametergestützte Analyse	91
5.1	Parameteridentifikation.....	91
5.1.1	Übersicht der Studie von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin.	92
5.1.2	Entwicklungspotential der vorliegenden Studie.....	96
5.2	Evaluierung am parametrischen Seilmodell.....	97
5.2.1	Eingangsparameter und Programmaufbau (Step 1-3)....	98
5.2.2	Formfindung (Step 4)	98
5.2.3	Auswertung (Step 5).....	99
5.2.4	Evaluation	100
5.3	Beschreibung des Seilnetzmodells	103
5.3.1	Eingangsparameter und Programmaufbau (Step 1-3)..	103
5.3.2	Formfindung (Step 4)	104
5.3.3	Auswertung (Step 5).....	104
5.4	Parametergestützte Analyse am Seilnetzmodell.....	107
5.4.1	Untersuchungsausschnitt	107
5.4.2	Allgemeine Parametereinstellung.....	108
5.4.3	Parameterstudie am Seilnetzmodell.....	110
5.4.3.1	Ergebnisse der Parametervariation Druckelementlänge... am 0° Netz	110
5.4.3.2	Ergebnisse der Parametervariation	
	Übergreifungslängenfaktor am 0° Netz	114
5.4.3.3	Ergebnisse der Parametervariation	
	Druckelementreihenabstand am 0° Netz.....	119
5.4.3.4	Zusammenfassende Bewertung der Parametervariation.. am 0° Netz	123
5.4.3.5	Bewertung der Parametervariation am 45° Netz.....	126
5.4.4	Variantenstudie am Seilnetzmodell.....	128
5.4.4.1	Ausgangskonfiguration der untersuchten Varianten .	128
5.4.4.2	Ergebnisse der Variantenstudie	130
5.4.4.3	Zusammenfassende Bewertung der Variantenstudie	133
6	Konstruktive Umsetzung eines Demonstrators	137
6.1	Projektstudie zur konstruktiven Umsetzung	139
6.1.1	Textegrity I.....	139
6.1.2	Textegrity-Dome	139
6.1.3	Pavillon MOOM	140

6.1.4	Form Follows Tension	141
6.1.5	Hanabi Pavillon.....	141
6.2	Konzeptentwicklung.....	143
6.2.1	Geometriedefinition	144
6.2.2	Materialdefinition.....	145
6.2.3	Fertigungs- und Montageablauf.....	147
6.2.4	Konstruktive Detaillierung des Druckelements.....	150
6.3	Planung und Berechnung des Demonstrators	152
6.3.1	Gewählte Herangehensweise.....	152
6.3.2	Überführung des digitalen Demonstrator-Modells in das FEM-Programm Sofistik	154
6.3.3	Materialkennwerte der textilen Membran	156
6.3.4	Modellierung und Berechnung in der FEM-Software	160
6.3.5	Zuschnittsberechnung der Membranfläche	168
6.4	Konstruktive Umsetzung des Demonstrators	172
6.4.1	Phase 1 – Realisierung eines Arbeitsmodells	172
6.4.2	Phase 2 – Realisierung des Demonstrators.....	175
7	Bewertung der konstruktiven Umsetzung.....	183
7.1	Bewertung der baulichen Realisierung des Demonstrators.	183
7.2	Verformungsvergleich der berechneten und der gebauten Struktur	186
8	Schluss	193
9	Literaturverzeichnis	199
10	Abbildungsverzeichnis	209
11	Anhangverzeichnis	225

1 Einleitung

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der konstruktiven Umsetzung einer besonderen Art räumlicher und raumschaffender Leichtbau-Strukturen, die lediglich durch Normalkräfte beansprucht werden, den sogenannten Tensegrity-Membran-Strukturen. Diese Strukturen entstehen aus der Komposition zweier Tragwerkstypologien, den Tensegrity-Strukturen, die durch den Einsatz textiler Membrane ergänzt werden. Gegenüber anderen normalkraftbeanspruchten Raumstrukturen liegt die Besonderheit von Tensegrity-Membran-Strukturen in den in der Zugfläche diskontinuierlich verteilten Druckelementen. Diese spezielle Anordnung der Druckelemente verleiht, durch ihre scheinbare Schwerelosigkeit, den Tensegrity-Strukturen eine ganz besondere gestalterische Wirkung. Im Vergleich zu reinen Tensegrity-Strukturen, welche ausschließlich aus räumlich angeordneten linearen Zug- und Druckelementen bestehen, können Tensegrity-Membran-Strukturen durch die flächigen Zugelemente neue Funktionalitäten zugewiesen werden, wie beispielsweise der Schutz der Nutzer vor Umgebungseinflüssen. Damit sind für die Tensegrity-Membran-Strukturen auch raumschaffende architektonische Anwendungen denkbar.

Forschungsfeld

Die reinen Tensegrity-Strukturen wurden erstmals Mitte des 20. Jahrhunderts genauer beschrieben und stellen ein fundamentales Prinzip des natürlichen Kraftflusses dar. Die Auflösung von Druck- und Zugkräften in Verbindung mit der vorhandenen Diskontinuität der Druckelemente, lässt die Notwendigkeit eines übergeordneten stabilisierenden Zugsystems entstehen, welches als Ursache für die Effizienz dieser Strukturen zu benennen ist. Diese strukturelle Besonderheit wird auch als Tensegrity-Prinzip bezeichnet, der Begriff *Tensegrity* setzt sich aus den Wörtern *tensional* und *integrity* zusammen. Tensegrity-Strukturen faszinieren durch das Wechselspiel weniger stabförmiger Druckelemente in einem stabilisierenden Netz aus Zugelementen. Durch diesen konstruktiven Aufbau vermitteln sie eine vermeintliche Leichtigkeit, da die Druckelemente nahezu schwerelos erscheinen. Trotz der Reduktion auf lediglich zwei konstruktive Elemente, die dünnen Seile und die schlanken Druckelemente, ist eine große Gestaltungsvielfalt möglich. Innerhalb der vergangenen achtzig Jahre haben sich zahlreiche Disziplinen, beispielsweise die darstellende Kunst, die Biologie oder das Ingenieurwesen, mit den Tensegrity-Strukturen, beziehungsweise ihrer wissenschaftlichen Beschreibung und ersten praktischen Anwendungen des Prinzips beschäftigt [Motro, 2011]. Der Auseinandersetzung mit den Strukturen liegen dabei sehr unterschiedliche Ansätze zugrunde, so wurden in der Kunst auf faszinierende Weise räumliche Kräfte visualisiert [Snelson, 2013], während in der Biologie der Aufbau lebender Zellen anhand des Prinzips des übergeordneten Zusammenhalts dargestellt wurde [Ingber, 1998]. Die Strukturen vereinen dabei, neben ihrem gestalterischen Wesen, strukturelle Effizienz und durch das vorliegende Verformungsvermögen

Wissenschaftliche Relevanz

auch eine hohe Flexibilität, beziehungsweise eine Wandelbarkeit. Diese Flexibilität führt allerdings auch dazu, dass die Tensegrity-Strukturen einer gewissen strukturellen Weichheit ausgesetzt sind. Für kleine Strukturen, wie sie beispielsweise in der Biologie Anwendung finden, stellt diese Weichheit keinen Nachteil dar, im Bauwesen führt jedoch insbesondere dieser Aspekt dazu, dass bisher nur sehr wenige Tensegrity-Strukturen realisiert wurden. Als weitere Ursachen für die geringe Anzahl realisierter Projekte im Bauwesen können aber ebenfalls der fehlende Raumabschluss und die damit ausstehende Schutzfunktion benannt werden [Meeß-Olsohn, 2002].

Die Tensegrity-Membran-Strukturen sind eine relativ junge konstruktive Entwicklung des Tensegrity-Prinzips. Die Kombination aus Tensegrity-Struktur und strukturell wirksamen Membranflächen wird seit etwa 15 Jahren wissenschaftlich diskutiert, wobei in dieser Zeit nur wenige, hauptsächlich temporäre Experimentalbauten entstanden sind. Grundlegend haben die Tensegrity-Membran-Strukturen das Potential, die Anwendungsbereiche der reinen Tensegrity-Strukturen zu erweitern, da sich durch den Einsatz der flächigen Membranelemente abschließende und schützende Räume ausbilden lassen. Des Weiteren kann die globale Steifigkeit der Strukturen durch das Einsetzen der Zugflächen gesteigert werden. Darüber hinaus sind die Tensegrity-Membran-Strukturen von hohem gestalterischen Interesse, die vorliegende Diskontinuität der Druckelemente visualisiert auf erstaunliche Weise die, den Strukturen inwohnenden Kräfte, indem die Druckwege innerhalb der Struktur unterbrochen und dennoch im Gesamtsystem kurzgeschlossen werden. Unter Beachtung dieser Aspekte bieten die Tensegrity-Membran-Strukturen sowohl hohes gestalterisches, als auch ein hohes strukturelles Potential für den konstruktiven Leichtbau, welches nach derzeitigem Stand allerdings noch nicht zufriedenstellend baupraktisch umgesetzt wurde.

Forschungsziel

Die Weiterentwicklung des Tensegrity-Prinzips in der Form der Tensegrity-Membran-Strukturen kann aus den benannten Gründen zu einer Etablierung dieser faszinierenden Strukturen im Bauwesen beitragen. Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist somit die Entwicklung des Tensegrity-Prinzips im Bauwesen detailliert zu untersuchen, die Tensegrity-Membran-Strukturen und ihre Entwicklung zu studieren, und darauf aufbauend die Grundlagen für eine baupraktische konstruktive Umsetzung der Tensegrity-Membran-Strukturen zu erarbeiten. Die primärwissenschaftliche Frage, die in der vorliegenden Arbeit beantwortet wird ist, welche Herausforderungen eine anwendungsorientierte Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen bedingt und welche konstruktiven Ansätze daraus abgeleitet werden können.

Die vorliegende Arbeit ist in drei aufeinander aufbauende Teile gegliedert. Der erste Teil (siehe Kapitel 2 und 3) befasst sich mit einer umfangreichen Literaturstudie über Prinzipien und Entwicklungen der benannten Strukturen, der zweite Teil (siehe Kapitel 4 und 5) behandelt die Wahl einer Referenzstruktur und eine daran durchgeführte Parameterstudie zum mechanischen Verständnis dieser beispielhaft gewählten Tensegrity-Membran-Struktur. Den Abschluss bildet der dritte Teil (siehe Kapitel 6 und 7), der sich mit der konstruktiven Umsetzung eines Modellausschnitts, sowie dessen numerischer Analyse auseinandersetzt.

In dem ersten Teil werden die gebauten Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen in den Kontext des Tensegrity-Prinzips eingeordnet. Ziel dieser Einordnung ist es, das qualitative Tragverhalten dieser Konstruktionen zu verstehen und die besonderen strukturellen und gestalterischen Eigenschaften, wie beispielsweise die Effizienz des übergeordneten stabilisierenden Zugsystems oder die gestalterische Klarheit der visualisierten Kräfte, herauszuarbeiten. Außerdem wird untersucht, inwieweit bestehende Begriffsklärungen des Tensegrity-Prinzips zur Beschreibung der bisher im Bauwesen konstruktiv umgesetzten Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen geeignet sind. Anhand dieser Untersuchungen wird eine zeitgemäße Definition erarbeitet, die als Grundlage zur Evaluation und Klassifizierung gebauter Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen herangezogen wird.

Auf Basis der vorgenommenen theoretischen Auseinandersetzung wird in dem zweiten Teil dieser Arbeit eine Referenzstruktur, basierend auf einem realisierten Projekt ausgewählt und daran eine prinzipielle Parameterstudie durchgeführt. Die Studie dient dem Ziel, tragwerksrelevante Parameter, wie beispielsweise die Druckelementlänge oder den gegenseitigen Abstand der Druckelemente, zu identifizieren, sowie deren tragwerkstechnische Auswirkungen auf die prinzipielle Beanspruchung einer textilen Membran zu analysieren. Die computerbasierte Parameterstudie wird mit modernen parametrischen Entwurfswerkzeugen aufgebaut und durchgeführt, um ein breites Spektrum an Variationsschritten einzelner Parameter erfassen und auswerten zu können. Die Erkenntnisse aus der Variation der einzelnen Parameter werden im Anschluss für eine Multiparameteroptimierung, im Weiteren als Variantenstudie bezeichnet, verwendet. Das Ziel der Variantenstudie ist es, eine Systemkonfiguration der Referenzstruktur zu ermitteln, die eine möglichst tragwerkstechnisch optimierte geometrische Ausprägung der textilen Membran aufweist, um einen gleichmäßigen zweiachsigen Lastabtrag zu ermöglichen. Darüber hinaus dient diese Systemkonfiguration als Grundlage der nachfolgenden beispielhaften konstruktiven Umsetzung eines Modellausschnitts.

Den dritten und abschließenden Teil der vorliegenden Arbeit bildet die bereits benannte konstruktive Umsetzung des Modellausschnitts der optimierten Systemkonfiguration. Die bauliche Umsetzung dieses sogenannten Demonstrators ermöglicht eine gezielte Überprüfung der kon-

struktiven Ausbildung von Tensegrity-Membran-Strukturen. Die konstruktive Umsetzung beinhaltet dabei die Entwicklung eines Realisierungskonzeptes, sowie die anschließende detaillierte Planung des Demonstrators, welche eine FEM-basierte numerische Analyse der Struktur beinhaltet. Da mit Hilfe der zuvor durchgeführten Parameterstudie lediglich qualitative Aussagen über Tragverhalten und Ausprägung der Struktur möglich sind, ist eine exakte numerische Analyse für die konstruktive Umsetzung unabdingbar. Abschließend wird der gebaute Demonstrator für eine Evaluierung des gesamten Realisierungsprozesses herangezogen. Die im Verlauf des Realisierungsprozesses entwickelten Lösungsansätze zur Planung, Berechnung und konstruktiven Durchbildung werden im Anschluss hinterfragt. Dabei ist das Ziel, diese Lösungsansätze, sofern notwendig, zu verbessern, um sie als Grundlage für die Umsetzung beliebiger Tensegrity-Membran-Strukturen verwenden zu können.

2 Das Tensegrity-Prinzip

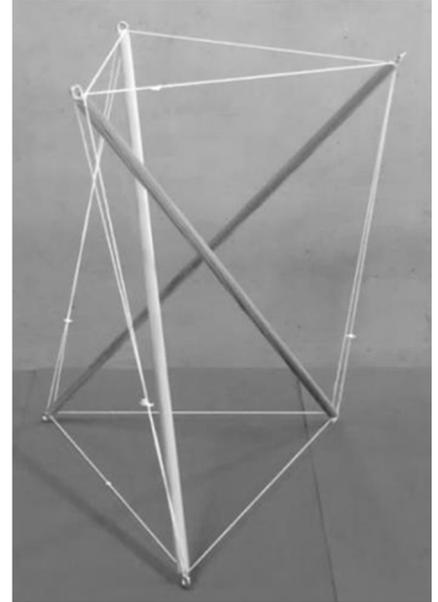
2 Das Tensegrity-Prinzip

Der Begriff *Tensegrity* ist eine Wortschöpfung von Richard Buckminster Fuller aus den 1950er Jahren. Er beschreibt mit Tensegrity das natürliche Prinzip des strukturellen Zusammenhalts durch ein stabilisierendes Zugsystem. Der Begriff Tensegrity setzt sich aus den Wörtern *Tension* = *Zug* und *integrity* = *Zusammenhalt* zusammen [Krausse, 2000, S.408], [Burkhardt, 2008, S.31]. Die beiden Wörter beschreiben die grundlegende Funktionsweise dieser Tragstrukturen. Eine Tensegrity-Struktur besteht aus Druck- (Stäben) und Zugelementen (Seilen), wobei erst die Zugelemente das Gesamtsystem stabilisieren und die Druckelemente in ihrer Position halten. Bild 2-1 zeigt die einfachste räumliche Konfiguration einer Tensegrity-Struktur, ein sogenanntes Twist-Element. Das Twist-Element wird dabei mit einer minimal notwendigen Anzahl der konstruktiven Elemente ausgebildet, drei Druckelemente und neun Zugelemente.

Die Integrität des Systems, die durch das Kräftegleichgewicht entsteht, wird durch die übergeordneten Zugkräfte sichergestellt. In der Umkehrung sorgen die Druckelemente für eine Umlenkung der Zugkräfte an den Knotenpunkten, was zur flexiblen Gestaltung der Strukturen beiträgt. Bei den als vermeintlich rein oder auch als klassisch bezeichneten Tensegrity-Strukturen besteht keinerlei Kontakt zwischen den Druckelementen (siehe Bild 2-1), allerdings gibt es auch gebaute Tragstrukturen die eben diese Kontaktstellen in den Druckelementen aufzeigen und dennoch als Tensegrity-Strukturen bezeichnet werden können.

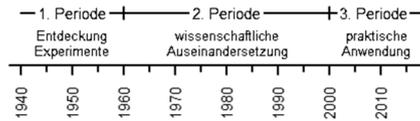
Durch die Auflösung in reine Druck- oder Zugkräfte weisen Tensegrity-Strukturen eine hohe strukturelle Effizienz und eine damit verbundene Leichtigkeit auf, da die zugehörigen konstruktiven Elemente, durch nicht vorhandenen Biegebeanspruchungen, entsprechend schlank ausgestaltet werden können. Das Tensegrity-Prinzip kann als technisches Abbild eines natürlichen Phänomens angesehen werden. Im menschlichen Körper ist dies beispielsweise wiederzufinden. Das Körpergewicht wird durch das Zusammenspiel von Muskeln und Knochen getragen, dieses System funktioniert allerdings erst, wenn die Druckelemente (Knochen) durch ein übergeordnetes Zugsystem (Muskeln) stabilisiert werden [Ingber, 1998, S.50].

Die Teilung in reine Zug- und Druckbeanspruchungen hat neben der Effizienz auch Auswirkung auf die Erscheinung der Tensegrity-Strukturen. Durch die strikte Trennung der Beanspruchungen und der damit verbundenen Ausgestaltung der konstruktiven Elemente ist die strukturelle Klarheit ablesbar und der qualitative Krafffluss erlebbar. Außerdem wirken die Druckelemente, durch die Einbettung in ein feines Geflecht aus Seilelementen nahezu schwerelos, was einen weiteren Aspekt für die Faszination dieser Strukturen darstellt.



2-1 Modellbau eines dreieckförmigen Tensegrity-Twist-Elements

2.1 Entwicklung der Tensegrity-Strukturen



2-2 Übersicht der gemäß René Motro definierten zeitlichen Perioden der Entwicklung der Tensegrity-Strukturen

Die Entwicklung der Tensegrity-Strukturen lässt sich, nach René Motro in drei zeitliche Perioden (siehe Bild 2-2) einteilen. In die erste Periode (1940er und 1950er Jahre) ordnet er die Entdeckung des Tensegrity-Prinzips und frühe experimentelle Arbeiten ein. Die zweite Periode (1960er bis 1990er Jahre) umfasst die wissenschaftliche Auseinandersetzung und die systematische Beschreibung des Prinzips. Als dritte Periode (2000er Jahre bis heute) beschreibt er das Auftreten baupraktischer Umsetzungen [Motro, 2011, S.1].

Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit ist die baupraktische Anwendung des Tensegrity-Prinzips. Insbesondere zum Ende der zweiten Periode und vermehrt in der dritten Periode tauchen diese Anwendungen auf. Daher erfolgt vorrangig eine Auseinandersetzung mit gebauten Strukturen innerhalb der dritten Periode, anhand der tragwerksrelevante Parameter identifiziert und konstruktive Umsetzungen beschrieben werden können, darüber hinaus kann auch eine Vielfalt der strukturellen Konfigurationen dargestellt werden.

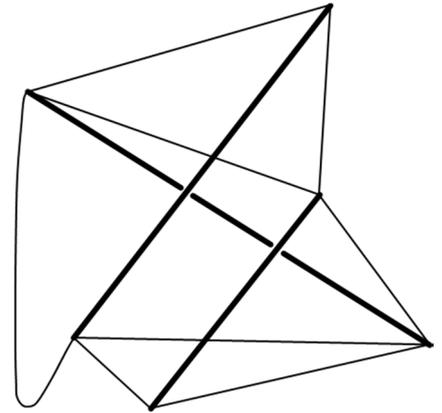
Während der zweiten Periode hat eine weitreichende theoretische Auseinandersetzung mit dem Prinzip in verschiedenen Disziplinen, wie beispielsweise in der Mathematik, in der Biomechanik und der Raumfahrt stattgefunden. Auch Ansätze dieser Disziplinen werden in der vorliegenden Arbeit kurz angeschnitten, um die Breite der Entwicklung darzustellen. Darüber hinaus werden die wichtigen wissenschaftlichen Ansätze der zweiten Periode vorgestellt, welche als Grundlage zur Beschreibung der geometrischen Vielfalt und der Berechnung von Tensegrity-Strukturen dienen.

Die Auseinandersetzung mit der Entdeckung des Tensegrity-Prinzips innerhalb der ersten Periode wird nachfolgend anhand der wichtigen Personen vorgenommen. Dabei werden maßgeblich die Visionen und Betrachtungsweisen dargestellt, um die Besonderheiten und Charakteristika des Tensegrity-Prinzips aufzuzeigen.

Da zum Teil eine zeitliche Überschneidung der einzelnen Entwicklungen vorliegt, orientiert sich die nachfolgende Auflistung vorrangig anhand der inhaltlichen Unterscheidung der von René Motro definierten Perioden und nicht ausschließlich anhand der chronologischen Zuordnung.

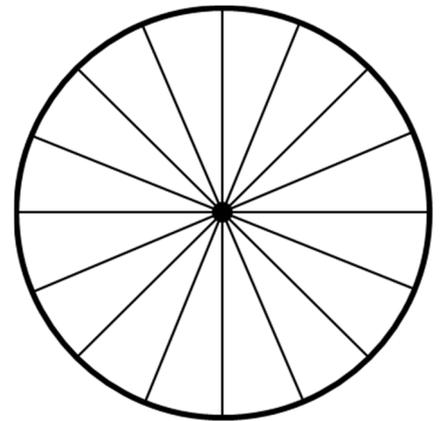
2.1.1 Erste Periode: Entdeckung und Experimente

Die früheste Dokumentation eines Vorläufers der Tensegrity-Strukturen geht bereits in das Jahr 1920 zurück. Ein lettischer Künstler des Konstruktivismus, Karl loganson führte eine Studie über das Gleichgewicht durch und entwarf damit die wahrscheinlich erste Tensegrity-Struktur, beziehungsweise einen Vorläufer der späteren Tensegrity-Strukturen. Seine Gleichgewichtskonstruktion (siehe Bild 2-3) bestand aus drei Druckstäben, sieben gespannten Seilen und einem achten beweglichen Seil, zur Änderung der Systemkonfiguration. Damit ist diese Struktur in den Grundzügen einem Twist-Element sehr ähnlich, verfügt aber nicht über eine feste Systemkonfiguration und einen stabilen Gleichgewichtszustand. Dennoch zeigt das Kunstwerk bereits die typische Auflösung der konstruktiven Elemente und die Faszination der daraus resultierenden Leichtigkeit. Allerdings fand die Arbeit von Karl loganson zu Beginn des 20. Jahrhunderts wenig Beachtung in der Architektur, beziehungsweise im Ingenieurwesen [Robbin, 1996, S.25].



2-3 Gleichgewichtskonstruktion von Karl loganson (1920)

Bevor sich Richard Buckminster Fuller mit Tensegrity-Strukturen befasste, widmete er sich bereits in den späten 1920er Jahren leichten, effizienten und aufgelösten Tragstrukturen. Effizienz und Leichtigkeit bilden den Kern von Richard Buckminster Fullers zahlreichen Arbeiten, was sich in seinen frühen Projekten, aber auch in seinen späteren Visionen wieder spiegelt. Im Jahr 1927, fasste Richard Buckminster Fuller die Entscheidung sein Leben dem Entwurf zukunftsweisender Projekte zu widmen, die das Leben der Menschheit verbessern sollten. 1929 präsentierte er seinen fortschrittlichen Entwurf eines energieeffizienten Einfamilienhauses: das Dymaxion-House [Peters, 1998, S.11]. Zwar stellt das Dymaxion-House keine Tensegrity-Struktur dar, aber Richard Buckminster Fuller konnte mit diesem Entwurf eine erste Vorstellung gewinnen, wie effizient maßgeblich zugbeanspruchte und zugstabilisierte Tragwerke sind. Die Haupttragwirkung des Gebäudes beruht auf dem sogenannten Speichenrad-Prinzip, bei welchem die Stabilität in der Ebene auf die Zusammenarbeit von Druckring (Felge), Zugring (Nabe) und vorgespannten Seilen (Speichen) zurückzuführen ist (siehe Bild 2-4).



2-4 Speichenrad, bestehend aus außenliegendem Druckring (Felge), innenliegendem Zugring (Nabe) und vorgespannten Seilen (Speichen)

Das Dymaxion-House besteht aus zwei liegenden Speichenrädern, die den Boden und die Decke des Hauses bilden und über einen mittig platzierten Pylon abgehängt sind [Krohn, 2004, S.22]. Bild 2-5 zeigt ein Modell des Dymaxion-House, bei dem die beiden sechseckförmigen liegenden Speichenräder und die zugehörige Abspannung über den zentrierten Pylon gut erkennbar sind. Bereits in diesem ersten Entwurf ist der prägende Effizienzgedanke Richard Buckminster Fullers markant: da Baumaterialien unter Zugbeanspruchungen wesentlich effizienter sind als unter Druckbeanspruchungen, versuchte er die Druckelemente auf ein Minimum zu reduzieren. Lediglich der Pylon und die Druckringe der Speichenräder wurden als druckbeanspruchte Stabelemente ausgeführt. Darüber hinaus hat er die Gesamtkonstruktion um den Pylon zentriert, um einerseits statisch effizient zu bauen und andererseits den Flächenanteil der Außenhaut zu reduzieren [Lessing, 2007, S.17f.]. Darüber hinaus



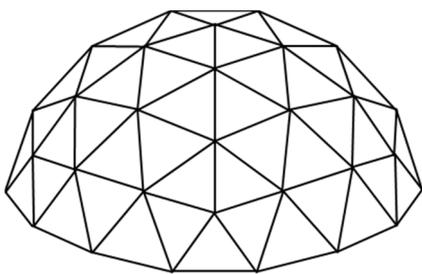
2-5 Modellbau von Richard Buckminster Fullers Dymaxion-House

entwarf er das Dymaxion-House so, dass es industriell gefertigt und innerhalb kürzester Zeit montiert werden konnte. Der Name des Hauses ist eine Wortschöpfung, aus den drei Begriffen *Dynamik*, *Maximum* und *Ion*. Für Richard Buckminster Fuller war dies unter anderem die Beschreibung des technischen Grundprinzips: den größtmöglichen Nutzen durch die geringste Aufwendung von Material und Energie zu erreichen. Um dieses Ziel zu verwirklichen mussten nach seiner Auffassung alle wissenschaftlichen und technischen Mittel zur Anwendung kommen [Peters, 1998, S.4f.].

Neben dem Dymaxion-House entwarf er noch weitere Dymaxion Projekte, die dem gleichen Grundgedanken folgen, mit einem minimalen Aufwand an Energie und Material ein maximales Ergebnis zu erreichen: das Dymaxion-Auto 1934, die Dymaxion Badezimmereinheit oder das Wichita-Haus 1944. Dabei beschränkte er den Effizienzgedanken nicht ausschließlich auf das Tragwerk. Die Dymaxion Badezimmereinheit beispielsweise war nach Richard Buckminster Fullers Auffassung effizient, da sie auf minimalen Raum eine maximale Anzahl an Funktionen bot und dabei dem Nutzer ein hohes Maß an Komfort ermöglichte [Lessing, 2007, S.19].

Erste strukturelle Beschreibung des Tensegrity-Prinzips, 1948

Die eigentliche erste strukturelle Beschreibung des Tensegrity-Prinzips erfolgte Ende der 1940er Jahre, während Richard Buckminster Fuller am Black Mountain College lehrte. In seinem Unterricht philosophierte er mit seinen Studierenden bereits über das universelle Prinzip von *tensional integrity structures* [Sadao, 1996], ohne jedoch eine eigene Darstellung dieses Prinzips aufzeigen zu können. 1948 gelang es Kenneth Snelson, einem Studenten von Richard Buckminster Fuller, eine Skulptur zu konstruieren, die dieses Prinzip darstellte [Gomez-Jauregui, 2009, S.1643f.]. Dieser Durchbruch trieb Richard Buckminster Fuller an, viele eigene experimentelle Tensegrity-Strukturen zu entwerfen und zu realisieren. Außerdem kreierte er in dieser Zeit den Begriff Tensegrity [Burkhardt, 2008, S.31].



2-6 Prinzipdarstellung des strukturellen Aufbaus einer Geodätischen Kuppel

1953 baute Richard Buckminster Fuller einen sogenannten Geodesic Tensegrity Dome. Die Struktur besteht aus stabförmigen Druckelementen und Seilen. Die Anordnung der Elemente folgt der Form einer geodätischen Kuppel (siehe Bild 2-6), daher ergibt sich die, von Richard Buckminster Fuller gewählte Bezeichnung der Struktur. Im Gegensatz zu einer klassischen geodätischen Kuppel, deren Aufbau einer dreieckförmigen Struktur aus Stäben folgt, hat Richard Buckminster Fuller die Anzahl der Druckelemente reduziert und zusätzliche Seile eingeführt. Das hat dazu geführt, dass die Druckelemente berührungslos voneinander verteilt sind, eingebettet in einem Meer aus Seilen, eine im Verlauf der Entwicklung oft benutzte Beschreibung des Tensegrity-Prinzips. Der Geodesic Tensegrity Dome war schlussendlich wahrscheinlich zu instabil, um vollständig ohne eine Unterstützung stehen zu können. In Bild 2-7 sind sehr dünne Linien, direkt über dem Scheitelpunkt der Kuppel, zu erkennen, bei denen es

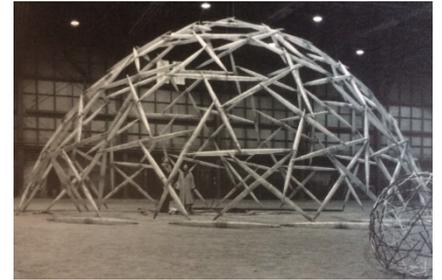
sich um eine Abhängung der Struktur zu handeln scheint [Pars, ohne Datum].

Tensegrity-Strukturen benötigen zum einen eine sehr definierte Vorspannung der Zugelemente um den endgültigen Gleichgewichtszustand einnehmen zu können und zum anderen eine sehr genaue Formfindung um die genaue Geometrie des endgültigen Zustands ermitteln zu können. Die mangelnde Stabilität der Struktur könnte darauf zurückgeführt werden, dass für eine Struktur dieser Größe die Erfahrungen und technischen Hilfsmittel noch nicht ausreichend vorhanden waren. Zudem wird angenommen, dass durch den Verzicht der dreieckförmigen Struktur auch ein Steifigkeitsverlust resultierte.

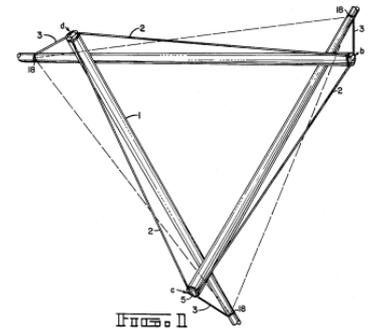
Neben einer Vielzahl an Strukturen, die von dem Tensegrity-Prinzip inspiriert wurden, beschäftigte Richard Buckminster Fuller sich auch mit den kleinstmöglichen Grundeinheiten räumlicher Tensegrity-Strukturen, den sogenannten Twist-Elementen. 1962 meldete er dazu eine Patentschrift an, in der er die Erfindung der Tensile Integrity Strukturen benannte. Bild 2-8 zeigt eine Draufsicht auf eine von Richard Buckminster Fullers patentierte Tensegrity-Struktur. Dabei handelt es sich um ein typisches dreieckförmiges Twist-Element (siehe Bild 2-1). Zudem befasste sich Fuller bereits in seiner Patentschrift mit der konstruktiven Ausbildung der Tensegrity-Strukturen [Fuller, 1962].

1964 ließ Richard Buckminster Fuller eine weitere Struktur patentieren [Fuller, 1964], die durch ein übergeordnetes Zugsystem stabilisiert wurde. Der Aspension Dome ist in Bild 2-9 zu sehen. Bei dem Entwurf handelt es sich um eine kuppelförmige Dachkonstruktion, bei welcher aufgelöste Ringe mit abnehmendem Durchmesser miteinander verknüpft werden. Die Verknüpfung der einzelnen Ebenen erfolgt durch eine Aufhängung, bei der Seile an Druckstäben befestigt werden. Ohne das Seilsystem wird kein stabiler Zustand der Struktur erreicht. Die Druckstäbe sind wiederum in gleichmäßigen Abständen auf den Ringen angeordnet, wobei die Unterseite der kleineren Ringe immer an die Oberseite der größeren Ringe gehängt wird. Über die Aufhängungen ergeben die Einzelelemente so ein ansteigendes Gesamttragwerk. Die Ausbildung der Verbindung der einzelnen Ebenen ist in der Abbildung gut zu erkennen. Richard Buckminster Fuller kombinierte auch bei diesem Entwurf Druck- und Zugelemente ähnlich der tensegren Grundidee und stabilisierte das System mit der übergeordneten Zugkraft. Die Entwicklung der Struktur folgte seiner Idee, mit dem Tensegrity-Prinzip große Räume überspannen zu können [Peters, 1998, S.105].

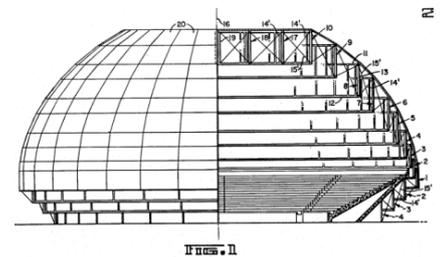
Bis zu seinem Tod 1983, entwickelte Richard Buckminster Fuller eine Vielzahl von leichten und effizienten Strukturen, darunter auch viele Tensegrity-Strukturen. Die aufgezeigte Auswahl seiner Strukturen zeigt die Philosophie des Effizienzgedankens, der das Wesen des Tensegrity-Prinzips prägt.



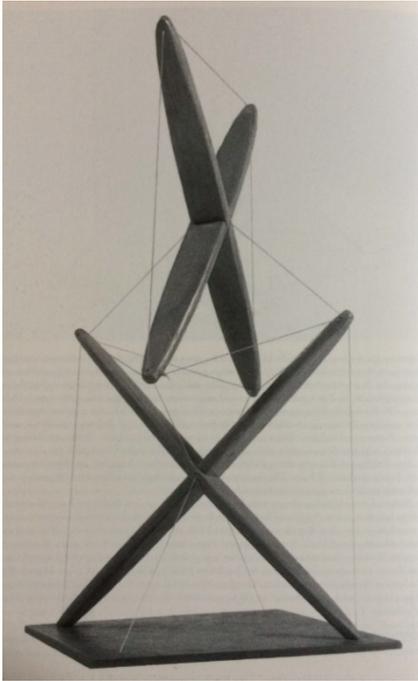
2-7 Geodesic Tensegrity Dome von Richard Buckminster Fuller (1953)



2-8 Patentierte Tensegrity-Struktur von Richard Buckminster Fuller (1962)



2-9 Richard Buckminster Fullers patentierter Aspension Dome (1964)



2-10 Kenneth Snelson X-Piece (1948)

Wie bereits kurz beschrieben war es Kenneth Snelson, der im Dezember 1948, damals Student am Black Mountain College, eine erste Darstellung des Tensegrity-Prinzips konstruierte, das X-Piece (siehe Bild 2-10). Einer seiner damaligen Professoren war Richard Buckminster Fuller, der Kenneth Snelson durch seine Vorträge über das tensional integrity Prinzip inspirierte. Mit dem X-Piece gelang es Kenneth Snelson, das von Richard Buckminster Fuller bereits mehrere Jahre beschriebene Prinzip darzustellen [Gomez-Jauregui, 2009, S.1643f.].

Das von Kenneth Snelson entwickelte X-Piece besteht aus zwei X-förmigen Druckelementen, die durch eine Seilverspannung berührungslos übereinander angeordnet sind. Die Verspannung und die dadurch entstandene Anordnung der beiden hölzernen X-Elemente sind in Bild 2-10 gut zu erkennen. Im Gegensatz zu seinen späteren Arbeiten ist bei dem X-Piece noch eine biegesteife Verbindung innerhalb der beiden Holzelemente angeordnet. Er selbst spricht später von einer reinen Trennung in Zug- und Druckkräfte und linearen, berührungslos vorliegenden Druckelementen, wenn er Tensegrity-Strukturen beschreibt [Snelson, 2002, S.50]. Allerdings sieht er sein X-Piece zugleich als erste gebaute Tensegrity-Struktur an.

Nach dem Zusammentreffen von Richard Buckminster Fuller und Kenneth Snelson entwickelten beide ihre Arbeiten weitestgehend unabhängig voneinander weiter. In den 1960er Jahre begann auch Kenneth Snelson mit dem Bau verschiedener Tensegrity-Strukturen, die er bis dato im Modellmaßstab entworfen hatte. Bis zu seinem Tod im Dezember 2016 entwarf und baute er eine Vielzahl dieser Strukturen. Die beiden im Folgenden vorgestellten Tensegrity-Strukturen von Kenneth Snelson stellen nur einen kleinen Auszug seiner zahlreichen Werke dar. Aber sie zeigen auf beeindruckende Art und Weise sein Verständnis von Tensegrity-Strukturen und damit seine Vorstellung von der Visualisierung von Kräften im Raum.



2-11 Kenneth Snelson Skulptur Needle Tower in Washington D. C. (1968)

Zu den grundlegenden Prinzipien von Kenneth Snelsons späteren Arbeiten gehört die berührungslose Anordnung der Druckelemente, die durch die entsprechenden Zugkräfte im Gleichgewicht gehalten werden. Darüber hinaus ist bei der Betrachtung seiner Tensegrity-Strukturen zu erkennen, dass sie stets einen dreieckförmigen Aufbau folgen [Wolkowicz, 2008, S.14]. Die Bildung von Dreiecken durch Druckelemente und Seile begründet Kenneth Snelson dabei mit der Stabilität der Strukturen. Nach seiner Auffassung würden andere Polygonformen zu einem Stabilitätsverlust führen [Snelson, 2002, S.50].

Eine der Skulpturen Kenneth Snelsons, die in dieser Arbeit näher betrachtet wird, ist der Needle Tower. Die Skulptur wurde im Rahmen einer Ausstellung im Hirshhorn Museum and Sculpture Garden in Washington D.C., 1968 gebaut [Yaeger, 2014]. Bei der 18 m hohen, turmartigen Tensegrity-Struktur handelt es sich um eine Addition von einzelnen dreieckförmigen Twist Elementen, deren Durchmesser mit zunehmender Höhe reduziert wird. Im Bild 2-11 sind die vorab beschriebene dreieckförmige

Anordnung und die Addition der konstruktiven Elemente gut zu erkennen. Die Druckelemente liegen bei dieser Struktur vollständig berührungslos vor und werden durch das Gesamtsystem aus Seilen im Gleichgewicht gehalten. Zudem zeigt die skulpturale Arbeit einen weiteren typischen Aspekt der Tensegrity-Strukturen: Die einzelnen Elemente befinden sich in einer rotationssymmetrischen Anordnung zueinander.

Eine weitere bemerkenswerte Arbeit K. D. Snelsons ist die im Jahre 1977 in Baltimore vor dem Maryland Science Center gebaute Skulptur Easy Landing. Die Struktur ist 7,5 m hoch und spannt 22 m in der Horizontalen. Sie besteht, ähnlich wie der Needle Tower, nur aus Stahlseilen und Stahlrohren und ist perfekt auf drei Betonstützen ausbalanciert. Auch hier liegen die Druckstäbe berührungslos zueinander vor und die Struktur wurde ausschließlich durch eine Addition dreieckförmiger Elemente gebildet. Die Faszination dieser Struktur geht dabei von ihrer Leichtigkeit und den scheinbar in der Horizontalen schwebenden Stäben aus. Sie vermittelt dem Betrachter den Eindruck eines komplexen visualisierten räumlichen Kräftediagramms [Kelly, 2011, S.24] Im Gegensatz zum Needle Tower liegt bei dieser Skulptur keine Symmetrie vor. Die, im Bild 2-12 gut zu erkennende Asymmetrie kann im Bereich der Tensegrity-Strukturen als Besonderheit benannt werden.



2-12 Kenneth Snelsons Skulptur Easy Landing in Baltimore (1977)

Bei beiden Werken handelt es sich um Skulpturen, die Kräfte visualisieren und mit der besonderen gestalterischen Wirkung der Strukturen spielen, die eine Reduzierung auf reine Zug- oder Druckkräfte hervorbringen kann. In den Arbeiten und Werken von Kenneth Snelson ging es stets darum, die Kraft in ihrer Reinheit zu gestalten und mit der Faszination scheinbar schwebender Strukturen zu spielen und diese sichtbar zu machen. Obwohl seine Skulpturen in gewisser Weise eine Funktionalität vermissen lassen, die für eine baupraktische Umsetzung notwendig wäre, so zeigt Kenneth Snelson mit seinen Werken doch die nahezu unendliche Gestaltungsvielfalt der Tensegrity-Strukturen [Carstens, 2008, S.21].

Das Zusammentreffen von Richard Buckminster Fuller und Kenneth Snelson am Black Mountain College führte allerdings nicht nur zu einem Meilenstein in der Entwicklung des Tensegrity-Prinzips, sondern stellte gleichzeitig auch den Beginn eines langwährenden Konflikts dar. Während ihrer Schaffenszeit, nach 1948, haben beide die Entdeckung der Tensegrity-Strukturen für sich beansprucht. Es wird allerdings vermutet, dass überhaupt erst ihre Zusammenarbeit am Black Mountain College zu der frühen Entdeckung des Tensegrity-Prinzips geführt hat. Das folgende Zitat verdeutlicht, wie eng die Arbeit der beiden miteinander verknüpft gewesen ist: „*If Fuller acknowledges his debt to Snelson for the invention of the tensegrity principle, Snelson likewise acknowledges his own debt to Fuller's visionary work.*“ [Kurtz, 1968]. Dazu ist anzumerken, dass beide mit völlig anderen Sichtweisen das Tensegrity-Prinzip betrachteten. Daher werden nachfolgend die unterschiedlichen Blickwinkel und ihre Bedeutung für die Entwicklungen der Tensegrity-Strukturen erläutert. Es

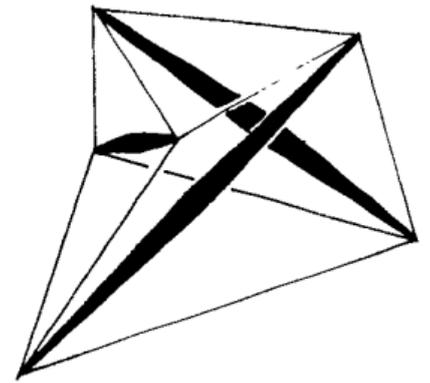
erfolgt jedoch keine Bewertung darüber, wer als Entdecker des Tensegrity-Prinzips gilt.

Für Richard Buckminster Fuller stellt das Tensegrity-Prinzip die höchste Stufe der strukturellen Effizienz dar, die es ermöglicht, mit minimalem Energieeinsatz ein maximales Ergebnis zu erreichen. Die absolute Auflösung in reine Zug- und Druckelemente und die Reduzierung der Druckelemente auf ein notwendiges Minimum sind prägend für die strukturelle Effizienz von Tensegrity-Strukturen. Dabei befasst er sich nicht nur mit den eigentlichen Strukturen, vielmehr interessiert sich Richard Buckminster Fuller für die Philosophie des universellen Zusammenhangs, die sich mit Hilfe des Tensegrity-Prinzips umsetzen lässt [Krausse, 2002]. Diese Eigenschaften versuchte er bereits mit seinen Dymaxion Entwürfen herauszuarbeiten. Es ist also davon auszugehen, dass die fortschrittlichen Arbeiten von Richard Buckminster Fuller und sein visionäres Denken die treibende Kraft hinter der Entdeckung des Tensegrity-Prinzips gewesen sind. Er beschreibt Tensegrity folgendermaßen: *„The word tensegrity is an invention: it is a contraction of tensional integrity. Tensegrity describes a structural-relationship principle in which structural shape is guaranteed by the finitely closed, comprehensively continuous, tensional behaviors of the system and not by the discontinuous and exclusively local compressional member behaviors. Tensegrity provides the ability to yield increasingly without ultimately breaking or coming asunder.“* [Fuller, 1975, S.700.011].

Im Gegensatz dazu versteht Kenneth Snelson den *„Wert von Tensegrity letztlich nicht so sehr in seiner konstruktiven Leistungsfähigkeit, sondern in der Schönheit, Kräfte so elegant offenbar zu sehen, wie in der Trennung der Muskeln von den Knochen.“* [Tausch, 1998, S.12]. Die Werke von Kenneth Snelson zeichnen sich insbesondere durch ihre Gestaltung aus und weniger durch konstruktive oder strukturelle Besonderheiten. Doch ist es anfänglich maßgeblich der Beitrag von Kenneth Snelson gewesen, der mit seinen zahlreichen und greifbaren Kunstwerken die Ingenieure und Architekten seiner Zeit zum Nachdenken über Tensegrity-Strukturen angeregt hat [Motro, 2012].

Etwa zeitgleich entwarf und baute auch der ungarisch-französische Ingenieur David Georges Emmerich seine ersten Tensegrity-Strukturen, bei welchen er von Karl Jönsöns Gleichgewichts konstruktion inspiriert wurde [Motro, 2003, S.7]. David Georges Emmerich hatte während der Entwicklung seiner Strukturen vorerst keinen nachweislichen Kontakt zu Richard Buckminster Fuller oder Kenneth Snelson und beanspruchte zeitweise ebenfalls die Entdeckung der Tensegrity-Strukturen für sich. In den 1950er und 1960er Jahren beschäftigte er sich mit entsprechenden vorgespannten und selbsttragenden Strukturen, die er *Construction de réseaux autotendants* nannte. Diese Prismatischen Körper, welche im Minimum aus drei Druckstäben und neun vorgespannten Seilen bestehen (entspricht der Konfiguration des Twist-Elements), sind heute als einfachste räumliche Tensegrity-Strukturen bekannt.

Die erste dieser Strukturen entwickelte David Georges Emmerich 1958 mit Hilfe von Mikadostäben und Nähgarn [Emmerich, 1996, S.29]. Neben den einzelnen Twist-Elementen befasste er sich später mit der Kombination eben dieser Einzelelemente zu mehrlagigen Tensegrity-Netzen [Emmerich, 1988]. Sein Ansatz war die Reduzierung der Druckelementlängen, um diese möglichst materialsparend und gleichzeitig stabil ausbilden zu können [Peters, 1998, S.106]. In Bild 2-13 ist exemplarisch ein Twist-Element von David Georges Emmerich dargestellt. Es ist gut zu erkennen, wie sich die Struktur aus insgesamt drei Stäben und neun Seilen zusammensetzt. Auch weist das Element die typische, zur Stabilisierung notwendige Verdrehung auf.



2-13 Patentierte Tensegrity-Struktur (Construction de réseaux autotendants) von David Georges Emmerich (1963)

Anfang der 1960er Jahre ließen sowohl, Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich, sowie Kenneth Snelson ihre Entdeckung der Tensegrity-Strukturen patentieren [Fuller, 1962], [Emmerich, 1963], [Snelson, 1965]. Alle drei beschrieben nahezu zeitgleich in ihren Patenten unter anderem eine identische strukturelle Konfiguration: das dreieckigförmige Twist-Element [Motro, 2003, S.12]. Genaugenommen hat Richard Buckminster Fuller damit vor David Georges Emmerich und Kenneth Snelson eine Tensegrity-Struktur patentiert, ob er allerdings deswegen als erster Entdecker betitelt werden sollte ist fraglich.

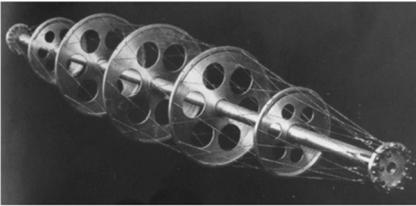
Sowohl Kenneth Snelson, als auch Richard Buckminster Fuller waren sich im späteren im Laufe ihrer Schaffenszeit, nach einer langen konfliktreichen Zeit der Aberkennung, der gegenseitigen Einflussnahme bewusst und haben dies auch schlussendlich erwähnt. Ebenfalls wurde auch die frühe Auseinandersetzung mit Tensegrity-Strukturen durch David Georges Emmerich entsprechend gewürdigt. 1996 veröffentlichte Haresh Lalvani eine Sammlung der Stellungnahmen von David Georges Emmerich, Richard Buckminster Fuller und Kenneth Snelson unter dem Titel *Origins of Tensegrity: Views of Emmerich, Fuller and Snelson* [Lalvani, 1996]. Diese Veröffentlichung gibt eine detaillierte Auskunft über die Sichtweisen von David Georges Emmerich, Richard Buckminster Fuller und Kenneth Snelson zur Entdeckung der Tensegrity-Strukturen und der späteren gegenseitigen Anerkennung der drei Entdecker. Die maßgebliche Entwicklung des Tensegrity-Prinzips geht damit zweifelsfrei auf David Georges Emmerich, Richard Buckminster Fuller und Kenneth Snelson zurück. Der Vollständigkeit halber werden an dieser Stelle noch zwei weitere Arbeiten präsentiert, die sich inhaltlich in die erste Periode der Tensegrity-Strukturen einordnen lassen.

Das Spiel mit dem Gleichgewicht durch die Interaktion von Druck- und Zugelementen faszinierte 1951 Jahre auch andere Personen. In London sorgte eine temporäre Skulptur, das Skylon, im Rahmen des Festivals of Britain für Aufsehen. In Bild 2-14 ist die Skulptur abgebildet, der circa 100 m hohe Pylon ruht mit seinem Fußpunkt auf drei Seilen. Diese wiederum sind über drei kleinere Maste abgespannt. Die Mitte des Pylons wird ebenfalls über diese Maste verankert, um die Struktur im Gleichgewicht zu halten. Der Ingenieur Felix Samuely konstruierte dieses Tragwerk



2-14 Skulptur Skylon beim Festival of Britain (1951)

nach dem Entwurf der Architekten Hidalgo Moya und Philip Powell [Gomez-Jauregui, 2004, S.23]. Für die damaligen technischen Möglichkeiten stellte das Skylon eine beeindruckende Konstruktion dar, welche die Faszination von leichten Konstruktionen unterstreicht. Der Pylon entspricht in seiner Anordnung und Stabilisierung der Philosophie des Tensegrity-Prinzips, da er ein Minimum an Druckelementen aufweist und die vorgespannten Seile für die übergeordnete Stabilität des Gesamtsystems sorgen. Allerdings kann durch die vorhandenen Verankerungen der Abspannseile die strukturelle Effizienz in Frage gestellt werden. Trotzdem stellt das Skylon in beeindruckender Weise die Leichtigkeit und die sichtbare Auflösung der Kräfte dar.



2-15 Seilpolygon von Robert Le Ricolais

Die zweite Arbeit stammt von Robert Le Ricolais. Er arbeitete mit Strukturen, die eine große Ähnlichkeit mit den Tensegrity-Strukturen besitzen. Ab Mitte der 1950er Jahre unterrichtete er an der University of Pennsylvania. Den Schwerpunkt seiner Forschungsarbeit bilden die modernen Raumfachwerke. Explizit befasste er sich mit der klaren Trennung der zug- und druckbeanspruchten Elemente, sowie dem Einfluss von Druckkräften auf einzelne konstruktive Elemente. Aus diesen Überlegungen heraus entwickelte er Anfang der 1960er Jahre linsenförmige rotations-symmetrische Seilpolygone. Er selbst sagte über seine Arbeit: „*Wir handhaben die Asymmetrie zwischen Zug und Druck nicht indem wir der herkömmlichen, bei Fachwerken üblichen, Differenzierung in alternierenden Glieder folgen, sondern indem wir die gesamte Struktur in zwei verstärkt agierende Gruppen zerlegen, die unter Spannung im Gleichgewicht gehalten werden.*“ [McCleary, 2002, S.66] Mit dieser Aussage nähert sich Robert Le Ricolais in gewisser Weise der Betrachtung von David Georges Emmerich an: dem zugstabilisierten Gesamtsystem, welches aus zwei strukturellen Elementgruppen zusammengesetzt ist und durch eine Reduzierung der Druckelementlänge an Stabilität gewinnt. Das abgebildete Seilpolygon (Bild 2-15) verdeutlicht diesen Gedanken. Um das Ausknicken des druckbeanspruchten Stabelements zu verhindern, sieht Robert Le Ricolais in seinem Entwurf die regelmäßige Anordnung von Scheibenelementen, sowie eine äußere Seilverspannung vor [Motro, 1996, S.76]. Mit dieser Struktur, beziehungsweise diesem Prinzip ist Robert Le Ricolais sicherlich kein Mitbegründer der Tensegrity-Strukturen, aber der grundlegende Gedanke seiner Arbeit weist große Parallelen zu David Georges Emmerichs und Richard Buckminster Fullers Arbeiten auf, die sich auf die übergeordnete Zugstabilisierung des Gesamtsystems und eine damit verbundene strukturelle Effizienz konzentrierten.

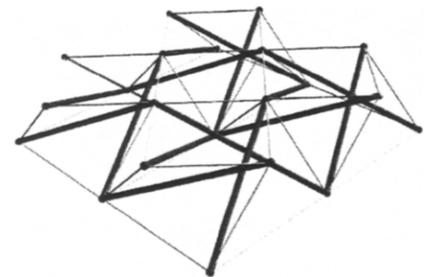
Die erste Periode der Entwicklung der Tensegrity-Strukturen beschreibt die Entdeckung des Prinzips und den Bau erster Modelle und Experimente. Insbesondere die unterschiedlichen Sichtweisen der drei Hauptakteure, David Georges Emmerich, Richard Buckminster Fuller und Kenneth Snelson zeigt die Vielfalt, die diesem Prinzip enthalten ist. Richard Buckminster Fuller sieht in den Tensegrity-Strukturen ein universelles Prinzip, das sich durch Leichtigkeit und Effizienz auszeichnet. Im Gegensatz dazu, erkennt Kenneth Snelson das gestalterische Potential,

dass durch Leichtigkeit und Auflösung der Kräfte hervorgerufen wird. David Georges Emmerich stellt, ähnlich wie Richard Buckminster Fuller, vor allem die strukturelle Effizienz dar, beschränkt sich aber dabei auf stabile dreieckförmige Konfigurationen aufbauend auf den Twist-Einheiten.

2.1.2 Zweite Periode: Wissenschaftliche Auseinandersetzung

Inspiziert durch die dargestellten Pionierarbeiten im Bereich des Tensegrity-Prinzips, haben sich seit den 1960er Jahren verschiedene Architekten, Ingenieure und andere Wissenschaftler mit den Strukturen befasst. Dabei wurde beispielsweise der Systemaufbau unterschiedlicher Konfigurationen untersucht und beschrieben. Aber auch erste Berechnungsansätze, sowie erste Ideen für praktische Anwendungsbereiche wurden entwickelt [Snelson, 2012, S.79]. Unter anderem haben die Tensegrity-Strukturen auch Einzug in die Biomechanik, die Raumfahrt und die Mathematik gehalten. Nachfolgend werden einige, für die Entwicklung der Tensegrity-Strukturen wichtige Personen, ihre Arbeiten und ihre Ansätze beschrieben.

Anfang der 1970er Jahre begann René Motro an der Universität Montpellier mit seiner Forschungsarbeit über das mechanische Verhalten von Tensegrity-Strukturen. Ursprünglich von David Georges Emmerich inspiriert [Motro, 2003, S.1], hat René Motro seitdem eine Vielzahl von Veröffentlichungen über die Strukturen geschrieben [Gomez-Jauregui, 2004, S.13f.]. Er kann damit zweifelsfrei zu den Personen gezählt werden, die einen maßgeblichen wissenschaftlichen Beitrag zur Untersuchung des Tensegrity-Prinzips geleistet haben. Mitte der 1980er Jahre wurde er mit der Leitung des Laboratoire de Mécanique et Génie Civil beauftragt, und nutzte dort die Möglichkeit Tensegrity-Strukturen auf der Basis wissenschaftlicher Methoden in Theorie und Experimenten zu analysieren [Sultan, 2009]. Einen Schwerpunkt seiner Forschungsarbeiten bilden Tensegrity-Gitter-Strukturen, sogenannte Tensegrity-Grids. Dabei handelt es sich um eine Art Weiterentwicklung von klassischen Raumfachwerken, basierend auf dem Tensegrity-Prinzip (siehe Bild 2-16). Darüber hinaus hat sich René Motro auch mit der wissenschaftlichen Beschreibung und Einordnung verschiedenster Tensegrity-Strukturen befasst. Damit kann seine Arbeit als eine der ersten wissenschaftlichen Aufarbeitungen von Tensegrity-Strukturen angesehen werden.

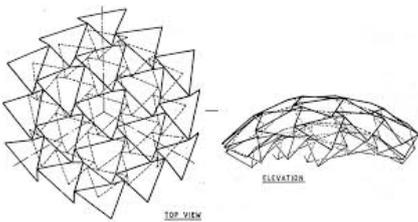


2-16 Tensegrity-Grid von René Motro, bestehend aus mehreren addierten Twist-Elementen

Ebenfalls in den 1970er Jahren begannen Anthony Pugh und Hugh Kenner, von der University of California, mit ihren wissenschaftlichen Arbeiten über Tensegrity-Strukturen. Beide veröffentlichten 1976 jeweils ein Buch über ihre Forschungsergebnisse [Kenner, 1976], [Pugh, 1976]. Hugh Kenner präsentierte eine systematische Analyse über die Geometrie von verschiedenen Twist-Elementen und einfachen sphärischen Tensegrity-Strukturen, sowie deren geometrischer Beschreibung und Berechnung [Gomez-Jauregui, 2004, S.14]. Er konnte mit seiner Arbeit den Zusammenhang zwischen der Rotation und der Anzahl der Druckelemente eines Twist-Elements erklären [Charalambides, 2004, S.22]. Anthony

Pugh veröffentlichte ein Werk, indem er eine Varianz an Tensegrity-Strukturen beschrieb und diese in verschiedene Systemaufbauten gliederte. Darüber hinaus beschrieb er Regeln zur Konstruktion einfacher Tensegrity-Strukturen [Sultan, 2009, S. 76].

Etwas später, Anfang der 1980er Jahre begann Robert William Burkhardt Jr. sich mit den Tensegrity-Strukturen zu befassen. Im Jahre 1982 stand er erstmals mit Richard Buckminster Fuller im Briefkontakt, um detaillierte Kenntnisse über die Geometrie und die Mathematik von Tensegrity-Strukturen zu erlangen [Gomez-Jauregui, 2004, S.14f.]. Aus seinem anfänglichen Interesse entstand etwa 20 Jahre später das Buch *A Practical Guide to Tensegrity Design* [Burkhardt, 2004], welches dabei allerdings eher einer wissenschaftlichen Abhandlung entspricht, als einem Lehr- oder Fachbuch über Tensegrity-Strukturen. Robert William Burkhardt beschreibt in seiner Veröffentlichung die Arbeit an nichtlinearen Programmentwicklungen zur Untersuchung von Tensegrity-Strukturen, sowie seine Forschung über zweischalige Tensegrity-Domes. Dabei handelt es sich um kuppelförmige Tensegrity-Konstruktionen, die durch die Addition einzelner Twist-Elemente einen zweilagigen Aufbau der Schale abbilden [Kawaguchi, 2007]. Darüber hinaus entwickelte er ein Programm, welches den Entwurf und die Berechnung von Tensegrity-Strukturen ermöglicht [Gomez-Jauregui, 2004, S.57]. Seine Arbeit kann als ein bedeutender Schritt für das geometrische Verständnis dieser Strukturen und insbesondere für deren programmatische Umsetzung betrachtet werden.



2-17 Zweilagiger Tensegrity-Dome von Ariel Hanaor, bestehend aus mehreren addierten Twist-Elementen

Ariel Hanaor, ein Ingenieur am Israeli Building Research Institute, begann mit seinen Forschungsarbeiten über Tensegrity-Strukturen Ende der 1980er Jahre. In seiner Arbeit fokussierte auch er sich auf zweilagige Tensegrity-Grids, die sich aus einzelnen Twist Elementen zusammensetzen, darüber hinaus galt sein Interesse den zweilagigen Tensegrity-Domes [Motro, 2011, S.7]. Bei Vergleichsuntersuchungen von Tensegrity-Grids und klassischen räumlichen zweilagigen Fachwerkssystemen konnte er feststellen, dass die Tensegrity-Strukturen nicht die Steifigkeit der Fachwerkstrukturen erreichten. Untersuchungen räumlicher Kuppeltragwerke zeigten hingegen, dass sich bei diesen Systemen mit zweilagigen Tensegrity-Domes sehr wohl annähernde Steifigkeiten von Fachwerkkuppeln mit geringen Eigengewichten erreichen lassen [Peters, 1998, S.107]. Bild 2-17 zeigt den Aufbau eines zweilagigen Tensegrity-Domes nach Ariel Hanaor. In der Draufsicht ist gut zu erkennen, dass sich der Dome aus einzelnen dreieckförmigen Twist Elementen zusammensetzt, durch diesen Aufbau konnte Ariel Hanaor eine größere Stabilität erzielen, als Richard Buckminster Fuller 1953 mit seiner einlagigen Tensegrity-Kuppel. Bei späteren Arbeiten stellte Ariel Hanaor zudem fest, dass die Steifigkeit der Tensegrity-Strukturen durch den regelmäßigen Kontakt einzelner Druckelemente zunimmt. Aufgrund dieser Erkenntnis, als auch aufgrund des geringen Eigengewichts der Strukturen, sieht er zweilagige Tensegrity-Domes als durchaus konkurrenzfähig zu klassischen Fachwerkstrukturen an [Robbin, 1996, S.30f.]. Ein Grund für die frühe wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den Tensegrity-Grids

liegt sicherlich in dem geometrischen Aufbau der Strukturen. Zweilagige Tensegrity-Grids können durch die Addition einfacher Twist-Elemente gebildet werden.

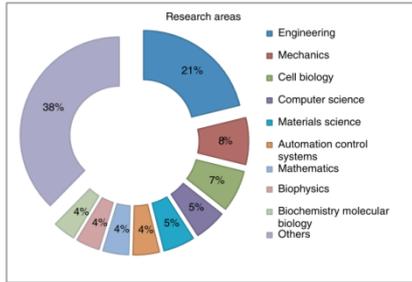
Robert Connelly und Allen Back veröffentlichten Ende der 1990er Jahre ihre Forschungen über Tensegrity-Strukturen. Sie nutzten bei ihren Untersuchungen verschiedene mathematische Theorien, um die Geometrie von Tensegrity-Strukturen zu beschreiben, sowie ihre mechanischen Eigenschaften, wie beispielsweise die Steifigkeit und die Stabilität, zu erfassen [Sultan, 2009, S.82]. Robert Connelly und Allen Back eröffneten damit erstmals die Möglichkeit einer allgemeinen mathematischen Beschreibung von dreidimensionalen Tensegrity-Strukturen. Diese Erkenntnisse sowie die Anwendung computergestützter Berechnungen ermöglichte ihnen darüber hinaus den Entwurf zahlreicher Tensegrity-Strukturen und deren Katalogisierung in Abhängigkeit von Symmetrie, Stabilität und Steifigkeit [Gomez-Jauregui, 2004, S.15].

Auch in der Biomechanik wird den Tensegrity-Strukturen eine gewisse Bedeutung zuteil. Als Beispiel für die wissenschaftliche Breite des Tensegrity-Prinzips wird die Arbeit von Donald E. Ingber erwähnt, mit der er sich seit Mitte der 1990er Jahre befasst. Donald E. Ingber beschreibt den menschlichen Körper als Tensegrity-Struktur, beziehungsweise als natürliche Struktur, die dem Tensegrity-Prinzip entspricht. Die Knochen entsprechen dabei den Druckelementen und die Muskeln fungieren als stabilisierendes Zugsystem [Ingber, 1998, S.50]. Richard Buckminster Fuller hat bereits viele Jahre vorher das Tensegrity-Prinzip auch an Entwicklungen aus der Natur angelehnt und damit unter anderem die universelle Bedeutung der Tensegrity-Strukturen hervorgehoben. Richard Buckminster Fuller ging sogar soweit, ein Atommodell mit dem Tensegrity-Prinzip zu beschreiben. Auch Donald E. Ingber nutzt den grundsätzlichen Aufbau von Tensegrity-Strukturen um ein mikroskopisches Modell zu entwickeln, und zwar den Aufbau von lebenden Zellen [Wolkowicz, 2008, S.14].

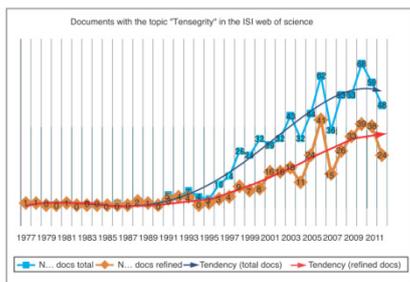
Die zweite Periode der Tensegrity-Strukturen beschreibt die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Prinzip und die Formulierung erster theoretischer Ansätze. Insbesondere die mathematischen Beschreibungen der geometrischen Vielfalt und entsprechender Konfigurationen, sowie die dadurch entstandene Möglichkeit der späteren numerischen Analyse sind als besondere Meilensteine zu nennen.

2.1.3 Dritte Periode: Erste praktische Anwendungen

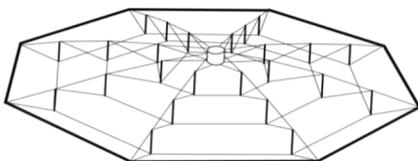
Die dritte Periode der Entwicklung der Tensegrity-Strukturen definiert sich durch einer Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen verschiedenster Disziplinen und vor allem durch erste praktische Anwendungen des Prinzips. Maßgeblich wurde diese Entwicklung durch die rapide vorschreitende Computertechnologie beeinflusst, sowohl im Bereich der Softwareentwicklung, als auch im Bereich der Hardwareentwicklung. Dadurch, dass es sehr große Fortschritte in der Leistungsfähigkeit von Computersystemen gab, konnten diese auf einmal hoch komplexe geometrische und mathematische Zusammenhänge erfassen und berechnen, die vorher in diesem Maße noch nicht umsetzbar waren. Auch der Zugang zu diesen neuen Werkzeugen wurde durch die Verbreitung gängiger PC-Systeme entsprechend vereinfacht. Für die Tensegrity-Strukturen ergaben sich damit zahlreiche neue, bis dato in ihrer Komplexität nicht vorstellbare Möglichkeiten, die nun mit entsprechenden digitalen Modellen abgebildet und berechnet werden konnten [Ingber, 2012], [Sultan, 2009, S.84] und welche die Grundlage für eine baupraktische Umsetzung bildeten.



2-18 Anteil verschiedener Disziplinen an der Tensegrity-Forschung im ISI Web of Science



2-19 Anzahl an Veröffentlichungen zum Thema Tensegrity



2-20 Prinzipdarstellung der tragenden Elemente eines Geiger-Domes

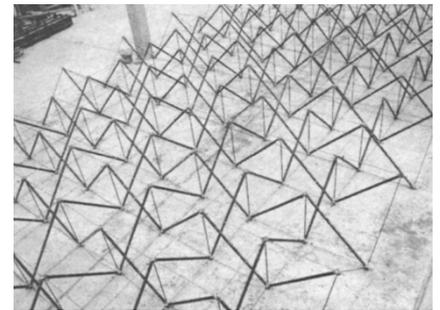
Eine an dieser Stelle erwähnenswerte Studie, ist die Arbeit von Valentin Gomez-Jauregui, der 2012 eine kurze Untersuchung von Veröffentlichungen mit dem Schlagwort *tensegrity* in der ISI Web of Science Datenbank durchgeführt hat (siehe Bild 2-18). Dabei sind insgesamt 675 Ergebnisse aus unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen zu diesem Thema zu finden. Mit einem Anteil von 21 % kommen die meisten Beiträge aus dem Bereich Ingenieurwesen. Darüber hinaus ist aus der Auswertung von Valentin Gomez-Jauregui der Trend ablesbar (siehe Bild 2-19), dass die Anzahl an Veröffentlichungen zum Thema Tensegrity ab Mitte der 1990er Jahre stark zugenommen hat. [Gomez-Jauregui, 2012]

Eine relativ frühzeitige Anwendung des Tensegrity-Prinzips im Bauwesen sind die sogenannten Geiger Domes, teilweise auch Cable Domes genannt (siehe Bild 2-20). Sie wurden nach ihrem Erfinder David H. Geiger benannt. Die Geiger-Domes können als Weiterentwicklung des Aspension Domes von Richard Buckminster Fuller (siehe Abschnitt 2.1.1) verstanden werden [Nenadovic, 2010], obwohl ihre Zuordnung zu den Tensegrity-Strukturen oftmals kontrovers diskutiert wurde. René Motro schreibt hierzu: „[...] these very efficient tension structures were inspired by tensegrity concept, but their mechanical behavior is quite different. They are stabilized and tensioned on a peripheral compressed ring.“ [Motro, 2011, S.5]. Tony Robbin, der sich unter anderem mit gebauter Architektur auseinandersetzt, ist allerdings gegensätzlicher Auffassung: „People who view the domes are, in any case, strongly reminded of tensegrity structures like Snelson’s sculptures. [...] I think we can fairly call aspension domes tensegrity domes, and consider them the first architectural application of tensegrity.“ [Robbin, 1996, S.34]. Im Gegensatz zu René Motro vertritt Tony Robbin damit sogar die Meinung, dass die Geiger Domes die erste architektonische Anwendung der Tensegrity-Strukturen überhaupt darstellen. Eine detaillierte Diskussion über die Einordnung

der Geiger Domes in den Tensegrity-Kontext wird im weiteren Verlauf der Arbeit im Abschnitt 2.4.2 vorgenommen.

Ein Geiger Dome erreicht aufgrund seiner Leichtigkeit sehr große Spannweiten. Das Tragwerk besteht aus einem umlaufenden Druckring, einer typischerweise mittig angeordneten Nabe, vorgespannten Seilen, welche den Druckring und die Nabe verbinden, sowie mehreren vertikal angeordneten Druckelementen, die eine synklastische Krümmung des gesamten Dachtragwerks ermöglichen. Den Scheitelpunkt der Geiger Domes bildet dabei die Nabe. Als Tragwerkseindeckung werden u.a. textile Membrane verwendet, die zusätzlich zur seitlichen Stabilisierung der Druckelemente herangezogen werden können [Nenadovic, 2010]. Da diese Strukturen als Überdachung großer stützenfreier Räume durchaus effektiv sind, wurden Ende der 1980er Jahre und in den 1990er Jahren mehrere Stadionüberdachungen als Geiger Domes errichtet. Die erste Dachkonstruktion wurde, anlässlich der Olympischen Spiele 1986, in Seoul gebaut. Daraufhin folgten kurze Zeit später unter anderem die Redbird Arena, 1988, in Illinois, als erster ovaler Geiger Dome, der Florida Suncoast Dome, ebenfalls 1988, in St. Petersburg, und der Georgia Dome, 1992, in Georgia, mit einer überspannten Fläche von 227 x 185 m, als einer der größten Geiger Domes überhaupt [Gomez-Jauregui, 2004, S.27f.].

Zwischen 1998 und 2000 entwickelte und baute der René Motro mit seinem Team an der University of Montpellier ein rechteckiges, flaches, zweilagiges Tensegrity-Grid. Die Tensegrity-Struktur, mit der Bezeichnung Tensarch (siehe Bild 2-21), überspannte eine Fläche von etwa 80 m² bei einem zugehörigen Gewicht von 12 kg/m². Der Einsatz als Trag-system einer Überdachung wurde angedacht [Motro, 2011, S.9], [Liu, 2017, S.3]. Das Besondere der Tensarch-Struktur gegenüber bisher realisierten Tensegrity-Strukturen ist die Anordnung der Druckelemente. Im Vergleich zu früheren Grids wurde hier keine Addition von einzelnen Twist Elementen vorgenommen. Bei dem Tensarch bilden zwei Seilnetze, über eine entsprechende Anordnung von Druckelementen gekoppelt, Ober- und Unterseite des Grids. Dabei ließ René Motro einen direkten Kontakt von jeweils zwei Druckstäben zu. In Bild 2-21 ist die Druckstabanordnung bei dem Tensarch gut zu erkennen. Die für Tensegrity-Strukturen neue Anordnung der Elemente zeigt gegenüber einer reinen Addition von Twist-Elementen den Vorteil einer erhöhten Steifigkeit auf. Diese Steifigkeitssteigerung ermöglicht eine effiziente und mit 12kg/m² auch sehr leichte Umsetzung des Tragwerks. Ein weiterer struktureller Vorteil dieses neuen Systemaufbaus ist die klare Gliederung der Struktur und der damit verbundene klar gegliederte Aufbau [Robbin, 1996, S.31f.].



2-21 Tensarch von René Motro (2000)

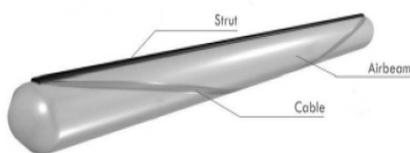


2-22 Tensegrity-Tower als Stützung der Struktur White Rhino (2001)



2-23 Fünfeckiges Twist-Element als Stützung der Struktur White Rhino (2001)

Im Jahr 2001 wurde in Chiba, Japan eine Pavillonstruktur mit dem Namen White Rhino unter Leitung von Ken'ichi Kawaguchi errichtet [Liu, 2017, S.3]. Bei der Struktur handelt es sich um ein Membrandach mit zwei Hochpunkten, welche von jeweils einer Tensegrity-Struktur gestützt werden. Abgesehen von den, als Stadionüberdachung genutzten Geiger Domes ist das White Rhino, damit eines der ersten baupraktisch dauerhaft umgesetzten Tensegrity-Strukturen. Die Stützkonstruktion des einen Hochpunktes wurde als etwa 10 m hoher Tensegrity-Turm (siehe Bild 2-22) umgesetzt. Der Tensegrity-Turm besteht aus zwei kleineren gestapelten dreieckförmigen Twist Elementen, die mit zusätzlichen Zugelementen versteift wurden. Die zweite Stützkonstruktion des Pavillondaches besteht aus einem fünfeckförmigen Tensegrity-Twist Element (siehe Bild 2-23) mit einer Höhe von etwa 7 m [Kawaguchi, 2011]. Bei dem fünfeckigen Twist-Element liegt die Besonderheit in den zusätzlich eingebauten Vertikalseilen, welche die notwendige Steifigkeit bieten, um alle Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten. Anstatt fünf Diagonalseile sind bei der Struktur insgesamt zehn Diagonalseile zwischen oberem und unterem Polygon angeordnet [Zhang, 2015, S.4]. Durch die zusätzlich eingeführten versteifenden Diagonalseile unterliegen auch diese Tensegrity-Strukturen einer strukturellen Veränderung um eine Realisierung zu ermöglichen. Sowohl in der ersten, sowie in der zweiten Periode wurde maßgeblich versucht, die Anzahl aller Elemente in einer Tensegrity-Struktur so gering wie möglich zu halten. Das typische Twist-Element besteht demzufolge aus n Druckelementen und insgesamt $n \cdot 3$ Seilelementen [Peters, 1998, S.34f.]. In der vorliegenden Struktur sind also fünf zusätzliche Seilelemente verbaut. Ein weiterer Aspekt ist das Aufbringen der notwendigen Vorspannkraft der Diagonalseile. Bei der Planung der Struktur wurde auch die Herausforderung bedacht, wie die notwendigen Vorspannkraft möglichst gleichmäßig in die Tensegrity-Strukturen einzubringen sind. Die Lösung bietet hier das händische Aufbringen der Vorspannung in jedem Seilelement über Spannschlösser. Mit entsprechenden Versuchen wurden die dafür notwendigen Parameter, beispielsweise die maximal händisch aufbringbare Spannkraft, ermittelt [Kawaguchi, 2017].

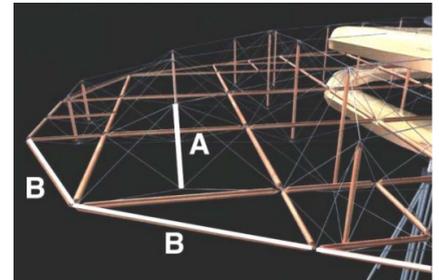


2-24 Prinzipdarstellung eines luftgestützten Tensairity-Balkens

Eine weitere Entwicklung, die in diesem Rahmen zu nennen ist, ist die Anfang der 2000er Jahre von Mauro Pedretti und Rolf Luchsinger entwickelte Tensegrity-Struktur, dem heute patentierten Leichtbausystem Tensairity®. Dabei handelt es sich um einen dünnen Biegebalken, der durch einen, unter Innendruck stehenden Membranzylinder, gebettet wird. Zur zusätzlichen Stabilisierung sind an dem Membranzylinder zudem tragende Seilelemente angeordnet. Das hybride System trägt äußere Lasten maßgeblich über die Interaktion zwischen dünnem Balken und die Seilverspannung ab, die pneumatische Membrankonstruktion dient der Stabilisierung des Balkens und um eine statische Höhe zwischen Balken und Verspannung sicherzustellen [Teutsch, 2009, S.27]. Eine prinzipielle Darstellung des Tensairity-Balkens zeigt Bild 2-24. Zwar kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass dieses hybride System von bisherigen Tensegrity-Strukturen abweicht und daher eventuell nicht als Tensegrity-

Struktur im eigentlichen Sinn bezeichnet werden kann, der Grundgedanke der Interaktion von wenigen Druckelementen und einem übergeordneten System aus stabilisierenden Zugelementen ist hier aber dennoch zweifelsfrei gegeben. Auch wird der Tensegrity-Balken in der Literatur als „*synergetic combination of a pneumatic structure and a tensegrity structure*“ [Roekens, 2011, S.199] bezeichnet. Somit kann der Tensegrity-Balken zumindest anteilig als gebautes Beispiel, basierend auf dem Tensegrity-Prinzip angesehen werden [Motro, 2011, S.8].

Zur Schweizer Expo 2002 entstand in Zusammenarbeit von dem New Yorker Architekturbüro Diller & Scofidio und Mauro Pedretti das Blur Building (Bild 2-25) als temporärer Pavillonbau auf dem Neuchâtelsee in Yverdon-les-Bains. Der Pavillon besteht aus einem ovalen Gitterrost, das über mehrere zentral angeordnete Stützen aus dem See emporragt und etwa eine Fläche von 60 x 100 m überspannt [Meeß-Olsohn, 2004, S.31]. In jedem Feld des horizontal angeordneten Gitterrostes sind einzelne vertikale Druckstäbe angeordnet (A), die nur durch eine Seilspannung gehalten werden, die durch einen äußeren Druckring (B) kurzgeschlossen sind [Motro, 2011, S.160]. Durch die verspannten Druckelemente erzeugt das Blur Building den Eindruck einer Tensegrity-Struktur. Es wirkt, als ob viele einzelne Tensegrity-Elemente in der Ebene zu der Gesamtkonstruktion addiert wurden.

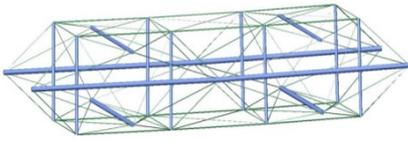


2-25 Visualisierung der Struktur des Blur Buildings (Passera/Pedretti)

Anlässlich der Internationalen Gartenausstellung 2003 in Rostock wurde der, bis dato höchste Tensegrity-Turm erbaut. Der sogenannte Warnow-Tower wurde von Volkwin Marg und Mike Schlaich entworfen und realisiert. Mit einer Gesamthöhe von 62,3 m ist der aus sechs Tensegrity-Twist-Elementen bestehende Turm schon weithin als Wahrzeichen gut sichtbar und damit die bis dato höchste Tensegrity-Struktur. Um die für diese Konstruktionshöhe erforderliche Struktursteifigkeit zu erreichen, erfolgte die Anordnung der einzelnen Elemente zueinander über einen Kontakt von jeweils zwei übereinanderliegenden Druckstäben. Die konstruktive Ausführung eines solchen Kontaktpunktes ist in Bild 2-26 dargestellt. Durch diese Anordnung kann eine Steifigkeit erzielt werden, die die Kopfverschiebung des Tensegrity-Turms bei Sturm auf etwa 1m begrenzt, darüber hinaus wurde durch diese Anordnung auch die Montage der Struktur wesentlich vereinfacht. Grundlegend behält der Turm durch die einzelnen dreieckförmigen Twist-Elemente und die klare Gliederung eine, für Tensegrity-Strukturen typische Ästhetik [Schlaich, 2004].



