Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.

http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

Diplomarbeit
Master Thesis

Entwurf von Membrankonstruktionen anhand physischer Modelle

Experimentelle Formfindung zur Entwicklung des Vorentwurfs

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter gemeinsamer Leitung von

o. Univ. Prof. DDI Wolfgang WINTER und Univ. Lektor Prof. DI Vinzenz Sedlak, MPhil

E 259 Institut für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Roman Ivancsits
9618371

Wien, am

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die die Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Im Besonderen danke ich Vinzenz Sedlak, der mein Interesse am Leichtbau und vor allem an Membrankonstruktionen bei einem Praktikum in Australien geweckt hat und meinen weiteren universitären Werdegang genauso freundschaftlich wie immer auf höchste Anforderungen bedacht über vielen Stationen begleitet hat.

Jürgen Hennicke danke ich für die Möglichkeit, die Modellbaumethoden am Institut für leichte Flächentragwerke aus erster Hand kennen zu lernen.

Ohne die moralische Unterstützung meiner Frau Diane hätte ich diese Arbeit nicht fertigstellen können und bin unendlich glücklich, sie an meiner Seite zu haben.

Vor allem danke ich auch meinen Eltern, die mir durch ihr aufgeschlossenes Denken und ihre warmherziges Wesen alles Nötige mit auf den Lebensweg gegeben haben, um zuversichtlich nach vorn zu blicken und meine Träume zu verwirklichen.

Kurzbeschreibung

Der Entwurf von Membrankonstruktionen stellt für Architekten eine besondere Herausforderung dar. Zwar gibt es Computerprogramme für den Entwurf doppelt gekrümmter Flächen, allerdings geht dabei die Materialität verloren. Membrankonstruktionen zeichnen sich durch ihre lastaffinen Formen aus, sind also durch den Lastfall Vorspannung bestimmt. Das physische Modell stellt ein wesentliches Mittel dar, um die Zusammenhänge zwischen Form – Kraft – Masse im wahrsten Sinne des Wortes „begreiflich" zu machen. Dabei ermöglicht es auch gleichzeitig eine Überprüfung der Form und Funktionalität, die qualitativ auch von 3D-Computersimulationen nicht erreicht wird.
Auf viele der experimentellen Formfindungsmöglichkeiten am physischen Modell - die großteils auf Frei Otto und dessen bahnbrechende Entwicklungen ab den 1950ern zurückgehen - gibt es zwar zahlreiche Hinweise in der Literatur (im Besonderen: *Gaß, Siegfried. 1990. IL 25. Form, Kraft, Masse. 5. Experimente*), allerdings sind dem Autor keine Publikationen bekannt, die die Modellmethoden in leicht nachvollziehbaren Schritten und konkreten Anleitungen dokumentieren. Das Anliegen dieser Arbeit ist es daher, eine möglichst vollständige Anleitung zur Anwendung der Modellmethoden zu bieten, die vor allem jenen als Einführung in den Bereich der Membrankonstruktionen dient, die sich zum ersten Mal mit diesem Thema und der Formfindung am physischen Modell auseinandersetzen. Die Umsetzung dieser Idee basiert auf der Vermittlung dieser Modellmethoden an der TU-Wien [Sedlak 2012a] durch Vinzenz Sedlak, der diese Methoden 1979 an Frei Ottos Institut aufgriff und in der Folge an der Lightweight Structures Research Unit, University of New South Wales, Sydney weiterentwickelte.

Um die Vorzüge des physischen Modells für einen intuitiven Einstieg in den Entwurf von Membrankonstruktion zugänglich zu machen, wurden die Modellmethoden, untersucht und auf die gegenwärtigen Bedürfnisse zur digitalen Bearbeitung weiterentwickelt. Eine Übersicht unterschiedlicher Modellarten mechanisch vorgespannter Zelte wurde erstellt und am Beispiel Strumpf-Modell mit praktischen Anleitungen versehen. Aufbauend auf den existierenden Techniken wurden Adaptierungen entwickelt, die helfen, durch einfache und leicht verfügbare Mittel die Effizienz und Genauigkeit zu erhöhen, wie z. B. der Einsatz eines Kreuzlinienlasers, um Krümmungslinien auf dem Modell berührungslos analysieren zu können oder die Verwendung von Photogrammetrie-Apps, um 3D-Modelle zu erstellen. Auch unterschiedliche Strategien zur Digitalisierung der Form wurden betrachtet und essenzielle Methoden, wie z. B. die Formerfassung über die Hauptkrümmungen, dokumentiert. Weiters wurden die Grundzüge der digitalen Formfindung anhand der Software Formfinder beleuchtet und der Vergleich zwischen physischem und digitalem Modell angestellt, um eine grundlegende Einordnung der beiden Ansätze im Entwurfsprozess zu ermöglichen.

Physische wie digitale Formfindung haben ihre Vor- und Nachteile. Die Verbindung beider Methoden stellt vor allem für all jene, die sich dem Gebiet der Membrankonstruktionen erstmals annähern, eine Bereicherung dar und ist in dieser Arbeit nachvollziehbar dokumentiert. Der modulare Aufbau mit vorbereitenden Schritten und exemplarischen Grundformen erlaubt eine fokussierte Anwendung der jeweiligen Technik und bietet auch die Option zu vertiefenden Schritte oder alternativen Methoden.

Abstract

The design of membrane structures poses a particular challenge for architects. While computer programs do support the design of double curved surfaces, materiality is lost in the process. Membrane structures are characterized by load determined shapes, defined by the load case prestress. The physical model forms an essential means to comprehend the correlation between form – force – mass (as extensively demonstrated in the IL publications by Frei Otto's institute, and in particular in *Gaß, Siegfried. 1990. IL 25. Form, Kraft, Masse. 5. Experimente*). At the same time it enables a validation of form and functionality which cannot be reproduced to the same degree of quality by 3D computer simulation.
There are ample examples in the literature pointing towards the possibilities of experimental form-finding in physical models - a majority thereof trace back to Frei Otto and his groundbreaking developments starting in the 1950s. Yet there are no publications known to the author, documenting the modeling methods in easy to follow steps and with concrete instructions. The purpose of this paper is to offer a comprehensive guide for the utilization of modeling methods, serving as an introduction especially for those looking into the field of membrane constructions and physical models for the first time. The present paper builds upon the learnings of modeling methodologies as introduced by Vinzenz Sedlak at the University of Vienna [Sedlak 2012a]. He became familiar with these methods in 1979 at Frei Otto's institute and further developed these at the Lightweight Structures Research Unit at the University of New South Wales in Sydney, Australia.

The possibilities of modeling methods have been researched and further developed for contemporary needs of digitization, in order to make the advantages of physical models accessible as an intuitive introduction to the design of membrane structures.
An overview of various models of mechanically prestressed tents was created and equipped with practical instructions exemplifying the stocking model. Adaptations were developed building upon existing technical methods, helping increase efficiency and precision through simple and easily available means, such as the use of a cross-line laser for a touch free analysis of the model's curvature or by utilizing photogrammetric apps to create 3D models. Various strategies for the digitization of the form were evaluated and essential methods were documented, e.g., the definition of form through the principal section curves. Furthermore the principles of digital form-finding were explored by building upon the Formfinder software. A comparison between physical and digital models was conducted in order to support a foundational differentiation between both approaches in the design process.

Both physical and digital form-finding methods hold advantages and disadvantages. The linkage of the two methods, herewith documented in a comprehensive manner, will however prove enriching primarily for all those who are exploring the field of membrane structures for the first time. The modular build up of preparation steps and exemplary basic forms enables a focused application of the respective technique and offers options for in-depth steps or alternative methods.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis / Begriffe 8

Vorwort 9

1 Einführung 10

1.1 Geschichte des physischen Modells im modernen Membranbau 10

1.1.1 Historische Entwicklung 10

1.1.2 Frei Otto 11

1.1.3 Entwicklung des modernen Membranbaus 12

1.1.4 Verbreitung des Membranbaus 17

1.2 Relevanz des physischen Modells im digitalen Zeitalter 19

1.3 Übersicht zu Modellarten und Experimenten 21

1.3.1 Formfindungsmodelle 21

1.3.2 Generelle Modellarten und Experimente 23

2 Grundlagen der experimentellen Formfindung 26

2.1 Experimentelle Formfindungsmethoden im Membranbau 26

2.1.1 Gewebemodell 26

2.1.2 Seifenhautmodell 27

2.1.3 Gummihautmodell 28

2.2 Entwurfsprozess 29

2.3 Typologie relevanter Tragsysteme 30

2.3.1 Kategorisierung 30

2.3.2 Auswahl relevanter Tragsysteme zur Demonstration der Modell-Technik 32

3 Entwicklung der Entwurfsidee am Strumpf-Modell 33

3.1 Relevante Modell-Techniken zur Entwicklung der Entwurfsidee 33

3.2 Vorbereitung 34

3.2.1 Grundlegender Ablauf bei der Erstellung der Modelle 34

3.2.2 Grundlegende Modell-Technik 35

3.2.3 Material und Werkzeug 39

3.2.4 Arbeitsumgebung 48

3.3 Vorarbeiten zum Modellbau 51

3.3.1 Modell-Platte 52

3.3.2 Spann-Platte 54

3.3.3 Strumpf-Stoff 55

3.4 Modell-Technik 65

3.4.1 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche 66

3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring 72

3.4.3 Typ 3: Hochpunkt - Mast mit Buckel 82

3.4.4 Typ 4: Hochpunkt - Mast mit Rosette 83

3.4.5 Typ 5: Hochpunkt - Mast mit Augschlaufe 91

3.4.6 Typ 6: Hochpunkt - Mast mit Seil 96

3.4.7 Typ 7: Bogengestützt 105

3.4.8 Typ 8: Seilrand am Beispiel Mast mit Ring 115

4 Integration physischer und digitaler Methoden 118

4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell 118

4.2 Formerfassung mittels Hauptkrümmungen 120

4.2.1 Parallellichtmethode 121

4.2.2 Zentralprojektion 122

4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD 123

4.2.4 Analyse der Hauptkrümmungen 128

4.2.5 Rekonstruktion als digitales Modell 129

4.2.6 Umgang mit komplexen Formen 131

4.3 Formerfassung mittels Photogrammetrie 133

4.3.1 3D-Modell via App: 123D Catch 133

4.4 Digitales Modell mittels Computer-Simulation 137

4.4.1 Einführung 137

4.4.2 Formfinder 138

4.4.3 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche 141

4.4.4 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring 143

4.4.5 Typ 7: Bogengestützt 144

4.5 Erstellung eines Zuschnitts der Membran-Fläche 145

4.5.1 Grundlagen des Zuschnitts am physischen Modell 145

5 Schlussfolgerung 147

Quellenangaben 149

Literatur 151

Abbildungsverzeichnis 154

Abkürzungsverzeichnis / Begriffe

123D	123D Catch Smartphone App (Autodesk)
Blender	Blender Software (Blender Foundation)
EL	Entwicklungsstätte für den Leichtbau in Berlin
Formfinder	Formfinder Software (Formfinder Software GmbH)
IL	Institut für Leichte Flächentragwerke, Technischen Hochschule Stuttgart
ILEK	Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart (ehemals IL)
LSRU	The Lightweight Structures Research Unit, University of New South Wales, Sydney
Rhino	Rhinoceros CAD Software (Robert McNeel & Associates)
SDA	Structural Design Aid (LSRU)
TU-Wien	Technische Universität Wien

Begriffe im Zusammenhang mit den Steckbriefen der jeweiligen Modell-Typen (ab 3.4 Modell-Technik, S. 65)

Aufwand	Herstellungszeit (ohne Wartezeiten für das Trocknen von Klebestellen etc.)
Komplexität	Schwierigkeitsgrads (niedrig, mittel, hoch) als Indikation der nötigen Übung und Präzession, um die jeweiligen Schritte mit dem angestrebten Ergebnis umsetzen zu können. Je höher die Komplexität, desto größer ist auch die Gefahr von Abweichungen zur gewünschten Form durch Ungenauigkeiten.
Kosten	Verbrauchsmaterial (ohne Werkzeug, Klebstoffe etc.) zu handelsüblichen Preisen. Die Preisspanne ergibt sich aus den Einzelstückpreisen und den Preisen üblicher Packungsgrößen (bei Mindestabnahmemengen).

(i) Info	Text in Blau zeigt ergänzende Informationen an, die einem tiefergehenden Verständnis dienen oder alternative Optionen aufzeigen, die für die Ausführung der beschriebenen Technik nicht zwingend nötig, aber hilfreich sind.

Vorwort

Ziel dieser Arbeit ist, durch die Dokumentation der zur Entwicklung der Entwurfs-Idee relevanten Modellmethoden den Einstieg in den Bereich der Membrankonstruktion zu erleichtern und die Hemmschwelle zur Auseinandersetzung mit dem physischen Modell im Entwurfsprozess zu senken.

Benutzungsempfehlung

In den ersten beiden Kapiteln (1 Einführung, S. 10; 2 Grundlagen der experimentellen Formfindung, S. 26) wird das Hintergrundwissen zur experimentellen Formfindung beleuchtet - sowohl in geschichtlicher Hinsicht, als auch mit einem Überblick genereller Modellmethoden, die im Membranbau Relevanz haben.
Interessierte sowie auch im Modellbau Erprobte können hier Anregung für weitergehende Vertiefung zu dem Thema finden.

Das dritte Kapitel (3 Entwicklung der Entwurfsidee am Strumpf-Modell, S. 33) steigt direkt in den Modellbau ein und bietet alle nötigen Informationen, um die Vorbereitungen für den Modellbau zu treffen und den Materialbedarf abschätzen zu können.
Anhand der Schritt-für-Schritt-Anleitung kann die Umsetzung der Modell-Techniken erprobt werden, um zunächst Materialien und deren Verhalten in unterschiedlichen Anordnungen kennenzulernen. Graduell können diese Erfahrungen durch Anwendung erweiterter Methoden nach Bedarf vertieft und die Genauigkeit gesteigert werden.
Gutes und vor allem geeignetes Material und Werkzeug sind ein wesentlicher Faktor für eine erfolgreiche Umsetzung der Modell-Technik. Sobald ein Modell-Typ zur Umsetzung ausgewählt wurde, sollte daher in den Angaben der entsprechenden Modell-Technik (3.4 Modell-Technik, S. 65) das benötigte Material und Werkzeug festgestellt und vorbereitet werden. Der Abschnitt über Material und Werkzeug (3.2 Vorbereitung, S. 34) bietet einen Überblick sowie Empfehlungen zur Anwendung, um diese bei der Beschaffung berücksichtigen zu können.

Wurde die Form dann zur Zufriedenheit am Modell entwickelt, kann diese dann auf unterschiedliche Weise durch die in Kapitel Integration (4 Integration physischer und digitaler Methoden, S. 118) beschriebenen Methoden digitalisiert und zur Weiterbearbeitung aufbereitet werden.

Der Abschnitt zur digitalen Formfindung (4.4 Digitales Modell mittels Computer-Simulation, S. 137) gibt erste Anhaltspunkte für Anwendungsmöglichkeiten sowie grundsätzliche Unterschiede zwischen physischem und digitalem Ansatz der Formgenerierung.

1 Einführung

1.1 Geschichte des physischen Modells im modernen Membranbau

1.1.1 Historische Entwicklung

Modelle als Projektion eines geplanten Bauwerks spielen immer dann eine wesentliche Rolle, wenn im Entwurf der Erfahrungsbereich der „anerkannten Regeln der Baukunst“ sowohl in formaler als auch in konstruktiver Hinsicht verlassen wird, und somit überlieferte Proportionsregeln nicht bedenkenlos angewandt werden können. Wann die ersten Modelle zur Überprüfung architektonischer Ideen angewandt wurden, ist nicht bekannt. Es ist aber davon auszugehen, dass jedes realisierte Bauwerk als Modell für nachfolgende dient.
Am Beispiel der von Brunelleschi konstruierten Florentiner Domkuppel lässt sich die schrittweise Annäherung an ein neues Konstruktionsprinzip beim Vorstoß in neue Dimensionen erstmals belegen: Um den Nachweis zu führen, dass die Kuppel ohne Traggerüste gemauert werden kann, ließ er 1418 ein gemauertes Modell der projektierten Kuppel im Maßstab 1:8 bauen.
Den Beweis der Übertragbarkeit auf größere Bauwerke erbrachte er mit zwei kleineren Kuppeln, bevor er die Domkuppel aufmauern ließ.
Mit der ingenieurwissenschaftlichen Betrachtung gewinnt der Kraftfluss in einer Konstruktion an Bedeutung. Leonardo da Vinci stellt um 1500 Überlegungen zum Horizontalschub eines Bogens unter Last dar. Mit dem ersten überlieferten Belastungsversuch wurde von Philibert de l'Orme um 1550 die Tragfähigkeit von Bohlenbindern nachgewiesen.
Mitte des 19. Jahrunderts leitet Fr. Stehlin aus experimentell ermittelten Biegelinien eines schmiedeeisernen Bogens die zur Lastabtragung mit geringer Verformung geeignete Form ab.
Die von Ernst Carlipp Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Modelle mit eingefügten Schraubenfedern veranschaulichen die unter Last entstehenden Zug-, Druck-, Biege-, Schub-, und Torsionsbeanspruchungen [Gaß 1990: S. 1.8, 1].

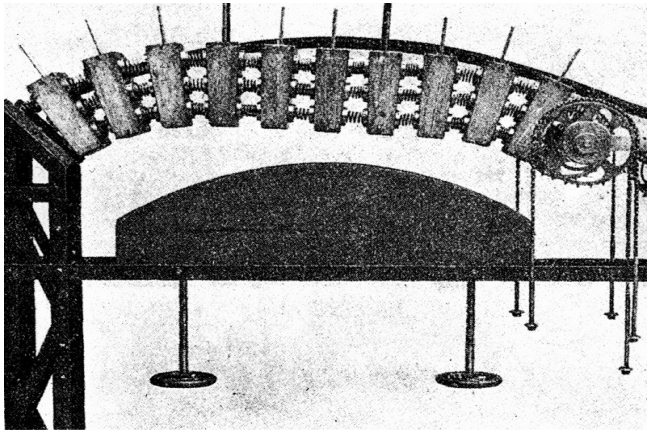

Abb. 1: Carlipp: Modelle mit Schraubenfedern

In der modernen Modellstatik werden die in einer Konstruktion wirkenden Kräfte über die Bestimmung von Verformungen an einem Modell ermittelt, dessen charakteristische Eigenschaften den Modellgesetzen entsprechend der projektierten Konstruktion ähnlich sind.
Heinz Isler entwickelte 1955 eine Formfindungsmethode für druckbeanspruchte Schalentragwerke, die mit elastischen Membranen und einer Last aus erhärtendem Material die flächige Hängeform erzeugt.
Mit Experimenten im Bereich der zugbeanspruchten Konstruktionen legt Frei Otto in den 50er Jahren die Grundlage für die Interpretation und Anwendung der in Selbstbildungsprozessen entstehenden Konstruktionen [Gaß 1990: S. 1.6, 5 f.].