2-26 Knotenpunkt am Warnow-Tower (links), Warnow Tower (rechts)



2-27 Visualisierung der Tor Vergata Brücke

Auf der Internationalen Footbridge Conference 2005 wurde der Entwurf der Tor Vergata Brücke als Tensegrity-Struktur von Andrea Micheletti vorgestellt. Auch hier bestand das Problem darin, eine adäquate Steifigkeit des Systems sicherzustellen. Als Lösung wurde eine zusätzliche Verspannung der einzelnen Tensegrity-Elemente untereinander eingeführt. Um die Steifigkeit in Haupttragrichtung sicher zu stellen, musste zusätzlich zu den Seilverspannungen auch ein durchgehender Druckstab in Brückenlängsrichtung (siehe Bild 2-27) installiert werden [Micheletti, 2012]. Trotz einer Abweichung vom klassischen Tensegrity-Konzept behält der Entwurf der Tor Vergata Brücke die Leichtigkeit und Transparenz einer Tensegrity-Struktur.



2-28 Kurilpa Bridge in Brisbane

Im Jahre 2009 wurde von der ARUP Group Ltd in Brisbane die Fußgängerbrücke Kurilpa Bridge (siehe Bild 2-28) errichtet. Auch dieses Projekt erinnert durch die scheinbar schwebenden Stabelemente, sowie die zahlreichen Zugseile an eine Tensegrity-Struktur, und wurde auch zu jener Zeit als sogenannte erste Tensegrity-Brücke präsentiert [Beck, 2012]. Allerdings weist auch diese Konstruktion bei genauer Betrachtung Elemente auf, die denen einer Tensegrity-Struktur widersprechen. Als Beispiel ist das durchgehende tragende Brückendeck oder die teilweise in Fundamentkörpern verankerte Abspannseile zu nennen. Mit einer Spannweite von 128 m ist die Kurilpa Bridge dennoch die erste große Brücke, die zumindest in Teilen dem Tensegrity-Prinzip folgt [Motro, 2011, S.5].

Kurzzusammenfassung

In der ersten Periode der Entwicklung der Tensegrity-Strukturen ging es vorrangig um die Entdeckung des Prinzips und nicht um die Möglichkeit praktische Anwendungen zu entwerfen. Neben den visionären Arbeiten von Richard Buckminster Fuller, der sich unter anderem auch mit kuppelförmigen Tensegrity-Strukturen auseinandersetzte, lag der Fokus dieser Periode auf den einfachen räumlichen Grundelementen, den Twist-Elementen, die sinnbildlich für die strukturelle Umsetzung des Tensegrity-Prinzips standen. Sowohl David Georges Emmerich, Richard Buckminster Fuller, sowie Kenneth Snelson patentierten in den 1960er Jahren ihre Entdeckungen des dreieckförmigen Twist-Elements.

Aufbauend auf den ersten Experimenten wurde in der zweiten Periode maßgeblich an einer wissenschaftlichen Beschreibung der Tensegrity-Strukturen der ersten Periode gearbeitet. Hauptsächlich wurden dabei verschiedenste Konfigurationen der Twist-Elemente, oder aus Twist-Elementen zusammengesetzte Strukturen untersucht, die grundlegend mit einer minimalen Anzahl ihrer konstruktiver Elemente aufgebaut wurden.

Die realisierten Tensegrity-Strukturen aus der dritten Periode unterscheiden sich von den theoretisch untersuchten Grundelementen, da beispielsweise auf unterschiedliche Art und Weise zusätzliche Elemente eingeführt wurden, um beispielsweise eine höhere Stabilität zu erreichen. Exemplarisch können hier der Druckstabkontakt bei dem Warnow-Tower

oder zusätzlich eingebaute Vorspannseile bei dem fünfeckförmigen Twist-Element des White Rhino angeführt werden. Der für die Twist-Elemente typische Kräftekurzschluss innerhalb der Struktur lässt sich auch nicht in allen gebauten Projekten klar identifizieren. Die Kurilpa Bridge verfügt beispielweise über zusätzliche Verankerungen in Fundamentkörpern. Trotz der bisherigen Anpassung der klassischen Grundeinheiten wird erwartet, dass Tensegrity-Strukturen im Bauwesen der Zukunft durch ihre hohe Flexibilität, ihre Anpassungsfähigkeit und ihre Multifunktionalität eine Rolle spielen [Sultan, 2009, S.133]. Inwieweit die Anpassungen der Konstruktion gebauter Tensegrity-Strukturen eine Abweichung von dem eigentlichen Tensegrity-Prinzip darstellt, wird in den folgenden Abschnitten (siehe Abschnitt 2.3 und Abschnitt 2.4) diskutiert.

2.2 Charakteristik von Tensegrity-Strukturen

Nach einem umfassenden Einblick in die Entwicklung und bisherige Umsetzung von Tensegrity-Strukturen, sowie einer Gliederung dieser in drei Perioden, sollen in diesem Abschnitt die Eigenschaften von Tensegrity-Strukturen näher betrachtet werden. Der Fokus wird dabei auf den gestalterischen Charakter, das mechanische Tragverhalten und die strukturellen Potentiale der Strukturen gelegt.

2.2.1 Strukturelle-Ästhetik

Der gestalterische Ausdruck von Tensegrity-Strukturen ist etwas Besonderes. Ihre strukturelle Konfiguration fasziniert, da sie lediglich aus sehr reduzierten Elementen besteht, die entweder Zug oder Druckkräfte aufnehmen [Gilewski, 2015, S.242]. Da die Zugelemente, ihrer Natur entsprechend sehr schlank gehalten werden, scheinen die Druckelemente, bedingt durch ihre diskontinuierliche Anordnung, in dem Gesamtsystem zu schweben, obwohl sie natürlich den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Schwerkraft unterliegen [Motro, 2012]. Die Druckkräfte werden nicht, wie üblich, auf direktem Wege in das Erdreich abgeleitet, sondern durch faszinierende Art und Weise in dem Gesamtsystem umgelenkt. Damit erhalten die Strukturen eine Leichtigkeit, wie nur wenige andere Tragwerke. Insbesondere die strukturelle Effizienz, die der Reduzierung der konstruktiven Elemente auf ein notwendiges Minimum folgt, unterstreicht die Leichtigkeit von Tensegrity-Strukturen, diese Ästhetik ist im Besonderen in den Skulpturen von Kenneth Snelson zu bewundern [Sroka-Bizon, 2017]. Durch die Materialwahl, die deutlich zwischen Druck- und Zugelementen unterscheiden lässt, können die Tensegrity-Strukturen als Visualisierung des ihnen inhärenten strukturellen Prinzips benannt werden. Ebenfalls stellen sie komplexe Gleichgewichtsformen dar. Die dazu notwendige Vorspannung wird durch die sichtbare Spannung der Seile erfahrbar.

2.2.2 Strukturelle Eigenschaften

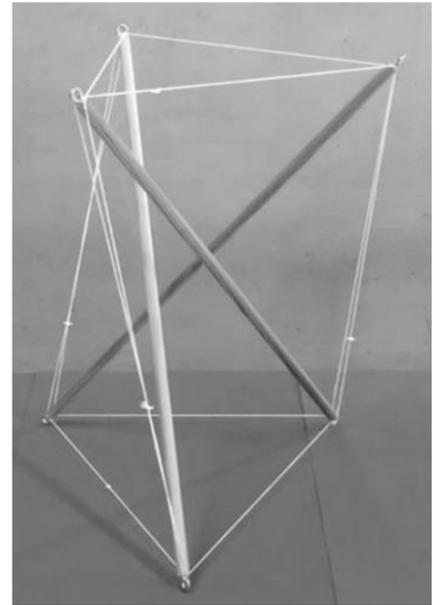
Tensegrity-Strukturen können als räumliche, aufgelöste und zugstabilisierte Tragwerke umschrieben werden. Dabei bestehen sie ursprünglich lediglich aus Druckstäben und Seilen. Die Seile sind dabei miteinander verbunden, während die Druckstäbe, bei den typischen Twist-Elementen, untereinander berührungslos im Gesamtsystem angeordnet sind. Das Gesamtsystem stabilisiert sich allein durch das Kräftegleichgewicht aus druckbeanspruchten Stäben und vorgespannten Seilen, wobei das übergeordnete stabilisierende Zugsystem ein wesentliches Merkmal des Tragverhaltens von Tensegrity-Strukturen ist. Aus diesem Grund liegen in den Systemen grundlegend mehr Zugelemente als Druckelemente vor, idealerweise jedoch nur so viele wie notwendig. Die Druckelemente haben die besondere Eigenschaft die übergeordneten stabilisierenden Zugkräfte lokal umzulenken, und somit räumliche zugdominierte Systeme auszubilden, die keine oder nur wenige äußere Verankerungspunkte benötigen [Meeß-Olsohn, 2004, S.6]. Darüber hinaus eröffnet die Möglichkeit der Kraftumlenkung an den Stabenden den Tensegrity-Strukturen

eine nahezu unendliche Gestaltungsfreiheit. Folgend werden der Systemaufbau, der Lastabtrag, die Steifigkeit und die Stabilität der Strukturen näher analysiert.

Systemaufbau

Ein sogenanntes Tensegrity-Twist-Element beschreibt das kleinste räumliche und in sich geschlossene Tensegrity-Element (siehe Bild 2-29). Dieses dreieckförmige Grundelement wird für die nachfolgende Beschreibung des Tragverhaltens herangezogen, um die wesentlichen strukturellen Mechanismen und Interaktionen der einzelnen Elemente zu klären. Das Twist-Element besteht aus sechs Knotenpunkten, drei Druckstäben, drei Diagonalseilen und sechs Polygonseilen. Da das System lediglich aus Stäben und Seilen besteht und beide Elemente nur in Verbindung miteinander zu einem stabilen System führen, kann an dieser Stelle also nicht von einer Hierarchie der konstruktiven Elemente gesprochen werden. Die drei Druckstäbe sind in dem Twist-Element rotations-symmetrisch mit einer definierten Neigung um eine vertikale Achse angeordnet. Durch die Verdrehung der Elemente um die vertikale Mittelachse ergibt sich eine geometrische Überschneidung [Meeß-Olsohn, 2004, S.8ff.]. Jeweils drei Polygonseile ergeben ein unteres und ein oberes dreieckförmiges Polygon. In jedem Knotenpunkt werden zwei Polygonseile, ein Druckstab und ein weiteres Diagonalseil miteinander gekoppelt und kurzgeschlossen. Je nachdem, ob die Elemente in ihren Gruppierungen die gleichen Längen besitzen oder nicht, liegt ein symmetrisches oder unsymmetrisches Twist-Element vor, wobei angemerkt werden muss, dass die Rotationssymmetrie bei den Twist-Elementen immer gegeben ist. Um das System zu stabilisieren werden die Diagonalseile, welche das untere und obere Polygon miteinander verbinden, gleichmäßig vorgespannt. Das Twist-Element reagiert auf diese Vorspannung mit einer Rotation in der Polygonebene und einer Translation in der Grundrissebene. Damit stellt sich eine minimale Diagonalseillänge ein, wobei der Rotationswinkel genau 30° beträgt. In diesem Zustand liegt ein stabiles gleichmäßig belastetes System vor. Für den Gleichgewichtszustand sind lediglich die Vorspannkräfte verantwortlich. Je nach Anzahl der Knotenpunkte und der damit verbundenen Anzahl der Ecken der beiden Polygonebenen variiert der beschriebene Rotationswinkel [Peters, 1998, S.34ff.], [Pellegrino, 1986, S.409ff.].

Die Tensegrity-Elemente werden durch die Vorspannung der Diagonalseile in einen stabilen Zustand versetzt. Die Besonderheit eines Twist-Elements liegt in dem Kurzschluss aller Vorspannkräfte im System. Diese Systemeigenschaft wird als selbstverankert oder kurzgeschlossen bezeichnet und hat zur Folge, dass ein Twist-Element in der Theorie jede beliebige Lage im Raum einnehmen kann und trotzdem als in sich stabil anzusehen ist. In der praktischen Umsetzung ist mindestens die Lagesicherung, und damit eine Festhaltung der Struktur vorzusehen. Es existieren aber auch Tensegrity-Konfigurationen, die nicht vollständig geschlossen sind. Innerhalb dieser Tensegrity-Strukturen können Kräfte nicht vollständig kurzgeschlossen werden, sie werden daher als rückveranker-



2-29 Modellbau eines dreieckförmigen Tensegrity-Twist-Elements.

te oder offene Systeme bezeichnet. Diese Systeme bedürfen daher einer Lagerung und einer Ableitung der Kräfte in den Baugrund um das notwendige Gleichgewicht zu erreichen [Lindenberg, 2017, S. 7]

Lastabtrag

Unter symmetrischen vertikalen Lasten reagiert das Twist-Element mit einer Rotation und einer Translation des oberen Polygons. Mit zunehmender Vertikalbelastung verringert sich die Verformungszunahme, folglich nimmt die Steifigkeit des Systems zu [Peters, 1998, S.42ff.]. Unter unsymmetrischen vertikalen Lasten zeichnet sich ein ähnliches Tragverhalten ab. Das Twist-Element reagiert ebenfalls mit einer Rotation und einer Translation, allerdings erfolgt die Translation maßgeblich an den belasteten Knoten. Auch in diesem Fall ist eine Versteifung unter Laststeigerung festzustellen [Peters, 1998, S.48ff.]. Wird das Grundelement durch eine gleichmäßige horizontale Last beansprucht, so hat diese Belastung relativ schnell einen Seilausfall zur Folge. Der Zeitpunkt des Ausfalls ist dabei von der Wirkungsrichtung der Horizontallast abhängig. Unabhängig davon ist aber grundsätzlich festzuhalten, dass der Seilausfall einen Abfall der Steifigkeit mit sich bringt, und somit Horizontallasten gegenüber Vertikallasten für die Elemente wesentlich ungeeigneter sind [Peters, 1998, S.53ff.]. Das erklärt beispielsweise die zusätzlich notwendige Steifigkeit bei der Konstruktion des Warnow-Towers (siehe Abschnitt 2.1.3), da dort der maßgebliche Lastfall infolge horizontaler Windeinwirkung berücksichtigt werden muss.

Erfährt ein dreieckförmiges Twist-Element eine gleichmäßige Torsionsbeanspruchung kommt es zu einer Rotation des oberen Polygons. Mit dieser Rotation stellt sich zugleich eine Vertikalverschiebung ein, damit ähnelt die Reaktion des Systems infolge Torsion im Grunde dem Strukturverhalten bei gleichmäßigen vertikalen Belastungen [Peters, 1998, S.59ff.].

Die gleichförmige Verdrehung infolge symmetrischer Lastfälle liegt vor allem an der Vorspannung des Twist-Elements. Dabei führt die gleichmäßige Vorspannung der Diagonalseile einerseits zu einer reinen Normalkraftbeanspruchung in Stäben und Seilen. Andererseits sorgt der Vorspannzustand für eine gleichmäßige Verteilung der Beanspruchungen des Twist Elements [Wolkowicz, 2009, S.73ff.]. Durch äußere Einwirkungen werden die Normalkräfte in den Seilen und Stäben gegenüber dem Vorspannzustand entsprechend gleichmäßig verändert.

Global gesehen ist folglich festzustellen, dass sich ein Tensegrity-Twist-Element unter äußeren vertikalen Belastungen versteift. Werden die einzelnen Elemente lokal betrachtet, so müssen die Stabelemente so dimensioniert werden, dass unter äußeren Einwirkungen eine Knickgefährdung auszuschließen ist [Meeß-Olsohn, 2004, S.7]. Darüber hinaus muss auch die Art der Lasteinleitung berücksichtigt werden, diese können unter Umständen auch zu lokaler Biegung der Druckelemente führen. Da die Biegesteifigkeiten der verhältnismäßig kurzen Druckelemente allerdings im Vergleich zu den lokal auftretenden äußeren Lasten (z.B. Wind) ver-

hältnismäßig groß sind und die Kopplungen der verschiedenen Elemente ursprünglicher Weise keine Übertragung der Momente zulassen, können diese grundlegend als vernachlässigbar angesehen werden [Lindenberg, 2017, S.6].

Steifigkeit

Da Tensegrity-Strukturen zu den formaktiven Tragwerken zählen, kann die Steifigkeit in zwei Anteile aufgeteilt werden. Der erste Anteil ist die elastische Steifigkeit, die von dem verwendeten Material der Zug- und Druckelemente abhängig ist. Die elastische Steifigkeit wirkt der elastischen Dehnung entgegen. Der zweite Anteil wird als geometrische Steifigkeit bezeichnet und ist von der Systemgeometrie und der Vorspannung abhängig. Eine Änderung der Systemgeometrie bewirkt damit eine Änderung der geometrischen Steifigkeit. Tensegrity-Strukturen weisen die Fähigkeit auf, Einwirkungen durch Geometrieänderung zu kompensieren. Durch die Geometrieänderung steigt der geometrische Widerstand der Strukturen. Das ist der Grund, warum Twist-Elemente bei Belastungszunahme einen erhöhten Verformungswiderstand aufweisen. Der Anteil der geometrischen Steifigkeit kann daher in Abhängigkeit der Einwirkung nicht linear verlaufen. Eine weitere Einflussgröße auf die geometrische Steifigkeit ist die aufgebrachte Vorspannung. Die vorgespannten Elemente wirken der kinematischen Bewegung durch zusätzliche Belastungen entgegen [Wolkowicz, 2008, S.73f.]. Darüber hinaus können die Steifigkeiten in einem Tensegrity-System auch in lokal und global wirkende Steifigkeiten aufgeteilt werden. Lokale elastische und geometrische Steifigkeit erhält ein Element aufgrund seiner Materialität und seiner relativen Bewegung in Bezug auf angrenzende Elemente. Die globale Steifigkeit hängt von der Konfiguration und den Eigenschaften des Gesamtsystems ab [Lindenberg, 2017, S.9]. Die Betrachtung lokaler Steifigkeiten ist sinnvoll, wenn einzelne Bereiche oder Elemente der Gesamtstruktur im Fokus stehen. Doch auch wenn nur einzelne Elemente direkt belastet werden, muss immer die globale Struktur und damit auch die globale Steifigkeit mit beachtet werden, da jede lokale Belastung eine globale Auswirkung zur Folge hat.

2.2.3 Vor- und Nachteile

Die aufgezeigten Eigenschaften und Merkmale von Tensegrity-Elementen ergeben in dem Umgang mit den Strukturen einige Vor- und Nachteile, die in dem folgenden Abschnitt aufgeführt und diskutiert werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Verwendung und Eignung der Strukturen im Bauwesen, da diesen insbesondere dort ein eher dekorativer Charakter nachgesagt wird [Paronesso, 2003, S.8].

Ein wesentlicher Vorteil der Tensegrity-Strukturen ist ihre strukturelle Effizienz und die damit verbundene Leichtigkeit. Die Leichtigkeit der Strukturen ist nicht nur ein struktureller Vorteil, sondern auch maßgeblich eine gestalterische Eigenschaft. Tensegrity-Strukturen bestehen aus sehr dünnen linearen Elementen, die im Wesentlichen nur durch Zug- oder Druckkräfte beansprucht werden [Skelton, 2009, S.14ff.]. Auch die Unterscheidung in reine Zug- oder Druckelemente unterstreicht diese Leichtigkeit und den Effizienzgedanken [Skelton, 2001]. Durch die Vorspannung wird zudem sichergestellt, dass sich alle Tragwerkselemente weitgehend gleichmäßig am Lastabtrag beteiligen. Dadurch erhalten die Tensegrity-Strukturen eine relativ große Steifigkeit in Bezug auf ihre Leichtigkeit [Wolkowicz, 2009, S.73ff.]. Auch diese Eigenschaft kann als sehr effizient angesehen werden, da es nicht zu massiven lokalen Lastkonzentrationen kommt. Weiter liegen durch die Konfiguration der Tensegrity-Strukturen wesentlich mehr Zugelemente als lokal stabilitätsgefährdete Druckelemente in dem System vor [Paronesso, 2003, S.7].

Allerdings ist im Bauwesen nicht nur die Effizienz der Tensegrity-Strukturen als Vorteil zu nennen. Dadurch, dass Tensegrity-Strukturen infolge Belastung mit verhältnismäßig großen Verformungen reagieren, stellen sich entsprechen kurze Lastpfade ein. Eng verbunden mit dem Verformungsvermögen ist damit auch die Zunahme der geometrischen Steifigkeit der Tensegrity-Strukturen. Durch das Einstellen der Strukturen in Bezug auf einwirkende Belastungen steigt die geometrische Steifigkeit an. Das kann dann zu einem verhältnismäßig hohen Lastniveau der Strukturen führen [Bansod, 2014]. Grundsätzlich ist die lastabhängige Zunahme der geometrischen Steifigkeit eine wertvolle Eigenschaft der Strukturen.

Das kontrollierbare Verformungsvermögen kann als besondere positive Eigenschaft verstanden werden. Sind Tragwerke einer dynamischen oder kinematischen Beanspruchung (z.B. Einwirkungen infolge Erdbeben) ausgesetzt, so kann ein entsprechendes Verformungsvermögen das System vor zusätzlichen Zwangsbeanspruchungen und damit vor Überlastung schützen [Skelton, 2009, S.14ff.].

Ebenfalls als Vorteil kann die Wandelbarkeit der Tensegrity-Strukturen angesehen werden. Mit diesem Aspekt der Tensegrity-Strukturen befasst sich vorwiegend die Weltraumforschung [Tibert, 2002].

Allerdings bringen die kinematischen Eigenschaften der Tensegrity-Strukturen auch gewisse Nachteile mit sich. Damit verbunden sind auch

entsprechend große Verformungen, die im klassischen Bauwesen eher unerwünscht sind [Bansod, 2014].

Darüber hinaus ist die Berechnung von Tensegrity-Strukturen durch ihre lastabhängigen Gleichgewichtszustände durchaus aufwendig, da diese Tragwerke mit nicht linearen Theorien berechnet werden können [Motro, 2011, S.6f.]. Damit verbunden ist eine größere Fehleranfälligkeit der Berechnungen, da diese wesentlich komplexer sind als nahezu starre Tragwerke [Bansod, 2014].

Ein weiterer Nachteil ist die notwendige Präzision in Fertigung und Montage der Tensegrity-Strukturen [Wolkowicz, 2008, S.16]. Einerseits müssen die einzelnen Tragwerkselemente sehr genau gefertigt werden, da schon kleine Abweichungen enorme Auswirkungen auf das Vorspannungsniveau haben können. Minimale Längenänderungen einzelner Elemente können zu unkontrollierten Beanspruchungen der anderen Tragwerkselemente führen. Zum anderen muss die Vorspannung selbst sehr genau aufgebracht werden, da diese maßgeblich den Gleichgewichtszustand der Struktur definiert [Kawaguchi, 2017].

Der instabile Bauzustand ist ein weiterer Nachteil der an dieser Stelle zu nennen ist. Erst mit dem Einbringen der notwendigen Vorspannung und dem Schließen des Gesamtsystems findet eine Tensegrity-Struktur ihr Gleichgewicht [Zhang, 2015, S.6].

Darüber hinaus fehlt den Tensegrity-Strukturen, zu begründen durch die reine Linearität der konstruktiven Elemente, die Möglichkeit geschlossene Räume auszubilden. Damit entfällt ebenfalls eine entsprechende Schutzfunktion, beziehungsweise eine breitere Anwendungsmöglichkeit des Prinzips [Shigematsu, 2008, S.1], [Meeß-Olsohn, 2002].

Die beschriebenen Vorteile zeigen ein mögliches Spektrum des strukturellen und gestalterischen Potentials des Tensegrity-Prinzips, die aufgelisteten Nachteile können dahingehend als Begründungen für den bisher sehr geringen Einsatz der Strukturen angesehen werden.

2.3 Definition von Tensegrity-Strukturen

In den vorherigen Abschnitten wurden die Entwicklung der Tensegrity-Strukturen, sowie markante Eigenschaften und Charakteristika vorgestellt. Ebenfalls wurden Vor- und Nachteile der Strukturen erläutert. Der aktuelle Abschnitt baut auf den bereits erarbeiteten Erkenntnissen auf. In der Literatur verschiedenster Wissenschaftsbereiche finden sich, über die vergangenen 70 Jahre, zahlreiche Deutungen und Erläuterungen über Tensegrity-Strukturen. Dabei handelt es sich maßgeblich um teilweise unterschiedliche Verständnisse der Systemaufbauten und Definitionen besonderer Systemeigenschaften. Nachfolgend wird eine kritische Auseinandersetzung mit entsprechenden Texten aus dem ingenieurmäßigen Kontext vorgenommen, um somit anschließend eine für das aktuelle Bauwesen geeignete Definition von Tensegrity-Strukturen vornehmen zu können. Diese Definition dient dem weiteren Verständnis des Tensegrity-Begriffs und einer Basis für eine Einordnung der gebauten Projekte.

2.3.1 Definitionen der ersten Periode

Richard Buckminster Fuller definiert Tensegrity als „*structural relationship in which structural shape is guaranteed by the finitely closed, comprehensively continuous tensional behaviors of the system and not by the discontinuous and exclusively local compression behaviors*“ [Fuller, 1975, S.700.011]. Eine Tensegrity-Struktur stellt für Richard Buckminster Fuller nicht nur ein Tragwerkstyp dar, sondern ein strukturelles Prinzip. Für ihn ist das übergeordnete, geschlossene und kontinuierliche Zugsystem der ausschlaggebende Aspekt für die Gleichgewichtsfindung, nicht die lokalen, diskontinuierlich vorliegenden Druckelemente.

David Georges Emmerich gibt in seinem ersten Patent keine explizite Definition des Begriffs der Tensegrity-Strukturen an, allerdings nimmt er eine sehr detaillierte Zusammenfassung der Eigenschaften seiner *Construction de réseaux autotendants* vor. David Georges Emmerich beschreibt das kontinuierliche Zugsystem und die damit verbundene Gleichgewichtsfindung der Systeme als besondere Eigenschaft. In Bezug auf die Druckelemente geht er sogar noch über die Aussage von Richard Buckminster Fuller hinaus: Druckelemente können im Kontakt stehen, Druckelemente können teilweise im Kontakt stehen oder Druckelemente können kontaktfrei vorliegen. Die Anordnung der Druckelemente wird durch den Systemaufbau und die zugehörige Gleichgewichtsfindung bestimmt [Emmerich, 1963].

Kenneth Snelson definiert Tensegrity-Strukturen als „[...] *a novel and improved structure of elongate members which are separately placed either in tension or in compression to form a lattice, the compression members being separated from each other and the tension members being interconnected to form a continuous tension network.*“ [Snelson, 1965, S.1] Im Gegensatz zu David Georges Emmerich und Richard Buckminster Fuller beschreibt er damit die diskontinuierliche Anordnung der Druckelemente in Tensegrity-Strukturen als notwendige Eigenschaft.

Bei dem Vergleich der ersten drei Definitionen zeigt sich, dass für Richard Buckminster Fuller und David Georges Emmerich das strukturelle Prinzip von Tensegrity-Strukturen im Vordergrund steht. Das übergeordnete, die Struktur im Gleichgewicht haltende Zugsystem ist ein wesentlicher Aspekt, den beide ansprechen. Ihrer Auffassung nach, geht es maßgeblich um die Effizienz der Strukturen, die Diskontinuität der Druckelemente nimmt dabei nur eine untergeordnete Bedeutung ein. Für Richard Buckminster Fuller zeichnet sich die Effizienz dabei vorrangig in einer Materialersparnis der Gesamtstruktur aus, wie auch schon bei seinen früheren Dymaxion-Projekten. David Georges Emmerich betrachtet die Effizienz der Tensegrity-Strukturen weitaus ingenieurmäßiger, sein Grundgedanke lag in der Reduzierung der Druckelementlängen, um die lokale Stabilität zu erhöhen. Im Gegensatz dazu legt Kenneth Snelson besonderen Wert auf die visuelle Trennung der Elemente als Gestaltungsmerkmal und maßgeblich auf die Diskontinuität der Druckelemente. Für ihn steht vor allem die faszinierende darstellerische Kraft der Tensegrity-Strukturen im Vordergrund, was beispielsweise durch nahezu schwebende Druckelemente unterstrichen wird, und nicht die Verwendung der Strukturen als effizientes Tragwerk [Meeß-Olsohn, 2004, S.20]. Im Grunde zeigt sich bereits in der ersten Periode, dass erst das Zusammenwirken der strukturelle Effizienz und der klaren Gestaltung eine vollständige und in sich schlüssige Tensegrity-Struktur ergeben.

2.3.2 Definitionen der zweiten Periode

Während die verschiedenen Definitionen der ersten Periode einen maßgeblich beschreibenden Anteil jeweils eines wesentlichen Kerngedankens des Tensegrity-Prinzips beinhalten, wurde bei den Definitionen in der zweiten Periode versucht, eine klare Abgrenzung von anderen tragenden Strukturen vorzunehmen, und die speziellen Eigenschaften der ersten Tensegrity-Strukturen hervorzuheben.

Anthony Pugh definiert Tensegrity-Strukturen wie folgt: *„A tensegrity system is established when a set of discontinuous compressive components interacts with a set of continuous tensile components to define a stable volume in space.”* [Pugh, 1976, S.3] Damit folgt er erst einmal den vorherigen Definitionen und erweitert diese um die Räumlichkeit von Tensegrity-Strukturen. Zudem benennt er die Besonderheit der Interaktion von diskontinuierlichen Druck- und kontinuierlichen Zugelementen. Die Diskontinuität der Druckelemente macht ein kontinuierliches Zugsystem erforderlich, wodurch wiederum ein stabiles Gleichgewicht ermöglicht wird. Das kontinuierliche, stabilisierende Zugsystem wiederum ist nach Auffassung von Anthony Pugh der wesentliche Aspekt der tensional integrity Strukturen [Pugh, 1976, S.4]. Damit unterstreicht er einerseits das strukturelle Verständnis des Tensegrity-Prinzips, andererseits stellt er die systembedingte Besonderheit der Tensegrity-Strukturen mit seiner Definition noch einmal in den Vordergrund.

Ariel Hanaor beschreibt die Tensegrity-Strukturen als: *„internally prestressed, free-standing pin-jointed networks, in which the cables or ten-*

dons are tensioned against a system of bars or struts." [Hanaor, 1994, S. 227]. Ähnlich wie Anthony Pugh beschreibt Ariel Hanaor damit unter anderem die notwendige Interaktion der Zug- und Druckelemente, unterlässt allerdings eine Unterscheidung von Kontinuität und Diskontinuität. Darüber hinaus führt er den Aspekt der inneren Vorspannung ein [Hanaor, 1992]. Obwohl in der vorherigen Definition bereits von zugstabilisierten Gleichgewichten gesprochen wird, wurde der Begriff bisher noch nicht in diesem Kontext verwendet. Auch die Beschreibung *free-standing pin-jointed networks* wurde bisher noch nicht verwendet. *Free-standing* bezeichnet dabei die Fähigkeit geschlossener Tensegrity-Strukturen, sich unabhängig von ihrer Lage im Raum in einem stabilen Gleichgewichtszustand zu befinden. Dieser Aspekt ist für das Verständnis der Gleichgewichtsfiguren von Tensegrity-Strukturen wichtig, für eine bauliche Umsetzung allerdings nur von geringer Bedeutung, da gebaute Strukturen aus Sicherheitsgründen grundsätzlich einer Lagesicherung bedürfen. *Pin-jointed* bezeichnet die Art und Weise wie die Elemente statisch miteinander gekoppelt werden [Hanaor, 1994]. Dieser Punkt wurde in bisherigen Definitionen nicht klar benannt, ist aber durchaus in gleicher Art und Weise in Zeichnungen vorangegangener Quellen zu erkennen (siehe Abschnitt 2.1.1). Eine biegesteife Kopplung der Elemente ist nicht sinnvoll, da sie das notwendige Verformungsvermögen stark einschränken würde. Außerdem sind die verwendeten Zugelemente in der Regel biegeweich oder sogar biegeschlaff, womit generell nur ein Übertrag von Normalkräften an den Knotenpunkten möglich ist.

Tony Robbin definiert die Tensegrity-Strukturen als pure Darstellung des Prinzips der Auflösung eines Tragwerks in Druck- und Zugelemente. Wobei ausnahmslos Druck- oder Zugkräfte vorherrschen und ein Beanspruchungswechsel in einem Element ausgeschlossen ist. Darüber hinaus definiert er die Tensegrity-Strukturen als geschlossene Systeme, deren Zugkräfte innerhalb der Strukturen kurzgeschlossen sind. Weiter beschreibt er berührungslose Druckelemente, die in einer geringen Anzahl in einem Netz aus reinen Zugelementen vorliegen [Robbin, 1996, S.25]. Durch seine Definition vereint er die strukturellen Besonderheiten von Tensegrity-Strukturen sowie das gestalterische Potential, welches durch die Visualisierung der Kräfte, die Tensegrity-Strukturen innewohnen, hervorgehoben wird.

Robert Connelly und Allen Back beschreiben Tensegrity-Strukturen, im Vergleich zu den zuvor aufgeführten Definitionen, mit einer gewissen mathematischen Nüchternheit, als eine Konfiguration von Punkten, deren Abstände durch definierte Randbedingung vorgegeben werden: *„Putting aside the physical details of the construction, every tensegrity can be modeled mathematically as a configuration of points, or vertices, satisfying simple distance constraints.*“ [Connelly, 1998, S.142]. Für eine bauliche Umsetzung erscheint diese Definitionen zuerst wenig hilfreich, allerdings ist gerade diese detaillierte mathematische Beschreibung dafür verantwortlich, dass heutige Programmlösungen zur Verfügung stehen, um die Strukturen berechnen zu können. Außerdem definieren sie damit

indirekt die Bedeutung der Eigenschaften der Elemente zueinander. Nur durch annähernd drucksteife Stäbe und, im Verhältnis dazu, elastischen Seilen ist eine Tensegrity-Struktur überhaupt in der Lage ihren Gleichgewichtszustand zu finden.

Robert William Burkhardt Jr. beschreibt in seinem Buch *A Practical Guide to Design Tensegrity*, dass sich Tensegrity-Strukturen durch die Verteilung der Kräfte in sich selbst auszeichnen. Die Zugelemente formen ein kontinuierliches Netzwerk und verteilen die Kräfte innerhalb der ganzen Struktur, während die Druckelemente die Kräfte über kurze Strecken transportieren und somit sehr schlank ausgebildet werden können, ohne zu knicken [Burkhardt, 2008, S.29]. Zum einen definiert er damit, dass Druckelemente nicht explizit berührungslos vorliegen müssen, zum anderen beschreibt er als wesentliche Funktion der Druckelemente, die lokale Umlenkung der Zugkräfte des Gesamtsystems. Darüber hinaus erläutert er, dass die Stabilität einer Tensegrity-Struktur durch das kontinuierliche Zugsystem sichergestellt wird und dieses Teil des Primärtragsystems sein sollte. Weiter beschreibt Robert William Burkhardt Jr. den Einsatz von leichten, hocheffizienten, zugbeanspruchten Materialien als klaren Tensegrity-Vorteil. Auch die Möglichkeit der Vorspannung ist seiner Meinung nach ein wesentlicher Punkt der Tensegrity-Strukturen. [Burkhardt, 2011]

Während unter anderem Anthony Pugh und Ariel Hanaor die Definitionen der ersten Periode von David Georges Emmerich und Richard Buckminster Fuller, im maßgeblich strukturellen Kontext erweitern, beziehungsweise detaillieren, geht Tony Robbin auch auf das gestalterische Potenzial der Tensegrity-Strukturen ein, welches bereits von Kenneth Snelson beschrieben wurde. Dabei gelingt es Tony Robbin erstmals das strukturelle und das gestalterische Potenzial der Tensegrity-Strukturen in seiner Beschreibung miteinander zu verknüpfen und die beiden Aspekte nicht isoliert voneinander zu betrachten.

2.3.3 Definitionen der dritten Periode

In der dritten Periode existiert eine Vielzahl an Quellen, die Tensegrity-Strukturen mehr oder weniger definieren. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden für die Erarbeitung einer eigenen Definition von Tensegrity-Strukturen nur Quellen herangezogen, die in der Hauptsache mit der baulichen Umsetzung der Strukturen im Kontext stehen oder die Strukturen aus dem architektonisch-ingenieurmäßigen Kontext betrachten. Auch wird bei der Auswahl der Quellen darauf geachtet, dass sich diese nicht ausschließlich auf bereits genannte Primärquellen wie beispielsweise von Richard Buckminster Fuller, Kenneth Snelson oder Anthony Pugh beziehen.

René Motro beschreibt Tensegrity als: „*system in a stable self-equilibrated state comprising a discontinuous set of compressed components inside a continuum of tensioned components.*“ [Motro, 2003, S.19] Damit greift er die bereits vorher definierten Eigenschaften von Tensegri-

ty auf. In einer weiteren Veröffentlichung relativiert er allerdings die Notwendigkeit der Diskontinuität von Druckelementen: „*It seems that nowadays a consensus was reached classifying tensegrity structures in several classes: for class I the compressed components are single struts, while class II several struts are contiguous.*” [Motro, 2011, S.5f.].

Diese Aussage wird unter anderem auch von Robert Skelton und Mauricio C. de Oliveira unterstützt, die in ihrem Buch *Tensegrity Systems* von einer Tensegrity-Konfiguration sprechen, die entsteht, sobald eine Anordnung mehrerer Körper von einem kontinuierlichen Zugsystem stabilisiert wird. Dabei ist die Diskontinuität der einzelnen Körper kein Ausschlusskriterium für die Definition einer Tensegrity-Struktur als solche. Vielmehr wird eine Tensegrity-Konfiguration in zwei Klassen eingeteilt: *class I* und *class k* [Skelton, 2009, S.1f.]. Tensegrity-Strukturen der Klasse I definieren sich dadurch, dass die Körper (Druckelemente) untereinander berührungslos vorliegen, diese Strukturen werden auch als reine Tensegrity-Strukturen bezeichnet. Bei Tensegrity-Strukturen der Klasse k treffen an einem Knotenpunkt insgesamt k Druckelemente aufeinander. Übergeordnet ist bei dieser Klasse allerdings ein kontinuierliches Zugsystem erforderlich, damit diese Anordnung der Elemente als Tensegrity-Konfiguration bezeichnet werden kann. Mit ihrer Definition liegen sie relativ nahe an Richard Buckminster Fullers Verständnis von Tensegrity-Strukturen und der Bedeutung der Diskontinuität.

Ebenso definieren Antonio Paronesso und Rinaldo Passera den Kontakt von Druckelementen als einen Evolutionsschritt, der nach Ihrer Meinung für eine baupraktische Umsetzung des Tensegrity-Prinzips notwendig ist. [Paronesso, 2003]

Bin Bing Wang beschreibt Tensegrity-Strukturen als: “*free-standing pin-jointed cable networks in which a connected system of cables are stressed against a disconnected system of struts and extensively, any free-standing pin-jointed cable networks composed of building units that satisfy aforesaid definition.*” [Wang, 2004, S.22]. Zum einen werden auch hier bisherige Definitionen weitestgehend wiederholt, zum anderen spricht B. B. Wang von einem getrennten System aus Druckstäben und nicht von einzelnen getrennten Elementen. Mit dieser Aussage erweitert er die bisherigen Definitionen von Tensegrity-Strukturen. Er relativiert allerdings diese Aussage damit, dass sich der zuerst definierte Teil auf reine Tensegrity-Strukturen bezieht und der zweite Teil eher als erweitertes Konzept zu verstehen ist [Wang, 2004, S.22].

Auch Koryo Miura und Sergio Pellegrino definieren Tensegrity-Strukturen über das stabilisierende übergeordnete Zugsystem. Darüber hinaus benennen sie eine notwendige Vorspannung, die dafür sorgt, dass alle Zuelemente durch Zugkräfte beansprucht werden und zu einer Stabilisierung des Gesamtsystems führt [Tibert, 2002, S.2].

Mike Schlaich, einer der bis dato wenigen Erbauer einer baupraktisch umgesetzten Tensegrity-Struktur, definiert seine Konstruktion, trotz des

vorhandenen Druckstabkontakts, ebenfalls als sogenannten Tensegrity-Turm. Nach seiner Meinung ist der Kontakt der Druckelemente notwendig um der Struktur die erforderliche Steifigkeit zu verleihen. Weiter erhält der Turm durch die definierte Anordnung der Elemente eine visuelle Klarheit, da der Druckstabkontakt nur zwischen einzelnen Etagen des Turms vorliegt. Jede Etage für sich ist als klassisches dreieckiges Twist-Element umgesetzt. Damit bleibt seiner Meinung nach die Ästhetik der Tensegrity-Struktur erhalten und die einzelnen Elemente tragen klar als Tensegrity-Strukturen [Schlaich, 2004, S.2f.]. Wie bereits Tony Robbin, stellt Mike Schlaich mit seinem Bauwerk die Verbindung zwischen strukturellem und gestalterischem Potential dar.

Christian Wolkowicz grenzt den Begriff Tensegrity in seiner Dissertation nach ingenieurtechnischen Aspekten wie folgt ab: Eine Tensegrity-Struktur soll *„selbstverankert sein, sich im Tensegrity-Zustand befinden und Zugkräfte durch Seile und Druckkräfte durch Stäbe abtragen.“* [Wolkowicz, 2008, S.15]. Nach seiner Definition befindet sich eine Struktur im Tensegrity-Zustand *„wenn sie durch Annahme einer speziellen Geometrie, bei unveränderter Topologie, eine unendlich kleine Bewegungsmöglichkeit erhält, welche sich durch die ebenfalls erhaltene Möglichkeit der Vorspannung stabilisieren lässt. Für den Tensegrity-Zustand selbst spielt die Verwendung von Seilen oder Stäben und ob sich diese berühren oder nicht, also keine Rolle.“* [Wolkowicz, 2008, S.28]. Christian Wolkowicz führt mit seiner zweiten Aussage, ähnlich wie Robert William Burkhardt Jr. die Bedeutung der Vorspannbarkeit von Tensegrity-Strukturen zur Stabilisierung an. Bei der Definition des Tensegrity-Zustandes widerspricht er damit allerdings seiner anfangs aufgezeigten Beschreibung des Begriffs Tensegrity, indem er die Verwendung der konstruktiven Elemente in seiner zweiten Aussage revidiert. Dieser Sachverhalt kann aber auch so verstanden werden, dass der von Christian Wolkowicz benannte Tensegrity-Zustand einer Erweiterung des Verständnisses von Tensegrity gleichkommt.

Insbesondere die Beschreibungen und Definitionen der dritten Periode beziehen maßgeblich die bereits gebauten Projekte mit ein, wodurch sich eine Loslösung von den relativ starren Definitionen der zweiten Periode ergibt. Dabei wird in der dritten Periode hervorgehoben, dass die baupraktische Anwendung entsprechende Anpassungen des theoretischen Prinzips erfordert.

2.3.4 Eigene Definition des Tensegrity-Prinzips

Werden die verschiedenen Definitionen und Beschreibungen über Tensegrity-Strukturen miteinander verglichen, so fällt auf, dass mit der baulichen Umsetzung dieser Strukturen auch die Einschränkungen, wie beispielsweise die unabdingbare Diskontinuität der Druckelemente, in den Definitionen abnehmen und das Verständnis mehr zu einem Tensegrity-Prinzip übergeht, als bei einer klaren Beschreibung einer spezifischen Struktur verbleibt. Das vermag zum einen daran liegen, dass sich die frühen Definitionen mit einfachsten geometrischen Einheiten auseinandersetzten und versuchten diese erstmals zu erfassen. Es ist an dieser Stelle aber auch anzumerken, dass sowohl David Georges Emmerich, als auch Richard Buckminster Fuller das Potential des strukturellen Prinzips, von Anfang an, in ihren Entdeckungen gesehen haben. Zum anderen ist auch die spätere wissenschaftlich breite Auseinandersetzung dafür verantwortlich, dass Tensegrity-Strukturen aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden konnten, was dazu führte auch verschiedene Gewichtungen auf unterschiedliche Aspekte zu legen. Folgend werden die Eigenschaften, welche das Tensegrity-Prinzip im Ingenieurwesen definieren zusammengefasst, dargelegt und darüberhinausgehende Diskussionspunkte aufgezeigt. Tensegrity-Strukturen können anhand der folgenden zehn Kriterien definiert werden.

1. Es liegt eine räumliche Interaktion von diskontinuierlich angeordneten, überwiegend lokal vorhandenen Druckelementen und einem übergeordneten System aus Zugelementen vor.
2. Die Stabilisierung der Gesamtstruktur erfolgt in der Hauptsache durch das übergeordnete Zugsystem.
3. Erst die Diskontinuität der Druckelemente schafft die Notwendigkeit eines kontinuierlichen Zugsystems.
4. Trotz ihrer Diskontinuität ist der direkte Kontakt zwischen einzelnen Druckelementen möglich, sofern das übergeordnete Zugsystem maßgebend für die Stabilisierung des Gesamtsystems bleibt.
5. Der Kräftekurzschluss in der Gesamtstruktur ist theoretisch nur bei rotationssymmetrischen oder radialsymmetrischen Systemen möglich und generell wünschenswert. In der baupraktischen Umsetzung von Tensegrity-Strukturen muss allerdings eine Lagesicherung vorgesehen werden. Durch diesen Aspekt kann der Kräftekurzschluss zumindest in den Lagerungsbereichen nicht oder nur bedingt realisiert werden.
6. Die Formfindung des Systems erfolgt durch eine gleichmäßige Kräfteverteilung im Gesamtsystem und wird erst durch Vorspannung einzelner Zugelemente und einem grundlegenden Verformungsvermögen ermöglicht.

7. Die spezifische und grundlegend unveränderbare Beanspruchung der konstruktiven Elemente ist strukturell eine Besonderheit der Tensegrity-Strukturen. Strukturell werden verschiedene Lastzustände durch neue Gleichgewichtszustände aufgenommen
8. Gestalterisch werden die vorliegenden Kräfte durch die unterschiedliche Ausbildung der konstruktiven Elemente visualisiert und erst damit wird das strukturelle Prinzip der Konstruktionen dargestellt.
9. Besonders die Verwendung von hocheffizienten leichten Zugelernen verleiht den Tensegrity-Strukturen eine spürbare Leichtigkeit. Die überwiegend lokal vorliegenden Druckelemente scheinen durch die Leichtigkeit des übergeordneten Zugsystems nahezu schwerelos.
10. Ein ästhetisches Merkmal von Tensegrity-Strukturen sind die lokal sichtbaren räumlichen Knotengleichgewichte. Diese bestechen durch die markante Umlenkung der Zugkräfte an den Druckelementen und verleihen den Tensegrity-Strukturen durch ihr regelmäßiges Auftreten ein visuelles Merkmal.

2.4 Klassifizierung von Tensegrity-Strukturen

Der Abschnitt widmet sich der Klassifizierung von gebauten Tensegrity-Strukturen, anhand der vorher festgelegten Definition, beziehungsweise der zehn aufgelisteten Kriterien, die als Basis einer eigenen Definition des Tensegrity-Prinzips herangezogen wurden. Darüber hinaus werden bereits vorgenommene Ansätze zur Einordnung von Tensegrity-Strukturen aus der Literatur aufgearbeitet und mit dem aktuellen Kenntnisstand verglichen. Die nachfolgenden Ansätze aus der Literatur werden explizit von den Definitionen abgegrenzt, da sie sich ausschließlich mit der Einordnung der Tensegrity-Strukturen in den Kontext des Tensegrity-Prinzips auseinandersetzen und sich damit von einer reinen Beschreibung abgrenzen. Da die Geiger-Domes (siehe Abschnitt 2.1.3) eine Sonderrolle im Kontext des Tensegrity-Prinzips einnehmen, werden diese im nachfolgenden Teil noch einmal gesondert diskutiert, um auch diese Strukturen besser in Relation zu anderen Projekten einordnen zu können.

2.4.1 Ansätze aus der Literatur

Eine der nachweislich ersten Klassifikationen von Tensegrity-Tragwerken nahm Gernot Minke 1972 vor. Er definierte drei verschiedene Strukturmerkmale, die er als Klassifizierungsmerkmale für Tensegrity-Strukturen verwendete. Als erstes Merkmal wird die Lage der Druckelemente angeführt, bei welcher zwischen einer ebenengleichen Druckelementlage, der sogenannten Normallage (N) und einer nicht ebenengleichen Druckelementlage, der Twistlage (T) zu differenzieren ist. Das zweite Merkmal ist die Verankerung der Vorspannkkräfte. Bei diesem Merkmal kann nach Gernot Minke zwischen sogenannten offenen Systemen (o) und geschlossenen Systemen (g) unterschieden werden. Die Vorspannkkräfte offener Systeme werden extern verankert, die Vorspannkkräfte von geschlossenen Systemen dagegen werden durch einen Kräftekurzschluss in den Strukturen selbst verankert. Das dritte Merkmal ist die Tragwirkung und der zugehörige Lastabtrag der Strukturen. Gernot Minke unterscheidet dabei zwischen einem ein-, zwei- und einem dreidimensionalen Lastabtrag, also einer linearen (1), flächigen (2) oder räumlichen (3) Tragwirkung. Aus diesen drei Merkmalen formulierte Gernot Minke zwölf mögliche Konfigurationen von Tensegrity-Tragwerken.

		Normallage		Twistlage	
		offen	geschlossen	offen	geschlossen
Dimension	1	1No	1Ng	1To	1Tg
	2	2No	2Ng	2To	2Tg
	3	3No	3Ng	3To	3Tg

2-30 Klassifikation von Tensegrity-Tragwerken nach Gernot Minke

Eine anschließende Untersuchung der definierten Konfigurationen ließ Gernot Minke zu dem Schluss kommen, dass es sich bei den beiden eindimensionalen offenen Systemen 1No und 1To eher um klassische Seiltragwerke, wie beispielsweise Seilbinder, als um Tensegrity-Systeme handelt, und diese Konfigurationen somit von den Tensegrity-Strukturen auszuschließen sind (in Bild 2-30 rot eingefärbt). Die Konfigurationen 1Ng und 2Ng können eingeschränkt als Tensegrity-Strukturen eingeordnet werden. Sie besitzen aber eine geringe Effizienz gegenüber den offenen Systemen, da sie wesentlich materialaufwendiger sind und mehr Knotenpunkte aufweisen. Deshalb sind sie in der baupraktischen Umsetzung nur bedingt brauchbar. Eine geringe Effizienz ist auch bei Strukturen der Konfiguration 3Ng zu verzeichnen. Gegenüber den zuvor ge-

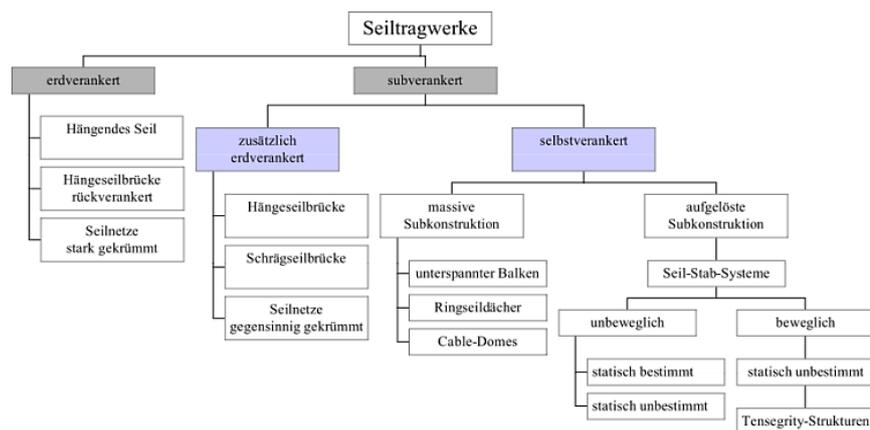
nannten Konfigurationen sind für diese, aufgrund der räumlichen Tragwirkung, durchaus sinnvolle Anwendungen denkbar. Die Systeme 2No und 2To können nach Gernot Minke auch als Tensegrity-Strukturen bezeichnet werden, es handelt sich um Konfigurationen wie beispielsweise den Aspension Dome von Richard Buckminster Fuller. Die dreidimensionalen offenen Konfigurationen 3No und 3To sind eher als Mischkonstruktionen aus Raumseilnetzen mit anteiligen Tensegrity-Elementen zu verstehen, weshalb sie nur eingeschränkt zu den Tensegrity-Strukturen zählen. Auch als Tensegrity-Systeme sind zweifelsfrei die geschlossenen Konfigurationen mit Twistlage der Druckelemente zu verstehen. Durch lineare, flächige oder räumliche Addition einzelner Twist Elemente sind entsprechende geschlossene Systeme möglich [Minke, 1972]. Das bedeutet von den zwölf möglichen Konfigurationen für Tensegrity-Systeme bleiben nach Untersuchung durch Gernot Minke nur sechs Systemtypen über, die als Tensegrity klassifiziert werden (in Bild 2-30 grün eingefärbt).

Aufbauend auf der Arbeit von Gernot Minke, nahm auch Stefan Peters in seiner Diplomarbeit eine Klassifizierung von Tensegrity-Strukturen vor. Er wählte als ein Klassifizierungsmerkmal ebenfalls die Unterteilung in offene und geschlossene Systeme, differenzierte darüber hinaus allerdings nur zwischen ebenen und räumlichen Konfigurationen. Damit ergeben sich nach Stefan Peters zunächst vier verschiedene Klassen von Tensegrity-Strukturen. Eine nähere Untersuchung der einzelnen Klassen schließt die ebenen geschlossenen Systeme als echte Tensegrity aus, da bei diesen Druckstabkontakt besteht [Peters, 1998]. In Bezug auf die übrigen drei Klassen kommt Stefan Peters auf ähnliche Ergebnisse wie Gernot Minke.

Lars Meeß-Olsohn unterteilt in seiner Dissertation die Strukturen in Tensegrity Konstruktionen und Tensegrity-ähnliche Konstruktionen. Als Tensegrity Konstruktionen *„werden räumliche, statisch in sich geschlossene Fachwerke bezeichnet, deren Stabelemente ausschließlich durch Normalkräfte beansprucht werden. Die diskontinuierlichen, nichthierarchischen Druckelemente sind räumlich überlagert und werden an ihren Enden durch ein kontinuierliches System von linearen Zugelementen vorgespannt und in ihrer Lage fixiert. [...] Der Begriff Tensegrity-ähnliche Konstruktionen wird im Verlauf der Abgrenzung für all die Tragwerke verwendet, die zwar einige, aber nicht alle der oben aufgeführten Merkmale der Tensegrity-Konstruktionen in sich vereinigen“* [Meeß-Olsohn, 2004, S.9] Mit dieser Einordnung grenzt Lars Meeß-Olsohn zum einen die reinen Tensegrity-Konstruktionen sehr stark ein. Zum anderen behält er aber mit seiner Differenzierung gegenüber Tensegrity-ähnlichen Konstruktionen die Möglichkeit auch Tragwerke einzuordnen, die nur in Teilen dem Tensegrity-Prinzip folgen. Inwiefern eine solch strikte Trennung für baupraktische Anwendungen sinnvoll erscheint, wird nachfolgend diskutiert. Für die Zuordnung verschiedener Konfigurationen von Tensegrity-Strukturen hat sich Lars Meeß-Olsohn an der Arbeit von Gernot Minke orientiert. Nur die dreidimensionalen geschlossenen Tensegrity-Strukturen in Twistlage ordnet Lars Meeß-Olsohn den reinen Tensegrity-Konstruktionen zu. Dar-

über hinaus klassifiziert er auch alle möglichen Formen addierter Twist-Elemente zu den Tensegrity-Konstruktionen. Alle weiteren Konfigurationen werden von ihm als Tensegrity-ähnliche Konstruktionen eingeordnet [Meeß-Olsohn, 2004, S.9ff.].

Einen anderen Ansatz der Einordnung von Tensegrity-Strukturen stellte Christian Wolkowicz 2008 auf. Die Klassifizierung von Christian Wolkowicz beginnt mit der Einordnung der Strukturen in die Gruppe der Seiltragwerke. Dazu unterteilt er die Seiltragwerke in erd- und subverankerte Systeme. Die erdverankerten Systeme sind Tragwerke, die ihre Seilkräfte über feste Auflager im Baugrund verankern. Das entspricht den vorher als offen oder rückverankert bezeichneten Systemen. Bei den subverankerten Systemen werden die Seilkräfte durch eine Subkonstruktion aufgenommen, welche wiederum weiter in *zusätzlich erdverankerte Systeme* und *selbstverankerte Systeme* zu unterteilen ist. Die selbstverankerten Systeme wurden vorher auch als geschlossene Systeme bezeichnet. Bei den selbstverankerten Systemen benennt er zwei weitere Untergruppen, erstens die selbstverankerten Systeme mit massiven Subkonstruktionen und zweitens die selbstverankerten Systeme mit aufgelösten Subkonstruktionen, sogenannte *Seil-Stab-Systeme*. Diese werden dann weiter unterteilt in unbeweglich und beweglich, wobei er die Tensegrity-Strukturen den beweglichen Systemen zuordnet. Mit der Beweglichkeit wird das für Tensegrity-Strukturen notwendige Verformungsvermögen bezeichnet [Wolkowicz, 2008, S.17ff.]. Christian Wolkowicz klassifiziert die Tensegrity-Strukturen damit nach der Verankerungsart der Seilkräfte. In Bild 2-31 ist die beschriebene Unterteilung der Seiltragwerke nach Christian Wolkowicz, sowie die Einordnung der Tensegrity-Strukturen in diese Gruppe abgebildet.



2-31 Klassifikation von Tensegrity-Tragwerken nach Christian Wolkowicz

Zusammenfassung

Gernot Minke, Stefan Peters und Christian Wolkowicz klassifizieren die Tensegrity-Strukturen unter anderem anhand der Verankerung der Seilkräfte. Bei der Einordnung der klassischen Twist-Elemente sind sie sich einig, diese als echte Tensegrity-Strukturen zu bezeichnen. Stefan Peters bezeichnet darüber hinaus ebene offene Systeme auch als Tensegrity-

Strukturen, da diese ohne Druckstabkontakt auskommen. Er klassifiziert sie damit anhand der Diskontinuität der Strukturen. Darüber hinaus ordnet er auch Richard Buckminster Fullers Aspension Dome und die Geiger Domes den Tensegrity-Strukturen zu.

Im Gegensatz dazu, klammert Gernot Minke die eindimensionalen offenen Systeme als Tensegrity-Strukturen aus, indem er sie als Seiltragwerke bezeichnet. Den Aspension Dome ordnet Gernot Minke ebenfalls den Tensegrity-Strukturen zu. Die Geiger Domes sind erst nach seiner Arbeit entstanden und tauchen daher nicht auf, es wird aber vermutet, dass er eine ähnliche Zuordnung, aufbauend auf Richard Buckminster Fullers Aspension Dome vorgenommen hätte.

Christian Wolkowicz grenzt die Geiger Domes klar von den Tensegrity-Strukturen ab. Er bezieht damit keine weiteren Tragwerke in die Klasse der Tensegrity-Strukturen ein als Twist-Elemente. Lars Meeß-Olsohns Einordnung kann mit der von Christian Wolkowicz gleichgestellt werden, auch hier werden nur die reinen Twist-Elemente als Tensegrity-Konstruktionen klassifiziert, alle weiteren Systeme werden als Tensegrity-ähnliche Konstruktionen klassifiziert. Im Grunde führt diese Einordnung zu dem folgenden Problem: nach Lars Meeß-Olsohn und Christian Wolkowicz handelt es sich nur bei reinen Twist-Elementen um echte Tensegrity-Strukturen. Eine baupraktische Umsetzung dieser Konfigurationen ist allerdings nur bedingt sinnvoll, da wenig sinnvolle Nutzungen durch die entsprechende geometrische Anordnung entstehen.

Den bisher aufgezählten Ansätzen fehlt in der Hauptsache die Auseinandersetzung mit der baupraktischen Umsetzung von Tensegrity-Strukturen, da abgesehen von Kenneth Snelsons Skulpturen, kaum Tensegrity-Strukturen zum Zeitpunkt der Arbeiten realisiert wurden. Für den weiteren Verlauf werden daher folgende Überlegungen mit in die Einordnung der Tensegrity-Strukturen einbezogen. Erstens beziehen sich die bisherigen Ansätze aus der Literatur lediglich auf strukturelle Eigenschaften von Tensegrity-Strukturen, allerdings sollten für eine Umsetzung im Bauwesen auch gestalterische Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Zweitens sind die Ansätze aus der Literatur verhältnismäßig starr definiert, da vor allem die reine Konfiguration verschiedener Elemente berücksichtigt wurde, nicht aber konstruktive Randbedingungen, die für eine Realisierung notwendig sind. Hier sollte ein wesentlich stärkerer Fokus auf die Baubarkeit gelegt werden. Drittens hat die Recherche gebauter Beispiele (siehe Abschnitt 2.1.3) gezeigt, dass auch die Geiger-Domes bestimmte Aspekte der Tensegrity-Strukturen erfüllen und sie teilweise sogar als die ersten anwendungsorientierten nutzbaren Tensegrity-Strukturen bezeichnet wurden. Die Bedeutung dieser Strukturen im Kontext des Tensegrity-Prinzips wurde allerdings nur in begrenztem Umfang in der bisherigen Arbeit diskutiert. In dem folgenden Abschnitt wird daher die Bedeutung der Geiger-Domes zur Diskussion stellt, um im Anschluss eine umfängliche Klassifizierung unter den oben genannten Gesichtspunkten durchführen zu können.

2.4.2 Das Verständnis der Geiger Domes in Bezug auf Tensegrity-Strukturen

Als eine Art Sonderfall in der Entwicklung der Tensegrity-Strukturen wurde über die Zugehörigkeit der Geiger Domes kontrovers diskutiert. Diese Dachtragwerke fanden mit Ende der 1980er Jahre erstmals baupraktisch Anwendung. Bisher haben diese Strukturen zur Erarbeitung einer Definition von Tensegrity-Strukturen keine oder nur geringe Berücksichtigung gefunden, was unter anderem auch darauf zurückzuführen ist, dass die Strukturen erst zum Beginn der dritten Periode entstanden sind. Da es sich allerdings bei den Geiger Domes um frühe reale Bauwerke im Kontext des Tensegrity-Prinzips handelt, werden entsprechende Quellen über die Bedeutung der Geiger-Domes in Bezug auf die Tensegrity-Strukturen nachfolgend untersucht. Damit besteht die Möglichkeit, diese Bauwerke in die nachfolgende Klassifizierung mit aufnehmen zu können.

In seinem Buch *Engineering A New Architecture* vertritt Tony Robbin die Ansicht, dass die Geiger Domes die erste architektonische und funktionale Anwendung von Tensegrity-Strukturen darstellen. Die Strukturen sind seiner Meinung nach eine direkte Weiterentwicklung des Aspension Domes. Tony Robbin begründet seine Aussage anhand der gestalterischen Ähnlichkeit der Geiger Domes zu den weiteren Tensegrity-Strukturen [Robbin, 1996, S.34]. Damit stellt Tony Robbin auch die Gestaltung der Geiger Domes als Merkmal für die Zugehörigkeit zu den Tensegrity-Strukturen in den Vordergrund.

René Motro spricht den Geiger Domes zwar zu, dass sie auf Basis des Tensegrity Prinzips entwickelt wurden, schließt eine Zuordnung zu den Tensegrity-Strukturen allerdings aus. Nach seiner Auffassung steht das Problem der Zuordnung der Geiger Domes zu den Tensegrity-Strukturen darin, dass strukturell zwei unterschiedliche Druckelemente innerhalb des Domes identifiziert werden können. Zum einen können die üblichen lokal angeordneten Druckstäbe, die innerhalb des kontinuierlichen Zugsystems die Zugkräfte umlenken, identifiziert werden und zum anderen weisen die Strukturen einen äußeren geschlossenen Druckring auf. Die Interaktion zwischen einzelnen Druckstäben und Seilen über die gesamte Strukturfläche spricht für die Zuordnung der Geiger Domes zu den Tensegrity-Strukturen. Aufgrund der Tatsache, dass die Systeme allerdings erst mit der Einführung des äußeren Druckrings in sich geschlossen sind, spricht R. Motro eine Zuordnung zu den Tensegrity-Strukturen allerdings ab [Motro, 2003, S.27].

Carlos Graciano ordnet die Geiger Domes wiederum in seinem Beitrag *Tensegrity Structures A State-of-the-Art* den Tensegrity-Strukturen zu. Nach seiner Auffassung kann der Druckring als gebogenes Stabelement verstanden werden. Mit dieser Annahme würden sich die Geiger Domes als weitreichende Anwendung der Tensegrity-Strukturen einordnen lassen [Graciano, 2005].

Der Umgang von Geiger Domes im Kontext der Tensegrity-Strukturen ist, wie aufgezeigt, sehr umstritten. Es besteht insoweit Einigkeit darüber, dass die Strukturen durch das Tensegrity-Prinzip inspiriert wurden. Darüber hinaus existieren eher widersprüchliche Aussagen über eine klare Zuordnung, welche in der Hauptsache auf den äußeren Druckring zurückzuführen ist. Wird er zum System dazugezählt, ist ein Kräftekurzschluss vorhanden, allerdings verliert das System die übergeordnete Stabilisierung durch das Zugsystem. Außerdem ist auch die Diskontinuität im Bereich des Druckrings fraglich. Wird der Druckring hingegen als äußere Lagerung verstanden, dann können die Geiger Domes durchaus als offene räumliche Tensegrity-Strukturen verstanden werden.

2.4.3 Klassifikation gebauter Beispiele

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit werden einige der bereits vorgestellten und auch gebauten Tensegrity-Strukturen, sowie der Georgia Dome, als exemplarisches Beispiel der Geiger Domes, diskutiert und klassifiziert. Die Matrix (siehe Bild 2-32) bietet eine Übersicht der verschiedenen Kriterien, die im Abschnitt 2.3.4 definiert wurden. Die Projekte werden anhand dieser Kriterien untersucht, um abschließend eine Klassifizierung für die gewählten Tensegrity-Strukturen im Bauwesen vorzunehmen. Zur besseren Übersicht wird die Einordnung der Projekte mit den fünf Prädikaten *voll erfüllt*; *weitgehend erfüllt*; *bedingt erfüllt*; *kaum erfüllt* und *nicht erfüllt vorgenommen*. Somit kann überprüft werden, ob ein Projekt in der Hauptsache den Kriterien des Tensegrity-Prinzips folgt oder nicht. Im Anschluss erfolgt eine kurze Diskussion der aufgezählten Projekte im Hinblick auf die Erkenntnisse der Klassifizierung.

	Georgia Dome (Geiger Dome)	Tensarch	White Rhino	Blur Building	Warnow Tower	Tor Vergata Bridge	Kurilpa Bridge
1. Räumliche Interaktion der konstruktiven Elemente	weitgehend erfüllt (in der Fläche)	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt
2. Stabilisierung durch kontinuierliches Zugsystem	weitgehend erfüllt (in der Fläche)	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	kaum erfüllt (Stabilisierung durch Abspannungen)
3. Zugkontinuität durch Druckdiskontinuität	weitgehend erfüllt (in der Fläche)	bedingt erfüllt (nur teilweise Diskontinuität)	voll erfüllt	bedingt erfüllt (nur teilweise Diskontinuität)	voll erfüllt	voll erfüllt	nicht erfüllt (kein kontinuierliches Zugsystem)
4. Zugstabilisierung trotz Druckelementkontakt	trifft nicht zu	voll erfüllt	trifft nicht zu	trifft nicht zu	voll erfüllt	trifft nicht zu	trifft nicht zu
5. Kurzschluss der Zugkräfte im Gesamtsystem	bedingt erfüllt (in Verbindung mit Druckring)	voll erfüllt	voll erfüllt	bedingt erfüllt (in Verbindung mit Trägerrost)	voll erfüllt	voll erfüllt	nicht erfüllt (Widerlager vorhanden)
6. Gleichgewicht durch Vorspannung	weitgehend erfüllt (in der Fläche)	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	bedingt erfüllt (stellenweise)
7. Strukturelle Trennung der Beanspruchungen	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt (teilweise)	voll erfüllt	voll erfüllt	bedingt erfüllt (stellenweise)
8. Visualisierung des strukt. Prinzips durch Auflösung	weitgehend erfüllt (in der Fläche)	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt (teilweise)	voll erfüllt	voll erfüllt	bedingt erfüllt (stellenweise)
9. Materielle Leichtigkeit und schwebende Druckelemente	voll erfüllt	weitgehend erfüllt (Druckelemente wirken zusammenhängend)	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	bedingt erfüllt (Längselemente dominieren visuell)	bedingt erfüllt (durchgehendes Deck dominiert visuell)
10. Lokale Umlenkung der Zugkräfte	weitgehend erfüllt (leher unterspannender Charakter)	bedingt erfüllt (weniger visuelle Klarheit durch Kontakt)	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt (leher abspannender Charakter)
Anmerkungen	System wirkt durch Gestaltung der Fläche	Regelmäßiger Druckkontakt beeinfl. Erscheinung	Teil eines Tragwerks (Funktionalität)	Trägerrost beeinfl. Tragverhalten	Klare Tensegrity Erscheinung trotz Druckkontakt	Visuell dominierende Längselemente	Eher abgespanntes Brückendeck
Ergebnis	Tensegrity	Tensegrity	Tensegrity	Tensegrity	Tensegrity	Tensegrity	Orientierung am Tensegrity-Prinzips

Die Geiger Domes, respektive der Georgia Dome, erfüllt weitgehend die strukturellen Kriterien die Tensegrity-Strukturen auszeichnen. Natürlich ist hierbei zwischen dem außenliegenden Druckring und der eigentlichen Dachfläche zu differenzieren. Da die Interaktion zwischen Druck- und Zugelementen in der Hauptsache innerhalb der Dachfläche vorzufinden ist, steht diese auch im Vordergrund der Betrachtung. Lediglich zum Kurzschluss der Zugkräfte ist der Druckring zwingend notwendig. Wie bereits diskutiert wurde, existieren dadurch unterschiedliche Auffassungen über die Zuordnung der Geiger Domes zu den Tensegrity-Strukturen. Da der Georgia Dome auch gestalterisch viele Kriterien der Tensegrity-Strukturen erfüllt, beziehungsweise weitgehend erfüllt, werden im Rahmen dieser Arbeit die Geiger Domes als gebaute Tensegrity-Strukturen klassifiziert. Bild 2-33 zeigt den Georgia Dome, der Anteil der Dachfläche gegenüber dem Flächenanteil des außenliegenden Druckrings unterstreicht den gestaltgebenden Charakter des Tensegrity-Prinzips.



2-33 Georgia Dome (1992)

Das Tensarch von René Motro kann klar den Tensegrity-Strukturen zugeordnet werden, sowohl strukturell, als auch gestalterisch erfüllt es die meisten der benannten Kriterien. Lediglich durch den teilweise vorliegenden Druckstabkontakt gibt es leichte visuelle Einschränkungen, da einzelne Stabreihen zusammenhängend wirken und somit in Teilbereichen die grundlegend so markante visuelle Umlenkung der Zugkräfte an den Stabenden verloren geht. Die Leichtigkeit und die Auflösung bleiben aber trotzdem erhalten und verleihen der Struktur die typische Tensegrity-Ästhetik.

Die beiden Stützen des White Rhino sind vollständig als Tensegrity-Strukturen einzuordnen und erfüllen alle benannten Kriterien in Gänze. Die zusätzlichen versteifenden Zugelemente stören in keiner Weise das Erscheinungsbild oder die Tragwirkung. Allerdings ist anzumerken, dass die Stützen nur einen Teil des gesamten Bauwerks bilden, und es sich somit nicht um eine ausschließliche Tensegrity-Struktur handelt.

Das Blur Building erfüllt in der Gestaltung die benannten Kriterien der Tensegrity-Strukturen. Strukturell gibt es allerdings durch die Kombination der einzelnen Tensegrity-Elemente mit dem Gitterrost gewisse Ungenauigkeiten, in wie weit das Tragverhalten klar den Tensegrity-Strukturen zuzuordnen ist oder nicht. Zum einen ist der Gitterrost ein durchgehendes Element, daher existiert bei der Gesamtstruktur nur eine lokale Diskontinuität der Druckstäbe innerhalb des Rostes, zum anderen funktioniert ein Kurzschluss der Zugkräfte in dem System nur in Verbindung mit dem Gitterrost. Dennoch bilden die Druckstäbe für sich eine tragende Ebene, auf der ein Teil der Konstruktion ruht, ohne direkt auf dem Rost abgestützt zu werden. Insgesamt gilt hier, dass mehr Kriterien für eine Tensegrity-Struktur sprechen, als dagegen. Vor allem die gestalterische Ausprägung spricht klar für die Zuordnung, auch wenn durch den Rost einige strukturelle Aspekte nur in Teilen klar zuzuordnen sind.

Der Warnow Tower ist klar als Tensegrity-Struktur einzuordnen. Er erfüllt alle gestalterischen und strukturellen Kriterien. Zudem trägt der bereits

aufgezeigte Druckstabkontakt im Übergangsbereich der einzelnen Twist Elemente, durch die dadurch erzeugte visuelle Elementtrennung, positiv zu der Klarheit der Struktur bei.

Auch der Entwurf der Tor Vergata Bridge ist klar den Tensegrity-Strukturen zuzuordnen. Einzig die Einführung der zwei durchgehenden Längsstäbe dominiert die Gestaltung der Brücke, was zu einer leichten ästhetischen Einschränkung führt.

Die Einordnung der Kurilpa Bridge ist im Vergleich zu den bisher diskutierten Projekten nicht so eindeutig vorzunehmen. Es gibt sowohl strukturell, als auch gestalterisch starke Einschränkungen. Strukturell liegt das größte Problem darin, dass die Zugelemente innerhalb der Brücke teilweise eher als Abspannung funktionieren, die über eine Mischung aus Druckstäben und Pylonen umgelenkt und schlussendlich in den Widerlagern verankert werden. Damit entspricht das Tragverhalten eher einer Mischung aus dem Tensegrity-Prinzip und dem einer Schrägseilbrücke. Darüber hinaus scheint das Brückendeck als Biegeträger mit in die Tragwirkung der Gesamtkonstruktion eingebunden zu sein, was einerseits ingenieurmäßig sinnvoll ist, andererseits aber nicht dem Tensegrity-Prinzip entspricht. Auch gestalterisch verleihen Abspannungen und Brückendeck dem Tragwerk nicht die für Tensegrity-Strukturen typische Leichtigkeit, auch wenn in Teilen scheinbar schwebende Stabelemente vorkommen. Insgesamt wird diesem Bauwerk zwar ein grundlegender visueller Charakter und eine gewisse strukturelle Idee des Tensegrity-Prinzips zugestanden, in Gänze kann die Brücke aber nicht als Tensegrity-Struktur klassifiziert werden.

Zusammenfassung

Die Klassifizierung von Tensegrity-Strukturen, anhand ausgewählter gebauter Beispiele zeigt, dass sich im Hinblick auf eine baupraktische konstruktive Umsetzung eine strikte Abgrenzung der Strukturen nicht rechtfertigen lässt. Bereits in dem Abschnitt 2.3.4 wurde geklärt, dass Tensegrity mehr als nur ein Tragwerkstyp ist. Tensegrity stellt ein Prinzip dar, welches durch gewisse strukturelle und gestalterische Aspekte funktioniert. Bei der Untersuchung der gebauten Strukturen hat sich herausgestellt, dass alle Beispiele, mit Ausnahme der Kurilpa Bridge, kleinere Einschränkungen bezogen auf das eine oder andere, vorher definierte Kriterium aufweisen. Diese Einschränkungen führen allerdings nicht dazu die Strukturen als Tensegrity-Strukturen auszuschließen, vielmehr verdeutlichen sie die Komplexität, die eine baupraktische Umsetzung dieser Strukturen mit sich bringt. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass mit Ausnahme der Geiger Domes nur bedingt raumbildende und keine raumabschließenden Tensegrity-Strukturen umgesetzt wurden.

3 Tensegrity-Membran-Strukturen

3 Tensegrity-Membran-Strukturen

Eine Neuheit im Bereich der Tensegrity-Strukturen sind die sogenannten Tensegrity-Membran-Strukturen. Sie stellen eine Verbindung klassischer Tensegrity-Strukturen mit strukturell wirksamen flächigen Membranelementen dar und sind vorrangig in der dritten Periode der Tensegrity-Strukturen in Erscheinung getreten. Dabei wird in dem folgenden Kapitel untersucht, in wie fern die Tensegrity-Membran-Strukturen mit den reinen Tensegrity-Strukturen in Verbindung stehen.

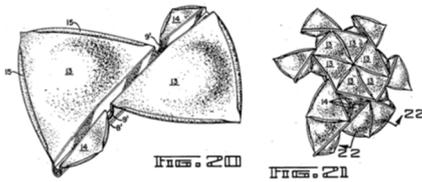
Weiterhin wird untersucht, ob durch die Integration von flächigen Membranelementen die strukturellen und gestalterischen Potentiale der reinen Tensegrity-Strukturen erweitert werden können, beziehungsweise, ob sich die Nachteile der Tensegrity-Strukturen kompensieren lassen und die Vorteile dadurch baupraktisch sinnvoller nutzbar sind. Es hat sich gezeigt, dass beispielsweise zusätzliche eingeführte Seilelemente eine Tensegrity-Struktur versteifen können (siehe Abschnitt 2.1.3). Daher wird vermutet, dass der Einsatz flächiger Zugelemente ebendiesen Effekt verstärkt. Der Einsatz textiler Membranen bietet folglich die Möglichkeit die strukturelle Effizienz des Tensegrity-Prinzips zu steigern. Darüber hinaus bieten die Flächenelemente die Chance, einer Etablierung dieser Konstruktionen im Bauwesen, da insbesondere die Möglichkeit der Raumbildung als funktionaler Vorteil gegenüber reinen Tensegrity-Strukturen genannt werden kann [Ratschke, 2016].

Nachfolgend erfolgt eine Recherche über die Entwicklung der Tensegrity-Membran-Strukturen im Kontext des Tensegrity-Prinzips. Dabei werden in der Hauptsache realisierte Projekte präsentiert, um die Entwicklungsfähigkeit aufzuzeigen und darauf aufbauend Eigenschaften und Charakteristika der Strukturen ableiten zu können. Darüber hinaus bieten die recherchierten Projekte die Möglichkeit, im späteren Verlauf der vorliegenden Arbeit, konstruktive Lösungsansätze zu analysieren und für die baupraktische Umsetzung eines Demonstrators heranzuziehen. Ebenfalls auf Basis der recherchierten Erkenntnisse über Tensegrity-Membran-Strukturen erfolgt die bereits genannte Zuordnung in Bezug auf das Tensegrity-Prinzip.

3.1 Entwicklung der Tensegrity-Membran-Strukturen

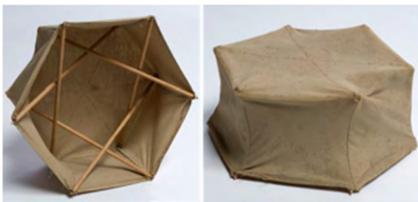
Der Grundgedanke der Tensegrity-Membran-Strukturen besteht darin, reine Tensegrity-Strukturen und strukturell wirksamen Membranen miteinander zu kombinieren. Die Membranen werden als Zugelemente in die Tensegrity-Strukturen eingesetzt und können dabei ergänzend oder als Ersatz der Seile Verwendung finden. Damit ermöglichen die Tensegrity-Membran-Strukturen gegenüber reinen Tensegrity-Strukturen eine Erweiterung der strukturellen und gestalterischen Eigenschaften sowie erweiterte Nutzungsmöglichkeiten. Die nachfolgend vorgestellten Konzepte und hauptsächlich gebauten Projekte sollen das Verständnis für die Erweiterung der Potentiale fördern und als Grundlage für die darauf aufbauende Aufarbeitung der Eigenschaften und Charakteristika von Tensegrity-Membran-Strukturen dienen.