1.1.2 Frei Otto

Frei Otto wurde 1925 in Chemnitz geboren und wuchs in einem liberalen Elternhaus auf. Ottos Eltern waren Mitglieder im Deutschen Werkbund und dessen Reformgedanken allgegenwärtig. Der Vorname „Frei“ war die Erfindung seiner Mutter, der Sohn sollte das „Frei-Sein“ schon im Namen tragen. Ursprünglich wollte Frei Otto wie sein Vater und Großvater auch Bildhauer werden. Auf der Handelsschule kam Otto durch seinen Lehrer mit dem Segelfliegen und dem Modellbau in Kontakt [Meissner und Möller 2015: S. 12, 3].

Frei Ottos frühe Begeisterung für das Fliegen entzündete sich an einer großen Fasanenfeder. Angeregt durch ihre Flugeigenschaften, baute er seine ersten Flugmodelle aus Balsaholz und Papier für Pfeil- und Schlitzflügel. Die Freude am Experimentieren, am Basteln und Modellbauen ist zu einer wesentlichen Antriebskraft seiner späteren Arbeit an Baukonstruktionen geworden. Diese stark ausgeprägten technischen Neigungen sind seit frühen Jahren mit einer ungewöhnlichen Beobachtungsgabe für Naturvorgänge verbunden.
Die Konstruktion von Segelflugzeugen ist eng verwandt mit Zelten: Hauchdünne Häute - Membranen - werden über ein extrem leichtes Gerippe gespannt; so erwarb sich Otto beim Segelfliegen bereits manche Kenntnisse von physikalischen Zusammenhängen und konstruktiven Eigenschaften, die ihm später bei der Entwicklung der Membranbauten sehr zugute kamen [Roland 1965: S. 1, 3 ff.].

Nach dem Abitur 1943 führte ihn sein Weg vom Segelflieger zum Wehrdienst als Flugzeugpilot und 1945, mit 20 Jahren, in eine zweijährige Kriegsgefangenschaft in einem Lager in der Nähe von Chartres. Hier fand Frei Otto Zeit zu erster theoretischer und autodidaktischer Beschäftigung mit den Baukonstruktionen. Den Anlass dazu gaben praktische Bauaufgaben im Lager, die unter primitivsten Bedingungen und mit möglichst geringem Materialaufwand zu lösen waren. Hier sind vielleicht die Ursprünge seiner Arbeiten über den Minimalaufwand für Baukonstruktionen zu suchen [Roland 1965: S. 1, 6; Meissner und Möller 2015: S. 12, 3].

Er befasste sich mit Baustatik und untersuchte viele Formen von Fachwerkträgern nach ihrer Wirtschaftlichkeit. Dabei stellte er immer wieder fest, dass das Materialvolumen um so geringer ist, je mehr Zugglieder im System vorhanden sind, wie zum Beispiel bei Fischbauchträgern und unterspannten Balken.
1948 nahm er das Studium der Architektur an der Technischen Hochschule Berlin wieder auf und vertiefte seine Forschung auf dem Gebiet der Zelt- und Seilnetzkonstruktionen. 1954 erschien mit seiner Dissertation „Das hängende Dach“ eine bahnbrechende Auseinandersetzung mit zugbeanspruchten Flächentragwerken [Roland 1965: S. 1, 6 ff.].

Im Zuge dieser Arbeit kam er mit dem Zeltbauer Peter Stromeyer in Kontakt und aus der gemeinsamen Arbeit entstanden die ersten Zeltdächer für die Bundesgartenschauen in Kassel 1955 und Köln 1957 sowie für die Interbau in Berlin 1957 und ebnete damit dem Membranbau den Weg zur anerkannten Bauform [Meissner und Möller 2015: S. 12 ff.].

1.1.3 Entwicklung des modernen Membranbaus

Den unmittelbaren Anstoß für seine weitere Arbeit erhielt Otto während einer Studienreise 1950 / 51 in New York im Ingenieurbüro von Fred N. Severud; dort lagen die Konstruktionszeichnungen für die von Novicki entworfene Raleigh-Arena [Dorton Arena in Raleigh im US-Bundesstaat North Carolina], das erste hängende Dach, mit dessen Bau 1952 begonnen wurde. In diesem Projekt waren bereits Ideen verwirklicht, die seinen eigenen Erkenntnissen und Bemühungen eng verwandt waren [Roland 1965: S. 1, 7] und es wurde zu einem Schlüsselwerk in Frei Ottos Schaffen [Meissner und Möller 2015: S. 12, 4].
Fast alle folgenden Bauten mit Seilnetzen dieser Zeit wurden von diesem Projekt beeinflusst. Ihr gemeinsames Konstruktionsmerkmal ist die Verwendung von nicht vorgefertigten Netzen mit ungleichen Maschen. Erst 1961 wurden für eine Hafenüberdachung in Bremen vorgefertigte Netze mit gleichgroßen Maschen vorgeschlagen, die in der Folge fast ausschließlich verwendet wurden [Bubner 1972: S. 4, 1].

Nach ersten theoretischen Untersuchungen gelang es Otto sehr schnell, die neuen Ideen durch Zelt-Versuchsbauten mit kleinen Spannweiten praktisch zu erproben und Erfahrungen zu sammeln. Es ist das Verdienst von Peter Stromeyer, des Mitinhabers der damals größten Zeltbaufabrik Europas, dass er klar erkannte, welche Möglichkeiten in der praktischen Auswertung der in Ottos erstem Buch dargestellten Ideen liegen. 1954 bahnte sich eine fruchtbare Zusammenarbeit an, die von Jahr zu Jahr intensiver wurde. Auf den reichen Erfahrungen der Großzeltabteilung von Stromeyer aufbauend, entstanden zahlreiche Leichtbaukonstruktionen, die dem Zeltbau neue Wege wiesen [Roland 1965: S. 1, 10]. Seine ersten Kontakte mit dem Zeltbau und Stromeyer schildert Frei Otto ausführlich in IL 16 - Zelte [Otto, Burkhardt, und Schmall 1976: S. 8 ff.].

Ab 1955 entstanden erste wichtige Versuchsbauten, wie der Musikpavillon auf der Bundesgartenschau in Kassel 1955. Hier wurden an Grundformen die ersten Erfahrungen mit den Prinzipien und Methoden des Membranbaus gesammelt [Roland 1965: S. 1, 11]. Mit dem Zeltdach über dem Tanzbrunnen in Köln 1957 wurde - obwohl es eine völlig neue Konstruktionsform darstellte - durch intensive Durcharbeitung aller Einzelheiten bereits in diesem frühen Entwicklungsstadium ein reifes und konsequentes Werk geschaffen.
Auf dem Gebiet der Seilnetz-Dachkonstruktionen war von Ingenieuren in aller Welt in den vorangegangenen zehn Jahren theoretisch wie praktisch sehr viel geleistet worden - auf dem Gebiet des Bauens mit dünnen Gewebemembranen war allerdings bisher noch in keinem anderen Land vergleichbare Ergebnisse erzielt worden - abgesehen von den hervorragend ausgeführten pneumatisch gespannten Membranbauten von Walter Bird in USA [Roland 1965: S. 1, 12 ff.].

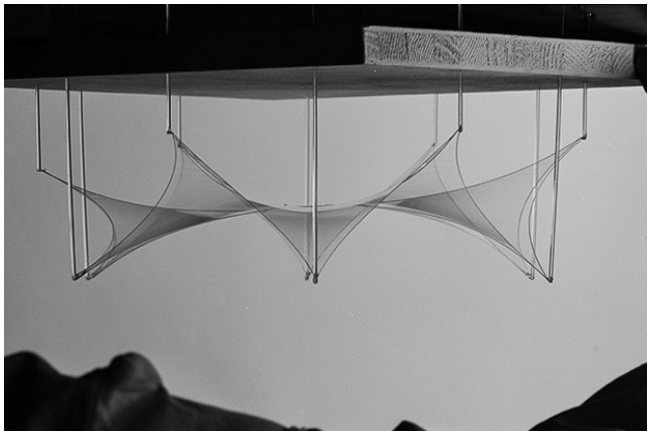

Abb. 2: Seifenhautversuch (Tanzbrunnen)

Modelle und Experimente als Grundlage der Entwurfsentwicklung

Um seine theoretische Entwicklungsarbeit in größerem Maßstab mit mehreren Mitarbeitern vorantreiben zu können, gründete Frei Otto 1957 aus eigener Initiative, ohne jegliche Unterstützung durch öffentliche Mittel, die „Entwicklungsstätte für den Leichtbau" in Berlin. Neben der Beschäftigung mit den Grundlagen des Leichtbaus (Konstruktionssysteme, Formanalyse, Belastungsversuche usw.) wurden mit großzügiger Unterstützung durch Peter Stromeyer zahlreiche Studien und Projekte durchgeführt [Roland 1965: S. 2, 4].

Für Frei Otto war die natürliche Selbstfindung der Form im physikalischen Modell Ausgangspunkt für Ideen des Entwerfens und die Elemente einer zukunftsweisenden „Natürlichen Architektur" [Gaß 1990: S. 0.7, 2].
Modelle und Experimente spielen eine wichtige Rolle in der Entwicklung architektonischer Entwürfe und in deren Umsetzung in realisierbare Konstruktionen. Neben der dreidimensionalen Darstellung architektonischer Ideen und Konzepte ist ihre Bedeutung vor allem in der Möglichkeit zu sehen, in der Entwicklung neuartiger Konstruktionen und ungewöhnlicher räumlicher Konfigurationen, die einen veränderten, von den Regeln der Tradition abweichenden Umgang mit Form und Material eröffnen, den materiellen Aufwand und den potentiellen Schaden im Falle eines Misserfolgs durch die maßstäbliche Verkleinerung zu begrenzen. Modell und Experiment ermöglichen die Vorwegnahme der gebauten Wirklichkeit unter realitätsnahen Bedingungen.
In diesen Experimenten, stellen sich die aus dem Kraftfluss resultierenden Formen neuartiger Konstruktionen von selbst ein [Gaß 1990: S. 0.14, 1].
Die unterschiedlichen Experimente, die als Analogmodelle im architektonischen Entwerfen und Konstruieren und zur Beschreibung der in Selbstbildungsprozessen entstehenden Formen zur Anwendung kommen, greift den enormen Fundus auf, der in der Arbeit Frei Ottos und seiner Teams seit Beginn der 1950er Jahre und seit 1964 am Institut für leichte Flächentragwerke der Universität Stuttgart und im Atelier Warmbronn angefüllt und ständig weiterentwickelt wurde [Gaß 1990: S. 0.15, 3].

Frei Ottos Arbeitsmethode zeichnete sich durch die folgenden zwei Aspekte aus [Roland 1965: S. 2, 8 ff.]:

- **Systemskizzen**
  Wenn sich Otto vornimmt, eine konstruktive Grundform zu untersuchen, so entstehen oft in wenigen Tagen mehrere hundert Systemskizzen, welche die Vielfalt der möglichen Additionen, Kombinationen und Variationen sichtbar machen.
- **Modellversuche**
  Viele der von Frei Otto entwickelten Konstruktionen sind mathematisch nur unter großen Schwierigkeiten, mit großem Zeitaufwand und auch dann meist nur näherungsweise zu erfassen. Alle Projekte und ausgeführten Bauten sind daher im Modell entwickelt worden, meist in der Reihenfolge:
  - Entwurfsmodell (kleiner Maßstab, aus Gummituch oder feinem Gewebe)
  - Messmodell (großer Maßstab, aus Fäden, Federn und Ketten, zur Messung der Höhenlinien und zum Aufmessen der Zuschnitte)
  - Statisches Messmodell (für Belastungsversuche)

Anwendung der Modellmethoden zur Entwurfsentwicklung

Komplizierte räumlich gekrümmte Konstruktionsformen wie sattelförmige Zelte sind auf dem üblichen Weg der Entwurfszeichnung nicht ausreichend genau zu entwickeln. Allein das Modell gibt die Möglichkeit, an allen Punkten ausreichende Flächenkrümmungen zu gewährleisten und eine Vorstellung von Form und Raum zu vermitteln. Die Forderung nach optimaler Materialausnutzung setzt bereits im Entwurfsstadium die annähernde Kenntnis der Spannungsverhältnisse voraus, die im Modellversuch aus Netzen durch eingebaute Federn oder mit hochelastischen Gummimembranen leicht zu prüfen und zu verändern sind. Das Modell kann so lange verändert werden, bis optimale statische und räumliche Bedingungen erfüllt sind [Roland 1965: S. 2, 11].

Die Entwurfsentwicklung und Herstellung des Eingangsbogens zur Bundesgartenschau von 1957 in Köln zeugt davon, wie sehr sich Frei Otto auf Modellversuche und Messungen zum Ausarbeiten der Konstruktionsform stützt [Roland 1965: S. 56, 1 f. Drew 1976: S. 15, 2].

Entwurfsmodell:
Die Form wurde an einem kleinen Versuchsmodell aus dünnem Stoff überprüft und diente als Grundlage für das Messmodell.

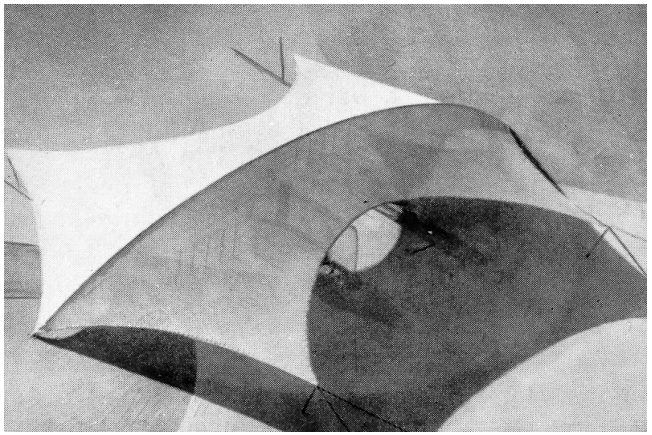

Abb. 3: Entwurfsmodell (1957)

Messmodell:
Das Messmodell wurde im Maßstab 1:50 auf einer präzisionsgeschliffenen Marmorplatte gebaut. Zweck dieses zweiten Modells war es, Aufschlüsse über den Vorspannungszustand in der Membran und die genaue Anordnung und Herstellung der Glasfaserstreifen, der Seile und des Bogens in unbelastetem Zustand zu erhalten. Das Messmodell bestand aus einem 1 mm dicken elastischen Stahldrahtbogen, versteift mit Fäden, die die Glasfasermembran darstellten. Daran wurden geeichte Federn zur Messung der Beanspruchungen befestigt. Jeder Querfaden stand für einen Gewebestreifen. Der Drahtbogen ruhte auf einer Plexiglasführungsschiene, so dass seine Ausrichtung überprüft werden konnte. Man führte ihn durch Löcher in kleinen Gleitgeräten mit Messmarken, damit er keine Buckel bildete, solange das Modell gebaut wurde. Die linearen Elemente des Belastungsmessmodells wurden genau vermessen, und die Ergebnisse wurden in einer Zeichnung festgehalten, die mit Fotografien des Modells verglichen wurde. Diese Daten wurden dann auf Durchschnittswerte gebracht.

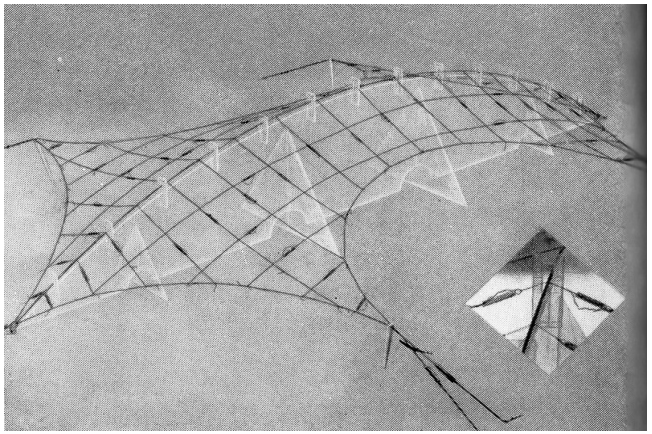

Abb. 4: Messmodell (1957)

Zuschnittsmodell:
Auf der Grundlage der ermittelten Daten wurde das dritte Modell für ein Viertel des Daches im Maßstab 1:25 gebaut. Das Profil der Randkrümmungen wurde aus Aluminiumblechen gebildet, die auf einer Marmorplatte befestigt wurden, und die Membranfläche wurde in Gips gegossen und mit Hilfe von Blechprofilen der Dachsegmente auf eine Genauigkeit von ±0,1 mm geschliffen. Um den Zuschnitt für die Membran vorzubereiten, wurden die Gewebestreifen auf der Oberfläche des Quadrantenmodells mit einem flexiblen Lineal eingezeichnet. Auf diese Weise konnte das Ausmaß der keilförmigen Überlappungen an den Geweberändern, die sich aus der räumlichen Krümmung der Dachfläche ergaben, genügend genau festgelegt werden.

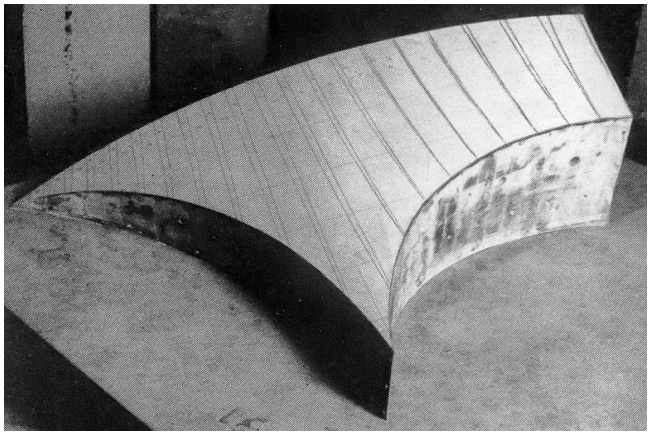

Abb. 5: Zuschnittsmodell (1957)

Vertiefende Untersuchungen am Modell:
1958 verfeinerte Frei Otto seine Methoden am Beispiel des Orchester-Schutzdaches auf der Interbau 1957, um über die Form, Belastbarkeit und Wirtschaftlichkeit ein genaueres Bild zu erhalten.
Diese ersten Messungen an der speziellen Form sind bezeichnend für Ottos Arbeitsweise und waren eine unbedingte Voraussetzung für die einwandfreie Ausführung der Membranbauten in dieser Zeit [Roland 1965: S. 74, 1 f.] - auch aus der Notwendigkeit heraus, da noch keine alternativen Möglichkeiten, wie Berechnungsmodelle oder Computer-Programme, zur Verfügung standen [Sedlak 2017a].