3.1.1 Frühe Konzepte und Visionen



3-1 Richard Buckminster Fullers Idee für die Integration von Flächenelementen in eine kuppelförmige Tensegrity-Struktur (1962)

Richard Buckminster Fuller beschreibt in seinem Patent von 1962 bereits die Möglichkeit eine modifizierten Tensegrity-Kuppel „*which includes surfacing elements*“ [Fuller, 1962, S.14]. Bild 3-1 zeigt einen Ausschnitt einer kuppelförmigen Tensegrity-Struktur, bei der diese flächigen Elemente gut zu erkennen sind. Mit diesem Ansatz zeigt Richard Buckminster Fuller schon früh seine Ideen weiterer Entwicklungspotentiale der Strukturen in Bezug auf mögliche Nutzungen, die durch eine komplette Einhüllung denkbar wären [Fuller, 1962]. An dieser Stelle muss allerdings angemerkt werden, dass in dem Patent keine Aussage über die Tragwirkung, beziehungsweise die konstruktive Ausbildung der flächigen Elemente vorgenommen wurde. Es kann daher auch nicht davon ausgegangen werden, dass Richard Buckminster Fuller bereits den Einbau textiler Membranelemente angedacht hat, welche sich gegebenenfalls auf das Tragverhalten auswirken könnten, oder ob er nur eine Verkleidung vorgesehen hat. Da sowohl die Tensegrity-Strukturen, als auch der technische Membranbau erst einige Jahre vor Anmeldung des Patents maßgeblich entwickelt wurden, ist durchaus nachvollziehbar, warum Richard Buckminster Fuller zu dieser Zeit lediglich ein Konzept präsentierte.



3-2 Modellbau eines frühen Entwurfs einer Tensegrity-Membran-Struktur von David George Emmerich

Ein Entwurf von David Georges Emmerich zeigt dagegen bereits den Einsatz textiler Flächenelemente [Brayer, 2013]. Der Entwurf besteht aus sechs stabförmigen Druckelementen und einer Art Stoffüberzug (siehe Bild 3-2), natürlich handelt es sich bei dem verwendeten Stoff nicht um eine textile Membran nach heutigem Verständnis. Auch der Zuschnitt entspricht nicht den heutigen Kenntnissen, was an der Faltenbildung des Stoffes zu erkennen ist. Die Geometrie kann daher als nicht optimal für die Verwendung einer typischen Membran bezeichnet werden. Grundsätzlich entsteht aber bereits bei diesem Entwurf im Modellmaßstab eine erkennbare Interaktion zwischen den Druckelementen und der Zugfläche. Die Zugelemente werden dabei ausschließlich durch das Textil gebildet, welches gleichzeitig eine einhüllende Funktion der Struktur übernimmt. Somit zeigt der Entwurf, dass sowohl die strukturellen Eigenschaften durch die Membran übernommen werden können sowie die funktionale

Erweiterung der Raumbildung auf den Einsatz der Membran zurückzuführen ist.

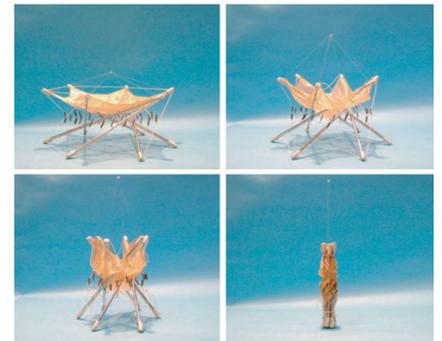
Auch Anthony Pugh hat in seinem Buch von 1976 *An Introduction to Tensegrity* bereits die Möglichkeit eines „*Tensegrity Dome with a tensile skin*“ [Pugh, 1976, S.65] beschrieben. Anthony Pugh vertritt in seiner Arbeit die Meinung, dass „*struts and tendons in the models of Tensegrity systems represent patterns of forces, and they can be replaced by other components, provided those components can accommodate the forces.*“ [Pugh, 1976, S.65]. Durch die Aussage, dass die einzelnen Konstruktionskomponenten durch Kräfte definiert werden und durch gleichwertige Elemente ersetzt werden können, spricht er sich damit für eine Erweiterung des Tensegrity-Prinzips aus. Die maßgebliche Stabilisierung des Systems ist allerdings den Zugelementen vorbehalten, damit der Charakter der Tensegrity-Strukturen erhalten bleibt [Pugh, 1976, S.3f.]. Bild 3-3 zeigt den *Tensegrity Dome with a tensile skin*. Es lässt sich gut erkennen wie die Membranhaut das Gesamtsystem stabilisiert und gleichzeitig die Erscheinung prägt.



3-3 Tensegrity Dome with a tensile skin von Anthony Pugh (1976)

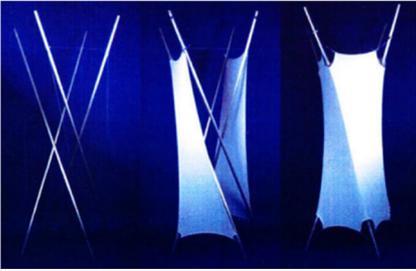
3.1.2 Erste Experimentalbauten

Nach den anfänglichen beschriebenen Konzepten und Visionen in den 1960er und 1970er Jahren, tauchen neue mögliche Verbindungen von Tensegrity-Strukturen und Membranen erst zum Jahrtausendwechsel im Bereich der Weltraumforschung wieder auf. Gunnar Tibert und Sergio Pellegrino präsentieren in dem AIAA Gossamer Spacecraft Forum in Seattle ein Konzept für einen Reflektor auf Basis einer Tensegrity-Membran-Struktur [Tibert, 2002]. Bei diesem Konzept spielt nicht etwa das Potential der Raumbildung eine Rolle, sondern Mobilität, Transportgröße und Flexibilität, was zusammengefasst unter dem Aspekt Wandelbarkeit ebenfalls als Vorteil in Abschnitt 2.2.3 aufgezählt wurde. Damit weicht dieses Projekt auf den ersten Eindruck von den klassischen Anforderungen im Bauwesen ab, die strukturelle Effizienz und die Leichtigkeit der Struktur sind allerdings nach wie vor wichtige Merkmale. Ganz allgemein wäre auch eine statische Installation dieser strukturellen Konfiguration, beispielhaft als Überdachung, vorstellbar. Bild 3-4 zeigt den Entwurf und den entsprechenden Installationsmechanismus. Der Aufbau erfolgt auf Basis eines sechseckförmigen Twist-Elements, die Membran wird dabei in dem oberen Polygon eingebunden. Für die Beweglichkeit des Moduls und seine Einsatzfähigkeit im Weltraum ist eine Möglichkeit vorzusehen, die Diagonalseile je nach Bauzustand zu verkürzen beziehungsweise zu verlängern, damit der Faltprozess eingeleitet werden kann. Erst nach abgeschlossenem Faltprozess ist ein stabiler Zustand erreicht.



3-4 Konzept eines Tensegrity-Reflektors von Gunnar Tibert und Sergio Pellegrino (2002)

Die erste und bisher nachweislich einzige dauerhaft umgesetzte Tensegrity-Membran-Struktur wurde von Lars Meeß-Olsohn entworfen und realisiert. Im Rahmen seiner Dissertation *Textegrity – Textiles and Tensegrity* hat er an der Möglichkeit der Einbindung strukturell wirksamer textiler Membranelemente in Tensegrity-Strukturen gearbeitet und 2000, im



3-5 Die Skulptur Textegrity I von Lars Meeß-Olsohn (2000)

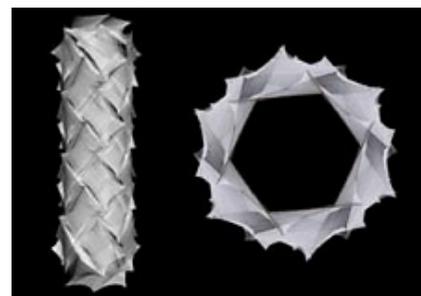
Rahmen des Symposiums LeichtBauKunst, eine Struktur auf dem Campus der Universität Duisburg-Essen errichtet [Meeß-Olsohn, 2004, S.51]. Bild 3-5 zeigt eine Modellstudie der Struktur Textegrity I. Die Tensegrity-Membran-Struktur besteht insgesamt aus drei viereckförmigen Twist-Elementen, wobei das zweite und das dritte Element jeweils um zwei, beziehungsweise vier textile Membranflächen erweitert werden. Die Seile des klassischen Twist-Elements bleiben bei der Struktur erhalten und dienen als Randseile der Membranen. Die Entwicklungsschritte vom reinen Tensegrity-Twist zum hybriden System sind in der Abbildung gut erkennbar. Lars Meeß-Olsohn beschreibt die Struktur als die „ersten noch zweckfreien Textegrity-Einheiten“ [Meeß-Olsohn, 2004, S.51]. Der Begriff Textegrity wurde, in Anlehnung an Richard Buckminster Fullers Wortschöpfung Tensegrity, aus den Wörtern Textil und Tensegrity kreiert [Meeß-Olsohn, 2004, S.45]. Dabei ist anzumerken, dass Lars Meeß-Olsohn in seiner Arbeit eine klare Abgrenzung zwischen Tensegrity Konstruktionen und Tensegrity-ähnlichen Konstruktionen vornimmt (siehe Abschnitt 2.4.1). Mit der Bezeichnung Textegrity beschreibt er nur die nach ihm klassifizierten Tensegrity Konstruktionen, die durch strukturell wirksame, textile Membrane ergänzt wurden. Das umfasst lediglich geschlossene Grundeinheiten und verschiedene Formen der Addition von Grundeinheiten. Damit widerspricht seine Einordnung der in dieser Arbeit vorgenommenen Definition und Klassifizierung von Tensegrity-Strukturen im Bauwesen (siehe Abschnitt 2.3.4 und Abschnitt 2.4.3).



3-6 Der Messestand Textegrity-Dome von Lars Meeß-Olsohn (2002)

Neben der Struktur Textegrity I hat Lars Meeß-Olsohn, für das Symposium Transparenz und Leichtigkeit 2002, eine weitere Tensegrity-Membran-Struktur, einen knapp 5 m hohen, sogenannten Textegrity-Dome, realisiert. Die Struktur basiert auf der sphärischen Addition von sechs viereckförmigen Twistelementen und bezieht sich aufgrund der Elementanordnung auf seine erste Struktur. Zur Formfindung diente eine geschlossene Struktur mit 24 Druckelementen. Der realisierte Textegrity-Dome besteht allerdings nur aus 20 stabförmigen Druckelementen, vier Druckelemente im Aufstellbereich des Pavillons entfallen aufgrund der notwendigen Auflagerung und werden durch Seilelemente kurzgeschlossen. Die geometrische Abweichung zwischen berechneter und gebauter Struktur könnte eine Grund dafür sein, dass die Berechnungsergebnisse nicht mit den Versuchsergebnissen übereinstimmten [Meeß-Olsohn, 2004, S.118.]. Darüber hinaus besteht die Struktur noch aus einer homogenen textilen Membran und mehreren Gurten, die in die Membranfläche eingenäht sind. Die Gurte dienen dem Anschluss zwischen Druckelementen und Membran. Der Aufbau und die entsprechende Knotenausbildung sind Bild 3-6 zu entnehmen. Auch der Kräftekurzschluss im Auflagerbereich ist auf der Abbildung zu erkennen [Meeß-Olsohn, 2004, S.83ff.]. Mit seiner zweiten, wenn auch nur temporär genutzten Tensegrity-Membran-Struktur hat Lars Meeß-Olsohn eine Konfiguration gewählt, die einerseits eine strukturelle Interaktion von Tensegrity und Membran zulässt und zudem die Funktionalität der reinen Tensegrity-Struktur erweitert.

Das folgende Projekt von Mizuki Shigematsu, Masato Tanaka und Hirohisa Noguchi wurde zwar nicht baulich umgesetzt, zeigt aber welche gestalterische Formsprache die Kombination aus Tensegrity-Strukturen und Membranen ermöglicht. Der Entwurf der sogenannten tensegrity membrane structure wurde 2008 auf der IASS-IACM Konferenz in Ithaca präsentiert und basiert auf einer radial angeordneten Konfiguration von Druckelementen und Membran [Shigematsu, 2008, S.3]. In Bild 3-7 ist die entsprechende Konfiguration aus Tensegrity-Struktur und Membran dargestellt. Der rotationssymmetrische Systemaufbau, in Anlehnung an ein mehreckiges Twist-Element mit wiederkehrender Stapelung, ist dabei gut zu erkennen. Der eigentliche Pavillonentwurf basiert auf der oben gezeigten zylindrischen Konfiguration, die in Längsrichtung halbiert wurde. Bild 3-8 zeigt eine fotorealistische Perspektive des Entwurfs, die Offenheit der Struktur, welche durch die Interaktion von Druckelementen und Membran im Lagerungsbereich der Struktur entsteht, ist dabei gut zu erkennen. Neben dem Entwurf wurde in dem zugehörigen Konferenzbeitrag sowohl eine numerische Formfindung, sowie eine Spannungsanalyse der Globalstruktur präsentiert [Shigematsu, 2008, S.4], die als Machbarkeitsstudie gewertet werden können, auch wenn damit vorerst viele konstruktive Fragen unbeantwortet bleiben.



3-7 Dem Entwurf tensegrity membrane structure zugrunde liegende rotationssymmetrische Konfiguration



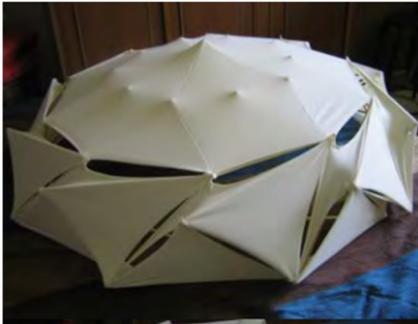
3-8 Visualisierung des Entwurfs tensegrity membrane structure (2008)

Eine weitere zu nennende Tensegrity-Membran-Struktur ist der 2011 in Noda (Japan) realisierte temporäre Pavillon MOOM. Der Pavillon nimmt in dieser Arbeit eine besondere Rolle ein, zum einen ist er ein markant gestaltetes Beispiel einer Tensegrity-Membran-Struktur, zum anderen dient er für die weitere Analyse der strukturellen Mechanismen und der konstruktiven Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen als Referenzprojekt. Unter der Leitung von Kazuhiro Kojima und Jun Sato wurde diese experimentelle Struktur von 70 Studierenden an der Tokyo University of Science entworfen, geplant und gebaut. Der Pavillon überdacht eine Grundfläche von 146 m² und besteht aus einer einzigen textilen Membranfläche, in die 131 parallel liegende Druckelemente aus Aluminium eingebettet wurden. Insgesamt kommt der Bau auf ein Konstruktionsgewicht von nur 600 kg [Popp, 2012]. Die Idee zum Entwurf dieser Struktur kommt aus dem Bereich der pneumatischen Membrankonstruktionen, die Interaktion zwischen Druckelement und Membran soll eine Art mechanischen Innendruck auf die Membranfläche erzeugen [Tu, 2016, S.2]. Das Ergebnis lässt sich als Tensegrity-Membran-Struktur beschreiben, wobei die charakteristischen Punkte der Kraftumlenkung an den Druckelementenden klar für eine Struktur sprechen, die dem Tensegrity-Prinzip folgt. Eine Besonderheit gegenüber voran beschriebener Strukturen besteht in der Verbindung der Aluminiumstäbe und der Membran, die Druckelemente sind bei dem Projekt mit aufgenähten Taschen über die komplette Elementlänge mit der Membran gekoppelt [Tu, 2016, S.2]. Die bisherigen präsentierten Projekte weisen hingegen punktförmige Verbindungen von Druckelementen und Membran auf, oder die Membran ist über Randseile mit den Druckelementenden verknüpft. Ein weiterer besonderer Aspekt ist die das verwendete offenmaschige Polyestergewebe, welches eine hohe Dehnfähigkeit besitzt, was den Auf- und Abbau er-



3-9 Innenseitig beleuchteter Pavillon MOOM bei Nacht (2011)

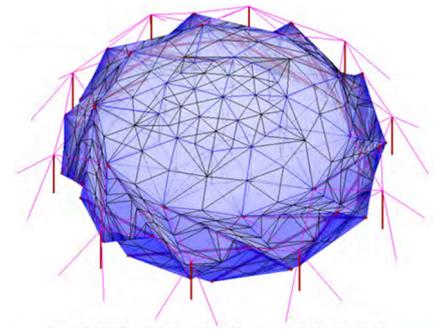
leichtert, aber ebenfalls den temporären Charakter unterstreicht, da ein langfristiger stabiler Vorspannzustand nur schwer zu realisieren ist. Allerdings verzeiht die Membran dadurch gewisse Ungenauigkeiten bei Berechnung und Herstellung der Konstruktion. Darüber hinaus bedingt das offenmaschiges Gewebe keine Schutzfunktion vor beispielsweise Wind oder Regen [Tu, 2016, S.2]. Bild 3-9 zeigt eine Perspektive des Pavillons. Die parallele Lage der, in die Membranfläche, eingebetteten Druckelemente ist gut zu erkennen. Diese geordnete Lage der Aluminiumrohre verleiht der Struktur eine gestalterische Ruhe und Klarheit, führt aber konstruktiv dazu, dass sich der Pavillon rechtwinklig zu den Druckelementachsen zusammenziehen möchte. Dieser Effekt wird durch eine seitliche Verjüngung der Pavillonhöhe, infolge einer Reduzierung des Strukturdurchmessers, sowie durch die Abspannung am Ende verhindert.



3-10 Modellbau des Tensegrity Domes von Diana Maritza Peña Villamil (2012)

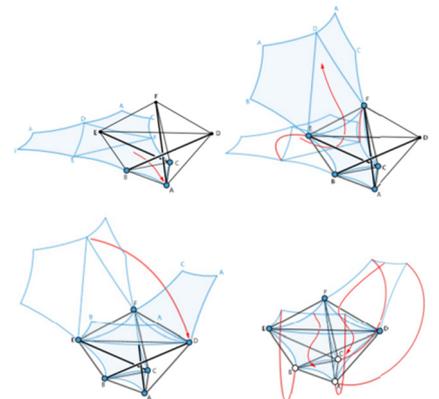
Im Jahr 2012 präsentierte Diana Maritza Peña Villamil im Rahmen ihrer Dissertation zum Thema *Aplicación de los Principios del Tensegrity a las Construcciones textiles atirantadas* den Entwurf einer Stadioneinhüllung, des sogenannten Tensegrity Domes, als eine weitere Tensegrity-Membran-Struktur. Im Grundsatz beschäftigt sich Diana Maritza Peña Villamil mit der Kombination von Membranelementen und Tensegrity-Strukturen im Modellmaßstab. Ein wesentlicher Teil ihrer Arbeit umfasst den modellbasierten physikalischen Formfindungsprozess von Tensegrity-Membran-Strukturen [Peña Villamil, 2012], dabei verwendet sie in der Hauptsache Holzstäbe als Druckelemente und sehr dehnfähige Stoffe (wie z.B. Lycra oder Elastan) als Membranmaterial, wobei sie keine zusammenhängende Membranfläche, sondern einzelne Membranelemente ausbildet. Es ist anzumerken dass die Materialeigenschaften somit stark von denen, in der Baupraxis gängigen Materialien abweichen und somit nicht ohne weitere Berücksichtigung auf größere Modelle oder reale Systeme zu übertragen sind. Die Verbindung der Druckelemente und der Membran erfolgt im Modellmaßstab als quasi gelenkiger Anschluss mit Hilfe dünner Nadeln, die den Stoff an den Stabenden fixieren. Die Studienobjekte von Diana Maritza Peña Villamil haben gemein, dass es sich um geschlossene selbstverankerte Strukturen handelt, die vom Aufbau her den Twist-Elementen nachempfunden sind. Bild 3-10 zeigt den Aufbau des Tensegrity-Domes als Modell mit einem Durchmesser von 100 cm, die Struktur wird dabei aus zwei Teilen zusammengesetzt. Den äußeren seitlichen Abschluss bildet eine ringförmige Tensegrity-Membran-Struktur, die oberhalb durch eine kuppelförmige Struktur ergänzt wird [Peña Villamil, 2012, S244ff.].

Neben der Untersuchung physischer Formfindungsmodelle wurde der Entwurf von Diana Maritza Peña Villamil auch numerisch abgebildet und analysiert. Die Untersuchungen wurden mit der FEM-Software WinTess an einem digitalen Modell mit einem Durchmesser von 40 m vorgenommen und haben gezeigt, dass zusätzliche Pylone und Abspannseile um die Struktur angeordnet werden müssen, um einen stabilen Zustand zu erhalten [Peña Villamil, 2011]. Das FE-Modell ist in Bild 3-11 dargestellt, die Pylone und Abspannungen sind umlaufend deutlich zu erkennen. An dieser Stelle kann nur vermutet werden, woher die Abweichungen zwischen Formfindung im Modellmaßstab und FE-Modell kommen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung sehr dehnfähiger Stoffe im Modellbau, die das tatsächliche Tragverhalten textiler Membrane nicht ausreichend abbilden. In der FE-Berechnung wurde mit einer typischen baupraktischen textilen Membran gerechnet [Peña Villamil, 2011, S.74]. Ein weiterer Grund könnte die Skalierung zwischen physischem und FE-Modell sein, wodurch bestimmte Effekte im physischen Modell nur untergeordneten Einfluss auf die Stabilität haben, die allerdings in der numerischen Analyse durchaus zum Tragen kommen. Eine weitere Fehlerquelle könnte auch die Modellierung der Kontaktbereiche zwischen den Druckelementen und der Membran sein. Es wird vermutet, dass ein punktförmiger Anschluss zu Spannungsspitzen führt und somit zu ungenauen Ergebnissen, sofern dieser nicht detailgetreu abgebildet wird.



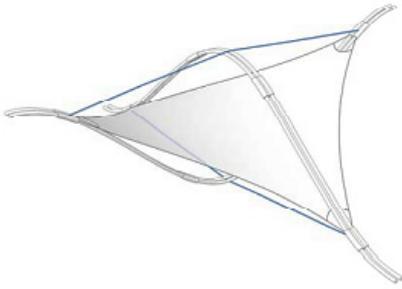
3-11 Visualisierung des FE-Modells des Tensegrity Domes von Diana Maritza Peña Villamil (2012)

Eine weitere realisierte Pavillonstruktur ist der Underwood Pavilion, der im Sommer 2014, in einem fünfwöchigen Seminar an der Ball State Universität Muncie, unter der Leitung von Gernot Riether und Andrew Wit entstanden ist. Hierbei handelt es sich um eine 18 m² überspannende Pavillonkonstruktion, die aus insgesamt 56 kleinen Tensegrity-Membran-Elementen zusammengesetzt wurde [Schröck, 2015]. Die einzelnen Elemente sind dabei Variationen verschiedener dreieckförmiger Twist-Elemente, die im Nachgang mit einer Hülle aus sehr dehnfähigem Elastan (bis zu 40 % Dehnung) überspannt wurden [Riether, 2015]. Von daher ist anzumerken, dass der Membran wahrscheinlich keine primäre Tragfunktion zukommt. Allerdings findet in jedem einzelnen Element eine Interaktion zwischen reiner Tensegrity-Struktur und Membran statt, wodurch das Primärtragverhalten des einzelnen Elements definitiv durch die Membran, beziehungsweise ihren Spannungszustand, beeinflusst wird. Bild 3-12 zeigt den Aufbau der einzelnen Tensegrity-Membran-Elemente. Ein weiterer interessanter Aspekt des Entwurfs ist, dass der Pavillon auf Basis parametrischer Entwurfswerkzeuge entstanden ist, so wurde unter anderem die Software Rhinoceros 3D, Grasshopper 3D und Kangaroo3d für den Entwurf, die Variation und die Formfindung verwendet. Der Einsatz dieser modernen parametrischen Entwurfswerkzeuge zeigt zum einen, wie komplex Entwurf, Formfindung und Konstruktion von Tensegrity-Membran-Strukturen sind und zum anderen, dass sich durch den Einsatz dieser Software aufwendige Konstruktionen vergleichsweise einfach und schnell analysieren lassen. Alle numerischen Ergebnisse wurden bei dem Projekt zunächst durch physikalische Modelle bestätigt,



3-12 Beispielhafter Aufbau eines Tensegrity-Membran-Elements am Underwood Pavillon von Gernot Riether und Andrew Wit (2014)

um mögliche numerische Fehlerquellen frühzeitig aufzudecken [Riether, 2015].



3-13 Einzelnes Segment der Bending-Activated Tensegrity-Struktur Form Follows Tension von Eike Schling (2015)

2015 wurde in Amsterdam auf dem IASS Symposium die sogenannte Bending-Activated Tensegrity-Struktur Form Follows Tension von Eike Schling, von der Technischen Universität München, vorgestellt. Diese Konstruktion vereint Tensegrity-Struktur und textile Membran durch die Einführung zusätzlicher biegeaktiver Elemente, auf den Einsatz reiner Druckelemente wurde hingegen verzichtet. In Bild 3-13 ist die Konstruktion des einzelnen Moduls gut zu erkennen. Jedes Modul besteht aus einer Membranfläche, zwei biegeaktiven Stabelementen und zwei linearen Zugelementen. Die Gesamtkonstruktion besteht aus insgesamt 2 x 2 Modulen und überspannt damit etwa 6 x 6 m [Schling, 2015, S.3]. Im Vergleich zu den bisher betrachteten Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen, wird hier gezielt mit der Biegesteifigkeit und den daraus resultierenden Rückstellkräften der Stabelemente gearbeitet und nur in Teilen mit der bei Strukturen nach dem Tensegrity-Prinzip typischen Druckbeanspruchungen.



3-14 Hanabi Pavillon von Chia-Ho Lin (2015)

Ebenfalls 2015 wurde von Chia-Ho Lin im Rahmen einer Master-Thesis an der National Cheng Kung University in Taiwan der Hanabi Pavillon entworfen und realisiert. Der Pavillonentwurf basiert auf einer umfassenden Geometriestudie des temporären und bereits aufgezeigten Pavillons MOOM. Darauf aufbauend wurde ein halb-kugelförmiger Pavillon durch die Kombination von Bambusstäben und einer nicht näher benannten, als „non-stretch waterproof“ [Tu, 2016, S.8] bezeichneten, Membran realisiert. Die Bambusstäbe wurden bei dieser Struktur, in Anlehnung an den Pavillon MOOM, in vorgefertigte Futterale der Membranfläche geschoben. Zudem gehören zu der Struktur ein innerer Druckring, ein Mittelpfosten und einige daran angeordneten Abspannseile (siehe Bild 3-14). Die Notwendigkeit dieser zusätzlichen Elemente hängt mit der fehlenden Stabilität der Struktur zusammen. Bei dem Entwurf wurde keine Formfindung der Struktur vorgenommen, da fälschlicherweise die Annahme getroffen wurde, dass die Kugelgeometrie die ideale Gleichgewichtsform darstellt [Ratschke, 2017], darüber hinaus dienen die zusätzlichen Elemente als Vorspannmechanismus der Membranfläche um die Fläche zu stabilisieren [Tu, 2016, S.8f.]. Aufgrund der fehlenden Formfindung stellen sich auf der Membran Falten ein, da kein membrangerechter Spannungszustand vorliegt. Die Faltenbildung ist ebenfalls in Bild 3-14 gut zu erkennen. Im Allgemeinen ist anzumerken, dass eine Formfindung bei der Auseinandersetzung mit Tensegrity-Membran-Strukturen unabdingbar ist [Ratschke, 2017]. Trotz der benannten Kritik stellt dieser Entwurf doch eine der wenigen, überhaupt realisierten Tensegrity-Membran-Strukturen dar.

Eine weitere Struktur, bei der Tensegrity-Prinzip und Membran kombiniert wurden, ist der Tension Pavilion von Geoff Morrow und seinem Büro StructureMode. Der Pavillon wurde für die Ausstellung Vision London 2016 entworfen und realisiert. Er besteht aus einem äußeren Tensegrity-Ring und einer inneren textilen Membran. Der äußere Ring wird dabei aus insgesamt 24 dreieckigen Twist-Elementen zusammengesetzt und dient quasi als Randlagerung für die Membranfläche. In Bild 3-15 ist die Anknüpfung von textiler Membran an den Tensegrity-Ring dargestellt. Dabei ist auch die Aneinanderreihung der einzelnen Tensegrity-Elemente als Randträger der Membran gut zu erkennen [Whitelaw, 2016, S.47]. Damit unterscheidet sich der Pavillon deutlich von den bisher gezeigten Tensegrity-Membran-Strukturen. Bei diesem Projekt findet keine direkte Interaktion zwischen Druckelementen und Membran statt. Der äußere Tensegrity-Ring ist in sich stabil und käme wahrscheinlich auch ohne innere Membran aus. Allerdings würde die Struktur damit auch ihre wesentliche Funktion verlieren. Von daher ist auch bei diesem Projekt zu diskutieren, ob es in den Bereich der Tensegrity-Membran-Strukturen fällt oder nicht. Bei dem Entwurf und der Realisierung des Tension Pavillons wurden ebenfalls parametrische Entwurfswerkzeuge genutzt, wodurch in kurzer Zeit verschiedene Konfigurationen erstellt und bewertet werden konnten, um einerseits die doppelte Krümmung der Membranfläche sicherzustellen und zudem die Gleichgewichtsfindung der Tensegrity-Elemente zu berücksichtigen [Whitelaw, 2016, S.47].

Zusammenfassung

Die Idee, den Tensegrity-Strukturen durch geschlossene Flächenelemente weitere Anwendungsmöglichkeiten zukommen zu lassen und damit einem wesentlichen Kritikpunkt der ursprünglichen Strukturen entgegen zu wirken, existiert seit den Anfängen der Strukturen selbst, entsprechende Konzepte und Visionen wurden frühzeitig veröffentlicht (siehe Abschnitt 3.1.1). Dass die Membran dabei auch als tragendes Element angesetzt wird, ist zumindest in den Entwürfen von David Georges Emmerich und Anthony Pugh erkennbar. Da sowohl die Tensegrity-Strukturen, sowie der konstruktive Membranbau noch verhältnismäßig junge Teilgebiete des konstruktiven Ingenieurbaus sind, verwundert es nicht, dass eine erste praktische Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen erst innerhalb der letzten 15 Jahre erfolgt ist. Abgesehen von der Struktur Textegrity I existieren bisher nur temporäre Experimentalbauten, welche in der Regel mit sehr dehnfähigen Membranmaterialien ausgeführt wurden, wodurch die materialspezifischen Einflüsse langlebig einsetzbarer textiler Membrane in den Analysen nur bedingt Berücksichtigung finden. Zudem weisen die Strukturen durch die hohe textile Dehnfähigkeit ein extrem großes Verformungsvermögen auf, was unter extremen Einwirkungen zu Instabilitäten führen könnte. Ebenfalls ist anzumerken, dass oftmals weitere konstruktive Elemente wie Randseile oder Gurte den Systemen hinzugefügt wurden, um bestimmte Anschluss- oder Interaktionspunkte zu vereinfachen. Durch diese Addition entstehen zusätzliche Effekte, die das reine Interaktionsverhalten zwischen den Druckelementen und der Membran beeinflussen. Bei der Betrachtung der



3-15 Tension Pavilion von Geoff Morrow (2016)

meisten Projekte zeigt sich weiter, dass eine zuvor durchgeführte Formfindung unumgänglich ist, teilweise aber nicht oder nur unzureichend durchgeführt wurde. Dieser Aspekt verdeutlicht, dass das ohnehin schon komplexe Tragverhalten reiner Tensegrity-Strukturen durch eine Interaktion mit textilen Membranen noch komplexer wird.

Im Gegensatz zu den reinen Tensegrity-Strukturen scheint eine zeitliche Unterteilung der Entwicklung der Tensegrity-Membran-Strukturen in drei Perioden (siehe Abschnitt 2.1) als nicht sinnvoll, vielmehr bietet es sich an, die Entwicklung der Tensegrity-Membran-Strukturen an die dritte Periode der Tensegrity-Strukturen anzugliedern. Im Grunde wurden die Idee der Verbindung von Tensegrity-Struktur und Membranfläche bereits innerhalb der ersten Tensegrity-Periode aufgeführt, da zu diesem Zeitpunkt aber weder das Tragverhalten der reinen Tensegrity-Strukturen, noch das Tragverhalten von textilen Membranen umfassend erforscht war, blieb es bei den benannten Konzepten und Visionen. Die eigentliche Entwicklung von Tensegrity-Membran-Strukturen und vor allem die konstruktive Umsetzung erster Experimentalbauten beginnen erst mit der dritten Periode der Tensegrity-Strukturen.

3.2 Charakteristik von Tensegrity-Membran-Strukturen

Nach einem umfassenden Einblick in die Entwicklung der Tensegrity-Membran-Strukturen sollen nachfolgend die Eigenschaften dieser Strukturen näher betrachtet werden. Dabei sollen sowohl der ästhetische Charakter, das mechanische Tragverhalten und die strukturellen Potentiale herausgearbeitet werden und in Hinblick auf die bereits erlangten Erkenntnisse mit ebenfalls diesen von klassischen Tensegrity-Strukturen verglichen werden. Darüber hinaus erfolgt vorab ein kurzer Einschub über die wichtigen Grundlagen zum Tragverhalten textiler Membrane, da diese Kenntnisse notwendig sind, um dem folgend beschriebenen Interaktionsverhalten der Tensegrity-Membran-Strukturen folgen zu können.

3.2.1 Tragverhalten Textiler Membrane

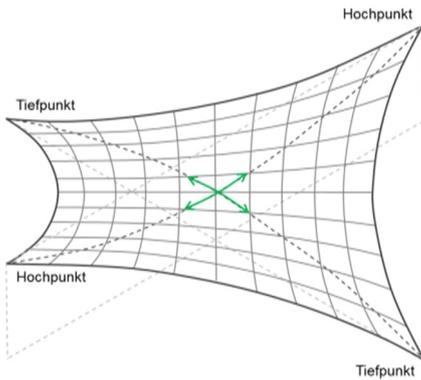
Textile Membrane werden heute in vielen Bereichen des Bauwesens eingesetzt, insbesondere der strukturelle Leichtbau ist durch diese effizienten und filigranen Tragwerke geprägt. Etwa zeitgleich mit dem Auftauchen der ersten Tensegrity-Strukturen wurden auch die ersten modernen textilen Membrankonstruktionen realisiert. In den 1950er Jahren überführte *Frei Otto* die seit Jahrtausenden bekannte Idee der Zeltkonstruktionen in die zeitgenössische Architektur. Für die Bundesgartenschauen in Kassel 1955 und in Köln 1957 (siehe Bild 3-16) konstruierte und errichtete er die ersten modernen textilen Membranbauten [Knippers, 2010, S.14f.].

Die textilen, beziehungsweise die technischen Membrane lassen sich in den Bereich der formaktiven Tragwerke einordnen. Diese Tragwerke kennzeichnen sich im Allgemeinen durch eine reine Zug- (Seile, Membrane) oder eine reine Druckbeanspruchung (Bögen, Schalen) der tragenden Elemente, was bedeutet, dass die Tragwerksgeometrie den einwirkenden Kräfte beziehungsweise deren Lastpfaden entsprechen muss. Die zugbeanspruchten formaktiven Tragwerke können aufgrund nicht vorhandener Stabilitätsprobleme zu den effizientesten Systemen gezählt werden [Knippers, 2010, S.134ff.].

Das Tragverhalten einer Membrankonstruktion ist in der Hauptsache von der Geometrie, der Vorspannung und der Materialität abhängig. Durch die Geometrie der Membran wird maßgeblich die doppelte Krümmung der Fläche beeinflusst. Diese muss zwangsläufig bei der mechanisch vorgespannten Membran antiklastisch verlaufen, was sich in einer bestimmten Formensprache der Strukturen ausdrückt. Für das Tragverhalten der Membrane ist die doppelte Flächenkrümmung von besonderer Bedeutung, durch die antiklastisch gekrümmte Fläche kann sich eine räumliche geometrische Steifigkeit ausbilden, die der Konstruktion neben der materiellen Steifigkeit zusätzlichen Widerstand gegenüber äußeren Einwirkungen verleiht. Die Vorspannung hat einen zusätzlichen Versteifungseffekt auf die Membrankonstruktion und ist von der Krümmung abhängig. Je kleiner die Flächenkrümmungen ausfallen, desto größer muss die aufgebrachte Vorspannung sein, welche wiederum in Fundamenten zu verankern ist [Knippers, 2010, S.138]. Der Lastabtrag erfolgt rein über



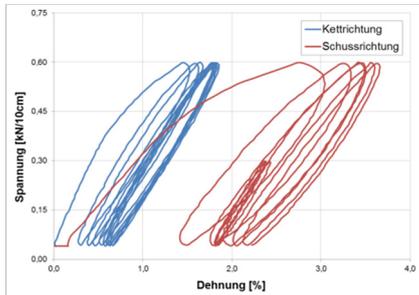
3-16 Sternwellenzelt über dem Tanzbrunnen in Köln



3-17 Der Lastabtrag einer beispielhaften antiklastisch gekrümmten Hyperfläche verläuft jeweils zu den beiden Hoch- und Tiefpunkten

Zugnormalkräfte, die sich über den gesamten Querschnitt gleichmäßig verteilen, wodurch die Membran als besonders effizientes Tragwerk angesehen werden kann [Grunwald, 2007, S.14]. Bild 3-17 zeigt eine antiklastisch gekrümmte Hyperfläche. Der Lastabtrag erfolgt jeweils zu den gegenüberliegenden Hoch-, bzw. Tiefpunkten.

Die materielle Steifigkeit der textilen Membrane hängt von deren Aufbau ab. Grundsätzlich besteht eine textile Membran aus einem beschichteten oder unbeschichteten Gewebe, wobei die beschichteten Gewebe, aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit, weitaus häufiger verwendet werden. Die mechanischen Eigenschaften der textilen Membran werden im Besonderen durch das Gewebe geprägt. Die drei gängigen Gewebe im Membranbau bestehen aus Polyester (PES), Glasfaser oder PTFE und sind mit PVC-, THV-, Silikon- oder PTFE-Beschichtungen versehen, und bedingen in ihrer Kombination verschiedene, nicht lineare Eigenschaften des Materials. Zum einen tritt durch das synthetische Gewebe ein stofflich nicht lineares elastisches Verhalten auf, das rein auf der Materialzusammensetzung beruht. Des Weiteren zeigt die textile Membran durch die herstellbedingte Struktur der Gewebe ein anisotropes Materialverhalten. Durch den Webvorgang weisen die Schussfäden im Gegensatz zu den Kettfäden eine wesentlich größere Welligkeit auf, diese unterschiedliche Welligkeit bedingt ein richtungsabhängiges Dehn- und somit Materialverhalten. Auch ist die gewebte Struktur dafür verantwortlich, dass eine direkte Interaktion der Geweberichtungen vorliegt [Seidel, 2008, S.48ff.].



3-18 Beispielhaft abgebildetes Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer PES/PVC Membran Type I

Diese Herstellungseffekte, beziehungsweise deren Überlagerung werden im biaxialen Zugversuch der textilen Membranen deutlich. In entsprechenden Spannungs-Dehnungs-Diagrammen ist deutlich das richtungsabhängige Dehnverhalten einer textilen Membran erkennbar. Bild 3-18 zeigt beispielhaft das Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines Polyester-gewebes mit einer PVC-Beschichtung. Der Effekt der unterschiedlichen richtungsabhängigen Dehnungen der Kett- und Schussrichtung ist gut erkennbar. Auch ist in der Schussrichtung zu Beginn der Lastaufbringung eine verhältnismäßig hohe Dehnung ohne entsprechende Kraftaufnahme erkennbar, welche sich vor allem durch die hohe Welligkeit der Fäden begründen lässt [Seidel, 2008, S.51f.].

Zusammenfassung

Insgesamt kann für die textilen Membrane festgehalten werden, dass sich die hohen Steifigkeiten der Membrankonstruktionen zum einen durch die Materialwahl, und zum anderen durch eine entsprechende Geometrie erreichen lassen. Diese Eigenschaften erlauben den Bau leichter und effizienter Konstruktionen, allerdings bedingt das hochgradig nicht lineare Materialverhalten zugleich einen entsprechend hohen Berechnungsaufwand und die relativ leichten Flächentragwerke fordern oftmals schwere Fundamentkörper, um erforderliche Vorspannkkräfte in den Baugrund abzutragen [Knippers, 2010, S.134ff.].

3.2.2 Strukturelle Ästhetik

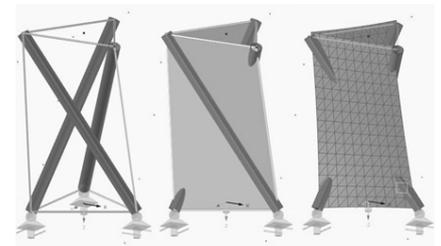
Der Unterschied zwischen Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen liegt in der Hauptsache in der Ausbildung des kontinuierlichen Zugsystems, da bei ersterem rein lineare, und bei zweitem vorrangig flächige Zugelemente Verwendung finden. Damit bleiben die bereits vorher beschriebenen gestalterischen Merkmale von Tensegrity-Strukturen (siehe Abschnitt 2.3.4) weitgehend auch bei den Tensegrity-Membran-Strukturen erhalten. Das bedeutet, dass auch bei den Tensegrity-Membran-Strukturen eine klare visuelle Trennung der konstruktiven Elemente mit unterschiedlichen Beanspruchungen vorgenommen wird, die Druckelemente bleiben in Art und Weise erhalten, die Zugelemente werden durch die Verwendung von Membranen nicht mehr linear sondern flächig ausgeführt. Da es sich bei den textilen Membranen um hocheffiziente und leichte Materialien handelt, bleibt die spürbare Leichtigkeit, trotz der Verwendung einer Art Hülle weitgehend erhalten. Durch die Interaktion der Druckelemente und der Membranfläche entstehen, wie auch bei den Tensegrity-Strukturen markante lokale Bereiche an denen eine gezielte Kraftumlenkung erfolgt. Die Verwendung der Membrane als raumabschließende und raumdefinierende Konstruktionselemente erweitert das gestalterische Potential der Strukturen, für den Einsatz im architektonischen Kontext, gegenüber den Tensegrity-Strukturen [Meeß-Olsohn, 2002].

3.2.3 Strukturelle Eigenschaften

Das globale Tragverhalten von Tensegrity-Membran-Strukturen lässt sich aus den bereits gewonnenen Erkenntnissen der Tensegrity-Strukturen ableiten. Das kontinuierliche Zugsystem wird allerdings in der Hauptsache anstelle der Seile durch die Membranfläche ausgebildet. Die Druckelemente liegen ebenfalls maßgeblich diskontinuierlich vor und bilden kein zusammenhängendes System aus. Durch die Verwendung der strukturell wirksamen Membrane entstehen jedoch Unterschiede, im Vergleich mit dem lokalen Tragverhalten klassischer Tensegrity-Strukturen. Die Beschreibung des qualitativen Tragverhaltens einer reinen Tensegrity-Struktur erfolgte anhand des dreieckförmigen Twist-Elements, dem kleinsten in sich geschlossenem Grundelement (siehe Abschnitt 2.2.2). Für eine bessere Vergleichbarkeit der Strukturen wird somit auch das Tragverhalten der Tensegrity-Membran-Strukturen, in Teilen, an Twist-Elementen beschrieben (siehe Bild 3-19), die mit zusätzlichen Membranelementen ausgestattet wurde [Ratschke, 2016].

Systemaufbau

Tensegrity-Membran-Strukturen bestehen grundsätzlich aus stabförmigen Druckelementen und flächigen Membranen. Bei der Recherche gebauter Projekte hat sich bereits gezeigt, dass durchaus, auch für den reinen Membranbau, typische Randseile und -gurte genutzt werden, um die Membranflächen mit den Druckstäben zu koppeln [Meeß-Olsohn, 2004], [Riether, 2015]. Die Konfiguration von Tensegrity-Membran-Strukturen kann in Anlehnung an typische Tensegrity-Konfigurationen

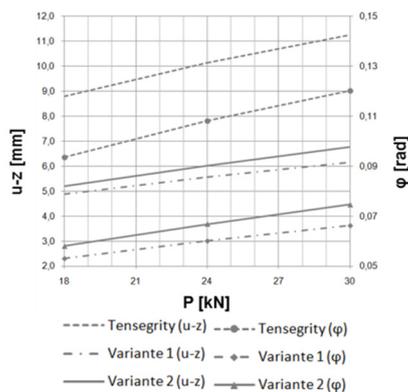


3-19 Visualisierung von drei FE-Modellen, Tensegrity-Twist-Element (links), Tensegrity-Membran-Twist-Elemente mit unterschiedlichem Aufbau (mittig und rechts)

vorgenommen werden, die linearen Zugelemente können dabei in ihrer Lage durch textile Membrane ersetzt werden [Peña Villamil, 2010]. Ob entsprechende Randseile und –gurte, zum Beispiel zum Vorspannen der Membran, oder zur konstruktiven Verbindung von Druckstäben und Membran notwendig sind, muss im Einzelfall entschieden werden. Druckelemente und textile Membran stehen aber, ungeachtet eventuell weiterer Elemente, als konstruktive Elemente im Vordergrund, da sie den primären Lastabtrag leisten. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass auch die Konfigurationen von Tensegrity-Membran-Strukturen auf rotations-symmetrischen Geometrien aufbauen. Dies liegt in der Natur der Tensegrity-Strukturen und der grundsätzlichen Idee des Kräftekurzschlusses im System.

Lastabtrag

Die numerische Untersuchung eines dreieckförmigen Tensegrity-Twist-Elements mit zwei vergleichbaren Konfigurationen von Tensegrity-Membran-Strukturen hat gezeigt, dass ein sehr ähnliches Grundverhalten der drei modellierten Systeme vorliegt. Generell reagieren Tensegrity-Grundelemente mit einer gegensätzlichen Verdrehung der Polygone auf Belastungsänderungen. Durch diese Verdrehung stellt sich eine erhöhte geometrische Steifigkeit des Systems, als Widerstand gegenüber den Einwirkungen ein. Dieser Sachverhalt konnte genauso bei den beiden untersuchten Tensegrity-Membran-Strukturen identifiziert werden. Die Verformung infolge äußerer Belastung stellte sich bei den beiden Tensegrity-Membran-Strukturen geringer ein, als bei dem reinen Tensegrity-System. Die nachfolgende Grafik bietet einen Überblick der Verformungen der drei Systeme. Die Tensegrity-Membran-Strukturen sind in Bild 3-20 mit Variante 1 und 2 bezeichnet, sie unterscheiden sich in der Weise, wie die Membran integriert wurde. Detaillierte Informationen zur Studie sind in der entsprechenden Veröffentlichung [Ratschke, 2016] aufgezeigt.



3-20 Last-Verformungs-Diagramm zum Vergleich verschiedener Konfigurationen von Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen

Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die integrierte textile Membranfläche an der Stabilisierung des Elementes beteiligt wird. Im Vergleich zu den abnehmenden Verformungen infolge der Einbindung mehrerer Membranfläche, nehmen die Schnittgrößen der einzelnen druckbeanspruchten Elemente nur geringfügig zu. Im Gegensatz zur reinen Tensegrity-Struktur verursacht das Einbinden der Membranflächen zusätzliche Zugkräfte. Diese Kräfte bedingen den beschriebenen Anstieg der Schnittgrößen in den Druckelementen [Ratschke, 2016, S.9]. Ebenfalls ist eine geringere Verformungszunahme der Tensegrity-Membran-Strukturen infolge steigender Belastung erkennbar. Hier zeigt sich, dass die Stabilisierung über die textile Membran gewährleistet wird. Auch Lars Meeß-Olsohn kommt in seiner Arbeit zu der Erkenntnis, dass die Verformungen der Tensegrity-Membran-Strukturen abnehmen, da die Membranflächen der Verdrehung der Polygonzüge unter Belastung entgegen wirken [Meeß-Olsohn, 2004, S.118]. Eine detaillierte Betrachtung der numerischen Studie ist im Rahmen dieser Arbeit nicht erforderlich, da lediglich das globale Tragverhalten von Tensegrity-Membran-Strukturen an dieser Stelle veranschaulicht werden soll.

3.2.4 Synergieeffekte in Tensegrity-Membran-Strukturen

Sowohl die klassischen Tensegrity-Strukturen, als auch die textilen Membrankonstruktionen weisen, je nach Anwendung, bestimmte nachteilige Eigenschaften auf. Besonders die baupraktische Eignung, beziehungsweise der Vorwurf einer mangelnden baupraktischen Eignung [Paronesso, 2003, S.8] der Tensegrity-Strukturen ist dabei für diese Forschungsarbeit von Bedeutung. Durch die Verbindung der Konstruktionsprinzipien von Tensegrity-Strukturen und konventionellem Membranbau zu einer kombinierten Tragstruktur, können wesentliche Stärken der jeweiligen Grundsysteme genutzt werden, um die strukturellen Nachteile des jeweils anderen Systems in der Tensegrity-Membran-Struktur zu verbessern. Nachfolgend werden die wesentlichen Synergieeffekte der hybriden Struktur diskutiert.

Das verhältnismäßig große Verformungsvermögen der Tensegrity-Strukturen lässt sich unter anderem auf die rein linearen vorgespannten Zugelemente zurückführen, diesen steht lokal nur die materielle Steifigkeit als Widerstand gegenüber einwirkenden Kräften zur Verfügung, die geometrische Steifigkeit erhöht sich erst mit einsetzender Verformung des Gesamtsystems. Werden die Zugelemente einer klassischen Tensegrity-Struktur durch textile Membrane ersetzt, kann sich zusätzlich zu der lokalen materiellen Steifigkeit auch eine lokale geometrische Steifigkeit ausbilden, da die textilen Membrane lokale antiklastische Krümmungen aufweisen, welche die Struktur zusätzlich stabilisieren [Alpermann, 2014, S.10ff.].

Im Falle von Beschädigungen, oder dem Versagen einzelner Elemente einer Tensegrity-Struktur, besteht eine hohe Anfälligkeit eines Systemversagens. Durch die Flächentragwirkung kann bei der Verwendung einer textilen Membran ein schlagartiges Versagen bei den Tensegrity-Membran-Strukturen vermieden werden. Lars Meeß-Olsohn hat dieses Verhalten in einem seiner Experimente beobachten können, bei einer Belastungsserie des Textegritty-Domes kam es zum plötzlichen Versagen einer Naht. Die angeschlossene Membranfläche riss durch die schlagartige Überlastung ein. Trotzdem hat sich das Gesamtsystem durch eine entsprechende geometrische Umlagerung der Pavillonstruktur insgesamt stabilisiert [Meeß-Olsohn, 2004, S.111].

Das Fehlen flächiger Elemente bei den reinen Tensegrity-Strukturen hat zudem zur Folge, dass keine räumlichen Abschlüsse realisiert werden können, dies kann unter anderem auch als gestalterischer Nachteil angesehen werden [Shigematsu, 2008, S.1]. Für eine architektonische Umsetzung ist anzumerken, dass durch den fehlenden Raumabschluss reiner Tensegrity-Strukturen auch jeglicher Witterungsschutz entfällt. Der Einsatz textiler Membranelemente bietet hingegen die Möglichkeit reale erfahrbare Raumabschlüsse auszubilden [Meeß-Olsohn, 2004, S.44f.] und somit auch bauphysikalischen Anforderungen gerecht zu werden.

Das Aufbringen der Vorspannkraft an Tensegrity-Strukturen erfordert eine sehr hohe Genauigkeit, kleine Abweichungen der aufgebrachten Spannkraft, beispielsweise in Form von Abweichungen der Seillängen, bringen ein statisches Ungleichgewicht in die Struktur ein. Dieser wesentliche Nachteil entsteht vor allem dadurch, dass eine Vielzahl einzelner Zugelemente nacheinander vorgespannt, beziehungsweise eingebaut werden und die Interaktion an der Gesamtstruktur erst im Nachhinein erfolgt [Peters, 1998, S.97]. Während des Einbaus interagieren die einzelnen Elemente miteinander und wirken sich so teilweise ungünstig auf den abschließenden Gleichgewichtszustand der Gesamtstruktur aus. Die textile Membran, als integrierte Zugfläche betrachtet, kann hingegen als ein flächiges Zugelement vorgefertigt werden, die Vorspannkraft wird entsprechend über den Zuschnitt definiert und pendeln sich gleichmäßig in der Gesamtstruktur nach Abschluss der Montage ein. Als Beispiel kann hier der Textegrid-Dome angeführt werden, dessen Montage nach dem beschriebenen Prinzip verlief [Meeß-Olsohn, 2004, S.97].

Bisher wurden nur die Schwächen der reinen Tensegrity-Strukturen und die darauf positiven Einflüsse der textilen Membrane erläutert, aber auch die reine Membran-Struktur weist insbesondere zwei Schwachstellen auf, welche durch das Tensegrity-Prinzip positiv beeinflusst werden können. Textile Membrane müssen, wie auch Seile, zwingend vorgespannt werden, die Vorspannung bedarf dabei einer Größe, die im Fall auftretender Druckbeanspruchungen lediglich einen Abbau der bestehenden Vorspannung verursacht. Es ist somit sicherzustellen dass unter jeglichen Einwirkungskombinationen ein Mindestmaß an Zugbeanspruchung im System erhalten bleibt, um dessen Stabilität zu gewährleisten. Die Vorspannkraft ist folglich verhältnismäßig groß und benötigen in der Regel zur sicheren Lastabtragung große Verankerungskörper. An der klassischen Tensegrity-Struktur tritt der Effekt ein, dass sich die Vorspannkraft in der Struktur, infolge des rotationssymmetrischen Aufbaus, kurzschließen, dieser Effekt kann auch auf die Tensegrity-Membran-Struktur übertragen werden und damit deutlich zur Materialeinsparung beitragen, da die Verankerungskörper entfallen [Meeß-Olsohn, 2004, S.38].

Weiter ist die Formenvielfalt reiner mechanisch vorgespannter textiler Membran-Strukturen beschränkt, da diese zur Aktivierung der geometrischen Steifigkeit, global betrachtet, eine antiklastische Krümmung erfordern, was die Vielfalt in der Hauptsache auf reine Hyparflächen oder aus Hyparflächen zusammengesetzte Strukturen begrenzt. Diese werden in der Regel durch die Anordnung verschiedener Hoch- und Tiefpunkte gebildet. Die Hoch- und Tiefpunkte wiederum werden über zusätzliche Seile und Maste vorgegeben. Im Gegensatz dazu, ermöglicht die Anordnung einzelner, in der Hauptsache diskontinuierlich vorliegender Druckelemente, das Einbringen lokaler Umlenkkräfte innerhalb der Membranfläche, infolge derer sich lokale antiklastische Krümmungen ausbilden. Diese führen dazu, dass die textile Membran ihre notwendige geometrische Steifigkeit in unabhängigen lokalen Teilbereichen ausbilden kann, ohne eine Abspannung durch externe Bauteile vorzunehmen. Es lassen

sich somit durchaus global synklastisch geformte Strukturen erzeugen, welche als Erweiterung der Formenvielfalt des konventionellen Membranbau angesehen werden können. Als Beispiel für die benannte Erweiterung der Formenvielfalt kann an dieser Stelle der temporäre Pavillon MOOM benannt werden [Popp, 2012].

3.3 Definition von Tensegrity-Membran-Strukturen

Der Begriff Tensegrity-Membran-Struktur wurde in der Literatur bisher nicht weiter definiert, die einzige Auseinandersetzung mit einer Begrifflichkeit, zur Beschreibung dieser Strukturen, wurde von Lars Meeß-Olsohn vorgenommen. Er kreierte den Begriff *Textegrity*, in Anlehnung an die Wörter *Textile Membrane* und *Tensegrity* [Meeß-Olsohn, 2004, S.45]. Der Begriff *Textegrity* bezeichnet dabei explizit: „räumliche, statisch in sich geschlossene Tragwerke [...], deren Elemente ausschließlich durch Normalkräfte beansprucht werden. Die diskontinuierlichen, nichthierarchischen Druckstäbe sind räumlich überlagert und werden an ihren Enden durch ein kontinuierliches System von flächigen und / oder linearen Zugelementen vorgespannt und in ihrer Lage fixiert.“ [Meeß-Olsohn, 2004, S.45]. Lars Meeß-Olsohn bezieht seine Beschreibung auf eine sehr eng gefasste Definition von Tensegrity-Konstruktionen, in Abgrenzung zu Tensegrity-ähnlichen Konstruktionen. Als Tensegrity-Konstruktionen sind nach Lars Meeß-Olsohn nur geschlossene Grundeinheiten, also Twist-Elemente, und deren Addition zulässig [Meeß-Olsohn, 2004, S.22].

In dem vorigen Kapitel wurde bereits eine umfangreiche Auseinandersetzung mit den Definitionen des Tensegrity-Prinzips und zugehöriger Begrifflichkeiten vorgenommen (siehe Abschnitt 2.3). Auch in dem folgenden Abschnitt soll eine entsprechend Definition für die Tensegrity-Membran-Strukturen entwickelt werden, da diese für eine baupraktische Anwendung der Strukturen als erforderlich angesehen wird. Die Bezeichnung Tensegrity-Membran-Struktur wird als geeignete Wahl für die beschriebenen Strukturen angesehen. Im Gegensatz zu dem, von Lars Meeß-Olsohn definierten Begriff *Textegrity*, wurde bisher keine nachweisliche Definition des Begriffs Tensegrity-Membran-Struktur vorgenommen, weshalb dieser frei von Einschränkungen ist, obwohl er bereits in verschiedenen Quellen zur Benennung entsprechender Projekte genutzt wurde [Shigematsu, 2008, S.1], [Tu, 2016, S.2], [Ratschke, 2016, S.1].

Des Weiteren soll im folgenden Abschnitt geklärt werden, ob Tensegrity-Membran-Strukturen eine eigene Tragwerkstypologie darstellen, oder ob sie den Tensegrity-Strukturen zugeordnet werden können. Die Projekt-recherche und die Erarbeitung der Charakteristika von Tensegrity-Membran-Strukturen haben bereits viele Übereinstimmungen mit reinen Tensegrity-Strukturen aufgezeigt. Der gestalterische Charakter von Tensegrity-Strukturen ist ebenso in den Tensegrity-Membran-Strukturen wiederzufinden, wie auch das übergeordnete strukturelle Verhalten der Tensegrity-Strukturen, auf das der Tensegrity-Membran-Strukturen übertragbar ist. Es wird somit vermutet, dass die Tensegrity-Membran-Strukturen als (Weiter-) Entwicklung der Tensegrity-Strukturen zu behandeln sind und nicht als eine eigenständige Tragwerkstypologie. Um die vermutete Zuordnung zu überprüfen, wird die vorher festgelegte Definition des Tensegrity-Prinzips folgend auf ihre Eignung als Definition für Tensegrity-Membran-Strukturen überprüft (siehe Abschnitt 2.3.4). Die ersten zehn Kriterien werden daher nachfolgend übernommen und auf ihre Eignung in

Bezug auf die Tensegrity-Membran-Strukturen diskutiert. Darauf aufbauend wird noch ein weiteres elftes Kriterium neu eingeführt.

1. Es liegt eine räumliche Interaktion von diskontinuierlich angeordneten, überwiegend lokal vorhandenen Druckelementen und einem übergeordneten System aus Zugelementen vor.

Bei den Tensegrity-Membran-Strukturen erfolgt der strukturelle Aufbau nahezu identisch mit den reinen Tensegrity-Strukturen. Die Unterscheidung liegt allein in der Ausbildung des übergeordneten Zugsystems. Nach bisheriger Definition widersprechen die Tensegrity-Membran-Strukturen in diesem Punkt damit nicht dem Tensegrity-Prinzip.

2. Die Stabilisierung der Gesamtstruktur erfolgt in der Hauptsache durch das übergeordnete Zugsystem.

Dieses Kriterium trifft ebenfalls in vollem Umfang auf die Tensegrity-Membran-Strukturen zu.

3. Erst die Diskontinuität der Druckelemente schafft die Notwendigkeit eines kontinuierlichen Zugsystems.

Auch diese Notwendigkeit des kontinuierlichen Zugsystems trifft auf die Tensegrity-Membran-Strukturen zu.

4. Trotz ihrer Diskontinuität ist der direkte Kontakt zwischen einzelnen Druckelementen möglich, sofern das übergeordnete Zugsystem maßgebend für die Stabilisierung des Gesamtsystems bleibt.

Bei der Recherche realisierter Tensegrity-Membran-Strukturen ist dieser Sachverhalt bisher nicht aufgetreten. Grundsätzlich ist die Auseinandersetzung damit bereits bei den reinen Tensegrity-Strukturen erfolgt und somit auch für die Tensegrity-Membran-Strukturen vorstellbar. Da die flächig wirksamen Membranen allerdings einen positiven Einfluss auf die Stabilität von Tensegrity-Membran-Strukturen haben, ist die statische Notwendigkeit dieser Maßnahme nicht in dem Umfang gegeben, wie bei den reinen Tensegrity-Strukturen.

5. Der Kräftekurzschluss in der Gesamtstruktur ist theoretisch nur bei rotationssymmetrischen oder radialsymmetrischen Systemen möglich und generell wünschenswert. In der baupraktischen Umsetzung von Tensegrity-Strukturen muss allerdings eine Lagesicherung vorgesehen werden. Durch diesen Aspekt kann der Kräftekurzschluss zumindest in den Lagerungsbereichen nicht oder nur bedingt realisiert werden.

Auch die Tensegrity-Membran-Strukturen nutzen eine grundsätzliche Rotations- oder Radialsymmetrie zur Sicherstellung des Kräftekurzschlusses. Um auch der konstruktiven Umsetzbarkeit Rechnung zu tragen gibt es ebenfalls Lagerungsbereichen, die

einen ganzheitlichen Kräftekurzschluss in den Systemen stören können, allerdings im baupraktischen Kontext unabdingbar sind.

6. Die Formfindung des Systems erfolgt durch eine gleichmäßige Kräfteverteilung im Gesamtsystem und wird erst durch Vorspannung einzelner Zuelemente und einem grundlegenden Verformungsvermögen ermöglicht

Auch dieses Kriterium trifft bei den Tensegrity-Membran-Strukturen zu.

7. Die spezifische und grundlegend unveränderbare Beanspruchung der konstruktiven Elemente ist strukturell eine Besonderheit der Tensegrity-Strukturen. Strukturell werden verschiedene Lastzustände durch neue Gleichgewichtszustände aufgenommen

Die klare Trennung in druck- und zugbeanspruchte Elemente bleibt auch bei den Tensegrity-Membran-Strukturen erhalten. Entsprechend stellen sich lastabhängige Gleichgewichtszustände ein und die Elemente behalten ihre unveränderbare qualitative Beanspruchung.

8. Gestalterisch werden die vorliegenden Kräfte durch die unterschiedliche Ausbildung der konstruktiven Elemente visualisiert und erst damit wird das strukturelle Prinzip der Konstruktionen dargestellt.

Auch bei den Tensegrity-Membran-Strukturen stellt die unveränderbare grundlegende Beanspruchung der konstruktiven Elemente eine gestalterische Besonderheit dar.

9. Besonders die Verwendung von hocheffizienten leichten Zuelementen verleiht den Tensegrity-Strukturen eine spürbare Leichtigkeit. Die überwiegend lokal vorliegenden Druckelemente scheinen durch die Leichtigkeit des übergeordneten Zugsystems nahezu schwerelos.

Durch die Verwendung hocheffizienter textiler Membrane bleibt diese Leichtigkeit auch bei den Tensegrity-Membran-Strukturen erhalten. Die Druckelemente wirken nach wie vor nahezu schwerelos.

10. Ein ästhetisches Merkmal von Tensegrity-Strukturen sind die lokal sichtbaren räumlichen Knotengleichgewichte. Diese bestehen durch die markante Umlenkung der Zugkräfte an den Druckelementen und verleihen den Tensegrity-Strukturen durch ihr regelmäßiges Auftreten ein visuelles Merkmal.

Die lokal sichtbaren Knotengleichgewichte bleiben auch bei den Tensegrity-Membran-Strukturen als typisches Gestaltungsmerkmal erhalten.

11. Ein Merkmal, welches bei den Tensegrity-Strukturen nicht auf-taucht, ist der, durch die Verwendung von textilen Membranen, mögliche Raumabschluss. Neben der Erfüllung bauphysikali-scher Anforderungen, kann dieser Aspekt als zusätzliches ge-staltgebendes und raumdefinierendes Merkmal der Tensegrity-Membran-Strukturen angesehen werden.

Die Tensegrity-Membran-Strukturen lassen sich in Gänze den Definiti-
onskriterien von Tensegrity-Strukturen zuordnen und werden somit im
Rahmen dieser Arbeit als Weiterentwicklung des Tensegrity-Prinzips
verstanden. Strukturell und gestalterisch bieten sie darüber hinaus sogar
noch erweiterte Einsatzmöglichkeiten, da die Membran einerseits zusätz-
lich stabilisierend wirkt, und andererseits dem System neue architektoni-
sche Anwendungen ermöglicht.

3.4 Klassifizierung von Tensegrity-Membran-Strukturen

Analog zu den Tensegrity-Strukturen werden an dieser Stelle auch die recherchierten Tensegrity-Membran-Strukturen anhand der vorher festgelegten Definition klassifiziert. Die Bewertung erfolgt ebenfalls anhand der folgenden Prädikate: *voll erfüllt*; *weitgehend erfüllt*; *bedingt erfüllt*; *kaum erfüllt* und *nicht erfüllt*. Somit kann überprüft werden, ob ein Projekt in der Hauptsache den Kriterien des Tensegrity-Prinzips folgt und als Tensegrity-Membran-Struktur verstanden werden kann. Wie bereits bei der vorherigen Klassifizierung der Tensegrity-Strukturen (siehe Abschnitt 2.4.3), soll auch nachfolgend ein gewisses Maß an Einschränkungen nicht zum direkten Ausschluss der Projekte führen. Im Anschluss an die grafische Zusammenfassung der Einordnung werden die gebauten Beispiele im Einzelnen kurz diskutiert.

	Textegrity I	Textegrity Dome	tensegrity membrane structure	Pavillon MOOM	Tensegrity Dome	Underwood Pavillon	Form Follows Tension	Hanabi Pavillon	Tension Pavillon
1. Räumliche Interaktion der konstruktiven Elemente	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(richtungsabhängig)</small>	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(richtungsabhängig)</small>	voll erfüllt
2. Stabilisierung durch kontinuierliches Zugsystem	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(richtungsabhängig)</small>	bedingt erfüllt <small>(Sekundärkonstr.)</small>	voll erfüllt	kaum erfüllt <small>(Unterspannung)</small>	bedingt erfüllt <small>(Sekundärkonstr.)</small>	weitgehend erfüllt <small>(Tensegrity-Ring)</small>
3. Zugkontinuität durch Druckdiskontinuität	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	nicht erfüllt <small>(biegeaktive Elemente)</small>	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(Tensegrity-Ring)</small>
4. Zugstabilisierung trotz Druckelementkontakt	trifft nicht zu	trifft nicht zu	trifft nicht zu	trifft nicht zu	trifft nicht zu	trifft nicht zu	bedingt erfüllt <small>(biegeaktive Elemente)</small>	trifft nicht zu	trifft nicht zu
5. Kurzschluss der Zugkräfte im Gesamtsystem	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(richtungsabhängig)</small>	bedingt erfüllt <small>(Sekundärkonstr.)</small>	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(Sekundärkonstr.)</small>	weitgehend erfüllt <small>(Tensegrity-Ring)</small>
6. Gleichgewicht durch Vorspannung	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(Sekundärkonstr.)</small>	voll erfüllt	bedingt erfüllt <small>(biegeaktive Elemente)</small>	weitgehend erfüllt <small>(Sekundärkonstr.)</small>	weitgehend erfüllt <small>(Tensegrity-Ring)</small>
7. Strukturelle Trennung der Beanspruchungen	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	bedingt erfüllt <small>(biegeaktive Elemente)</small>	voll erfüllt	voll erfüllt
8. Visualisierung des strukt. Prinzips durch Auflösung	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	bedingt erfüllt <small>(biegeaktive Elemente)</small>	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(Tensegrity-Ring)</small>
9. Materielle Leichtigkeit und schwebende Druckelemente	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	weitgehend erfüllt <small>(Sekundärkonstr.)</small>	voll erfüllt	kaum erfüllt <small>(durchlaufende Stabelemente)</small>	weitgehend erfüllt <small>(Sekundärkonstr.)</small>	bedingt erfüllt <small>(keine Verbindung mit Membran)</small>
10. Lokale Umlenkung der Zugkräfte	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	kaum erfüllt <small>(durchlaufende Stabelemente)</small>	weitgehend erfüllt <small>(fehlend. Formfindung)</small>	weitgehend erfüllt <small>(Tensegrity-Ring)</small>
11. Raumabschluss und Raumdefinition	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	voll erfüllt	bedingt erfüllt <small>(nur in Membranebene)</small>	voll erfüllt	voll erfüllt
Anmerkungen	reine Twist-Erscheinung	klassische Tensegrity-Erscheinung	lediglich digitaler Entwurf	klare strukt. und gestalt. Erscheinung	keine reale Umsetzung	Twist-Elemente mit Membranen eingekleidet	biegeaktive Elemente dominieren	Einschränkungen in der konstruktiven Umsetzung	Tensegrity-Struktur lagert Membranfläche
Ergebnis	Tensegrity-Membran	Tensegrity-Membran	Tensegrity-Membran	Tensegrity-Membran	Tensegrity-Membran	Tensegrity-Membran	Biegeaktive Struktur	Tensegrity-Membran	Tensegrity

Die beiden Entwürfe von Lars Meeß-Olsohn, die Skulpturen Textegrity I und der Messestand Textegrity-Dome, erfüllen im vollen Umfang die Kriterien des Tensegrity-Prinzips und können folglich als Tensegrity-Membran-Strukturen bezeichnet werden. Insbesondere durch die drei Einheiten der Skulptur Textegrity I (siehe Abschnitt 3.1.2) wird die Weiterentwicklung einer reinen Tensegrity-Struktur zur Tensegrity-Membran-Struktur deutlich, allerdings muss angemerkt werden, dass bei der Struktur Textegrity I keine weiteren Nutzungsanforderungen gestellt wurden. Das Potential einer erweiterten Funktionalität ist insbesondere bei der Struktur Textegrity-Dome erkennbar.

Die tensegrity membrane structure von Mizuki Shigematsu, Masato Tanaka und Hirohisa Noguchi ist lediglich ein Entwurf, kann aber grundlegend in den Bereich der Tensegrity-Membran-Strukturen eingeordnet werden. Im Rahmen einer Umsetzung würden sicherlich konstruktive Randbedingungen eine gewisse Überarbeitung des Entwurfs erfordern, dennoch zeigt das Projekt eindrucksvoll die gestalterischen und funktionalen Möglichkeiten der strukturellen Entwicklung des Tensegrity-Prinzips.

Der temporäre Pavillon MOOM erfüllt gestalterisch alle Kriterien die als Weiterentwicklung des Tensegrity-Prinzips definiert wurden. Besonders die klare Gliederung der Druckelemente in der Membranfläche verleiht dem Entwurf eine besondere gestalterische Ausdruckskraft. Strukturell erfordert diese Anordnung allerdings einige Ergänzungen, wie beispielsweise die Abspannung quer zu der Druckelementanordnung an den Pavillonenden. Wie auch schon bei den reinen Tensegrity-Strukturen werden auch hier gewisse Anpassungen in Bezug auf eine baupraktische Umsetzung akzeptiert. Sofern der wesentliche Charakter des Tensegrity-Prinzips in struktureller, als auch in gestalterischer Hinsicht erkennbar bleibt, werden diese Strukturen als Tensegrity-Membran-Strukturen eingeordnet, was auf den MOOM-Pavillon eindeutig zutrifft.

Der Entwurf Tensegrity Dome von Diana Maritza Peña Villamil weist strukturell einige Einschränkungen auf. Da der Entwurf physikalisch nur im Modellmaßstab erfolgte, sind diese Einschränkungen erst in der numerischen Berechnung aufgetreten, beziehungsweise aufgefallen. Ein stabiles Gleichgewicht konnte bei dem Entwurf nur durch das Einführen zusätzlicher Maste und Abspannungen erreicht werden. Da der grundlegende Charakter des Tensegrity-Prinzips dennoch im Vordergrund der Struktur steht, und die markanten gestalterischen Kriterien trotz der Abspannungen erkennbar bleiben, wird auch der Tensegrity Dome als Tensegrity-Membran-Struktur eingeordnet.

Der Underwood Pavillon erfüllt umfänglich die genannten Definitionskriterien und ist somit klar den Tensegrity-Membran-Strukturen zuzuordnen. Allerdings muss auch bei diesem Projekt ein Aspekt diskutiert werden, die grundlegende Stabilität erhält der Pavillon bereits durch den Zusammenbau von Stabelementen und Seilen, die Membrane werden erst nach Fertigstellung der unterschiedlichen Twist Elemente installiert. Somit

könnte davon ausgegangen werden, dass es sich eher um eine reine Tensegrity-Struktur handelt, welche mit Membranflächen verkleidet wurde. Da die Membran allerdings nach ihrem Einbau mit den Twist Elementen statisch interagiert, und die Membranflächen einen wesentlichen gestalterischen Aspekt des Entwurfs darstellen, wird auch dieser Pavillon als Tensegrity-Membran-Struktur klassifiziert.

Der Entwurf Form Follows Tension widerspricht in vielen Punkten dem Tensegrity-Prinzip. Zwar stellt er, strukturell betrachtet, eine Interaktion verschiedener konstruktiver Elemente dar, allerdings liegen nur die Seile und die Membran mit einer reinen Normalkraftbeanspruchung vor. Die Stabelemente werden in der Hauptsache aktiv auf Biegung beansprucht, um durch Rückstellkräfte eine Interaktion mit den Zugelementen sicherzustellen. Diese Beanspruchung beeinflusst auch die Gestaltung der Struktur, welche die wesentlichen Merkmale einer Tensegrity-Membran-Strukturen, beziehungsweise einer Tensegrity-Struktur vermissen lassen. Damit wird diese Struktur nicht als Tensegrity-Membran-Struktur klassifiziert, sondern den biegeaktiven Strukturen [Lienhard, 2014, S.12] zugeordnet.

Der Hanabi Pavillon kann eindeutig den Tensegrity-Membran-Strukturen zugeordnet werden. Zwar liegen gewisse strukturelle Fehler vor, jedoch lassen sich diese, in der Hauptsache, durch eine fehlende numerische Formfindung erklären. Explizit wurde auch bei dieser Struktur eine Abspannung eingeführt, um ein stabiles System zu erhalten, dies wirkt sich allerdings nur bedingt auf die gestalterische Umsetzung aus, sofern von der Faltenbildung der Membran abgesehen wird.

Eine besondere Konstruktion in diesem Kontext ist der Tension Pavillon von Geoff Morrow. Im Grunde erfüllt der Pavillon weitgehend mehrere benannten Kriterien, allerdings ist eine direkte Interaktion von Druckelementen und Membranfläche nicht gegeben, da ein Tensegrity-Ring vorliegt, welcher in sich stabil ist. Dieser Tensegrity-Ring dient der Membranfläche lediglich als Randalagerung. Damit fehlen auch die typischen gestalterischen Merkmale, die sich durch die direkte Interaktion von Membran und Druckelementen einstellen. Der Tension Pavillon kann definitiv als interessante Tensegrity-Struktur angesehen werden, allerdings wird er nicht zu den Tensegrity-Membran-Strukturen gezählt.

Zusammenfassung

Anhand der, in Abschnitt 2.3.4 festgelegten und der, in Abschnitt 3.3 erweiterten Kriterien des Tensegrity-Prinzips, wurden auch die Tensegrity-Membran-Strukturen klassifiziert. Es hat sich gezeigt, dass kleinere Einschränkungen für die Baubarkeit ebenso auftreten, wie bereits bei den Tensegrity-Strukturen, die Strukturen damit aber dennoch als Tensegrity-Membran-Strukturen eingeordnet werden können. Ebenfalls hat sich gezeigt, dass eine große Übereinstimmung der Tensegrity-Strukturen und der Tensegrity-Membran-Strukturen vorliegt, damit bestätigt sich die Annahme, dass die Tensegrity-Membran-Strukturen als Entwicklung im Kontext der Tensegrity-Strukturen, beziehungsweise des Tensegrity-

Prinzips zu verstehen sind. Insbesondere das letzte klassifizierte Projekt hat aber auch gezeigt, dass durchaus Abgrenzungen zwischen Tensegrity-Strukturen und Tensegrity-Membran-Strukturen notwendig sind. Es ist eine direkte Interaktion von Druckelementen und Membran erforderlich, um dem strukturellen und gestalterischen Charakter der Tensegrity-Membran-Strukturen zu entsprechen.

4 Referenzprojekt Pavillon MOOM

4 Referenzstruktur Pavillon MOOM

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit hat eine umfassende Auseinandersetzung mit dem Tensegrity-Prinzip (siehe Kapitel 2) stattgefunden, darauf aufbauend wurden die Tensegrity-Membran-Strukturen untersucht und in den Kontext des Tensegrity-Prinzips eingeordnet (siehe Kapitel 3). Der zweite Teil des Vorhabens befasst sich mit der Auswahl eines Referenzprojektes, anhand dessen die konstruktiven Elemente, die tragwerkstechnischen Parameter und das strukturelle Verhalten auf Basis einer prinzipiellen parametergestützten Analyse (siehe Kapitel 5) erforscht werden. Als Referenzprojekt wurde der Pavillon MOOM gewählt, die Wahl des Projektes wird nachfolgend erläutert. Die daran durchgeführte Parameterstudie wird durch eine Variantenstudie ergänzt, die auf Basis der getätigten Analysen eine günstige geometrische Ausprägung für das zweiachsige Tragverhalten der textilen Membran definiert, welche anschließend als Grundlage für eine konkrete Realisierung herangezogen werden kann. Eine konstruktive Umsetzung der gewählten Tensegrity-Membran-Struktur erfolgt dann in Form eines Demonstrators und wird im dritten und abschließenden Teil der Arbeit erläutert (siehe Kapitel 6 und Kapitel 7).

4.1 Auswahl der Referenzstruktur

Anhand des ausgewählten Referenzprojektes sollen zunächst detaillierte Erkenntnisse über das Tragverhalten und die konstruktive Umsetzung der konkreten Tensegrity-Membran-Struktur gewonnen werden. Dazu wird sich auch auf die bereits gewonnenen Erkenntnisse über die technischen Mechanismen der Strukturen orientiert (siehe Kapitel 3.2). Das detaillierte Verhalten der Referenzstruktur kann dann als Basis zur Entwicklung eines Demonstrators herangezogen werden, um eine Parameterstudie und eine Variantenstudie auf der Grundlage der gewählten Referenzstruktur, in Anlehnung an den Pavillon MOOM, durchzuführen. Dabei wird in der vorliegenden Arbeit keine erneute Berechnung des bereits temporär realisierten Pavillons MOOM durchgeführt. Die Referenzstruktur dient lediglich dazu, die Vorgehensweise der anwendungsorientierten konstruktiven Umsetzung anhand eines Demonstrators exemplarisch aufzuzeigen. Der gestalterische Entwurf von Tensegrity-Membran-Strukturen wird im weiteren Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt. Der Demonstrator soll dazu dienen, anhand einer kleinen und überschaubaren Konstruktion die experimentellen Fragestellungen in Bezug auf eine konstruktive Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen zu beantworten. Dabei liegt der Vorteil einer, vor allem in ihrer Größe begrenzten Struktur darin, konkrete konstruktive Prinzipien und damit einhergehende Fragestellungen zu extrahieren [Bögle, 2014, S.20f.].