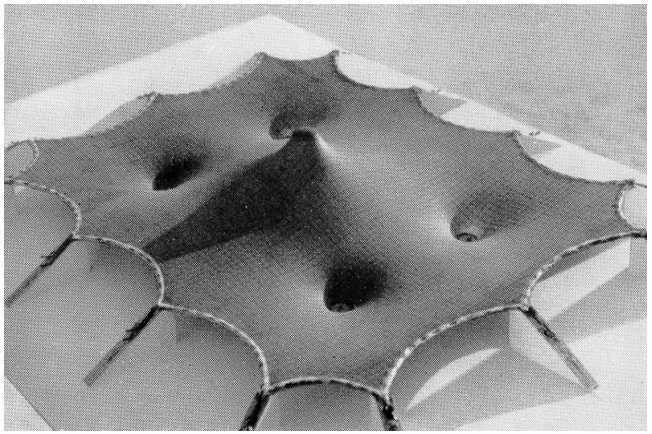

Abb. 6: Gummihautmodell (1958)

Die Untersuchungen geben Aufschluss über die Spannungsverteilung im Grundspannungszustand (d. h.: ohne äußere Lasteinwirkung) einer ursprünglich ebenen, später aufgebuckelten Membran, sowohl bei einem homogen elastischen Material wie Gummi als auch bei Geweben. Sie zeigen, welche Punkte beim Entwurf besonders zu beachten sind. Zur Erzielung möglichst genauer Messungen wurde eine Gummimembran von der Form des Orchester-Schutzdachs gespannt, auf deren Oberfläche im ebenen Ausgangszustand unter Normalspannung ein quadratisches Messliniennetz aufgezeichnet worden war.
Beim Aufbuckeln wurde beobachtet, dass sich jeder Punkt der Membran nur lotrecht bewegte, dass also die Grundrissprojektionen aller Messlinien erhalten blieben [Roland 1965: S. 74, 2].

Zur Ermittlung der Höhenlinien wurde ein Höhenlinien-Tastgerät gebaut. Es besteht aus einem dünnen Lot, das an einem auf der Zeichenfläche frei verschiebbaren Stahlrohrgalgen hängt.
Mit Hilfe der Höhenlinien wurden die Schnitte ermittelt und ein idealisierter endgültiger Höhenlinienplan zusammengesetzt. Anschließend wurden am Modell Belastungsversuche vorgenommen und die Verschiebung der Höhenlinien aufgezeichnet. Daraufhin konnte die Aussage getroffen werden, dass es sich bei der untersuchten Membrankonstruktion um eine der einfachsten Leichtkonstruktionen von großer Wirtschaftlichkeit handelt. Das Resultat dieser Modellversuche wurde bei der großen Membranhalle in Hamburg praktisch ausgewertet [Roland 1965: S. 74, 3 ff.].

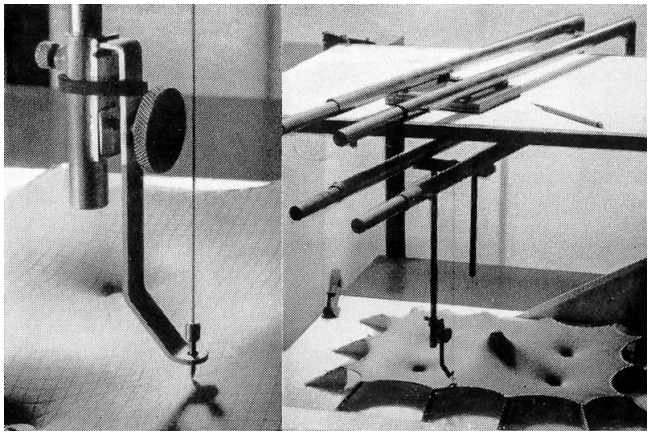

Abb. 7: Höhenlinien-Tastgerät (1958)

Auch auf fotografischem Wege können Höhenlinien mit hoher Präzision ermittelt werden, indem man ein Linienraster parallel zur Bezugsebene auf die Modellfläche projiziert (Modellversuch 1964). Dieses Verfahren ist unter bestimmten Bedingungen auch für Minimalflächen aus Seifenhäuten brauchbar [Roland 1965: S. 74, 4].

Frei Otto bemühte sich stets, die strukturelle Wahrheit der Realität mit geringen Mitteln zu erfassen. Er war ein vorzüglicher Fotograf und verwendete den Fotoapparat als wissenschaftliches Instrument zum Aufzeichnen von konstruktiven Daten. Für ein einziges Bauprojekt fertigte er zumeist Hunderte von Bildern, die er systematisch ordnete, damit später darauf zurückgegriffen werden konnte. So wurde die Entwicklung einer baulichen Idee vom ersten Seifenblasenmodell bis hin zum fertigen Gebäude in vielen Einzelheiten festgehalten. Dies gestattete Frei Otto, den Entstehungsprozess der Form zu analysieren, Vorzüge und Nachteile festzuhalten und damit sein Konstruktionswissen zu erweitern [Drew 1976: S. 10, 5].

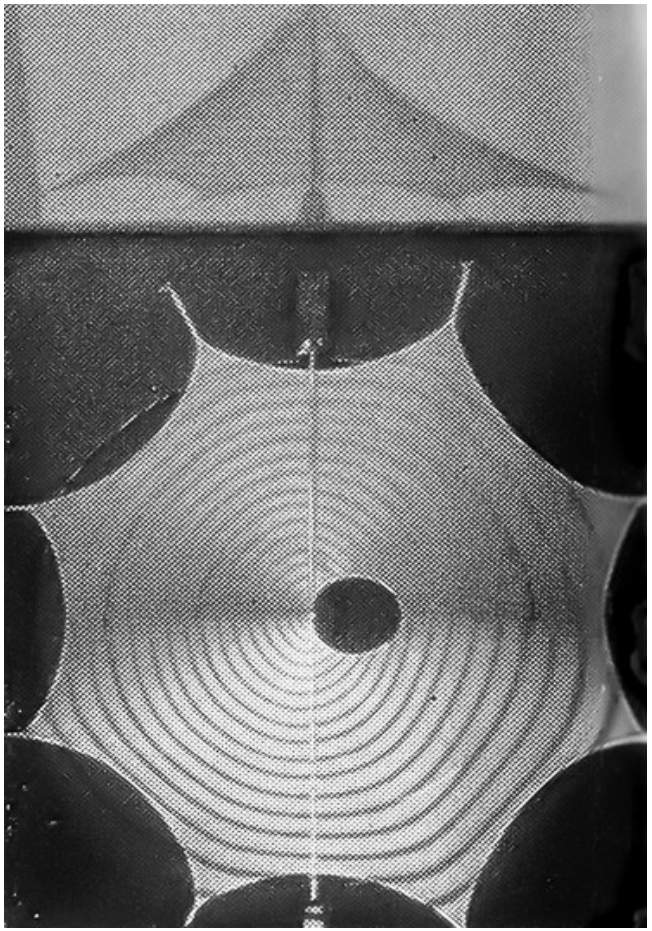

Abb. 8: Linienraster (Modellversuch 1964)

1.1.4 Verbreitung des Membranbaus

Es folgten ab 1964 die zwei ersten Großprojekte Frei Ottos, und gleichzeitig die bedeutendsten für die Entwicklung von Seilnetzkonstruktionen und Membrankonstruktion im Allgemeinen:

- Deutscher Pavillon für die Weltausstellung Expo 67 in Montreal
- Olympische Bauten 1972 in München (eine detaillierte Beschreibung findet sich in IL 8 - Netze in Natur und Technik)

Das Institutsgebäude Frei Ottos diente ursprünglich als Versuchsbau für den deutschen Pavillon auf der Expo 67 und wurde errichtet, um nach dem gewonnen Wettbewerb unklare Fragen zur Berechnung und Detaillierung zu untersuchen.
Die Realisierung der Dachlandschaft der olympischen Bauten in München war eine noch größere Herausforderung und Frei Otto sagte dem Auftrag, der auf dem Wettbewerbs-Entwurf von Günter Behnisch basierte, erst zu, nachdem er sich durch die Modellversuche sicher war, dass es machbar wäre [Hennicke 2015].

Um die Machbarkeit einer derart weitgespannten Seilnetzkonstruktionen abschätzen und planen zu können, mussten die vorhandenen Modellmethoden verfeinert und genaue Messtechniken entwickelt werden. Die dabei entwickelten Methoden dienten als Basis für eine Verbreitung des Membranbaus durch die vielen an der Forschung und Entwicklung Beteiligten, die diese Methoden aufnahmen und später an eigenen Projekten anwendeten und weiterentwickelten [Sedlak 2017a].

Durch die Unterstützung von Fritz Leonhardt - der ihn auch an die Universität Stuttgart geholt hatte - war Frei Otto weitgehend von der Lehre befreit und konnte sich voll der Forschung widmen. Durch umfangreiche Forschungsförderung war er in der Lage, über die Jahre hunderte von Mitarbeiter zu beschäftigen und so nicht nur natürliche Formen und deren Entwicklung zu erforschen, sondern auch wesentlich zur Verbreitung des Wissens um Membrankonstruktionen beizutragen [Hennicke 2015].

Akademische Entwicklungen

1968 kam Jürgen Hennicke an das IL und war später als Stellvertreter Frei Ottos maßgeblich in die Entwicklungen am Institut eingebunden. Nach der Emeritierung von Frei Otto und der Übernahme durch Werner Sobek im Jahr 1995 behielt er eine tragende Rolle bei der Auseinandersetzung mit den „natürlichen Konstruktionen“ und setzt sich weiterhin engagiert in unzähligen Vorträgen, Workshops und Lehrveranstaltungen dafür ein, die Innovationen Frei Ottos und die am IL entwickelten Methoden zugänglich zu machen und zu verbreiten.
Jürgen Hennicke gibt sein Wissen auch an der TU-Wien im Rahmen des Moduls "Experimenteller Hochbau" weiter und war auch in den Aufbau des Master Lehrgangs Membrane Lightweight Structures an der TU-Wien (seit 2017 an der Donau-Universität Krems) beteiligt [mls.tuwien.ac.at 2017].

Nicht nur am IL wurden diese Methoden angewandt und weiterentwickelt. Vinzenz Sedlak brachte nach seiner Mitarbeit am IL 1979 diese Techniken an die University of New South Wales (UNSW) in Sydney und etablierte durch die Gründung der Lightweight Structures Research Unit (LSRU) die Weiterentwicklung und Verbreitung dieser Leichtbaumethoden [Sedlak 2017a]. Neben Versuchsbauten und der praktischen Arbeit am Modell war die Dokumentation des Wissens ein wichtiger Beitrag zur Vermittlung des Leichtbaus. Aus den Forschungsergebnissen - das Archiv dazu befindet sich heute in Wien - wurde schon früh das Structural Design Aid (SDA [Sedlak 2017b]) entwickelt. Dieses beinhaltet eine Datenbank mit wissenschaftlich untersuchten Projekten und Kategorisierungen (mit Filtermöglichkeiten nach Form, Tragwerkstyp, Material, etc.) sowie Visualisierungen des Tragverhaltens von Tragsystemen. Zwischen 2002 - 2005 wurde die SDA im Rahmen eines Austausches zwischen der UNSW und der TU-Wien weiterentwickelt. Daraus ging auch eine Arbeit zur visuellen Kategorisierung der Tragwerksform hervor (Jurewicz, Philipp. 2005. *Building shape ontology : organising, visualising and presenting building shape with digital tools*. TU-Wien). Die Projekt-Datenbank sowie das Kategorisierungssystem wurde in der Folge in den Formfinder (ein von Robert Roithmayr entwickelte Software zu Formfindung von Membrankonstruktion [Roithmayr 2017]) übernommen.

Ab 1999 wurden die an der LSRU weiterentwickelten Modellmethoden durch Vinzenz Sedlak in verschieden Lehrveranstaltungen an der TU-Wien eingeführt. Diese Lehrveranstaltungen am Institut für Architekturwissenschaften - Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau dienten als primäre Grundlagen zur Entwicklung dieser Arbeit und der dokumentierten Modell-Techniken. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang [tiss.tuwien.ac.at 2017]:

- Tragwerksentwicklung am Modell
- Wahlseminar Leichtbau
- Entwurfs-Übungen zum Thema Leichtbau und Membrankonstruktion

Vor allem die Unterlagen der im Rahmen dieser Lehrveranstaltungen durchgeführten Modellbau Workshops waren wichtige Quellen zur konkreten Umsetzung der Modell-Technik. Diese beinhalten Angaben zum benötigten Material und Werkzeug sowie Anleitungen zum Modellbau in textueller Form [Sedlak 2012c].
Neben den Vorlesungsunterlagen wurden auch Berichte der LSRU zur Verfügung gestellt, die Modellmethoden für mechanisch vorgespannte Membrankonstruktion, aber auch für pneumatische Konstruktionen dokumentieren:

- Membrane Structures & Application Proposal: Faculty Common Room - Course Report, Surface & Spatial Structures A, 1980
- Pneumatic Membrane Cushion Prototype - Course Report, Surface & Spatial Structures B, 1979

1.2 Relevanz des physischen Modells im digitalen Zeitalter

Für die skizzenhafte Formulierung und Überprüfung einer Entwurfsidee eignen sich sogenannte Entwurfsmodelle, die ohne zeitaufwendige Detailarbeit die grundsätzliche Konzeption des Entwurfs vermitteln und realitätsnah die formbestimmenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Formgenerierung wirksam werden lassen. Weiters lassen sich die Funktion einer projektierten Konstruktion, insbesondere Montage- und Bewegungsabläufe kinematischer Konstruktionen, in entsprechenden Modellen überprüfen, die sich lediglich im Maßstab von realitätsgetreuen Prototypen unterscheiden [Gaß 1990: S. 0.20, 2].
Das bedeutet, dass auch die vereinfachte Abbildung in kleinerem Maßstab bei ähnlichen Materialien (biegeweiche Membran, biegesteife Unterstützungen etc.) vergleichbare Ergebnisse liefert, aus denen Rückschlüsse auf das Tragverhalten des Systems gezogen werden können. Diese Untersuchungen haben experimentellen Charakter und basieren auf dem gleichen Einschätzungsvermögen, das wir tagtäglich anwenden, um physikalische Zusammenhänge zu erkennen. Aus der Beobachtung, dem Test und dem Vergleich lernen wir und können so intuitiv Abschätzungen treffen. Was die Augen nicht sehen - Spannungen - können wir mit den Fingern spüren. Auf diese Weise können wir direkt und mit allen unseren Sinnen die Entwurfsidee in der uns gewohnten physischen Umgebung entwickeln, ohne uns in abstrakte virtuelle Realitäten begeben zu müssen, die unserer gewohnten Wahrnehmung oder Haptik nicht entsprechen.

Die Generierung doppelt gekrümmter Flächen am Computer ist heute durchaus beherrschbar und vielfältig verfügbar. Allerdings ist die Umsetzbarkeit der Formen - besonders bei Membrankonstruktionen oft eingeschränkt. Nicht alle Formen, die sich am Computer erstellen lassen, können auch tatsächlich gebaut werden. Komplexere Tragsysteme wiederum sind nicht mit jedem Programm darstellbar.
Beim Versuch, sich nur über digitale Hilfsmittel dem Entwurf von Membrankonstruktionen anzunähern, besteht einerseits die Gefahr, dass technischen Limitationen bei der Darstellung von Tragsysteme die Kreativität bei der Entwicklung der Entwurfsidee einschränken. Andererseits können potente Spezialprogramme im Membranbau alle möglichen Formen berechnen, sind aber meist für die Verwendung durch eingeschulte Tragwerks-Ingenieure ausgelegt und erschließen sich daher nicht unbedingt sofort dem Architekten, der vor allem seine Entwurfsidee entwickeln und eine konkrete Form geben will - und dies möglichst intuitiv ohne die Abstimmung unzähliger Parameter.

Programme, die auf eine möglichst direkte „zeichnerische“ Generierung der Form ausgelegt sind, kommen dem Architekten hier stark entgegen: z. B. der Formfinder [Roithmayr 2017]: geschlossene Polygonzüge werden auf einer Zeichenebene als Begrenzung der Membran-Fläche aufgezeichnet; die einzelnen Punkte können in der Ebene sowie vertikal mit dem Eingabegerät direkt verschoben werden. Solche Abläufe, die dem Skizzieren auf Papier ähnlich sind, erlauben einen raschen Einstieg in die Nutzung.
Die Verwendung dieser Programme hat ihre Vorzüge und ist besonders hilfreich und sinnvoll in der tieferen Analyse und Ausarbeitung der Entwurfsidee. Allerdings ändert dies nichts an dem grundsätzlichen Unterschied zwischen Simulation und Realität und der Problematik, die sich daraus für den Einsteiger in das Gebiet der Membrankonstruktion ergibt.

Ein generelle Herausforderung beim Entwurf von Membrankonstruktionen stellen deren statischen Eigenschaften dar, die sich aus dem biegeweichen Material ergeben. Membran und Seile nehmen nur Zug auf und verhalten sich unter Belastung dynamisch. Je nach Konstruktion kann es zu erheblichen Änderungen in der Form kommen und die Form selber kann nicht frei gewählt werden, sondern definiert sich über eine Fläche, die permanent unter Spannung stehen muss, um stabil zu bleiben, und den Unterstützungen, zu denen die Kräfte aus dieser Fläche geleitet werden.

Um Membrankonstruktionen effizient entwerfen zu können, ist also ein Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen der vorgespannten Membran-Fläche und der Positionierung der Unterstützungen wichtig sowie der sich daraus ergebenden Krümmungen in der Fläche und deren Einfluss auf die Kräfte, denen das Tragwerk und in weiterer Folge die Unterstützungen standhalten müssen.

Eine computergestützte Generierung von Membrankonstruktionen kann zwar die statisch korrekte Form berechnen - allerdings ist der Weg dorthin oft nicht selbsterklärend und voller potentieller Fehlerquellen. Eine Computer-Simulation ist nicht automatisch richtig sondern hängt auch von der korrekten Benutzung ab und kann dem Einsteiger in die Materie ein intuitives Verständnis physischer Zusammenhänge kaum näher bringen.
Auch am physischen Modell können Fehler gemacht werden. Allerdings deutet schon der experimentelle Charakter dieses Zugangs an, dass es sich um einen Prozess handelt, aus dem gelernt werden kann und soll.
Georg Vrachliotis beschreibt die Bedeutung des physischen Modells folgendermaßen: „Es [handelt] sich um gebaute Denkmodelle, in denen sich Wissen und Erkenntnis durch die Formfindungsprozesse gewissermaßen selbstgenerieren“ [Sigmund 2016].

1.3 Übersicht zu Modellarten und Experimenten

Für die unterschiedlichsten Entwurfsaufgaben steht eine Vielzahl an Modellarten und Experimenten zur Verfügung.
Modelle erfassen im allgemeinen nicht alle Merkmale des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur die zur Beurteilung der untersuchten Eigenschaften und Zusammenhänge als relevant erscheinenden, dies bedarf aber einer gewissenhaften Auswahl der abzubildenden Merkmale, um Fehlinterpretationen vorzubeugen [Gaß 1990: S. 1.2, 4]. Durch die schrittweise Konkretisierung der Aufgabe und ihrer Lösung trägt das Modell zur Aufwands- und gegebenenfalls auch zur Schadensbegrenzung bei. Die Reduzierung im Maßstab und durch die im Modell mögliche Konzentration auf Einzelaspekte lassen sich der Aufwand an Material und Zeit erheblich reduzieren und die Folgen des geplanten Handelns praxisnah überprüfen [Gaß 1990: S. 6.2, 1].

1.3.1 Formfindungsmodelle

Formfindungsmodelle dienen in erster Linie der schrittweisen und experimentellen Annäherung an eine Form, die nicht beliebig angenommen werden kann, sondern durch die Randbedingungen beeinflusst und kontrolliert werden muss. Es handelt sich also um ein System, das unter dem Einfluss bestimmter Randbedingungen und Kräfte in einen mechanischen Gleichgewichtszustand relaxiert und dabei eine selbstgebildete Form annimmt [Gaß 1990: S. 0.7, 2]. Mit dem Fortschritt im Entwurfsprozess erhöhen sich Maßstab sowie Genauigkeitsanspruch [Sedlak 2012a].

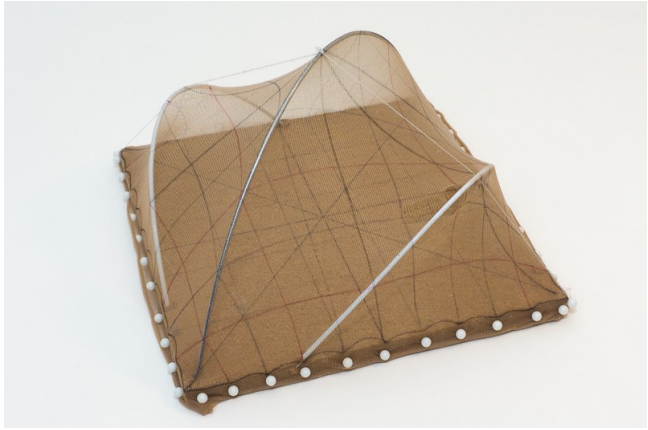

Abb. 9: Vorentwurfsmodell

Abb. 10: Entwurfsmodell

Vorentwurfsmodell

- Dient der Entwicklung der Entwurfsidee zur Überprüfung der Form mit reduziertem Genauigkeitsanspruch.

Entwurfsmodell

- Das Entwurfsmodell soll vor allem die architektonische Wirkung und Funktion des Entwurfs darstellen und dabei realitätsnah die formbestimmenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Formgenerierung wirksam werden lassen, muss dabei aber nicht die nötige Präzession eines Messmodells erreichen [Gaß 1990: S. 0.20, 2].

Tragwerksmodell

- Zur Überprüfung und Verdeutlichung der statischen und konstruktiven Funktionalität des Tragwerks.

Abb. 11: Tragwerksmodell

Spannungsmodell / Messmodell

- Überprüfung der Entwurfsidee in maßstäblichen Material- und Kräfteverhältnissen (vor allem im Bereich der Seil-Netze).

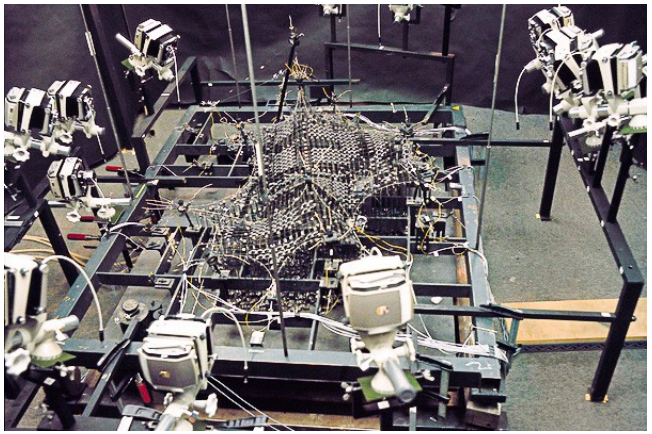

Abb. 12: Messmodell

Zuschnittsmodell

- Dient zur Erstellung des Zuschnittmusters auf Basis einer zuvor im Formfindungsprozess definierten Form. Um auf der Oberfläche Markierungen aufzeichnen zu können und dabei die Form nicht zu verändern, sollten elastische Flächen z. B. mit Fixierlack stabilisiert werden.

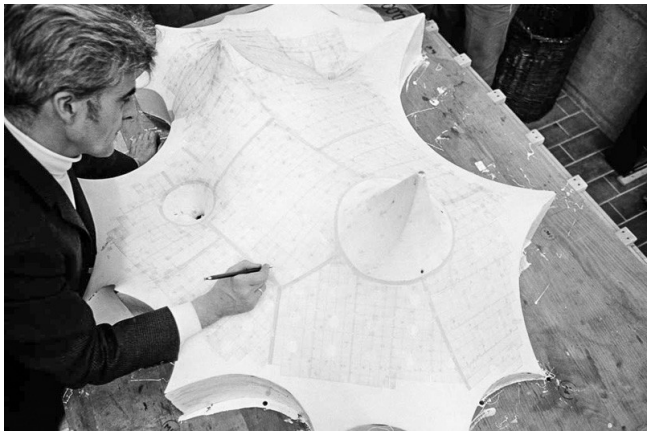

Abb. 13: Zuschnittsmodell

1.3.2 Generelle Modellarten und Experimente

Detailmodell

- Entwicklung und Überprüfung von Detaillösungen - vor allem, um deren räumliche Funktionalität und Integration bzw. Montage am Tragwerk zu bewerten.

Windkanalmodell

- Wichtig für eine effiziente Bemessung der Druck- und Zugelemente (aufgrund der tatsächlichen Lastverteilung) und damit verbundenen Materialeinsparungen. Da dieses Verhalten schwer am PC simulierbar ist, spielt diese Art der Untersuchung am Modell immer noch eine wichtige Rolle bei der Optimierung von Tragwerken - wird aber wegen des hohen Aufwands und der damit Verbundenen Kosten eher bei Großprojekten durchgeführt.
- Auch für Membrankonstruktionen werden hierbei meist biegesteife Materialien verwendet, da nicht die Verformung sonder der Winddruck gemessen wird.
  Zunächst wird vom Tüll-Modell (Maßstab 1:100) ein Gipsabdruck angefertigt und durch Tiefziehen das Windkanalmodell als dünne Schale erstellt.
  2 dieser Schalen werden übereinandergelegt, um dazwischen die Schläuche für die Messung der Druckunterschiede zu verlegen.
  Gemessen wird der Winddruck unter sowie über der Form (unterer + oberer Winddruck = Gesamtwinddruck).
  Durch verdampfendes Trockeneis kann das Strömungsverhalten sichtbar gemacht werden.
  [Sedlak 2012a]

Funktionsmodell

- Ein Beispiel ist die Überprüfung von Montageabläufen und Logistik am Montagemodell.
- Für die Realisierung von Konstruktionen, die zur Erfüllung neuartiger Aufgaben dienen, kommen Modelle zum Einsatz, die die Erfüllung der an die Hauptausführung gestellten Aufgabe in verkleinertem Maßstab simulieren, den materiellen und zeitlichen Aufwand der Entwicklung reduzieren und so rasch zur Bestätigung oder Widerlegung einer Arbeitshypothese führen. Die strenge Ähnlichkeit zwischen Modell und Hauptausführung muss nicht immer gegeben sein, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Im Bereich kinematischer Konstruktionen haben sich Funktionsmodelle bewährt, wobei die modellstatischen Ähnlichkeitsgesetze eingehalten werden müssen, wenn die Funktionsfähigkeit sehr wesentlich durch die Dimensionen der einzelnen Elemente und ihre relative Steifigkeit bestimmt werden. Zur Untersuchung von Phänomenen, die aus dem Zusammenwirken unterschiedlicher Einflussgrößen resultieren, kommen analoge Modelle zur Anwendung, die Selbstbildungsprozesse zur Lösung von Anordnungsproblemen nutzen [Gaß 1990: S. 6.3, 3].

Prototyp

- Prototypen dienen wie Funktionsmodelle der Überprüfung von Arbeitshypothesen, sind aber Modelle im Maßstab 1:1, die alle Anforderungen, die an die Konstruktion gestellt werden, erfüllen, auch wenn diese nicht Gegenstand der Untersuchung waren - das heißt, sie entsprechen allen Gesetzen der strengen Ähnlichkeit. In diesem Sinn ist jedes realisierte Gebäude, das neuartige Elemente zur Lösung funktionaler Anforderungen zur Anwendung bringt, Prototyp für nachfolgende Entwicklungen [Gaß 1990: S. 6.3, 4].

Sonne-Schatten-Gerät - Ermittlung der Verschattung

- Wesentliches Entwurfskriterium unter Gesichtspunkten der Energiebilanz eines Gebäudes ist dessen Orientierung zur Sonne und der Grad seiner Verschattung. Je nach Standort wird klimabedingt ein relativ hoher Anteil an Energieeinstrahlung oder ein entsprechender Grad an Verschattung gewünscht. Für komplexe Gebäudeformen ist die zeichnerische Ermittlung der Verschattungsflächen relativ aufwendig. Die kontrollierte Anstrahlung eines Modells unter Verwendung von Sonnen- oder 'parallelem' Licht führt zu scharf gezeichneten Schatten, wobei die geographische Breite des Standortes, die Jahres- und die Uhrzeit mit Hilfe eines künstlichen Himmels mit einem wandernden Scheinwerfer oder durch die entsprechende Orientierung des Modells zur Lichtquelle simuliert werden kann [Gaß 1990: S. 6.2, 4].

Modellstatik - Untersuchungen zum Tragverhalten am Modell

- Die Bedeutung modellstatischer Untersuchungen wurde mit der Entwicklung leistungsfähiger Rechner, die zur Verarbeitung komplexer Finit-Element-Programme in der Lage sind, reduziert. Sie finden in der Entwicklung mathematischer Modelle zur Überprüfung der im Rechner generierten Ergebnisse, und zur Ermittlung der physikalischen Grundlagen mathematischer Modellierung weiterhin Anwendung. Aufgrund ihrer großen Anschaulichkeit - insbesondere dann, wenn durch Materialgleichheit zwischen Modell und Hauptausführung eine große Ähnlichkeit und damit die direkte Übertragbarkeit gewährleistet ist - sind sie zur Entwicklung eines statisch-konstruktiven Verständnisses von großer Bedeutung [Gaß 1990: S. 6.3, 1].

Materialprüfung

- In der Entwicklung von Leichtbaukonstruktionen, die einen minimierten Aufwand an Material zur Lösung einer konstruktiven Aufgabe benötigen, kommt dem Wissen über die Materialeigenschaften besondere Bedeutung zu. Die Ermittlung der Kennwerte, die das Verhalten des Materials unter Last beschreiben, muss unter realistischen Bedingungen vorgenommen werden. Anhaltswerte lassen sich aus einfachen, mit geringem Aufwand realisierbaren Untersuchungen ableiten. Diese können im Einzelfall wesentlich aussagekräftiger sein als die mit allgemeiner Verbreitung eines Materials üblichen Veröffentlichungen von standardisierten Messergebnissen durch die Hersteller oder die in einer Norm festgelegten Mindeststandards für Kenndaten von

Materialien. Diese Experimente haben große Ähnlichkeit mit den Untersuchungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Konstruktionen, wobei hier aber nicht nach der Last unter der eine Konstruktion versagt, gesucht wird, sondern deren langfristiges Verhalten unter einer Nutzlast, die im allgemeinen wesentlich geringer als die Versagenslast ist, analysiert wird [Gaß 1990: S. 6.3, 2].

2 Grundlagen der experimentellen Formfindung

2.1 Experimentelle Formfindungsmethoden im Membranbau

2.1.1 Gewebemodell

Gewebemodelle umfassen eine Gruppe von Formfindungsmodellen, die mit unterschiedlichen Stoffen oder Netzen hergestellt werden.

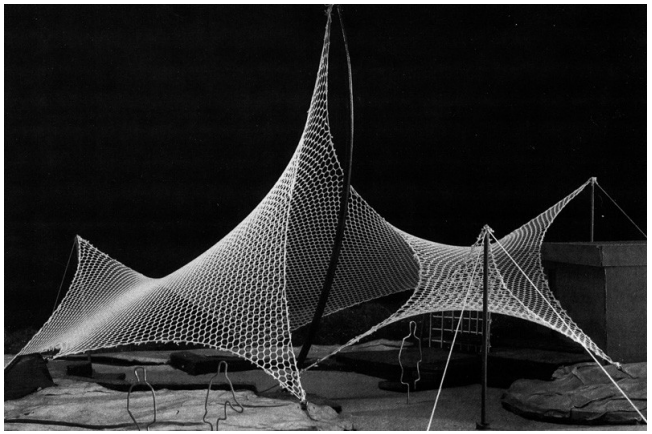

Abb. 14: Sechsecknetz-Modell

Elastische Stoffe

Zur Entwicklung der Entwurfsidee werden hauptsächlich elastische Stoffe verwendet, die die Bildung von doppelt gekrümmten Flächen ohne Zuschnitt der Membran erlauben. Dazu zählen Gewirke wie der Strumpf-Stoff oder Tricot-Stoff / Elastan.

Geschlossene Gewebe

Auch homogene Stoffe erlauben durch die Winkelverschiebung zwischen den beiden Webrichtungen (Kette und Schuss) die Ausbildung doppelt gekrümmter Flächen, allerdings können mit diesem Material - im Gegensatz zu den elastischen Stoffen - durch deren Steifigkeit sehr stark gekrümmte Flächen ohne Zuschnitt nur schwer oder gar nicht umgesetzt werden [Sedlak 2012a].

Offenmaschige Gewebe

Netze wie Gittertüll werden aufgrund deren unterschiedlichen Eigenschaften in der Regel nicht zu Formfindung für homogene Membranen verwendet. Durch deren ausgeprägte Fähigkeit zur Winkelverschiebungen zwischen den Gewebe-Achsen können allerdings vielfältige Formen und starke Krümmungen darstellt werden. Ein wichtiges Kriterium dieser Netze ist die freie Verschieblichkeit in den Knoten - also ohne steife Verbindung zwischen den Gewebe-Achsen [Hennicke 2012].

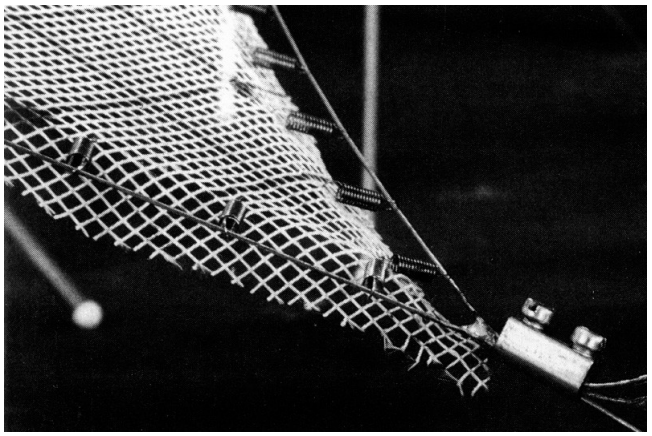

Abb. 15: Detail eines Gittertüll-Modells

Das Gittertüll-Modell wird im fortgeschrittenen Stadium des Entwurfs dafür verwendet, um an der vorgefundenen Form die Bedingungen zur Herstellung aus textilen Membranen zu überprüfen. Dabei wird die Form des quadratmaschigen Gittertülls so optimiert, dass über die Fläche verteilt möglichst wenige Abweichungen zum rechten Winkel in den Knoten auftreten [Gaß 1990: S. 7.8, 1 ff.].

Sechsecknetz

Das Sechsecknetz- oder Sechsecktüll-Modell eignet sich zur Ermittlung der Form unter kontrollierten Spannungsbedingungen in der Fläche. In den dreiarmigen Knoten stellt sich unter einem Kräftegleichgewicht ein Winkel von 120 ° der Arme zueinander ein. Durch die Winkeländerung können Rückschlüsse auf die Spannungsverteilung in der Membran angestellt werden [Gaß 1990: S. 4.6, 1 ff.].

2.1.2 Seifenhautmodell

Seifenhäute bilden das physikalische Analogon zur Minimalfläche. Sie sind gekennzeichnet durch eine konstante Oberflächenspannung.
Sie bilden daher eine interessante Möglichkeit, Formen mit günstigen Spannungseigenschaften in der Membran-Fläche zu untersuchen.
Allerdings sind nicht alle Formen vom Gewebemodell in die Seifenhaut übertragbar [Gaß 1990: S. 7.6, 2].

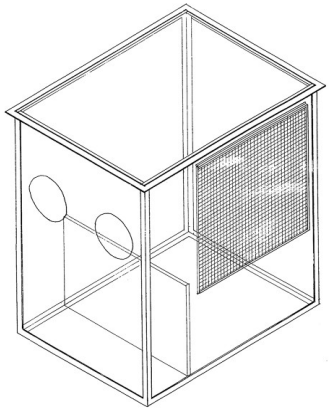

Abb. 16: Seifenhautgerät der LSRU

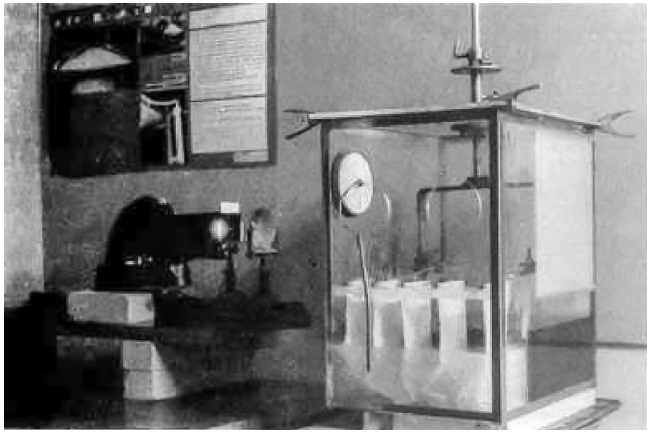

Abb. 17: Seifenhautgerät der LSRU

Außerdem bedarf das Erzeugen einer relativ stabilen Seifenhaut, die sich zur Formerfassung (durch Fotografieren) eignet, eines relativ hohen Aufwands.
Das Seifenhautgerät der LSRU soll als rundum fast komplett geschlossene Box einerseits durch aufgehängte Tücher eine günstige Luftfeuchtigkeit erzeugen und andererseits eine Führung und Fixierung des Modells sowie die nötige Ausleuchtung für das Abfotografieren ermöglichen [Sedlak 1979].