Bei der Klassifizierung der recherchierten Tensegrity-Membran-Strukturen hat sich gezeigt, dass insgesamt sieben der in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Projekte in dieser Kategorie aufgeführt werden können (siehe Abschnitt 3.4):

- a) tensegrity membrane structure
- b) Tensegrity Dome
- c) Textegritty-Dome
- d) Hanabi Pavillon
- e) Underwood Pavillon
- f) Textegritty I
- g) temporärer Pavillon MOOM

Für eine zukünftige baupraktische Anwendung von Tensegrity-Membran-Strukturen geht es unter anderem auch darum, Möglichkeiten aufzuzeigen, dem Tensegrity-Prinzip im Bauwesen eine bisher fehlende Funktionalität der Strukturen zuzuweisen. Dies geschieht vor allem durch die Möglichkeit der Raumbildung und der damit verbundenen Schutzfunktion, die durch das Einführen der Membranflächen erreicht wird. Idealerweise sollte ein Referenzprojekt grundlegend eine sinnvolle Nutzung ermöglichen, ohne dabei zu komplexe strukturelle Mechanismen vorauszusetzen. Außerdem sollte das Referenzprojekt dazu dienen mögliche konstruktive Fragestellungen abzuleiten, die für eine spätere Umsetzung unumgänglich sind und darüber hinaus auf weitere Projekte übertragen werden können.

Durch den zuletzt benannten Aspekt der konstruktiven Ausbildung scheiden die Projekte aus, die nicht oder nur in einem skalierten Maßstab, wie beispielsweise als Arbeitsmodelle realisiert wurden, da hier keine konstruktiven Fragestellungen erarbeitet, beziehungsweise beantwortet wurden: a) tensegrity membrane structure von Mizuki Shigematsu, Masato Tanaka und Hirohisa Noguchi und b) Tensegrity Dome von Diana Maritza Peña Villamil.

Des Weiteren steht die grundsätzliche Geometrie der Strukturen in direktem Zusammenhang mit einer möglichen Nutzung. Bei radialsymmetrischen Konfigurationen stehen die Spannweite und die Konstruktionshöhe in Verbindung zueinander, somit bedingen zunehmende Spannweiten, beziehungsweise resultierende Grundflächen, entsprechend große Höhen der Gesamtkonstruktion. Dieser Aspekt führt einerseits zu funktionalen Einschränkungen und andererseits auch zu einem wesentlichen Anstieg der äußeren Belastungen, wie zum Beispiel Windlasten, da die Angriffsfläche mit steigendem Durchmesser um ein vielfaches zunimmt. Schon bei der Umsetzung des c) Textegritty-Domes mit einer Höhe von ca. 5 m zeigt sich [Meeß-Olsohn, 2004, S.83ff.], dass wesentlich größere Pavillonbauten mit diesem Prinzip nur noch eingeschränkt möglich sind. Gleiches trifft auf den d) Hanabi Pavillon zu.

Auch der e) Underwood Pavillon kann als Referenzprojekt ausgeschlossen werden, da eine Interaktion zwischen Membran und Stab nur im Zu-

sammenhang mit den vorhandenen Seilelementen stattfindet [Riether, 2015]. Die Membranflächen werden bei dieser Struktur erst nachträglich in die fertigen Tensegrity-Elemente eingearbeitet. Dadurch findet zwar eine Interaktion zwischen allen konstruktiven Elementen am Twist-Element statt, allerdings ist fraglich wie bedeutend der Einfluss der Membran auf das Tensegrity-Element ist, beziehungsweise inwieweit diese einen grundlegenden Einfluss auf Tragverhalten und Geometrie ausüben.

Bei der Skulptur f) Textegrity I ist grundsätzlich keine Nutzung vorgesehen [Meeß-Olsohn, 2004, S.51], diese sollte aber für eine mögliche Umsetzung eines Prototyps vorhanden sein.

Der g) temporäre Pavillon MOOM zeichnet sich dahingegen als geeignetes Referenzprojekt für die weitere Arbeit aus. Zum einen werden die Kriterien, welche an eine sinnvolle Nutzung gestellt werden erfüllt, da ein geschützter und gut proportionierter Raum geschaffen wird. Zum anderen sind die strukturellen Elemente des Pavillons klar gegliedert, die gleichmäßige Ausrichtung der Druckelemente führt dazu, dass sich der Interaktionsbereich zwischen Druckelement und textiler Membran in der Struktur wiederholt. Damit sinkt die geometrische Komplexität der Struktur deutlich, was durchaus als Vorteil für die weitere Arbeit angesehen werden kann. Zudem wurde der Pavillon ausschließlich aus Druckstäben und Membranfläche konstruiert, entsprechend sind keine zusätzlichen Einflüsse durch beispielsweise Seil- oder Gurtelemente zu berücksichtigen. Die detaillierte Umsetzung bietet darüber hinaus die Möglichkeit grundlegende konstruktive Fragestellungen zu identifizieren und darauf aufbauend mögliche Detaillösungen für die Umsetzung eines Demonstrators zu erarbeiten, der ohne Zusatzelemente auskommt.

4.2 Temporärer Pavillon MOOM

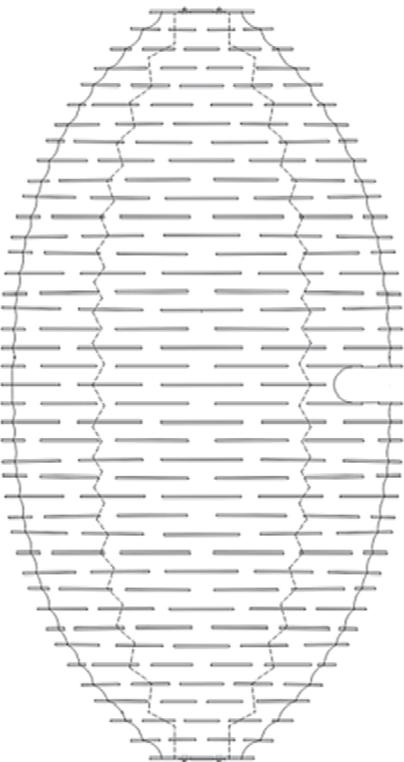
Der temporäre Pavillon MOOM wurde unter der Leitung von Kazuhiro Kojima und Jun Sato an der Tokyo University of Science von insgesamt 70 Architekturstudierenden entworfen und an einem Tag erbaut [Kojima, 2011], [Popp, 2012]. Ein interessanter Aspekt ist der grundlegende Entwurfsgedanke des Pavillons, da dieser nicht auf der Umsetzung einer Tensegrity-Struktur in Kombination mit Membranen basiert, sondern auf der Idee einen Pavillon nach dem Prinzip einer Drucklufthalle zu entwerfen. Ein gleichmäßiger Innendruck sollte durch die Anordnung der Stabelemente ersetzt werden [Tu, 2016]. Aus dieser Entwurfsidee ist eine Konstruktion entstanden, die als Tensegrity-Membran-Struktur einzuordnen ist (siehe Abschnitt 3.4).

4.2.1 Geometrie und Struktur

Der Pavillon ist 26 m lang, 7,5 m breit und weist eine Höhe von maximal 4,25 m auf. Damit überdacht die Struktur insgesamt eine Fläche von 146 m². Die globale Form kann als ein, an der langen Rotationsachse halbiertes Ellipsoid beschrieben werden. Da das Ellipsoid zu den Rotationskörpern zählt, unterliegt auch diese Struktur dem Grundprinzip des für Tensegrity-Membran-Strukturen typischen Kräftekurzschlusses im Gesamtsystem, wobei allerdings eine Einschränkung durch die Lagerung besteht. In Bild 4-1 ist die ellipsoide Geometrie des Pavillons gut erkennbar.



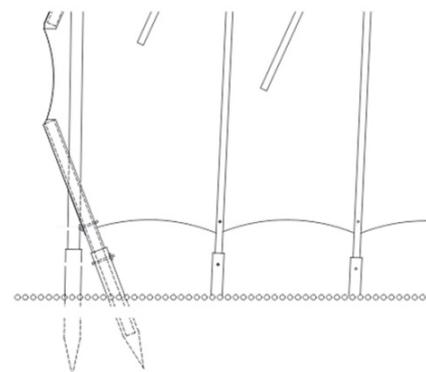
4-1 Pavillon MOOM in Noda (2011)



4-2 Draufsicht auf die Membranfläche des Pavillons MOOM. Die äußere, die Fläche umschließende Linie zeigt die eben ausgebreitete Membran, die beiden, von links nach rechts verlaufenden, inneren Linien stellen die Fußpunktposition im aufgebauten Zustand dar.

Für den konstruktiven Membranbau stellt die global synklastisch geformte Fläche eine Besonderheit dar. Grundlegend müssen textile Membrane mit einer antiklastischen Krümmung ausgebildet werden, um einen stabilen Zustand zu gewährleisten (siehe Abschnitt 3.2.1), diese antiklastische Krümmung wird bei dem Projekt lokal an den Stabendknoten erzeugt. Für die raumbildende Membran kam ein 0,7 mm starkes, offenmaschiges Polyestergewebe zum Einsatz. Aufgrund der Textileigenschaften ist der Pavillon nicht für eine langlebige Nutzung geeignet, da das Gewebe keinen Schutz vor Regen und Wind bietet. Auch ist das Material sehr dehnfähig, was dazu führt, dass eine Dauerhaftigkeit nicht gewährleistet werden kann [Tu, 2016]. Insgesamt sind 131 Aluminiumrohre mit einem Durchmesser von 25 mm in Längen zwischen 0,6 und 2,8 m in die Membranfläche in sogenannte Futterale eingebettet worden. Die unterschiedlichen Stablängen werden durch den in Struktur-längsrichtung abnehmenden Durchmesser bedingt. Die Anordnung der Stabelemente erfolgte parallel zur Strukturquerrichtung und in einem Abstand von 0,65 m zueinander [Popp, 2012]. Die für eine Tensegrity-Struktur eher ungewöhnliche, einachsige Ausrichtung der Stabelemente lässt sich durch die bereits beschriebene Entwurfsidee erklären. In Bild 4-2 ist der Pavillonbau in der Draufsicht dargestellt, dabei ist besonders die parallele Ausrichtung der Stabelemente und der, zu den Enden hin abnehmende Durchmesser des Pavillons erkennbar. Die äußere Umrandung markiert die Lage der Membranfläche vor dem Aufbau, die inneren gestrichelten Linien geben den Grundriss des Pavillons in aufgebautem Zustand an.

Zur Lagesicherung des Pavillons wurden die Stabelemente in den Randbereichen mit HülSEN im Erdreich verankert. Die HülSEN wurden aus Aluminiumrohr mit einem Durchmesser von 34 mm gefertigt, indem deren untere Enden durch Zusammendrücken zu Spitzen geformt wurden. Außerdem wurde die Membran im Randbereich mit Ösen versehen, um sie mit kleinen Bolzen ebenfalls an den Fußpunkten zu befestigen [Popp, 2012]. Diese konstruktive Ausbildung führt dazu, dass der Fußpunkt zumindest als Teileinspannung betrachtet werden sollte, was für die Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen eher als Besonderheit zu werten ist. Der beschriebene Fußpunkt ist in Bild 4-3 dargestellt. Neben den genannten konstruktiven Elementen sind auch die versetzte Anordnung der Stabreihen, sowie die dadurch resultierende unterschiedliche Neigung der Pflöcke gut zu erkennen. Insgesamt kommt der Pavillonbau auf ein Gesamtgewicht von rund 600 kg, und erreicht damit eine wahrnehmbare Leichtigkeit von 4,22 kg/m².



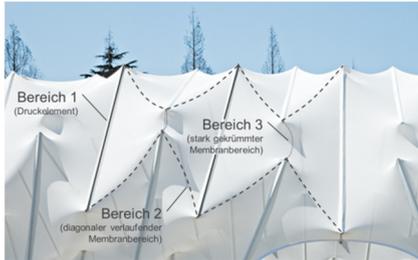
4-3 Detailansicht der Fußpunktausbildung am Pavillon MOOM

Eine weitere, neben der Ausbildung der Fußpunkte, zu benennende konstruktive Besonderheit ist die Einbettung der Druckelemente in die Membranfläche. Auf die zugeschnittene und konfektionierte Fläche wurden Taschen, sogenannte Futterale aufgenäht, in welche die Stäbe während der Montage eingeführt wurden [Popp, 2012]. Diese, über die gesamte Stablänge vorgenommene flächige Fixierung ist eher ungewöhnlich, im Regelfall weisen Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen lediglich punktuelle Interaktionsbereiche auf, an denen die unterschiedlichen konstruktiven Elemente gekoppelt werden. Die stark ausgeprägte Krümmung der Membranflächen an den Stabendknoten deutet allerdings darauf hin, dass auch bei dieser Tensegrity-Membran-Struktur die maßgebliche Interaktion an dem benannten Punkten, und somit maßgeblich punktuell erfolgt.

4.2.2 Tragverhalten

Grundlegend verhält sich die Pavillonstruktur wie vergleichbare Strukturen, die dem Tensegrity-Prinzip folgen, die stabförmigen Druckelemente liegen diskontinuierlich im Gesamtsystem vor, und werden durch die zugbeanspruchte Membranfläche in einen stabilen Zustand versetzt. Erst durch die Interaktion von Druckelementen und kontinuierlichem Zugsystem entsteht der stabile und endgültige Gleichgewichtszustand. Ein Kräftekurzschluss der stabilisierenden Vorspannkraft erfolgt grundlegend innerhalb der Membranfläche. Da die Pavillongeometrie aufgrund der funktionalen und gestalterischen Anforderungen jedoch kein vollständig geschlossenes rotations- oder radialsymmetrisches System abbildet, werden die Vorspannkraft an den Randbereichen durch eine zusätzliche Lagerung aufgenommen. Diese Funktion übernehmen die im Erdreich verankerten AluminiumhülSEN welche durch ihre konstruktive Ausbildung zumindest Teileinspannungen an den Fußpunkten erzeugen. Dieser Aspekt, sowie die zu abnehmenden Durchmesser sorgen dafür, dass sich der Pavillon in Längsrichtung (quer zu den Stabachsen) nicht zusammenzieht. Die Anordnung zusätzlicher Abspannseile in den Endbereichen des Pavillons unterstützt eine Stabilisierung in Systemlängsrichtung.

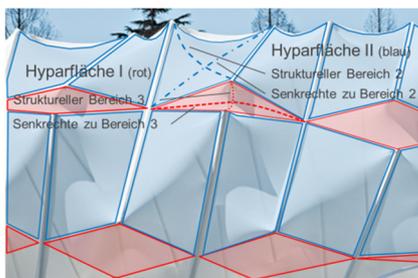
Konstruktiv gesehen besteht der Pavillon im Wesentlichen aus zwei Materialien, der offenmaschigen Polyester/PVC Membran und den Aluminiumrohren, und somit einer für Tensegrity-Membran-Strukturen klassischen Aufteilung in rein druck- und rein zugbeanspruchte Bauteile. Bei genauer Betrachtung der Konstruktion lassen sich allerdings drei strukturelle Bereiche identifizieren [Ratschke, 2017]:



4-4 Exemplarische Darstellung der identifizierten strukturellen Membranbereiche an einem Pavillonausschnitt

1. druckbeanspruchte lineare Stabelemente
2. diagonal verlaufende, zugbeanspruchte, schwach gekrümmten Membranbereiche als Verbindung der Stabenden nebeneinanderliegender Stabreihen
3. in Richtung der Stabachsen verlaufende, stark gekrümmten Membranbereiche als Verbindung der Stabenden in einer Stabreihe

Die unterschiedlich beanspruchten Bereiche in der Membranfläche, Bereich 2 und Bereich 3, kommen durch die versetzte Anordnung der Stabreihen zustande, sie sind der maßgebende geometrische Aspekt für eine Gleichgewichtsfindung der Gesamtstruktur, da erst die Überschneidung der benachbarten Stabelemente eine Umlenkung der Zugkräfte ermöglicht. In Bild 4-4 sind die beiden beschriebenen Membranbereiche beispielhaft über drei beteiligte Stabreihen hervorgehoben. Die Stabelemente sind ohne weiteres auch so gut erkennbar und daher nicht extra markiert. Die benannten strukturellen Bereiche wiederholen sich in der gesamten Pavillonstruktur. Grundlegend bedeutet die Identifikation von zwei unterschiedlich strukturell wirksamen Bereichen in der Membranfläche ein entsprechend lokal unterschiedliches Beanspruchungsverhalten der Membran.



4-5 Beispielhafte Darstellung der, sich wiederholenden, identifizierten Hyparflächen auf der Membranfläche

Werden die strukturellen Bereiche 2 und 3 in der Membranfläche genauer betrachtet, so lässt sich jeweils zu diesen Bereichen eine senkrecht verlaufende Krümmung identifizieren. In Bild 4-5 sind diese Bereiche wiederum hervorgehoben, die dadurch senkrecht zueinander verlaufenden Linien stellen jeweils die Hauptkrümmungslinien einer Hyparfläche dar. Durch die Identifikation dieser Bereiche kann die gesamte Membranfläche durch zwei, sich wiederholende Hyparflächen beschrieben werden. Die Hyparflächen wurden ebenfalls farblich hervorgehoben (siehe Bild 4-5). Die Hyparfläche um die stark gekrümmte Verbindung der Stabenden in Ausrichtung der Stabachsen wird als Hyparfläche I bezeichnet (rot). Die zweite Hyparfläche, die zwischen den benachbarten Stabreihen zu finden ist, wird als Hyparfläche II bezeichnet (blau). Für die Auswertung der nachfolgenden Parameterstudie ist dieses Erkenntnis von besonderem Wert, da durch die Hyparflächen Rückschlüsse auf die geometrische Ausbildung der Membranfläche und das Tragverhalten möglich sind.

4.2.3 Montage

Zum weiteren Verständnis der Pavillonstruktur, sowie einer späteren Umsetzung eines Demonstrators, ist ebenfalls der konstruktive Aufbau von Interesse. Da bei der Umsetzung des Pavillons ein sehr weiches und dehnfähiges Membranmaterial zum Einsatz kam, konnte die zur Stabilisierung notwendige Vorspannung der Struktur, beziehungsweise das Einbringen der Stabelemente, einfach durch entsprechend manuelles Auseinanderziehen der Membran und zeitgleiches Einführen der Aluminiumstäbe in die Futterale erreicht werden. Dieser Vorgang wurde im ebenliegenden Zustand der Membranfläche durchgeführt. In Bild 4-6 ist der beschriebene Aufbauzustand zu erkennen.



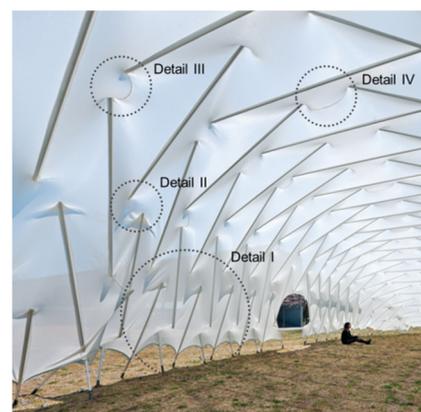
4-6 Einführen der Druckelemente in die aufgenähten Futterale beim Pavillon MOOM

Das eigentliche Aufstellen des Pavillons erfolgte in einem weiteren Schritt (siehe Bild 4-7). Die Randbereiche wurden entsprechend aufeinander zubewegt, während im Inneren der Struktur die Membranfläche mit langen Stangen nach oben geführt wurde. Mit Erreichen der gewünschten globalen Form wurden dann die Fußpunkte, durch Einführen der Aluminiumhülsen im Erdreich verankert.



4-7 Aufrichten des Pavillons MOOM durch innenseitiges Anheben der Pavillonfläche und gleichzeitigem Verschieben der Fußpunkte.

Im aufgestellten Zustand ergibt sich die global synklastische Geometrie des Pavillons. Die zur Stabilisierung notwendige antiklastische Krümmung der Membran wird grundlegend durch eine Umlenkung der Zugkräfte an den Stabendknoten der Druckelemente erreicht. Eine genaue Betrachtung zeigt jedoch, dass eben diese wesentliche Krümmungsbildung nicht vollständig realisiert werden kann. Besonders in den Randbeziehungsweise den Anschlussbereichen der Verankerungen, folgt die Membranfläche (global betrachtet) nicht der stetigen synklastischen Krümmung der oberen Pavillonbereiche. In Bild 4-8 ist dieses Verhalten in Detail I erkennbar. Jeder zweite, in den Aluminiumhülsen verankerte Druckstab, kippt scheinbar nach Innen. Das führt dazu, dass sich die Membranfläche im Übergangsbereich zum folgenden Stab nicht mit der notwendigen antiklastischen Krümmung ausbildet, was wiederum die sichtbare Faltenbildung der Membran bedingt. Die Falten sind ein Indiz dafür, dass in diesen Bereichen keine ausreichende Zugbeanspruchung erreicht wird, bzw. nur ein einachsiger Spannungszustand vorliegt. Auch im Detail II ist dieser unsaubere Übergang zwischen zwei Stäben erkennbar. Die fehlende Ausbildung einer antiklastischen Krümmung kann in diesen Bereichen u.a. durch den Einfluss der Fußpunkte und die damit verbundene Teileinspannung, sowie eine nicht exakte Platzierung der Aluminiumhülsen erklärt werden. Darüber hinaus sind in lokalen Bereichen der Membranfläche unterschiedlich starke Ausprägungen der Krümmungen zu erkennen. Werden beispielsweise Detail III und Detail IV einander gegenübergestellt, so ist zu erkennen, dass die sich zwischen zwei Stabenden einstellende Krümmung stark variiert und somit zu unterschiedlichen Beanspruchungen der Membran führt. Für ein gleichmäßiges Tragverhalten der Membran ist eine gleichmäßige Beanspruchung von Vorteil. Der Umstand, dass bei der temporären Pavillonkonstruktion ein sehr weiches und dehnfähiges Membranmaterial eingesetzt wurde, erlaubt trotz fehlender Formfindung [Sato, 2016] und Konfektionierung



4-8 Identifizierte Bereiche am Pavillon MOOM, die auf ein ungünstiges Tragverhalten der Membranfläche hinweisen

der Membran einen verhältnismäßig stabilen Gleichgewichtszustand der Konstruktion. Allerdings eignet sich eine derart dehnfähige Membran nicht für eine langlebige baupraktische Umsetzung einer vergleichbaren Konstruktion, da äußere Einwirkungen sehr große Verformungen der Struktur zur Folge haben würden, die unter Umständen zu einer Destabilisierung führen könnten. Auch ist das verwendete Material, wie zu Beginn dieses Kapitels angesprochen, nicht geeignet einen Witterungsschutz auszubilden, wie er zum Beispiel in Mitteleuropa notwendig wäre.

4.2.4 Gestalterischer Ausdruck



4-9 Innenseitig beleuchteter Pavillon MOOM bei Nacht (2011)

Der Pavillonentwurf von Kazuhiro Kojima und Jun Sato stellt eine gelungene architektonische Umsetzung des Tensegrity-Prinzips dar [Tu, 2016, S.2]. Zum einen konnte mit dem Entwurf und der Realisierung des Pavillons gezeigt werden, dass eine Kombination von Tensegrity-Struktur und Membranen eine neue raumschaffende Formensprache ermöglicht und damit auch neue funktionale Anforderungen angedacht werden können, die mit reinen Tensegrity-Strukturen bisher nicht möglich gewesen sind. Zum anderen zeigt der Entwurf die typischen gestalterischen Merkmale einer Struktur, die dem Tensegrity-Prinzip folgt (siehe Abschnitt 3.3) und dass diese Merkmale auch in der Weiterentwicklung der Struktur die Gestaltung charakterisieren und prägen können. Eine weitere Besonderheit des Pavillons ist die Transluzenz, die durch den Einsatz textiler Membrane ermöglicht wird. In Verbindung mit der, durch die Interaktionspunkte geprägte Pavillonoberfläche, entsteht ein „*lebhaftes Licht- und Schattenspiel*“ [Popp, 2012, S.1086], welches die Besonderheit des gestalterischen Ausdrucks der Tensegrity-Membran-Struktur noch verstärkt. Bild 4-9 zeigt eine entsprechende Nachtaufnahme, bei der die Transluzenz der Struktur durch zusätzliche Beleuchtung zum Ausdruck gebracht wird. Besonders die nicht transluzenten Stabelemente heben sich dadurch von der Membranfläche ab. Zusätzlich ergibt sich durch die lokale räumliche Krümmung der Membran an den Stabendpunkten eine entsprechende Schattierung.

5 Parametergestützte Analyse

5 Parametergestützte Analyse

Basierend auf dem gewählten Referenzprojekt, dem Pavillon MOOM, wird in dem folgenden Kapitel eine prinzipielle Parameterstudie an einer entsprechenden Referenzstruktur vorgenommen, um den Einfluss einzelner geometrischer Parameter, wie beispielsweise die Länge oder den gegenseitigen Abstand der Druckelemente, sowie deren tragwerkstechnische Auswirkungen auf die prinzipielle Beanspruchung einer textilen Membran, in Form der geometrischen Ausprägung der Membranfläche, zur Beschreibung eines gleichmäßigen Lastabtrags zu analysieren. Im Anschluss soll auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse mit Hilfe einer Multiparameteroptimierung, nachfolgend als Variantenstudie bezeichnet, die Pavillonstruktur hinsichtlich eines geometrisch möglichst membrange-rechten Zustands optimiert werden. Diese Variante wird dann im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit für die konstruktive Umsetzung eines Demonstrators herangezogen.

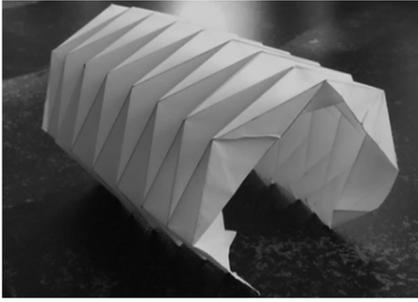
Vor zwei Jahren wurde bereits eine Entwurfsarbeit zum Pavillon MOOM von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin im Rahmen des IASS Symposiums 2016 Spatial Structures in the 21st Century in Tokyo vorgestellt. Dabei wurde unter anderem auch eine Studie am Pavillon MOOM vorgenommen, um die geometrischen Zusammenhänge der Struktur zu beschreiben, das beinhaltetete auch eine Identifikation möglicher tragwerkstechnischer Parameter (siehe Abschnitt 5.1) [Tu, 2016].

Die im Rahmen des IASS Symposiums präsentierte Studie wird im Folgenden untersucht und für die weitere Arbeit als Grundlage für den parametrischen Aufbau der zu untersuchenden Struktur herangezogen. Dazu werden zuerst auf Basis parametrischer Entwurfswerkzeuge, wie Rhinoceros 3D, Grasshopper 3D und Kangaroo3d, die Ergebnisse der Studie von 2016 mit einem eigenen digitalen parametrischen Modell (Seilmodell) verifiziert. Daran anschließend wird ein weiterentwickeltes digitales parametrisches Modell (Seilnetzmodell) aufgebaut, anhand dessen die anfänglich benannte eigene Parameterstudie vorgenommen wird um einzelne Parametereinflüsse zu analysieren. An dem Seilnetzmodell wird dann ebenfalls die Variantenstudie durchgeführt.

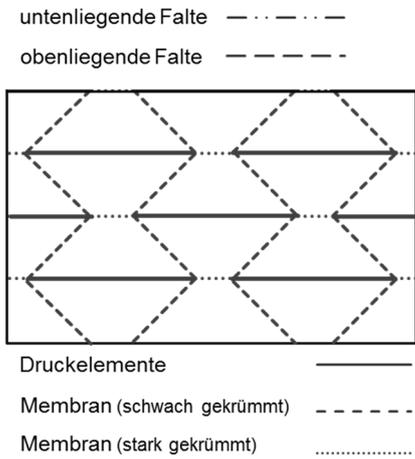
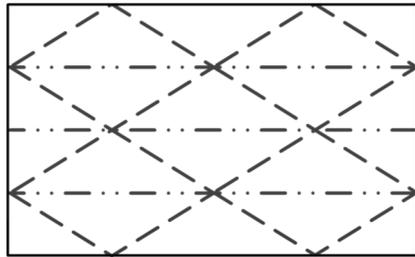
5.1 Parameteridentifikation

Die Durchführung einer Parameterstudie erfordert eine genaue Identifikation der tragwerksrelevanten Parameter. Diese Identifikation dient dabei zum einen dem Aufbau eines digitalen parametrischen Modells, zum anderen können durch eine gezielte Untersuchung der Einflüsse einzelner Parameter neue Erkenntnisse über das generelle Tragverhalten der Pavillonstruktur gewonnen werden. Zur Identifikation der tragwerkstechnischen Parameter wird zuerst die bereits benannte Studie von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin herangezogen. Nach einer entsprechenden Evaluierung werden Parameter für die eigentliche Parameterstudie dieser Arbeit ausgewählt und für den Aufbau des digitalen parametrischen Modells verwendet.

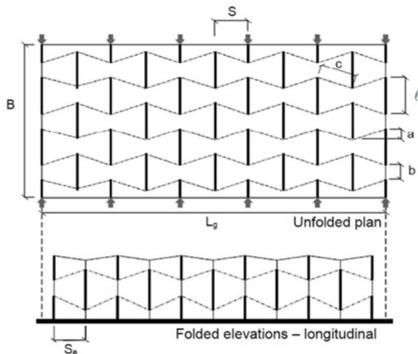
5.1.1 Übersicht der Studie von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin



5-1 Yoshimura Faltung eines Papiermodells



5-2 Vergleich der Faltmuster einer Yoshimura-Faltung (oben) und einer Hexagonal-Faltung (unten)



5-3 Grafische Beschreibung der geometrischen Parameter in Draufsicht und Seitenansicht

Zur Beschreibung der Pavillonstruktur haben sich Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin zunächst mit Faltpinzipien auseinander gesetzt. Dabei haben sie aufgezeigt, dass bei dem strukturellen Aufbau des Pavillons MOOM eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Aufbau der Yoshimura-Faltung besteht. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde für ihre Studie ein vereinfachtes lineares Systemmodell der Pavillonstruktur, aufbauend auf der Yoshimura-Faltung definiert [Tu, 2016]. Zum besseren Verständnis ist in Bild 5-1 ein Modell dargestellt, das mit dem Yoshimura-Faltprinzip aufgebaut wurde.

Die bereits am Pavillon MOOM identifizierten strukturellen Bereiche (siehe Abschnitt 4.2.2) entsprechen dabei den Kanten der Faltung. Im Gegensatz zu dem abgebildeten einfachen Faltsmodell (siehe Bild 5-1) haben Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin ihr parametrisches Modell für die Abbildung unterschiedlicher Membranbereiche um zusätzliche Faltnlinien zwischen den Druckelementenden einer Druckelementreihe erweitert, die entstandene Faltung wird als Hexagonal Faltung bezeichnet. Bild 5-2 stellt die beiden Faltsmuster dar. Dabei ist zu erkennen, dass die links dargestellte Yoshimura-Faltung lediglich aus zwei Elementen zusammengesetzt wird, der oberen Falte und der unterliegenden Falte [Miura, 1969]. Die rechte Darstellung zeigt die Hexagonal-Faltung, die Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin genutzt haben, um den konstruktiven Aufbau des temporären Pavillons zu beschreiben, hier sind drei Elemente zu erkennen.

Bild 5-3 zeigt eine Draufsicht des parametrischen Modells von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin im ungefalteten Zustand, sowie eine Längsansicht im gefalteten Zustand. Der ungefaltete Zustand beschreibt das System vor dem Aufbau, der gefaltete Zustand beschreibt die aufgestellte Geometrie des Pavillons. Die Druckelemente sind als durchgezogenen Linien, die Zugelemente als gestrichelte Linien dargestellt. Der Aufbau der zuvor beschriebenen Hexagonal-Faltung ist in der Darstellung entsprechend zu erkennen. Im Gegensatz zu dem oben gezeigten Faltsmuster haben Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin die Längen der einzelnen Elemente variiert. In ihrem parametrischen Modell definierten sie die folgend aufgezeigten geometrischen Parameter [Tu, 2016, S.4ff.].

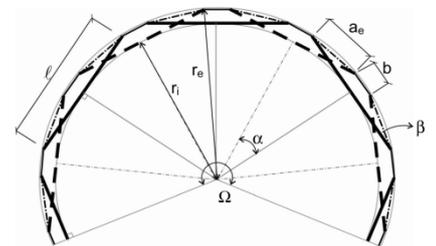
- L_g Länge der ungefalteten Struktur
- B Breite der ungefalteten Struktur
- S Druckelementreihenabstand der ungefalteten Struktur
- S_e Druckelementreihenabstand der gefalteten Struktur
- l Länge eines Druckelements
- a Übergreifungslänge benachbarter Druckelemente im ungefalteten Zustand
- b Abstand der Druckelemente
- c Länge der Zugelemente als direkte Verbindung benachbarter Druckelementreihen

Die Wahl der Parameter von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin erfordert folgende Vereinfachungen für die von ihnen durchgeführte Parameterstudie. Im Gegensatz zur realen Pavillonstruktur, deren Durchmesser zu den Pavillonenden abnehmend verläuft, wird für die Studie nur ein mittlerer Ausschnitt mit gleichbleibendem Durchmesser betrachtet. Daher weisen die zugehörigen Druckelemente alle eine identische Länge auf. Dadurch ergibt sich, im Gegensatz zu dem realen Pavillonbau, eine seitlich offene Struktur (siehe Abschnitt 4.2.1), welche eine entsprechende seitliche Lagerung erfordert, damit das Modell sich nicht quer zu den Druckelementachsen zusammenzieht. Außerdem wurde die biaxial tragende Membranfläche vereinfacht durch lineare Verbindungen der Druckelementendpunkte abgebildet. Das hat zur Folge, dass eine Interaktion der beiden Tragrichtungen der Membran in dieser Parameterstudie nicht untersucht werden kann. Diese geometrische Ausgestaltung hat im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu der Benennung Seilmodell geführt.

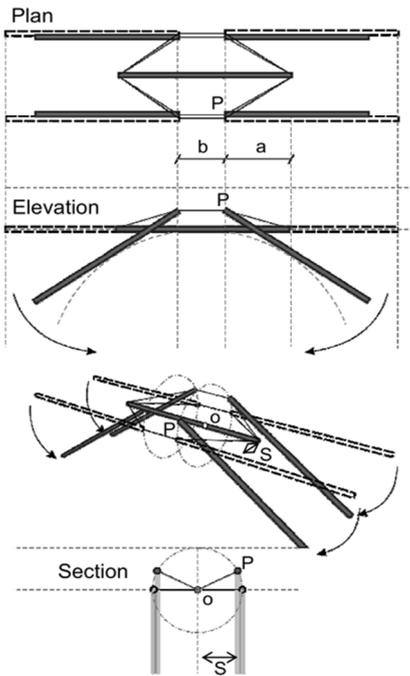
Um den Pavillon, beziehungsweise das, der Parameterstudie zugrunde liegende Modell, auch im aufgebauten (gefalteten) Zustand beschreiben zu können, haben Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin weitere Größen definiert. Darüber hinaus haben sie die entsprechenden Parameter miteinander verknüpft. Durch das verwendete Faltmuster überschneiden sich die Druckelemente benachbarter Druckelementreihen, daher variiert die Anzahl der Druckelemente pro Reihe (siehe Bild 5-4). Sind in einer ersten Druckelementreihe N Druckelemente angeordnet (als gestrichelte Linie dargestellt), so sind in der folgenden Druckelementreihe $N-1$ Druckelemente der Länge l und zwei Druckelemente der Länge $l/2$ angeordnet (als durchgezogene Linie dargestellt). In Abbildung 5-4 ist dieser Aspekt durch die unterschiedlich markierten Stäbe gut erkennbar. Die beiden kurzen Druckelemente sind in den Fußbereichen des Pavillons zu finden. Durch den Aufbau der Struktur entsteht eine rotationssymmetrische Anordnung der Druckelemente, dadurch lässt sich ihrer Lage durch den Kreismittelpunkt beschreiben. Die entsprechenden Größen sind nachfolgend aufgelistet und entsprechend dargestellt [Tu, 2016, S.4ff.].

- r_e Radius bezogen auf die Druckelementendpunkte
- r_i Radius bezogen auf die Druckelementmittelpunkte
- α projizierter Winkel zwischen zwei benachbarten Druckelementmittelpunkten
- β projizierter Winkel zwischen Druck- und Zugelement
- Ω Rotationswinkel des Pavillonausschnitts ($\Omega = \sum \alpha$)
- a_e Übergreifungslänge benachbarter Druckelemente im gefalteten Zustand

Durch den Aufbau des Pavillons ergeben sich zwei Kreisbahnen. Auf der äußeren Kreisbahn finden sich die Druckelementendpunkte wieder, auf der inneren Kreisbahn sind alle Druckelementmittelpunkte zu finden. Dadurch und durch die, sich überschneidenden benachbarten Druckelementreihen ergeben sich die notwendigen Hoch- und Tiefpunkte, welche den einzelnen Membranflächen beim realen Pavillonbau die lokale anti-



5-4 Grafische Darstellung der geometrischen Parameter im aufgebauten Zustand im Schnitt



5-5 Darstellung der geometrischen Veränderungen im Aufbauzustand (Phase 1)

klastische Krümmung verleihen. Die erforderliche Vorspannung wird in dem Modell durch eine Verschiebung der Druckelementreihen in Druckelementachse auf den zuvor beschriebenen Kreisbahnen erreicht, entsprechend ist damit eine Veränderung des Rotationswinkels Ω verbunden. Mit der Winkeländerung ist auch eine Lageänderung der Zügelemente in Längs- und Querrichtung verbunden, wodurch sich ein Rückschluss auf die Beanspruchung der Zügelemente ergibt. Nach Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin besteht der Aufstellvorgang aus zwei Phasen. In der ersten Phase wird durch die Änderung des Rotationswinkels Ω eine Änderung des Druckelementreihenabstands ausgelöst, der Abstand verringert sich von S auf S_e . Bis zum Einstellen eines ersten definierten Endzustands mit dem Rotationswinkels Ω_0 ändern sich die geometrischen Randbedingungen wie folgt [Tu, 2016, S.4ff.]:

- l , a , b und c bleiben konstant
- α, β und q werden größer
- r_i , r_e und S (S_e) werden kleiner

Mit der Größe q wird die Verschiebung in z -Richtung infolge des Aufbauzustands beschrieben. Der Wert S_e stellt das sich einstellende Minimum dar, dass der Parameter S durch den Aufbau einnimmt. Bild 5-5 zeigt einen Modellausschnitt im Aufbauzustand und die daraus resultierenden geometrischen Veränderungen. In der ersten Phase treten damit keine Längenänderungen der beteiligten Zug- und Druckelemente auf, es wird von dehnungslosen Verformungen ausgegangen und es wirken folglich auch keine Beanspruchungen auf die Elemente. Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin haben bei dieser Zusammenstellung sechs unabhängige Parameter definiert, auf deren Basis alle weiteren geometrischen Zusammenhänge beschrieben werden können. Als unabhängige Parameter sind die nachfolgenden sechs Größen benannt [Tu, 2016, S.4ff.]:

- l Länge eines Druckelementes
- ρ Übergreifungslängenfaktor benachbarter Druckelemente ($\rho = a/l$)
- S Druckelementreihenabstand der ungefalteten Struktur
- N Anzahl der Druckelemente je Druckelementreihe
- n_i Anzahl der benachbarten Druckelementreihen
- Ω Rotationswinkel des Pavillonausschnitts ($\Omega = \sum \alpha$)

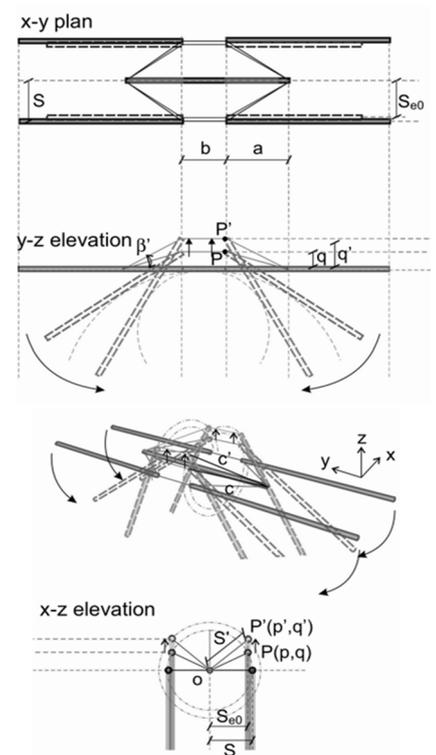
Der zweiten Phase des Aufstellvorgangs wird die Annahme zugrunde gelegt, dass sich der minimale Abstand benachbarter Druckelementreihen S_e im Zustand $\Omega = \Omega_0$ nicht weiter verringert, und weitere Änderungen des Rotationswinkels auf den Wert Ω' lediglich eine Verschiebungen der Druckelementendpunkte in z-Richtung bedingen. Dieser Zustand ist in Bild 5-6 zu erkennen, die Randbedingungen ändern sich dabei bis zum Erreichen des zweiten Endzustands wie folgt [Tu, 2016, S.4ff.]:

- l , a , b und S_e bleiben konstant
- r_i und r_e werden kleiner
- α (α'), β (β'), q (q') und c' ($c + \Delta c$) werden größer

Mit c' wird die resultierende Länge der diagonal verlaufenden Zuelemente beschrieben. Diese setzt sich aus der Ausgangslänge c (Aufbauphase 1) und der dehnungsbehafteten Längenänderung Δc durch den simulierten Vorspannzustand (Aufbauphase 2) zusammen. Die Längenänderung Δc kann zur Auswertung einer zugehörigen Zugkraft T verwendet werden. Diese ergibt sich unter Verwendung einer beliebig gewählten Materialsteifigkeit K_m zu [Tu, 2016, S.4ff.]:

- Zugkraft: $T = K_m \cdot \Delta c$

Auf Basis dieser Erkenntnisse und unter Verwendung des beschriebenen parametrischen Modells haben Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin eine Parameterstudie durchgeführt. Die genauen Ergebnisse der Studie sind der zugehörigen Veröffentlichung zu entnehmen [Tu, 2016].



5-6 Darstellung der geometrischen Veränderungen im Aufbauzustand (Phase 2)

5.1.2 Entwicklungspotential der vorliegenden Studie

Das Modell nach Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin ist in sich mathematisch plausibel und führt zu entsprechend verwertbaren Ergebnissen. Auch die damit verbundene Identifikation der Einflussgrößen, die Beschreibung der Verknüpfung der einzelnen Parameter und die Einteilung in unabhängige und abhängige Größen, sind sinnvoll. Es ist jedoch anzumerken, dass die Parameterstudie von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin zwei wesentliche Aspekte nicht berücksichtigt. Zum einen stellt der Aufbauzustand keinen statischen Gleichgewichtszustand der Struktur dar, damit fehlen ein formgefundener Zustand und eine korrekte Geometrie im vorgespannten Zustand. Um das Tragverhalten einer Membrankonstruktion ausreichend genau zu ergründen, muss grundlegend eine Betrachtung der Konstruktionen unter Berücksichtigung einer Formfindung erfolgen [Knippers, 2010, S.136ff.]. Zwar simulieren Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin durch das Verschieben der Geometrie auf einer Kreisbahn einen Vorspannungszustand, jedoch setzt dieser Ansatz voraus, dass die Parameter l (Druckelementlänge), a (Übergreifungslänge) und b (Druckelementabstand) konstant sind und als dehnstarre Elemente ausgeführt werden. Zumindest die Länge b kann allerdings nicht dehnstarr angesetzt werden, da diese die zwischen zwei Druckelementen gespannte Membran beschreibt, und somit einen Bereich in dem in jedem Fall Verformungen zu erwarten sind. Folglich ist die als Kreisbahn angenommene Geometrie kein korrekter Gleichgewichtszustand [Lindenberg, 2017, S.42].

Zweitens wird der Einfluss einer biaxial tragenden Membran nicht durch die vereinfacht linear dargestellten Zugelemente erfasst. Die Zugelemente liegen zwar im Bereich vermuteter Hauptspannungslinien (siehe Abschnitt 4.2.2), erfassen aber jeweils nur eine Tragrichtung. Dadurch kann keine genaue Aussage über das zweiachsige Tragverhalten der Membran getätigt werden, da gegenseitige Beeinflussungen der Tragrichtung in dem Modell unberücksichtigt bleiben. Der zweiachsige Lastabtrag einer Membran stellt allerdings ein besonderes Merkmal des Tragverhaltens dar und muss entsprechend berücksichtigt werden.

5.2 Evaluierung am parametrischen Seilmodell

Das vorgestellte parametrische Modell von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin hat sich im Grundsatz als schlüssig erwiesen. Die Entwicklung eines eigenen ersten digitalen parametrischen Modells (Seilmodell genannt) wird daher aufbauend, auf den bereits beschriebenen Erkenntnissen, vorgenommen. Die beschriebene Geometrie und die identifizierten Parameter werden von der im vorigen Abschnitt vorgestellten Studie übernommen. Da eine Formfindung für die Arbeit mit Membrantragwerken unabdingbar ist, wird die eigene Parameterstudie um ebendiese ergänzt. Der programmatische Aufbau des weiterentwickelten digitalen Modells erfolgt dabei in mehreren Schritten. Zuerst wird das Studienmodell von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin mit dem Programmen Rhinoceros 3D und dem Plug-In Grasshopper 3D nachgebildet. Das Plug-In Grasshopper 3D eignet sich insbesondere für diese Vorgehensweise, da die mathematischen Zusammenhänge visuell programmiert und die programmierte Geometrie visualisiert werden. Das Seilmodell wird dabei bereits um einen Formfindungsalgorithmus erweitert. Dazu wird das Plug-In Kangaroo3d verwendet, welches ebenfalls an die Software Rhinoceros 3D gekoppelt ist und mit dem Plug-In Grasshopper 3D verknüpft wird. Das Plug-In Kangaroo3d ist eine Live Physics Engine, basierend auf der Dynamischen Relaxation und wird zur Gleichgewichtsfindung verwendet. Mit Hilfe dieses Modells, erfolgen erste Untersuchungen. Zum einen wird die Funktionsweise des Modells anhand der Ergebnisse von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin verifiziert, zum anderen werden die Einflüsse eines Formfindungsprozesses aufgezeigt. In einem weiteren Schritt werden dann die bestehenden linearen Zugelemente zwischen den Druckelementen durch ein gleichmäßiges feines Seilnetz ersetzt [Ratschke, 2017]. Dieses finale Modell wird, aufgrund des eingeführten Seilnetzes zur Simulation der textilen Membran, als Seilnetzmodell benannt und dann für eine entsprechend detaillierte Parameterstudie (siehe Abschnitt 5.4.3) und eine Variantenstudie (siehe Abschnitt 5.4.4) verwendet.

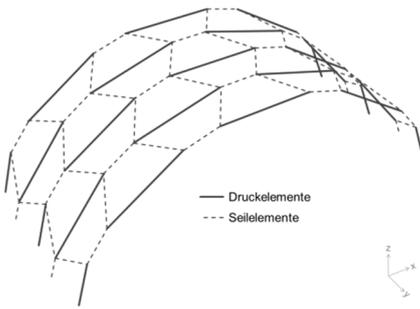
Im Folgenden wird der Aufbau des Seilmodells erläutert. Die bereits aufgezeigten mathematischen Bezüge der einzelnen Parameter wurden in der Software Rhinoceros 3D und dem Plug-In Grasshopper 3D programmiert und umgesetzt. Der daraus entwickelte Programmcode ist in fünf Steps unterteilt:

- Step 1: Eingangsparameter, Bedienelemente, Anzeigeeigenschaften
- Step 2: Berechnung der definierten mathematischen Bezüge
- Step 3: Aufbau, Berechnung und Visualisierung des digitalen Seilmodells
- Step 4: Formfindungsalgorithmus
- Step 5: Auswertung

5.2.1 Eingangsparmeter und Programmaufbau (Step 1-3)

Als geometrische Eingangsparmeter werden, gemäß der Studie von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin, die Länge eines Druckelements (l), der Übergreifungslängenfaktor benachbarter Druckelemente (ρ), der Druckelementreihenabstand der ungefalteten Struktur (S), die Anzahl der Druckelemente je Druckelementreihe (N), die Anzahl der benachbarten Druckelementreihen (n_i), sowie der Rotationswinkel des Pavillonausschnitts (Ω) definiert [Tu, 2016].

Die Berechnung der definierten mathematischen Bezüge erfolgt im zweiten Step. Neben den von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin festgelegten Verknüpfungen und den sich daraus ergebenden Größen, werden hierbei geometrische Zwischenwerte, wie beispielsweise Winkelbeziehungen einzelner Elemente, die für den Programmaufbau benötigt werden, definiert und berechnet. Die vollständige Programmierung ist dem Anhang zu entnehmen, die weiteren geometrischen Werte werden an dieser Stelle zur Übersichtlichkeit nicht aufgelistet, sofern sie nicht für die nachfolgende Auswertung oder das grundsätzliche Verständnis der Parameterstudie erforderlich sind.



5-7 Visualisierung des eigenen programmierten Modells, bestehend aus Druckelementen und Seilen (Seilmodell)

Auf Basis der Eingangsparmeter und der definierten mathematischen Bezüge, kann das eigentliche Seilmodell im dritten Step programmatisch erfasst und über die Programmoberfläche Rhinoceros 3D visualisiert werden. Die exakte Verortung der Druck- und Seilelemente wird mit Hilfe von Vektorbeziehungen vorgenommen. Zuerst erfolgt die Anordnung der Druckelemente innerhalb einer Reihe, diese kann im Anschluss mit dem Druckelementreihenabstand S in gewünschter Anzahl kopiert werden. Danach werden anhand der Druckelementenden die Seilelemente erzeugt. In Hinblick auf eine mögliche Realisierung wurde eine gelenkige Auflagersituation an den Fußpunkten angeordnet. Bild 5-7 stellt das digitale Seilmodell in der Perspektive dar, Druck- und Seilelemente sind entsprechend gekennzeichnet.

5.2.2 Formfindung (Step 4)

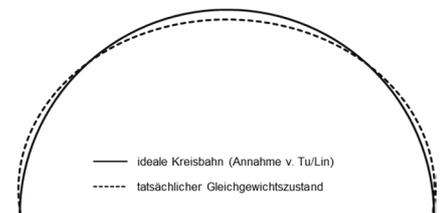
Im Anschluss an die Umsetzung der Geometrie wurde das Seilmodell im vierten Step um einen Formfindungsalgorithmus erweitert. Wie bereits erwähnt, basiert der Formfindungsprozess mit dem Plug-In Kangaroo3d auf der Dynamischen Relaxation (siehe Abschnitt 5.2). Das Prinzip der Dynamischen Relaxation beruht auf einer Schwingungsanregung eines Netzes, das statische Problem wird somit in ein dynamisches Problem überführt. Durch entsprechende viskoelastische oder kinetische Dämpfer klingen die aufgebrachten Schwingungen ab und überführen das Netz in eine Gleichgewichtsform [Knippers, 2010, S.137]. Um den Prozess der Gleichgewichtsfindung zu starten werden zusätzliche materialspezifische Größen benötigt, um jedem einzelnen Element des Netzes (hier: Druckelemente, Zuelemente und Auflagerpunkte) eine sogenannte *Strength* zuzuweisen, der Wert ist mit einer Dehnsteifigkeit gleichzusetzen. Darüber hinaus werden den linearen Elementen Sollängen zugewiesen, über die folgend eine Art Vorspannung definiert werden kann. Die Aufla-

gerpunkte und die Druckelemente erhalten im Modell eine vergleichsweise hohe *Strength* und sind damit als dehnstarr, bzw. unverschieblich anzusehen. Die Solllänge der Druckelemente wird auf den Faktor 1,0 gesetzt, da diese im realen Formfindungsprozess nicht vorgespannt werden. Für die Zugelemente wird die Steifigkeit auf einen verhältnismäßig geringen Wert gesetzt, um somit eine dehnungsbehaftete Verformung zuzulassen, die Solllänge wird entsprechend mit einem Faktor kleiner 1,0 angesetzt. Der definierte Formfindungsalgorithmus hat das Ziel, die Zugelemente in dem System zu verkürzen, und in Abhängigkeit der anderen materialspezifischen Parameter ein Gleichgewichtszustand am System zu ermitteln.

Der gewählte Formfindungsalgorithmus des Plug-Ins Kangaroo3d hat gewisse Vor- und Nachteile. Vorteilhaft ist die Möglichkeit eine Vielzahl an Varianten zu testen und über diese eine annähernde Echtzeit-Aussage zu erhalten. Nachteilig wirkt sich vor allem der Aspekt aus, dass die materialspezifischen Größen lediglich als Verhältniswerte zueinander definiert werden können, somit ist keine exakte Berechnung möglich. Da die Verhältnisse der Steifigkeiten allerdings anhand bekannter Materialwerte grob angepasst werden können, liefert der Algorithmus gute qualitative Ergebnisse, die tendenziell dem realen strukturellen Verhalten ähneln und somit eine entsprechende Aussage erlauben.

5.2.3 Auswertung (Step 5)

Der fünfte Step dient dazu, die Ergebnisse des Formfindungsprozesses aufzubereiten und diese für weitere Bearbeitungen zu exportieren. Die bereits aufgestellte Annahme, dass das Seilmodell im Gleichgewichtszustand im Querschnitt keine Kreisbahn mehr beschreibt, konnte durch den Formfindungsprozess nachgewiesen werden. Es wurde eine Abweichung am Scheitelpunkt und an den Viertelpunkten festgestellt. Bild 5-8 stellt das abweichende Verformungsbild prinzipiell dar. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass das Seilmodell vergleichbare Ergebnisse liefert, wie sie auch in einer Veröffentlichung von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin vorgestellt worden. Damit kann die programmatische Umsetzung der Studie nach Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin in Form des erzeugten parametrischen Seilmodells als erfolgreich bewertet werden.



5-8 Prinzipdarstellung des Vergleichs der Formfindungsfiguren

Als Ergebnisse des Formfindungsprozesses mit dem Plug-In Kangaroo3d werden keine Kräfte oder Spannungen, sondern lediglich Geometriewerte, also Längenänderung der einzelnen Elementgruppen ausgegeben. Diese Werte werden zur weiteren Auswertung über einen Exportalgorithmus an die Software Microsoft Excel übergeben. Sowohl für die Druck-, sowie die beiden unterschiedlichen Zugelemente (direkt und diagonale Druckelementendverbindung) liegen jeweils drei bekannte spezifische Längen vor. Abgesehen von den Elementen im Fußbereich weisen alle Druckelemente in der Ausgangskonfiguration identische Längen auf. Durch die Einstellungen des Formfindungsalgorithmus bleiben diese auch erhalten. Im Gegensatz dazu verändern sich die einzelnen Seilele-

mente im Verlauf der Formfindung. Die Längen der einzelnen Seilelemente werden daher für die Auswertung herangezogen.

- l_A Ausgangslänge
- l_S Solllänge
- l_F Formgefundene Länge

5.2.4 Evaluation

Maßgebend stellt das Seilmodell einen Zwischenschritt der vorgenommenen Parameterstudie dar, und wird aus diesem Grund folgend nur anhand eines konkreten Beispiels mit den Studienergebnissen von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin abgeglichen. Zur Überprüfung der Funktionsweise werden die berechneten Längen je Element in verschiedene Verhältnisse gesetzt, somit lassen sich mit ein paar vereinfachten Annahmen qualitative Rückschlüsse bilden.

Die Normalspannung kann mit dem Produkt aus dem Elastizitätsmodul und der Dehnung gleichgesetzt werden oder mit dem Quotient aus Kraft und Querschnittsfläche. Die Dehn- oder Federsteifigkeit eines Elements ergibt sich anhand des Quotienten aus Kraft und Längenänderung.

- Normalspannung: $\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{A}$
- Dehnsteifigkeit: $k_F = \frac{F}{\Delta l}$

Werden beide Größen zusammengeführt und umgeformt ergibt sich folgender Ausdruck:

- $F = k_F \cdot \Delta l = \frac{E \cdot A}{l} \cdot \Delta l$

Da die Dehnsteifigkeit aller definierten Zugelemente identisch ist, sowie alle gleichen Elemente zudem die gleiche Ausgangslänge aufweisen, kann die Dehnfedersteifigkeit k_F als konstant angesetzt werden. Wird diese Annahme auf die Verhältnismerte der verschiedenen berechneten Längen bezogen, so ergeben sich die folgenden Zusammenhänge:

- $k_F \cdot \Delta l_1 = k_F \cdot (l_A - l_S) \approx$ Geplante Vorspannkraft
- $k_F \cdot \Delta l_2 = k_F \cdot (l_S - l_F) \approx$ Kraftänderung durch Formfindung
- $k_F \cdot \Delta l_3 = k_F \cdot (l_A - l_F) \approx$ Verbleibende Vorspannkraft

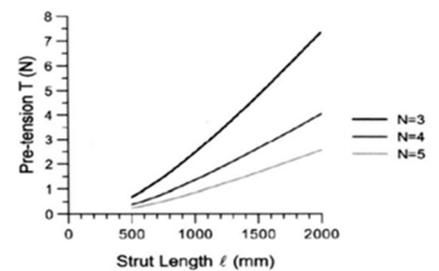
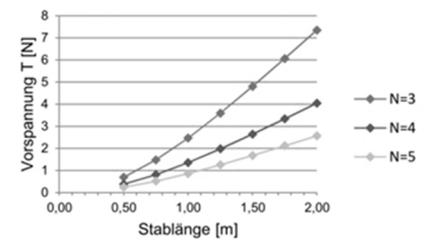
Der Wert Δl_1 beschreibt die Differenz aus Ausgangs- und Solllänge und kann somit als die in das System eingebrachte Kraft verstanden werden und entspricht folglich einer geplanten Vorspannkraft. Für den Formfindungsprozess wurde eine einheitliche Solllänge für alle Zugelemente definiert, daher ist Δl_1 , bzw. die Größe der geplanten Vorspannkraft nur von der Ausgangslänge abhängig. Die Differenz aus Solllänge und formgefundener Länge Δl_2 stellt den Einfluss des Formfindungsprozesses auf die einzelnen Elemente dar und ist daher als Kraftänderung zu interpretieren. Der Wert Δl_3 ist die Differenz aus Ausgangslänge und formgefundener Länge, somit ist dieser Wert als endgültig verbleibende Vorspann-

kraft, beziehungsweise als Zugkraft in den jeweiligen Elementen zu verstehen.

Zum Vergleich der Ergebnisse des Seilmodells mit der Studie von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin wurde der Ergebniswert Δl_3 , also die endgültig verbleibende Vorspannkraft herangezogen. Die Solllängenfaktoren und die Steifigkeitsverhältnisse wurden für eine Vergleichbarkeit der Berechnung des Seilmodells mit den Ergebnissen von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin so gewählt, dass sich zahlenmäßig ähnliche Werte ergeben [Lindenberg, 2017, S.51]. Die Vorspannkraften werden von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin mit $T = K_m \cdot \Delta c$ definiert. Der Wert Δc gibt dabei die Längenänderung eines Seilelements zwischen zwei benachbarten Druckelementen an (siehe Bild 5-6) und K_m ist eine von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin gewählte Dehnsteifigkeit der Elemente [Tu, 2016]. Die beiden Diagramme zeigen (siehe Bild 5-9), dass die Vorspannkraften in den Zugelementen mit zunehmender Druckelementlänge ansteigen. Dieses Verhalten lässt sich dadurch erklären, dass die Berechnung der Vorspannkraften über den Wert Δc an die Druckelementlänge gekoppelt ist, werden die Druckelemente länger, so wird auch die absolute Länge der Seile erhöht. Der Wert c ist abhängig von der Übergreifungslänge a , die auf die Druckelementlänge zurückzuführen ist. Außerdem werden in der Studie von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin drei Konfigurationen mit unterschiedlicher Druckelementanzahl je Druckelementreihe N durchgeführt. Dabei ist zu erkennen, dass weniger Druckelemente pro Druckelementreihe einen stärkeren Anstieg der Vorspannkraften bedingen. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die Erhöhung der Druckelemente pro Druckelementreihe zu kleineren Winkeln α und β führt. Werden die Winkel kleiner, so verteilen sich auch die Kräfte entsprechend und fallen damit bei mehr Elementen kleiner aus.

Es ist an dieser Stelle jedoch anzumerken, dass der hier vorgenommene Ergebnisvergleich der Einschränkung unterliegt, dass das Seilmodell infolge des durchgeführten Formfindungsprozesses seine Kreisform verliert und somit die Zugelemente unterschiedliche formgefundene Längen aufweisen. Damit unterscheiden sich je nach Lage im System auch die Verhältniswerte Δl_1 , Δl_2 und Δl_3 , voneinander. Bei der Studie von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin konnte dieser Aspekt aufgrund der vorliegenden Rotationssymmetrie unberücksichtigt bleiben. Das hat für die vorliegende Auswertung des Seilmodells zur Folge, dass eigentlich mit einer Änderung der Druckelemente je Druckelementreihe N auch unterschiedliche Elemente für die Auswertung herangezogen werden müssten, um sicherzustellen dass die Lage im System nahezu identisch ist.

Grundlegend ist festzuhalten, dass durch die durchgeführten Untersuchungen am Seilmodell eine korrekte Funktionsweise der programmierten Algorithmen bestätigt werden konnte. Ebenfalls wurde durch die Untersuchungen die Notwendigkeit eines Formfindungsprozesses aufgezeigt, da sich durch den Vergleich gezeigt hat, dass die kreisförmige Geometrie keinen statischen Gleichgewichtszustand darstellt. Es ist an die-



5-9 Ergebnisvergleich der Variation des Parameters Druckelementlänge am Seilmodell (oben) und der Studie nach Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin (unten)

ser Stelle jedoch anzumerken, dass das Seilmodell lediglich eine erste Näherung für die erforderlichen Untersuchungen von Tensegrity-Membran-Strukturen darstellt, da die linear vorliegenden Zugelemente keinerlei Rückschlüsse auf das typische zweiachsige Tragverhalten einer Membran zulassen. Für die Abbildung eines zweiachsigen Lastabtrages einer Membran wird in einem weiteren Schritt das generierte Seilmodell durch die Implementierung eines engmaschigen Seilnetzes erweitert. Das generierte Modell wird entsprechend als Seilnetzmodell bezeichnet.

5.3 Beschreibung des Seilnetzmodells

Der Aufbau des Seilnetzmodells erfolgt ebenfalls parametrisch, die Grundlage dafür bilden die bereits programmierten Algorithmen des Seilmodells, die entsprechend erweitert werden. Damit gleicht auch der programmatische Aufbau des Seilnetzmodells dem des Seilmodells und kann ebenfalls in die folgenden fünf Steps aufgeteilt werden:

- Step 1: Eingangsparameter, Bedienelemente, Anzeigeeigenschaften
- Step 2: Berechnung der definierten mathematischen Bezüge
- Step 3: Aufbau und Berechnung des digitalen Seilnetzmodells
- Step 4: Formfindungsalgorithmus
- Step 5: Auswertung

5.3.1 Eingangsparameter und Programmaufbau (Step 1-3)

Die Eingangsparameter sind identisch mit denen des Seilmodells. Es werden folglich die Länge eines Druckelementes (l), der Übergreifungslängenfaktor benachbarter Druckelemente (ρ), der Druckelementreihenabstand der ungefalteten Struktur (S), die Anzahl der Druckelemente je Druckelementreihe (N), die Anzahl der benachbarten Druckelementreihen (n_i) und der Rotationswinkel des Pavillonausschnitts (Ω) als variable Größen definiert. Wie bereits beschrieben, werden auch bei dem Seilnetzmodell in einem zweiten Step die mathematischen Bezüge und die für den weiteren Programmaufbau zusätzlich benötigten geometrischen Zwischenwerte berechnet.

Die programmatische Erfassung des Seilnetzmodells und die damit verbundene Visualisierung erfolgt im Step 3. Die definierten Algorithmen zur Anordnung der Druckelemente können ebenfalls aus dem Seilmodell übernommen werden. Die Umsetzung eines engmaschigen gleichmäßigen Seilnetzes erfordert eine Erweiterung der Programmierung, dementsprechend entfallen die ursprünglichen Elemente. Das Seilnetz wird ebenfalls parametrisch erzeugt, sodass eine variable Maschenweite und zwei unterschiedliche Orientierungen der Seilnetzelemente wählbar sind. Eine Orientierung um 90° oder 135° ist nicht notwendig, da das richtungsabhängige Verhalten des Seilnetzes über die entsprechenden Strength-Werte der einzelnen Seilnetzlinien geändert werden kann.

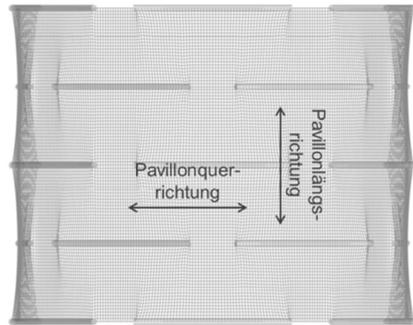
- 0° Netz (parallel und orthogonal zu den Druckelementen ausgerichtete Netzlinien)
- 45° Netz (diagonal zu den Druckelementen ausgerichtete Netzlinien)

Die Wahl der beiden unterschiedlichen Ausrichtungen des Seilnetzes richtet sich nach den bereits identifizierten Hyparflächen (siehe Abschnitt 4.2.2). Die Hyparfläche II liegt gegenüber der Hyparfläche I um etwa 45° verdreht vor. Dementsprechend kann mit Hilfe der Netzorientierung untersucht werden, welche Einflüsse diese auf das globale Tragverhalten der Struktur mit sich bringt. Generell wird ein gleichmäßiges Netz mit

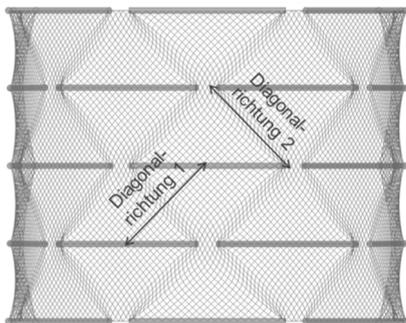
gleich langen Elementen, sowie gleichen Abständen zueinander generiert, da dies dem Gewebe herkömmlicher textilen Membranen entspricht [Seidel, 2008, S.35ff.].

5.3.2 Formfindung (Step 4)

Auch das Seilnetzmodell wird nach Berechnung der Geometrie über einen Algorithmus auf Basis der dynamischen Relaxation formgefunden. Dieser Prozess erfordert zunächst eine Implementierung der material-spezifischen Parameter, die richtungsabhängig definiert werden können. Im Gegensatz zu dem Seilmodell, welches nur aus drei Elementen (Druckelementen, Zugelementen und Auflagerpunkten) besteht, ist hier eine weitere Differenzierung der Zugelemente erforderlich, da textile Membrane aufgrund ihres Herstellungsprozesses in Kett- und Schussrichtung unterschiedliche Materialeigenschaften aufweisen können. Die Bilder 5-10 und 5-11 verdeutlichen die Netzorientierung an zwei beliebigen Konfigurationen eines 0° und eines 45° Netzes. Folgende materialspezifische Unterteilung der Zugelemente wurde entsprechend vorgenommen.



5-10 Netzausrichtung am 0° Netz in der Draufsicht des Seilnetzmodells



5-11 Netzausrichtung am 45° Netz in der Draufsicht des Seilnetzmodells

Einteilung am 0° Netz:

- Seilnetzlinien in Pavillonlängsrichtung (rechtwinklig zu den Druckelementen)
- Seilnetzlinien in Pavillonquerrichtung (in Richtung der Druckelemente)

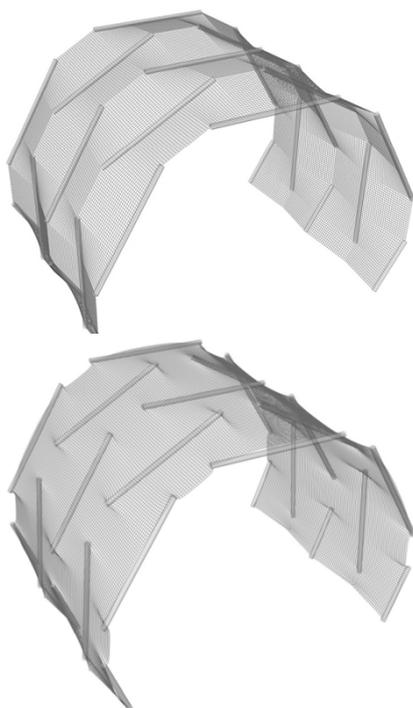
Einteilung am 45° Netz:

- diagonale Seilnetzlinien in Diagonalrichtung 1
- diagonale Seilnetzlinien in Diagonalrichtung 2

Der Formfindungsprozess unterliegt auch hier den bereits aufgezeigten Vor- und Nachteilen (siehe Abschnitt 5.2.2). Bild 5-12 zeigt jeweils eine Variante des Seilnetzmodells vor und nach Formfindung mit einem 0° Netz. Im Gegensatz zu der Abbildung des Seilnetzmodells vor der Formfindung, können am Seilnetzmodell nach Formfindung die doppelt gekrümmten Membranflächen deutlich identifiziert werden, am Seilnetzmodell vor Formfindung liegen diese Flächen hingegen noch eben vor, was keinem realen Zustand entspricht.

5.3.3 Auswertung (Step 5)

Der fünfte Step dient dazu die Ergebnisse des Formfindungsprozesses aufzubereiten, um diese Daten für die weitere Verarbeitung zu exportieren. In Kapitel 4 wurde bereits aufgezeigt, dass sich die gesamte Membranfläche aus einer Addition von zwei, sich wiederholenden Hyparflächen beschreiben lässt (siehe Abschnitt 4.2.2). Damit wurden wesentliche Bereiche identifiziert, die durch ihre geometrische Ausbildung das Tragverhalten der Struktur definieren. Die Auswertung der anstehenden Parameterstudie erfolgt somit anhand von Parametern, welche die geometrische Ausbildung der Hyparflächen I und II, und damit das Tragverhalten der gesamten Struktur beeinflussen. Die wesentlichen geometrischen

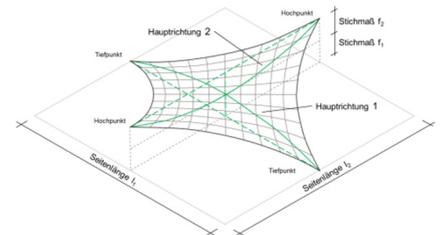


5-12 Seilnetzmodell vor Formfindung (oben) und nach Formfindung (unten)

Eigenschaften einer Hyparfläche definieren sich im Allgemeinen anhand der nachfolgend beschriebenen Parameter. Die Indizes 1 und 2 bezeichnen im allgemeinen Fall die lokalen Richtungen einer beispielhaften Hyparfläche.

- Spannweite zwischen den Hoch- bzw. Tiefpunkten (Seitenlänge l_1 und l_2)
- Höhe des Stichmaßes im Kreuzungspunkt der Hauptrichtungen (Stichmaß f_1 und f_2)
- Länge bzw. Längenänderung der Hauptrichtungen (Hauptrichtung 1 und Hauptrichtung 2)

Bild 5-13 zeigt exemplarisch einen allgemeinen Fall einer gleichmäßigen Hyparfläche. Die Hoch- und Tiefpunkte, die jeweiligen Seitenlängen, die zugehörigen Stichmaße, sowie die Hauptrichtungen sind nach der zuvor genannten Definition dargestellt. Die Krümmung der jeweiligen Hauptrichtungen, folgend auch als Stich- zu Seitenlängenverhältnis bezeichnet, kann anhand des Stichmaßes (f_1 und f_2) und der zugehörigen Seitenlänge (l_1 und l_2) ermittelt werden. Ebenfalls lässt sich mit den benannten Werten auch die Länge der Hauptrichtungslinien berechnen.



5-13 Prinzipdarstellung einer gleichmäßigen Hyparfläche mit Angabe der wesentlichen geometrischen Kenngrößen

Für die Auswertung der anstehenden Parameterstudie wurden zur Identifizierung der geometrischen Ausbildung der Hyparflächen I und II folgende Kenngrößen definiert und untersucht:

- das Stich-/ Seitenlängenverhältnis (f_i/l_i)
- die Längenänderung der Hauptrichtungen (Dehnung Δl_i)
- das Seitenlängenverhältnis (l_1/l_2)

Eine Auswertung des Stich-/Seitenlängenverhältnisses erlaubt eine detaillierte Aussage über die geometrische Ausbildung der beiden Hauptrichtungen der jeweiligen Hyparfläche. Grundlegend lässt sich damit aussagen, dass gleichmäßige Flächenkrümmungen einen gleichmäßigen zweiachsigen Lastabtrag, und damit ein zweiachsiges Tragverhalten begünstigen.

Die Längenänderung (Dehnung) der beiden Hauptrichtungen erlaubt im Allgemeinen einen qualitativen Aufschluss über die Beanspruchung der jeweiligen Elemente. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass die nachfolgend ausgewerteten Längenänderungen zwischen dem Zustand vor Formfindung und dem formgefundenen Gleichgewichtszustand erfolgt sind. Da der Zustand vor Formfindung kein real existenter Zustand ist, ist die Aussagekraft der absoluten Ergebnisse daher eingeschränkt. Die qualitative Werteentwicklung der Längenänderungen kann allerdings als Prognose für mögliche Spannungszustände im Gleichgewichtszustand herangezogen werden.

Das Seitenlängenverhältnis gibt Auskunft über die geometrische Ausbildung der einzelnen Hyparfläche, ein direkten Vergleich der Seitenlängenverhältnisse der Hyparflächen I und II erlaubt darüber hinaus eine

Auskunft über die Gleichmäßigkeit der beiden Teilflächen in der gesamten Pavillonstruktur. Nähern sich die Seitenlängenverhältnisse der Hyparflächen einem gemeinsamen Wert an, so ist das für die geometrische Ausprägung der Struktur als positiv aufzufassen, da beide Teilflächen damit ähnlich stark beansprucht werden.

Da die durchgeführte Parameterstudie des Seilnetzmodells wesentlich umfangreicher ist, als die des Seilmodells, werden die Studie sowie die die erzielten Untersuchungsergebnisse in dem folgenden Abschnitt „Parametergestützte Analyse am Seilnetzmodell“ detailliert dargestellt und erläutert.

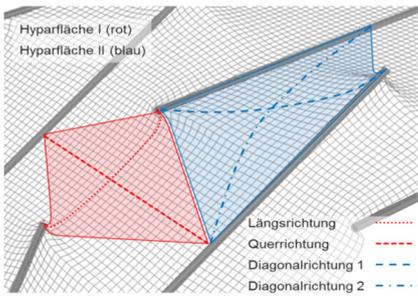
5.4 Parametergestützte Analyse am Seilnetzmodell

Zunächst wird nachfolgend der gewählte Untersuchungsausschnitt, sowie die Grundeinstellung der einzelnen unabhängigen Parameter erläutert. Im Anschluss werden die Untersuchungsergebnisse der gewählten Referenzstruktur präsentiert. In dem ersten Durchlauf wurden nur einzelne geometrische Parameter verändert, um deren tragwerkstechnische Auswirkungen auf die prinzipielle Beanspruchung einer textilen Membran, wie beispielsweise auf die geometrische Ausprägung der Fläche zu analysieren. Darauf aufbauen wird in einem zweiten Durchlauf eine Variantenstudie vorgestellt, die dazu dient, eine Systemkonfiguration der Referenzstruktur zu ermitteln, die eine möglichst tragwerkstechnisch optimierte geometrische Ausprägung der textilen Membran aufweist. Diese bildet dann die Grundlage der nachfolgenden beispielhaften konstruktiven Umsetzung eines Demonstrators. Bei der Variantenstudie werden mehrere Parameter variiert. Dementsprechend kann dieser Teil als Multiparameteroptimierung bezeichnet werden.

5.4.1 Untersuchungsausschnitt

Grundlegend können mit dem programmierten Algorithmus verschiedene Bereiche der Membranfläche zur Auswertung herangezogen werden. Um möglichst eindeutige Rückschlüsse auf das Tragverhalten der Hyparflächen treffen zu können und mögliche Überlagerungen und Einflüsse in den Randbereichen auszuschließen, beziehungsweise um diese zu minimieren, wurden für die nachfolgende Parameterstudie zwei benachbarte Hyparflächen in Systemmitte ausgewählt.

Auf alle anderen Hyparflächen können die gewonnenen Erkenntnisse entsprechend übertragen werden, da aufgrund der Symmetrie auch das qualitative Tragverhalten vergleichbar ist. Da diese Parameterstudie primär das Ziel verfolgt die globale Systemgeometrie in Hinsicht auf das Einführen einer textilen Membran zu optimieren, ist die Genauigkeit der generierten Ergebnisse für diesen Arbeitsschritt ausreichend. Für eine bauliche Umsetzung ist es hingegen erforderlich ein exaktes Berechnungsmodell zu verwenden, um zum Beispiel die maximal auftretenden Spannungen der Membran an jedem Punkt im System zu ermitteln. Dazu sollte beispielsweise ein FE-Modell der Gesamtstruktur angefertigt werden.



5-14 Zuordnung der Haupttrichtungslinien der Hyparflächen I und II

Für eine bessere Orientierung bei der Auswertung sind die untersuchten Hyparflächen I und II in Bild 5-14 farblich mit den zugehörigen Haupttrichtungen hervorgehoben. Das Bild verdeutlicht, dass die Flächen im Gesamtsystem, bezogen auf die jeweilige Haupttrichtung, zueinander verdreht angeordnet sind. Für die folgende Auswertung der Parameterstudie richten sich die Bezeichnungen nach der globalen Ausrichtung der Referenzstruktur. Die Haupttrichtungslinien werden folgend in Längsrichtung, beziehungsweise in Querrichtung zur gesamten Pavillonstruktur beschrieben.

- Haupttrichtungslinie der Hyparfläche I in Längsrichtung (rot durchgezogene Linie)
- Haupttrichtungslinie der Hyparfläche I in Querrichtung (rot gestrichelte Linie)
- Haupttrichtungslinie der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (blau durchgezogene Linie)
- Haupttrichtungslinie der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (blau gestrichelte Linie)

5.4.2 Allgemeine Parametereinstellung

Grundlegend werden zur geometrischen Beschreibung der untersuchten Struktur weiterhin die von Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin definierten unabhängigen geometrischen Parameter [Tu, 2016] als Eingangsparameter genutzt. Für die folgende Studie zur geometrischen Ausbildung der Hyparflächen eignen sich allerdings nur drei der insgesamt sechs benannten Parameter: die Länge eines Druckelements (l), der Übergreifungslängenfaktor benachbarter Druckelemente (ρ) und der Druckelementreihenabstand der ungefalteten Struktur (S).

Die weiteren Parameter werden im Rahmen der vorliegenden Studie nicht variiert. Sowohl der Rotationswinkel des Pavillonausschnitts (Ω) und die Anzahl der Druckelemente je Druckelementreihe (N) verändern maßgeblich die Ausgangsgeometrie des Pavillons und bieten daher keine ausreichende Vergleichbarkeit mit anderen Konfigurationen. Die Anzahl der benachbarten Druckelementreihen (n_i) hat lediglich einen Einfluss auf die Länge der Gesamtstruktur und beeinflusst daher nicht die Ergebnisse der beiden mittig platzierten Hyparflächen, sofern eine ausreichende Anzahl benachbarter Druckelementreihen existiert. Um die Einflüsse der verschiedenen Parameter vergleichen zu können, müssen diese Parameter Ω , N und n_i als variable Größen von der Studie ausgeschlossen werden. Für die entsprechenden Parameter wurden in der folgenden Untersuchung feste Werte angesetzt:

- $N = 4$
- $n_i = 5$
- $\Omega = 240^\circ$

Durch die Auswahl ergibt sich ein Ausschnitt der Struktur mit fünf benachbarten Druckelementreihen und damit vier nebeneinanderliegenden

Membranstreifen. Innerhalb jeder Druckelementreihe existieren vier identisch lange Druckelemente, beziehungsweise bei den versetzten Druckelementreihen, jeweils drei identisch lange Druckelemente und jeweils zwei Druckelemente halber Länge. Der gewählten Rotationswinkel von 240° wirkt sich günstig auf die konstruktive Ausbildung der Auflagersituation aus. Da die untere Druckelementreihe in Bezug auf die Symmetrieachse der Struktur nach außen geneigt ist, könnte eine einfache zugbeanspruchte Kopplung der gegenüberliegenden Auflagerpunkte eine mögliche Horizontalkomponente aufnehmen. Für die variablen geometrischen Parameter wird die folgende Grundeinstellung vorgenommen:

- $l = 1,0 \text{ m}$
- $\rho = 0,3 \text{ m}$
- $S = 0,5 \text{ m}$

Zusätzlich zu den drei variablen geometrischen Kenngrößen wird aufgrund der richtungsabhängigen Materialeigenschaften der textilen Membran auch ein Einfluss aus der Orientierung des Gewebes (0° Netz, 45° Netz) untersucht. Grundlegend können die geometrischen Parameter jedoch unabhängig von der Netzorientierung variiert werden, dadurch kann die Orientierung des Netzes als übergeordneten Parameter definiert werden.