Abb. 18: Seifenhautgerät (TU-Wien)

Abb. 19: Seifenhautgerät (Absenkvorrichtung)

Aufgrund dieser Vorgaben wurde für die Lehrveranstaltung Tragwerksentwicklung am Modell an der TU-Wien ein Seifenhautgerät entwickelt (S. a. Bericht zur Tragwerksentwicklung am Modell [Sedlak 2012b] sowie Bach, Burkhardt, und Otto 1988, IL 18 - Seifenblasen).

2.1.3 Gummihautmodell

Das Gummihautmodell findet hauptsächlich im Bereich der pneumatischen Konstruktionen Anwendung, die durch ihre besonderen Eigenschaften eine eigene Untergruppe der Membrankonstruktionen darstellen.

Die grundlegende Eigenschaft der pneumatischen Konstruktionen liegt in der flächigen Unterstützung der Membran durch Über- oder Unterdruck. Durch die gleichmäßige Druckverteilung über die gesamte Fläche entstehen gleichmäßige Krümmungen in der Membran-Fläche. Dabei wirkt der Druck immer senkrecht zur Oberfläche. Diese klaren Eigenschaften ermöglichen auch eine Annäherung an die Form aufgrund einfacher geometrischer Beziehungen [Hennicke 2012].

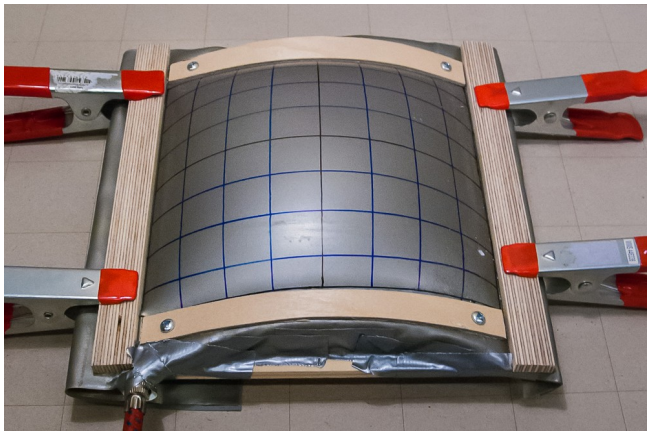

Abb. 20: Gummihaut-Versuch

Bei der experimentellen Formfindung am Modell wird - analog zu der Methode an den Gewebemodellen - die Form durch die Randbedingungen definiert bzw. kontrolliert. Dazu wird die Gummihaut an einem Rahmen luftdicht befestigt und aufgeblasen. Die Form kann dann z. B. durch Einschnürungen noch weiter beeinflusst werden, um die Krümmungen in der Oberfläche zu erhöhen und dadurch die Spannung in der Membran zu senken.

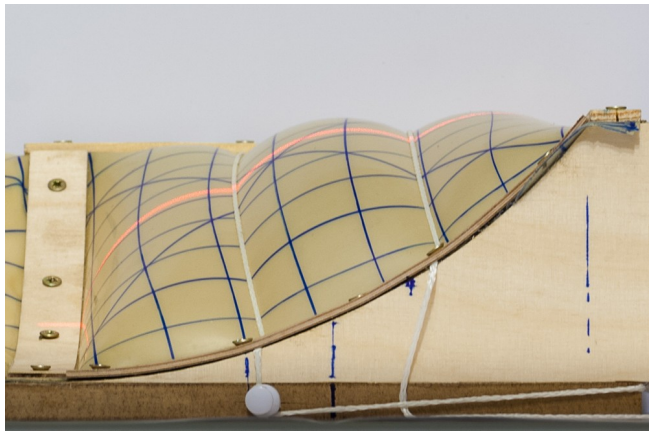

Abb. 21: Kissen mit Seilunterstützung

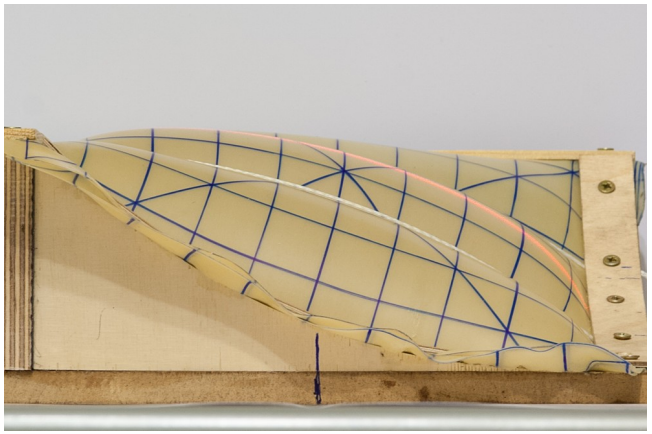

Abb. 22: Kissen mit Seilunterstützung

Um die Form zu fixieren, kann das Modell mit Gips gefüllt werden. Das Gipsmodell eignet sich gut, um die Form zu digitalisieren oder den Zuschnitt für die Membran anzufertigen.
[Sedlak 2012a; 1979: S. 2.3]

S. a. Bericht zur Tragwerksentwicklung am Modell [Sedlak 2012b].

Abb. 23: Gummihautmodell mit Gips-Füllung

Abb. 24: Gipsmodell der Kissen-Oberseite

2.2 Entwurfsprozess

Die Einflussfaktoren auf einen gelungenen Entwurf sind vielfältig und ebenso die Anpassungs- und Optimierungsmöglichkeiten. Diese können beinhalten:

- Lage (Regen, Schnee, Wind, Beschattung)
- Umgebung (Verankerungsmöglichkeiten, optische und funktionale Eingliederung, Transport- und Montage-Eigenschaften)
- Material (Lichtdurchlässigkeit, Lebensdauer, Umweltverträglichkeit, Belastbarkeit)
- Ästhetik („Leichtigkeit“ des Entwurfs, Assoziation mit natürlichen Konstruktionen, Oberflächengliederung (Schnittmuster))

Diese Arbeit wurde nicht mit dem Ziel entwickelt, für all diese möglichen Einflussfaktoren einen Leitfaden bereitzustellen, sondern zielt darauf ab, einen direkten und effizienten Einstieg in den Entwurf von Membrankonstruktion zu ermöglichen. Dabei soll durch den Zugang über das physische Modell - durch direkte optische und haptische Kontrolle des Tragwerks - eine intuitive Einschätzung des Verhaltens solcher Tragsysteme erlangt werden.

Mit diesem Wissen und der Auseinandersetzung der physischen und statischen Zusammenhänge am Modell kann die Plausibilität der Entwurfslösung im Bezug auf die Entwurfsvorgaben und deren Einflussfaktoren eingeschätzt werden.
In der Praxis sind viele dieser abschließenden Entscheidungen zum Entwurf vom statischen Verhalten des Tragsystems abhängig und bedürfen des Austauschs mit dem Ingenieur.

Der Prozess der Entwurfsentwicklung sollte folgendermaßen ablaufen:

- Entwicklung der Entwurfsidee am physischen Modell durch testen und vergleichen unterschiedlicher Modelle
- Überprüfung von Funktionalität und Verhalten des Tragwerks mit eventuell nötigen Anpassungen des Modells
- Digitalisierung des Vorentwurfsmodells zur genaueren Analyse der Form und weiteren planerischen Ausarbeitung
- Definition der Tragstruktur, Details und Materialien sowie Abschätzung der statischen Eigenschaften des Tragsystems (mit dem Ingenieur)
- Nach eventuell letzten nötigen Anpassungen Ausarbeitung der Entwurfs- und Detail-Pläne

S. a. 4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell, S. 118

2.3 Typologie relevanter Tragsysteme

2.3.1 Kategorisierung

Abb. 25 zeigt eine Auswahl von Modell-Studien [Sedlak 2012d], durchgeführt an der Lightweight Structures Research Unit (LSRU) / University of New South Wales, Sydney, Australien. Dabei wird die große Vielfalt der Formen und Tragsysteme deutlich, mit denen Membrankonstruktion umgesetzt werden können.

Eine Einteilung kann durch Kategorisierung der maßgeblich formgebenden Elemente getroffen werden, die sich aus der

- Flächenunterstützung
- Randausbildung

ergeben.

Dazu wurde an der LSRU ein Kategorisierungs-System entwickelt, das auch in das Structural Design Aid (SDA [Sedlak 2017b]) Einzug gefunden hat - eine über Jahrzehnte aufgebaute Datenbank, die die Suche und den Vergleich von Projekten anhand einer Vielzahl von Eigenschaften ermöglicht, und eben auch nach der Art des Tragsystems.

Anhand der Typologie-Studie der LSRU [Sedlak 1990] Abb. 27 kann die Systematik der Kategorisierung verdeutlicht und die Auswahl der in dieser Arbeit dokumentierten Grundformen getroffen werden.

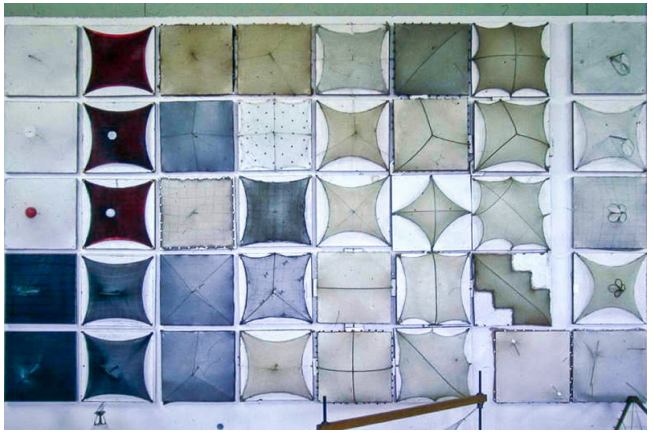

Abb. 25: Modell-Studien an der LSRU

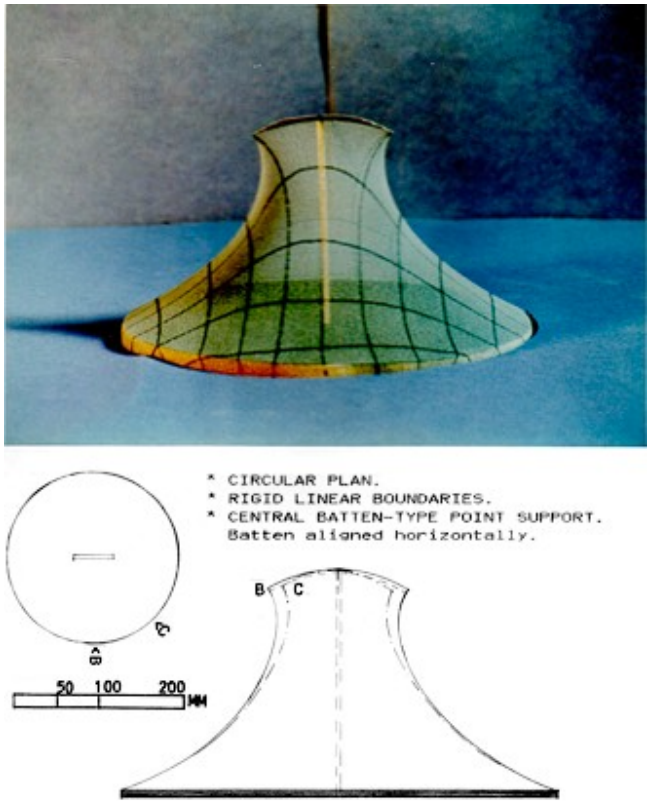

Abb. 26: Typologie-Studie an der LSRU

Kategorisierungs-System

Das erste Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Flächenunterstützung in:

- punktförmig (z. B. Mast)
- linienförmig (z. B. Bogen)
- punkt-/ linienförmig (z. B. Mast / Seil)

Die Art der Unterstützung wird im Schnitt dargestellt (Ring, Buckel, Bogen, etc.).

Darunter wird der entsprechende Grundriss angezeigt und enthält:

- Positionierung der Flächenunterstützung
- Art der Randausbildung

Für die Vergleichbarkeit ist der Grundriss quadratisch (könnte aber z. B. auch länglich oder rund sein) und die Flächenunterstützung mittig angeordnet (die ebenfalls variiert werden kann). Weiters wird die Randausbildung ersichtlich:

- biegesteifer Rand (z. B. Bogen)
- biegeweicher Rand (z. B. Seil)

[Sedlak 2017a]

Auswahl der Grundformen

Die rot markierten Felder zeigen die Kategorisierung der für diese Arbeit ausgewählten Modelle.

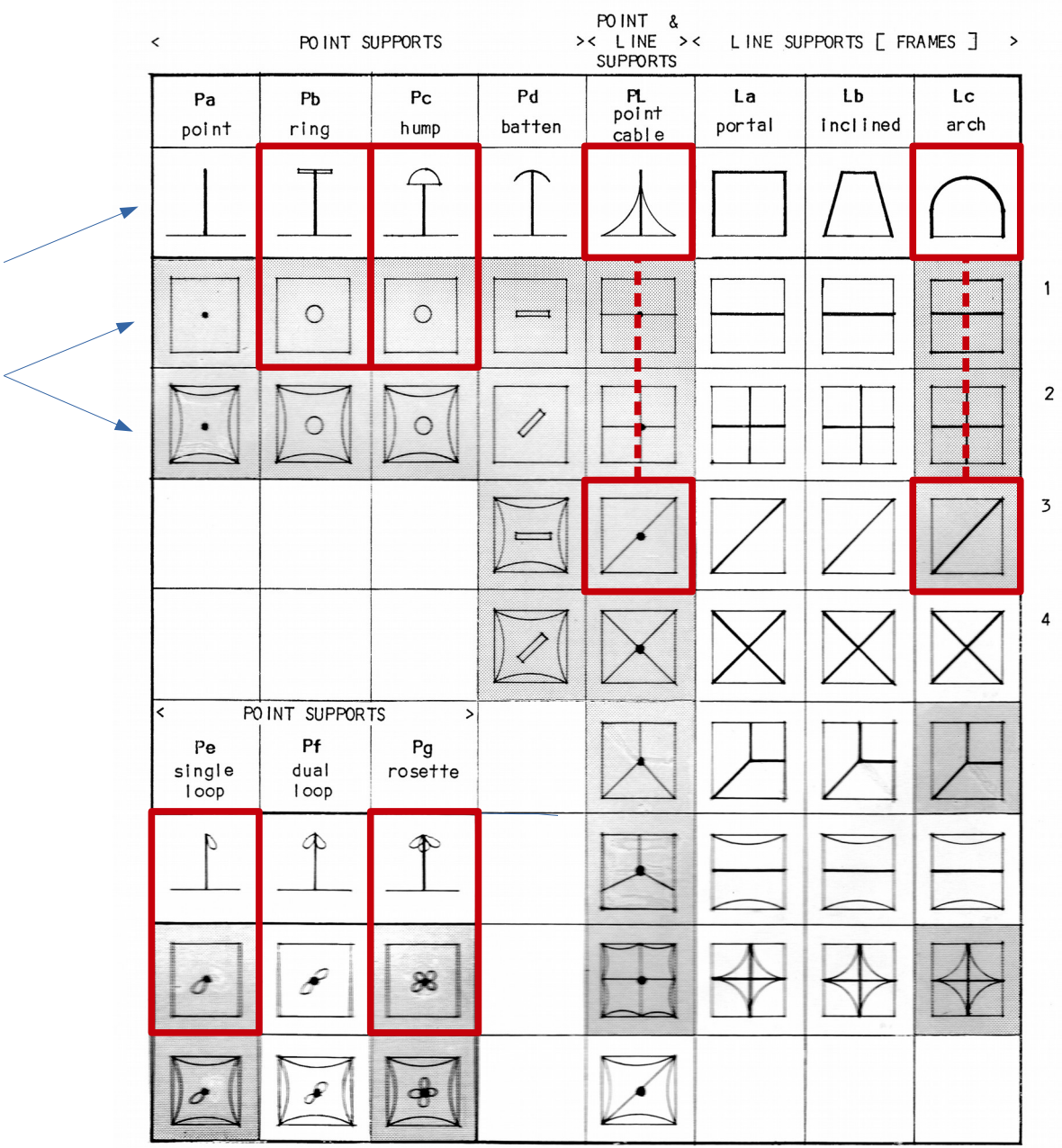

Abb. 27: Beispiel für die Kategorisierung von Membrankonstruktion der LSRU (SDA-Archiv)

2.3.2 Auswahl relevanter Tragsysteme zur Demonstration der Modell-Technik

Grundformen (generisch, fester Rand)

- Ohne Flächenunterstützung
  - Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche
- Flächenunterstützung: **punktförmig**
  - Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring
  - Typ 3: Hochpunkt - Mast mit Buckel
  - Typ 4: Hochpunkt - Mast mit Rosette
  - Typ 5: Hochpunkt - Mast mit Augschlaufe
- Flächenunterstützung: **punktförmig / linienförmig**
  - Typ 6: Hochpunkt - Mast mit Seil
- Flächenunterstützung: **linienförmig**
  - Typ 7: Bogengestützt

Anpassungsmöglichkeiten

- Rand-Form
  - Typ 8: Seilrand am Beispiel Mast mit Ring

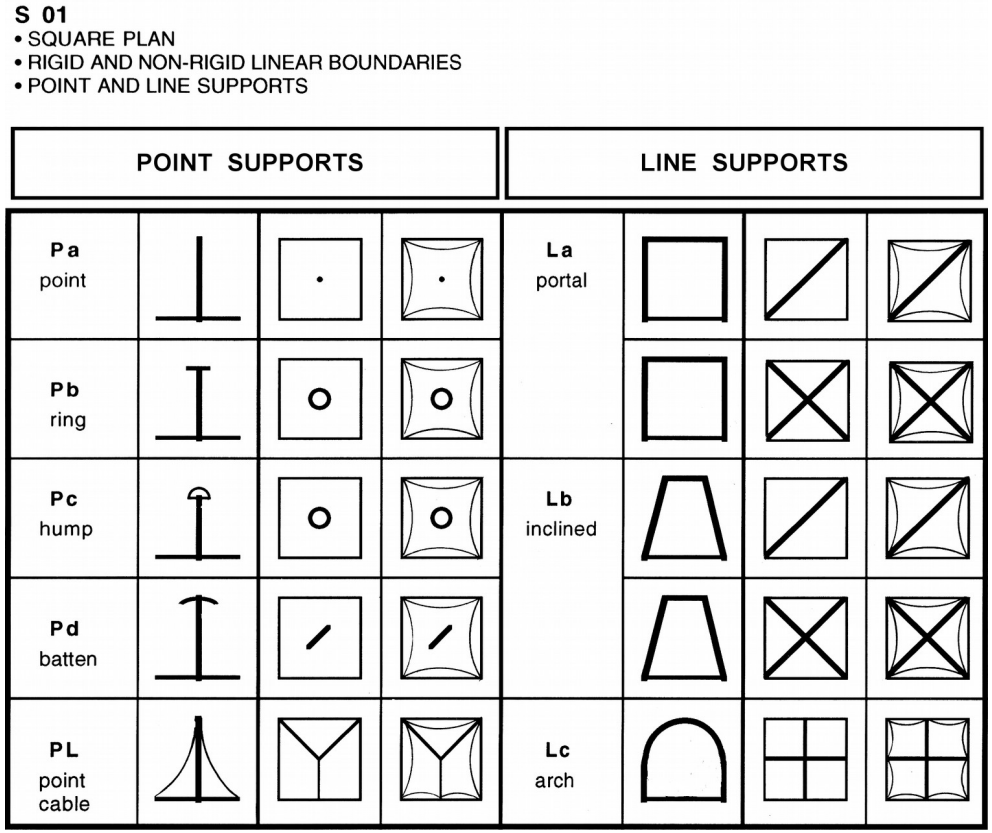

Abb. 28: SDA Kategorisierung: Überblick

3 Entwicklung der Entwurfsidee am Strumpf-Modell

3.1 Relevante Modell-Techniken zur Entwicklung der Entwurfsidee

Der Strumpf-Stoff eignet sich durch seine Elastizität besonders gut, um der ersten Entwurfsidee rasch eine konkrete Form zu geben und diese weiterzuentwickeln.

Die in dieser Arbeit dargestellten Techniken zur Entwicklung der Entwurfsidee beziehen sich in erster Linie auf das Strumpf-Modell und basieren vorwiegend auf dem Wissen, das durch Vinzenz Sedlak in der Lehrveranstaltung „Tragwerksentwicklung am Modell“ an der TU-Wien [Sedlak 2012a] vermittelt wird und im Besonderen auf den bereitgestellten Vorlesungsunterlagen und Anleitungen zu dem in diesem Rahmen durchgeführten Modellbau-Workshop [Sedlak 2012c].
Oft können diese Techniken auch direkt oder mit leichten Anpassungen für andere Modell-Typen übernommen werden, z. B. für die Herstellung eines Tüll-Modells oder das Abnehmen der Hauptkrümmungen.
Da die dabei verwendeten Materialien aber meist eine größere Genauigkeit in der Verarbeitung erfordern, kommen diese Modell-Typen oft erst in der nachgelagerten Ausarbeitung des Entwurfs zur Anwendung, um die Form einer schon entwickelten Entwurfsidee genauer und damit oft auch im größeren Maßstab zu bestimmen.

Das Strumpf-Modell dient daher zur exemplarischen Demonstration der Modell-Techniken zur Entwicklung der Entwurfsidee am physischen Modell. Diese Art der experimentellen Formfindung ist grundsätzlich für alle mechanisch vorgespannten Membrankonstruktion möglich.

Pneumatische Konstruktionen, die aufgrund ihrer Eigenschaften ein Sondergebiet im Membranbau darstellen, können auf diese Weise nicht erstellt werden. Die Formenvielfalt und Formfindungs-Möglichkeiten sind umfangreich und können im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt werden. Die Systematik der Form-Kontrolle erfolgt allerdings - ebenso wie bei der Modell-Technik der Strumpf-Modelle - über die Randbedingungen (Randausbildung, Flächenunterstützung etc.).
Ein kurzer Einblick in die Modell-Technik der pneumatischen Konstruktionen wurde in 2.1.3 Gummihautmodell, S. 28 gegeben.

3.2 Vorbereitung

3.2.1 Grundlegender Ablauf bei der Erstellung der Modelle

1. Vorbereitung der Modell-Basis:
   Modell-Platte mit Unterstützung (Mast, Bogen, erhöhter Rand etc.).

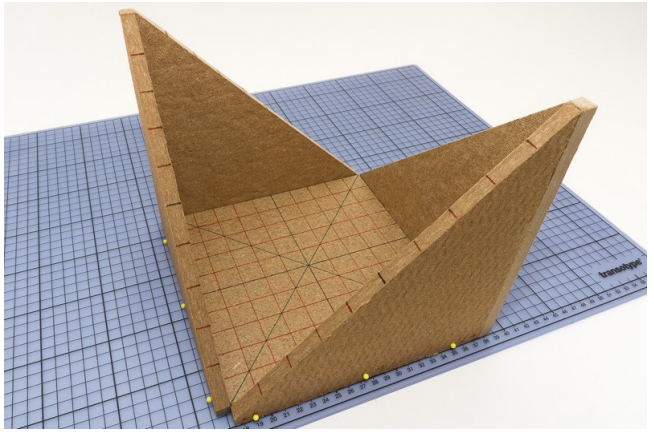

Abb. 29: 1. Modell-Basis

2. Vorbereitung des Stoff-Stücks:
   (Dehnungskompensation),
   Zuschneiden, Markierungen.

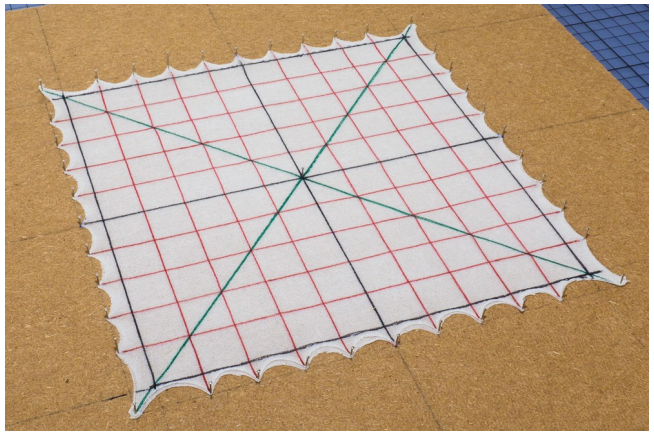

Abb. 30: 2. Strumpf-Stoff

3. Aufspannen des Stoffs auf das Modell.
   [Sedlak 2012a]

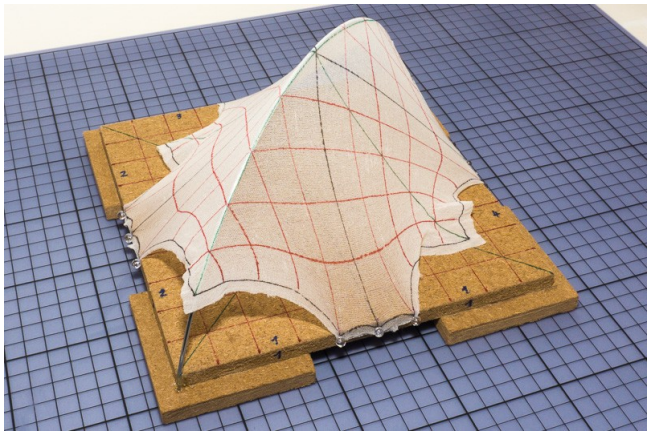

Abb. 31: 3. Stoff-Bespannung am Modell

4. Kontrolle der Form und eventuell nötige Korrekturen.

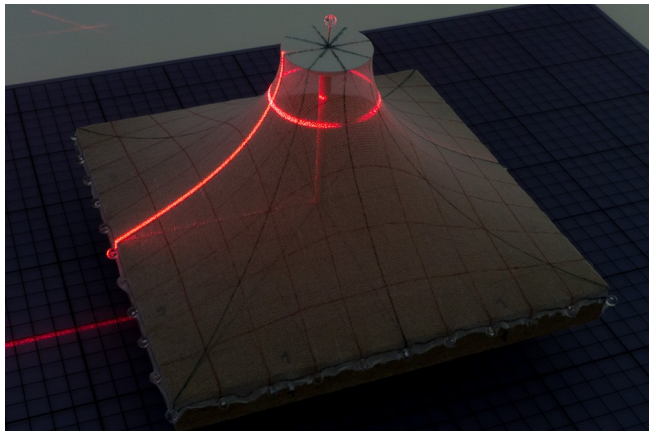

Abb. 32: 4. Form-Kontrolle / Korrektur

5. Analyse der Form:
   Bestimmung der Hauptkrümmungen oder 3D-Scan (mittels 3D-Scanner oder Photogrammetrie-App).

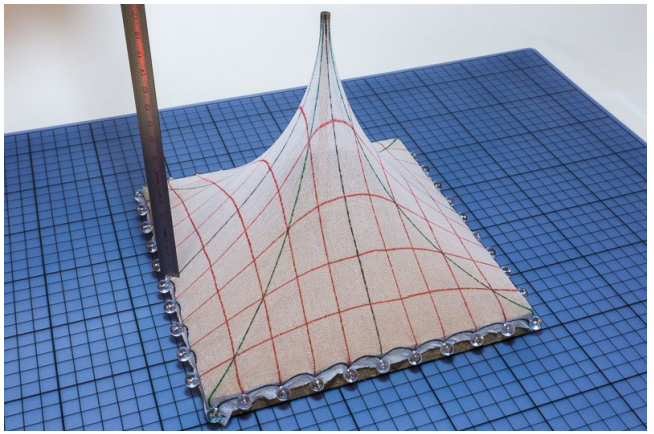

Abb. 33: 5. Form-Analyse

3.2.2 Grundlegende Modell-Technik

Das Hauptaugenmerk der hier vorgestellten Modell-Technik liegt bei der Herstellung der Membran-Fläche - und das möglichst einfach und rasch im Rahmen der für den Vorentwurf nötigen Genauigkeit der Annäherung. Bei Bedarf können die beschriebenen Prinzipien allerdings unter sorgfältiger Anwendung und mit tiefergehender Analyse und Kontrolle zur Erstellung sehr präziser Modelle dienen, die bei gewissen einfacheren Membran-Formen (wie z. B. dem HP-Zelt) auch als Vorlage zur Erstellung des Zuschnittmusters der zu realisierenden Membrankonstruktionen verwendet werden können.

Entwurfsmethode

Auf grundsätzliche und allgemeine Entwurfsmethoden in der Architektur soll hier nicht im Detail eingegangen werden. Allerdings spielt die Möglichkeit, Bauwerke in sich stabile statische Einheiten zu gliedern, im Modellbau ein wichtige Rolle. So ist es nicht nötig, das Modell des gesamten Bauwerks zu erstellen, wenn nur die Form der Membran-Fläche gefunden und untersucht werden soll, wie dies z. B. bei einer Terrassenüberdachung der Fall wäre. Für das Tragwerk der Membrankonstruktion sind die statischen Anknüpfungsmöglichkeiten am Bauwerk im Bereich der Terrasse ausschlaggebend, nicht unbedingt das gesamte Gebäude.
Genauso kann es bei modulartig zusammengesetzten Systemen eine Erleichterung sein, zuerst nur eine statische Einheit zu überprüfen, bevor das Zusammenwirken im Gesamttragwerk am Modell erkundet wird.
Eine weitere Möglichkeit, den Aufwand für die Herstellung des Modells zu reduzieren, ist die Ausnutzung von Spiegelachsen im Tragsystem, die es erlauben, nur einen Ausschnitt des Tragwerks als Annäherung an die Form umzusetzen und daraus auf das Verhalten des Gesamttragwerks zu schließen.
Natürlich kann es aus unterschiedlichen Gründen interessant und sogar wichtig sein, ein Modell der gesamten architektonischen Komposition sowie der Umgebung zu bauen, um Entwurfsideen unter möglichst realitätsnahen Bedingungen zu überprüfen. Die in dieser Arbeit beschriebenen Modell-Techniken beschränken sich aber auf die Formfindung der Membran-Fläche aufgrund bekannter, also schon vorausgewählter Randbedingungen (Flächen- und Rand-Unterstützungen, Abspannungen etc.), um die Entwurfsidee durch Herstellung der konkreten Membran-Fläche überprüfen und weiterentwickeln zu können.

Modell-Größe und Form

Beim Maßstab des Strumpf-Modells ist zu beachten, dass die maximale Größe durch den verfügbaren Stoff begrenzt wird. In der Regel wird das Stoff-Stück aus einer Damenstrumpfhose (XL-XXL) zugeschnitten, die maximale Dimensionen von 200 x 200 mm bis 250 x 400 mm ermöglicht.
Diese Dimensionen eignen sich für Modelle auf einer Grundfläche von ca. 200 x 200 mm (z. B. mit zentraler Flächenunterstützung) bis hin zu einer Grundfläche von ca. 200 x 400 mm (z. B. bei mehrfacher Punktunterstützung oder linienartiger Unterstützung durch Seil oder Bogen etc).

Die Form des Grundrisses muss dabei nicht automatisch rechteckig sein. Ecken stellen aus zweierlei Gründen eine besondere Herausforderung im Membranbau dar. Einerseits ergeben sich aus geometrischen Gründen relativ flache Stellen (also geringe Krümmungen) nahe der Ecke, die zu hohen Belastungen in der Membran führen können. Andererseits erfordert die Detaillösung und auch die Ausführung im Bauwerk relativ hohen Aufwand sowie Fachwissen. Durch einen runden Grundriss können diese Probleme vermieden werden bzw. können flache Stellen im Eckbereich durch Abschrägungen (z. B. durch ein Oktogon) vermindert werden.

Bei der Festlegung der Höhe einer Membrankonstruktion (z. B. des Masts, des Bogens oder des Höhenunterschieds der Eckpunkte eines 4-Punkt-Zelts) gilt es einen Ausgleich zu schaffen zwischen einerseits zu geringen Höhen, die schwache Krümmungen und damit „flache" Stellen und hohe Spannungen in der Membran-Fläche bewirken können und andererseits zu großen Höhen, die in der Regel einen höheren Materialbedarf (durch größere Oberfläche und Spannweiten) bewirken. Aus Sicht einer effizienten Konstruktion sollte die Höhe also gering gehalten werden, solange dadurch die Krümmung in der Membran-Fläche nicht zu stark abnimmt und durch höhere Spannungen in der Membran ein belastbareres Material oder zusätzliche Verstärkungen nötig werden.

Abgesehen davon gibt es natürlich auch andere Kriterien, die zu einer Formentscheidung führen können, wie z. B. nötige Neigungen, um übermäßigen Belastungen durch Schnee oder Wind vorzubeugen, oder die Raumwirkung, die erzielt werden soll und vieles mehr. Viele dieser Aspekte, die sich aus statischer Notwendigkeit oder dem Gestaltungswillen ergeben, sind abhängig von projektspezifischen Eigenheiten, wie dem Ort, der Funktion, dem Material etc., die in den Entwurfsprozess einfließen und oft auch prototypisch und schrittweise erarbeitet und optimiert werden müssen. Alle diese Aspekte mit ihren Auswirkungen hier anzuführen, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.
Wenn auch die experimentelle Entwicklung der Entwurfsidee nicht automatisch und zwingend zu dem effizientesten oder einem überhaupt realisierbaren Entwurf führt (und Erfahrung bzw. fachkompetente Beratung wie in jeder Lernphase eine wichtige Rolle spielt), so kann die Überprüfung des physischen Modells mit der Entwurfsaufgabe den aufmerksamen Betrachter doch auf mögliche Probleme aufmerksam machen (wie eben zu geringe Neigungen oder Krümmungen, Spannungsunterschiede, etc.).

Unterstützung

Die Form der Modell-Basis, z. B. Modell-Platte mit Seitenwänden für ein HP-Zelt, dient beim Vorentwurfsmodell in erster Linie zur Umsetzung der Membran-Fläche und muss nicht immer auch der am Bauwerk angewendeten Unterstützungsform entsprechen. So sind die Seitenwände hier ein notwendiges Hilfsmittel, um die Form der Membran-Fläche rasch und exakt umsetzen zu können. Nach Einbau eines Seilrands ist die stabile Form der Membran-Fläche nicht mehr von einer durchgängigen Befestigung am steifen Rand der Seitenwände abhängig, sondern wird durch die (vor)gespannten Randseile in Form gehalten. Nun können die Seitenwände durch punktförmige Unterstützung an den Enden der Randseile ersetzt werden.
Auch ein Mast könnte z. B. als Luftstütze ausgeführt werden, ohne dass sich dadurch die Form der Membran ändert.
Unterstützungen sollten die Membran-Fläche ungefähr in gleichgroße Bereiche teilen.

Raster

Das Raster wird auf die Modell-Platte sowie den Stoff aufgetragen und dient als Orientierungshilfe zum gleichmäßigen Spannen des Stoffs am Modell. Der Fokus liegt dabei auf den Mittellinien und Diagonalen der beiden Raster, um den Stoff mit einer möglichst gleichmäßigen Verteilung über der Modell-Platte ausrichten zu können. Ein weiterer Aspekt sind die Raster-Linien, die helfen, eine möglichst gleichmäßige Spannung in alle Richtung zu erreichen. Dabei ist nicht eine deckungsgleiche Anbringung des Rasters im Stoff über dem Raster der Modell-Platte ausschlaggebend, sondern ein gleichmäßiges Dehnungsbild im Raster des Strumpf-Stoffs, das meist auch durch gleichmäßige Abstände relativ zum Raster der Modell-Platte kontrolliert werden kann.
Das Raster am fertigen Modell kann auch durch das Ablesen von Verzerrungen auf eine unausgeglichene Spannung im Stoff hinweisen. Besonders bei stärker gekrümmten Oberflächen und komplexen Membran-Formen ist ein kleinteiliges Raster (ca. 20 mm) vorteilhaft, um die Kontrolle der Spannung des Stoffs und die Wahrnehmung der Oberflächenkrümmung zu verbessern.