Die Ausgangskonfiguration der materialspezifischen Parameter wird wie folgt vorgenommen. Eine Änderung der Einstellungen der Auflagerpunkte und Druckelemente ist nicht sinnvoll, der Vollständigkeit halber werden sie aber trotzdem an dieser Stelle als Parameter benannt und aufgeführt.

- Auflagerpunkte Strength-Faktor: 1,0 (unverschieblich)
- Druckelemente Strength-Faktor: 1,0 (dehnstarr)
- Druckelemente Solllängenfaktor: 1,0 (nicht vorgespannt)
- Seilnetzlinien in Längsrichtung am 0° Netz Strength-Faktor: 0,0001
- Seilnetzlinien in Längsrichtung am 0° Netz Solllängenfaktor: 0,9 (vorgespannt)
- Seilnetzlinien in Querrichtung am 0° Netz Strength-Faktor: 0,0001
- Seilnetzlinien in Querrichtung am 0° Netz Solllängenfaktor: 0,9 (vorgespannt)
- diagonale Seilnetzlinien 1 am 45° Netz Strength-Faktor: 0,0001
- diagonale Seilnetzlinien 1 am 45° Netz Solllängenfaktor: 0,9 (vorgespannt)
- diagonale Seilnetzlinien 2 am 45° Netz Strength-Faktor: 0,0001
- diagonale Seilnetzlinien 2 am 45° Netz Solllängenfaktor: 0,9 (vorgespannt)

Die richtungsbezogene Definition der einzelnen Seilnetzlinien mit entsprechenden Materialeigenschaften bietet die Möglichkeit verschiedene dominierende Tragrichtungen in der Parameterstudie zu simulieren.

5.4.3 Parameterstudie am Seilnetzmodell

		Parametervariation		
		Druckelementlänge	Übergreifungslängenfaktor	Druckelementreihenabstand
Hyparfläche I	Längsrichtung	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis
		Längenänderung	Längenänderung	Längenänderung
	Querrichtung	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis
		Längenänderung	Längenänderung	Längenänderung
	Beide Richtungen	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis
		Längenänderung	Längenänderung	Längenänderung
Hyparfläche II	Diagonalrichtung 1	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis
		Längenänderung	Längenänderung	Längenänderung
	Diagonalrichtung 2	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis
		Längenänderung	Längenänderung	Längenänderung
	Beide Richtungen	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis	Stich-/Seitenlängenverhältnis
		Längenänderung	Längenänderung	Längenänderung
Beide Richtungen	Seitenlängenverhältnis	Seitenlängenverhältnis	Seitenlängenverhältnis	
	Längenänderung	Längenänderung	Längenänderung	

Geometrische Kenngrößen zur Auswertung der Hyparflächen

5-15 Matrix zur Übersicht der jeweils einzelnen vorgenommenen Parametervariationen und der ausgewerteten geometrischen Kenngrößen

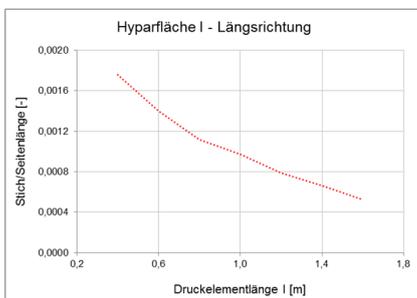
Nachfolgend werden die Ergebnisse der Parameterstudie infolge der Variation einzelner geometrischer Parameter (Druckelementlänge, Übergreifungslängenfaktor und Druckelementreihenabstand) an der Referenzstruktur präsentiert. Für die Referenzstruktur werden die in dem vorherigen Abschnitt definierten Grundeinstellungen der geometrischen Parameter sowie die definierte Ausgangskonfiguration der materialspezifischen Parameter zugrunde gelegt (siehe Abschnitt 5.4.2). Von daher werden nur von den Grundeinstellungen abweichende Parametereinstellungen sowie die genauen Netzeinstellungen nachfolgend gesondert benannt. Aufgrund der Komplexität der durchgeführten Studie, dient Bild 5-15 der Übersicht der untersuchten Variationsschritte. Dabei folgt die Untersuchung immer dem gleichen Aufbau, für den Parameter Druckelementlänge werden als erstes an der Hyparfläche I die Ergebnisse (Stich-/Seitenlängenverhältnis und Längenänderung) in Längsrichtung und danach in Querrichtung erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse beider Richtungen (Stich -/Seitenlängenverhältnis, Längenänderung und Seitenlängenverhältnis) der Hyparfläche I gegenübergestellt. Als zweites folgt die Ergebnisdarstellung für den Parameter Druckelementlänge an der Hyparfläche II. Auch hier werden zuerst die Ergebnisse der Diagonalrichtung 1 und im Anschluss die Ergebnisse der Diagonalrichtung 2 beschrieben. Danach erfolgt auch für die Hyparfläche II eine Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Richtungen. Das identische Vorgehen wird im Anschluss für die Parameter Übergreifungslängenfaktor und Druckelementreihenabstand durchgeführt.

5.4.3.1 Ergebnisse der Parametervariation Druckelementlänge am 0° Netz

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Variation des Parameters Druckelementlänge erläutert. Der Parameter wird dafür von $l = 0,4 \text{ m}$ bis $l = 1,6 \text{ m}$ in $0,2 \text{ m}$ Schritten variiert. Es wird ein 0° Netz mit einer Maschenweite von 20 mm angesetzt.

Ergebnisse an der Hyparfläche I

Die Ergebnisse der Hyparfläche I erklären sich wie folgt, wird die Länge der Druckelemente erhöht, so führt dies zu einer Verringerung des Stich-/Seitenlängenverhältnis in Längsrichtung der Hyparfläche I (siehe Bild 5-16). Mit zunehmender Druckelementlänge nimmt der Verlauf des Graphen des Stich-/Seitenlängenverhältnisses leicht fallend ab und nähert sich dem Wert 0 an. Das könnte bedeuten, dass die Verlängerung der Druckelementlänge den Lastabtrag in Längsrichtung erhöht. Dieser Einfluss wird allerdings erst nach einer entsprechenden Untersuchung der zweiten Hauptrichtungslinie der Hyparfläche I abschließend bewertet. Auch ist zu beachten, dass der Wertebereich des Stich-/Seitenlängenverhältnisses sehr gering ausfällt, dementsprechend kann vermutet werden, dass die Flächenkrümmung nicht besonders ausgeprägt auftritt.

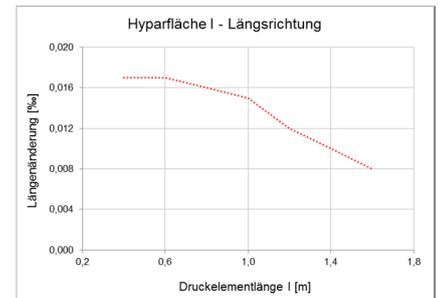


5-16 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Längsrichtung (Druckelementlänge)

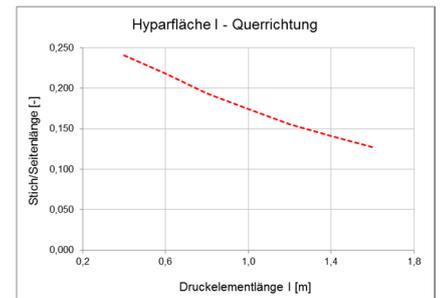
Des Weiteren verursacht die Verlängerung der Druckelementlänge eine positive Längenänderung (Dehnung) der Hauptrichtungslinie in Längsrichtung (siehe Bild 5-17). Allerdings ist anzumerken, dass mit einer Zunahme der Druckelementlänge die positiven Längenänderungen kleiner werden, der Verlauf des Graphen ist dabei als annähernd linear zu interpretieren. Das bedeutet grundlegend, dass die entsprechende Hauptrichtungslinie zugbeansprucht ist. Die Abnahme der Längenänderung bei einer Erhöhung der Druckelementlänge kann darauf zurückgeführt werden, dass mit zunehmender Druckelementlänge das Stich-/Seitenlängenverhältnis kleiner wird und damit die absolute Länge der Hauptrichtungslinie auf der Membran entsprechend kürzer wird. Dieser Aspekt sollte allerdings auch erst abschließend unter Bezug auf die zweite Hauptrichtungslinie der Hyparfläche I bewertet werden. Ebenfalls ist hier der entsprechende kleine Wertebereich der Längenänderungen zu berücksichtigen.

In Bezug auf die Hauptrichtungslinie in Querrichtung der Hyparfläche I nimmt das Stich-/Seitenlängenverhältnis ebenfalls mit zunehmender Druckelementlänge ab (siehe Bild 5-18). Der Verlauf des Graphen ist hier als linear zu interpretieren. Dieses Verhalten würde bedeuten, dass durch die Verlängerung der Druckelementlänge der Lastabtrag auch in Querrichtung zunimmt. Auch ist anzumerken, dass der Einfluss hier scheinbar deutlich größer ist, als in Längsrichtung. Der Einfluss wird ebenfalls erst abschließend in einem Vergleich mit der ersten Hauptrichtungslinie der Hyparfläche I bewertet.

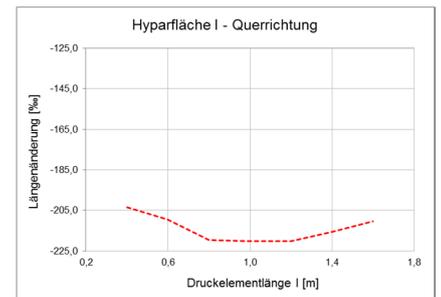
Im Gegensatz zur Längsrichtung verursacht die Veränderung der Druckelementlänge in Querrichtung eine negative Längenänderung, also einen Abbau der Vorspannung (siehe Bild 5-19). Der Graph bewegt sich dabei im größeren negativen Bereich innerhalb eines Spektrums von knapp 20 ‰. Die größten negativen Werte sind bei einer Druckelementlänge von 0,8 m bis 1,2 m zu identifizieren. Da sich die Längenänderung als Differenz aus dem Zustand vor Formfindung und dem formgefundenen Zustand ergibt (vgl. Abschnitt 5.3.3), sollten die Zahlenwerte nicht absolut bewertet werden. Daher wird sich auf eine qualitative Aussage beschränkt. Der Einfluss der Druckelementlänge auf die Querrichtung scheint relativ ausgeprägt zu sein. Da der Maximalbereich der Stauchung zwischen 0,8 m und 1,2 m Druckelementlänge liegt und die Höhe der negativen Stauchung mit steigender Druckelementlänge abnimmt, sollte idealerweise eine Druckelementlänge von größer als 1,2 m gewählt werden, um diese ansteigende Tendenz entsprechend aufzunehmen. Im Allgemeinen kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass der hier betrachtete Bereich der Hyparfläche I im Fall einer baulichen Umsetzung einer besonderen Beachtung bedarf.



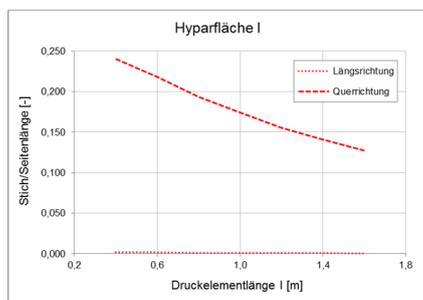
5-17 Längenänderung der Hyparfläche I in Längsrichtung (Druckelementlänge)



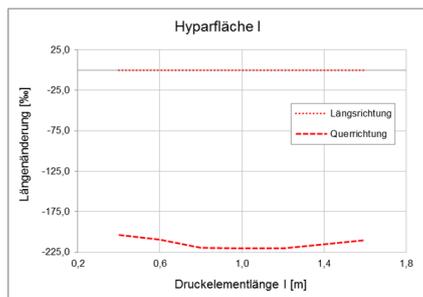
5-18 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Querrichtung (Druckelementlänge)



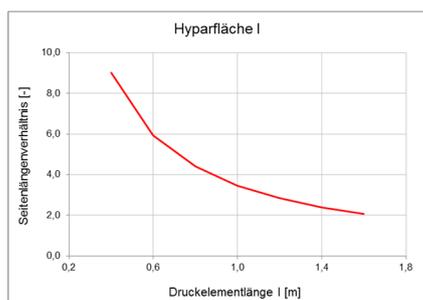
5-19 Längenänderung der Hyparfläche I in Querrichtung (Druckelementlänge)



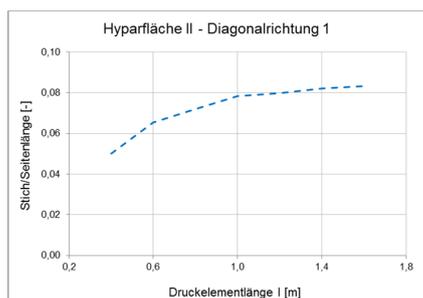
5-20 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Druckelementlänge)



5-21 Längenänderung der gesamten Hyparfläche I (Druckelementlänge)



5-22 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Druckelementlänge)



5-23 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Druckelementlänge)

Wird nun das Stich-/Seitenlängenverhältnis der beiden Hauptrichtungslinien im Vergleich zueinander betrachtet, so ist zu erkennen, dass die Größenordnung der beiden Graphen deutlich voneinander abweicht (siehe Bild 5-20). Es kann davon ausgegangen werden, dass mit der gewählten Grundkonfiguration ein entsprechend ungleichmäßiger Lastabtrag in der Hyparfläche I vorliegt. Die grundsätzliche geometrische Ausprägung der Hyparfläche I deutet bereits auf dieses Verhalten hin: Die Hauptrichtungslinie, die zwei Druckelementenden einer Druckelementreihe verbindet ist sehr stark gekrümmt. Die zweite Hauptrichtungslinie hingegen weist eine sehr schwache Krümmung auf. Außerdem ist zu erkennen, dass der Parameter Druckelementlänge einen wesentlich stärkeren Einfluss auf den, als eher kritisch zu betrachtenden Bereich in Querrichtung hat. Generell ist eine Erhöhung der Druckelementlänge als positiv zu bewerten, da sich die Stich-/Seitenlängenverhältnisse der Hauptrichtungslinien annähern. Eine Annäherung bedeutet, dass sich ein gleichmäßiger Lastabtrag einstellt. Dieser Aspekt sollte bei der Variantenstudie berücksichtigt werden.

In Bezug auf das Verhältnis der Längenänderungen beider Hauptrichtungslinien zueinander ist kein wesentlicher Einfluss durch die Änderung der Druckelementlänge erkennbar (siehe Bild 5-21). Es zeigt sich allerdings, dass die Beanspruchung der Querrichtung gegenüber der Beanspruchung in Längsrichtung wesentlich größer ist. Dieses Ergebnis kann allerdings erst abschließend im Kontext der gesamten Parameterstudie bewertet werden, da die relativ hohen Absolutwerte durchaus aufgrund der gewählten Ausgangskonfiguration der Parameter zustande kommen können.

Eine abschließende Untersuchung des Seitenlängenverhältnisses der Hyparfläche I in Abhängigkeit der Druckelementlänge zeigt, dass dieses Verhältnis mit einer Erhöhung der Druckelementlänge deutlich abnimmt (siehe Bild 5-22). Der Graph nähert sich als abnehmende Exponentialfunktion dem Verhältniswert von etwas unter 2,0 an. Ideal wäre hier der Verhältniswert von 1,0. Dieser Wert ist anscheinend durch die gewählte Ausgangskonfiguration nicht umsetzbar. Das Verhalten bestätigt aber die bereits gewonnen Erkenntnis, dass eine Verlängerung der Druckelementlänge sich grundsätzlich günstig auf einen gleichmäßigen Lastabtrag der Hyparfläche I auswirkt.

Ergebnisse an der Hyparfläche II

In Bezug auf die Hyparfläche II führt eine Erhöhung der Druckelementlänge dazu, dass das Stich-/Seitenlängenverhältnis in der Diagonalrichtung 1 ansteigt (siehe Bild 5-23). Der Graph verläuft schwach exponentiell ansteigend und nähert sich einem Wert von 0,09 an. Das bedeutet, dass die Krümmung der entsprechenden Hauptrichtungslinie mit zunehmender Druckelementlänge größer wird. Da sich die Differenz allerdings in einem sehr kleinen Bereich bewegt, sollte dieser Aspekt erst im Vergleich mit der zweiten Hauptrichtungslinie abschließend bewertet werden.

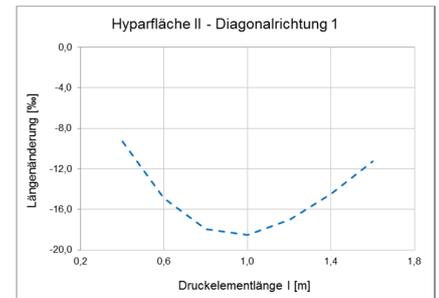
Der Verlauf des Graphen der Längenänderung stellt sich in der Diagonalrichtung 1, in Abhängigkeit des Parameters Druckelementlänge, parabelförmig ein, das Minimum liegt bei 1,0 m (siehe Bild 5-24). Auch hier stellt sich, für alle Variationen der untersuchten Druckelementlänge, eine negative Längenänderung. Dabei steigt die negative Längenänderung mit zunehmender Druckelementlänge zunächst an und erreicht bei 1,0m Länge ihr Minimum, weiter steigende Längen bedingen dann wieder eine Reduzierung der negativen Längenänderung. Damit spricht dieses Verhalten ebenfalls für eine Mindestlänge der Druckelemente, in diesem Fall von größer 1,0 m.

Die Diagonalrichtung 2 verhält sich in Bezug auf das Stich-/Seitenlängenverhältnis ähnlich wie die Diagonalrichtung 1 (siehe Bild 5-25). Der Graph verläuft schwach exponentiell ansteigend und nähert sich mit zunehmender Druckelementlänge dem Wert 0,05 an. Auch hier ist zu erkennen, dass die Krümmung der entsprechenden Hauptrichtungslinie mit zunehmender Druckelementlänge größer wird. Da die Differenz allerdings in einem sehr kleinen Wertebereich liegt, wird dieser Aspekt erst in einem Vergleich mit der ersten Hauptrichtungslinie bewertet.

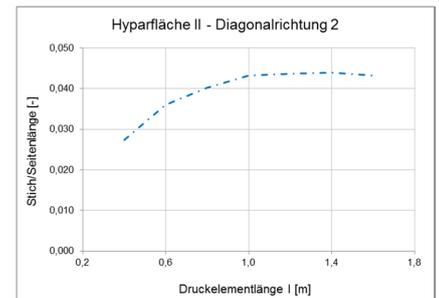
Die Längenänderung der Diagonalrichtung 2 befindet sich in einem positiven Wertebereich (siehe Bild 5-26). Der Graph verläuft annähernd linear ansteigend. Dieses Verhalten lässt eine deutliche Zugbeanspruchung durch die Erhöhung der Druckelementlänge in Diagonalrichtung 2 vermuten. Der hier vorliegende Effekt ist durchaus plausibel, da die Diagonalrichtung 2 jeweils zwischen zwei Druckelementendknoten benachbarter Druckelementreihen wiederzufinden ist. Bei einer Verlängerung der Druckelemente ist davon auszugehen, dass die dazwischenliegende Membran dementsprechend stark und direkt auf Zug beansprucht wird.

Wird das Stich-/Seitenlängenverhältnis beider Hauptrichtungslinien der Hyparfläche II miteinander verglichen, so zeigt sich, dass die Diagonalrichtung 1 etwas stärker gekrümmt ist, als die Diagonalrichtung 2. Mit zunehmender Druckelementlänge nimmt dieser Effekt zu (siehe Bild 5-27). Das bedeutet, dass von einem eher ungleichmäßigen Lastabtrag ausgegangen werden kann. Allerdings ist die Differenz der beiden Diagonalrichtungen verhältnismäßig klein, daher kann auch davon ausgegangen werden, dass der Effekt keinen starken Einfluss auf den Lastabtrag innerhalb der Hyparfläche II ausübt.

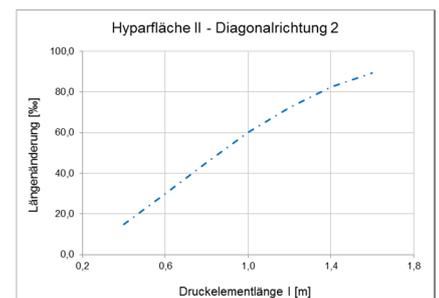
Ein Vergleich der Längenänderungen der beiden Diagonalrichtungen zeigt, dass der Parameter der Druckelementlänge einen deutlichen Einfluss auf die geometrische Kenngröße hat (siehe Bild 5-28). Mit zunehmender Druckelementlänge entfernen sich die beiden Graphen voneinander, was durchaus für eine ungleichmäßige Beanspruchung spricht. Dieses Ergebnis kann allerdings erst im Kontext der gesamten Parameterstudie bewertet werden, da die relativ hohen Absolutwerte durchaus aufgrund der gewählten Ausgangskonfiguration der Parameter zustande kommen können.



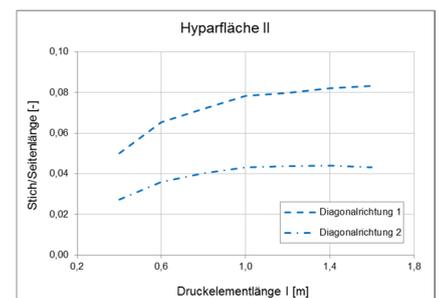
5-24 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Druckelementlänge)



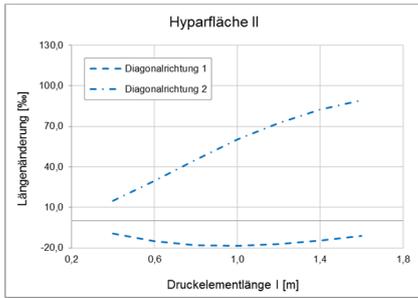
5-25 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Druckelementlänge)



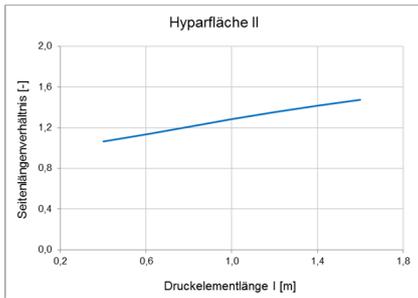
5-26 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Druckelementlänge)



5-27 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Druckelementlänge)



5-28 Längenänderung der gesamten Hyparfläche II (Druckelementlänge)



5-29 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Druckelementlänge)

Eine Untersuchung des Seitenlängenverhältnisses der Hyparfläche 2 zeigt, dass eine geringe Druckelementlänge ein nahezu ausgeglichenes Verhältnis bedingt (siehe Bild 5-29). Durch Erhöhungen der Druckelementlänge steigt das Seitenlängenverhältnis dann linear bis zu einem Wert von ca. 1,5 an. Damit würde in diesem Fall, hingegen den Ergebnissen der Hyparfläche I, eher eine Reduzierung der Druckelementlänge für ein gleichmäßiges Tragverhalten sprechen.

Kurzzusammenfassung

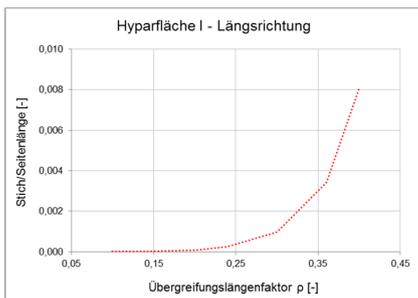
Für ein gleichmäßiges geometrisches Verhältnis der Hyparfläche I wirkt sich eine Erhöhung der Druckelementlänge deutlich positiv aus. Im Gegensatz dazu führt eine Erhöhung der Druckelementlänge zu einem steigenden Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II. Allerdings ist der positive Einfluss auf die Hyparfläche I wesentlich größer, als der ungünstige Einfluss einer Erhöhung der Druckelementlänge auf die Hyparfläche II, womit in Summe zunächst einmal ein positiver Effekt bezogen auf die gesamte Struktur angenommen werden könnte, sollte die Druckelementlänge erhöht werden.

5.4.3.2 Ergebnisse der Parametervariation Übergreifungslängenfaktor am 0° Netz

Nachfolgend werden die Ergebnisse infolge der Parametervariation des Übergreifungslängenfaktors beschrieben. Der Übergreifungslängenfaktor wird aus dem Verhältnis der Übergreifungslänge benachbarter Druckelemente und der eigentlichen Druckelementlänge gebildet. Somit bedeuten größere Übergreifungslängenfaktoren eine erhöhte Überschneidung benachbarter Druckelemente. Der Parameter wird bei der Untersuchung von $\rho = 0,1$ m bis $\rho = 0,4$ m variiert und es wird ebenfalls ein 0° Netz mit einer Maschenweite von 20 mm gewählt.

Ergebnisse an der Hyparfläche I

Die Erhöhung des Übergreifungslängenfaktors führt in Bezug auf die Hauptrichtungslinie in Längsrichtung der Hyparfläche I dazu, dass das Stich-/Seitenlängenverhältnis ansteigt. Der Anstieg verläuft dabei stark exponentiell zunehmend (siehe Bild 5-30). Das bedeutet, dass sich mit einer Erhöhung der Übergreifungslänge ein größeres Stichmaß der entsprechenden Hauptrichtungslinie ausprägt. Das Verhalten scheint erst einmal gegenläufig zu den Ergebnissen des Parameters Druckelementlänge zu sein (siehe Abschnitt 5.4.3.1). Auch dieser Einfluss wird daher erst in Abhängigkeit zur zweiten Hauptrichtungslinie abschließend bewertet. Es ist zudem anzumerken, dass der Wertebereich des Stich-/Seitenlängenverhältnisses relativ klein ist.



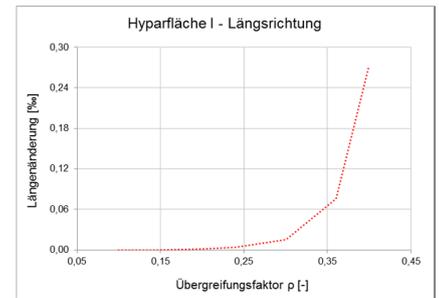
5-30 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Längsrichtung (Übergreifungslängenfaktor)

Die Hauptrichtungslinie in Längsrichtung weist durch Zunahme des Übergreifungslängenfaktors eine positiv ansteigende Längenänderung auf (siehe Bild 5-31). Ab einem Faktor von 0,3 ist dieses Verhalten stark exponentiell ansteigend. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit erhöhter Übergreifungslänge die Zugbeanspruchung der Hauptrichtungslinie zunimmt. Auch dieser Graph bestätigt das gegenläufige Verhalten in Bezug auf den Parameter Druckelementlänge (siehe Abschnitt 5.4.3.1).

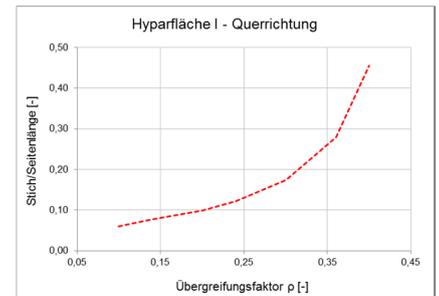
Für die Hauptrichtungslinie in Querrichtung der Hyparfläche I gilt, dass eine Erhöhung des Übergreifungslängenfaktors ebenfalls eine Zunahme des Stich-/Seitenlängenverhältnisses bedingt (siehe Bild 5-32). Der Anstieg verläuft stark exponentiell zunehmend, was bedeutet, dass sich mit einer Erhöhung der Übergreifungslänge ein größeres Stichmaß der Hauptrichtungslinie einstellt. Das Verhalten scheint ebenfalls gegenläufig zu den Ergebnissen des Parameters Druckelementlänge zu sein (siehe Abschnitt 5.4.3.1). Da die Hauptrichtungslinie in Längsrichtung ein ähnliches Verhalten aufweist, sollte dieser Aspekt abschließend in Abhängigkeit zur zweiten Hauptrichtungslinie der Hyparfläche I bewertet werden.

Eine Veränderung des Übergreifungslängenfaktors bewirkt in Querrichtung bewirkt eine negative Längenänderung der Seitenlänge (siehe Bild 5-33). Der Graph nimmt zunächst mit zunehmender Übergreifungslänge annähernd linear ab, beginnt dann aber ab einem Faktor von etwa 0,35 wieder schlagartig anzusteigen. Eine genaue Erklärung für dieses Phänomen liegt nicht vor. Es wird allerdings vermutet, dass die äußere komplexe Gesamtgeometrie bei der Veränderung des Übergreifungslängenfaktors über 0,35 mit einer wesentlichen Änderung der Systemkonfiguration reagiert. Daher sollte die grundlegende Tendenz dieses Parameters berücksichtigt werden. Wie bereits bei der Variation des Parameters Druckelementlänge fällt bei diesem Parameter auch die Querrichtung der Hyparfläche I als kritisch auf und bedarf daher besonderer Beachtung im weiteren Verlauf der Arbeit.

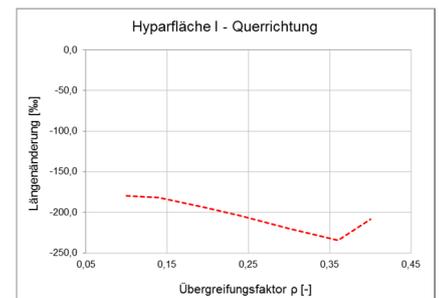
Ein Vergleich der Stich-/Seitenlängenverhältnisse der beiden Hauptrichtungslinien bestätigt die bisherige Vermutung, dass in den beiden Hauptrichtungen der Hyparfläche I ein ungleichmäßiger Lastabtrag vorliegt (siehe Bild 5-34). Zudem ist zu beachten, dass der Einfluss auf die Hauptrichtungslinie in Querrichtung exponentiell zunimmt. Daher kann bereits auf Basis der bisherigen Variation der Druckelementlänge, sowie der Variation der Übergreifungslänge vermutet werden, dass eine Änderung der einzelnen Parameter zu gegenläufigen Ergebnissen führt. Im weiteren Verlauf der Studie ist zu klären in welchem Maßstab der gegenseitige Einfluss der Parameter auftritt.



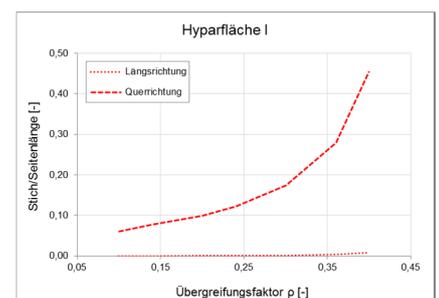
5-31 Längenänderung der Hyparfläche I in Längsrichtung (Übergreifungslängenfaktor)



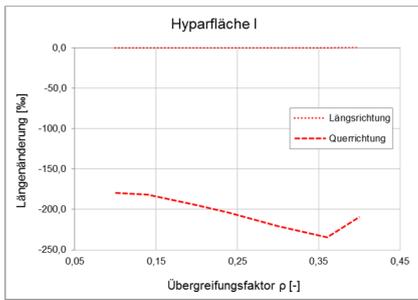
5-32 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Querrichtung (Übergreifungslängenfaktor)



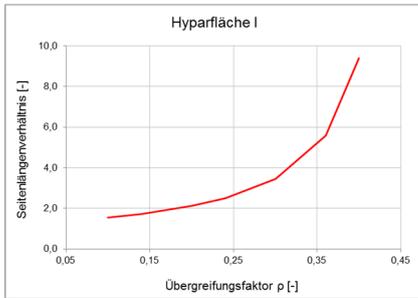
5-33 Längenänderung der Hyparfläche I in Querrichtung (Übergreifungslängenfaktor)



5-34 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Übergreifungslängenfaktor)



5-35 Längenänderung der gesamten Hyparfläche I (Übergreifungslängenfaktor)



5-36 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Übergreifungslängenfaktor)

In Bezug auf das Verhältnis der Längenänderungen beider Hauptrichtungslinien zueinander ist nur ein Einfluss durch die Änderung des Übergreifungslängenfaktors auf die Querrichtung erkennbar (siehe Bild 5-35). Generell ist die Beanspruchung der Querrichtung wesentlich größer, dieses Ergebnis kann allerdings erst abschließend im Kontext der gesamten Parameterstudie bewertet werden, da die relativ hohen Absolutwerte durchaus aufgrund der gewählten Ausgangskonfiguration der Parameter zustande kommen können.

Der Vergleich des Seitenlängenverhältnisses beider Hauptrichtungslinien bestätigt die bereits getroffenen Annahmen, dass eine Erhöhung des Übergreifungslängenfaktors zu einem ungleichmäßigen Tragverhalten führt (siehe Bild 5-36). Der Graph verläuft exponentiell ansteigend. Bei einem kleinen Übergreifungslängenfaktor nähert sich der Graph einem Verhältniswert von etwa 1,5 an, was zumindest für ein anteiliges zweiachsiges Tragverhalten spricht. Daher wird empfohlen, den Parameter Übergreifungslängenfaktor kleiner zu wählen. Das hier kein Verhältniswert von 1,0 vorliegt, ist mit der Wahl der Ausgangskonfiguration zu begründen.

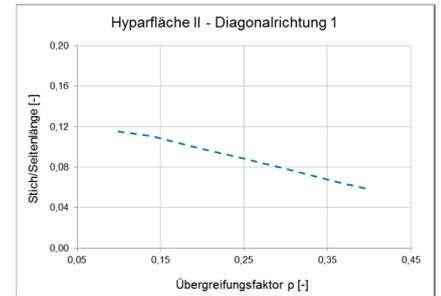
Ergebnisse an der Hyparfläche II

In Bezug auf die Hyparfläche II führt eine Erhöhung des Übergreifungslängenfaktors zu einer Reduzierung des Stich-/Seitenlängenverhältnisses, der Verlauf des Graphen ist dabei annähernd linear und bewegt sich in einem kleinen Wertebereich (siehe Bild 5-37). Auch an dieser Stelle folgt die abschließende Bewertung des Einflusses des Übergreifungslängenfaktors auf die Diagonalrichtung 1 erst im gemeinsamen Vergleich mit der Diagonalrichtung 2.

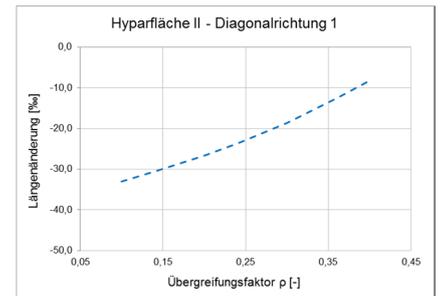
Eine Erhöhung des Übergreifungslängenfaktors bedingt grundlegend eine Abnahme der negativen Längenänderung der Seitenlänge in Diagonalrichtung 1 (siehe Bild 5-38). Der Graph verläuft dabei ebenfalls annähernd linear, und es ist davon auszugehen, dass weitere Vergrößerungen des Übergreifungslängenfaktors sogar zu positive Längenänderungen führen könnten. Allerdings ist fraglich, in wie weit eine weitere Erhöhung des Faktors sinnvoll ist, da es theoretisch ab einem Wert von 0,5 zu einem Kontakt der Druckelemente kommt, was grundlegend dem Definitivkriterium der Diskontinuität widerspricht. Eine abschließende Aussage erfolgt nach Abschluss der Variation der einzelnen Parameter.

Eine Änderung des Übergreifungslängenfaktors hat auf das Stich-/Seitenlängenverhältnis der Diagonalrichtung 2 keinen nennenswerten Einfluss (siehe Bild 5-39). Der Verlauf des Graphen kann als nahezu konstant beschrieben werden, dieser pendelt sich in einem Wertebereich von 0,042 bis 0,044 ein. Damit bewegt sich der Verlauf in einem sehr kleinen Wertebereich, was entsprechend geringe Krümmungen in dieser Richtung bedingt.

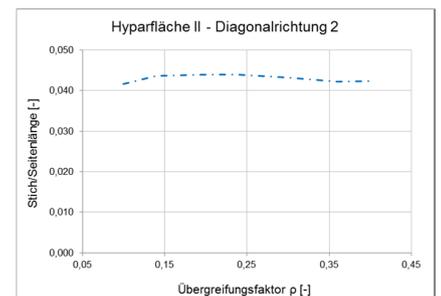
In Bezug auf die Längenänderung der Haupttrichtungslinie in Diagonalrichtung 2 ist erkennbar, dass positive Längenänderungen im größeren Wertebereich vorliegen (siehe Bild 5-40). Dabei liegt ein schwacher parabolähnlicher Verlauf des Graphen mit einem Maximum bei einem Übergreifungslängenfaktor von etwa 0,25 vor. Da alle Parametereinstellungen deutliche positive Ergebnisse hervorrufen, kann davon ausgegangen werden, dass der Parameter des Übergreifungslängenfaktors in diesem Bereich eher als unkritisch zu werten ist.



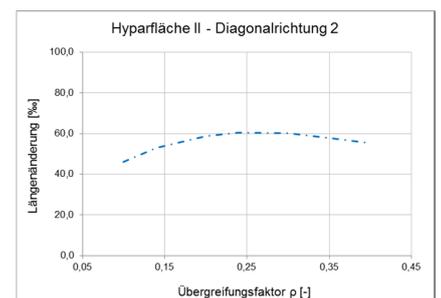
5-37 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Übergreifungslängenfaktor)



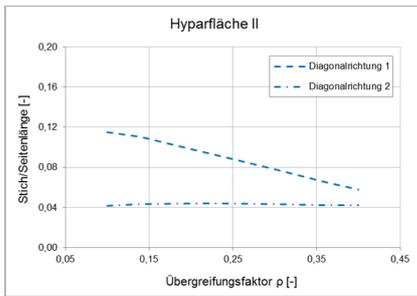
5-38 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Übergreifungslängenfaktor)



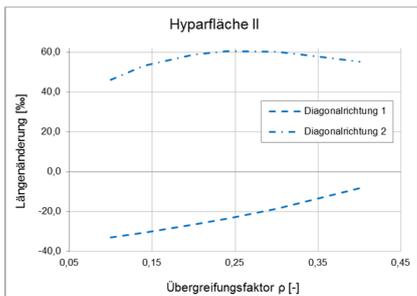
5-39 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Übergreifungslängenfaktor)



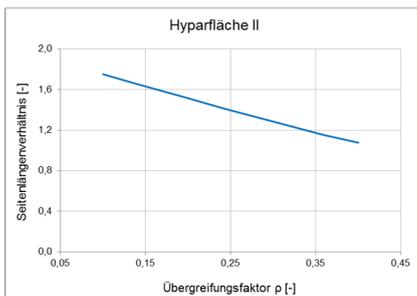
5-40 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Übergreifungslängenfaktor)



5-41 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Übergreifungslängenfaktor)



5-42 Längenänderung der gesamten Hyparfläche II (Übergreifungslängenfaktor)



5-43 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Übergreifungslängenfaktor)

Ein Vergleich der Stich-/Seitenlängenverhältnisse der Hyparfläche II zeigt, dass größere Übergreifungslängenfaktoren allgemein als günstig anzusehen sind (siehe Bild 5-41). Es zeigt sich auch, dass der Parameter auf die Hauptrichtungslinie in Diagonalrichtung 2 keinen maßgebenden Einfluss hat. In der Diagonalrichtung 1 kommt es mit einer Erhöhung des Faktors allerdings zu einer Abnahme des Stich-/Seitenlängenverhältnisses, es nähert sich dem Wertebereich in Diagonalrichtung 2 an. Generell liegen die Stich-/Seitenlängenverhältnisse allerdings eher in einem kleinen Bereich, somit sollte der Einfluss dieses Parameters auf die Hyparfläche II nicht zu stark bewertet werden.

Wird die Längenänderung der beiden Hauptrichtungslinien miteinander verglichen, so ist festzustellen, dass die Graphen in sehr unterschiedlichen Wertebereichen verlaufen (siehe Bild 5-42). Es ist somit von einem eher ungleichmäßigen Lastabtrag auszugehen. Mit einer Vergrößerung des Übergreifungslängenfaktors wird eine leichte Annäherung der Graphen zueinander erreicht.

Die Untersuchung des Seitenlängenverhältnisses der Hyparfläche II zeigt, dass sich dieses mit steigendem Übergreifungslängenfaktor dem Wert 1,0 annähert. Der Graph verläuft dabei linear abnehmend (siehe Bild 5-43). Das bedeutet, dass eine größere Übergreifungslänge das gleichmäßige Tragverhalten der Hyparfläche II begünstigt. Damit wirken sich, wie bereits angedeutet, die Parameter Druckelementlänge und Übergreifungslängenfaktor gegenläufig aus. Es gilt im weiteren Verlauf der Arbeit zu klären, welcher der Parameter einen stärkeren Einfluss auf die Gesamtstruktur ausübt. Zudem ist für eine abschließende Bewertung der dritte variable Parameter Druckelementreihenabstand in dem Gesamtgefüge zu berücksichtigen.

Kurzzusammenfassung

Für ein gleichmäßiges geometrisches Verhältnis der Hyparfläche I wirkt sich eine Verringerung des Übergreifungslängenfaktors deutlich positiv aus, bei der Hyparfläche II bedingt diese Verringerung hingegen ein steigendes Seitenverhältnis und wirkt sich somit negativ aus. Allerdings ist der positive Einfluss auf die Hyparfläche I größer, als der ungünstige Einfluss auf die Hyparfläche II, und somit vorerst in Bezug auf die gesamte Struktur als positiv zu bewerten.

5.4.3.3 Ergebnisse der Parametervariation Druckelementreihenabstand am 0° Netz

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Variation des Parameters Druckelementreihenabstand diskutiert. Der Parameter wird dafür von $S = 0,2$ m bis $S = 1,4$ m, in Schritten von jeweils 0,2 m variiert. Es wird wieder ein 0° Netz mit einer Maschenweite von 20 mm gewählt.

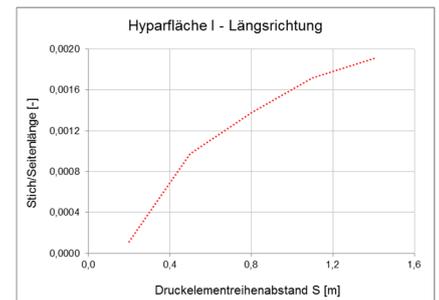
Ergebnisse an der Hyparfläche I

Eine Erhöhung des Druckelementreihenabstands führt zu einer Vergrößerung des Stich-/Seitenlängenverhältnisses der Hauptrichtungslinie in Längsrichtung (siehe Bild 5-44). Der Graph steigt dabei schwach und nähert sich dem Verhältniswert 0,002 an. Da die Änderung des Stich-/Seitenlängenverhältnisses in Abhängigkeit des Druckelementreihenabstands sehr klein ausfällt, wird vermutet, dass der Einfluss des Parameters eher von untergeordneter Bedeutung ist.

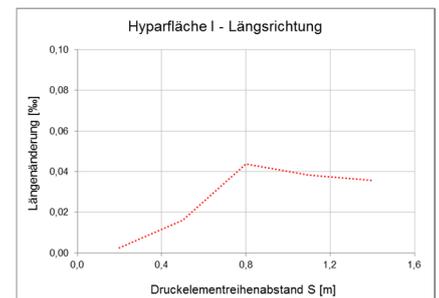
Die Vergrößerung des Druckelementreihenabstands führt bezogen auf eine Längenänderung zu kleinen positiven Dehnungen der Hauptrichtungslinie in Längsrichtung (siehe Bild 5-45). Bis zu einem Maximum bei $S = 0,8$ m ist der Verlauf des Graphen annähernd linear ansteigend, danach fällt der Verlauf leicht ab. Auch hier zu erkennen, dass der Wertebereich der sich einstellenden Längenänderungen sehr klein ist, was somit die Vermutung bestärkt, dass der Einfluss des Druckelementreihenabstands auf die Hauptrichtungslinie in Längsrichtung eher von untergeordneter Bedeutung ist.

Bezogen auf die Hauptrichtungslinie in Querrichtung bedingt ein erhöhter Druckelementreihenabstand ebenfalls eine Erhöhung des Stich-/Seitenlängenverhältnisses (siehe Bild 5-46). Der Graph verläuft exponentiell ansteigend und nähert sich einem Verhältnis von etwa 0,25 an. Damit scheint der Einfluss quantitativ größer zu sein als in Längsrichtung. Auch hier wird eine abschließende Bewertung aber erst anhand eines Vergleichs beider Hauptrichtungslinien vorgenommen.

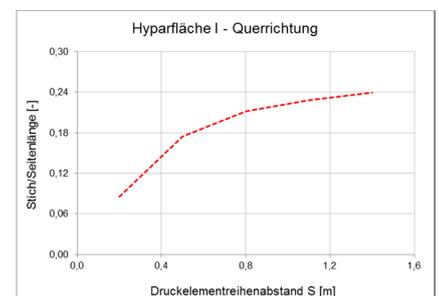
Die Untersuchungen der Längenänderungen in Querrichtung zeigen, dass über den gesamten Wertebereich des variierten Druckelementreihenabstandes ausschließlich negative Längenänderungen auftreten (siehe Bild 5-47). Damit kann unter Berücksichtigung der zuvor durchgeführten Parametervariationen festgestellt werden, dass die Hauptrichtungslinie in Querrichtung unabhängig von den geänderten Parametern einen kritischen Bereich der Hyparfläche I darstellt. Grundsätzlich kann der Graph der Längenänderung mit einem zunehmendem Druckelementreihenabstand als leicht abnehmend beschrieben werden. In Bezug auf die negativen Längenänderungen würde das bedeuten, dass sich der kritische Einfluss mit zunehmendem Druckelementreihenabstand erhöht. In Hinblick auf die tatsächlichen Längenänderungen sollte ein möglichst geringer Druckelementreihenabstand gewählt werden, um den negativen Einfluss zu minimieren. Für eine abschließende Aussage der



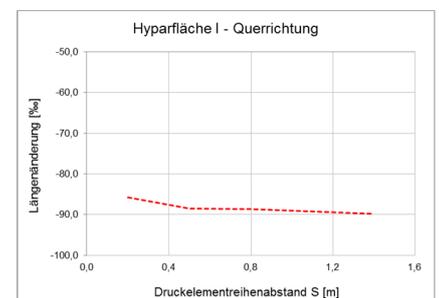
5-44 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Längsrichtung (Druckelementreihenabstand)



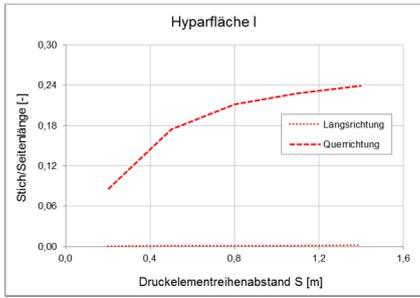
5-45 Längenänderung der Hyparfläche I in Längsrichtung (Druckelementreihenabstand)



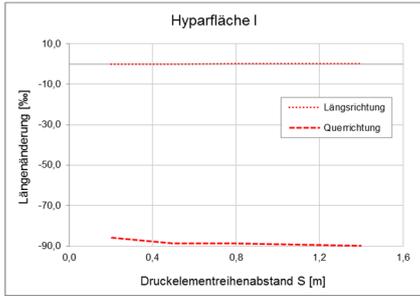
5-46 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Querrichtung (Druckelementreihenabstand)



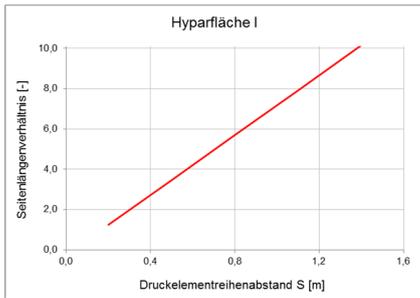
5-47 Längenänderung der Hyparfläche I in Querrichtung (Druckelementreihenabstand)



5-48 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Druckelementreihenabstand)



5-49 Längenänderung der gesamten Hyparfläche I (Druckelementreihenabstand)



5-50 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Druckelementreihenabstand)

Parameteränderung ist jedoch der Einfluss auf beide Hyparflächen zu berücksichtigen.

Eine Betrachtung des Stich-/Seitenlängenverhältnisses beider Hauptrichtungslinien der Hyparfläche I bestätigt die Vermutung, dass der Parameter des Druckelementreihenabstand einen wesentlich größeren Einfluss auf die Hauptrichtungslinie in Querrichtung aufzeigt (siehe Bild 5-48). Folglich ist in Bezug auf die Hyparfläche I ein geringer Druckelementreihenabstand als sinnvoll anzusehen, da mit zunehmendem Abstand der Unterschied zwischen den Hauptrichtungslinien ansteigt, und einen ungleichmäßigen Lastabtrag verstärkt.

In Hinblick auf den Vergleich der Längenänderungen zeigt sich, dass der Parameter des Druckelementreihenabstands nahezu keinen Einfluss auf die Hauptrichtung in Längsrichtung hat (siehe Bild 5-49). Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Beanspruchung beider Richtung deutlich voneinander abweicht. Dieser Bereich der Struktur sollte somit in der weiteren Arbeit noch eine besondere Beachtung finden.

Die Betrachtung des Seitenlängenverhältnisses der Hyparfläche I bestätigt die bisherigen Erkenntnisse (siehe Bild 5-50). Steigt der Parameter Druckelementreihenabstand an, so nimmt auch das Seitenlängenverhältnis zu, der Graph verläuft dabei linear ansteigend. Es sollte daher in Bezug auf die Hyparfläche I ein geringer Druckelementreihenabstand gewählt werden.

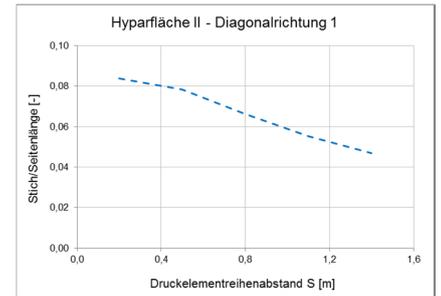
Ergebnisse an der Hyparfläche II

In Bezug auf die Hauptrichtungslinie in Diagonalrichtung 1 der Hyparfläche II bedingt eine Erhöhung des Druckelementreihenabstands, dass das Stich-/Seitenlängenverhältnis abnimmt (siehe Bild 5-51). Der Graph verläuft dabei annähernd linear. Allerdings ist auch hier anzumerken, dass der betrachtete Wertebereich verhältnismäßig klein ist.

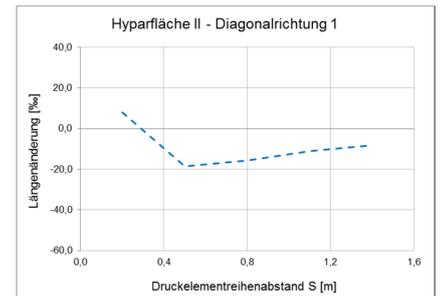
Die Betrachtung der Längenänderung in Diagonalrichtung 1 zeigt, dass kleine Druckelementreihenabstände bis $S = 0,3$ m zu positiven Längenänderungen führen, weitere Erhöhungen führen dann aber schlagartig zu negative Längenänderungen, welche sich allerdings mit einem steigenden Abstand wieder reduzieren (siehe Bild 5-52). Der Druckelementreihenabstand scheint somit einen entscheidenden Einfluss auf das Tragverhalten der Hauptrichtungslinie in Diagonalrichtung 1 zu haben, und sollte somit erst nach einer entsprechenden Untersuchung der Diagonalrichtung 2 abschließend bewertet werden.

Der Einfluss einer Erhöhung des Druckelementreihenabstands auf das Stich-/Seitenlängenverhältnis kann in der Diagonalrichtung 2 als gering beschrieben werden (siehe Bild 5-53). Der Graph verläuft, mit Ausnahme eines anfänglichen Ausreißers schwach linear abnehmend. Der betrachtete Wertebereich des Stich-/Seitenlängenverhältnisses ist dabei sehr klein. Auch an dieser Stelle scheint ein Abgleich mit der Hauptrichtungslinie in Diagonalrichtung 1 notwendig.

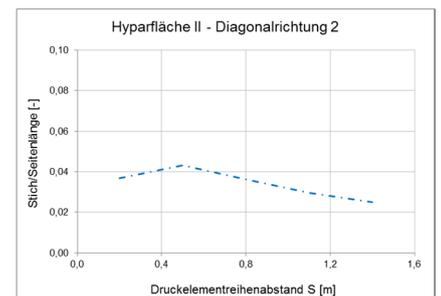
In Bezug auf die Längenänderung der Diagonalrichtung 2 ist bei Betrachtung des Wertebereichs ein vergleichsweise größerer Einfluss des Parameters des Druckelementreihenabstands erkennbar (siehe Bild 5-54). Grundlegend nehmen die Längenänderungen aber mit einem steigenden Abstand ab, und nähern sich einem Wert von etwa 10 % an. Dabei befinden sich alle Werte im positiven Wertebereich und es ist anzunehmen, dass ausschließlich Zugbeanspruchungen vorliegen.



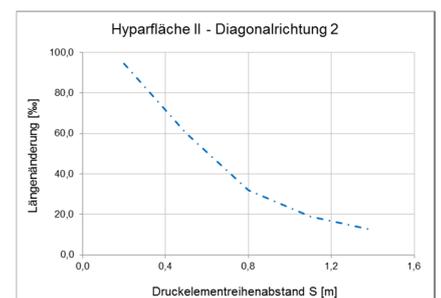
5-51 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Druckelementreihenabstand)



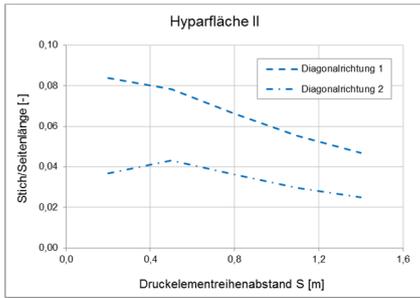
5-52 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Druckelementreihenabstand)



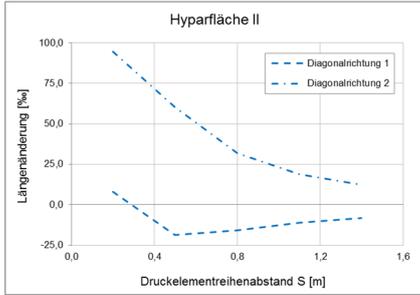
5-53 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Druckelementreihenabstand)



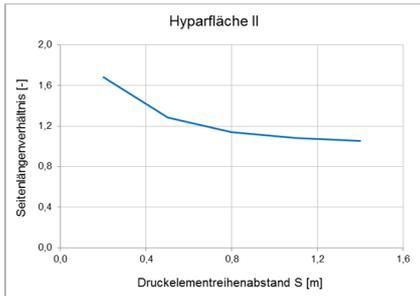
5-54 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Druckelementreihenabstand)



5-55 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Druckelementreihenabstand)



5-56 Längenänderung der gesamten Hyparfläche II (Druckelementreihenabstand)



5-57 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Druckelementreihenabstand)

Ein Vergleich des Stich-/Seitenlängenverhältnisses der Hauptrichtungen der Hyparfläche II zeigt, dass sich beide Verhältnisse in einem relativ kleinen Wertebereich bewegen und somit auch die Veränderungen vergleichsweise gering ausfallen (siehe Bild 5-55). Im Allgemeinen führt eine Erhöhung des Druckelementreihenabstandes aber in beiden Hauptrichtungen zu einer Abnahme des Stich-/Seitenlängenverhältnisses, aber zugleich auch dazu, dass sich die Verhältnisse annähern, was einen gleichmäßigen Lastabtrag der Gesamtstruktur begünstigt.

Auch die Betrachtung der Längenänderung beider Hauptrichtungen zeigt, dass sich diese mit steigendem Druckelementreihenabstand annähern (siehe Bild 5-56). Allerdings bedingt ein großer Abstand in der Diagonalrichtung 2 zugleich das Auftreten negativer Längenänderungen, was entsprechend zu berücksichtigen ist, da sich dies ungünstig auf das Tragverhalten der Einzelfläche auswirkt. Weiterhin zeigt der Verlauf allerdings, dass die Parameteränderung einen wesentlich größeren Einfluss auf das Verhalten in Diagonalrichtung 1 hat.

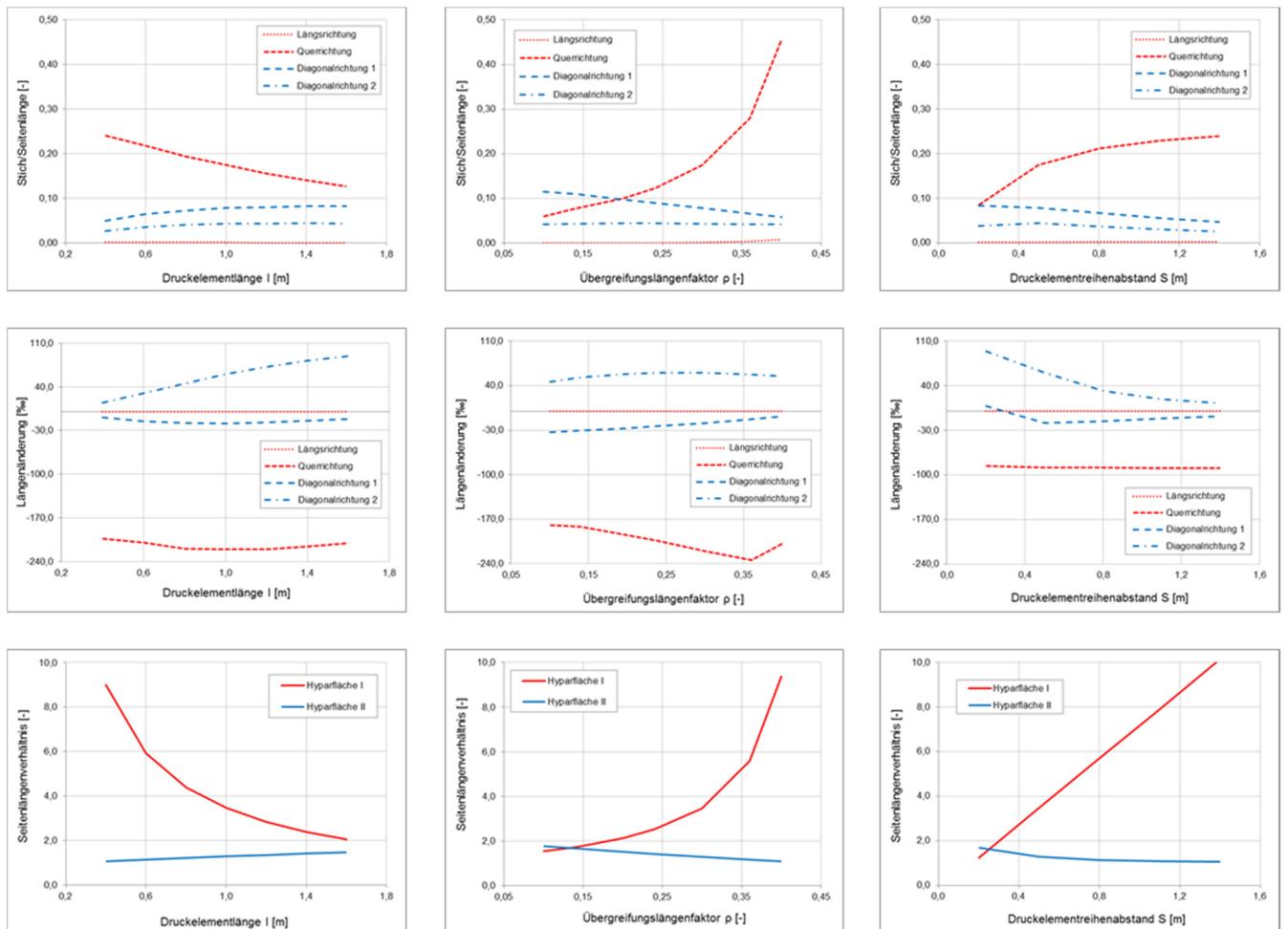
Das Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II nimmt mit einem steigenden Druckelementreihenabstand exponentiell ab und nähert sich einem Verhältnis von 1,0 an (siehe Bild 5-57). In Bezug auf das Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II scheint daher ein höherer Druckelementreihenabstand sinnvoll. Auch ist anzumerken, dass geringe Druckelementreihenabstände ebenfalls Seitenlängenverhältnisse unter 1,75 bedingen, was bedeutet, dass scheinbar alle untersuchten Druckelementreihenabstände mindestens anteilig einen zweiachsigen Lastabtrag zulassen.

Kurzzusammenfassung

Grundlegend kann eine Verringerung des Druckelementreihenabstands für ein gleichmäßiges geometrisches Verhältnis der Hyparfläche I als positiv bewertet werden, bei der Hyparflächen II führt dies allerdings zu einem steigenden Seitenlängenverhältnis, und das ist somit als ungünstig zu bewerten. In Summe ist der positive Einfluss auf die Hyparfläche I allerdings wesentlich größer, als der ungünstige Einfluss einer Verringerung des Druckelementreihenabstands auf die Hyparfläche II, so dass an dieser Stelle zunächst ein geringer Druckelementreihenabstand für die gesamte Struktur als positiv anzunehmen ist.

5.4.3.4 Zusammenfassende Bewertung der Parametervariation am 0° Netz

Die zuvor detailliert betrachteten Ergebnisse der einzelnen Parametervariationen werden nachfolgend im Vergleich miteinander diskutiert und abschließend bewertet. Darüber hinaus wird eine Empfehlung für eine Parametereinstellung der anschließenden Variantenstudie erarbeitet. Bild 5-58 bietet eine gesamtheitliche Übersicht der Ergebnisse der durchgeführten Parametervariationen. In der ersten Zeile der Übersicht sind jeweils die Stich-/Seitenlängenverhältnisse und in der zweiten Zeile die Längenänderungen beider Hauptrichtungslinien der Hyparfläche I und II zusammenfassend dargestellt. Die dritte Zeile der Übersicht zeigt die Seitenlängenverhältnisse der beiden Hyparflächen in Gegenüberstellung.



5-58 Zusammenfassende Übersicht der einzelnen Variationen der drei Parameter

Die Diagramme der Stich-/Seitenlängenverhältnisse aller drei Parametervariationen zeigen, dass die Hauptrichtungslinien der beiden Hyparflächen jeweils unterschiedlich auf die Veränderung der Parameter reagieren. Wird beispielsweise die Druckelementlänge erhöht, so nähern sich die Stich-/Seitenlängenverhältnisse der Hauptrichtungslinien der Hyparfläche I an. Im Gegensatz dazu entfernen sich die Stich-/Seitenlängenverhältnisse der Hyparfläche II. Allerdings ist auch anzumerken, dass bei allen drei Parametern der Einfluss auf die Hyparfläche I größer

ausfällt, als der Einfluss auf die Hyparfläche II. Dieser Aspekt wird durch die Diagramme der Längenänderung unterstrichen. Die Differenzen der beiden Hauptrichtungslinien der Hyparfläche I fallen wesentlich stärker aus, als die der Hyparfläche II. Generell kann festgestellt werden, dass die Hauptrichtungslinie in Querrichtung der Hyparfläche I als Ausreißer in der Parameterstudie auffällt. Es wird daher geschlussfolgert, dass dieser Bereich in Bezug auf eine mögliche Realisierung besonderer Beachtung bedarf. Dieses im Vergleich zu den drei anderen Hauptrichtungen eher abweichende Verhalten lässt sich durch die besondere Lage der Hauptrichtungslinie in Querrichtung in der Struktur erklären. Die Elemente liegen jeweils zwischen den Enden zweier Druckelemente einer Druckelementreihe (vgl. Abschnitt 5.4.1). An diesen Punkten erfolgt eine große Kraftkonzentration durch die Umlenkung der Zugkräfte am Druckelementknoten, zudem ist der Bereich im Vergleich zu der weiteren Struktur verhältnismäßig stark gekrümmt (siehe Abschnitt 4.2.2). Somit erscheint dieses lokale besondere Verhalten durchaus plausibel. Im Falle einer baulichen Umsetzung ist in diesem Bereich mit Hilfe einer entsprechende FE-Berechnung ein positives Spannungsniveau sicherzustellen, welches maßgeblich von dem Vorspannungsniveau, der konstruktiven Ausgestaltung der Struktur und dem Zuschnitt der Membranfläche beeinflusst wird. Abschließend sind die qualitativ ermittelten negativen Werte in Bezug auf die Längenänderung somit nicht als stabilitätsgefährdend für die Struktur zu bewerten (siehe Abschnitt 5.4.3.1).

Die Diagramme der Seitenlängenverhältnisse der beiden Hyparflächen bestätigen, dass sich der Parameter der Druckelementlänge gegensätzlich zu den Parametern des Übergreifungslängenfaktors und des Druckelementreihenabstands verhält. So führt eine Erhöhung der Druckelementlänge zu einer Annäherung der Seitenlängenverhältnisse der beiden Hyparflächen, während eine Erhöhung von Übergreifungslängenfaktor und Druckelementreihenabstand die Seitenlängenverhältnisse der Hyparflächen voneinander entfernt. Zudem ist den Diagrammen zu entnehmen, dass sich das Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I bei den Untersuchungen in einem Wertebereich von etwa 1 bis 10 bewegt, das Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II variiert hingegen in einem Bereich von 1,0 und 1,8. Grundlegend kann ab einem Seitenlängenverhältnis kleiner 2,0 zumindest anteilig von einem zweiachsigen Lastabtrag ausgegangen werden. Das bedeutet, dass bei der weiteren Parameterstudie ein besonderes Augenmerk auf die Ausgestaltung der Hyparfläche I zu legen ist, da die Parameteränderungen wesentlich größere und kritischere Einflüsse auf das Tragverhalten dieser Fläche haben. Grundlegend kann in einem direkten Vergleich der beiden Hyparflächen davon ausgegangen werden, dass selbst im Falle sehr ungünstiger Parametereinstellungen die Hyparfläche II einen anteiligen zweiachsigen Lastabtrag beibehält. Im Umkehrschluss bedeutet diese Erkenntnis, dass die Hyparfläche II aufgrund von Parameteränderungen als vergleichsweise unempfindlich beschrieben werden kann. Des Weiteren ist den Diagrammen der Seitenlängen-

verhältnisse zu entnehmen, dass sowohl eine Parameteränderung der Druckelementlänge, sowie des Übergreifungslängenfaktors dazu führt, dass sich die Ergebnisse der Hyparfläche I exponentiell verändern. Eine Variation des Druckelementreihenabstand hat hingegen einen linearen Einfluss auf die Hyparfläche I. Der Parameter bietet somit eine geringere Bandbreite für die Variation, da sich vergleichsweise schnell ungünstige geometrische Verhältnisse der Hyparfläche I einstellen.

Abschließend wird für eine weitere Parameterstudie am 0° Netz die folgende Einstellung empfohlen:

- eine mittlere bis große Druckelementlänge I
- ein kleinerer bis mittlerer Übergreifungslängenfaktor p
- ein kleiner Druckelementreihenabstand S

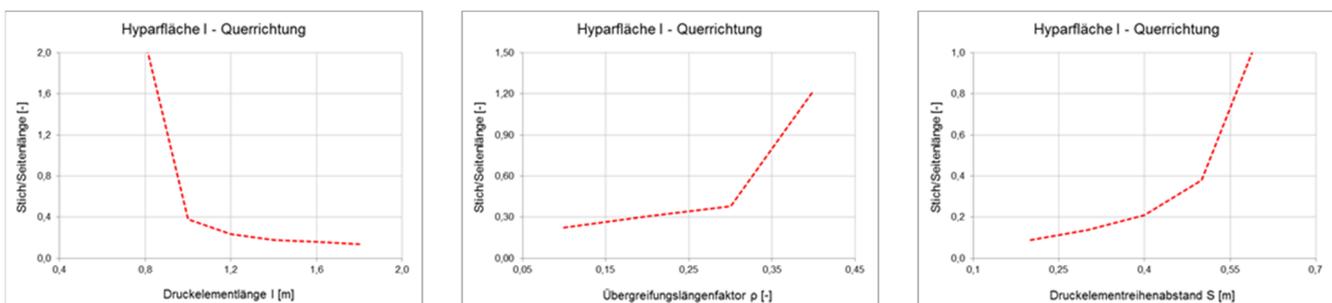
Für diese Einstellungen wird angenommen, dass sich innerhalb der beiden Hyparflächen annähernd gleichmäßige geometrische Verhältnisse einstellen, die einen membrangerechten Lastabtrag ermöglichen. Es wird an dieser Stelle aber nochmal hervorgehoben, dass die prinzipielle Parameterstudie lediglich qualitative Ergebnisse liefert, um das generelle Tragverhalten der Struktur abzuschätzen. Im Rahmen einer baulichen Umsetzung ist eine Durchführung einer numerischer Analyse zwingend erforderlich.

5.4.3.5 Bewertung der Parametervariation am 45° Netz

Um zusätzlich zu einer geometrischen Ausbildung der Hyparflächen I und II auch einen Einfluss der Netzorientierung zu untersuchen, wurde die an dem 0°Netz durchgeführte Parameterstudie folgend mit identischen Parametereinstellungen an einem 45° Netz mit einer Maschenweite von 20 mm durchgeführt.

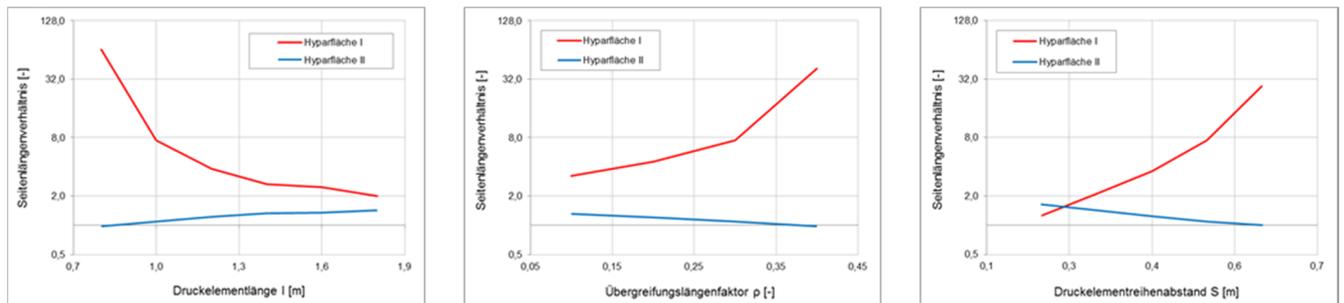
Die Parameterstudie hat grundlegend erkennen lassen, dass die gewählte Orientierung des Netzes zu Instabilitäten des Gesamtsystems führt. Aus diesem Grund werden die einzelnen Ergebnisse der Parametervariation an dieser Stelle nicht vergleichbar detailliert dargestellt, wie die Ergebnisse der Untersuchungen am 0° Netz. Die allgemeinen Probleme im Zusammenhang mit einem 45° orientierten Netz werden nachfolgend zusammengefasst. Grundsätzlich kann aber bereits an dieser Stelle die Anwendung einer 45° orientierten textilen Membran aufgrund der auftretenden Instabilitäten für eine mögliche Realisierung ausgeschlossen werden.

Bei verschiedenen Parametereinstellungen an dem 45° Netz entstehen innerhalb einer Druckelementreihe Überschneidungen der einzelnen Druckelementenden. Dieses Verhalten weist auf eine zu geringe Steifigkeit der Hauptrichtungslinie in Querrichtung der Hyparfläche I hin. Exemplarisch sind in Bild 5-59 die jeweiligen Diagramme der drei Parametervariationen in Bezug auf die Hauptrichtungslinie in Querrichtung der Hyparfläche I abgebildet. Den drei Diagrammen ist zu entnehmen, dass das Verhältnis aus Stich-/Seitenlänge in Bezug auf das 0° Netz als groß beschrieben werden kann, teilweise sind Werte über 1,0 (> 100 %) den Graphen zu entnehmen. Das bedeutet, dass das Stichmaß gleichgroß, beziehungsweise sogar größer ist, als die zugehörige Seitenlänge. Grundsätzlich ist aber bekannt, dass Stichmaße von über 25 % in Bezug auf die zugehörige Seitenlänge keine relevanten Erhöhungen der geometrischen Steifigkeit ermöglichen [Knippers, 2010, S.143], sondern als kritisch zu betrachten sind.



5-59 Auswirkungen auf das Stich-/Seitenlängenverhältnis der einzelnen Variationen der drei Parameter an der Hyparfläche I in Querrichtung am 45° Netz

Weiter zeigten die Untersuchungen der beiden Hyparflächen, dass sich auf der Hyparfläche I, sowohl infolge des Parameters Druckelementlänge, als auch infolge des Parameters Übergreifungslängenfaktor, grundlegend Seitenlängenverhältnisse von über 2 einstellen, kleinere Verhältnismerte wurden nicht erreicht. Damit weist du Hyperfläche I eindeutig einen einachsigen Lastabtrag auf. Auch wird damit die Vermutung bestätigt, dass die Hyparfläche I bei einer Netzorientierung von 45° zu geringe Steifigkeiten aufweist und zu Instabilitäten neigt. Bild 5-60 zeigt die entsprechende Auswertungen der Parameterstudie. Da die Instabilitäten der Hyparfläche I eine Instabilität der gesamten Struktur zur Folge haben und somit eine bauliche Umsetzung auszuschließen ist, wird an dieser Stelle auf eine weitere Darstellung der Untersuchungsergebnisse am 45° Netz verzichtet.



5-60 Auswirkungen auf das Seitenlängenverhältnis der einzelnen Variationen der drei Parameter am 45° Netz (logarithmische Darstellung)

5.4.4 Variantenstudie am Seilnetzmodell

Aufbauend auf den zuvor durchgeführten Untersuchungen zu den Einflüssen einzelner Parameter auf das Tragverhalten der Gesamtstruktur, beziehungsweise der geometrischen Ausbildung der beiden repräsentativen Hyparflächen I und II, erfolgt in diesem Abschnitt eine zweite Parameterstudie, um verschiedene Konfigurationen der Struktur mit möglichst membrangerechter Geometrie zu ermitteln. Dabei werden Veränderungen mehrerer Parameter vorgenommen, es handelt sich daher um eine sogenannte Multiparameteroptimierung. Diese Studie wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Variantenstudie bezeichnet.

Die möglichst optimale Geometrie einer Hyparfläche, in Bezug auf einen gleichmäßigen Lastabtrag, wird unter anderem durch eine Ausbildung annähernd gleicher Seitenlängen erreicht. Um die für den Lastabtrag notwendige geometrische Steifigkeit auszubilden, sind darüber hinaus nahezu gleichgroße Krümmungen, bzw. Stichmaße in den beiden Hauptrichtungslinien vorzusehen. Grundlegend ist auf Basis eines digitalen parametrischen Modells eine Erzeugung unendlich vieler Varianten möglich, darin liegt unter anderem eine Stärke dieses Werkzeugs. Die vorliegende Parameterstudie hat allerdings auch gezeigt, dass aufgrund der Komplexität des parametrischen Modells die Formfindung der Gesamtstruktur weit über eine Stunde Rechenzeit pro Parametereinstellung benötigt. Daher wird die folgende Studie auf drei zu untersuchende Varianten beschränkt, die Randbedingungen der Parametereinstellungen definieren sich dabei aus einer sinnvollen konstruktiven Umsetzung. Zudem soll durch die begrenzte Variantenuntersuchung das exemplarische Vorgehen in den Fokus gestellt werden. Bei der Multiparameteroptimierung werden unter Umständen Lösungen erzeugt, die kein absolutes Optimum in Bezug auf die einzelnen Ergebniskriterien darstellen, aber dennoch einen sinnvollen Kompromiss für die Gesamtstruktur aufzeigen. Bei der Auswertung der Parameterstudie der einzelnen Parameter hat sich bereits gezeigt, dass teilweise ein gegenläufiges Verhalten vorliegt, daher wird vermutet, dass bei der nachfolgenden Untersuchung entsprechende Kompromisslösungen auftreten.

5.4.4.1 Ausgangskonfiguration der untersuchten Varianten

Für die untersuchten Varianten wird grundlegend eine Ausgangskonfiguration der Parameter gewählt, die im Scheitelpunkt der Referenzstruktur eine Raumhöhe von 3 m erlaubt. Der Wert der Höhe von $h = 3$ m ist frei gewählt. Durch die Festsetzung auf einen festen Wert wird zum einen eine Vergleichbarkeit der Varianten sichergestellt, zum anderen erlaubt die definierte Höhe im Falle einer Realisierung eine sinnvolle Nutzung als Pavillon.

Als feste geometrische Parameter der Strukturdefinition werden, wie auch bei der vorherigen Parameterstudie (siehe Abschnitt 5.4.2), die definierten Werte des Rotationswinkels des Pavillonausschnitts (Ω), der Anzahl der Druckelemente je Druckelementreihe (N), sowie die Anzahl der benachbarten Druckelementreihen (n_i) angesetzt.

- $N = 4$
- $n_i = 5$
- $\Omega = 240^\circ$

Da die Voruntersuchungen gezeigt haben, dass ein um 45° orientiertes Netz zu Instabilitäten der Struktur führt, begrenzt sich die folgende Variantenstudie auf die Untersuchung an einem 0° Netz. Die Ausgangskonfiguration der freien geometrischen Parameter der Druckelementlänge (l), des Übergreifungslängenfaktors (ρ), sowie die des Druckelementreihenabstands (S) ist in Bild 5-61 dargestellt. Zusätzlich zu den geometrischen Parametern wird in der Variantenstudie der Einfluss des materialspezifischen Parameters Strength auf die orthogonalen Seilnetzlinien berücksichtigt. Durch die Berücksichtigung kann eine richtungsabhängige Steifigkeit des Seilnetzes simuliert werden, sozusagen entspricht diese Variation einem 0° und einem 90° orientierten Netz.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Druckelementlänge	1,20 m	1,50 m	1,80 m
Übergreifungslängenfaktor	0,10 [-]	0,20 [-]	0,36 [-]
Druckelementreihenabstand	0,50 m	0,50 m	0,50 m
Steifigkeitsverhältnis Seilnetz	1:1	1:1	1:1

5-61 Ausgangskonfiguration der Varianten 1 bis 3 für die Multiparameteroptimierung

Die gewählten Ausgangslängen der Druckelemente hängen maßgeblich von der definierten Raumhöhe von 3 m ab. Da der Radius des Pavillonquerschnitts, und somit auch die Pavillonhöhe, von der Druckelementlänge beeinflusst werden, ist der Parameter Druckelementlänge besonders geeignet, um die gewünschten globalen Strukturabmessungen vorzugeben. Entsprechend wurden drei Druckelementlängen ausgewählt, mit denen die Höhenvorgabe von $h = 3$ m erreicht werden kann. Der Wert $l = 1,20$ m (Variante 1) definiert dabei die minimale Länge, der Wert $l = 1,80$ m (Variante 3) die maximale Länge der Druckelemente. Durch diese Wahl bedingt sich ebenfalls die Ausgangskonfiguration des Übergreifungslängenfaktors. Liegt eine kurze Druckelementlänge vor, kann durch einen kleinen Übergreifungslängenfaktors die gewünschte globale Pavillonhöhe, ohne Anpassung der Anzahl der Druckelemente je Druckelementreihe (N) erreicht werden. Wird dagegen eine lange Druckelementlänge vorgegeben, bedingt das Zusammenspiel der beiden Parameter einen größeren Übergreifungslängenfaktor, um die gewählte Anzahl der Druckelemente beizubehalten. Da der Parameter Druckelementreihenabstand keinen Einfluss auf die globale Strukturhöhe hat, wurde dieser in einem identischen mittleren Wertebereich für alle Ausgangskonfigurationen vorgegeben. Die Untersuchung der folgenden Studie erfolgte in insgesamt fünf Optimierungsschritten, in denen die einzelnen geometrischen Parameter, sowie der materialspezifische Parameter, schrittweise variiert wurden, um schlussendlich eine möglichst membrangerechten Zustand zu generieren. Eine Beschreibung der einzelnen Parameteränderung erfolgt in dem nachfolgenden Abschnitt (siehe Abschnitt 5.4.4.2).