Strumpf-Stoff

Die Elastizität des Strumpf-Stoffs ermöglicht es - kombiniert mit einer sorgfältigen und gleichmäßigen Bespannung des Modells - eine ausgeglichene Spannungsverteilung in der Membran-Fläche zu erreichen und so eine effiziente Tragstruktur entwickeln zu können.
Die Verwendung des Strumpf-Stoffs zeichnet sich dadurch aus, dass sie den Prozess der „Formfindung“ ermöglicht bzw. vereinfacht, wobei nicht die Form selber definiert wird, sondern sich die Form aufgrund der Randbedingungen (Unterstützung, Spannung im Stoff, etc.) einstellt. Dabei ist der Strumpf-Stoff leicht verfüg- und verarbeitbar und kann auch einfach angepasst werden.
Das Stoff-Stück kann in der Regel in einer Größe analog zu der der Modell-Platte zugeschnitten werden.
Je nach Eigenschaften des Modells (Höhe, Krümmung, Anzahl der Unterstützungen etc.) oder Dehnungsvermögen des Stoffs kann es aber auch nötig sein, ein etwas größeres Stoff-Stück zuzuschneiden, um genügend Material für die optimale Form und Spannung zur Verfügung zu haben.

Dynamik zwischen Form und formbestimmenden Randbedingungen am Experiment

Eine realisierbare und auch statisch möglichst effiziente Membrankonstruktion hängt zu einem wichtigen Teil von einer möglichst gleichmäßigen Spannungsverteilung in der Membran-Fläche ab. Die einzelnen Eigenschaften, die eine derartige Membran-Fläche definieren, können daher nicht beliebig verändert werden und beeinflussen sich gegenseitig. Dadurch kann aber durch gezielte Veränderung der Randbedingungen die Form indirekt beeinflusst werden. So spielt der Zusammenhang zwischen Spannung und Krümmung eine wichtige Rolle, um einerseits die Form zu kontrollieren, aber andererseits auch zu hohe Spannungen zu vermeiden.

Diese dynamischen Eigenschaften der Membrankonstruktion müssen auch berücksichtigt werden, wenn etwa Seilränder in die Membran eingebaut werden. Dabei wird auf der bereits gefundenen Form am Modell eine Schnur auf dem Stoff befestigt (geklebt), die in Folge als Rand der Membran dienen soll und die Kräfte aus der Fläche zu den Randpunkten und der Seilabspannung leitet.

Gleiches gilt auch z. B. für eine Rosette oder Augschlaufe in der Membran-Fläche. Durch die Eigenschaften des Strumpf-Stoffs stellt sich nach dem Einbau einer Schlaufe automatisch eine für die Spannungsverteilung in der Membran-Fläche günstige Form ein.
Dies bedeutet aber nicht, dass für die Ausgangsform der Schlaufe eine beliebige oder gar ungünstige Form gewählt werden kann, die dann automatisch in eine optimale korrigiert wird. Vielmehr muss (aus Erfahrung und durch den Vergleich mit realisierten Projekten) eine für das jeweilige Tragsystem günstige Form so gut wie möglich angenähert werden, die dann durch die Selbsteinstellung der Form optimiert wird. So kann schrittweise durch das Korrigieren von Bereichen, die sich nach dem Einbau stark ändern die Ausgangsform optimiert werden, die sich im Idealfall dann kaum mehr verändert.

Diese Effekte können aber an den hier vorgestellten Strumpf-Modellen nur mit Einschränkungen genutzt werden, da sie in der nötigen maßstäblichen Genauigkeit nur schwer umsetzbar sind. So vermindert z. B. das Ankleben der Schnur am Stoff deren Flexibilität und kann eine Anpassung der Krümmung durch die relativ geringen Kräfte im Strumpf-Stoff verhindern (hier könnte eine Technik, bei der die Schnur mit einer Nähnadel in den Stoff eingenäht wird, Abhilfe schaffen - allerdings ist diese wiederum schwer am Strumpf-Stoff anzuwenden).
Aber auch wenn sich nicht die optimale Form einstellen kann, ist diese ohnehin für die nötige Genauigkeit des Vorentwurfsmodells ausreichend und bei genauer Beobachtung einer auch geringen Formveränderung können doch Rückschlüsse auf die Effizienz der Form und mögliches Optimierungspotenzial gezogen werden.

Krümmungen

Zur Überprüfung der Krümmungen am Modell kann deren Stichhöhe herangezogen werden, da sich die Krümmungen in der Idealisierung Kreisbögen annähern sollten. Dies gilt für die Krümmung der Randseile, die immer als Kreisbögen ausgeführt werden, verhält sich aber auch ähnlich mit den Krümmungen in der Fläche.
Die Krümmungen sollten in einem Bereich von 1:8 bis 1:12 liegen; generell kann ein Stich von 1:10 verwendet werden.
Für die in dieser Arbeit demonstrierten Modelle bedeutet dies, dass für einen Seilrand bei einer Seitenlänge von 200 mm ein Stich von 20 mm zu verwenden ist.
S. a. 3.4.8 Typ 8: Seilrand am Beispiel Mast mit Ring: Vorbereitung: Stichhöhe, S. 115.

3.2.3 Material und Werkzeug

Die Angaben in diesem Kapitel dienen zur allgemeinen Information und zum Überblick über die in den folgenden Kapiteln des Modellbaus verwendeten Materialien und Werkzeuge. Nähere Informationen zur jeweiligen Auswahl und Verwendung finden sich in den Kapiteln 3.4 Modell-Technik, S. 65 ff.

Bei der Anschaffung der Verbrauchsmaterialien empfiehlt es sich, Mengen eher überzählig zu wählen, um nicht durch fehlendes Material, z. B. durch ein gerissenes Stoff-Stück, im Arbeitsfluss gestoppt zu werden.

Bei Cutter, Schere und anderen Schneidwerkzeugen gilt generell, dass scharfe Klingen helfen können, die Genauigkeit zu erhöhen bzw. ein flüssiges Arbeiten erleichtern.

In der folgenden liste steht *M / W: empfohlen / alternativ* / *optional* für Material oder Werkzeug, das zur Verwendung empfohlen wird, oder als Alternative oder Zusatzoption gewählt werden kann.

Weichfaserplatte d: 10 - 20 mm M: empfohlen

(i) Die Platte dient hauptsächlich als Basis für das Modell und auch für eventuelle Seitenwände als Rand-Unterstützung der Membran-Fläche.
Weiters kann das Material zur Herstellung der Spann-Platte verwendet werden. Es eignet sich besonders gut, da die raue Oberfläche dem Strumpf-Stoff etwas Halt gegen das Verrutschen gibt, diesen aber nicht verletzt.
(i) Da 10 mm starke Platten eventuell leichter verfügbar und auch einfacher zu schneiden sind, wird die Anschaffung dieser Platten-Stärke empfohlen. In der Praxis hat es sich als vorteilhaft erwiesen, für stabilere Modell-Platten bei Bedarf zwei 10 mm starke Platten miteinander zu verkleben (mittels Express-Holzleim).

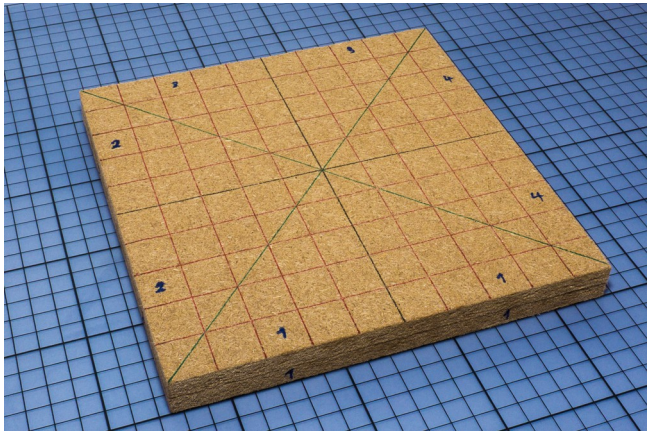

Abb. 34: Weichfaserplatte

Polystyrol-Hartschaumplatte d: 10 - 20 mm M: alternativ

(i) Das Material stellt eine Alternative zur Weichfaserplatte dar und bietet den Vorteil der leichteren Verfügbarkeit und etwas einfacheren Verarbeitung.
Die Nachteile liegen in der Notwendigkeit eines Spezial-Klebers beim Verbinden von Elementen und v. a. in einer Oberflächenstruktur, die den Strumpf-Stoff leicht verletzen kann.

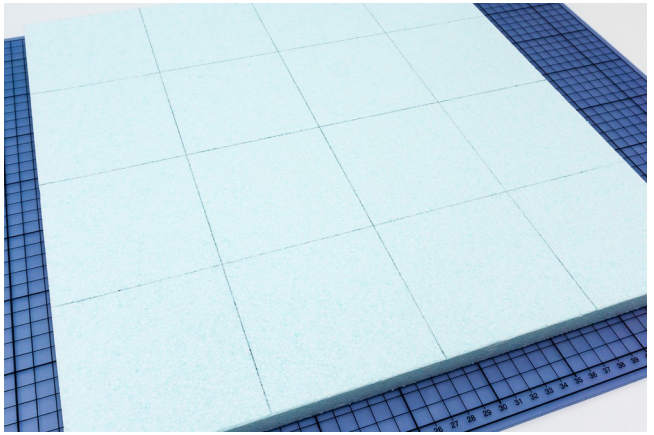

Abb. 35: Polystyrol-Hartschaumplatte

Strumpf-Stoff (Damenstrumpfhose) XL - XXL; weiß oder hell M: empfohlen

(i) Um ein möglichst großes Stoff-Stück aus dem Oberschenkelteil zuschneiden zu können, empfiehlt sich die Verwendung einer großen Strumpfhose (XXL, Angaben auch als Konfektionsgröße 52 - 54 oder Größe VI [ratgeber-und-hilfe.de 2017]).
Das Stoff-Stück sollte keine verstärkten oder doppellagigen Stellen aufweisen.
(i) Ein weißer (oder heller) Stoff ist nötig, um das aufgetragene Raster gut erkennen zu können.
(i) Vorsicht ist vor allem beim Arbeiten am gespannten Strumpf-Stoff angebracht, da dieser durch spitze oder scharfe Gegenstände leicht Löcher bekommen kann.

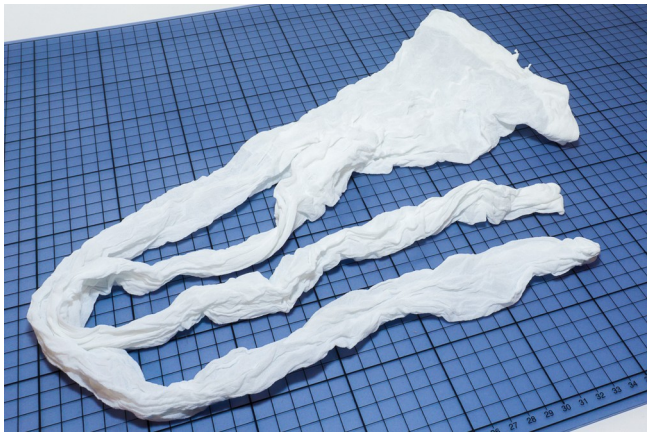

Abb. 36: Damenstrumpfhose

Lotschnur d: ca. 2 mm M: empfohlen

(i) Die Schnur sollte folgende Eigenschaften haben (die eine Lotschnur typischer Weise erfüllt):
nicht dehnbar sein (um die Spannung aus der Membran aufnehmen zu können), eine gewisse Steifigkeit aufweisen (um gleichmäßig gekrümmte Schlaufen auf der Membran-Fläche leichter umsetzten zu können), sich gut mit Sekundenkleber verbinden (um Schlaufen und Randseile gut mit der Membran-Fläche verbinden zu können) und durchgesteckten Landkartennadeln einen gewissen Halt bieten (um die Schnur mit etwas Spannung an der Modell-Platte befestigen zu können, ohne dass sie ausreißt).

Abb. 37: Lotschnur

Landkartennadeln (Kopf ca. 3 mm) L: 10 - 30 mm; durchsichtig M: empfohlen

(i) Landkartennadeln mit einem durchsichtigen Kopf habe bei der Befestigung des Strumpf-Stoffs am Modell den Vorteil, dass sie optisch in den Hintergrund treten (was sich positiv auf die Wahrnehmung der Oberfläche und deren Unterteilung auswirkt). Weiters sind lange Landkartennadeln mit einem kleinen Rundkopf vorteilhaft, da diese fester in der Platte halten und ein kleiner Kopf beim weiteren Arbeiten am Modell (z. B. Einfügen eines Seilrands) kaum stört.
(i) Beim Befestigen des Stoffs an Seitenwänden ist es empfehlenswert, Landkartennadeln zu verwenden, die nicht länger sind als die Wandstärke.

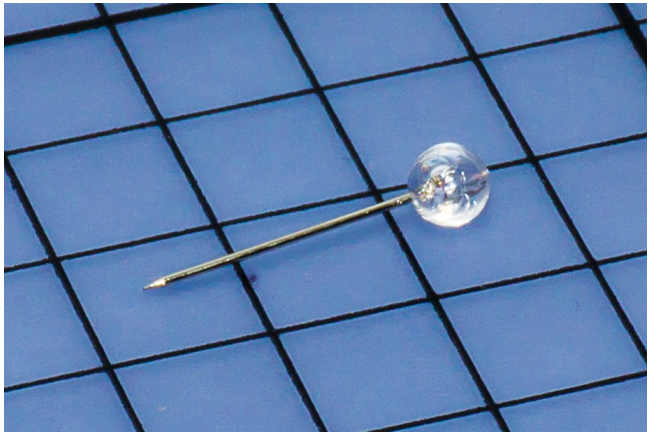

Abb. 38: Landkartennadel

Stecknadeln L: 10 - 30 mm M: empfohlen

(i) Die Stecknadeln werden hauptsächlich beim Spannen des Stoffs auf der Spann-Platte verwendet und sind vorteilhaft gegenüber Landkartennadeln, da deren kleiner Kopf beim Aufzeichnen des Rasters weniger stört.
(i) Aus dem gleichen Grund sollten die Stecknadeln auch nicht zu weit über die Spann-Platte stehen, aber auch nicht so kurz sein, dass sie bis zum Anschlag in der Spann-Platte versinken, da dies das Entfernen erschweren könnte. Ideal wäre eine Länge wenige Millimeter über der Stärke der Spann-Platte.

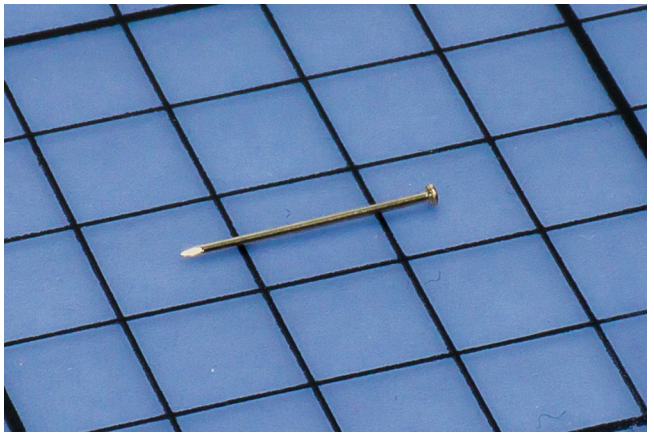

Abb. 39: Stecknadel

Sekundenkleber (Gel, nicht flüssig) M: empfohlen

(i) Generell ist es vorteilhaft, den Sekundenkleber dünn aber durchgängig aufzutragen, damit sich z. B. die Schnur schnell und stabil mit dem Stoff verbindet, die Verbindung aber nicht durch zu viel Kleber zu steif wird.

Abb. 40: Sekundenkleber

Heißkleber M: alternativ

(i) Heißkleber ist eine gute Alternative für schnelle Verbindungen. Allerdings muss die Verarbeitung sehr rasch erfolgen. Außerdem trägt das Material recht dick auf, so dass die Teile nicht exakt bündig verklebt werden können. Aus diesen Gründen sind auch andere Alternativen zu bedenken wie z. B. Express-Holzleim oder Modellbaukleber (schnell trocknend).

Abb. 41: Heißkleber

Overhead-Marker (rot, grün, schwarz, blau) 0,5 mm (F) M: empfohlen

(i) Die Stifte (Overhead-Marker oder Filzstifte) in zumindest 3 unterschiedlichen Farben werde vorwiegend zur Aufzeichnung des Rasters oder anderer Markierungen auf der Modell-Platte oder dem Strumpf-Stoff benötigt.

Abb. 42: Stifte: Overhead-Marker

Lineal / Schneidelineal W: empfohlen

(i) Ein schmales Lineal (weniger als 20 mm breit) hat beim Aufzeichnen des Rasters auf den Strumpf-Stoff den Vorteil, dass das Lineal zwischen den Stecknadeln im 20 mm Abstand platziert werden kann und somit das Raster einfach aufgezeichnet werden kann.
(i) Zur Verwendung als Schneidelineal eignet sich besonders ein Lineal mit Gummierung an der Unterseite, um ein Verrutschen zu verhindern.

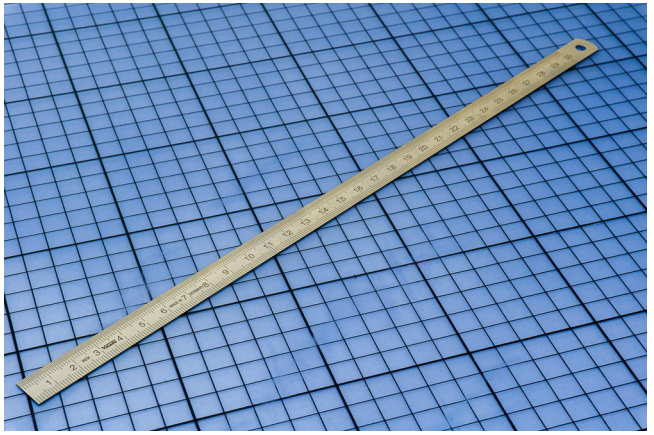

Abb. 43: Lineal

Geodreieck W: empfohlen

(i) Ein großes Geodreieck erleichter das Aufzeichnen von Rastern sowie die Kontrolle von rechten Winkeln.

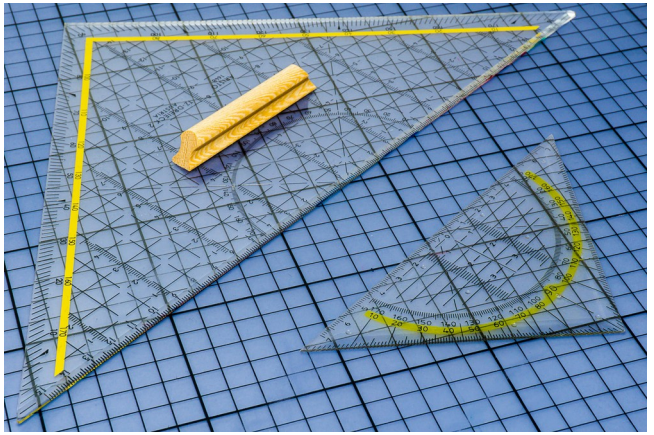

Abb. 44: Geodreieck

Schieblehre W: optional

(i) Die Schieblehre kann hilfreich sein, um z. B. Durchmesser eines Schnitts durch einen Hochpunkt festzustellen (s. a. 3.4.4 Modell: Rosette, S. 85).