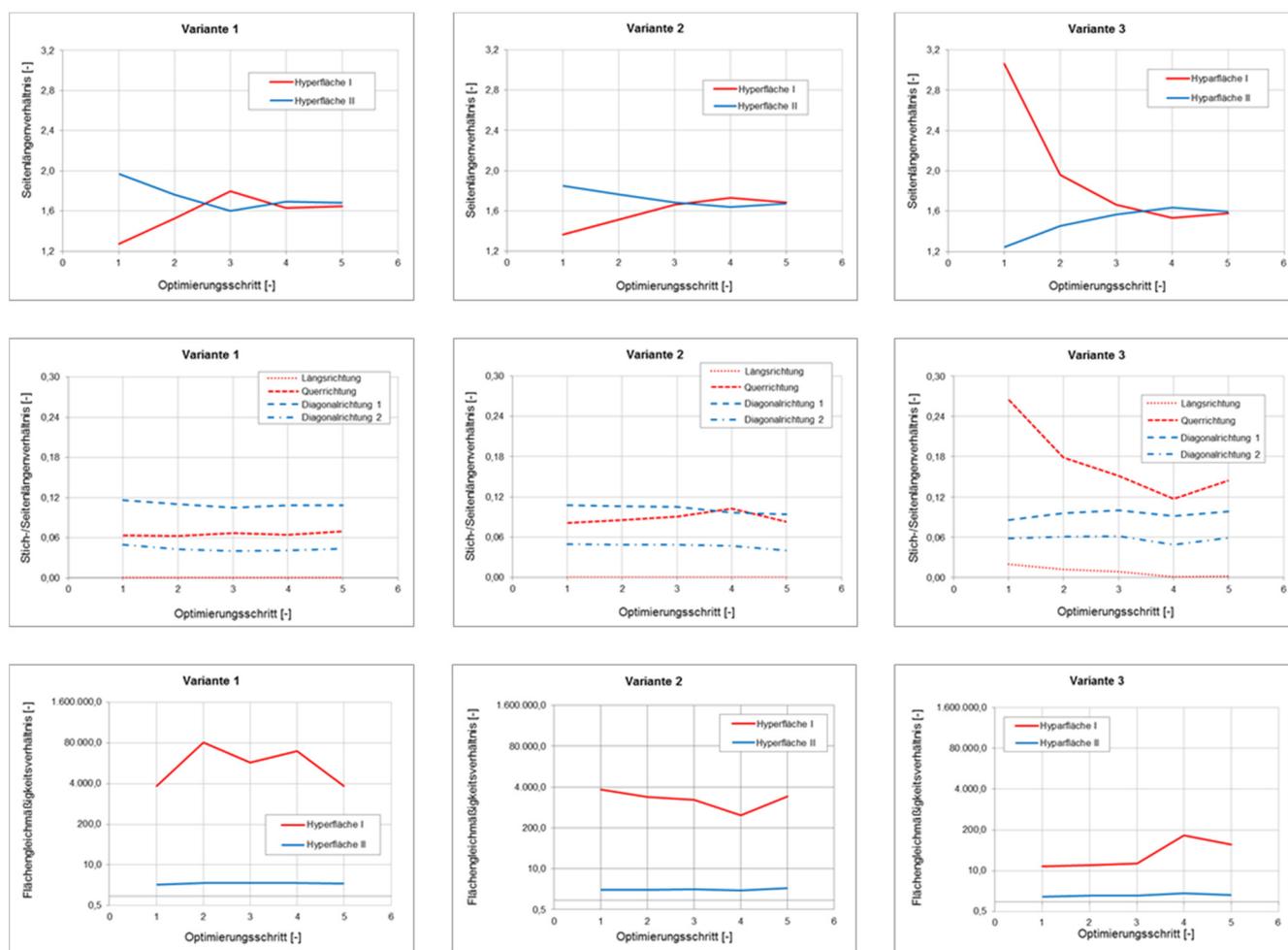
5.4.4.2 Ergebnisse der Variantenstudie

		Variante 1	Variante 2	Variante 3
		l = 1,20 m	l = 1,50 m	l = 1,80 m
Variationsschritte	1	$\rho = 0,10 [-]$ S = 0,50 m	$\rho = 0,20 [-]$ S = 0,50 m	$\rho = 0,36 [-]$ S = 0,50 m
	2	$\rho = 0,08 [-]$ S = 0,60 m	$\rho = 0,18 [-]$ S = 0,55 m	$\rho = 0,34 [-]$ S = 0,52 m
	3	$\rho = 0,14 [-]$ S = 0,70 m	$\rho = 0,22 [-]$ S = 0,60 m	$\rho = 0,28 [-]$ S = 0,50 m
	4	$\rho = 0,10 [-]$ S = 0,64 m	$\rho = 0,24 [-]$ S = 0,55 m	$\rho = 0,28 [-]$ S = 0,48 m
	5	+ 1:2 + 2:1	+ 2:1 + 1:2	+ 1:2 + 2:1

5-62 Variationsspektrum der Varianten 1 bis 3 in der Multiparameteroptimierung

Neben den bereits beschriebenen Kriterien zur Auswertung der geometrischen Ausbildung der Hyparflächen, dem Seitenlängenverhältnis und dem Verhältnis aus Stich/Seitenlänge der jeweiligen Hauptrichtungslinien, wurde bei der folgenden Auswertung noch das Flächengleichmäßigkeitsverhältnis eingeführt. Das Kriterium des Flächengleichmäßigkeitsverhältnisses dient zum besseren Vergleich der Varianten untereinander und bildet sich aus dem Verhältnis der Stich-/Seitenlängenverhältnisse beider Hauptrichtungslinien einer Hyparfläche. Je kleiner der Wert ist, desto gleichmäßiger sind die Krümmungen der zugehörigen Hyparfläche im Verhältnis zueinander ausgebildet. Somit kann durch das Kriterium eine Aussage über die Homogenität der Gesamtfläche getroffen werden. Eine Auswertung der Stich-/Seitenlängenverhältnisses hat bereits gezeigt, dass vor allem in der Hyparfläche I große Differenzen in den beiden Hauptrichtungslinien bestehen, es wird daher vermutet, dass ein komplettes Angleichen der Krümmungen nicht, beziehungsweise sich nicht möglich ist. Es gilt daher einen bestmöglichen Kompromiss zu ermitteln.

Insgesamt wurden für die Variantenstudie fünf Optimierungsschritte durchgeführt und dokumentiert. Bild 5-62 bietet einen Überblick über das angesetzte Variationsspektrum der einzelnen Parameter innerhalb der Varianten. Da sich bereits ein gegenläufiges Verhalten durch die Parameteränderung Druckelementlänge im Gegensatz zu den Parametern Übergreifungslängenfaktor und Druckelementreihenabstand gezeigt hat, wurde der Parameter Druckelementlänge nicht verändert. Die Anpassung der Systemgeometrie erfolgt über die ersten vier Optimierungsschritte nur durch Variation der andern beiden Parameter. Im fünften Optimierungsschritt wurde mit dem Parameter Strength unterschiedliche richtungsabhängige Steifigkeiten des Seilnetzes simuliert. Dabei wurde sich darauf beschränkt das Steifigkeitsverhältnis auf 1:2 und 2:1 zu begrenzen, da größere Verhältnisse als unrealistisch eingeschätzt werden. Zudem wurden in diesem Schritt nicht alle variierten Steifigkeitsverhältnisse dokumentiert, sondern nur das Verhältnis mit dem besten Gesamtergebnis.



5-63 Zusammenfassende Übersicht der multiparametrisch durchgeführten Variantenstudie der Varianten 1 bis 3

Die Zielvorgabe der Variantenstudie war ein möglichst gleichmäßiges Seitenlängenverhältnis der beiden Hyperflächen auszubilden. Anhand der Diagramme des Seitenlängenverhältnisses ist zu erkennen, dass dies in allen drei Varianten erreicht werden konnte, was entsprechend positiv für die gewählte Herangehensweise zu bewerten ist. Die Varianten 1 und 2 pendeln sich bei einem Verhältniswert von etwa 1,7 ein, mit der Variante 3 konnte ein Verhältniswert von etwa 1,6 erreicht werden. Alle drei Varianten ermöglichen damit einen zumindest anteiligen zweiachsigen Lastabtrag in der gesamten Membranfläche der Struktur.

Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wurden in der weiteren Ergebnisauswertung die Stich-/Seitenlängenverhältnisse der einzelnen Hauptrichtungslinien zur Abschätzung der Gleichmäßigkeit der beiden Hyperflächen analysiert. Grundsätzlich ist den Diagrammen zu entnehmen, dass die Stich-Seitenlängenverhältnisse der Hyperfläche I, bei den Varianten 1 und 2, in einem engeren Wertebereich angeordnet sind. Daher könnte davon ausgegangen werden, dass diese beiden Varianten, in Bezug auf die Hyperfläche I, ein gleichmäßigeres Tragverhalten zulassen. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass lediglich bei der Variante 3 eine signifikante Annäherung des Stich-/Seitenlängenverhältnisses der Längs- und Querrichtung der Hyperfläche I erreicht werden konnte. Bei den Varianten 1 und 2 ist dagegen mit zunehmender Optimierung eine Abweichung der Längs- und Querrichtung der Hyperfläche I zu erkennen. Dieses Ver-

halten kann unter anderem damit erklärt werden, dass in beiden Fällen nahezu kein Stichmaß innerhalb der Längsrichtung ausgebildet werden kann. Die Variante 3 ermöglicht dahingegen die Ausbildung eines Stich-/Seitenlängenverhältnis in Längsrichtung der Hyparfläche I und damit auch die Ausbildung der größten geometrische Steifigkeit in diesem Bereich. In Bezug auf die Hyparfläche II fallen die Ergebnisse der Stich-/Seitenlängenverhältnisse aller drei Varianten nahezu identisch aus.

Die Auswertung des Flächengleichgewichtsverhältnisses bestätigt, dass lediglich in der Variante 3 ein akzeptables, wenn auch sehr kleines Stichmaß, in der kritischen Hauptrichtung der Hyparfläche I ausgebildet werden kann und sich damit überhaupt erst eine annähernde Flächengleichmäßigkeit der Hyparfläche I einstellt. Das beste Flächengleichmäßigkeitsverhältnis wurde dabei im dritten Optimierungsschritt der Variante 3 erreicht. In diesem Optimierungsschritt ist ein entsprechendes Stichmaß in Längsrichtung der Hyparfläche I erkennbar.

In dem fünften Optimierungsschritt erfolgte eine Variation der richtungsabhängigen Steifigkeit der Seilnetzlinien. Dabei wurden alle Varianten mit den Konfigurationen 2:1, 1:1 und 1:2 (Quer- zu Längsrichtung) untersucht. Dargestellt ist in Bild 5-63 jeweils das Verhältnis mit dem besten Ergebnis. Die Untersuchung zeigt, dass der Parameter einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Änderungen der geometrischen Kenngrößen der Hyparflächen hat. Zudem lässt sich auch erkennen, dass die Materialwahl das Tragverhalten der Hyparfläche I dennoch durchaus beeinflussen kann, so lassen sich beispielsweise kleine Änderungen des Stich-/Seitenlängenverhältnisses erzeugen. Die Materialwahl kann somit als Parameter zur Feineinstellung des Tragverhaltens betrachtet werden.

Da innerhalb des parametrischen Modells die textile Membran lediglich als Seilnetz simuliert wurde und der Formfindungsalgorithmus die Steifigkeit lediglich als linear-elastische Federkonstante erfasst, kann die Interaktion des Gewebes und die Tragwirkung der Beschichtung nicht in diesem vorläufigen Formfindungsprozess realitätsnah abgebildet werden. Die beschriebenen Erkenntnisse des materialspezifischen Parameters sind daher vorsichtig zu bewerten und sollten mit einer FE-Berechnung im Fall einer Realisierung verifiziert werden.

5.4.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Variantenstudie

Mit Hilfe der Variantenstudie konnte durch die Variante 3 eine Systemkonfiguration ermittelt werden, die einen sinnvollen Kompromiss aus den verschiedenen Parametereinstellungen bildet und ein möglichst membrangerechtes Tragverhalten erlaubt. Dabei stellte sich der dritte Optimierungsschritt als sinnvollste Konfiguration für die weitere Vorgehensweise heraus. Die Auswertung der benannten Variante zeigt, dass sich anteilig ein zweiachsiger Lastabtrag in der Membranfläche einstellt, und in allen Bereichen eine Flächenkrümmung ausgebildet werden kann. Allerdings ist anzumerken, dass in Längsrichtung der Hyparfläche I nur eine verhältnismäßig geringe Krümmung ausgebildet werden konnte. Da sich auch gezeigt hat, dass die Materialität einen entsprechenden Einfluss auf das Tragverhalten hat, ist eine detaillierte numerische Analyse mit einem FEM-Programm unumgänglich, da dadurch exakte Materialparameter erfasst werden können, die zuvor mit entsprechenden Materialversuchen zu ermitteln sind.

Ebenfalls ist anzumerken, dass hier lediglich drei explizite Varianten mit den zuvor definierten Grundeinstellungen untersucht wurden, möglicherweise lassen sich noch viele weitere Systemkonfigurationen mit gleichwertigen beziehungsweise auch besseren Ausnutzungen generieren. Da diese Arbeit ihren Fokus auf die anwendungsorientierte konstruktive Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen legt, und die ermittelte Systemkonfiguration die dafür erforderlichen Randbedingungen in voller Gänze erfüllt, wird an dieser Stelle auf weitere Untersuchungen möglicher Varianten verzichtet. Für die weitere Erarbeitung eines Realisierungskonzeptes, sowie den Bau eines Demonstrators, werden folglich die Systemeinstellungen der Systemvariante 3 (Optimierungsschritt 3) zugrunde gelegt. Nachfolgend sind die einzelnen Parametereinstellungen detailliert aufgelistet.

- Anzahl der Druckelemente je Reihe $N = 4$
- Anzahl der Druckelementreihen $n_i = 5$
- Rotationswinkel $\Omega = 240^\circ$
- Gewebeausrichtung der textilen Membran 0° Netz
- Druckelementlänge $l = 1,80 \text{ m}$
- Übergreifungslängenfaktor $\rho = 0,28$
- Druckelementreihenabstand $S = 0,48 \text{ m}$
- Steifigkeitsverhältnis der Seilnetzlinien 1:1

6 Konstruktive Umsetzung eines Demonstrators

6 Konstruktive Umsetzung eines Demonstrators

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Grundlagen für eine anwendungsorientierte konstruktive Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen zu erarbeiten. Dafür wurde unter anderem, die vorherige detaillierte Untersuchung von Tensegrity-Membran-Strukturen im baupraktischen Kontext (siehe Kapitel 2 und Kapitel 3) vorgenommen, wobei beispielsweise erste Erkenntnisse über das Tragverhalten generiert und tragwerksrelevante Parameter identifiziert werden konnten. Die Erarbeitung der Grundlagen einer konstruktiven Umsetzung erfolgt auf Basis der Erkenntnisse der durchgeführten Parameterstudie (siehe Abschnitt 5.4.3) und der daran orientierten Variantenstudie (siehe Abschnitt 5.4.4). Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien (siehe Abschnitt 4.1) erfolgte die Wahl einer Referenzstruktur, anhand derer die bereits benannte Parameter- und Variantenstudie durchgeführt wurde. Die Variantenstudie erlaubte die Ermittlung einer Systemkonfiguration, die hinsichtlich definierter Randbedingungen, wie beispielsweise der lichten Pavillonhöhe, einen möglichst optimalen membrangerechten Lastabtrag erlaubt.

In dem dritten Teil der vorliegenden Arbeit wird die konstruktive Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen, am Beispiel eines konzeptionierten und realisierten Demonstrators untersucht. Der Demonstrator (siehe Abschnitt 6.2) stellt einen Ausschnitt aus der, mittels Variantenstudie, ermittelten Systemkonfiguration dar und dient dazu, die Herausforderungen, die in Bezug auf eine konstruktive Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen entstehen, beispielhaft zu ergründen und zu beantworten. Darüber hinaus dient der Demonstrator dazu, ein FE-Modell der Struktur zu entwickeln, welches eine ausreichende Aussagekraft in Hinblick auf eine baupraktische Umsetzung bietet.

In der Parameterstudie konnte bereits die Hyparfläche I (siehe Abschnitt 4.2.2) als besonders ausschlaggebend, in Bezug auf das Tragverhalten, identifiziert werden. Schon kleine Variationen der geometrischen Parameter wirkten sich auf die Hyparfläche I, insbesondere auf die Querrichtung, aus. Dieser Bereich, der den Anschluss von Druckelement und stark gekrümmter textiler Membran beinhaltet, wird daher bei der folgenden Realisierung des Demonstrators besonders beachtet. Darüber hinaus können, auf Basis der baulichen Umsetzung, weitgehende Erkenntnisse in Bezug auf Planung und Konstruktion von Tensegrity-Membran-Strukturen generiert werden, indem konstruktive Detaillösungen entwickelt, umgesetzt und diskutiert werden. Insbesondere werden dabei die Material-, sowie die Montageeinflüsse berücksichtigt. Darüber hinaus erfordert die bauliche Umsetzung des Demonstrators eine numerische Analyse der Struktur, die, wie bereits beschrieben, auf Basis der Finiten Elemente Methode erfolgt. Die Notwendigkeit ergibt sich vor allem infolge der genaueren Erfassung der Geometrie, unter Berücksichtigung genauer Materialeigenschaften und der damit verbundenen Zuschnittsberechnung, die infolge der räumlich gekrümmten Membranfläche unabdingbar ist. Da nachweislich noch keine zufriedenstellende numerische

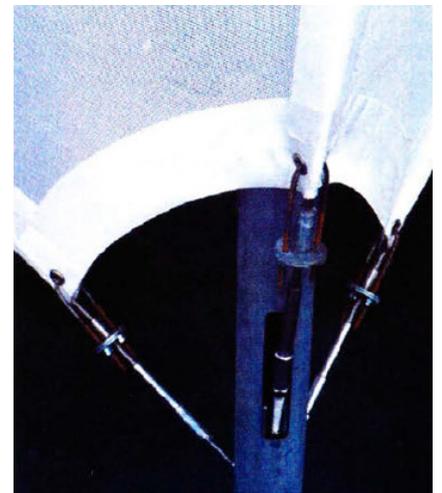
Analyse von Tensegrity-Membran-Strukturen durchgeführt wurde (siehe Abschnitt 3.1.2), stellt die FEM-Berechnung einen wichtigen Aspekt der nachfolgenden Realisierung dar. Sowohl die Berechnungsergebnisse, sowie die Umsetzung des entwickelten Realisierungskonzeptes werden im Anschluss evaluiert (siehe Kapitel 7). Die Evaluation der Berechnungsergebnisse erfolgt auf Basis einer optischen Messung des realisierten Demonstrators, wobei die Messergebnisse, respektive die verformte Figur im Vorspannzustand, mit dem berechneten FE-Modell verglichen werden. Abschließend werden die Umsetzung und die dazu entwickelten Lösungsansätze diskutiert und bei Bedarf weiterentwickelt, damit sie als Grundlage für die Umsetzung beliebiger Tensegrity-Membran-Strukturen herangezogen werden können.

6.1 Projektstudie zur konstruktiven Umsetzung

In Abschnitt 3.1.2 wurden mit der Struktur Textegrity I, dem Textegrity-Dome, dem Pavillon MOOM, der Struktur Form Follows Tension, sowie dem Hanabi Pavillon, verschiedene Tensegrity-Membran-Strukturen vorgestellt und hinsichtlich definierter Kriterien in den Kontext des Tensegrity-Prinzips eingeordnet (siehe Abschnitt 3.4). In der folgenden Studie werden diese Projekte in Hinblick auf ihre konstruktive Umsetzung analysiert, um in der Hauptsache die verwendeten Materialien zu identifizieren, sowie konstruktive Detaillösungen nachzuvollziehen und eventuelle Montageabläufe zu dokumentieren. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse wird im Anschluss ein Konzept für die bauliche Umsetzung eines Demonstrators erarbeitet.

6.1.1 Textegrity I

Die Struktur Textegrity I besteht aus einem PVC-beschichteten, offenmaschigen Polyestergewebe (PES) Typ 1, verzinkten Stahlrohren mit einem Durchmesser von 88,5 mm und einer Wandstärke von 6,3 mm, sowie Edelstahlspiralseilen mit einem Durchmesser von 6 mm, beziehungsweise 10 mm. Die PES/PCV Membran weist ein annähernd gleiches Dehnungsverhalten in Kett- und Schussrichtung auf. Das gewählte Spannungsniveau der textilen Membran ist mit 0,65 kN/m angegeben, dabei liegt in Kett- und Schussrichtung ein gleichmäßiges Vorspannungsniveau vor. Die Gewebeerorientierung erfolgte parallel zu den Membranrändern und somit auch parallel zu den integrierten Druckelementen. Der Verbindung der textilen Membran mit den Druckelementen wurde bei der Struktur über zusätzliche Edelstahlseile vorgenommen. Dazu wurde die textile Membran entsprechend an den Ecken ausgeschnitten, um einer eventuellen Faltenbildung, infolge der Kraftkonzentration im Eckbereich vorzubeugen. In Bild 6-1 ist der entsprechende Anschluss abgebildet. Damit stellt die Detailausbildung des Interaktionsbereichs für die geplante Realisierung eines Demonstrators keine zufriedenstellende Lösung dar, da durch die offenen Eckbereiche kein vollständiger Schutz gewährleistet werden kann und zusätzliche Seilelemente notwendig sind, die die strukturelle Klarheit der Struktur beeinflussen [Meeß-Olsohn, 2004, S.52ff.].



6-1 Knotenpunktdetail an der Skulptur Textegrity I von Lars Meeß-Olsohn

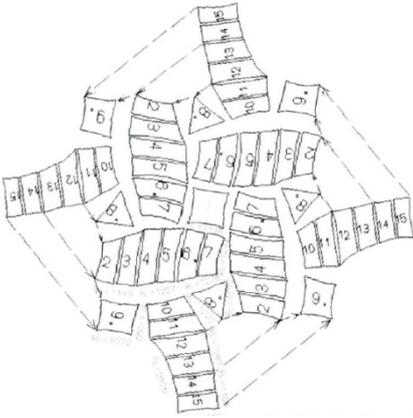
6.1.2 Textegrity-Dome

Der Textegrity-Dome ist ein weiteres Projekt von Lars Meeß-Olsohn. Für die textile Membran verwendete er ebenfalls ein PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ 1, sowie für den Kräftekurzschluss im Auflagerbereich Spiralseile mit einem Durchmesser von 6 mm. Als Druckelemente wurden Aluminiumrohre mit einem Durchmesser von 63 mm und einer Wandstärke von 8 mm verwendet. Der maßgebliche Vorteil der Aluminiumrohre gegenüber den Stahlrohren ist das wesentlich geringere Eigengewicht. Die Kraftübertragung zwischen den Druckelementen und der textilen Membran erfolgt bei dieser Struktur über zusätzliche lastabtragende Gurte, die in die Membranfläche ein- bzw. aufgenäht wurden und in Form von Laschen an die Druckelementenden anschließen. Das erforderte ebenfalls einen entsprechenden Eckausschnitt der Membranfläche



6-2 Knotenpunktdetail an dem Textegrity-Dome von Lars Meeß-Olsohn

an den Knotenpunkten. Die Membranfläche wurde deshalb auch an den entsprechenden Ecken ausgeschnitten. Bild 6-2 zeigt einen beispielhaften Knotenpunkt des Textegrity-Domes. Damit ist ebenso bei diesem Projekt die Detaillierung der Knotenpunkte für den geplanten Bau eines Demonstrators nicht weiter von Bedeutung.



6-3 Zuschnittsdefinition der Membranfläche des Textegrity-Domes

Dahingegen ist unter anderem der verwendete Vorspannmechanismus von Interesse für die weitere Vorgehensweise. Bei dem Textegrity-Dome wurden die Druckelemente über ein eingebautes Feingewinde um 4 bis 8 cm verlängerbar ausgeführt. Sie werden verkürzt in die Struktur eingebaut und zum Aufbringen der Vorspannung auf die vorgesehene Länge eingestellt. Darüber hinaus liegen detaillierte Informationen über den Montageprozess vor, welche ebenfalls von Bedeutung für das weitere Vorgehen ist. Als erstes wurde die Membranfläche hergestellt, indem einzelne Zuschnitte zu einer Gesamtfläche, mit einem für Thermoplaste üblichen Hochfrequenzschweißverfahren [Seidel, 2008, S.73], verschweißt wurden. Für die Zuschnittsdefinition wurde die Gesamtfläche in hauptsächlich gleichmäßige viereckförmige Elemente unterteilt, welche sich an den geplanten Druckelementen orientieren. Bild 6-3 zeigt die, in die Ebene abgewickelten Zuschnittsflächen. Im Anschluss wurde die fertige Membranfläche auf dem Boden ausgebreitet, um die Druckelemente im verkürzten Zustand einzubauen. Danach konnten die platzierten Druckelemente etagenweise verlängert werden, um die Struktur vorzuspannen. Abschließend wurde der horizontale Kräftekurzschluss im Auflagerbereich, durch Einbringen der Spiralseile ausgebildet. Bis zum Erreichen dieses endgültigen Zustands wurden verschiedene temporäre Abspannungen und Abstützungen benötigt, um die einzelnen Bauzustände zu ermöglichen. Insbesondere die schrittweise Verlängerung der Druckelemente bedurfte entsprechender temporärer Unterstützung [Meeß-Olsohn, 2004, S.85ff.].

6.1.3 Pavillon MOOM

Der Pavillon MOOM wurde bereits umfänglich vorgestellt (siehe Abschnitt 4.2), der Vollständigkeit halber werden nachfolgend die wichtigen materialspezifischen Daten und konstruktiven Lösungen zusammengefasst. Als Membranmaterial wurde ein sehr dehnfähiges, offenmaschiges Gewebe aus Polyester verwendet, welches aufgrund der Offenmaschigkeit keinen Schutz vor Umwelteinflüssen bietet. Weiter ist die Dehnfähigkeit des Materials sehr groß. Es wird daher vermutet, dass kein dauerhafter Lastabtrag sichergestellt werden kann, da entsprechende Vorspannkräfte nicht in der notwendigen Größe aufgebracht werden können. Die Art der Einbindung der Druckelemente und die Faltenbildung in der Membranfläche bestätigen diese Vermutung (siehe Abschnitt 4.2.3). Zur Ausbildung der Pavillonfläche kamen, außer der textilen Membran, lediglich Aluminiumrohre mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Wandstärke von 3 mm als konstruktive Elemente zum Einsatz. Die Druckelemente wurden in aufgenähten Futteralen in die Fläche eingesetzt. Eine detailliertere Ausbildung der direkten Interaktionspunkte zwischen den Druckelementen und der Membran wurde nicht vorgenommen, da die große Dehnfä-

higkeit der Membran eine entsprechende Anpassung an die eingebetteten Druckelemente erlaubt. Durch die Lagerung in den Futteralen entsteht eine Interaktion zwischen Druckelemente und textiler Membran über die gesamte Elementlänge. Die eigentliche Kraftkonzentration erfolgt nach wie vor maßgeblich an den Druckelementenden, was anhand der entsprechenden Flächenkrümmung abzulesen ist. Außerdem wird aufgrund der verhältnismäßig hohe Biegesteifigkeit der Aluminiumrohre davon ausgegangen, dass die Auswirkung der linearen Interaktion nicht sehr ausgeprägt auf das Tragverhalten ist. Die Montage der Struktur erfolgte, wie bereits beschreiben (siehe Abschnitt 4.2.3), über ein Auslegen der vorkonfektionierten Gesamtfläche, welche zuvor werkseitig aus Teilflächen zu einer Gesamtfläche vernäht wurde. Durch starkes Dehnen der Membranfläche wurden dann die Druckelemente in die vorgesehenen Futterale eingeführt. Im Anschluss konnte die Struktur im Inneren durch entsprechende Hilfsmittel nach oben gedrückt werden, um sich der globalen synklastisch gekrümmten Pavillonstruktur anzunähern, gleichzeitig wurden die Ränder aufeinander zu bewegt und in ihrer abschließenden Position mit Pflöcken im Boden fixiert. Der Membranrand wurde zusätzlich über Ösen an den Fußpunkten angehängt, um ein verrutschen der Membranfläche im Randbereich zu vermeiden [Popp, 2012].

6.1.4 Form Follows Tension

Die Struktur Form Follows Tension wurde zwar nicht als Tensegrity-Membran-Struktur klassifiziert (siehe Abschnitt 3.4), dennoch gibt es bei der Materialwahl und der konstruktiven Umsetzung gewisse Parallelen, weshalb die wesentliche Aspekte hier kurz aufgeführt werden. Die textile Membran wurde ebenfalls aus einem PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ 1 hergestellt, das nach Formfindung der Struktur von einem Membranbauer konfektioniert wurde. Die einzelnen Zuschnittsflächen wurden dazu werkseitig mit einem Hochfrequenzschweißverfahren zu einer Gesamtfläche verbunden. Die Membranränder wurden bauseits mit einem Warmgasschweißverfahren zweilagig ausgeführt. Die Vorspannung wird durch die Interaktion zwischen biegeaktivem Stabelement und Membranfläche erzeugt und ist daher nicht relevant für die weitere Umsetzung [Schling, 2015]. Die handwerkliche Ausführung der textilen Membran ist in Hinblick auf die Realisierung eines ersten Demonstrators durchaus als interessant einzustufen.

6.1.5 Hanabi Pavillon

Der Hanabi Pavillon wurde aus einer wasserfesten, nur wenig dehnfähigen Membran, sowie Bambusstäben gefertigt. Die Druckelemente wurden ebenfalls über Futteralen in die Membran eingebettet. Aufgrund der starken Faltenbildung im Bereich der Druckelemente wird vermutet, dass diese durch einfaches Einführen in die aufgenähten Futterale eingebaut wurden, ein druckelementseitiger Vorspannmechanismus kann aufgrund der geschilderten Faltenbildung ausgeschlossen werden. Über den Zuschnitt und das Fügen der Membranfläche liegen bei diesem Projekt ebenfalls keine genaueren Kenntnisse vor. Bei dem Aufbau des Pavillons

wurde ebenfalls die Gesamtfläche spannungsfrei ausgelegt und die Druckelemente in diesem Zustand in die Futterale eingeführt. Das Aufrichten erfolgte im Anschluss durch entsprechendes Anheben der Fläche und zeitliches Positionieren der Fußpunkte. Im Anschluss wurden die Fußpunkte fixiert und die notwendige Vorspannung extern aufgebracht [Tu, 2016, S.8f.].

Zusammenfassung

Bild 6-4 bietet eine Zusammenfassung darüber, welche der beschriebenen Projekte grundlegende Informationen zu Materialeien, konstruktiven Ansätze und Montagerandbedingungen bieten. Diese werden nachfolgend diskutiert und gegebenenfalls für das Konzept zur Realisierung eines Demonstrators herangezogen. Dabei hat sich bereits erkennen lassen, dass sowohl für die Materialwahl, sowie für den Montageprozess sinnvolle Erkenntnisse gewonnen werden konnten, für die konstruktive Lösung des Anschlussbereichs zwischen textiler Membran und Druckelement hingegen keine zufriedenstellenden Lösungen gefunden wurde.

		Textegity I	Textegity-Dome	Pavillon MOOM	Form Follows Tension	Hanabi Pavillon
Material	Textile Membran	X	X	(X)	X	
	Druck-Element	X	X	X	X	X
Konstruktion	Interaktionsbereich	-	-	-	-	-
Montage	Zuschnitt	-	X	-	(X)	-
	Bauzustände	(X)	X	X	-	(X)
	Vorspann-mech.	(X)	X	X	(X)	(X)

6-4 Matrix zur Übersicht der gewonnenen Informationen aus der Projektstudie zur konstruktiven Umsetzung

6.2 Konzeptentwicklung

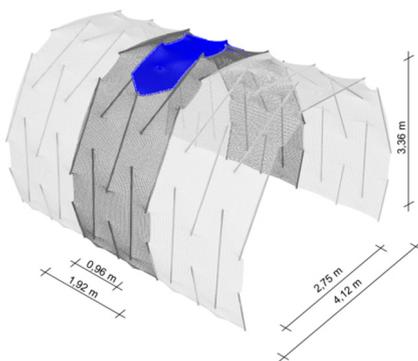
Auf Grundlage der aus der Projektstudie gewonnenen Erkenntnisse, wird in diesem Abschnitt ein Konzept für die Realisierung eines Demonstrators entwickelt. Die vorherige Zusammenfassung verdeutlicht jedoch, dass die bisher untersuchten Projekte keine zufriedenstellende konstruktive Lösung für die Anschlussgestaltung der Druckelemente und der textilen Membran liefern. Entweder wurde der direkte Kontakt zwischen textiler Membran und Druckelement vermieden, wie beispielsweise bei dem Textegrity-Dome, oder es wurde eine textile Membran mit sehr großem Dehnvermögen gewählt, wie zum Beispiel bei dem Pavillon MOOM, damit sich diese dem Druckelementende anpasst. Beide Möglichkeiten bewirken, dass eine Langlebigkeit, in Verbindung mit einem umfassenden Schutz, nicht gewährleistet werden kann. Für eine Etablierung der Tensegrity-Membran-Strukturen sind diese Aspekte jedoch außerordentlich bedeutsam. Dementsprechend wird in dem nachfolgenden Realisierungskonzept die Neugestaltung des Interaktionsbereichs zum direkten Anschluss von Druckelement und textiler Membran fokussiert. Die weiteren konstruktiven Detaillösungen, die Montageabläufe und die Materialwahl orientieren sich an den beschriebenen Ergebnissen.

- Die **Druckelemente** werden typischerweise aus einem leichten und gut bearbeitbaren Material hergestellt. In fast allen benannten Projekten sind leichte Werkstoffe zum Einsatz gekommen. Dazu bietet sich Aluminium, CFK oder GFK an, wobei anzumerken ist, dass die Verbundwerkstoffe CFK und GFK, insbesondere aufgrund richtungsabhängiger Eigenschaften, erhöhte Anforderungen an die Bearbeitung und somit an die Anschlussgestaltung bedingen
- Als **Membranmaterial** bietet sich ein handelsübliches PVC-beschichtete Polyestergewebe an. Bei den bisherigen Projekten wurde in drei von fünf Fällen eine entsprechende Wahl getroffen. Generell sind PES/PVC Membrane verhältnismäßig gutmütige Werkstoffe, was beispielsweise die Bearbeitbarkeit betrifft und damit sind sie häufig verwendete Materialien im technischen Membranbau. Von Vorteil sind unter anderem die gute Tragfähigkeiten und auch die vergleichsweise geringen Materialpreise. Darüber hinaus kann durch eine entsprechend gewählte Beschichtung auch die gewünschte Dauerhaftigkeit ohne Schwierigkeiten realisiert werden.
- Der **Zuschnitt** der Membranfläche kann aufgrund der richtungsabhängigen Tragfähigkeit der Gewebe, sowie den Erkenntnissen aus der durchgeführten Parameterstudie (siehe Abschnitt 5.4.3.5) an der Ausrichtung der Druckelemente orientiert werden. Diese Vorgehensweise wurde in ähnlicher Art und Weise erfolgreich bei dem Textegrity-Dome umgesetzt. Da die zur Auswertung definierten Hyparflächen sich ebenfalls an den Druckelementen orientieren, können diese als Grundlage für die weitere Zuschnittsdefinition herangezogen werden.

- Als **Vorspannmechanismus** bietet sich eine Verlängerung der Druckelemente an. Da die textile Membran für eine langlebige baupraktische Anwendung ein entsprechendes Vorspannniveau benötigt, kann ein entsprechender Verlängerungsmechanismus als Lösung herangezogen werden. Eine Verkürzung der Membranfläche wird aufgrund der erforderlichen Dehnsteifigkeit des Materials hingegen als nicht sinnvoll angesehen.
- Für den Bau des Demonstrators sollte ein möglichst geringes **Vorspannniveau** angesetzt werden, das in Eigenarbeit mit einfachen Hilfsmitteln aufgebracht werden kann. Daher könnte sich hier an dem, von Lars Meeß-Olsohn verwendeten Wert, von 0,65 kN/m orientiert werden. Grundlegend ist dieses Spannungsniveau ein üblicher Wert für kleinere Membrankonstruktionen [Meeß-Olsohn, 2004, S.60].
- Als **Montagereihenfolge** des Demonstrators bietet sich an, zuerst die Membranfläche herzustellen und im Anschluss die entsprechende Anzahl Druckelemente einzufügen. Da bereits als Vorspannmechanismus eine Verlängerung der Druckelemente angedacht wurde, könnte dieser Mechanismus ebenfalls zum Einbau der Druckelemente herangezogen werden. Durch die Verlängerung kann dann ein schrittweiser Aufbau erfolgen, da dadurch das notwendige Spannungsniveau erreicht wird und die Struktur in einen stabilen Zustand übergeht. Teilweise erforderliche temporäre Abspannungen, beziehungsweise Abstützungen, könnten für die entsprechenden Bauzustände in Betracht gezogen werden.

6.2.1 Geometriedefinition

Der Demonstrator wird anhand der ermittelten Systemkonfiguration geplant und realisiert (siehe Abschnitt 5.4.4.3). Wie bereits aufgezeigt, stellt insbesondere der Anschlusspunkt zwischen Druckelementen und der textilen Membran einen kritischen, beziehungsweise konstruktiv aufwendigen Bereich im Hinblick auf die Realisierung dar (siehe Abschnitt 4.2.2). Um diesen besonderen Bereich fokussiert untersuchen und ausbilden zu können, wird für den Demonstrator ein Ausschnitt gewählt, der die isolierte Betrachtung eines Druckelementes und der zugehörigen umgebenden Membranflächen ermöglicht. Damit die dadurch entstehenden Randbereiche möglichst geringe Einflüsse auf das strukturelle Verhalten des Demonstrators ausüben, wird ein Druckelement in Systemmitte gewählt, das sich der vollständigen Symmetrie der Struktur bedient. An den Stellen, wo die nächsten, seitlich benachbarten, Druckelemente anstehen, wird eine starre Randkonstruktion vorgesehen, um das zu untersuchende Tragverhalten der Hyparflächen möglichst realitätsnah zu dem, sich einstellenden Tragverhalten in der Gesamtkonstruktion abzubilden. Bild 6-5 zeigt die Lage des Demonstrator-Ausschnitts (blau) und die Größenverhältnisse der Gesamtstruktur, die Bemaßungen 0,96 m und 2,75 m beziehen sich dabei explizit auf die Abmessungen des Demonstrators in Quer- und



6-5 Visualisierung der Systemkonfiguration Variante 3 zur Verortung des Demonstrator-Ausschnitts (in blau dargestellt)

Längsrichtung. Die vorgesehenen Druckelementlänge bezieht sich auf die, in der Variantenstudie (siehe Abschnitt 5.4.4.3) vorgegebene Länge von 1,80 m.

6.2.2 Materialdefinition

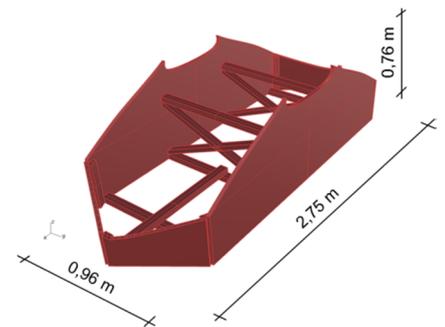
Grundsätzlich soll der Bau des Demonstrators mit Materialien erfolgen, die für eine angedachte anwendungsorientierte konstruktive Umsetzung einer Tensegrity-Membran-Struktur geeignet sind. Damit sind die Anforderungen wie folgt definiert: das Material kann als geeigneter Witterungsschutz fungieren und weist eine entsprechende Beständigkeit auf. Darüber hinaus soll ein übliches Vorspannniveau, in Bezug auf die notwendige Vorspannung, realisierbar sein. Weiterhin soll für die Ausführung ein gutmütiges und gut bearbeitbares Material zum Einsatz kommen, da geplant ist, die konstruktive Umsetzung in Eigenarbeit durchzuführen. Basierend auf der Projektrecherche wird als textile Membran ein PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ 1 „Barmbek MTR“ gewählt. Das Gewicht ist mit 650 g/m^2 angegeben, die Reißkraft mit 2000 N/50 mm in Kett- und Schussrichtung. Das zugehörige Datenblatt ist dem Anhang zu entnehmen. Das Vorspannungsniveau wird mit $0,65 \text{ kN/m}$ angesetzt und liegt damit deutlich unter dem maximal zulässigen Spannungsniveau. Das gewählte Material bietet also durchaus die Möglichkeit, ein wesentlich höheres Vorspannniveau auszubilden.

Die Ausrichtung der textilen Membran orientiert sich an den Druckelementen, sie wird mit der Kettrichtung parallel zur Druckelementachse ausgerichtet, in dem Seilnetzmodell wurde diese Konfiguration als 0° Orientierung bezeichnet. Das gewählte PVC-beschichtete Polyestergewebe Typ 1 ist eine verhältnismäßig steife textile Membran. Es werden somit geringe dehnungsbehaftete Verformungen erwartet, was mit einer hohen Stabilität des Gesamtsystems gleichzusetzen ist. Dazu ist anzumerken, dass geringe dehnungsbehaftete Verformungen bei diesen Werkstoffen im Zentimeterbereich liegen können. Gleichzeitig kann ein zu steifes Material zu lokalen Spannungsspitzen führen, als es vergleichsweise bei einem elastischen Material der Fall ist und daher bedarf dies ebenfalls besonderer Beachtung bei der numerischen Analyse und der daran anschließenden Zuschnittsberechnung. Dieser Sachverhalt zeigt sich beispielsweise bei dem Hanabi Pavillon, wo eine fehlende Formfindungsberechnung der textilen Membran zu einer deutlichen Faltenbildung führt.

Die Druckelemente werden aus Aluminiumrohr ausgeführt. Zum einen bietet das Material verhältnismäßig hohe Steifigkeiten bei geringem Eigengewicht, zum Beispiel im Vergleich mit Stahl, und zum anderen kann Aluminium in der hochschuleigenen Schlosserei gut bearbeitet werden. Als Profil wird ein Rundrohr mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Wandstärke von 3 gewählt. Eine überschlägige Abschätzung des benannten Profils erfolgte anhand der Verzweigungslast. Es wurde eine maximale Verzweigungslast von $N_{ki} = 5,01 \text{ kN}$ ermittelt, ausgehend von dem gewählten Querschnitt, sowie einem Elastizitätsmodul von 7.000

kN/cm² und einer Knicklänge von 180 cm. Aufgrund des verhältnismäßig niedrig gewählten Vorspannniveaus von 0,65 kN/m wird ein Überschreiten der ermittelten Knicklast nicht erwartet.

Die Randkonstruktion des Demonstrators wird aus Holz hergestellt. Da die Konstruktion lediglich für den Bau des Demonstrators erforderlich ist, und somit keine Anforderungen an Dauerhaftigkeit und Witterungsbeständigkeit erfüllen muss, erweist sich der Werkstoff Holz hinsichtlich der Fertigung und Montage als besonders geeignet. Für die äußere Umrandung werden Holzwerkstoffplatten mit einer Materialstärke von 22 mm gewählt. Diese Plattenelemente werden mit einfachen stabförmigen Elementen aus Bauholz 40 x 60 mm ausgesteift und mit entsprechenden metallischen Kleinbauteilen verbunden. Bild 6-6 zeigt eine Perspektivdarstellung der Plattenkonstruktion mit den geplanten Aussteifungselementen. Ebenfalls sind die maßgebenden Abmessungen der Konstruktion angegeben.

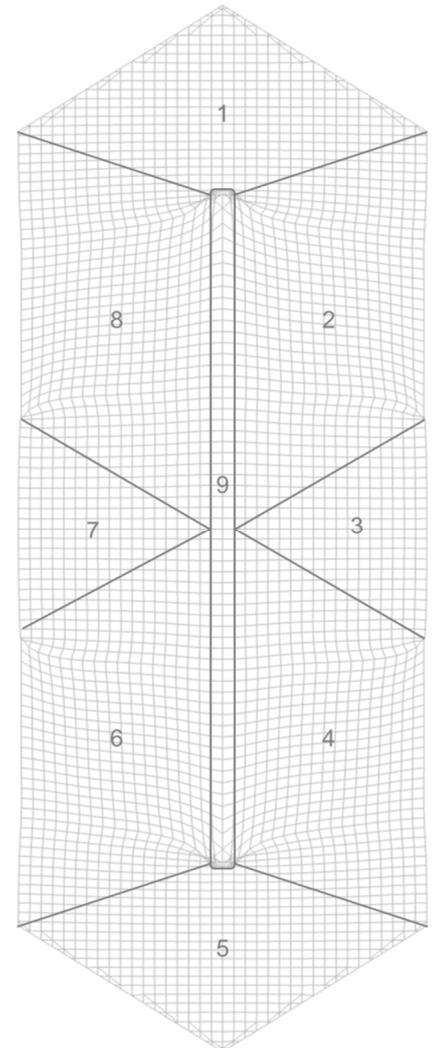


6-6 Visualisierung der Randkonstruktion mit zugehöriger Aussteifung

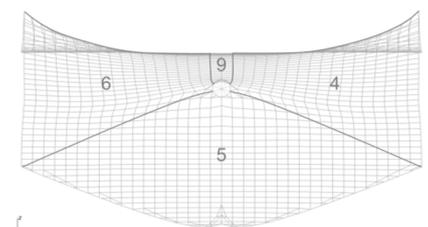
6.2.3 Fertigungs- und Montageablauf

Die Fertigung und die Montage des Demonstrators erfolgen in mehreren aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten. Die Reihenfolge orientiert sich dabei an der Montage der untersuchten Projekte (siehe Abschnitt 6.1). Zuerst werden notwendige Vorbereitungen vorgenommen, beispielsweise die Vorfertigung einzelner Bauteile. Daran anschließend können die Fertigung der Membranfläche, bestehend aus Zuschnitt und Konfektionierung und die Herstellung der Randkonstruktion erfolgen. Die zusammengesetzte Membranfläche kann dann auf der Randkonstruktion montiert und das Druckelement abschließend eingesetzt werden.

Für die textile Membran erfolgt, auf Basis einer FEM-Berechnung des Demonstrators, eine numerische Zuschnittsberechnung. Die daraus generierten Zuschnittsflächen werden dann entsprechend vorbereitet und aus dem Rollenmaterial ausgeschnitten. Dabei ist zu beachten, dass sich maximal drei Zuschnittsflächen in den Nahtbereichen überlagern. Sogenannte Kreuzstöße, also Nahtbereiche aus vier überlappenden Flächen sind unbedingt zu vermeiden, da eine kraftschlüssige Verbindung zwischen oberster und unterer Lage aufgrund der Anzahl der Zwischenlagen nicht sichergestellt werden kann. Die Bilder 6-7a und 6-7b zeigen eine mögliche Anordnung von Zuschnittsflächen, bei der maximal drei Flächen in den Nahtbereichen zusammentreffen und zudem möglichst wenige Teilflächen vorliegen, was wiederum die Schweißnahtlänge und somit mögliche Schwachstellen minimiert. Zur besseren Übersicht sind die einzelnen Zuschnittsflächen, insgesamt neun (siehe Bild 6-7a), durchnummeriert. Insbesondere die Vermeidung sogenannter Kreuzstöße bedingt die mittlere Zuschnittsfläche Nummer 9 (siehe Bild 6-7a), die sich in ihrer Lage exakt über dem späteren Druckelement befindet. Außerdem wirkt sich diese Zuschnittsfläche günstig auf die Herstellung des Anschlussbereichs von textiler Membran und Druckelementende aus.



6-7a Konzept zur Anordnung der Zuschnittsflächen in der Draufsicht



6-7b Konzept zur Anordnung der Zuschnittsflächen in der Frontansicht

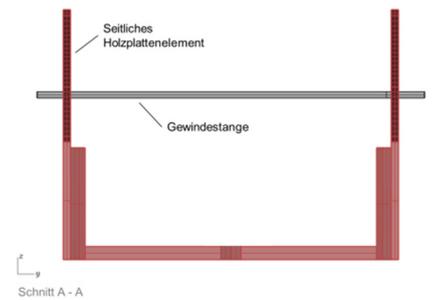
Da Thermoplaste hervorragende Schweißeigenschaften besitzen, erfolgt das Fügen der einzelnen Zuschnittsflächen der textilen Membran mit einem Warmgasschweißverfahren. Das Verfahren hat dabei gewisse Vor- und Nachteile gegenüber den Hochfrequenzschweißverfahren. Von Vorteil sind die verhältnismäßig einfache Handhabung der Werkzeuge,

sowie die vergleichsweise geringen Anschaffungskosten. Als Nachteil ist insbesondere die Wärmeregulierung zu nennen. Mit einem konstanten ca. 320 °C heißen Luftstrom wird die PVC-Beschichtung innerhalb von wenigen Sekunden erwärmt. Es ist dementsprechend darauf zu achten, dass die Beschichtung bei kurzer Überhitzung, beispielsweise durch einen Wärmestau in Naht- oder Überlappungsbereichen, nicht anfängt zu schmelzen, da diese Kunststoffe verhältnismäßig schlechte Wärmeleiteneigenschaften besitzen [Seidel, 2008, S.73]. Teilweise führt ein kurzzeitiges Überhitzen allerdings schon dazu, dass oberflächige Verbrennungen auftreten, innerhalb dieser Bereiche bilden sich kleinere Blasen auf der Oberfläche der Membran und es kommt zu Rußbildung und Verbrennungserscheinungen. Für das relativ niedrig gewählte Spannungsniveau sind allerdings keine tragwerkstechnischen Nachteile zu erwarten, da diese Fehlstellen lediglich bereichsweise auftreten und eine großzügige Nahtbreite von mindestens 50 mm vorgesehen wird. Zudem kann durch eine erhöhte Nahtbreite das Steifigkeitsverhältnis zwischen den Einzelflächen und den Verbindungsstellen angeglichen werden [Seidel, 2008, S.53f.], was ein homogeneres Tragverhalten der Konstruktion ermöglicht. Für die Realisierung eines vollständigen Prototyps wird an dieser Stelle allerdings empfohlen, das Fügen einzelner Elemente in Zusammenarbeit mit einem Membranhersteller zu realisieren.

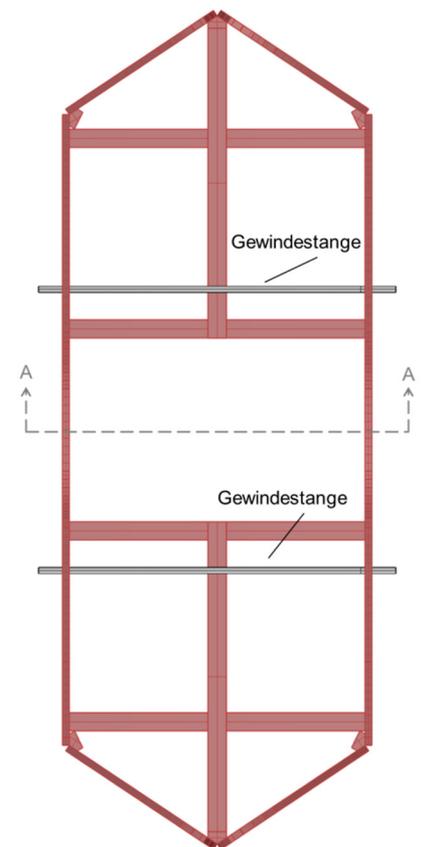
Die FEM-Berechnung kann ebenfalls als Basis für die Ermittlung der erforderliche Holzzuschnitte der Randkonstruktion verwendet werden, da sie in ihrer Geometrie die Struktur der nebenliegenden Membranfläche in den Randbereichen aufnimmt. Dabei ist zudem eine Möglichkeit vorzusehen, eine Vorspannung in Breitenrichtung der Struktur (kurze Systemseite) aufzubringen, da durch den Systemaufbau der Referenzstruktur die notwendige Vorspannung nur in Richtung der Druckelementachsen aufgebracht werden kann. Zu diesem Zweck erfolgt die Ausbildung der Randkonstruktion in Breitenrichtung der Struktur verschieblich beziehungsweise beweglich. Dazu wird die Aufnahme von zwei Gewindestangen vorgesehen, durch die dann der geplante Abstand zwischen den Holzplatten, und somit die Vorspannung der Membran in Breitenrichtung, nach der Befestigung der textilen Membran auf der Randkonstruktion eingestellt werden kann. Im Anschluss können die seitlichen Holzplatten mit Hilfe von Diagonal- und Querstreben gegeneinander ausgesteift werden.

Die Fertigung des Druckelements erfolgt in der Schlosserei des Baulabors der HafenCity Universität. Das beinhaltet die Herstellung eines entsprechenden Anschlusses an den Druckelementenden im Übergang zur textilen Membran und einen Mechanismus, der eine Verlängerung des Druckelements nach dem Einsetzen in die Membranfläche erlaubt.

Nach der Vorbereitung der Membranfläche, sowie die der Randkonstruktion und des Druckelements, erfolgt die Montage der einzelnen Elemente. Dazu wird an den langen Rändern die ungespannte Membranfläche an der Randkonstruktion über eine Klemmung befestigt. Die beiden Ränder werden dazu mit Hilfe von zwei Gewindestangen zusammengezogen. Die anschließende Vorspannung erfolgt in der Breitenrichtung indem die Gewindestangen dazu genutzt werden, die Randkonstruktion auf den geplanten Abstand auseinander zu drücken. Die Vorspannung in Querrichtung der Konstruktion erfolgt sozusagen über den Einbau einer verkürzten Membranfläche. In Längsrichtung wird die Vorspannung ausschließlich über die Verlängerung des Druckelements eingebracht. Aus diesem Grund lässt sich die spannungslose Membranfläche in dieser Richtung problemlos befestigen. In Bild 6-8a ist ein Schnitt des Demonstrators in Breitenrichtung dargestellt. Die zugehörige Draufsicht (siehe Bild 6-8b) erlaubt eine entsprechende Verortung der beiden Gewindestangen in Längsrichtung der Struktur. Die aussteifenden Elemente können entfernt werden, um mit den Gewindestangen den berechneten Abstand einstellen zu können. Im Anschluss kann das Druckelement innen- bzw. unterseitig in die Membranfläche verkürzt eingesetzt werden. Die dafür notwendige Anschlussgestaltung wird in Abschnitt 6.2.4 detailliert erläutert. Abschließend kann das Druckelement auf die berechnete Länge eingestellt werden, um die definierte Vorspannung einzubringen und damit den finalen Gleichgewichtszustand herzustellen.

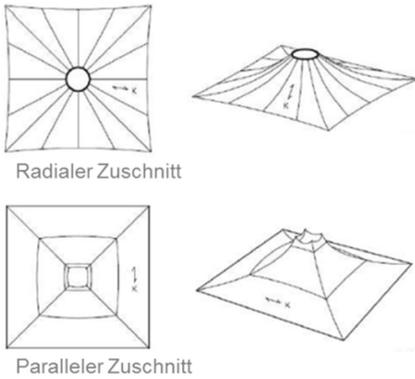


6-8a Visualisierung der Randkonstruktion mit Gewindestangen zum Aufbringen der Vorspannung in Breitenrichtung des Demonstrators im Querschnitt



6-8b Visualisierung der Randkonstruktion mit Gewindestangen zum Aufbringen der Vorspannung in Breitenrichtung des Demonstrators in der Draufsicht

6.2.4 Konstruktive Detaillierung des Druckelements



6-9 Radiale und Parallele Zuschnittsanordnung für Hochpunktkonstruktionen

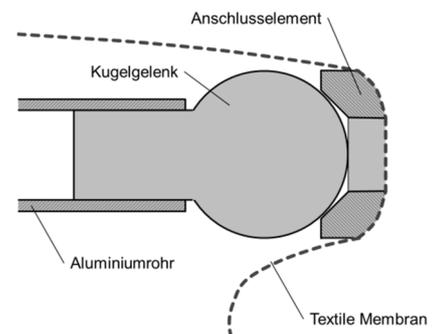
Die konstruktive Detaillierung des Druckelements bezieht sich insbesondere auf den Anschlussbereich zur textilen Membran, sowie auf den Mechanismus der Stabverlängerung zum Aufbringen der Vorspannung in Strukturlängsrichtung. Dabei nimmt der Anschlussbereich nicht nur eine besondere Bedeutung in Hinblick auf die Funktionalität, sondern auch auf die Gestaltung der Struktur ein, da die geometrische Ausbildung der Fläche die, für Tensegrity-Membran-Strukturen typischen Umlenkkräfte visualisiert. Die Funktionalität in Bezug auf beispielsweise einen Witterungsschutz wird mit der geschlossenen Membranfläche und der direkten Verbindung des Druckelements mit der textilen Membran erreicht. Zudem wird der gestalterische Ausdruck der Struktur durch die außenliegende geschlossene Membranfläche positiv beeinflusst. Die Verbindung zwischen dem Druckelement und der Membran muss eine direkte Kraftübertragung zwischen den beiden Elementen erlauben. Durch die nachträgliche Vorspannung, beziehungsweise das nachträgliche Verspannen des Druckelementes in der Membranfläche, muss der Anschlusspunkt in der Hauptsache über Druckkontakt funktionieren, da sich das Druckelement bei Verlängerung beidseitig gegen die Membranfläche drückt. Eine Festhaltung ist somit aus statischer Sicht im Endzustand nicht erforderlich. Zudem ist zu beachten, dass sich die gesamte Struktur formaktiv verhält, dementsprechend können infolge äußerer Einwirkungen durchaus Verformungen innerhalb der Struktur auftreten. Die geplante Anschlussdetaillierung muss die entsprechenden Verformungen zulassen können. Explizit ist eine Verdrehbarkeit der textilen Membran zu gewährleisten, der entsprechende Anschluss wird daher gelenkig konstruiert. Die geometrische Ausprägung der textilen Membran im Anschlussbereich weist eine große Ähnlichkeit mit einer, im konstruktiven Membranbau typischen, Hochpunktkonstruktion auf. Allerdings unterscheidet sich die Größenordnung davon deutlich. Grundsätzlich gibt es zwei zu differenzierende Möglichkeiten für die Ausbildung von Hochpunktkonstruktionen (siehe Bild 6-9). Zum einen können die Zuschnittsflächen so ausgeführt werden, dass radial auf den Hochpunkt zulaufenden Bahnen hergestellt werden. Zum anderen ist die parallele Anordnung der Zuschnittsflächen eine weitere Möglichkeit der Hochpunktausbildung [Seidel, 2008, S.63f.]. Im Abschnitt Fertigungs- und Montageablauf wurde unter Beachtung der zulässigen Überlagerungen bereits eine Definition der einzelnen Zuschnittsflächen aufgezeigt. Da sich dieser Ansatz eher mit den radialen Zuschnittsflächen realisieren lässt, wird dieser im Folgenden näher diskutiert.

Die Gewährleistung der direkten Kraftübertragung zwischen der textilen Membran und dem Druckelement erfordert eine entsprechende Ausgestaltung des Hochpunktes. Eine Möglichkeit ist der Abschluss der textilen Membran mit einem Klemmring, der mit weiteren Elementen, beispielsweise kurzen Seilen, am Druckelementende befestigt werden kann. Dabei ergeben sich allerdings einige konstruktive Punkte, die einer konkreten Lösung bedürfen und folgend diskutiert werden. Erstens ist zu prüfen, ob die Anschlussart in der gewünschten Größenordnung handwerklich noch

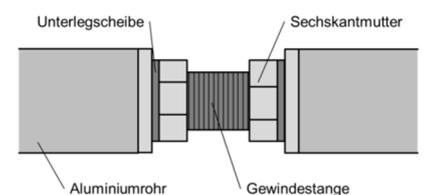
sinnvoll umsetzbar ist. Eine Verbindung über Seilelemente ist aufgrund der Größe des Druckelements von 30 mm Durchmesser, nur schwer realisierbar und kann daher ausgeschlossen werden. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, den Klemmring nicht mit biegeweichen Seilelemente, sondern mit steifen Stahl- oder Aluminiumbauteilen an einem geschlitzten Druckelementende zu befestigen. Dadurch könnte die handwerkliche Umsetzung verbessert werden, allerdings bleibt ein weiteres Problem bestehen. Die Kraftübertragung endet zwischen Klemmring und Mantelfläche des Druckelements. Damit wird das Druckelementende nicht vollständig von der textilen Membran umschlossen. Es ist zwar nachträglich möglich, diesen Bereich mit einer textilen Membran zu bekleiden, diese erfüllt dann allerdings nur kosmetische Aufgaben, sinnvoll wäre eine strukturelle Einbindung der Membranfläche am Druckelementende. Außerdem ist bei einer Klemmung das klemmende Bauteil auf der sichtbaren Außenseite der Struktur angebracht. Hier sollte untersucht werden, in wie weit die Anordnung eine gestalterische Einschränkung der Gesamtstruktur bedingt, gegebenenfalls müsste dann eine kosmetische Abdeckung angebracht werden.

Eine weitere Möglichkeit der Ausgestaltung des Anschlussbereichs ist das innenseitige Einbringen eines, an der geschlossenen Membranfläche befestigten, Kontaktelements zur Aufnahme des Druckelements. Das Kontaktelement sollte sich zudem auf der membran zugewandten Seite der geometrischen Ausprägung der Membranfläche anpassen. An der Innenseite ist zur Ausnahme des Druckelements ein Kugelgelenk vorzusehen, um so die für die Membran notwendigen Verdrehungen in Bezug auf die Druckelementenden zu ermöglichen. Ein Vorteil gegenüber der Ausbildung mittels Klemmring ist die vollständig geschlossene Membranfläche, die somit in allen Bereichen als strukturell wirksam anzusetzen ist. Ein weiterer positiver Aspekt ist die außenseitige Erscheinung einer homogenen Membranfläche. Als nachteilig ist bei dieser eigens entworfenen Anschlussmöglichkeit allerdings der Punkt zu nennen, dass keine vergleichbaren konstruktiven Lösungen im Membranbau existieren. Damit stellt die Entwicklung des konstruktiven Ansatzes eine wesentlich größere konstruktive Herausforderung dar. Bild 6-10 zeigt das Prinzip der Ausbildung des Anschlusspunktes. Da dieser Ansatz gegenüber der diskutierten Ausbildungsmöglichkeit mit Klemmung zum einen gestalterisch gefälliger ist und sich zudem in der vorgegebenen Größenordnung besser umsetzen lässt, erfolgt die Ausbildung des Kontaktpunktes nach dieser Variante.

Der Mechanismus zur Verlängerung des Druckelements wird etwa in der Mitte des Aluminiumrohres vorgesehen. Dabei wird das Aluminiumrohr geteilt und an den Schnittflächen mit Innengewinden versehen. Die Verbindung der beiden Rohrabschnitte erfolgt mit einem Gewindestab. Die Konstruktion ermöglicht durch gegenseitige Verdrehung der beiden Rohrabschnitte eine stufenlose Verlängerung des Druckelements. Um sicherzustellen, dass sich die eingestellte Länge nicht verstellt, werden zudem Kontermuttern vorgesehen.



6-10 Konzept zur Anschlussausbildung zwischen Druckelement und textiler Membran mit innenseitig befestigtem Anschlusselement



6-11 Konzept zur Ausbildung des Vorspannmechanismus im Druckelement

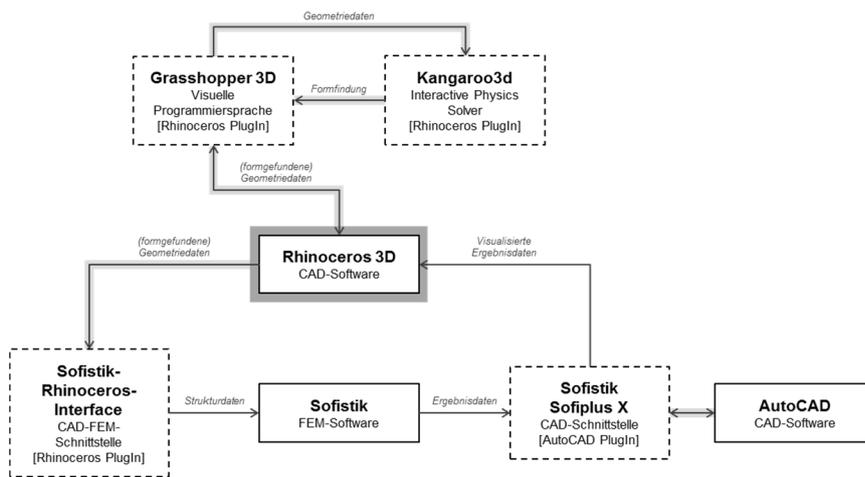
6.3 Planung und Berechnung des Demonstrators

In dem folgenden Abschnitt soll das zuvor erarbeitete Realisierungskonzept zur baulichen Umsetzung eines Demonstrators in seinen einzelnen Punkten detailliert ausgearbeitet, und in einen ausführungsfähigen Zustand überführt werden. Die weitere Planung beinhaltet dabei die Vorbereitung detailmaßstäblicher Zeichnungen für die Fertigung sowie eine ausführliche FEM-Berechnung in Anlehnung an die konstruktive Detaillierung.

6.3.1 Gewählte Herangehensweise

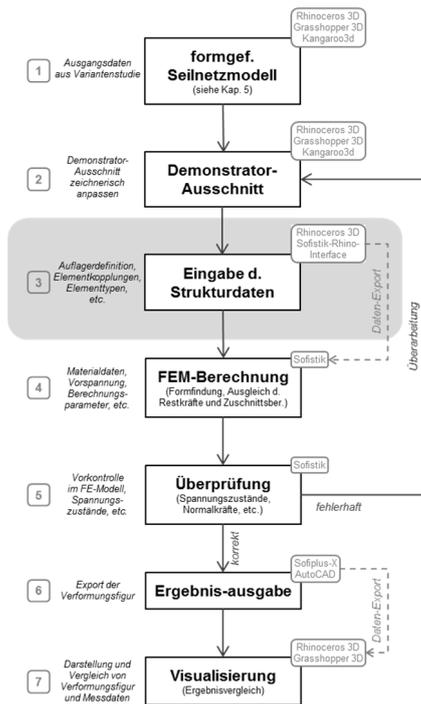
Die Planung des Demonstrators erfolgt computergestützt, dazu wird die Struktur in ein digitales dreidimensionales Modell überführt und berechnet. Die Geometrie wird programmatisch eingegeben beziehungsweise aus dem bereits programmierten Seilnetzmodell extrahiert (siehe Abschnitt 5.4.4.3) und an den gewählten Demonstrator-Ausschnitt angepasst (siehe Abschnitt 6.2.1), dabei wird die CAD-Software Rhinoceros 3D mit den beiden Plug-Ins Grasshopper 3D und Kangaroo3d verwendet. Grasshopper 3D ist eine Art visuelle Programmiersprache, die nach der Eingabe in der verknüpften CAD-Software als Struktur dargestellt wird. Kangaroo3d ist eine sogenannte Live Physics Engine, mit der eine Formfindung auf Basis der Dynamischen Relaxation durchgeführt werden kann, die ebenfalls in der CAD-Software dargestellt werden kann (siehe Abschnitt 5.2). Mit dem Plug-In Sofistik-Rhinoceros-Interface werden die, in Kangaroo3d formgefundenen Geometriedaten anschließend mit expliziten Struktureigenschaften versehen und in die FEM-Software Sofistik überführt. In dem Finite Element Programm Sofistik erfolgt sodann die Eingabe der Materialeigenschaften und eine numerische Analyse, dazu gehört auch eine zweite FEM-basierte Formfindung, da bei dem Formfindungsprozess, in dem Plug-In Kangaroo3d, die nicht-linearen Materialeigenschaften der textilen Membran nicht berücksichtigt werden konnten (siehe Abschnitt 5.4.4.2). In der ersten Formfindung (Kangaroo3d) lassen sich die Materialeigenschaften des Seilnetzes nur durch zwei linear elastische Federkonstanten beschreiben. Damit können Effekte wie zum Beispiel das Interaktionsverhalten der Geweberichtungen oder der Verbund zwischen Gewebe und Beschichtung nicht berücksichtigt werden. In der zweiten Formfindung (Sofistik) können entsprechende Materialmodelle herangezogen werden, die diese Einflüsse berücksichtigen. Die zweite Formfindung ist daher zur genauen Untersuchung unabdingbar. Trotzdem bietet es sich an, die erste Formfindung als Ausgangsgeometrie für die FEM-Berechnung zu verwenden, da damit der Berechnungsaufwand reduziert werden kann. Die FEM-Berechnung erfordert die Eingabe genauer Querschnitts- und Materialwerte, wobei die Eingabe der tabellierten Querschnittswerte und der Materialwerte des Aluminiums keine Besonderheiten aufweisen. Die Eingabe der Materialeigenschaften der textilen Membran hingegen, kann erst nach der Ermittlung durch gesonderte biaxiale Zugversuche erfolgen. In Abschnitt 6.3.3 werden die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Materialkennwerte der gewählten textilen Membran und die technischen Zusammenhänge, in Bezug auf die Not-

wendigkeit dieser Materialversuche, erläutert. Darüber hinaus bietet die FEM-Software Sofistik auch eine implementierte Lösung für die Zuschnittsberechnung von Membrantragwerken. Über das Sofistik AutoCAD Plug-In Sofiplus X kann der Export der berechneten Geometrie vorgenommen werden. Diese kann dann zur Vorbereitung des Zuschnitts entsprechend in der CAD-Software Rhinoceros 3D bearbeitet werden. Die Verknüpfung von Rhinoceros 3D und Grasshopper 3D kann ebenfalls für eine visuelle Aufarbeitung der Ergebnisse und ein Vergleich der Messdaten und der FEM-Berechnungen genutzt werden. Die Programmstruktur, beziehungsweise die Verknüpfung und der Ablauf der einzelnen digitalen Programme, sind in Bild 6-12 aufgezeigt.



6-12 Übersicht der verwendeten Programme und Datenaustausch zur Planung und Berechnung des Demonstrators

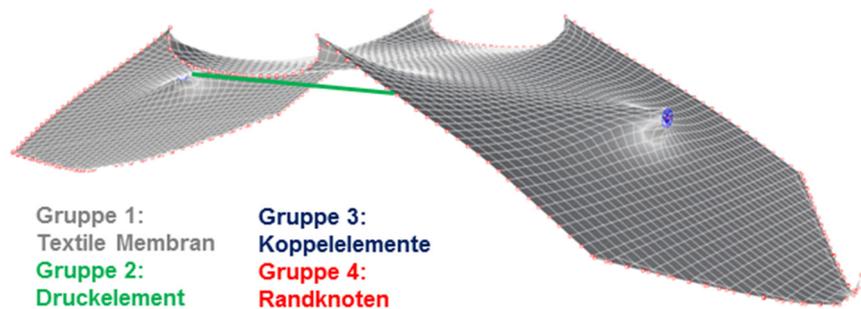
6.3.2 Überführung des digitalen Demonstrator-Modells in das FEM-Programm Sofistik



6-13 Ablaufschema der Berechnungsschritte des Demonstrators (hier markiert: Eingabe der Strukturdaten)

Die Überführung des digitalen Demonstrator-Modells aus dem Programm Rhinoceros 3D in das Finite Element Programm Sofistik, erfolgte unter Anwendung des Sofistik-Rhinoceros-Interface (siehe Abschnitt 6.3.1). Zur besseren Übersicht wurde der komplette Berechnungsablauf, in einzelne Arbeitsschritte unterteilt, dargestellt und durchnummeriert. Nachfolgend wird die Eingabe der Strukturdaten und der Datenexport in das FEM Programm beschrieben (siehe Bild 6-13 Nummer 3).

Um in der FEM-Berechnung (siehe Bild 6-13 Nummer 4) gezielt einzelne Strukturelemente anzuordnen und spezifische Eigenschaften definieren zu können, wurde mit dem Sofistik-Rhinoceros-Interface auch eine Zuweisung der Elemente in verschiedene Gruppen vorgenommen. Die nachfolgend als Koppellemente bezeichneten Elemente wurden im Verlauf der schrittweisen Entwicklung des FE-Modells eingeführt, sie sind der Vollständigkeit halber bereits an dieser Stelle mit aufgelistet. Eine entsprechende Erklärung für die Einführung der Koppellemente und der schrittweisen Entwicklung des FE-Modells erfolgt im weiteren Verlauf dieser Arbeit (siehe Abschnitt 6.3.4). Bild 6-14 zeigt den Demonstrator-Ausschnitt und die entsprechende Zuordnung der Elemente in vier Gruppen. Nachfolgend werden diese beschrieben und die entsprechenden Einstellungen erläutert.



6-14 Visualisierung der verschiedenen Gruppen und der zugewiesenen Elemente für die FEM-Berechnung des Demonstrators

Die Textile Membran (Gruppe 1) wurde als Strukturfläche definiert. Für die spätere FEM-Berechnung muss die Strukturfläche entsprechend vernetzt werden. Als FE-Netz wurde dabei das bestehende gleichmäßig erzeugte Seilnetz aus dem bereits mit Kangaroo3d vorformgefundenen Seilnetzmodell beibehalten. Die Maschenweite wurde zur Überführung in das FEM-Programm auf 30 x 30 mm eingestellt. Durch die orthogonale Ausrichtung des Seilnetzes lassen sich die materialspezifischen richtungsabhängigen Steifigkeiten entsprechend zuweisen. Für die anschließende FE-Berechnung ist eine Netzorientierung der Kettrichtung in X-Richtung der FE-Elemente anzustreben [Sofistik AG, 2015b, S.2-86], was ebenfalls durch diese Herangehensweise vereinfacht wird, da eine der beiden Seilnetzrichtungen bereits in X-Richtung des Systems vorliegt. Darüber hinaus wirkt sich eine gleichmäßige Netzeinteilung vorteilhaft bei der FEM-Berechnung von Hochpunktstrukturen aus, da die numeri-

sche Berechnung stabiler verläuft, als mit automatisch generierten Netzen, die Unregelmäßigkeiten aufweisen können [Sofistik AG, 2015b, S.2-64]. Da der Interaktionsbereich auf jeden Fall Ähnlichkeit mit einem Hochpunkt aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die vorliegende gleichmäßige manuelle Netzeinteilung zur stabileren Berechnung beiträgt. Die Stabilisierung der FEM-Berechnung wird zudem noch durch die bereits in Kangaroo3d durchgeführte erste Formfindung unterstützt. Der Vorteil einer vorgeschalteten Formfindung liegt darin, dass dadurch nur noch sehr kleine Verformungen bei der FEM-Berechnung auftreten, da schon ein annähernder Gleichgewichtszustand der Struktur vorliegt. Insbesondere bei der Verwendung von quadratischen FE-Elementen, können größere Verzerrungen der FE-Elemente, welche bei zu großen Verschiebungen und Verzerrungen der Gesamtstruktur entstehen können zu Instabilitäten der Berechnungen führen [Sofistik AG, 2015b, S.2-74]. Die Materialdicke der textilen Membran wurde nach Messungen an verschiedenen Materialproben mit 0,47 mm angesetzt und bereits in dem Sofistik-Rhinoceros-Interface eingegeben. Um ein membrangerechtes Tragverhalten sicherzustellen wurde als Elementansatz nur die Scheibenwirkung der Strukturflächenelemente erlaubt, damit eine reine Normalkraftbeanspruchung in Elementebene gegeben ist.

Das Druckelement (Gruppe 2) wurde als Strukturlinie definiert. Dabei wurde eine automatische Vernetzung mit einer Elementgröße von 0,1 m eingestellt. Weiterhin wurde das Druckelement als zentrischer Stab definiert, dabei handelt es sich um ein stabförmiges 3D-Element, dessen Querschnittswerte zentrisch auf die Schwerachse bezogen werden und das sowohl Normal- und Querkräfte, sowie Biege- und Torsionsmomente abtragen kann. Da die Membranfläche allerdings nur Normalkräfte abtragen kann und das Druckelement ausschließlich an die Membranfläche angeschlossen ist, besteht eine theoretische Labilität um die eigene Schwerachse, folglich kann dies zu Instabilitäten bei der FEM-Berechnung führen. Dabei handelt es sich um ein rein numerisches Problem, das durch das Einführen einer sehr schwachen Torsionsfeder am Druckelementende eliminiert werden kann. Die notwendige Torsionsfeder (1 kNm/rad) wurde im Sofistik-Rhinoceros-Interface entsprechend definiert.

Die Koppellemente (Gruppe 3) sind stabförmige Elemente und wurden zunächst ebenfalls als Strukturlinien mit einer automatischen Vernetzung der Netzparameter definiert. Diese Einstellung bedingte bei der folgenden FEM-Berechnungen das Auftreten vermehrter Fehlermeldungen, da aufgrund der automatischen Vernetzung sehr kleine FE-Elemente (< 10 mm) resultierten. Um die Fehlerquelle zu eliminieren wurde jeder Koppelstab daraufhin als ein FE-Element mit einer Elementlänge von 22,5 mm definiert. Die Koppellemente wurden im Verlauf der Entwicklung des FE-Modells eingeführt, um die Stabendknoten, bezogen auf die Stabachse, mit den Membranrändern im korrekten Abstand zu verbinden. Eine Kopplung umfasst lediglich die Weiterleitung von auftretenden Kräf-

ten, dementsprechend ist die vorgenommene Einstellung als einzelne FE-Elemente vertretbar.

Die Randknoten (Gruppe 4) ergeben sich aus der gewählten Vernetzung am Membranrand. Die entsprechenden Netzknoten wurden als Strukturpunkte definiert und unverschieblich in X-, Y- und Z-Richtung gelagert, eine entsprechende Verdrehung der textilen Membran an den Randknoten ist jedoch möglich. Wird der gesamte Pavillon betrachtet, könnten sich die Punkte grundlegend in ihrer Lage verschieben, da in dieser Arbeit allerdings vorrangig der Interaktionsbereich zwischen dem Druckelement und der textilen Membran, anhand des Demonstrator-Ausschnitts untersucht wird, kann dieser Aspekt vernachlässigt werden. Es muss natürlich beachtet werden, dass die Ergebnisse im Randbereich damit nicht ohne weiteres auf die Berechnung der gesamten Tensegrity-Membran-Struktur übertragen werden können. Die in Kangaroo3d durchgeführte Formfindung wurde bereits als vorteilhaft für die FEM-Berechnung der Membranfläche bezeichnet, für die Definition der Randknoten des Demonstrators ist sie ebenfalls sehr hilfreich. Dadurch wird sichergestellt, dass die Randgeometrie den anliegenden Membranflächen entspricht und damit als Randlagerung für den Demonstrator-Ausschnitt herangezogen werden kann. Da sich bereits gezeigt hat, dass die Geometrie der Struktur einen entscheidenden Einfluss auf das Tragverhalten der Tensegrity-Membran-Strukturen hat (siehe Abschnitt 5.4.4.3), ist diese Vorgehensweise eine gute Näherung um den Randbereich entsprechend genau abzubilden.

Im Anschluss an die Eingabe der Strukturdaten wurde das digitale Modell des Demonstrators in die FEM-Software überführt. Dazu wurde im Sofistik-Rhinoceros-Interface ein entsprechender Export gestartet, bei dem das Plug-In automatisch auf die FEM-Software zugreift und mit Hilfe des Sofistik-Eingabeprogramms SOFIMESH (siehe Abschnitt 6.3.4) die digitale Struktur in ein FEM-Modell überführt.

6.3.3 Materialkennwerte der textilen Membran

Für die nachfolgende Beschreibung der FEM-Berechnung ist die Ermittlung entsprechender Materialkennwerte der textilen Membran erforderlich, diese wird nachfolgend kurz beschrieben. Die gewählte textile Membran besteht aus einem PVC-beschichtetem Polyestergewebe Typ 1. Das Polyestergewebe und die PVC-Beschichtung erfüllen dabei unterschiedliche Aufgaben. Das Gewebe ist maßgeblich für die mechanischen Eigenschaften, respektive für die Festigkeit der Membran verantwortlich, die Beschichtung wird hingegen hauptsächlich als Schutz des Gewebes angesetzt. Darüber hinaus ermöglicht die Beschichtung die typische einhüllende Funktion, die entsprechende Anwendungsmöglichkeiten mit sich bringt und eine Ausgestaltung der Oberflächenbeschaffenheit. Außerdem kann in Abhängigkeit der Beschichtung eine geringe Schubsteifigkeit angesetzt werden [Blum, 2002]. Die textilen Membranen werden aufgrund ihres strukturellen Aufbaus zu den Verbundwerkstoffen gezählt werden. Durch ihre chemische Zusammensetzung und insbesondere

dem herstellungsbedingten Webvorgang unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften der textilen Membrane deutlich von herkömmlichen homogenen Materialien (siehe Abschnitt 3.2.1). Diese Materialeigenschaft wird als Anisotropie bezeichnet [Seidel, 2008, S.47ff.].

Die Ermittlung der komplexen spezifischen Materialeigenschaften des verwendeten PVC-beschichtetem Polyestergewebe Typ 1, erfordert somit die Durchführung biaxialer Zugversuche, da das mechanische Verhalten explizit von der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Kunststoffe, sowie dem Herstellungsprozess abhängt [Seidel, 2008, S.51ff.]. Die Durchführung biaxialer Zugversuche erfolgte im Baulabor der HafenCity Universität Hamburg [Amaro Goncalves, 2018]. Die Prüfmaschine verfügt je Seite über fünf unabhängig voneinander ansteuerbaren Aktuatoren, an deren Enden sich entsprechende Materialklemmen befinden, in welche die Materialprobe eingesetzt wird. Die Aktuatoren wiederum sind auf einer Schiene quer zur Krafrichtung, horizontal frei verschieblich gelagert und mit einem in sich geschlossenen Stahlrahmen verbunden, der die im Versuch auftretenden Kräfte kurzschließt. Zudem sind die Aktuatoren jeweils mit einer Kraftmessdose versehen, um die auftretenden Zugkräfte messen und steuern zu können. Die im Versuchsablauf auftretenden Dehnungen der Materialprobe werden über ein optisches Messsystem der Firma GOM aufgezeichnet und gemeinsam mit den gemessenen Zugkräften protokolliert.

Da zur biaxialen Prüfung textiler Membrane aktuell nur der Entwurf der europäische Norm [DIN EN 17117-1:2017-06] vorliegt, orientiert sich die Versuchsdurchführung in der Hauptsache an dem internationalen anerkannten Standard *Testing Method for elastic constants of membrane materials* der Membrane Structures Association of Japan [Membrane Structures Association of Japan, 1995] und der Fachliteratur *Biaxial Testing for Fabrics and Foils* [Beccarelli, 2015]. Die textile Probe wird als kreuzförmiger Ausschnitt mit einem 500 x 500 mm großen Messbereich aus der textilen Membran zugeschnitten. Der Messbereich wird über je fünf umseitig angeordnete Streifen, von jeweils 100 x 500 mm Länge, an die Aktuatoren, beziehungsweise die Materialklemmen angeschlossen. Da ein unterschiedliches Tragverhalten in Kett- und Schussrichtung zu erwarten ist, wird die Orientierung der Membranfläche bei der Versuchsdurchführung beachtet und dokumentiert. Für die Messreihe wurden fünf Standardproben getestet. Bild 6-15 zeigt die biaxiale Prüfmaschine der HafenCity Universität Hamburg mit einer eingebauten Textilprobe im gespannten Zustand. Da als Fügetechnik der Membranfläche das Warmgasschweißverfahren gewählt wurde, wurde mit Hilfe biaxialer Zugversuche ebenfalls der Einfluss der Schweißnähte auf das Tragverhalten der textilen Membran untersucht. Dazu wurden weitere fünf Materialproben gefertigt, die mittig eine 50 mm breite Schweißnaht, rechtwinklig zur Kett-richtung aufweisen. Die Versuche mit den Schweißproben haben allerdings, im Abgleich zu den Standardproben gezeigt, dass nur geringe Abweichungen im Tragverhalten durch die Schweißnaht entstehen [Amaro Goncalves, 2018]. Es wird vermutet, dass die verhältnismäßig breit



6-15 Eingesetzte Standardprobe in der Biaxialen Prüfmaschine der HafenCity Universität Hamburg

gewählte Naht eine entsprechenden Steifigkeitsausgleich zur Folge hat [Seidel, 2008, S.53f.]. Somit wurde der Einfluss der Schweißnähte für die Realisierung des Demonstrators nicht weiter rechnerisch berücksichtigt.

Zur Vorbereitung der biaxialen Zugversuche wurden an dem beprobten Material zunächst einachsige Zugversuche durchgeführt, um so die maximale Zugkraft für die biaxialen Versuche zu ermitteln, beziehungsweise die Herstellerangaben zu überprüfen (siehe Abschnitt 6.2.2). Für die biaxialen Versuche wurden daraufhin eine maximale Prüfkraft von etwa 20 % der im einachsigen Zugversuch ermittelten Reißkraft angesetzt [Membrane Structures Association of Japan, 1995]. Die einachsigen Zugversuche erfolgten für beide Geweberichtungen an jeweils fünf Probestücken und ergaben in Kett- und Schussrichtung eine Reißkraft von 3515,5 N/10cm, sowie in Schussrichtung eine Kraft von 2896,4 N/10cm. Die Auswertung der einachsigen Zugversuche sind der Arbeit von Nuno Amaro Goncalves zu entnehmen [Amaro Goncalves, 2018]. Auf Basis der ermittelten Werte wird für den biaxialen Zugversuch eine maximale Prüfkraft von 0,6 kN/10cm in Kett- und Schussrichtung angesetzt. Eine minimale Prüfkraft wird in Abhängigkeit der Prüfmaschine mit 0,04 kN/10cm gewählt. Die japanische Prüfvorschrift definiert im Rahmen der Versuchsdurchführung eine Dehnungsgeschwindigkeit von 2 bis 4 mm/min [Membrane Structures Association of Japan, 1995]. Darauf aufbauend wurde ein Lastprofil mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen der beteiligten Geweberichtungen definiert, die in mehreren, sich wiederholenden Zyklen auf- und abgebaut werden [Amaro Goncalves, 2018].

Die Auswertung der biaxialen Zugversuche erfolgte mit dem Ansatz eines Interaktionsmoduls, das die unterschiedlichen Elastizitätsmodule der beiden Geweberichtungen rechnerisch miteinander verknüpft. Dieses Interaktionsmodul berücksichtigt die gegenseitige Beeinflussung der Kett- und Schussrichtung des Materials und wird mit zwei Elastizitätsmodulen, sowie zwei Querdehnzahlen gekoppelt. Die aus den Versuchen gewonnenen nicht linearen Spannungs-Dehnungsdiagramme werden dafür in kleinen Intervallen abschnittsweise linearisiert [Bridgens, 2004, S.31]. Die Beschreibung des Dehnungsverhaltens des orthotropen Materials erfolgt anhand des folgenden Gleichungssystems:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1111} & E_{1122} \\ E_{2211} & E_{2222} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \end{bmatrix}$$

Dabei repräsentieren die Werte σ_{11} und σ_{22} die richtungsabhängigen Spannungen der beteiligten Geweberichtungen und die Werte ε_{11} und ε_{22} die zugehörigen richtungsabhängigen Dehnungen. Die vier unbekanntenen Elastizitätsmodule werden in sogenannte direkte Steifigkeiten E_{1111} und E_{2222} , sowie in Interaktionssteifigkeiten E_{1122} und E_{2211} unterteilt [Bridgens, 2004, S.31]. Die direkten Steifigkeiten beziehen sich dabei ausschließlich auf die jeweilige Richtung, die Interaktionssteifigkeiten beziehen sich auf die gegenseitige Beeinflussung der beiden Richtungen. Um die notwendigen Anzahlen erforderlicher Gleichungen zur Lösung der

vier auftretenden Unbekannten zu erhalten, werden verschiedene Lastverhältnisse berücksichtigt, beispielsweise wird dazu die Erhöhung der Spannung in Kettrichtung ($\Delta\sigma_{11}\neq 0$) bei gleichzeitigem Grundspannungsniveau in Schussrichtung ($\Delta\sigma_{22}=0$) herangezogen, und umgekehrt. Die somit erzeugten Spannungsverhältnisse erlauben das Aufstellen der folgend aufgezeigten Grundgleichungen zum Lösen der Elastizitätsmodule. Die Kettrichtung wird dabei nachfolgend mit dem Index x und die Schussrichtung mit dem Index y bezeichnet.

$$\sigma_{x,I} = E_{1111} \cdot \varepsilon_{x,I} + E_{1122,I} \cdot \varepsilon_{y,I}$$

$$\sigma_{y,I} = E_{1122} \cdot \varepsilon_{x,I} + E_{2222} \cdot \varepsilon_{y,I}$$

$$\sigma_{x,II} = E_{1111} \cdot \varepsilon_{x,II} + E_{1122,II} \cdot \varepsilon_{y,II}$$

$$\sigma_{x,II} = E_{1122} \cdot \varepsilon_{x,II} + E_{2222} \cdot \varepsilon_{y,II}$$

Das Lösen des Gleichungssystems liefert zwei Ergebnisse für $E_{1122}=E_{2211}$ [Membrane Structures Association of Japan, 1995], diese werden für das weitere Vorgehen gemittelt.

$$E_{1122} = E_{2211} = \frac{E_{1122,I} + E_{1122,II}}{2}$$

Im Anschluss werden die Ergebnisse in inverse Steifigkeiten überführt, da diese zur Eingabe in die FE-Software erforderlich sind [Uhlemann, 2016, S.51f.]

$$\nu_{xy} = \frac{E_{1122}}{E_{1111}}$$

$$\nu_{yx} = \frac{E_{2211}}{E_{2222}}$$

$$E_x = E_{1111} \cdot (1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})$$

$$E_y = E_{2222} \cdot (1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})$$

Die Auswertung der fünf durchgeführten biaxialen Zugversuche liefert die folgenden Elastizitätsmodule und inversen Steifigkeiten in Kett-, sowie in Schussrichtung der textilen Membran. Eine detaillierte Beschreibung der Auswertung ist der folgenden Arbeit zu entnehmen [Zywietz, 2018]. Die ermittelten Werte können zur weiteren Verarbeitung in das finite Element Programm Sofistik überführt werden. Anhand der ermittelten Steifigkeiten ist erkennbar, dass ein recht ähnliches Verhalten in Kett- und Schussrichtung vorliegt.

$$E_x = 447,024 \frac{N}{mm^2} \text{ (Kettrichtung)}$$

$$E_y = 380,465 \frac{N}{mm^2} \text{ (Schussrichtung)}$$

$$\nu_{xy} = 0,240 \text{ (Kettrichtung)}$$

$$\nu_{yx} = 0,204 \text{ (Schussrichtung)}$$

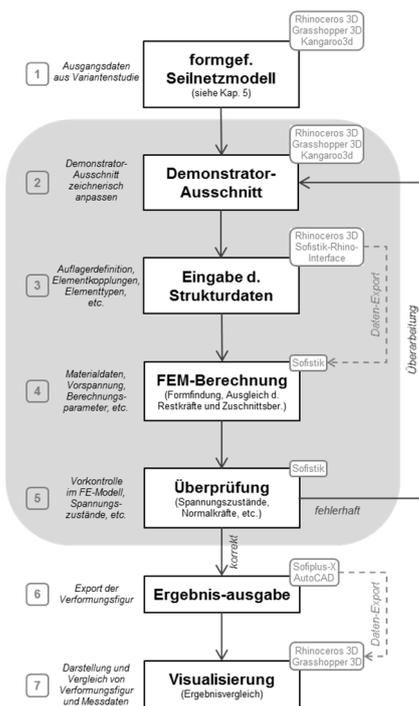
6.3.4 Modellierung und Berechnung in der FEM-Software

Das Finite Element Programm Sofistik setzt sich aus verschiedenen Unterprogrammen [Sofistik AG, 2015a, S.2-3f.] zusammen, welche in die folgenden vier Gruppen gegliedert werden, innerhalb derer die Unterprogramme je nach Problemstellung miteinander kombiniert werden können:

- Eingabeprogramme
- Rechenprogramme
- Bemessungsprogramme
- Auswertungsprogramme

In dieser Arbeit kamen die folgend aufgezeigten Programme zur Anwendung, wobei das Programm SOFIMESH automatisiert über das Sofistik-Rhinoceros-Interface ausgeführt wurde:

- AQUA (Definition von Materialien und Querschnitten)
- SOFIMESH (Geometrische Modellierung)
- SOFILOAD (Eingabe von Lasten und Lastfunktionen)
- ASE (Allgemeine Statik Finiter Element Strukturen)
- WING (Grafische Darstellung Finiter Element Strukturen)
- TEXTILE (Zuschnittsberechnung von Membrantragwerken)



6-16 Ablaufschema der Berechnungsschritte des Demonstrators (hier markiert: Überarbeitungsprozess bei fehlerhaften Ergebnissen).

Grundlegend bietet das Programm zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Systemdefinition, eine programmatische Definition (TEDDY-Projekt) und eine grafische Definition (SSD-Projekt). Aufgrund des komplexen Tragverhaltens der Struktur wurde sich bei dem vorliegenden Projekt für eine programmatische Bearbeitung im Texteditor (TEDDY) entschieden. Der finale TEDDY-Code ist dem Anhang zu entnehmen. Die programmatische Arbeit mit Rechenprogrammen erlaubt zudem eine sehr genaue Einstellung jeglicher Eingabeparameter.

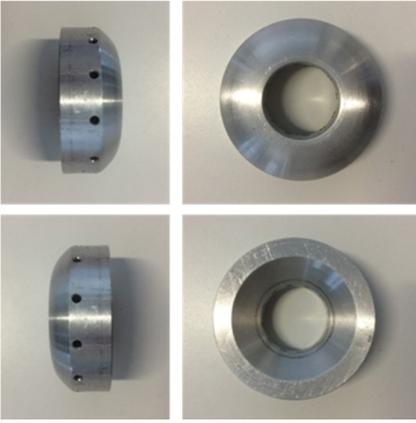
Die Entwicklung des finalen FE-Modells des Demonstrators wurde schrittweise vorgenommen. Dabei wurden die Berechnungen, aufeinander aufbauend, stetig verbessert und die Randbedingungen, im Abgleich mit der Entwicklung der konstruktiven Detaillösungen angepasst. Sofern bei dieser schrittweisen Entwicklung strukturelle Änderungen vorgenommen werden mussten, wurde der komplette Berechnungsablauf mit der Anpassung der Struktur neu begonnen, das bedeutet, dass die geänderte Struktur in Schritt Nummer 2 geometrisch überarbeitet und in Schritt Nummer 3 nochmals in das FEM-Programm überführt werden musste (siehe Bild 6-16). Nachfolgend werden die wichtigen Erkenntnisse und Bearbeitungsschritte der FE-Modellierung dargestellt und erläutert.

In der FEM-Software Sofistik wurden zuerst die Material- und Querschnittseigenschaften im Eingabeprogramm AQUA eingegeben, wie beispielsweise die im Versuch ermittelten Elastizitätsmodule und Querdehnzahlen der textilen Membran. Darauf aufbauend wurden die notwendigen Berechnungsparameter für den FEM-basierten Formfindungsprozess in dem Rechenprogramm ASE definiert und eine zweite, sehr genaue Formfindung durchgeführt. Bei der FEM-basierten Formfindung wird die

Steifigkeit der betreffenden Elemente, in diesem Fall die der textilen Membran, auf nahezu null ($1e^{-10}$) gesetzt, wodurch dehnungsbehaftete Verformungen, die zu Spannungsänderung führen unterbunden werden. Dementsprechend kann sich ein Kräftegleichgewicht auf Basis einer vorgegebenen Vorspannung der temporär annähernd steifigkeitslosen Elemente einstellen [Sofistik AG, 2015b, S.2-70]. Die Membranfläche der Struktur wird sowohl in Kett-, als auch in Schussrichtung, mit einer Kraft von 0,65 kN/m vorgespannt (siehe Abschnitt 6.2.2). Bei der Entwicklung und Berechnung dieses Demonstrators wurden die zahlreichen Möglichkeiten richtungsabhängiger Parametereinstellungen nicht weiter berücksichtigt. Auf Grundlage dieses Konzeptes soll erst einmal eine prinzipielle Vorgehensweise erarbeitet werden, um Tensegrity-Membran-Strukturen sicher berechnen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass beispielsweise unterschiedliche Vorspannungsniveaus problemlos mit einem funktionierenden Berechnungsmodell untersucht werden können. Bei der FEM-basierten Formfindung weder das Eigengewicht, noch die reale Steifigkeit der textilen Membran berücksichtigt. Daher erfolgt im Anschluss ein weiterer Berechnungsdurchlauf auf Basis der formgefundenen Struktur, der sowohl die reale Steifigkeit sowie das Eigengewicht beinhaltet. Dieser Durchlauf wird als Ausgleichen der Restkräfte bezeichnet. Damit stellt dieser Rechenschritt auch eine Art Kontrolle der Formfindung dar [Sofistik AG, 2015b, S.2-70]. Mit dem Ausgleich der Restkräfte wurde der endgültige Vorspannungszustand der Struktur definiert, auf dessen Basis weitere Berechnungen, wie beispielsweise die Zuschnittsberechnung erfolgen. Die aufgezeigten Berechnungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit näher erläutert.

Der Anschlussbereich zwischen dem Druckelement und der textilen Membran wurde unter Beachtung des erarbeiteten Entwicklungskonzeptes (siehe Abschnitt 6.2.4) konstruktiv durchgearbeitet, und die grundlegende Idee eines innenliegenden gelenkigen Anschlusses weiter konkretisiert. Mit der Wahl des Aluminiumrohrs mit einem Durchmesser von 30 mm als Druckelementquerschnitt wurde die Größenordnung des Anschlusselements vorgegeben. Um eine gelenkige Lagerung des Druckelementes zu gewährleisten wurde am Ende des Druckelementes eine Kugel vorgesehen, die in ihrem Durchmesser dem des Aluminiumrohrs entspricht. Es wird angenommen, dass sich das Druckelement im verlängerten Zustand in die beidseitig anstehende Membranfläche verspannt und somit in seiner Position fixiert wird. Das Kugelgelenk gewährt die notwendige Verdrehbarkeit der textilen Membran am Anschlusspunkt. Zur Lagesicherung des Druckelementes wurde das Anschlusselement so dimensioniert, dass sich die Kugel zu einem gewissen Anteil (10 mm) in die Mulde des Anschlusselements einfügt.

Um diesen Zustand sicherzustellen, wurde das Anschlusselement mit einem Durchmesser von 45 mm geplant. Als Werkstoff wurde hier ebenfalls Aluminium gewählt, da dies verhältnismäßig widerstandsfähig, gut bearbeitbar und entsprechend leicht ist (siehe Abschnitt Materialdefinition). Die Durchmesserdefinition von 45 mm erlaubt eine rückseitige Mul-



6-17 Anschlusselement zur innenseitigen Befestigung am Interaktionsbereich (verschiedene Ansichten)

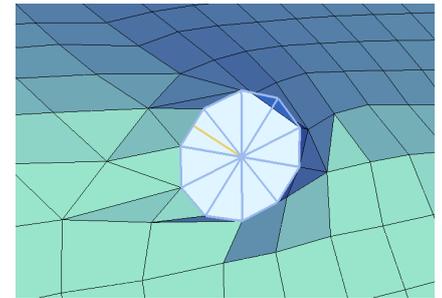
denausführung unter 45° , und damit eine ideale Ausbildung der Gelenkpfanne. Auf der membran zugewandten Seite wurde das Anschlusselement abgerundet um scharfkantige Ecken auszuschließen. Die exakte Ausbildung des Anschlusselements ist in Bild 6-17 aufgezeigt. Zur Lager-sicherung des Anschlusselements an der Membraninnenseite wurden Bohrungen mit einem Durchmesser von 1,0 mm vorgesehen, diese dienen dazu, dass Anschlusselement mit einer einfachen Naht an der textilen Membran zu befestigen. Bei einer anwendungsorientierten Realisierung einer Tensegrity-Membran-Struktur sei darauf hingewiesen, dass dieser Bereich zur Gewährleistung eines vollständigen Witterungsschutzes durch beispielsweise außenseitige Abdeckstreifen geschlossen werden sollte.

Die konstruktive Ausarbeitung des Interaktionsbereiches in Form des Kugelgelenkanschlusses wurde in die Entwicklung des FE-Modells übernommen. Da damit eine strukturelle Änderung verbunden ist, musste der komplette Berechnungsprozess entsprechend wiederholt werden (siehe Bild 6-16). Zuerst wurde das Anschlusselement durch eine kreisförmige Platte mit einem Durchmesser von 45 mm vereinfacht abgebildet, als Verbindung von Druckelement und Membranrand. Allerdings hat diese Vorgehensweise zu Berechnungsabbrüchen geführt. Bei der Formfindung von konventionellen Membrantragwerken ist bekannt, dass es zu Iterationsproblemen kommen kann, wenn Randseile mit voller Steifigkeit im FEM-basierten Formfindungsprozess angesetzt werden [Sofistik AG, 2015b, S.2-92]. Es wird vermutet, dass auch weitere vergleichsweise steife Elemente, bei dem Einsatz einer annähernd steifigkeitslosen textilen Membran während der Formfindung zu Iterationsproblemen führen können. Für Anschlüsse einer Membranfläche an einen Hochpunkt wird seitens der Sofistik AG vorgeschlagen, die am Membranrand liegenden Strukturpunkte über Stäbe an einen festen zentralen Knoten anzuschließen [Sofistik AG, 2015b, S.2-91]. Da der Interaktionsbereich zwischen dem Druckelement und der textilen Membran eine gewisse Ähnlichkeit mit einer Hochpunkt-konstruktion aufweist, wurde dieser Ansatz der Modellierung weiterverfolgt, der feste Knoten wurde dabei durch den Endknoten des Druckelements abgebildet.

Die bereits benannten Koppel-elemente dienen der Verbindung des Membranrandes und des Druckelementendes. Sie wurden im Verlauf der Weiterentwicklung des FE-Modells als stabförmige Elemente mit sehr hohen Biege- und Dehnsteifigkeiten definiert, wobei die maximale Höhe der Steifigkeiten iterativ ermittelt wurde, da eine zu hohe Steifigkeit eine Konvergenz verhinderte (siehe vorherigen Abschnitt). Es wird vermutet, dass in dem Interaktionsbereich ein minimales Verformungsvermögen erforderlich ist, um Spannungsspitzen in den FE-Flächenelementen zu eliminieren. Das entsprechende Verformungsvermögen entfällt bei zu steif angesetzten Elementen.

Die beschriebene Herangehensweise erlaubte eine Erhöhung der Stabilität der FEM-Berechnungen. Im Verlauf der Entwicklung des FE-Modells

wurde das FE-Netz, im Anschlussbereich der textilen Membran, darüber hinaus manuell verfeinert, wodurch die Berechnungen ebenfalls verbessert wurden. Durch den Einsatz einer dreieckförmigen Vernetzung der FE-Flächenelemente, die einen Kontakt zu den Koppelementen aufweisen, konnte die Verformungsfigur im Anschlussbereich genauer abgebildet werden, was in der Hauptsache die anschließende Zuschnittsberechnung verbesserte. Bild 6-18 zeigt den detaillierten Anschlussbereich im FE-Modell, die Koppelemente sind entsprechend zwischen Druckelemente und Membranrand zu erkennen, ebenso ist die dreieckförmige Vernetzung am Membranrand dargestellt. Allerdings ist auch zu erkennen, dass damit die FE-Modellierung eine starke Vereinfachung des realen konstruktiven Anschlusses darstellt. Da sowohl das Druckelementende, sowie der Anschlussbereich der textilen Membran exakt geometrisch verortet werden können, ist diese Lösung als zweckmäßig einzustufen. Die Ausgestaltung des Abschlusses der textilen Membran um das Anschlusselement wurde im Nachgang der FE-Berechnungen für die Realisierung entsprechend konstruktiv detailliert. Sowohl der Endknoten des Druckelementes, als auch die Randknoten der Membran wurden dabei als Zwangspunkte definiert.



6-18 Visualisierung des FE-Modells des vereinfachten Anschlussbereichs mit eingesetzten Koppelementen (Sofistik Animator)

Zur weiteren Stabilisierung der FEM-Berechnungen wurden im Zuge der Entwicklung des FE-Modells wurden verschiedene Berechnungsparameter über die Steuerung der Rechenverfahren angepasst. Nachfolgend werden die entsprechenden Einstellungen der Berechnungsparameter erläutert.

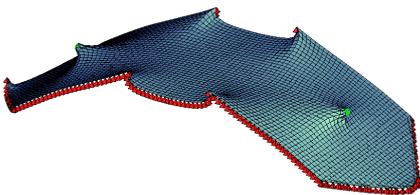
Die numerische Analyse von textilen Membranen erfordert eine nicht lineare Berechnung nach Theorie III. Ordnung. Bei einer Berechnung nach Theorie III. Ordnung wird der Gleichgewichtszustand unter Berücksichtigung der Verformungen des Systems ermittelt, dabei ist von verhältnismäßig großen Verformungen auszugehen. Die textilen Membrane werden in der FE-Berechnung als Grenzfall einer sehr dünnen Platte behandelt, die ausschließlich Normalkräfte aufnehmen und übertragen kann (siehe Abschnitt 6.3.2), auf eine Biegesteifigkeit wird demzufolge verzichtet. Bei der Berechnung ergeben sich sehr umfangreiche Modellgleichungen. Die großen Durchbiegungen, die aufgrund der nicht vorhandenen Biegesteifigkeit auftreten, sind mit den Gleichungen der Verschiebungen der Membranelemente gekoppelt [Altenbach, 2016, S.13]. Die Berechnungen können somit als hochgradig komplex beschrieben werden, da sich der Geometriezustand der Struktur mit jedem Rechenschritt ändert. Zudem weisen die Verformungen Größenordnungen auf, bei denen vereinfachte Annahmen, wie beispielsweise die Kleinwinkelnäherung [Spura, 2016, S.92] nicht mehr anwendbar sind. Es ist somit ein iteratives Lösungsverfahren erforderlich, das entsprechend hohe Rechenkapazitäten voraussetzt.

Als Iterationsverfahren wird ein so genanntes Linesearchverfahren gewählt. Bei der Verwendung des Linesearchverfahrens wird der Konvergenzradius der zugrunde liegenden Newton-Raphson-Methode erweitert.

„Diese Verfahren optimieren die Länge eines Lösungsincrements indem sie dieses so skalieren, dass ein lokales Minimum für das vom Gleichungssystem beschriebene Funktional erhalten wird.“ [Parisch, 2003, S.285]. Für die FE-Berechnung bedeutet diese Vorgehensweise, dass die Lastschrittweite der Iterationsschritte, in Abhängigkeit der Restkräfte, verändert wird. Die Anzahl der definierten Iterationsschritte ist somit von großer Wichtigkeit und sollte bei komplexen Berechnungen entsprechend hoch angesetzt werden. Darüber hinaus wurde für das iterative Berechnungsverfahren eine Dämpfung eingegeben. Bei dem Verwenden einer Dämpfung wird ebenfalls empfohlen die Anzahl der Iterationsschritte zu erhöhen, insgesamt wurden daher 1000 Iterationsschritte vorgegeben.

Zusätzlich zu der Anzahl der Iterationsschritte wurde für jeden Iterationsschritt ein Steifigkeitsupdate definiert. Während der iterativen Berechnung formaktiver Strukturen tritt häufig der Fall ein, dass nach einem Iterationsschritt Kräfte im System verbleiben, die nicht in der Gleichgewichtsformulierung berücksichtigt wurden. Diese verbleibenden Kräfte werden als Restkräfte bezeichnet und werden dem System in dem folgenden Iterationsschritt als zusätzliche Belastung eingetragen. Bei einem Steifigkeitsupdate wird in Abhängigkeit der verbleibenden Restkräfte die Lastschrittweite der folgenden Iterationsschritte angepasst. Sofern der Iterationsschritt in Richtung einer konvergenten Lösung führt, also ein Energieminimum ansteuert, wird eine neue tangential Steifigkeit aufgebaut. Durch dieses Vorgehen wird das weitere Iterationsverhalten optimiert [Sofistik AG, 2015b, S.3-31]. Um den Formfindungsprozess zudem weitergehend zu stabilisieren wurde das Steifigkeitsupdate der ersten 20 Iterationsschritte abgeschwächt. Mit einem langsamen Anstieg der tangentialen Steifigkeit wird ein zu schnelles Ansteigen der Normalkräfte in den Membranelementen unterbunden.

Bei der Formfindung von Membrankonstruktionen kann es aufgrund der großen Verformungen grundlegend zu einem sogenannten Verschwimmen der Knotenpunkte in der Membranebene kommen. Um diese Phänomene zu unterbinden, wurde in dem Programm das sogenannte Mesh Control aktiviert. Bei dem Mesh Control handelt es sich um eine Fixierung der FE-Knotenpunkte in Membranebene. Während dem Prozess der Formfindung wird in der Membranebene eine interne Scheibensteifigkeit aktiviert, die ein Verschwimmen der Knotenpunkte unterbindet [Sofistik AG, 2015b, S.2-77f.]. Bei der FE-Berechnung hat sich gezeigt, dass ein automatisches Mesh Control zur Stabilisierung des Formfindungsprozesses ausreichend ist.

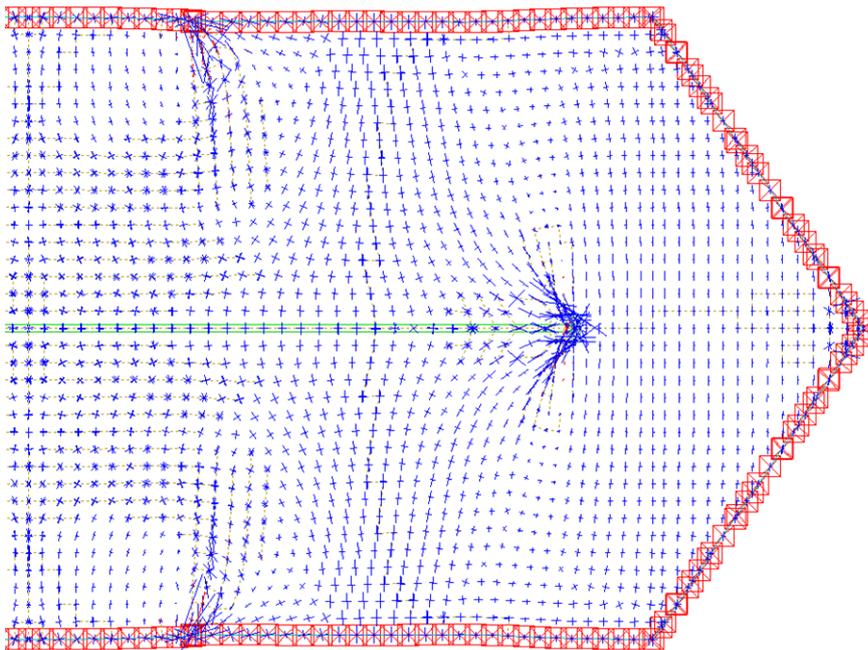


6-19 Visualisierung des finalen FE-Modells (Sofistik Animator)

Mit Hilfe der umgesetzten Berechnungsparameter und einer entsprechenden Strukturänderung im Anschlussbereich, konnte eine stabile FEM-Berechnung durchgeführt werden. Zur abschließenden Überprüfung der FEM-Berechnung wurden die Restkräfte der Struktur kontrolliert, da diese eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Berechnung zulassen [Sofistik AG, 2015b, S.2-71]. Da die verbleibenden Restkräfte gegen null liefen, konnte eine ordnungsgemäße Berechnung bestätigt werden, Bild

6-19 zeigt das finale FE-Modell. Die entsprechenden FEM-Berechnungen sind dem Anhang zu entnehmen.

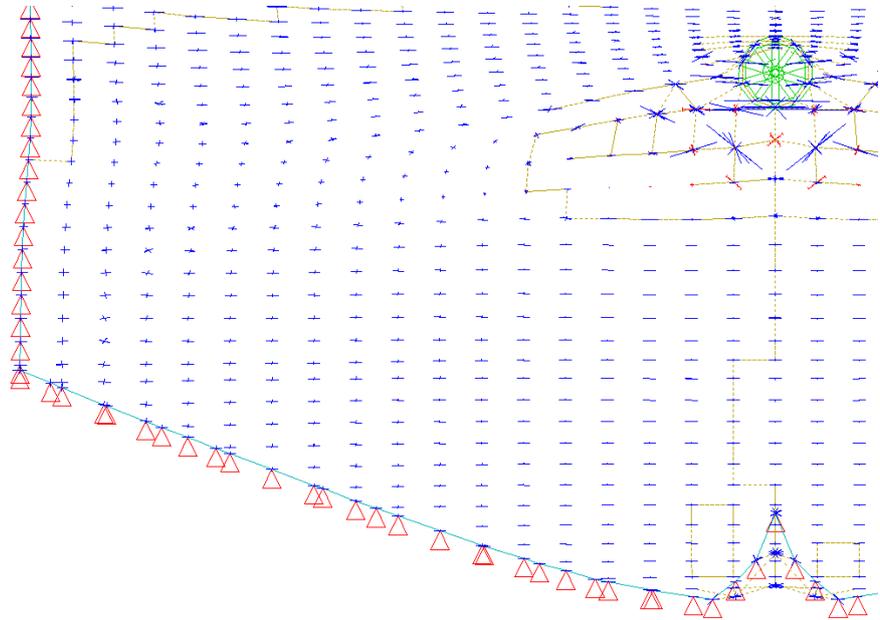
Nachfolgend werden die wichtigsten Berechnungsergebnisse dargestellt und erläutert. Bild 6-20 zeigt das FE-Modell des Demonstrators in der Draufsicht. Der Übersichtlichkeit halber werden nur qualitative Hauptmembrankräfte dargestellt. Durch die Symmetrie des vorliegenden Systems und des symmetrischen Lastfalls Vorspannung ist die Darstellung der halbierten Struktur entsprechend möglich. Es ist gut zu erkennen, dass nach einem Ausgleich der Restkräfte, dem Ansetzen des Eigengewichts, als auch der Eingabe der vollständigen Materialeigenschaften, ein nahezu gleichmäßiger zweiachsiger Spannungszustand in der Membranfläche vorliegt. Lediglich in dem Anschlussbereich zwischen dem Druckelement und der textilen Membran auf der Hyparfläche I, also im Bereich unterhalb des Druckelementendes, dominiert eine Spannung in Breitenrichtung, also der kürzeren Seite der Struktur. Dieses Verhalten kann auf die starke Krümmung der textilen Membran senkrecht dazu, unterhalb des Druckelementes zurückgeführt werden. Die Hyparfläche II, jeweils neben dem Druckelement zu finden, ist hingegen gleichmäßig zweiachsig beansprucht und weist keinerlei Besonderheiten auf.



6-20 Darstellung der Hauptmembrankräfte im berechneten Vorspannungszustand in der Draufsicht einer Systemhälfte (Sofistik Wingraf)

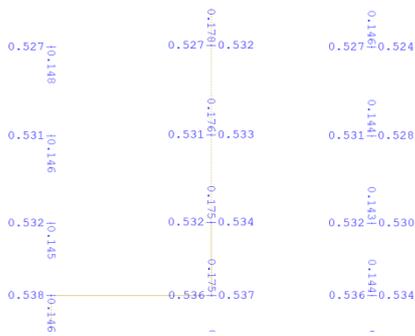
Bild 6-21 zeigt den Verlauf der Hauptmembrankräfte in einem Detailausschnitt um den Interaktionsbereich. Dabei wird deutlich, dass in Teilen der Hyparfläche I ein ungleichmäßiger zweiachsiger Lastabtrag vorliegt. In der durchgeführten Variantenstudie (siehe Abschnitt 5.4.4.2) wurde anhand des vorliegenden Seitenlängenverhältnisses der Hyparfläche I, bereits aufgezeigt, dass in diesem Bereich kein absolut ausgeglichener Spannungszustand zu erwarten ist. Die FEM-Berechnungen bestätigen die bereits in der Variantenstudie gewonnenen Erkenntnisse. Darüber hinaus lassen die qualitativen Membrankräfte erkennen, dass die Haupt-

beanspruchung direkt am Interaktionsbereich stattfinden, beide Tragrichtungen orientieren sich deutlich auf das Druckelementende zu. Es wurde bereits bei der konstruktiven Detaillierung des Druckelementanschlusses angenommen (siehe Abschnitt 6.2.4), dass sich das Druckelement beidseitig in die Membranfläche verspannt, sowohl die geometrische Ausprägung des Interaktionsbereichs, sowie der Verlauf der Hauptmembrankräfte bestätigen die Annahme.



6-21 Darstellung der Hauptmembrankräfte im berechneten Vorspannungszustand in der Frontansicht des Interaktionsbereich (Sofistik Wingraf)

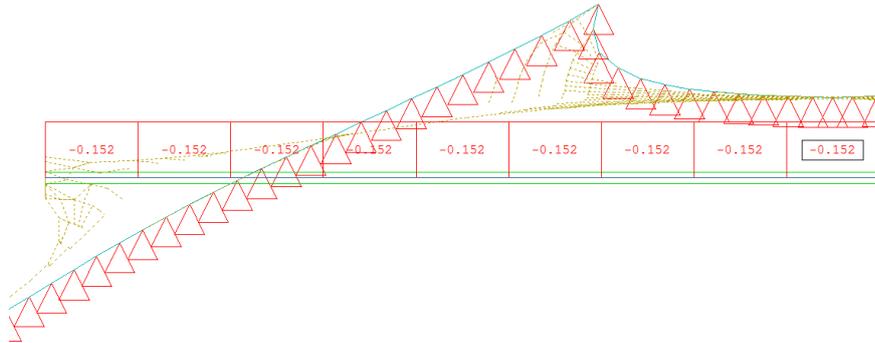
Eine genaue Betrachtung der Hauptmembrankräfte lässt zudem erkennen, dass vier, unmittelbar unter dem Druckelementanschluss liegende FE-Elemente, vergleichsweise geringe Druckspannungen aufweisen. Dieser Aspekt ist vermutlich auf die, lokal sehr unterschiedlich ausgeprägten Krümmungen der Hyparfläche I zurückzuführen, zusätzlich wird der benannte Aspekt durch das Eigengewicht des Druckelements verstärkt. Dies zeigt sich, sofern das Eigengewicht nicht berücksichtigt wird durch geringere Druckspannungen. Grundsätzlich können folgende drei Verbesserungsvorschläge, in Bezug auf dieses lokale Phänomen, in Betracht gezogen werden. Erstens kann die Geometrie der Hyparfläche I noch stärker an einen gleichmäßigeren Lastabtrag angepasst werden, was allerdings eine erneute Variantenstudie bedingt. Zweitens kann ein anderes Membranmaterial gewählt werden, dessen mechanische Eigenschaften auf die unterschiedlichen Beanspruchungen im Bereich der Hyparfläche I reagieren, und drittens kann ein leichter Werkstoff für die Umsetzung des Druckelementes gewählt werden, als das aktuell verwendete Aluminiumrohr.



6-22 Darstellung der Hauptmembrankräfte im Vorspannungszustand im Detailausschnitt, mittig in der Hyparfläche I (Sofistik Wingraf)

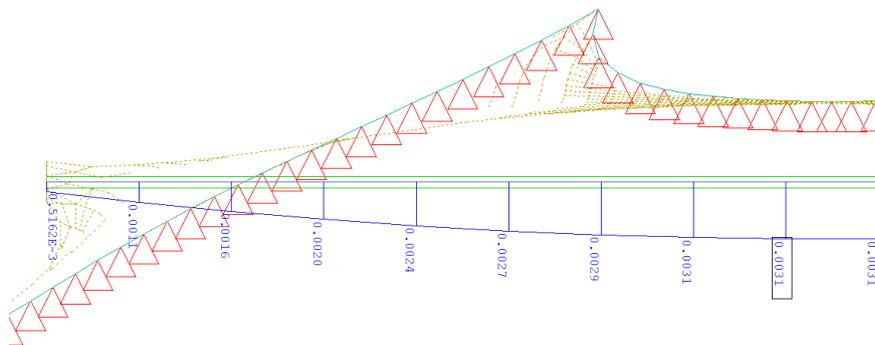
In Bild 6-22 werden die Hauptmembrankräfte in der Mitte der Hyparfläche I quantitativ dargestellt. Die Werte bestätigen das Vorliegen eines zweiachsigen Spannungszustandes, das Verhältnis der beiden Tragrichtungen variiert in diesem Bereich zwischen 1:3 und 1:4.

Bild 6-23 stellt die Stabnormalkräfte des Druckelements im Vorspannungszustand dar. Der Darstellung ist zu entnehmen, dass in dem Druckelement eine gleichmäßige Beanspruchung vorliegt, die einwirkende Stabnormalkraft ist mit $-0,152 \text{ kN}$ eher als gering einzustufen. Ein Versagen des Druckelements kann damit ausgeschlossen werden, da die überschläglich ermittelte Verzweigungslast $N_{ki} = 5,01 \text{ kN}$ (siehe Abschnitt 6.2.2) wesentlich höher, als die tatsächlich einwirkende Drucknormalkraft ist ($\eta = 0,04$). Die Normalspannung liegt bei $\sigma = 0,36 \text{ kN/cm}^2$ ($\eta = 0,02$).



6-23 Darstellung der Stabnormalkräfte im Vorspannungszustand in der Seitenansicht einer Systemhälfte (Sofistik Wingraf)

Eine Betrachtung des, auf das Druckelement wirkenden Biegemoments (M_y) zeigt, dass sich in dem Stabelement minimale Biegemomente einstellen (siehe Bild 6-24), dies kann durch das Eigengewicht erklärt werden. Da das Biegemoment mit einem Maximalwert von 3 Nm auftritt, kann es für das weitere Vorgehen aufgrund der geringen Größe vernachlässigt werden.



6-24 Darstellung der Biegemomente (M_y) im Vorspannungszustand in der Seitenansicht einer Systemhälfte (Sofistik Wingraf)

	max. Kraft	zul. Kraft	
Druckelement	0,15	5,01	kN
Kettrichtung	1,13	10,81	kN/m
Schussrichtung	3,94	8,91	kN/m

6-25 Vergleich der vorhandenen Schnittgrößen mit zulässigen Werten

Erkenntnisse der numerischen Modellierung und Berechnung

Mit der FEM-Berechnung des Demonstrators konnte folgende Annahmen nachgewiesen werden, grundlegend ist ein zweiachsiger Spannungszustand in der textilen Membran umsetzbar, wobei anzumerken ist, dass die Hyparfläche I keinen absolut gleichmäßigen Spannungszustand, aufgrund der gewählten Geometrie zulässt. Der globale Verlauf der Hauptmembrankräfte bestätigt die qualitativen Annahmen aus der Variantenstudie (siehe Abschnitt 5.4.4.2) in Bezug auf das Tragverhalten der Tensegrity-Membran-Struktur. Allerdings muss an dieser Stelle auch auf den lokalen Bereich unterhalb des Druckelements hingewiesen werden, der gewisse Unstimmigkeiten im Tragverhalten aufweist. Diese Aspekte konnten allerdings entsprechend erklärt werden. Damit kann die aufgezeigte FEM-Berechnung und die damit verbundene Herangehensweise im Allgemeinen als geeignet angesehen werden. Sowohl die Hauptmembrankräfte, respektive die Maxima, sowie die Stabnormalkräfte liegen im Vorspannzustand deutlich unterhalb der zulässigen Werte (siehe Bild 6-25), wobei angemerkt wird, dass es sich bei den herangezogenen Werten der Hauptmembrankräfte sogar um Spitzenwerte handelt und die Spannungen im Mittel deutlich geringer ausfallen. Die zulässigen Membrankräfte wurden mit einer Berechnung nach J. Minte [Minte, 1981] ermittelt und sind im Anhang dokumentiert. Es wird daher geschlussfolgert, dass die Materialwahl und die, auf Basis der Variantenstudie ermittelte Geometrie grundsätzlich ausreichendes Potential für die Umsetzung eines Prototyps bieten, der im Außenbereich eingesetzt werden kann.

6.3.5 Zuschnittsberechnung der Membranfläche

Zur Realisierung von Membrantragwerken ist eine numerische Ermittlung des Zuschnitts der Membranfläche unumgänglich. Durch die räumlichen antiklastischen Krümmungen kann die erforderliche Membranfläche nicht ohne weiteres in eine ebene Fläche überführt werden. Das Ausgangsmaterial liegt dahingegen als ebene Rollenware vor. Dementsprechend muss die berechnete räumliche Struktur in Hinblick auf die mathematisch-geometrischen Randbedingungen unterteilt werden, damit eine Abwicklung der Teilflächen (Verebnung) erfolgen kann [Seidel, 2008, S.59]. Die FEM-Software Sofistik bietet mit dem Programm TEXTILE die Möglichkeit der automatisierten Zuschnittsberechnung von Membrantragwerken.

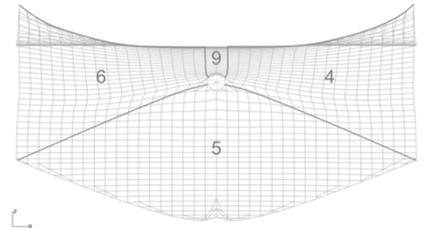
Die Einteilung des Zuschnitts der Membranfläche wird grundlegend von verschiedenen Kriterien optischer, topologischer sowie statischer Natur bedingt. Zusätzlich sind Aspekte der Montage und Verarbeitung zu berücksichtigen. Dabei hat die Wahl der Bahnenlage einen entsprechenden Einfluss auf die Steifigkeitsverteilung innerhalb der Membranfläche, die Orientierung der einzelnen Zuschnitte ist daher entscheidend für den Lastabtrag der Membrankonstruktion [Seidel, 2008, S.61f.]. Die Zuschnitte werden entsprechend der in der FEM-Berechnung definierten Haupttragrichtungen, also parallel zur Stabachse, festgelegt. Bei dem bereits entwickelten Zuschnittskonzept (siehe Abschnitt 6.2.3) wurde eine entsprechende Orientierung der Kettrichtung in Längsrichtung der Struktur

und der Schussrichtung in Breitenrichtung der Struktur vorgenommen. Somit liegt eine ideale Orientierung des Gewebes in Bezug auf die kritische Hyparfläche I vor. Prinzipiell besteht die Möglichkeit die Gewebeorientierung einzelner Zuschnittsflächen zu ändern, da allerdings keine wesentlichen Auswirkungen auf die Hyparfläche II, bei Verwendung eines 45° Netzes ermittelt werden konnten (siehe Abschnitt 5.4.3.5), werden zur konstruktiven Umsetzung des Demonstrators, alle Zuschnittsflächen einheitlich orientiert.

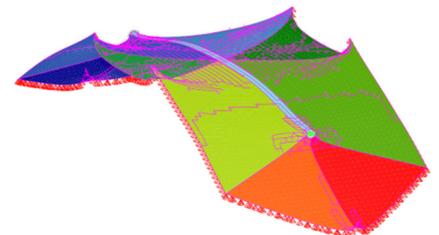
Weiterhin sieht das Zuschnittskonzept einen radial orientierten Zuschnitt für die Membranfläche im Anschlussbereich vor (siehe Bild 6-26). Radiale Zuschnitte sind grundlegend schwieriger zu bemessen und zu kompensieren, als parallele Anordnungen, jedoch aus statischer Sicht, bei der vorliegenden Geometrie, dennoch zu präferieren, da diese keine starre Berandung durch die angrenzenden Zuschnittsflächen aufweisen [Seidel, 2008, S.64].

Zudem könnte die starke Krümmung unterhalb des Interaktionsbereichs die Zuschnittsberechnung erschweren. Bereiche mit starken Flächenkrümmungen bedingen eine exakte Berechnung des Zuschnitts, da sich die räumliche Fläche aufgrund größerer Verzerrungen andernfalls nicht in die Ebene abwickeln lässt [Seidel, 2008, S.64f.]. Gegebenenfalls könnte somit, gegenüber dem vorerst angestrebten Zuschnittskonzept, eine weitere Unterteilung der Hyparfläche I erforderlich werden. Wie bereits beschrieben, bietet die FEM-Software SOFISTIK mit dem Programm TEXTILE die Möglichkeit Zuschnitte von Membrantragwerken zu ermitteln und zu berechnen. Die grafische Darstellung der Zuschnittsberechnung erfolgt mit dem Programm WINGRAF. Als Basis für die Zuschnittsberechnung liegt die formgefundene Struktur des Demonstrators zugrunde.

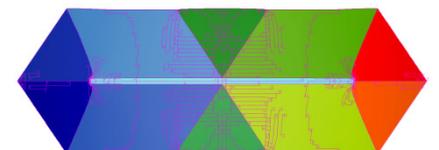
Zur Vorbereitung der Zuschnittsberechnung werden zunächst sogenannte Zuschnittslinien definiert. TEXTILE bietet dabei verschiedene Möglichkeiten der Eingabe [Sofistik AG, 2015c, S.2-1f.]. Aufgrund der komplexen geometrischen Ausprägung der Struktur, wurde sich für eine Eingabe über die exakten Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der Zuschnittslinien entschieden. Die Linien werden sodann, durch Angabe einer Projektionsrichtung, auf der räumlichen Fläche abgebildet. Bei den projizierten Linien handelt es sich um sogenannte geodätische Linien, also um die kürzeste Verbindung zweier Punkte auf der Fläche. Durch die sich teilweise räumlich überschneidende Geometrie der textilen Membran, und die dadurch erforderliche unterschiedliche Projektionsrichtung einzelner Linien, ist dieser Arbeitsschritt vergleichsweise fehleranfällig und aufwendig. Aus diesem Grund wurden die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte schrittweise, unter Berücksichtigung verschiedener Projektionsrichtungen verändert, bis eine sinnvolle Anordnung der Zuschnittsflächen berechnet werden konnte. Bild 6-27a und Bild 6-27b zeigen die Anordnung der Zuschnittslinien und die daraus resultierenden Zuschnittsflächen auf der räumlichen Struktur und in der Draufsicht, diese



6-26 Konzept zur Anordnung der Zuschnittsflächen in der Frontansicht



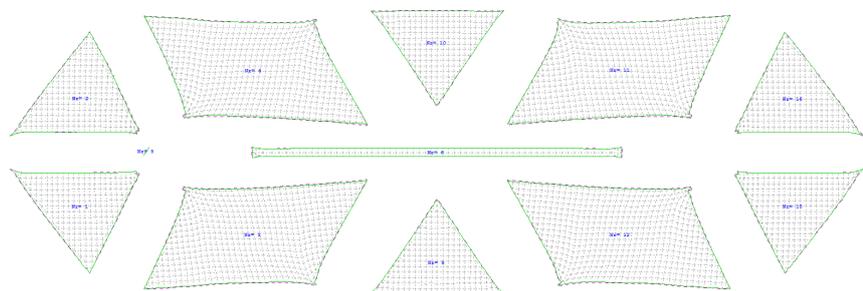
6-27a Visualisierung der Zuschnittsflächen gemäß der Zuschnittsberechnung in der Perspektive (Sofistik Wingraf)



6-27b Visualisierung der Zuschnittsflächen gemäß der Zuschnittsberechnung in der Draufsicht (Sofistik Wingraf)

sind zur besseren Unterscheidung unterschiedlich eingefärbt. Wie bereits vermutet wurde, musste die Hyparfläche I, infolge der starken Flächenkrümmung unterhalb des Interaktionsbereichs in zwei Zuschnittsflächen unterteilt werden. Damit wird die textile Membran des Demonstrators aus insgesamt elf Zuschnittsflächen zusammengesetzt. Des Weiteren wurde bei der numerischen Modellierung des Anschlussbereichs die textile Membran nur bis an die Koppelstabenden geführt, weshalb direkt an den beiden Druckelementenden jeweils ein offener Bereich von 45 mm Durchmesser vorliegt. Dementsprechend können die Bereiche nicht in der Zuschnittsberechnung berücksichtigt werden, im Verlauf der Realisierung werden die, nachfolgend als Abdeckelemente benannten, zusätzlichen Zuschnitte daher konstruktiv eingesetzt.

Mit Hilfe der generierten Zuschnittsflächen konnte schlussendlich die Abwicklung in die Ebene berechnet werden. Hierbei wurde eine entsprechende Kompensation berücksichtigt. Da die Abwicklung anhand der formgefundenen und somit anhand der vorgespannten Geometrie erfolgte, wurde der Zuschnitt um die vorspannungsabhängige elastische Dehnung verkleinert [Knippers, 2010, S.146]. Aufgrund des gewählten niedrigen Spannungsniveaus fällt die Kompensation bei dem untersuchten Projekt allerdings entsprechend gering aus [Amaro Goncalves, 2018]. Trotz der genauen Anordnung der Zuschnittslinien und der daraus resultierenden Zuschnittsflächen, kam es bei der Berechnung der Abwicklung neben den elf geplanten Zuschnitten zu weiteren Kleinstflächen, welche sich jeweils an den Stellen großer räumliche Überschneidungen in der textilen Membran befinden, also an den Druckelementenden und den Randpunkten, an denen die nächste Druckelementreihe anschließen würde. Diese Kleinstflächen sind zwischen 0,1 bis 0,6 cm² groß und weisen damit einen Anteil von jeweils 0,002 % an der Gesamtfläche auf und wurden deshalb nicht weiter für die konstruktive Realisierung beachtet. In Bild 6-28 ist die Abwicklung dargestellt. Mit der erfolgreichen Berechnung der Abwicklung der textilen Membran wurde die numerische Analyse abgeschlossen.



6-28 Visualisierung der berechneten Abwicklung (Sofistik Wingraf)

Erkenntnisse der Zuschnittsberechnung

Im Allgemeinen haben sich die Definition des Zuschnitts, als auch die Berechnung der einzelnen Flächen als geeignete Vorgehensweise erwiesen, lediglich im Bereich der Hyparfläche I wurde das Zuschnittskonzept im Verlauf der Zuschnittsberechnung angepasst. Allerdings konnte festgestellt werden, dass aufgrund der komplexen Geometrie der Membranfläche, bereits hohe Anforderungen an die Definition der Zuschnittslinien gestellt wurden. Es wird vermutet, dass diese Komplexität, auf der unterschiedlichen Zusammensetzung der Gesamtfläche, aus hochpunktähnlichen Bereichen und verschiedenen Hyparflächen beruht. Daher wäre es empfehlenswert, den Zuschnitt eines geometrisch ebenso komplexen Prototyps, an separaten Teilflächen vorzunehmen, da es unterschiedliche Vorgehensweisen für die Konfektionierung verschiedener Geometrien gibt.

6.4 Konstruktive Umsetzung des Demonstrators

Die konstruktive Umsetzung des konzipierten und berechneten Ausschnitts der Referenzstruktur, dem sogenannten Demonstrator, erfolgt in zwei Phasen. Die erste Phase beschreibt die Realisierung eines kleinmaßstäblichen Arbeitsmodells (1:3) zur Untersuchung der geplanten Vorgehensweise. Darauf aufbauend wird der eigentliche Demonstrator im Maßstab 1:1 errichtet. Die vorrangigen Ziele bei der Umsetzung sind die Evaluation:

- des entwickelten Konzeptes
- der geplanten Herangehensweise
- und der numerischen Berechnungen.

Außerdem kann die Realisierung zur Identifikation möglicher Probleme herangezogen werden, für die dann entsprechende Lösungsansätze entwickelt werden können.

6.4.1 Phase 1 – Realisierung eines Arbeitsmodells

Als erste Phase der Realisierung wurde ein Arbeitsmodell im Maßstab 1:3 des Demonstrators gebaut, in Längsrichtung misst es 92 cm und in Breitenrichtung 32 cm. Das Arbeitsmodell dient dabei vorrangig als Probelauf für das entwickelte Konzept und die darin angedachten Montageabläufe (siehe Abschnitt 6.2 und 6.3). Es wurde daher angestrebt, unter Beachtung des gewählten Maßstabs, ein möglichst detailgetreues Modell umzusetzen.

Als Materialien wurden mitteldichte Faserplatten und Holzleisten für die Randkonstruktion gewählt. Das Druckelement wurde aus einem hölzernen Rundstab gefertigt und die textile Membran wurde durch einen festen Baumwollstoff ersetzt. Dieser Schritt wurde in der Hauptsache aufgrund der Skalierung vorgenommen, da angenommen wird, dass die tatsächlich gewählte PES/PVC-Membran zu steif für den Einsatz in dem Arbeitsmodell ist, zudem würden die Nähte zu klein für das zur Realisierung vorgeschlagene Schweißverfahren. Die Wahl des Baumwollstoffs hat allerdings zur Folge, dass keine exakten Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Materialeigenschaften des Membranmaterials im Arbeitsmodell gewonnen werden können. Es wird aber angenommen, dass ein fester Stoff ähnliche Voraussetzungen bei der Montage mit sich bringt und sich diese Erkenntnisse daher beim Bau des Demonstrators zur Einschätzung der Montage nutzen lassen. Zur Befestigung der Elemente wurden Schrauben und Holzleim verwendet. Die Textilzuschnitte wurde mit Hilfe von Pappschablonen auf das Baumwollgewebe übertragen. Die Schablonen wurden ebenso wie die Holzzuschnitte mit einer CNC-Fräse hergestellt.

Die anschließende Montage erfolgte, mit Ausnahme des Fügens der Membranfläche, gemäß dem entwickelten Montagekonzept. Die Membranfläche wurde genäht. Zunächst wurde die aus den Holzelementen bestehende Randkonstruktion mit der zugehörigen Aussteifung zusammengesetzt (siehe Bild 6-29). Parallel dazu erfolgte der Zuschnitt der

definierten Zuschnittsflächen des Baumwollgewebes mit Hilfe der vorgefertigten Schablonen.

Darüber hinaus mussten die Zuschnitte mit einer entsprechenden Naht- und Randzugabe versehen werden. Die fertigen Zuschnitte wurden dann miteinander verbunden (siehe Bild 6-30). Dabei konnte festgestellt werden, dass die Fertigung der Nähte im Bereich erhöhter Flächenkrümmungen besonderer Aufmerksamkeit bedurfte, da die Teilflächen dazu neigten schnell zueinander zu verrutschen. Aufgrund des Maßstabs des Arbeitsmodells wurde während des Baus die Entscheidung getroffen, von der eigentlichen Montageplanung abzuweichen. Anstatt eines definierten Abdeckelements an den Druckelementenden (vgl. Abschnitt 6.3.5) wurde jeweils eine Tasche zur Aufnahme der Druckelemente hergestellt. Nachdem die Membranfläche zusammengenäht wurde, konnten die Aussteifungen der Randkonstruktion gelöst werden, um dem Modell in Breitenrichtung ein größeres Verformungsvermögen für den Einbau der Membran zu ermöglichen. Die Membranfläche wurde entsprechend auf der Randkonstruktion, unter Verwendung eines schnell erhärtenden Holzleims, befestigt. Trotz des abweichenden gewählten Fügeverfahrens passte die Membranfläche verhältnismäßig gut auf die Randkonstruktion (siehe Bild 6-31), obwohl stellenweise festgestellt wurde, dass große Dehnungen des Materials zum Einbau notwendig waren.

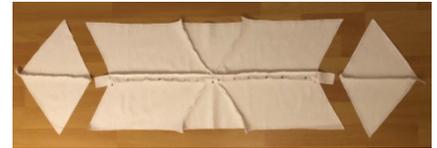
Anschließend wurden die Aussteifungen wieder eingebaut und das Druckelement wurde eingesetzt. Dabei wurde das Druckelement, abweichend von der eigentlichen Planung, in exakt geplanter Länge eingesetzt. Dies ist möglich, da das Baumwollgewebe im Vergleich zur PES/PVC-Membran ein größeres elastisches Verhalten zeigte und daher die Membran zum Einsetzen des Druckelements entsprechend überdehnt werden konnte. Durch das Einsetzen des Druckelements wurde das Arbeitsmodell fertiggestellt (siehe Bild 6-32).

Erkenntnisse aus der Umsetzung des Arbeitsmodells

Generell konnte durch den Bau des Arbeitsmodells das geplante Montagekonzept und die Fertigungsreihenfolge bestätigt werden. Es muss allerdings angemerkt werden, dass in einigen Detailpunkten von dem Konzept abgewichen wurde. Diese Punkte werden folgend noch einmal beschrieben. Durch das Nähen konnte am Arbeitsmodell keine Erkenntnis über mögliche Einflüsse des gewählten Fügeverfahrens für die eigentliche Realisierung gewonnen werden. Es hat sich aber auch beim Nähen gezeigt, dass die Bereiche mit starken Flächenkrümmungen besonderer Beachtung bedürfen. Es wird davon ausgegangen, dass sich dieser Aspekt nicht durch die Wahl des Verfahrens ändert. Außerdem konnte der Interaktionsbereich, somit die Kopplung des Druckelements und der Membranfläche, nicht wie vorgesehen ausgebildet werden, da aus Fertigungsgründen auf das Abdeckelement verzichtet wurde. Dieser Aspekt bedarf somit bei der Realisierung des Demonstrators ebenfalls besonderer Aufmerksamkeit. Grundsätzlich hat das fertige Arbeitsmodell aber gezeigt, dass der gewählte Zuschnitt den Anschlusspunkt zwischen Dru-



6-29 Randkonstruktion des Arbeitsmodells



6-30 Membranfläche des Arbeitsmodells während der Fertigung



6-31 Einbau der Membranfläche des Arbeitsmodells



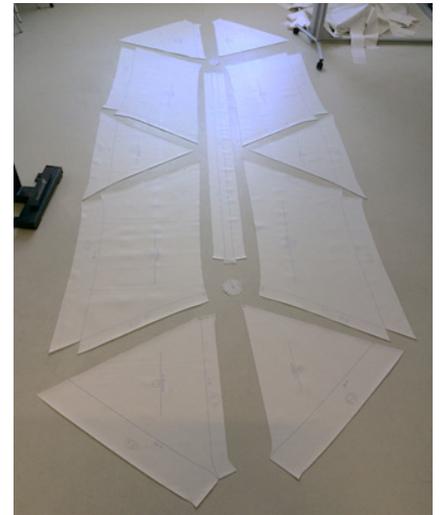
6-32 Fertiges Arbeitsmodell

ckelement und textiler Membran gut erfasst. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass durch Einbauen des Druckelementes der gewünschte Geometriezustand in dem System erreicht wurde. Der geplante Vorspannmechanismus wird daher als sinnvoll angesehen.

6.4.2 Phase 2 – Realisierung des Demonstrators

Aufgrund der im Allgemeinen positiv bewerteten Vorgehensweise bei der Erstellung des Arbeitsmodells im Maßstab 1:3 wurde der Demonstrator, entsprechend des Montagekonzeptes im Maßstab 1:1 realisiert.

Aufgrund der Größe des Demonstrators ($l / b / h = 2,75 \text{ m} / 0,96 \text{ m} / 0,76 \text{ m}$) konnten die Holzzuschnitte nicht direkt in der CNC-Fräse hergestellt werden. Daher wurden die einzelnen Elemente der Randkonstruktion mit Hilfe von gefrästen Pappschablonen aufgezeichnet und mit einer Stichsäge zugeschnitten. Die verwendeten Schablonen wurden dafür direkt aus dem digitalen Modell erstellt. Die Aluminiumbauteile, explizit der Anschlusspunkt und der Vorspannmechanismus, wurden in der Metallwerkstatt des Baulabors der HafenCity Universität, entsprechend der Planungsvorgaben hergestellt. Der Membranzuschnitt wurde ebenfalls mit Hilfe gefräster Pappschablonen vorgenommen, wobei zwecks Nahtausbildung und Befestigung an den späteren Rändern ein Streifen in Höhe von 10 cm zugegeben wurde und für die Ausführung der Schweißnähte eine Nahtüberdeckung in Höhe von 5 cm eingeplant wurde. Bild 6-33 zeigt die einzelnen Zuschnitte der textilen Membran. Gut zu erkennen sind neben den berechneten Zuschnittsflächen auch die beiden kreisförmigen Abdeckelemente, die jeweils an den Druckelementenden zu finden sind.



6-33 Zuschnitt der textilen Membran des Demonstrators

Der Zusammenbau der Randkonstruktion erfolgte entsprechend des Montagekonzeptes. Die Holzplatten wurden nacheinander mit Hilfe innenliegender Konstruktionshölzer miteinander verschraubt und ausgesteift. Ebenfalls wurde bereits die Vorrichtung zum Einbau der Gewindestangen vorbereitet, die zum Vorspannen der Membran in Breitenrichtung dienen. Bild 6-34 zeigt die Randkonstruktion ohne Aussteifung mit eingesetzten Gewindestangen.



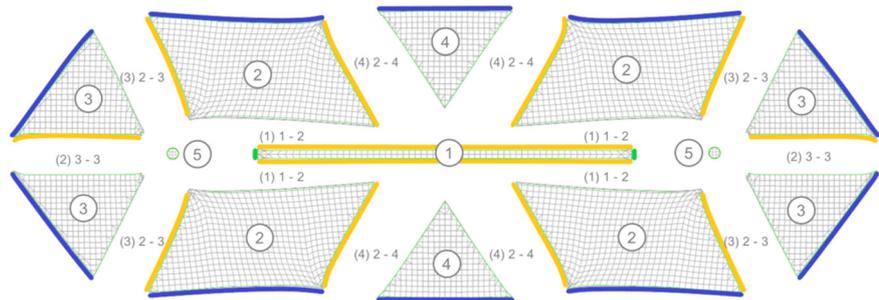
6-34 Randkonstruktion des Demonstrators ohne Aussteifung und mit Gewindestangen

Das Fügen der Membranfläche erfolgt durch ein Warmgasschweißverfahren. Hierbei werden die Zuschnittsflächen mit einem Heißluftfön im Bereich der Überdeckung auf etwa 320 °C erwärmt und mit einer metallischen Rolle mechanisch aufeinander gepresst. Durch die Wärme und den Druck geht die PVC-Beschichtung eine nicht lösbare Schweißverbindung ein. Um die Wärmeverteilung für die vorgesehene Nahtbreite von 5 cm zu verbessern, wurde eigens eine Düse für den verwendeten Heißluftfön angefertigt. Bild 6-35 zeigt das Herstellen einer Flächennaht mit dem Warmgasschweißverfahren.



6-35 Handwerkliche Fertigung einer Flächennaht mit dem Warmgasschweißverfahren

Zur Herstellung der Membranfläche wurde eine Schweißreihenfolge (siehe Bild 6-36) definiert, die sich an dem symmetrischen Aufbau der Fläche orientiert. Zuerst wurden die vier großflächigen Zuschnittsflächen (2) an die längliche Zuschnittsfläche (1) geschweißt (Schweißnaht 1 – 2). Danach folgte die Verbindung der Zuschnittsflächen (3) miteinander (Schweißnaht 3 – 3), welche anschließend wiederum mit den Zuschnittsflächen (2) verschweißt (Schweißnaht 2 – 3) wurden. Darauf aufbauend konnten die beiden dreieckförmigen Zuschnittsflächen (4) beidseitig mit den Zuschnittsflächen (2) verbunden werden (Schweißnaht 2 – 4). Zum Abschluss wurde das Abdeckelement (5) an den umliegenden Zuschnittsflächen befestigt.



6-36 Festlegung der Schweißreihenfolge der einzelnen zugeschnittenen Teilflächen der Membranfläche (Nummerierung = blau; 10 cm Rand = blau; 5 cm Naht = gelb)



6-37 Handwerkliche Fertigung des Anschlussbereichs mit dem Warmgas-schweißverfahren

Die Kleinteiligkeit des Abdeckelements führte zu relativ großen Unsauberkeiten in der Fertigung. Vor allem die Wärmeregulierung an dem konzentrierten Punkt mit der breiten Düse erschwerte die Befestigung des Abdeckelements (siehe Bild 6-37). Es hat sich bei der Herstellung der Membranfläche gezeigt, dass für die Fertigung eines großen Prototyps, die Kenntnisse, Fertigkeiten und Werkzeuge eines professionellen Membranherstellers unerlässlich sind.

Nach dem Fertigstellen der Membranfläche (siehe Bild 6-38) wurde das Anschlusselement eingebaut. Dabei wurde das Aluminiumbauteil innen mit Hilfe einer konstruktiven Naht an der textilen Membran befestigt. Der verwendete Faden besteht aus hitzebeständigem Polyethersulfon. Bild 6-39 zeigt die spannungsfrei ausgebreitete Membranfläche im Anschlussbereich. An den Rändern ist der abstehende Faden, mit dem das Aluminiumbauteil vernäht wurde, gut zu erkennen.

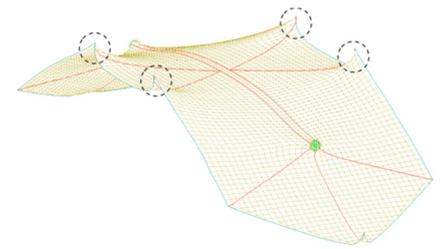


6-38 Fertiggestellte Membranfläche des Demonstrators



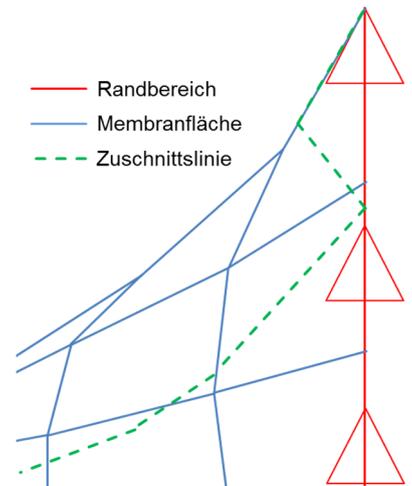
6-39 Anschlussbereich mit innenseitig eingenähtem Anschlusselement

Im Anschluss wurden für einen spannungsfreien Einbau der Membranfläche die seitlichen Plattenelemente der Randkonstruktion, mit Hilfe der vorgesehenen Gewindestangen zusammengezogen. Dazu wurden die aussteifenden Elemente entsprechend temporär entfernt. Bei der Befestigung des Membranrandes an den seitlichen Plattenelementen wurde festgestellt, dass die textile Membran zu kurz zugeschnitten wurde. Ausgehend von der Mitte des Demonstrators in Längsrichtung wurde eine Differenz von insgesamt 60 mm festgestellt. Wie sich bei der Ursachenanalyse herausstellte, war eine fehlerhafte Projektion der Zuschnittslinien in der FEM-Software die Ursache des Längenunterschieds (siehe Bild 6-40). Bei der Umsetzung des Arbeitsmodells ist dieser Fehler nicht aufgefallen, da vermutlich das Dehnvermögen des Baumwollgewebes diesen verhältnismäßig geringen Längenunterschied ausgleichen konnte.



6-40 Verortung der Projektionsfehler bei der Zuschnittsberechnung

In Bild 6-41 ist gut zu erkennen, dass die Zuschnittslinie die Membranfläche im Randbereich mehrmals schneidet. Dadurch entstehen die Kleinstflächen, die wie bereits beschrieben nicht berücksichtigt wurden (siehe Abschnitt 6.3.5). Allerdings folgt daraus auch ein verkürzter Membranrand, weshalb sich die Länge des Zuschnitts von der Länge der Randkonstruktion unterscheidet.

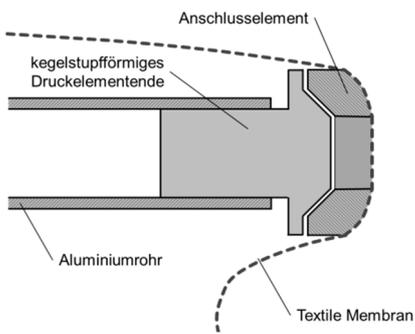


6-41 Detaillierte Darstellung des Projektionsfehlers am Membranrand

Da sich die Differenz als verhältnismäßig gering erwies, wurde darauf verzichtet eine komplett neue Membranfläche herzustellen. Zum Ausgleich der Längendifferenz wurden die seitlichen Plattenelemente im Bereich der Symmetrieachse um insgesamt 60 mm gekürzt. Im Anschluss konnte die Membranfläche wie geplant an der Randkonstruktion befestigt werden. Die Befestigung wurde mit Hilfe von 3 mm starken Klemmstreifen aus Hartfaserplatten vorgenommen, die direkt in den Holzplatten mit Feindrahtklammern verankert wurden. Nach der umlaufenden Befestigung der Membranfläche konnten die Gewindestangen auf den geplanten Abstand der Ränder gespannt und die Aussteifungselemente wieder eingebaut werden. Damit wurde in Breitenrichtung die notwendige Vorspannung eingebracht. Anschließend wurden die Gewindestangen gelöst und ausgebaut.

Abschließend erfolgte das Einsetzen des Druckelements. Dazu wurde das stabförmige Element zunächst verkürzt eingesetzt. Mit Hilfe des Vorspannmechanismus sollte im Anschluss die notwendige Längeneinstellung entsprechend des ermittelten Vorspannungszustands erfolgen. Aufgrund der fehlerhaften Zuschnittsberechnung und der gekürzten Randkonstruktion konnte auch das Druckelement nicht mit der ursprünglich angesetzten Länge verbaut werden. Die ursprünglich geplante Druckelementlänge von 1,80 m wurde insgesamt um 60 mm reduziert. Dadurch, dass die innenseitig befestigten Anschlusselemente jeweils mit 10 mm Stärke eingebaut wurden, belief sich die neue Druckelementlänge auf 1,72 m.

$$l_{\text{Druckelement}} = 1,80\text{m} - 0,06\text{m} - (2 \cdot 0,01\text{m}) = 1,72\text{m}$$



6-42 Weiterentwickelte Anschlussausbildung zwischen Druckelement und textiler Membran mit kegelstumpfförmigen Bauteil

Durch den bereits hergestellten Vorspannmechanismus bestand keine Notwendigkeit das Druckelement in der Länge abzuändern, die erforderliche Differenz von 60 mm konnte durch den vorgesehenen Gewindemechanismus kompensiert werden. Der Einbau des Druckelements wurde allerdings nicht wie ursprünglich geplant vorgenommen (siehe Abschnitt 6.2.4). Die Kugelgelenke an den Druckelementenden führten dazu, dass das membranseitige Anschlusselement permanent auf dem Kugelgelenk verrutsche und kein stabiler Zustand erreicht wurde. Grundlegend wurde angenommen, dass eine vollständige Verdrehbarkeit der textilen Membran an den Druckelementen die Stabilität der Struktur im finalen Zustand nicht beeinflusst, die Problematik beim Einbau wurde allerdings nicht vorhergesehen. Dementsprechend wurde das Kugelgelenk durch einen Kegelstumpf ersetzt, der sich exakt in die innenseitige Mulde des Anschlusselementes einpasst und somit während des Einbaus als Lagesicherung fungiert. Da sich das Druckelement nur über eine Verspannung in der Membranfläche stabilisieren sollte, konnte die gewünschte Verdrehbarkeit im fertigen Zustand erhalten bleiben. Für den Einbauzustand lieferte der korrigierte Anschluss die entsprechende Stabilität um ein Verrutschen des Anschlusselements zu verhindern. Bild 6-42 zeigt das verbaute Druckelementende.



6-43 Fertiger Demonstrator

Anschließend ließ sich das Druckelement mit Hilfe des Vorspannmechanismus auf die gewünschte Länge bringen, um den berechneten Vorspannzustand zu realisieren (siehe Bild 6-43). Dabei wurden zwei weitere Probleme identifiziert. Durch die passgenaue Geometrie zwischen Anschlusselement und Kegelstumpf traten beim Vorspannen Reibungskräfte zwischen diesen Elementen auf, so dass nur mit Hilfe eines graphitbasierten Schmiermittels und der unterstützenden Festhaltung der Anschlusselemente der Vorspannvorgang durchgeführt werden konnte. Für eine weitere Anwendung wird daher empfohlen, den Vorspannmechanismus des Druckelements so abzuändern, dass keine Verdrehung der Druckelementenden aus der Verlängerung resultiert. Außerdem konnte beobachtet werden, dass im Druckelement eine leichte Durchbiegung beim Vorspannen auftritt. Das ist auf die Ausgestaltung des Vorspannmechanismus zurückzuführen. Abweichend von der Konzeption des Vorspannmechanismus wurde bei der Fertigung eine verhältnismäßig dünne Gewindestange verwendet. Generell ist die Art der Ausbildung mit einem eingesetzten Gewindestab immer als Querschnittsschwächung zu verstehen. Es sollte daher im Rahmen einer weiteren Anwendung darüber nachgedacht werden, den Mechanismus ohne Querschnittsschwächung zu gestalten.

Erkenntnisse aus der Umsetzung des Demonstrators

Insgesamt kann die Realisierung des Demonstrators als erfolgreich bezeichnet werden. Es hat sich gezeigt, dass die entwickelten konstruktiven Lösungen grundsätzlich funktional und umsetzbar sind. Allerdings konnten auch einige Probleme identifiziert werden, die allerdings im Rahmen der Umsetzung größtenteils behoben wurden. Während der Realisierung musste beispielsweise das Druckelementende überarbeitet werden, um

einen stabilen Einbau zu ermöglichen, weiterhin hat sich gezeigt, dass der Vorspannmechanismus überarbeitet werden sollte, um eine Verdrillung des Druckelementes während des Vorspannens zu vermeiden. Die Weiterentwicklung des Vorspannmechanismus kann gleichzeitig genutzt werden, um die vorhandene Querschnittsschwächung zu umgehen. Auch hat sich gezeigt, dass die Ermittlung der Zuschnittslinien an der komplexen Demonstrator-Geometrie fehleranfällig ist. Der bei der Projektion entstandene Zuschnittsfehler konnte jedoch konstruktiv ausgeglichen werden. Die größte Problematik entstand durch das verwendete Fügeverfahren. Insbesondere den optischen Ansprüchen konnte nicht vollständig Genüge getan werden, da bereits kleine Ungenauigkeiten bei dem handwerklichen Schweißvorgang visuellen Beeinträchtigungen der Nähte verursachten. Ebenfalls führte die Kleinteiligkeit des Interaktionsbereichs in Verbindung mit dem gewählten Warmgasschweißverfahren zu oberflächlichen Verbrennungen und zu einem Anschmelzen der textilen Membran, beziehungsweise der Beschichtung, da vor allem die Zugänglichkeit mit den vorhandenen Werkzeugen relativ schwierig war. Die Beschädigungen können prinzipiell neben optischen Einschränkungen auch ungünstige Einflüsse auf die Tragfähigkeit der textilen Membran bedingen. Dieser Fall ist bei dem Bau des Demonstrators allerdings nicht eingetreten.

7 Bewertung der konstruktiven Umsetzung

7 Bewertung der konstruktiven Umsetzung

Der Bau des Demonstrators wird grundlegend als Erfolg bezeichnet. Zum einen wurden beispielhafte konstruktive Detaillösungen erarbeitet, die aufgrund der detaillierten Planung und der baulichen Umsetzung entsprechende Rückschlüsse auf ihre Funktionalität und ihre Anwendbarkeit zulassen, zum anderen kann die FEM-Berechnung des Demonstrators als wertvoller Erkenntnisgewinn für die generelle numerische Analyse von Tensegrity-Membran-Struktur betrachtet werden. Nachfolgend werden die in Kapitel 6 gewonnenen Erkenntnisse, in Bezug auf die vorgenommene Realisierung, zusammengefasst und anhand der gebauten Struktur diskutiert und bewertet. Ebenfalls werden in diesem Kapitel für bereits identifizierte Probleme weiterentwickelte konstruktive Lösungsansätze vorgestellt und erörtert. Ein Verformungsvergleich der gebauten Geometrie im Vorspannzustand, mit dem numerischen Modell, erlaubt Rückschlüsse über die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der FEM-basierten Modellierung in Sofistik, und bildet den Abschluss dieses Kapitels

7.1 Bewertung der baulichen Realisierung des Demonstrators

Der Realisierung des Demonstrators gliedert sich in drei wesentliche Bereiche, die Konzeptentwicklung (siehe Abschnitt 6.2), die digitale Planung einschließlich der FEM-Berechnung (siehe Abschnitt 6.3) und die konstruktive Umsetzung (siehe Abschnitt 6.4). Die einzelnen Erkenntnisse die innerhalb des Realisierungsprozesses gewonnen werden konnten, wurden bereits in den benannten Abschnitten ausführlich präsentiert, nachfolgend werden die Aspekte zusammengefasst dargestellt.

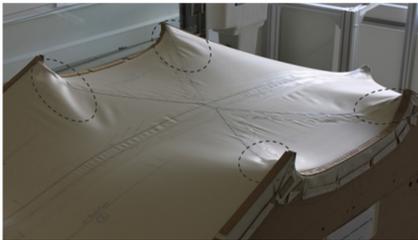
Anhand einer durchgeführten Sichtprüfung des Demonstrators konnte das zu erwartende qualitative Tragverhalten der Struktur (siehe Abschnitt 4.2.2) grundlegend bestätigt werden. Ebenso hat sich die angenommene, visuell deutlich ausgeprägte Interaktion der konstruktiven Elemente im Anschlussbereich, wie erwartet eingestellt. Es konnte ein ausgeglichener und stabiler Gleichgewichtszustand berechnet und realisiert werden, bei dem sich ebenfalls der erwartete, in der Hyparfläche I ungleichmäßige, zweiachsige Spannungszustand einstellte. In Bild 7-1 ist eine Detailansicht der Hyparfläche I abgebildet. Zur besseren Darstellung wurde ein Stahllineal auf die Membranfläche, in Richtung der minimal ausgebildeten Krümmung, gelegt. Dabei zeigt sich, dass die Membranfläche das Stahllineal mittig berührt und an den Endpunkten einen vertikalen Abstand von etwa 2 cm aufweist und der zweiachsige Lastabtrag somit realisiert werden konnte. Die Ungleichmäßigkeit des Lastabtrags in der Hyparfläche I wurde bisher nicht als Problem wahrgenommen und wird auch folgend nicht als Problem der baulichen Umsetzung zugeordnet, da die Ungleichmäßigkeit bereits im Verlauf der Variantenstudie erkannt und aufgezeigt wurde (siehe Abschnitt 5.4.3.4).



7-1 Detailansicht der Hyparfläche I am fertigen Demonstrator

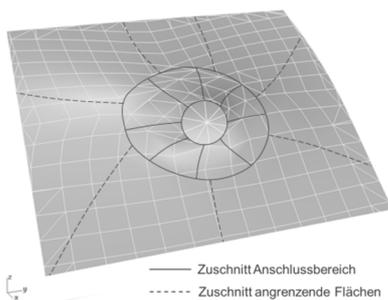
Die Wahl eines Membranmaterials, welches deutliche Unterschiede in den Steifigkeiten der Geweberichtungen aufweist, kann unter Umständen das zweiachsige Tragverhalten in dem benannten Bereich verbessern, es wird allerdings vermutet, dass vor allem die geometrische Ausprägung der Struktur für das ungleichmäßige Tragverhalten verantwortlich ist (siehe Abschnitt 5.4.4.2). Bei einer Realisierung eines Prototyps der gesamten Struktur sollte daher der generelle strukturelle Aufbau der Konstruktion diskutiert werden.

Die punktförmige Kraftübertragung zwischen dem Druckelementende und der textilen Membran bedingt bei der numerischen Berechnung eine Modellierung mit einem sehr hohen Detaillierungsgrad. Diese Erkenntnis ist von Bedeutung, da erst mit der detailgetreuen Abbildung des Anschlusses eine stabile Berechnung durchgeführt werden konnte. Es wird angenommen, dass die numerische Modellierung von Tensegrity-Membran-Strukturen einen hohen Detaillierungsgrad voraussetzt, um aussagekräftige Berechnungsergebnisse zu erzeugen.



7-2 Faltenbildung im den oberen Randbereich des Demonstrators

Die Sichtprüfung des Demonstrators zeigte weiter eine Welligkeit der textilen Membran in den oberen Anschlussbereichen an die Randkonstruktion. (siehe Bild 7-2). Diese Welligkeit ist auf die fehlerhafte Projektion der Zuschnittslinien im Berechnungsprozess zurückzuführen (siehe Abschnitt 6.4.2), welche infolge der komplexen Geometrie der Membranfläche entstanden ist. Zwar erfolgte im Verlauf der konstruktiven Umsetzung ein Ausgleich des Fehlers durch eine Kürzung der Randkonstruktion, dennoch ist deutlich ersichtlich, dass diese den Zuschnittsfehler nicht vollumfänglich kompensieren konnte. Aus diesem Grund wird für eine weitere Umsetzung empfohlen die Zuschnittsberechnung einer ähnlich komplexen Struktur an Teilstücken durchzuführen. Dadurch sollte die Projektion der Zuschnittslinien sicher vorgenommen werden können, ohne überlappende Bereiche mehrfach zu durchschneiden.



7-3 Darstellung einer möglichen Zuschnittsdefinition zur Verbesserung der Fertigungsbedingungen am Anschlussbereich

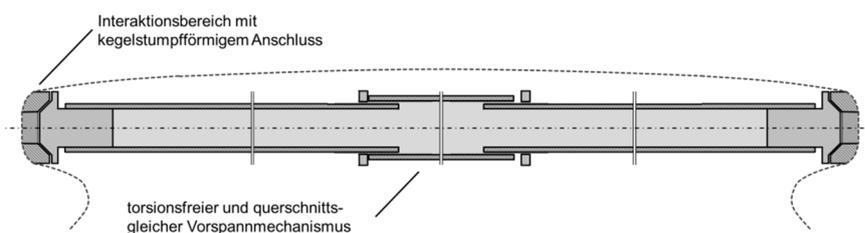
Eine bereichsweise Unterteilung des Zuschnitts der Membranfläche kann sich ebenfalls positiv auf die Herstellung des Interaktionsbereichs auswirken, da dieser von der Gesamtfläche unabhängig hergestellt werden könnte, was wiederum eine bessere Handhabung ermöglicht. In Bild 7-3 ist eine Variante einer möglichen unterteilten Zuschnittsdefinition dargestellt, der kreisförmige Bereich um den Druckelementanschluss könnte unabhängig von der Hauptfläche gefertigt und anschließend mit dieser verbunden werden.

Grundlegend hat sich bei der Begutachtung der Schweißnähte gezeigt, dass vollflächig verschweißte Nahtbereiche entstanden sind. Damit kann eine kraftschlüssige Verbindung sichergestellt werden. Es ist allerdings aufgefallen, dass in einigen Bereichen Stellen erkennbar sind, die sich ungünstig auf das Erscheinungsbild auswirken. Dabei handelt es sich in der Hauptsache um oberflächliche Verbrennungen und Verrußungen auf der Membranfläche, beziehungsweise auf den Schweißnähten (siehe Abschnitt 6.4.2). Das kann maßgeblich auf die mangelnde handwerkliche Erfahrung im Membranbau und auf die nicht ausreichende Routine im

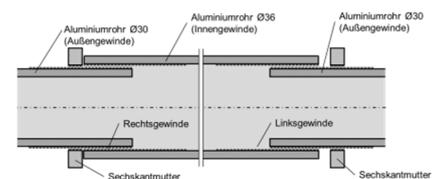
Umgang mit dem gewählten Schweißverfahren zurückgeführt werden. Daher wird empfohlen, einen professionellen Membranhersteller für die Umsetzungen weiterer Projekte hinzuzuziehen.

Die zunächst angedachte Einbauvariante des Druckelements mittels kugelförmigen Gelenkanschluss konnte aufgrund instabiler Bauzustände nicht erfolgreich durchgeführt werden. Diese Problematik wurde bereits in dem Abschnitt der konstruktiven Umsetzung (siehe Abschnitt 6.4.2) aufgezeigt und durch die Anpassung als kegelstumpfförmiger Anschluss behoben werden.

Ebenfalls hat sich beim Einbau des Druckelements gezeigt, dass der konstruierte Mechanismus zum Einbringen der Vorspannung in Systemlängsrichtung, zwei wesentliche Probleme verursacht. Aufgrund der Querschnittsschwächung, infolge der mittig angeordneten dünnen Gewindestange, ist eine nicht erwartete Durchbiegung aufgetreten. Zudem hat die konstruktive Ausgestaltung des Mechanismus zu einer gegenseitigen Torsion des Druckelements geführt, wodurch die an den Enden befestigten kegelstumpfförmigen Anschlussbauteile während des Einbaus die Anschlusselemente und damit die textile Membran verdreht haben (siehe Abschnitt 6.4.2). Bei einer weiteren Anwendung des konstruierten Mechanismus wird daher angedacht, den eigentlichen Vorspannmechanismus durch ein Rohrelement mit beidseitigem Innengewinde auszuführen (siehe Bild 7-4a). Das Innengewinde sollte dabei auf der einen Seite als Rechts- und auf der anderen Seite als Linksgewinde ausgeführt werden (siehe Bild 7-4b). Die beiden verbleibenden Druckelementrohre sind mit einem passenden Außengewinde zu versehen, sodass eine Verlängerung oder Verkürzung des Druckelements durch eine Verdrehung des mittigen Rohrs erfolgen kann. Durch den weiterentwickelten Vorspannmechanismus lässt sich ebenfalls das Problem der Querschnittsschwächung umgehen.



7-4a Visualisierung des Druckelementes mit einem torsionsfreien und querschnittsgleichen Vorspannmechanismus im Schnitt



7-4b Detaillierte Darstellung des torsionsfreien und querschnittsgleichen Vorspannmechanismus im Schnitt

7.2 Verformungsvergleich der berechneten und der gebauten Struktur

Der Ergebnisvergleich des Aufmaßes der gebauten Geometrie im Vorspannzustand, mit der entsprechenden numerisch berechneten Verformungsfigur, erlaubt Rückschlüsse über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der FEM-Modellierung und Berechnung. Hierfür wurde das FE-Modell auf die abgeänderte, in Systemmitte um 60 mm verkürzte Struktur des Demonstrators angepasst (siehe Abschnitt 6.3.4). Aus dem neu berechneten FE-Modell konnte die Verformungsfigur der Membranfläche im Vorspannzustand in das CAD-Programm Rhinoceros überführt werden um diese mit den Messergebnissen zu überlagern.

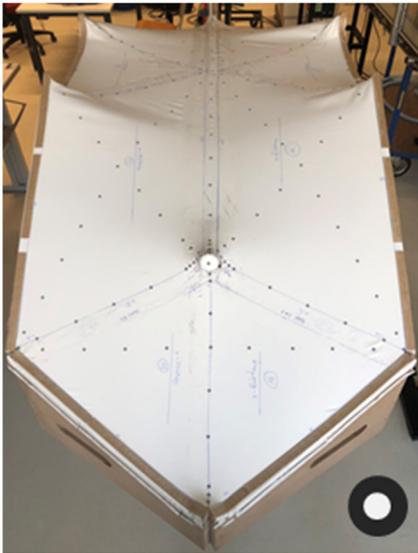


Bild 7-5: Vorbereitung des Demonstrators zum Aufmaß durch Aufkleben von Zielmarken, Vergrößerte Darstellung einer Zielmarke (rechts unten)

Das Aufmaß des Demonstrator, beziehungsweise der Membranfläche, erfolgte mit einem Tachymeter Leica FlexLine TS02. Dazu wurden über 200 Zielmarken auf der Membranfläche befestigt und in ihrer räumlichen Lage aufgenommen. In kritischen Bereichen, wie beispielsweise dem Interaktionsbereich der Membran und des Druckelements, wurden die Zielmarken mit einer erhöhten Dichte angebracht. Innerhalb der Flächen erfolgte die Anbringung der Zielmarken gleichmäßig an den zu erwarteten Hauptspannungslinien, um eine möglichst präzise Aussage über das Tragverhalten zu erlangen [Knippers, 2010, S.134ff.]. Bild 7-5 gibt einen Überblick der befestigten Zielmarken auf der Membranfläche.

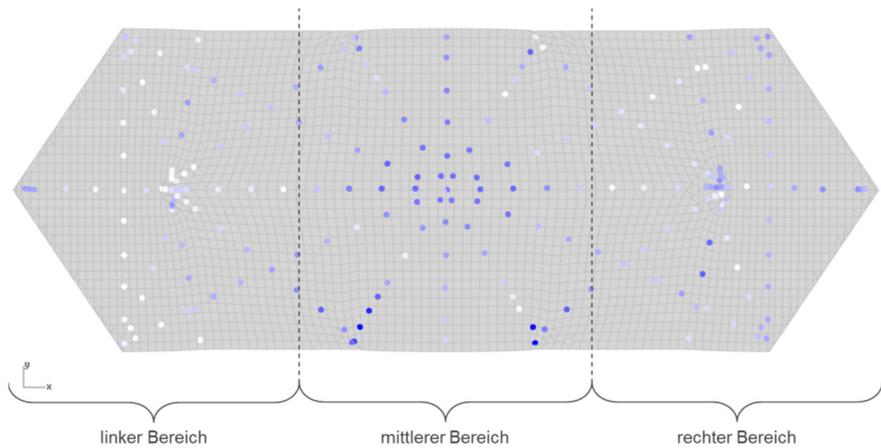
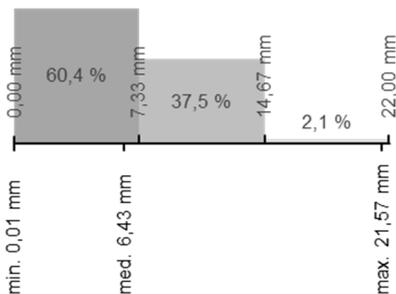
Die aufgenommenen Messpunkte wurden im Anschluss ebenfalls in das CAD-Programm Rhinoceros überführt. Für die Aufbereitung der Daten und die Visualisierung des Geometrievergleichs der Membranfläche aus dem FE-Modell und den mittels Tachymeter aufgemessenen Punkten, wurde ein Skript in dem Programm Grasshopper geschrieben [Zywietz, 2018]. Um eine konkrete Aussage über den Vergleich zwischen der berechneten und der vermessenen Geometrie treffen zu können, wurde der realisierte Vorspannungszustand untersucht. Darüber hinaus wurde noch ein zweiter Systemzustand berechnet und aufgemessen, wofür das Druckelement um 10 mm (auf 1,71 m) verkürzt wurde. Eine entsprechende Verkürzung des Druckelements wurde gewählt, da diese am Demonstrator aufgrund des Reibungswiderstandes einfacher umzusetzen war als eine entsprechende Verlängerung (siehe Abschnitt 6.4.2). Da der zweite Zustand lediglich zum Abgleich der Berechnungsergebnisse dient, ist eine Verkürzung ebenso brauchbar wie eine Verlängerung. In der FE-Berechnung wurde für die Verkürzung des Druckelements eine negative Dehnung als zusätzlicher Lastfall definiert, der auf den Lastfall Vorspannung aufgesetzt wurde.

Die Überführung der Berechnungs- und Messdaten in die CAD-Software Rhinoceros und das zur Auswertung angeschlossene Grasshopper-Skript erlaubten eine gute Visualisierung des quantitativen Ergebnisvergleichs. Die visualisierten Ergebnisvergleiche der zwei untersuchten Spannungszustände sind in Bild 7-6a und Bild 7-7a nachfolgend dargestellt. Die berechnete Membranfläche ist jeweils als hellgraue Fläche dargestellt, die dunkelgrauen Linien auf der Fläche bilden das FE-Netz ab. Die auf-

genommenen Messpunkte sind als Kreise auf der Fläche abgebildet, die dargestellte Farbe variiert dabei in Abhängigkeit von der Größe der Abweichung der Messwerte (gemessene Höhendifferenz zwischen Messung und FE-Modell) zwischen Weiß und Dunkelblau. Um eine gute Vergleichbarkeit sicher zu stellen, wurden bei beiden dargestellten Spannungszuständen (Zustand 1: 1,72 m Druckelementlänge und Zustand 2: 1,71 m Druckelementlänge) eine identische Farbskala mit weiß gleich 0,00 mm, und Dunkelblau gleich 22,0 mm Abweichung definiert.

Ergebnisvergleich erster Spannungszustand (1,72 m)

Für den Ergebnisvergleich des realisierten Spannungszustands (siehe Bild 7-6a) mit einer Druckelementlänge von 1,72 m wurden auf der Membranfläche des gebauten Demonstrators die angebrachten Messpunkte aufgenommen. Ein Vergleich dieser Punkte mit der numerisch berechneten Fläche liefert eine durchschnittliche Abweichung der Messpunkte von 6,43 mm gegenüber der berechneten Fläche. Dabei liegen ein Minimalwert von 0,01 mm und ein Maximalwert von 21,57 mm vor (siehe Bild 7-6b). Die Abweichungen verteilen sich dabei allerdings nicht gleichmäßig innerhalb des beschriebenen Wertebereichs. Abweichungen von über 14,67 mm (oberes Drittel) sind lediglich an 2,1 % der Messpunkte zu identifizieren. Diese hohen Abweichungen befinden sich am unteren Rand des mittleren Bereichs (stark dunkelblau eingefärbt). Die vergleichsweise großen Abweichungen lassen sich mit der bereits aufgezeigten fehlerhaften Zuschnittsberechnung, und der daraus resultierenden Faltenbildung begründen (siehe Abschnitt 7.1). Generell weisen der linke und der rechte Bereich des Demonstrators geringere Abweichungen gegenüber dem mittleren Bereich auf. Es wird vermutet, dass die vergleichsweise höheren Abweichungen im mittleren Bereich auf die Ungenauigkeiten im Zuschnitt zurückzuführen sind. Abweichungen von unter 7,33 mm (unteres Drittel) sind an 60,4 % der Messpunkte zu identifizieren, womit eine relativ geringe Differenz zwischen den berechneten und den gemessenen Werten vorliegt, was den Rückschluss auf eine grundlegend zuverlässige und genaue FE-Berechnung erlaubt. Der Anschluss zwischen Druckelement und textiler Membran im linken Bereich weist die bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung auf. Die Abweichungen am Anschluss im rechten Bereich sind zwar ebenfalls als gut zu bewerten, liegen aber wertemäßig über dem anderen Bereich. Dieser Sachverhalt kann durch die Fertigungsreihenfolge begründet werden, da bei dem Herstellen des Anschlusses im linken Bereich bereits die Erkenntnisse aus der Fertigstellung des anderen Anschlusses berücksichtigt werden konnten.

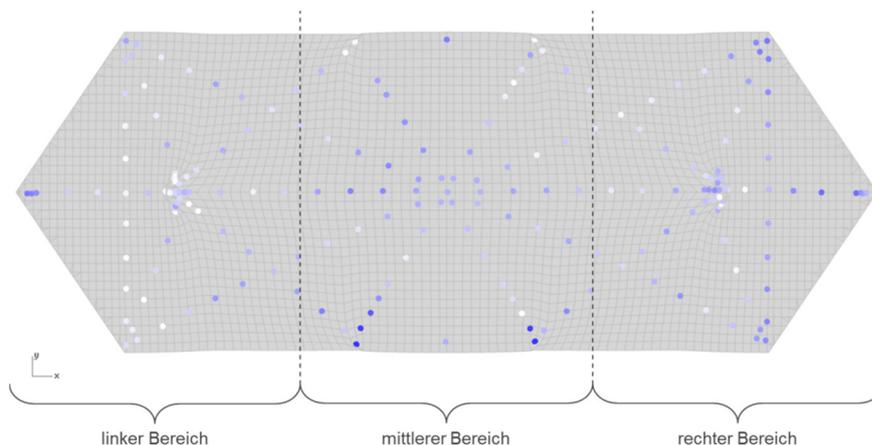


7-6b Darstellung der Verteilung der berechneten Abweichung und der Extremwerte des realisierten Vorspannungszustands

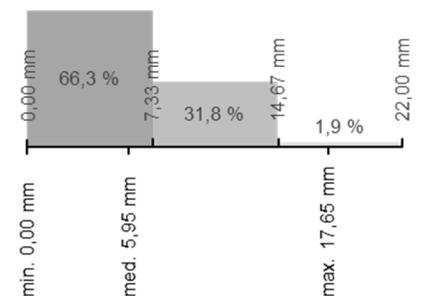
7-6a Visualisierung des Ergebnisvergleichs von berechneter Membranfläche (hellgrau) und Aufmaß der gebauten Struktur (farbige Punkte) im realisierten Vorspannungszustand

Ergebnisvergleich zweiter Spannungszustand (1,71 m)

Für den Ergebnisvergleich des zweiten Spannungszustands (siehe Bild 7-7) mit einer Druckelementlänge von 1,71 m wurden auf der Membranfläche des gebauten Demonstrators ebenfalls die angebrachten Messpunkte aufgenommen. Ein Vergleich dieser Punkte mit der numerisch berechneten Fläche liefert eine durchschnittliche Abweichung der Messpunkte von 5,95 mm gegenüber der berechneten Fläche. Dieser Wert weist damit eine sehr ähnliche Größenordnung wie beim anderen Spannungszustand auf. Dabei liegen ein Minimalwert von 0,00 mm und ein Maximalwert von 17,65 mm vor (siehe Bild 7-7b). Die Abweichungen verteilen sich dabei auch nicht gleichmäßig innerhalb des beschriebenen Wertebereichs. Abweichungen von über 14,67 mm (oberes Drittel) sind lediglich an 1,9 % der Messpunkte zu identifizieren, wobei diese Punkte an den identischen Stellen zu verorten sind, dem unteren Rand des mittleren Bereichs (stark dunkelblau eingefärbt) und sich daher ebenfalls durch die fehlerhafte Zuschnittsberechnung erklären lassen. Generell weist in diesem Spannungszustand wiederum der mittlere Bereich des Demonstrators die höchsten Abweichungen auf, wobei vermutet wird, dass die vergleichsweise höheren Abweichungen ebenfalls auf die Ungenauigkeiten im Zuschnitt zurückzuführen sind. Abweichungen von unter 7,33 mm (unteres Drittel) sind an 66,3 % der Messpunkte zu identifizieren, womit eine relativ geringe Differenz zwischen den berechneten und den gemessenen Werten vorliegt, was ebenso Rückschluss auf eine grundlegend zuverlässige und genaue FE-Berechnung erlaubt. Der linke Interaktionsbereich weist auch in diesem Zustand die bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung auf als der rechte Interaktionsbereich. Da beide Zustände diese Beobachtung bestätigen, ist die vorerst angebrachte Erklärung durchaus plausibel.



7-7a Visualisierung des Ergebnisvergleichs von berechneter Membranfläche (hellgrau) und Aufmaß der gebauten Struktur (farbige Punkte) im zweiten Spannungszustand



7-7b Darstellung der Verteilung der berechneten Abweichung und der Extremwerte des zweiten Spannungszustands

Erkenntnisse des Verformungsvergleichs

Der Ergebnisvergleich der beiden Vorspannzustände zeigt eine gute Übereinstimmung des gebauten Demonstrators und der numerischen Berechnungen. Diese können somit als aussagekräftig und genau bezeichnet werden. Größere Abweichungen zwischen Messung und Berechnung ($> 14,67$ mm) treten in beiden Zuständen ausschließlich in den Randbereichen und somit nur im Anschlussbereich der Membran und der Randkonstruktion, auf. Es ist an dieser Stelle nochmal anzumerken, dass in den der Mitte der Randkonstruktion die fehlerhafte Zuschnittsberechnung korrigiert wurde, was die größeren Abweichungen durchaus erklärt. In den linken und dem rechten Bereich zeigen beide Vergleiche übereinstimmend geringe Abweichungen zwischen dem Aufmaß und der FEM-Berechnung. Die aufwendige Herangehensweise zur FEM-basierten Berechnung der Tensegrity-Membran-Struktur kann somit als erfolgreich bezeichnet werden. Insbesondere die guten Übereinstimmungen in den Interaktionsbereichen sind für die angestrebten Untersuchungen als sehr positiv zu bewerten, da dieser lokale Bereich im Fokus der realisierten konstruktiven Umsetzung des Demonstrators stand.

8 Schluss

8 Schluss

In der vorliegenden Arbeit wurde das Tensegrity-Prinzip und die, diesem Prinzip zugeordneten Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen detailliert studiert, sowie die anwendungsorientierte Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen an einer beispielhaften Referenzstruktur untersucht. Ebenfalls wurden die, mit der Umsetzung verbundenen planerischen und konstruktiven Herausforderungen ausgearbeitet, um darauf aufbauend entsprechende baupraktische Lösungsansätze zu entwickeln und diese auf Basis der durchgeführten anwendungsorientierten Realisierung zu bewerten.

Anhand einer umfangreichen Literaturstudie über Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen (siehe Kapitel 2 und 3) wurden deren Entwicklungen, sowie Eigenschaften und Charakteristika herausgearbeitet. Es hat sich gezeigt, dass sowohl die Tensegrity-, als auch die Tensegrity-Membran-Strukturen durch das besondere Merkmal der Auflösung der Druck- und Zugkräfte, verbunden mit einer vorliegenden Diskontinuität der Druckelemente und einer daraus entstehenden Notwendigkeit eines übergeordneten, die Gesamtstruktur stabilisierenden Zugsystems, definiert werden können. Darauf aufbauend wurden zehn Kriterien für die Tensegrity-Strukturen, beziehungsweise elf Kriterien für die Tensegrity-Membran-Strukturen aufgestellt, an derer die vorgestellten gebauten Projekte in den Kontext des Tensegrity-Prinzips eingeordnet wurden. Es ist anzumerken, dass die aus der Literatur recherchierten Definitionen maßgeblich die strukturellen Eigenschaften der Konstruktionen und deren Systemaufbau beschreiben und sich nur in sehr geringem Umfang mit der ebenso bedeutenden Erscheinung der Strukturen auseinandersetzen. In der vorliegenden Arbeit erfolgte aus diesem Grund eine gezielte Definition struktureller sowie gestaltgebender Kriterien. Bei den untersuchten gebauten Tensegrity-Strukturen hat sich herausgestellt, dass alle Projekte in ihrem Systemaufbau, abweichend von dem zugrunde liegenden theoretischen Prinzip, baulich verändert wurden. Dies diente dazu, um die Tragfähigkeit der Strukturen, beispielsweise in Form einer Steifigkeitserhöhung durch zusätzlich eingebaute Seilelemente, zu verbessern. Insgesamt konnten, trotz der baupraktischen Veränderungen, sechs von sieben untersuchten Projekten als Tensegrity-Strukturen klassifiziert werden. Die Tensegrity-Membran-Strukturen unterscheiden sich in der Hauptsache durch die direkte Interaktion der vorliegenden Druckelemente mit einer Zugfläche von den Tensegrity-Strukturen, die lediglich über lineare Zugelemente verfügen. Aus diesem Grund wurde die Einordnung der Tensegrity-Membran-Strukturen um ein elftes Kriterium erweitert. Die Untersuchung realisierter Tensegrity-Membran-Strukturen hat ebenfalls aufgezeigt, dass bauliche Veränderungen der Systemkonfiguration, abweichend von der Theorie des Tensegrity-Prinzips, für eine Realisierung erforderlich sind. Entsprechend konnten auch hier sieben von neun Projekten als Tensegrity-Membran-Struktur klassifiziert werden. Anhand der vorgenommenen Untersuchung konnte darüber hinaus aufgezeigt werden, dass die Tensegrity-Membran-Strukturen das strukturelle, sowie das

funktionale Spektrum des Tensegrity-Prinzips erweitern und daher als Weiterentwicklung der Tensegrity-Strukturen verstanden werden können.

Ebenfalls konnten anhand der literaturgestützten Projektrecherche gebauter Tensegrity-Membran-Strukturen erste Erkenntnisse über deren konstruktive Umsetzung und deren numerische Analyse gewonnen werden. In Bezug auf die konstruktive Umsetzung hat sich im Wesentlichen herausgestellt, dass diese Strukturen entweder unter Verwendung sehr weicher und dehnfähiger Membrane realisiert wurden, was keine detaillierte Ausgestaltung der Interaktionsbereiche zwischen Druckelementen und Membran erforderte und damit einer langlebigen Stabilität entgegen wirkte. Oder es wurden verhältnismäßig steife Membrane eingesetzt. Bei einer baulichen Umsetzung mit steifen Membranen erfolgte die Ausbildung der Anschlussdetails durch eine Auflösung der Membranfläche in Seilelemente. Die aufgezeigte Ausbildung stellt zwar eine notwendige Steifigkeit für eine langfristige Anwendung sicher, bietet aber durch die Flächenauflösung keinen vollständigen Schutz vor äußeren Einflüssen. Außerdem bedingt diese Lösung gestalterische Einschränkungen. In Hinblick auf die numerischen Analysen von Tensegrity-Membran-Strukturen hat sich bei den vorgenommenen Projektrecherchen herausgestellt, dass eine baustatische Analyse des Tragverhaltens bisher nicht hinreichend genau abgebildet werden konnte.

Für die weitere Bearbeitung wurde der Pavillon MOOM als Referenzprojekt gewählt und einer qualitativen Analyse des Tragverhaltens unterzogen (siehe Kapitel 4). Die Untersuchungen haben insbesondere aufgezeigt, dass die Membranfläche durch zwei, sich wiederholender Hyparflächen beschrieben werden kann und damit entsprechende prinzipielle Rückschlüsse auf das Tragverhalten erlauben. Darauf aufbauend wurde eine Referenzstruktur definiert, an der die geometrischen Parameter Druckelementlänge, Übergreifungslängenfaktor benachbarter Druckelemente und der Druckelementreihenabstand identifiziert und in einer prinzipiellen Parameterstudie jeweils einzeln auf ihre Auswirkungen auf den Formfindungszustand der Membranfläche untersucht wurden (siehe Kapitel 5). Dabei hat sich gezeigt, dass ein Teilbereich der Membranfläche bei den Parameteränderungen durchaus ungünstigere Ergebnisse in Bezug auf das Tragverhalten aufweist als die restliche Fläche. Außerdem wurde festgestellt, dass die einzelnen Parameter teilweise gegenseitige Auswirkungen auf die Struktur verursachen. Als Grundlage für die geplante konstruktive Umsetzung einer Tensegrity-Membran-Struktur wurde eine Multiparameteroptimierung, auf Basis der Parameterstudie, im Allgemeinen als Variantenstudie bezeichnet, durchgeführt. Durch die Variantenstudie wurde eine Systemkonfiguration eines untersuchungsrelevanten Ausschnitts der Referenzstruktur ermittelt, die eine günstige geometrische Ausprägung für das zweiachsige Tragverhalten der textilen Membran darstellt. Aufgrund der verwendeten parametrischen Entwurfswerkzeuge erfolgte der Formfindungsprozess in der Parameter- und der Variantenstudie nur mit ausgewählten Verhältniswerten, um die Materialien und die Vorspannung abzubilden. Deshalb wurde im weiteren Verlauf eine FEM-

basierte Berechnung der Struktur durchgeführt, da die Genauigkeit der Ergebnisse der Parameter- und Variantenstudie nicht für eine Realisierung ausreichte.

Den Abschluss der vorliegenden Arbeit bildet die beispielhafte konstruktive Umsetzung eines Ausschnitts der Referenzstruktur (siehe Kapitel 6), dem sogenannten Demonstrator und ein Ergebnisvergleich des gebauten Struktur sowie der zugehörigen detaillierten numerischen Analyse (siehe Kapitel 7). Der Fokus der baulichen Umsetzung lag in der konstruktiven Ausgestaltung des Interaktionsbereichs zwischen dem Druckelement und der textilen Membran. Daher wurde als Demonstrator-Ausschnitt ein einzelnes, von den entsprechenden Membranflächen umfasstes, Druckelement ausgewählt. Bereits bei der Planung der konstruktiven Umsetzung hat sich gezeigt, dass die Wahl des Ausschnitts als sinnvoll bewertet werden konnte, da viele numerische Probleme so reduziert betrachtet und erfolgreich gelöst werden konnten. Bei der anschließenden baulichen Umsetzung hat sich im Wesentlichen bestätigt, dass das grundlegende Konzept und die darauf aufbauend detailliert geplanten Lösungen umgesetzt werden konnten. Insbesondere die konstruierte Anschlussausbildung zwischen Druckelement und der textilen Membran konnte durch die, im Verlauf der Realisierung verbesserte konstruktive Detaillösung und die, ebenfalls im FEM-Programm vorgenommene Zuschnittsberechnung der textilen Membran realisiert werden. Allerdings verursachte die handwerkliche Fertigung der Struktur auch gewisse Schwierigkeiten, welche das optische Ergebnis ungünstig beeinflussten. Für eine weitere Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen wird daher angeraten, einen professionellen Membranhersteller hinzuzuziehen. Mit dem anschließenden Ergebnisvergleich zwischen der aufgemessenen Struktur und der numerisch berechneten Verformungsfigur, konnte die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der numerischen Analyse bestätigt werden. Damit können die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die konstruktive Umsetzung von Tensegrity-Membran-Strukturen als Grundlage für die weitere Entwicklung und die Etablierung des Tensegrity-Prinzips im Bauwesen dienen.

Ausblick

Basierend auf der exemplarisch aufgezeigten konstruktiven Umsetzung des Demonstrators sind verschiedene Anwendungsmöglichkeiten von Tensegrity-Membran-Strukturen im Bauwesen denkbar. Insbesondere als Dachtragwerke, sowohl im kleinen Maßstab wie beispielsweise als Überdachung eines U-Bahn-Eingangs, als auch im großen Maßstab, wie unter anderem als Stadionüberdachung, stellen diese Strukturen vorteilhafte Tragsysteme dar. Ein maßgeblich struktureller Vorteil ist dabei, dass die Strukturen durch die vorherrschende Kraftumlenkung im Systeminneren nur wenige Auflagerpunkte benötigen. Gleichzeitig weisen Sie eine hohe Leichtigkeit auf und können große Flächen überspannen. Als wichtigster gestalterischer Vorteil kann die große Formenvielfalt der Strukturen genannt werden.

Die Formenvielfalt der Tensegrity-Membran-Strukturen kann als bedeutender und untersuchungsrelevanter Anknüpfungspunkt dieser Arbeit angesehen werden. Im Verlauf der durchgeführten Studien wurde entschieden, am Beispiel der gewählten Referenzstruktur die konstruktive Umsetzung der Tensegrity-Membran-Strukturen detailliert zu untersuchen. Daher wurde das, an den recherchierten Projekten aufgezeigte gestalterische Potential nicht weiter analysiert. Beispielsweise die Einbindung unterschiedlich langer, beziehungsweise unterschiedlich ausgerichteter Druckelemente könnte die Formenvielfalt der Strukturen deutlich erweitern.

Ebenfalls mit der potentiellen Formenvielfalt der Strukturen verbunden, ist die Art und Weise der Verbindung von Druckelementen und textiler Membran. In dieser Arbeit wurde, aufgrund der strukturellen Reinheit des Tensegrity-Prinzips, lediglich eine normalkraftbasierte Kraftübertragung an den Druckelementenden untersucht. Da allerdings auch andere strukturelle Veränderungen im Kontext des baupraktisch umgesetzten Prinzips aufgetaucht sind, kann eine lineare Verbindung von Druckelement und textiler Membran, insbesondere in Hinsicht auf die Erweiterung möglicher Formen diskutiert werden. Insofern könnte eine Gegenüberstellung struktureller Nachteile und gestalterischer Vorteile den Anfang entsprechender Studien darstellen.

Einen weiteren Anknüpfungspunkt an die vorliegende Arbeit bietet die Verwendung neuer technisch weiterentwickelter textiler Membrane, durch welche beispielsweise die tragwerkstechnische Eigenschaften verbessert und fertigungstechnische Abläufe ausgebaut werden könnten.

9 Literaturverzeichnis

9 Literaturverzeichnis

Alpermann, H.: Membranversteifte Tragwerke. Dissertation, Universität der Künste, Berlin, 2014.

Altenbach, H.; Altenbach, J.; Naumenko, K.: Ebene Flächentragwerke. Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten. Springer Vieweg, 2. Aufl., 2016.

Amaro Goncalves, N.: Untersuchung und FE-Implementierung des biaxialen Spannungs-Dehnungsverhaltens einer PES/PVC Membran, Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht).

Bansod, Y. D.; Nandanwar, D.; Bursa, J.: Overview of Tensegrity – I: Basic Structures. In: Engineering Mechanics, Vol. 21, No. 5, 2014. S. 355-367

Beccarelli, P.: Biaxial Testing for Fabrics and Foils. Springer International Publishing, Cham, 2015.

Beck, H.; Cooper, J.: Kurilpa Bridge. The Images Publishing Group Pty Ltd, 2012.

Blum, R.: Material Properties of Coated Fabrics for Textile Architecture. Mollaert, M. (Hrsg.): The Design of membrane and lightweight structures. VUB-Press, Brüssel, 2002. S. 63-88

Bögle, A.; Kühnast, S.: Klein und experimentell. In: DBZ Deutsche Bauzeitschrift, 7/2014. S. 20-21

Brayer, M.-A.: David Georges Emmerich (1925-1996). In: Brayer, M.-A.: Architectures expérimentales 1950 - 2012, Collection du FRAC Centre, HYX, 2013. S. 236-243

Bridgens, B. N.; Gosling, P. D.; Birchall, M. J. S.: Membrane material behavior: concepts, practice & developments. In: The Structural Engineer 20, Juli 2004. S. 28-33

Burkhardt, R. W. Jr.: Definition and Classification of Tensegrities, 2011. <http://bobwb.tripod.com/synergetics/tensegrity/index.html> (Aufruf: 14.11.2017)

Burkhardt, R. W. Jr.: A practical guide to tensegrity design, 2008. Online-Publikation: http://www.angelfire.com/ma4/bob_wb/tenseg.pdf (Aufruf: 19.08.2016)

Carstens, S.; Kuhl, D.: Tensegrity – Islands of Compression in a Sea of Tension. In: gacmReport, 2008. S. 21-29

Charalambides, J. E.: Computer Method for the Generation of the Geometry of Tensegrity Structures. Dissertation, The University of Texas at Austin, 2004.

- Connelly, R.; Back, A.:** Mathematics and Tensegrity. In: American Scientist, Volume 86, 1998. S. 142-151
- DIN EN 17117-1:2017-06** – Entwurf: Mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien - Mechanische Prüfverfahren unter biaxialen Spannungszuständen - Teil 1: Zugsteifigkeitseigenschaften; Deutsche und Englische Fassung prEN 17117-1:2017.
- Emmerich, D. G.:** Construction de réseaux autotendants. Franz. Patent P.V. n° 931.099 N° 1.377.290, 1963.
- Emmerich, D. G.:** Emmerich on Self-Tensioning Structures. In: International Journal of Space Structures Vol. 11 Nos. 1 & 2 1996. S. 29-36
- Emmerich, D. G.:** Structures Tendues et Autodetantes. Paris, 1988.
- Fuller, R. B.:** Suspension Building. US Patent Nr. 3.139.957, 1964.
- Fuller, R. B.:** Synergetics Exploration in the Geometry of Thinking. Macmillan Publishing Co. Inc., 1975.
- Fuller, R. B.:** Tensile Integrity-Structures. US-Patent Nr. 3.063.521, 1962.
- Gilewski, W.; Klosowska, J.; Obara, P.:** Applications of Tensegrity Structures in Civil Engineering. In: Procedia Engineering 111, December, 2015. S. 242-248
- Gomez-Jauregui, V.:** Tensegrity, the Queen of Structures? – Discussion about Hanaor's paper ("Debunking Tensegrity – A personal Perspective"). In: International Journal of Space Structures Vol. 27, No. 2 & 3, 2012.
- Gomez-Jauregui, V.:** Controversal Origins of Tensegrity. In Proceeding of the International IASS Symposium 2009, Evolution and Trends in Design, Valencia, 2009. S. 1642-1652
- Gomez-Jauregui, V.:** Tensegrity Structures and their Application to Architecture. Masterthesis, Queens University Belfast, 2004.
- Graciano, C.:** Tensegrity Structures A State-of-the-Art Review. In: Proceeding II Simposio Latino Americano de Tenso Estructuras, At Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2005.
- Grunwald, G.:** Mechanisch vorgespannte, doppelagige Membranmodule in ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle. Technische Universität Berlin, Dissertation, 2007.
- Hanaor, A.:** Aspects of design of double layer tensegrity domes. In: International Journal of Space Structures, Vol. 7, No. 2, 1992. S. 101-113
- Hanaor, A.:** Geometrically rigid double-layer tensegrity grids. In: International Journal of Space Structures 9, 1994. S. 227–238

- Ingber, D. E.:** The Architecture of Life. In: Scientific American, 1998. S. 48-57
- Ingber, D. E.; Landau, M.:** Tensegrity, 2012.
www.scholarpedia.org/article/Tensegrity (Aufruf: 26.10.2017)
- Kawaguchi, K.:** A practical Guide to Tensegrity Design 2nd Edition. A review of Robert Burkhardt's on-line book. In: Journal of the IASS Vol. 48, No. 1, April 2007. S. 63-64
- Kawaguchi, K.; Mizutani, K.; Fujiwara, J.; Imai, K.:** Preliminary report of design and construction of a tensegrity tower and a pentagonal skeleton supporting a membrane roof. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium "Interfaces: architecture . engineering . science", Hamburg, 2017.
- Kawaguchi, K.; Ohya, S.; Vormus, S.:** Long-Term Monitoring of White Rhino, Building with Tensegrity Skeletons, in 5th Annual Symposium of IABSE / 52nd Annual Symposium of IASS / 6th International Conference on Space Structures, London, 2011.
- Kelly, C.:** Outdoor Sculpture in Baltimore: A Historical Guide to Public Art in the Monumental City. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2011.
- Kenner, H.:** Geodesic math and how to use it. University of California Press Berkeley, Los Angeles 1976.
- Knippers, J.; Cremens, J.; Gabler, M.; Lienhard J.:** Atlas Kunststoffe + Membranen. Detail Verlag, München, 2010.
- Kojima, K.:** "MOOM" Tensegric membrane structure. In: GA Japan, 110, 2011. S. 149-151 (japanisch)
- Krausse, J.:** Buckminster Fullers Modellierung der Natur. In: Arch+ 159/160, Mai 2002. Seite 40-49
- Krausse, J.; Lichtenstein, C.:** Your Private Sky. R. Buckminster Fuller. Design als Kunst einer Wissenschaft. Verlag Lars Müller, 2. Aufl., 2000.
- Krohn, C.:** Buckminster Fuller und die Architekten. Dietrich Reimer Verlag, Berlin, 2004.
- Kurtz, S. A.:** Kenneth Snelson The Elegant Solution. In: Art News, 1968.
Online-Publikation: www.kennethsnelson.net/icons/art.htm (08.12.2017)
- Lalvani, H.:** Origins of Tensegrity: Views of Emmerich, Fuller and Snelson. In: International Journal of Space Structures Vol. 11 Nos. 1 & 2 1996. S. 27-55
- Lessing, H. E.:** Die Dymaxion-Wohnmaschine. In: Kultur & Technik 04/2007. S. 16-20

Lienhard, J.: Bending-Active Structures - Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. Dissertation, Universität Stuttgart, 2014.

Lindenberg, J.: Analyse der Interaktion linearer Stabelemente und strukturell wirksamer Membrane am Beispiel des Noda Pavillons. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2017 (unveröffentlicht).

Liu, R.: Resilience: lessons from tensegrity structures. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium "Interfaces: architecture . engineering . science", Hamburg, 2017.

Luchsinger, R. H.; Pedretti, A.; Pedretti, M.; Steingruber, P.: The new structural concept Tensairity: Basic principles. In: Zingoni, A (Hrsg.): Proceeding of the Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation. Lisse, 2004.

McCleary, P.: Robert Le Ricolais' Suche nach der ‚unzerstörbaren Idee‘. In: Arch+ 159/160, 2002. S.64-68

Meeß-Olsohn, L.: Tensegrity: Skulptur und Konstruktion. In: Leicht Bau Kunst, Symposiumsband, Universität Essen, 05/2002. S. 83-98

Meeß-Olsohn, L.: Textiles and Tensegrity. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004.

Membrane Structures Association of Japan: Testing Method for elastic constants of membrane materials, MSAJ/M-02:1995.

Micheletti, A.: Modular Tensegrity Structures: The Tor Vergata Footbridge. In: Frémond, M.; Maceri, F. (Hrsg.): Mechanics, Models and Methods in Civil Engineering. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol. 61, Springer, Berlin Heidelberg, 2012.

Minke, G.: Tensegrity-Tragwerke. In: Zodiac 21, Milano, Oktober, 1972. S.132-145

Minte, J.: Das mechanische Verhalten von Verbindungen beschichteter Chemiefasergewebe. Dissertation, RWTH Aachen, 1981.

Miura, K.: Proposition of pseudo-cylindrical concave polyhedral shells. University of Tokyo, 1969.

Motro, R.: Tensegrity: from Art to Structural Engineering. In: Proceeding of IASS-APCS Symposium, Seoul, 2012.

Motro, R.: Tensegrity Structural Systems for the Future. Kogan Page Limited, London, 2003.

Motro, R.: Tensegrity Systems: The State of the Art. In: International Journal of Space Structures Vol. 7 No. 2, 1996. S. 75-83

- Motro, R.:** Tension Structures in „Fifty years of progress for shell and spatial Structures“. In: IASS Jubilee Book, Multi-Sciences, 2011.
- Nenadovic, A.:** Development, characteristics and comparative structural analysis of tensegrity type cable domes. In: Spatum, No. 22, July, 2010. S. 57-66
- Palmen, C.:** Konstruktionen des Leichtbaus – Das Prinzip Speichenrad. Dietrich Reimer Verlag, Berlin, 2017.
- Parisch, H.:** Festkörper-Kontinuumsmechanik. Von den Grundgleichungen zur Lösung mit Finiten Elementen. Vieweg-Teubner, 1. Auflage, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2003.
- Paronesso, A.; Passera, R.:** Schwebende Strukturen mit Durchblick: Evolution und Anwendung eines alternativen Leichtbaukonzeptes. In: Tec21, Band 129, Heft 40 Leichte Konstruktionen, 2003.
- Pars, M.:** Tensegrity, ohne Datum.
<http://www.tensegriteit.nl/e-architecture.html> (Aufruf: 09.10.2017)
- Pellegrino, S. u. Calladine C. R.:** .Matrix Analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks. In: International Journal of Solids and Structures 22, 1986.
- Peña Villamil, D. M.:** Aplicación de los Principios del Tensegrity a las Construcciones textiles atirantadas. Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- Peña Villamil, D. M.:** Tensegrity ring for a sports arena – Formfinding and Testing. In: Onate, E.: Textile Composites and Inflatable Structures, Barcelona , 2011.
- Peña Villamil, D. M; Llorens, I.; Sastre, R.:** Application of Tensegrity to Tensile-Textile Constructions: Formfinding and Structural Analysis. In: IASS Journal, Vol. 52, No. 2, 2011. S. 67-81
- Peña Villamil, D. M.:** Application of the Tensegrity Principles on Tensile Textile Constructions. In: International Journal of Space Structures, Vol. 25, No. 1, 2010. S. 57-68
- Peters, S.:** tensional integrity. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 1998.
- Popp, P.:** Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088
- Pugh, A.:** An introduction to Tensegrity. University of California Press Berkeley, Los Angeles, 1976.
- Ratschke, N.; Bögle, A.; Lindenberg, J.:** Parametric Analysis of Tensegrity-Membrane-Structures. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium “Interfaces: architecture . engineering . science”, Hamburg, 2017.

Ratschke, N.; Bögle, A.: Analysis of the interaction between integrated linear compression elements in membranes. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium „Spatial Structures of the 21st Century“, Tokyo, 2016.

Riether, G.; Wit, A. J.; Putt, S. T.: The Underwood Pavilion. In: Ikeda, Y. (Hrsg.): Emerging Experience in Past, Present and Future of Digital Architecture, Proceeding of the 20th International Conference of the Association for CAADRIA in Hong Kong, 2015. S. 663-672

Riether, G.; Wit, A.: Underwood Pavilion. In: Proceeding ACSA, Toronto, 2014.

Robbin, T.: Engineering A New Architecture. Quebecor-Eusey Press, Leominster, 1996.

Roekens, J.; u.a.: Preliminary investigation to Tensairity arches. In: Onate, E; Kröplin, B.; Bletzinger K.-U. (Hrsg.): Structural Membranes 2011 V International Conference on textile Composites and Inflatable Structures, Barcelona, 2011. S. 198-209

Sadao, S.: Fuller on Tensegrity. In: International Journal of Space Structures Vol. 11 Nos. 1 & 2, 1996, S. 37-42

Sato, J.: Projektvortrag. Tokyo, 2016 (unveröffentlicht)

Schlaich, M.: The Messeturm in Rostock – A Tensegrity Tower. In: Journal of International Association for Shell and spatial Structures Vol. 45, N. 145, 2004.

Schling, E.; u.a.: Bending-Active Tensegrity. In: Proceeding of IASS Symposium „Future Visions“, Amsterdam, 2015.

Schröck, A.: Certain Tension: Pavilion in Indiana, 2015. <http://www.detail.de/artikel/unter-spannung-pavillon-in-indiana-13246/> (22.01.2016)

Seidel, M.: Textile Hüllen - Bauen mit biegeweichen Tragelementen: Materialien, Konstruktion, Montage. Berlin, 2008.

Shigematsu, M.; Tanaka, M.; Noguchi, H.: Form finding analysis of tensegrity membrane structures based on variational method. Proceeding of the 6th IASS-IACM 2008 "Spanning Nano to Mega", Ithaca, 2008.

Skelton, R. E.; de Oliveira, M. C.: Tensegrity Systems, Springer, 2009.

Skelton, R. E.; et al.: An Introduction to the Mechanics of Tensegrity Structures. In: Proceeding of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, 2001. S. 17.1-17.5

Snelson, K. D.: The Art of Tensegrity. In: International Journal of Space Structures, Vol. 27 No. 2 & 3, 2012. S. 71-80

- Snelson, K. D.:** Art and Ideas, 2013. Online Publikation: http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf (Aufruf: 13.11.2017)
- Snelson, K. D.:** Schwebender Druck. In: Arch+ 159/160, 2002. S. 50-51
- Snelson, K. D.:** Continous tension, discontinuous compression structures. US-Patent Nr. 3.169.611 A, 1965
- Sofistik AG:** ASE Allgemeine Statik Finiter Element Strukturen. Handbuch Version 12/2016. Oberschleißheim, 2015b.
- Sofistik AG:** Sofistik Basisfunktionalitäten. Handbuch Version 05/2016. Oberschleißheim, 2015a.
- Sofistik AG:** TEXTILE Zuschnitt von Membranstrukturen. Handbuch Version 06/2016. Oberschleißheim, 2015c.
- Spura, C.:** Technische Mechanik 1. Stereostatik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- Sroka-Bizon, M.:** Tensegrity Structures – Work of Artist, Designer, Scientist? In: Proceeding of 24th Conference Geometry Graphics Computer, 2017.
- Sultan, C.:** Tensegrity Structures: Sixty Years of Art, Science, and Engineering. In: Aref, H.; Giessen, E. v. d. (Hrsg.): Advances in Applied Mechanics, Vol. 43, 2009. S. 70-145
- Tausch, G.:** Das Wunder vom Zusammenhalt. In: Arch+ 144/145, 1998. Seite 12-13
- Teutsch, U.:** Tragverhalten von Tensairity Trägern, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.
- Tibert, G. u. Pellegrino, S.:** Deployable Tensegrity Reflectors for Small Satellites. In: Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 39, No. 5, 2002.
- Tibert, G.:** Deployable Tensegrity Structures for Space Application. Dissertation, Königliche Technische Hochschule Stockholm, 2002.
- Tu, Y.-H.; Lin, C.-H.:** Tensegric membrane structure with radiated struts. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium „Spatial Structures of the 21st Century“, Tokyo, 2016.
- Uhlemann, J.:** Elastic Constants of Architectural Fabrics for Design Purposes. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2016.
- Wang, B. B.:** Free-Standing Tension Structures: From Tensegrity Systems to Cable-Strut Systems. Spon Press, 2004.
- Whitelaw, J.:** Profile - From earth bags to tensegrity pavilions, in his practice - StructureMode - engineer Geoff Morrow has created a place

where creativity and innovation are paramount. In: The Structural Engineer, October 2016. S. 46-48

Wolkowicz, C.: Ein Beitrag zur Evolution des Tensegrity – Konzeptes. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2008.

Yaeger, B.: How Does the Hirshhorn's 60-Foot "Needle Tower" Stay Upright In A Stiff Wind?, 2014.

<https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/how-does-hirshhorn-60-foot-needle-tower-stay-upright-in-stiff-wind-180953391/>
(Aufruf: 10.10.2017)

Zhang, J. Y.; Ohsaki, M.: Tensegrity Structures - Form, Stability and Symmetry. Springer Verlag, 2015.

Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht).

10 Abbildungsverzeichnis

10 Abbildungsverzeichnis

- 2-1 Modellbau eines dreieckförmigen Tensegrity-Twist-Elements. Eigene Fotografie, 2016.
- 2-2 Übersicht der von René Motro definierten zeitlichen Perioden der Entwicklung der Tensegrity-Strukturen. Eigene Darstellung, 2018.
- 2-3 Gleichgewichtskonstruktion von Karl loganson (1920). Eigene Darstellung, 2018.
- 2-4 Speichenrad, bestehend aus außenliegendem Druckring (Felge), innenliegendem Zugring (Nabe) und vorgespannten Seilen (Speichen). Eigene Darstellung, 2018.
- 2-5 Modellbau von Richard Buckminster Fullers Dymaxion-House. William W. Braham, "How Much Does Your Household Weigh?" Places Journal, September 2009.
<https://placesjournal.org/article/how-much-does-your-household-weigh/> (Aufruf: 08.01.2018)
- 2-6 Prinzipdarstellung des strukturellen Aufbaus einer Geodätischen Kuppel. Eigene Darstellung, 2018.
- 2-7 Geodesic Tensegrity Dome von Richard Buckminster Fuller (1953). Krause, J.; Lichtenstein, C.: Your Private Sky. R. Buckminster Fuller. Design als Kunst einer Wissenschaft. Verlag Lars Müller, 2. Aufl., 2000. S.409.
- 2-8 Patentierte Tensegrity-Struktur von Richard Buckminster Fuller (1962). R. B. Fuller: Tensile Integrity-Structures. US-Patent Nr. 3.063.521, 1962.
- 2-9 Richard Buckminster Fullers patentierter Aspension Dome (1964). R. B. Fuller: Suspension Building. US Patent Nr. 3.139.957, 1964.
- 2-10 Kenneth Snelson X-Piece (1948). Krause, J.; Lichtenstein, C.: Your Private Sky. R. Buckminster Fuller. Design als Kunst einer Wissenschaft. Verlag Lars Müller, 2. Aufl., 2000. S. 400.
- 2-11 Kenneth Snelson Skulptur Needle Tower in Washington D. C. (1968). Snelson, K. D.: Art and Ideas, 2013. Online Publikation: http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf (Aufruf: 13.11.2017)
- 2-12 Kenneth Snelsons Skulptur Easy Landing in Baltimore (1977). Snelson, K. D.: Art and Ideas, 2013. Online Publikation: http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf (Aufruf: 13.11.2017)
- 2-13 Patentierte Tensegrity-Struktur (Construction de réseaux autotendants) von David Georges Emmerich (1963). Emmerich, D. G.:

- Construction de réseaux autotendants. Franz. Patent P.V. n° 931.099 N° 1.377.290, 1963.
- 2-14 Skulptur Skylon beim Festival of Britain (1951). Museum of London, 1951. Lizenzfreies Bild.
- 2-15 Seilpolygon von Robert Le Ricolais. McCleary, P.: Robert Le Ricolais' Suche nach der unzerstörbaren Idee'. In: Arch+ 159/160, 2002. S.67.
- 2-16 Tensegrity-Grid von René Motro, bestehend aus mehreren addierten Twist-Elementen. Motro, R.: Tensegrity Structural Systems for the Future. Kogan Page Limited, London, 2003. S. 26.
- 2-17 Zweilagiger Tensegrity-Dome von Ariel Hanaor, bestehend aus mehreren addierten Twist-Elementen. Hanaor, A.: Aspects of design of double layer tensegrity domes. In: International Journal of Space Structures, Vol. 7, No. 2, 1992.
- 2-18 Anteil verschiedener Disziplinen an der Tensegrity-Forschung im ISI Web of Science. Gomez-Jauregui, V.: Tensegrity, the Queen of Structures? – Discussion about Hanaor's paper ("Debunking Tensegrity – A personal Perspective"). In: International Journal of Space Structures Vol. 27, No. 2 & 3, 2012.
- 2-19 Anzahl an Veröffentlichungen zum Thema Tensegrity. Gomez-Jauregui, V.: Tensegrity, the Queen of Structures? – Discussion about Hanaor's paper ("Debunking Tensegrity – A personal Perspective"). In: International Journal of Space Structures Vol. 27, No. 2 & 3, 2012.
- 2-20 Prinzipdarstellung der tragenden Elemente eines Geiger-Domes. Eigene Darstellung, 2018.
- 2-21 Tensarch von René Motro (2000). Motro, R.: Tensegrity Structural Systems for the Future. Kogan Page Limited, London, 2003.
- 2-22 Tensegrity-Tower als Stützung der Struktur White Rhino (2001). Kawaguchi, K.; Mizutani, K.; Fujiwara, J.; Imai, K.: Preliminary report of design and construction of a tensegrity tower and a pentagonal skeleton supporting a membrane roof. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium "Interfaces: architecture . engineering . science", Hamburg, 2017.
- 2-23 Fünfeckiges Twist-Element als Stützung der Struktur White Rhino (2001). Kawaguchi, K.; Mizutani, K.; Fujiwara, J.; Imai, K.: Preliminary report of design and construction of a tensegrity tower and a pentagonal skeleton supporting a membrane roof. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium "Interfaces: architecture . engineering . science", Hamburg, 2017.

- 2-24 Prinzipdarstellung eines luftgestützten Tensairity-Balkens. Luchsinger, R. H; et al.: The new structural concept Tensairity: Basic principles., In: Zingoni, A (Hrsg.): Proceeding of the Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation. Lisse, 2004.
- 2-25 Visualisierung der Struktur des Blur Buildings (Passera/Pedretti). Motro, R.: Tension Structures in „Fifty years of progress for shell and spatial Structures“. In: IASS Jubilee Book, Multi-Sciences, 2011. S.160.
- 2-26 Knotenpunkt am Warnow-Tower (links), Warnow Tower (rechts). Schlaich, M: The Messeturm in Rostock – A Tensegrity Tower. In: Journal of Inter-national Association for Shell and spatial Structures Vol. 45, N. 145, 2004.
- 2-27 Visualisierung der Tor Vergata Brücke. Micheletti, A.: Modular Tensegrity Structures: The Tor Vergata Footbridge. In: Frémond, M.; Maceri, F. (Hrsg): Mechanics, Models and Methods in Civil Engineering. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol. 61, Springer, Berlin Heidelberg, 2012.
- 2-28 Kurilpa Bridge in Brisbane. Fotografie Paul Guard, 2009, Lizenzfreies Bild.
- 2-29 Modellbau eines dreieckförmigen Tensegrity-Twist-Elements. Eigene Darstellung, 2018.
- 2-30 Auflistung der Klassifikation von Tensegrity-Tragwerken nach Ger-not Minke. Eigene Darstellung, 2018.
- 2-31 Klassifikation von Tensegrity-Tragwerken nach Christian Wolkowicz. Wolkowicz, C.: Ein Beitrag zur Evolution des Tensegrity – Konzeptes. Dissertation Bauhaus-Universität Weimar, 2008. S. 19.
- 2-32 Klassifizierung gebauter Tensegrity-Strukturen. Eigene Darstellung, 2018.
- 2-33 Georgia Dome (1992).
<https://www.flickr.com/photos/ucumari/481430551> (Aufruf : 19.02.2018), Creative Common License.
- 3-1 Richard Buckminster Fullers Idee für die Integration von Flächenelementen in eine kuppelförmige Tensegrity-Struktur (1962). R. B. Fuller: Tensile Integrity-Structures. US-Patent Nr. 3.063.521, 1962. S.13.
- 3-2 Modellbau eines frühen Entwurfs einer Tensegrity-Membran-Struktur von David George Emmerich. Brayer, M.-A.: David Georges Emmerich (1925-1996). In: Brayer, M.-A.: Architectures expérimentales 1950 - 2012, Collection du FRAC Centre, HYX, 2013. S. 236-243. S.242.

- 3-3 Tensegrity Dome with a tensile skin von Anthony Pugh (1976). Pugh, A.: An introduction to Tensegrity. University of California Press Berkeley, Los Angeles, 1976. S.65.
- 3-4 Konzept eines Tensegrity-Reflektors von Gunnar Tibert und Sergio Pellegrino (2002). Tibert, G.: Deployable Tensegrity Structures for Space Application. Dissertation, Königliche Technische Hochschule Stockholm, 2002. S.171.
- 3-5 Die Skulptur Textegrity I von Lars Meeß-Olsohn (2000). Meeß-Olsohn, L.: Textiles and Tensegrity. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004. S.52.
- 3-6 Der Messestand Textegrity-Dome von Lars Meeß-Olsohn (2002). Meeß-Olsohn, L.: Textiles and Tensegrity. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004. S.83.
- 3-7 Visualisierung des Entwurfs tensegrity membrane structure (2008). Shigematsu, M.; Tanaka, M.; Noguchi, H.: Form finding analysis of tensegrity membrane structures based on variational method. Proceeding of the 6th IASS-IACM 2008 "Spanning Nano to Mega", Ithaca, 2008. S.3.
- 3-8 Dem Entwurf tensegrity membrane structure zugrunde liegende rotationssymmetrische Konfiguration. Shigematsu, M.; Tanaka, M.; Noguchi, H.: Form finding analysis of tensegrity membrane structures based on variational method. Proceeding of the 6th IASS-IACM 2008 "Spanning Nano to Mega", Ithaca, 2008. S.3.
- 3-9 Innenseitig beleuchteter Pavillon MOOM bei Nacht (2011). Fotografie Sadao Hotta. <http://c-and-a.co.jp/projects/other/moom.html> (Aufruf: 21.04.2018)
- 3-10 Modellbau des Tensegrity Domes von Diana Maritza Peña Villamil (2012). Peña Villamil, D. M.: Aplicación de los Principios del Tensegrity a las Construcciones textiles atirantadas. Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012. S.49.
- 3-11 Visualisierung des FE-Modells des Tensegrity Domes von Diana Maritza Peña Villamil (2012). Peña Villamil, D. M.: Aplicación de los Principios del Tensegrity a las Construcciones textiles atirantadas. Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012. S.236.
- 3-12 Beispielhafter Aufbau eines Tensegrity-Membran-Elements am Underwood Pavillon von Gernot Riether und Andrew Wit (2014). Riether, G.; Wit, A.: Underwood Pavilion. In: Proceeding ACSA, Toronto, 2014. S.2.
- 3-13 Einzelnes Segment der Bending-Activated Tensegrity-Struktur Form Follows Tension von Eike Schling (2015). Schling, E.; u.a.: Bending-Active Tensegrity. In: Proceeding of IASS Symposium Future Visions, Amsterdam, 2015. S.3.

- 3-14 Hanabi Pavillon von Chia-Ho Lin (2015). Tu, Y.-H.; Lin, C.-H.: Tensegric membrane structure with radiated struts. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium Spatial Structures of the 21st Century, Tokyo, 2016. S.9.
- 3-15 Tension Pavilion von Geoff Morrow (2016). Whitelaw, J.: Profile - From earth bags to tensegrity pavilions, in his practice - Structure-Mode - engineer Geoff Morrow has created a place where creativity and innovation are paramount. In: The Structural Engineer, October 2016. S. 46-48. S.47. Fotografie Agnese Sanvito.
- 3-16 Sternwellenzelt über dem Tanzbrunnen in Köln. Eigene Fotografie, 2015.
- 3-17 Der Lastabtrag einer beispielhaften antiklastisch gekrümmten Hyparfläche verläuft jeweils zu den beiden Hoch- und Tiefpunkten. Eigene Darstellung, 2018.
- 3-18 Beispielhaft abgebildetes Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer PES/PVC Membran Type I. Eigene Darstellung, 2018.
- 3-19 Visualisierung von drei FE-Modellen, Tensegrity-Twist-Element (links), Tensegrity-Membran-Twist-Elemente mit unterschiedlichem Aufbau (mittig und rechts). Ratschke, N.; Bögle, A.: Analysis of the interaction between integrated linear compression elements in membranes. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium „Spatial Structures of the 21st Century“, Tokyo, 2016. S.8.
- 3-20 Last-Verformungs-Diagramm zum Vergleich verschiedener Konfigurationen von Tensegrity- und Tensegrity-Membran-Strukturen. Ratschke, N.; Bögle, A.: Analysis of the interaction between integrated linear compression elements in membranes. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium „Spatial Structures of the 21st Century“, Tokyo, 2016. S.9.
- 3-21 Klassifizierung gebauter Tensegrity-Membran-Strukturen. Eigene Darstellung, 2018.
- 4-1 Pavillon MOOM in Noda (2011). Popp, P.: Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088
- 4-2 Draufsicht auf die Membranfläche des Pavillons MOOM. Die äußere, die Fläche umschließende Linie zeigt die eben ausgebreitete Membran, die beiden, von links nach rechts verlaufenden, inneren Linien stellen die Fußpunktposition im aufgebauten Zustand dar. Popp, P.: Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088. S.1087.
- 4-3 Detailansicht der Fußpunktausbildung am Pavillon MOOM. Popp, P.: Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088. S.1088.

- 4-4 Exemplarische Darstellung der identifizierten strukturellen Membranbereiche an einem Pavillonausschnitt. Popp, P.: Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088. S.1086.
- 4-5 Beispielhafte Darstellung der, sich wiederholenden, identifizierten Hyparflächen auf der Membranfläche. Popp, P.: Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088. S.1086.
- 4-6 Einführen der Druckelemente in die aufgenähten Futterale beim Pavillon MOOM. Popp, P.: Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088. S.1088.
- 4-7 Aufrichten des Pavillons MOOM durch innenseitiges Anheben der Pavillonfläche und gleichzeitigem Verschieben der Fußpunkte. Popp, P.: Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088. S.1088.
- 4-8 Identifizierte Bereiche am Pavillon MOOM, die auf ein ungünstiges Tragverhalten der Membranfläche hinweisen. Popp, P.: Temporärer Pavillon in Noda. In: Detail Heft 10, 2012. S. 1086-1088. S.1087.
- 4-9 Innenseitig beleuchteter Pavillon MOOM bei Nacht (2011). Fotografie Sadao Hotta. <http://c-and-a.co.jp/projects/other/moom.html> (Aufruf: 21.04.2018)
- 5-1 Yoshimura Faltung eines Papiermodells. Eigene Fotografie, 2017.
- 5-2 Vergleich der Faltmuster einer Yoshimura-Faltung (links) und einer Hexagonal-Faltung (rechts). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-3 Grafische Beschreibung der geometrischen Parameter in Draufsicht und Seitenansicht. Tu, Y.-H.; Lin, C.-H.: Tensegric membrane structure with radiated struts. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium Spatial Structures of the 21st Century, Tokyo, 2016. S.5.
- 5-4 Grafische Darstellung der geometrischen Parameter im aufgebauten Zustand im Schnitt. Tu, Y.-H.; Lin, C.-H.: Tensegric membrane structure with radiated struts. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium Spatial Structures of the 21st Century, Tokyo, 2016. S.5.
- 5-5 Darstellung der geometrischen Veränderungen im Aufbauzustand (Phase 1). Tu, Y.-H.; Lin, C.-H.: Tensegric membrane structure with radiated struts. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium Spatial Structures of the 21st Century, Tokyo, 2016. S.5.
- 5-6 Darstellung der geometrischen Veränderungen im Aufbauzustand (Phase 2). Tu, Y.-H.; Lin, C.-H.: Tensegric membrane structure with radiated struts. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium Spatial Structures of the 21st Century, Tokyo, 2016. S.7.

- 5-7 Visualisierung des eigenen programmierten Modells, bestehend aus Druckelementen und Seilen (Seilmodell). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-8 Prinzipdarstellung des Vergleichs der Formfindungsfiguren. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-9 Ergebnisvergleich der Variation des Parameters Druckelementlänge am Seilmodell (oben) und der Studie nach Yi-Husan Tu und Chia-Ho Lin (unten). Lindenberg, J.: Analyse der Interaktion linearer Stabelemente und strukturell wirksamer Membrane am Beispiel des Noda Pavillons. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2017 (unveröffentlicht). S.51. (oberes Diagramm). Tu, Y.-H.; Lin, C.-H.: Tensegric membrane structure with radiated struts. In: Proceeding of the IASS Annual Symposium Spatial Structures of the 21st Century, Tokyo, 2016. S.7. (unteres Diagramm).
- 5-10 Netzausrichtung am 0° Netz in der Draufsicht des Seilnetzmodells. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-11 Netzausrichtung am 45° Netz in der Draufsicht des Seilnetzmodells. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-12 Seilnetzmodell vor Formfindung (oben) und nach Formfindung (unten). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-13 Prinzipdarstellung einer gleichmäßigen Hyparfläche mit Angabe der wesentlichen geometrischen Kenngrößen. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-14 Zuordnung der Haupttrichtungslinien der Hyparflächen I und II. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-15 Matrix zur Übersicht der jeweils einzelnen vorgenommenen Parametervariationen und der ausgewerteten geometrischen Kenngrößen. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-16 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Längsrichtung (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-17 Längenänderung der Hyparfläche I in Längsrichtung (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-18 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Querrichtung (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-19 Längenänderung der Hyparfläche I in Querrichtung (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-20 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.

- 5-21 Längenänderung der gesamten Hyparfläche I (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-22 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-23 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-24 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-25 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-26 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-27 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-28 Längenänderung der gesamten Hyparfläche II (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-29 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Druckelementlänge). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-30 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Längsrichtung (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-31 Längenänderung der Hyparfläche I in Längsrichtung (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-32 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Querrichtung (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-33 Längenänderung der Hyparfläche I in Querrichtung (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-34 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-35 Längenänderung der gesamten Hyparfläche I (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-36 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-37 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-38 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.

- 5-39 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-40 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-41 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-42 Längenänderung der gesamten Hyparfläche II (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-43 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Übergreifungslängenfaktor). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-44 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Längsrichtung (Druckelement-reihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-45 Längenänderung der Hyparfläche I in Längsrichtung (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-46 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche I in Querrichtung (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-47 Längenänderung der Hyparfläche I in Querrichtung (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-48 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-49 Längenänderung der gesamten Hyparfläche I (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-50 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche I (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-51 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-52 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 1 (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-53 Stich-/Seitenlängenverhältnis der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-54 Längenänderung der Hyparfläche II in Diagonalrichtung 2 (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-55 Stich-/Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-56 Längenänderung der gesamten Hyparfläche II (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.

- 5-57 Seitenlängenverhältnis der gesamten Hyparfläche II (Druckelementreihenabstand). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-58 Zusammenfassende Übersicht der einzelnen Variationen der drei Parameter. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-59 Auswirkungen der einzelnen Variationen der drei Parameter an der Hyparfläche I in Querrichtung am 45° Netz. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-60 Auswirkungen auf das Seitenlängenverhältnis der einzelnen Variationen der drei Parameter am 45° Netz (logarithmische Darstellung). Eigene Darstellung, 2018.
- 5-61 Ausgangskonfiguration der Varianten 1 bis 3 für die Multiparameteroptimierung. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-62 Variationsspektrum der Varianten 1 bis 3 in der Multiparameteroptimierung. Eigene Darstellung, 2018.
- 5-63 Zusammenfassende Übersicht der multiparametrisch durchgeführten Variantenstudie der Varianten 1 bis 3. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-1 Knotenpunktdetail an der Skulptur Textegrity I von Lars Meeß-Olsohn. Meeß-Olsohn, L.: Textiles and Tensegrity. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004. S.53.
- 6-2 Knotenpunktdetail an dem Textegrity-Dome von Lars Meeß-Olsohn. Meeß-Olsohn, L.: Textiles and Tensegrity. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004. S.83.
- 6-3 Zuschnittsdefinition der Membranfläche des Textegrity-Domes. Meeß-Olsohn, L.: Textiles and Tensegrity. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004. S.100.
- 6-4 Matrix zur Übersicht der gewonnenen Informationen aus der Projektstudie zur konstruktiven Umsetzung. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-5 Visualisierung der Systemkonfiguration Variante 3 zur Verortung des Demonstrator-Ausschnitts (in blau dargestellt). Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.12.
- 6-6 Visualisierung der Randkonstruktion mit zugehöriger Aussteifung. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-7a Konzept zur Anordnung der Zuschnittsflächen in der Draufsicht. Eigene Darstellung, 2018.

- 6-7b Konzept zur Anordnung der Zuschnittsflächen in der Frontansicht. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-8a Visualisierung der Randkonstruktion mit Gewindestangen zum Aufbringen der Vorspannung in Breitenrichtung des Demonstrators im Querschnitt. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-8b Visualisierung der Randkonstruktion mit Gewindestangen zum Aufbringen der Vorspannung in Breitenrichtung des Demonstrators in der Draufsicht. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-9 Radiale und Parallele Zuschnittsanordnung für Hochpunktkonstruktionen. Seidel, M.: Textile Hüllen - Bauen mit biegeweichen Tragelementen: Materialien, Konstruktion, Montage. Berlin, 2008. S.63.
- 6-10 Konzept zur Anschlussausbildung zwischen Druckelement und textiler Membran mit innenseitig befestigtem Anschlusselement. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-11 Konzept zur Ausbildung des Vorspannmechanismus im Druckelement. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-12 Übersicht der verwendeten Programme und Datenaustausch zur Planung und Berechnung des Demonstrators. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-13 Ablaufschema der Berechnungsschritte des Demonstrators (hier markiert: Eingabe der Strukturdaten). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-14 Visualisierung der verschiedenen Ebenen und der zugewiesenen Elemente für die FEM-Berechnung des Demonstrators. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-15 Eingesetzte Standardprobe in der Biaxialen Prüfmaschine der HafenCity Universität Hamburg. Amaro Goncalves, N.: Untersuchung und FE-Implementierung des biaxialen Spannungs-Dehnungsverhaltens einer PES/PVC Membran, Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.21.
- 6-16 Ablaufschema der Berechnungsschritte des Demonstrators (hier markiert: Überarbeitungsprozess bei fehlerhaften Ergebnissen). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-17 Anschlusselement zur innenseitigen Befestigung am Interaktionsbereich (verschiedene Ansichten). Eigene Fotografie, 2018.
- 6-18 Visualisierung des FE-Modells des vereinfachten Anschlussbereichs mit eingesetzten Koppellementen (Sofistik Animator). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-19 Visualisierung des finalen FE-Modells (Sofistik Animator). Eigene Darstellung, 2018.

- 6-20 Darstellung der Hauptmembrankräfte im berechneten Vorspannungszustand in der Draufsicht einer Systemhälfte (Sofistik Wingraf). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-21 Darstellung der Hauptmembrankräfte im berechneten Vorspannungszustand in der Frontansicht des Interaktionsbereich (Sofistik Wingraf). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-22 Darstellung der Hauptmembrankräfte im Vorspannungszustand im Detailauschnitt, mittig in der Hyparfläche I (Sofistik Wingraf). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-23 Darstellung der Stabnormalkräfte im Vorspannungszustand in der Seitenansicht einer Systemhälfte (Sofistik Wingraf). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-24 Darstellung der Biegemomente (M_y) im Vorspannungszustand in der Seitenansicht einer Systemhälfte (Sofistik Wingraf). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-25 Vergleich der vorhandenen Schnittgrößen mit zulässigen Werten. Eigene Darstellung.
- 6-26 Konzept zur Anordnung der Zuschnittsflächen in der Frontansicht. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-27a Visualisierung der Zuschnittsflächen gemäß der Zuschnittsbeziehung in der Perspektive (Sofistik Wingraf). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-28 Visualisierung der berechneten Abwicklung (Sofistik Wingraf). Eigene Darstellung, 2018.
- 6-29 Randkonstruktion des Arbeitsmodells. Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.42.
- 6-30 Membranfläche des Arbeitsmodells während der Fertigung. Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.43.
- 6-31 Einbau der Membranfläche des Arbeitsmodells. Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.44.
- 6-32 Fertiges Arbeitsmodell. Eigene Fotografie, 2018.
- 6-33 Zuschnitt der textilen Membran des Demonstrators. Eigene Fotografie, 2018.

- 6-34 Randkonstruktion des Demonstrators ohne Aussteifung und mit Gewindestangen. Eigene Fotografie, 2018.
- 6-35 Handwerkliche Fertigung einer Flächennaht mit dem Warmgas-schweißverfahren. Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.47.
- 6-36 Festgelegte Schweißreihenfolge der einzelnen zugeschnittenen Teilflächen der Membranfläche. Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.46.
- 6-37 Handwerkliche Fertigung des Anschlussbereichs mit dem Warmgas-schweißverfahren. Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.47.
- 6-38 Fertiggestellte Membranfläche des Demonstrators. Eigene Fotografie, 2018.
- 6-39 Anschlussbereich mit innenseitig eingenähtem Anschlusselement. Eigene Fotografie, 2018.
- 6-40 Verortung der Projektionsfehler bei der Zuschnittsberechnung. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-41 Detaillierte Darstellung des Projektionsfehlers am Membranrand. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-42 Weiterentwickelte Anschlussausbildung zwischen Druckelement und textiler Membran mit kegelstumpfförmigen Bauteil. Eigene Darstellung, 2018.
- 6-43 Fertiger Demonstrator. Eigene Fotografie, 2018.
- 7-1 Detailansicht der Hyparfläche I am fertigen Demonstrator. Eigene Fotografie, 2018.
- 7-2 Faltenbildung im den oberen Randbereich des Demonstrators. Eigene Fotografie, 2018.
- 7-3 Darstellung einer möglichen Zuschnittsdefinition zur Verbesserung der Fertigungsbedingungen am Anschlussbereich. Eigene Darstellung, 2018.
- 7-4a Visualisierung des Druckelementes mit einem torsionsfreien und querschnittsgleichen Vorspannmechanismus im Schnitt. Eigene Darstellung, 2018.

- 7-4b Detaillierte Darstellung des torsionsfreien und querschnittsgleichen Vorspannmechanismus im Schnitt. Eigene Darstellung, 2018.
- 7-5 Vorbereitung des Demonstrators zum Aufmaß durch Aufkleben von Zielmarken, Vergrößerte Darstellung einer Zielmarke (rechts unten). Eigene Fotografie, 2018.
- 7-6a Visualisierung des Ergebnisvergleichs von berechneter Membranfläche (hellgrau) und Aufmaß der gebauten Struktur (farbige Punkte) im realisierten Vorspannungszustand. Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.56.
- 7-6b Darstellung der Verteilung der berechneten Abweichung und der Extremwerte des realisierten Vorspannungszustands. Eigene Darstellung, 2018.
- 7-7a Visualisierung des Ergebnisvergleichs von berechneter Membranfläche (hellgrau) und Aufmaß der gebauten Struktur (farbige Punkte) im zweiten Spannungszustand. Zywietz, M.: Entwurf und Realisierung eines Demonstrators zum konstruktiven Verständnis von Tensegrity-Membran-Strukturen. Masterthesis, HafenCity Universität Hamburg, 2018 (unveröffentlicht). S.56.
- 7-7b Darstellung der Verteilung der berechneten Abweichung und der Extremwerte des zweiten Spannungszustands. Eigene Darstellung, 2018.

11 Anhangverzeichnis

11 Anhangverzeichnis

Die nachfolgend aufgelisteten Anhänge befinden sich in gleicher Struktur auf beiliegendem Datenträger.

5.1 Parametrische Modelle *(Datei, nicht in Druckfassung enthalten)*

5.2 Daten und Diagramme der Parameterstudie
(Datei, nicht in Druckfassung enthalten)

5.3 Daten und Diagramme der Variantenstudie
(Datei, nicht in Druckfassung enthalten)

6.1 Datenblatt der textilen Membran
(Datei, nicht in Druckfassung enthalten)

6.2 Spannungsberechnung nach Minte
(Datei, nicht in Druckfassung enthalten)

6.3 Daten der Zugversuche der textilen Membran
(Datei, nicht in Druckfassung enthalten)

6.4 Auswertung der Biaxialen Zugversuche der textilen Membran
(Datei, nicht in Druckfassung enthalten)

6.5 FEM-Berechnungen
(Datei, nicht in Druckfassung enthalten)