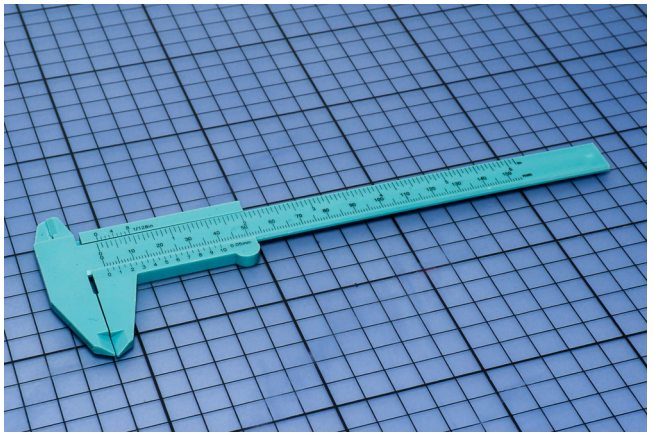

Abb. 45: Schieblehre

Zirkelschneider (Kreisschneider) W: optional

(i) Der Zirkelschneider erleichtert das Ausschneiden von Kreisen, Ringen etc. (s. a. 3.4.4 Modell: Rosette, S. 85).

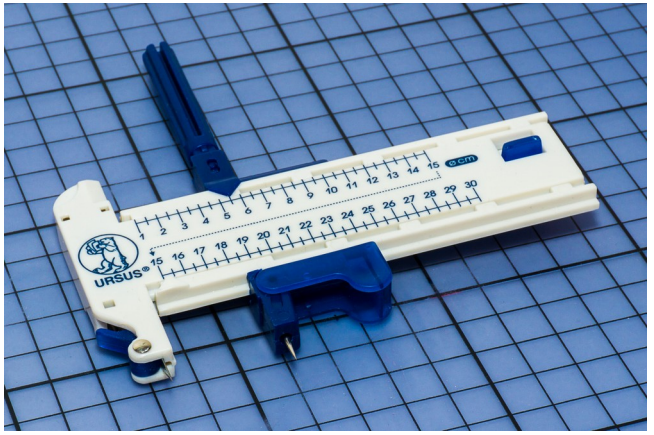

Abb. 46: Zirkelschneider

Cutter (scharf; ev. Ersatzklingen) W: empfohlen

(i) Der Cutter wird vor allem zu Schneiden und Durchschneiden dickerer Platten oder anderer Materialien benötigt.

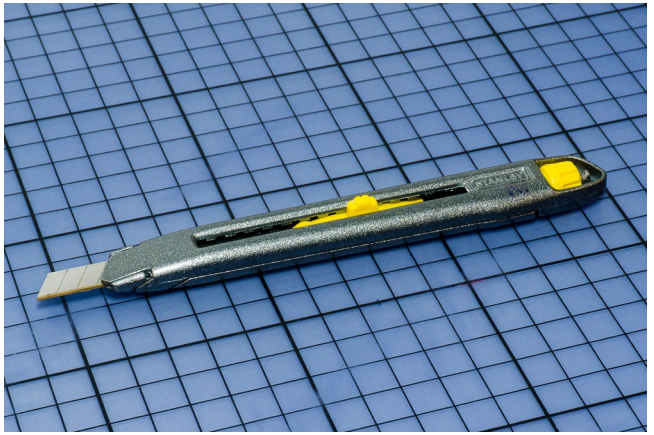

Abb. 47: Cutter

Modellmesser (scharf; ev. Ersatzklingen) W: empfohlen

(i) Das Modellmesser eignet sich durch seine kleine und scharfe Klinge besonders für präzise Schnitte am Modell, z. B. um überschüssige Bereiche nach Fixierung des Stoffs am Modell auszuschneiden (s. a. 3.4.4 Modell: Rosette, S. 85).

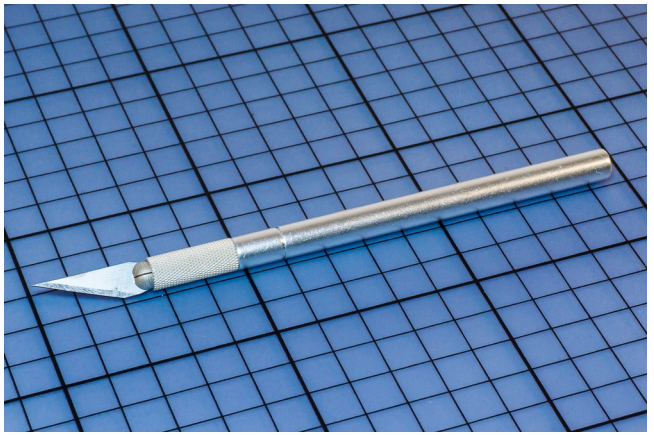

Abb. 48: Modellmesser

Rollschneider (scharf; ev. Ersatzklingen) W: optional

(i) Der Rollschneider eignet sich besonders, um Stoff zu schneiden und kann als Alternative zu Cutter oder Schere beim Schneiden des Strumpf-Stoffs verwendet werden. Der Vorteil liegt darin, dass dabei ein Verrutschen und Verziehen des Stoffs vermieden werden kann.

Abb. 49: Rollschneider

Schere (scharf; ev. Scherenschärfer) W: empfohlen

(i) s. a. Scherenschärfer (Abb. 51, S. 45).

Abb. 50: Schere

Scherenschärfer W: optional

(i) Eine Schere kann durch dieses spezielle Werkzeug einfach und rasch geschärft werden.

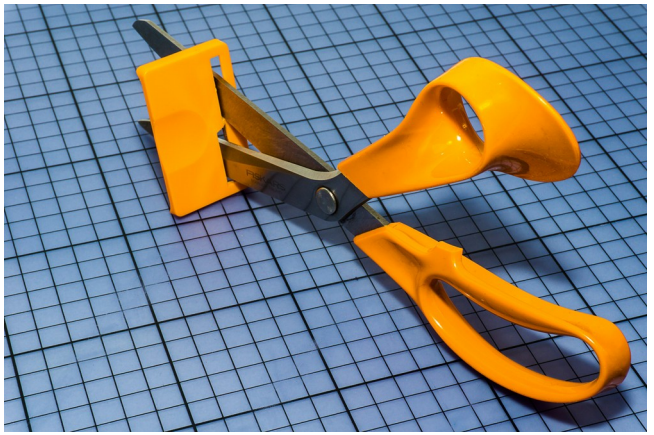

Abb. 51: Scherenschärfer

Schneidematten ca. 450 x 600 mm W: optional

(i) Alternativ kann auch eine Kartonunterlage verwendet werden, allerdings eignet sich die Schneidematte besser, um den Strumpf-Stoff zuzuschneiden.

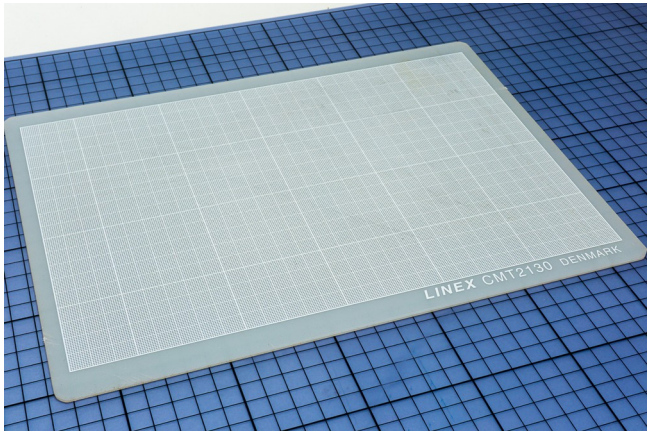

Abb. 52: Schneidematten

Pinzette W: optional

(i) Die Pinzette kann hilfreich sein, um beim Ausschneiden von geklebten Rändern am Modell das Einreißen des Stoffs zu verhindern (s. a. 3.4.4 Modell: Rosette, S. 85).

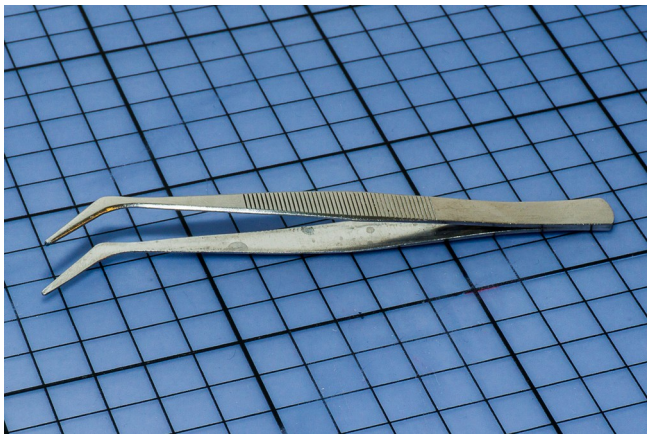

Abb. 53: Pinzette

Zangen W: optional

(i) Die Kombination vom 2 Zangen wird benötigt, um z. B. den Draht, der als Bogenunterstützung dient, an den Ecken umzubiegen (s. a. 3.4.7 Vorbereitung: Bogen, S. 106).

Abb. 54: Zangen

Kreuzlinienlaser W: optional

(i) Ein Linienlaser ist nicht unbedingt nötig zur Ausführung der in dieser Arbeit beschriebenen Modellmethoden, allerdings stellt der Kreuzlinienlaser ein sehr hilfreiches und essentielles Werkzeug für vertiefende Techniken dar.
Eine Übersicht befindet sich in Kapitel 3.2.4 Kreuzlinienlaser, S. 50.

Abb. 55: Kreuzlinienlaser

3.2.4 Arbeitsumgebung

Ein Foto-Tisch ist keine Voraussetzung, die in dieser Arbeit beschriebenen Modelle bauen oder analysieren zu können. Allerdings ist eine systematisch strukturierte Arbeitsumgebung ein wesentliches Hilfsmittel, um eine größere Genauigkeit, Effizienz und auch Vergleichbarkeit herzustellen; dazu zählen:

- eine gute und gleichmäßige Ausleuchtung (eventuell mit Diffusor, um harte Schatten zu vermeiden),
- ein einfarbiger heller Hintergrund (in manchen Fällen auch ein dunkler Hintergrund für besseren Kontrast zu hellen Objekten im Vordergrund),
- Stative (vorzugsweise mit Schnellwechselplatte, 3-Wege-Stativkopf und eventuell einem mittigen Gestänge zur Höhenverstellung) um Kamera oder Kreuzlinienlaser exakt ausrichten zu können und das Wechseln zwischen unterschiedlichen, aber immer gleichbleibenden Blickwinkeln zu erleichtern,
- und Markierungen, um die Modelle und Geräte nach Wechseln wieder gleich und exakt positionieren zu können.

Foto-Tisch: Herstellung

- Es wurde ein Gestell zur Befestigung des Hintergrunds (weißer Karton) aus Winkelleisten angefertigt (Materialkosten ca. € 50) und mit Klemmen temporär am Tisch befestigt.

  (i) Über Flügelschrauben kann der Winkel des Gestells relativ zu Unterlage (Tisch) verändert werden.

- Für eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung wurden mehrere Stehlampen mit einem Diffusor (matter transluzenter Bezug) versehen.

- Abb. 59 zeigt die Positionierung des Haupt-Stativs

Abb. 56: Gestell für den Hintergrund

Abb. 57: Gestell: Befestigung am Tisch

Abb. 58: Gestell: Befestigung durch Zwingen

Abb. 59: Foto-Tisch mit Hintergrund

Foto-Tisch: Einrichten

- (i) Für Aufnahmen der Aufsicht wurde ein Galgen-Stativ verwendet, das über dem Zentrum der Modell-Achsen positioniert wurde. Dazu wurde das Objektiv von 2 Seiten mit einem Lot über die Modell-Achsen (X und Y) ausgerichtet.

Abb. 60: Beleuchtung, Stative, Linienlaser

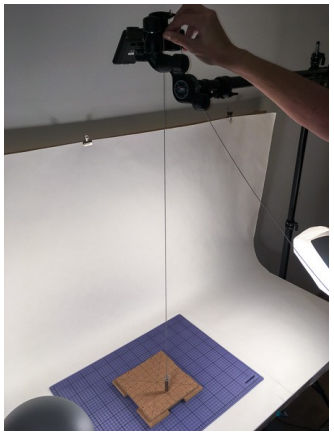

Abb. 61: Galgen-Stativ: Vertikale Ausrichtung

- (i) Nachdem das Objektiv über dem Modell ausgerichtet wurden, kann nun die Kamera selbst so am Stativ ausgerichtet werden, dass Bildebene und Modell-Platte parallel sind. Dazu sollte die Bild-Mitte genau über den Zentrum des Modells liegen. Dies kann leicht über die Kamera-Option *Bildschirmdiagonalen* oder - falls verfügbar - über eine Fernsteuerungs-App überprüft werden (Abb. 64).

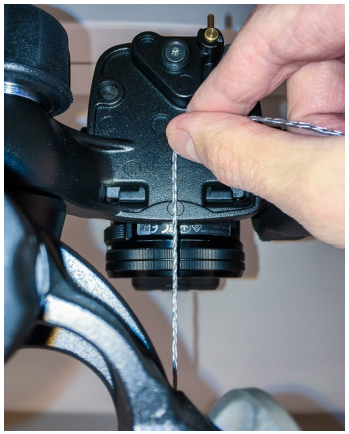

Abb. 62: Galgen-Stativ: Objektiv-Achse 1

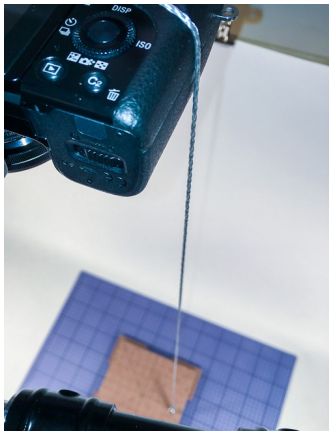

Abb. 63: Galgen-Stativ: Objektiv-Achse 2

- (i) Alternativ kann anstatt des Lots auch ein Linienlaser verwendet werden (s. a. Kreuzlinienlaser, S. 50)

(i) Für wechselnde Stative können Markierungen zur Positionierung am Boden hilfreich sein (mittels Aufkleber, Klebeband, etc.).

(i) Für eine genau und einfach Ausrichtung der Kamera am Stativ empfiehlt sich die Verwendung eines 3-Wege-Neigers (Stativkopf).

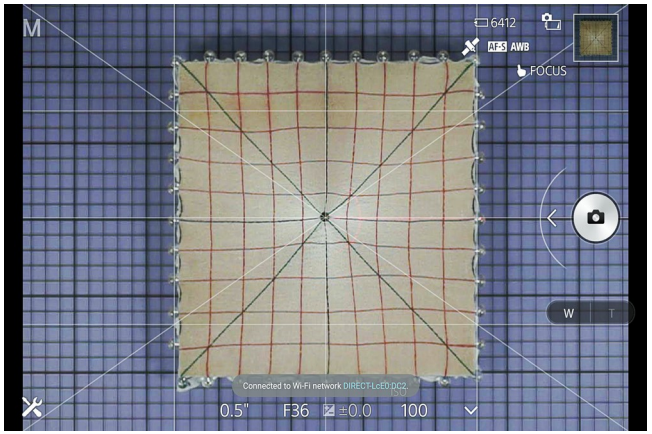

Abb. 64: Kamera: Ausrichtung via App

Kreuzlinienlaser

Der Kreuzlinienlaser bietet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten, um die Arbeit am Modell sowie die Formerfassung zu erleichtern bzw. um die Genauigkeit zu erhöhen.

Für nähere Informationen zu den Anwendungsmöglichkeiten des Kreuzlinienlasers siehe:

- 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring: Nachtrag: (Kreuz-)Linienlaser, S. 79
- 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring: Nachtrag: Hauptkrümmungen: Hilfsmittel, S. 81
- 4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD: Anordnung: Modell - Kamera, S. 123 f.
- 4.2.6 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD: Umgang mit komplexen Formen, S. 131

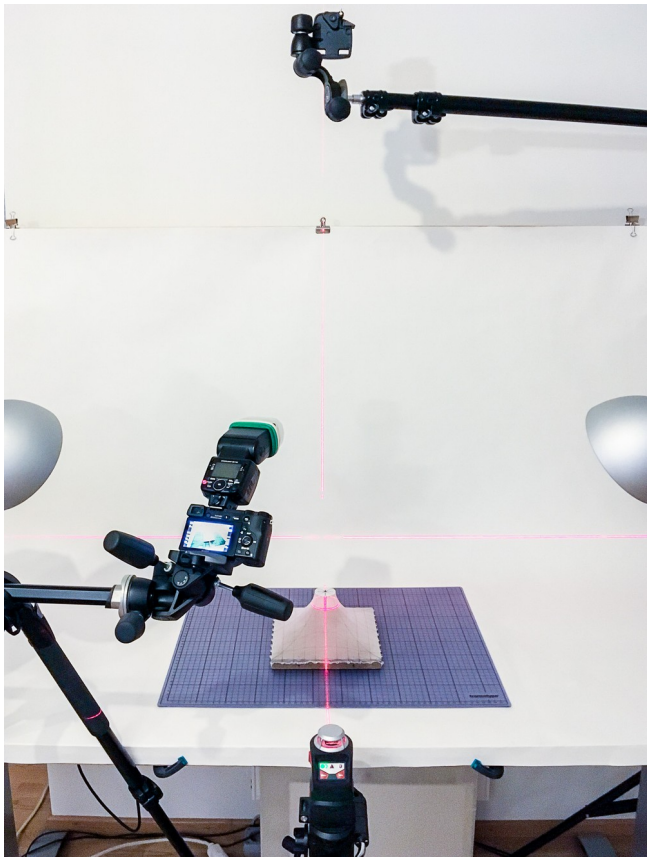

Abb. 65: Linienlaser: Ausrichtung Modell - Kamera

3.3 Vorarbeiten zum Modellbau

Im folgenden Kapitel werden die Vorarbeiten behandelt, die zur Herstellung der im Kapitel 3.4 Modell-Technik, S. 65 beschriebenen Modellmethoden nötig sind:

- 3.3.1 Modell-Platte, S. 52
- 3.3.2 Spann-Platte, S. 54
- 3.3.3 Strumpf-Stoff, S. 55

Da die Dimensionen der konkreten Umsetzung von den tatsächlichen Modellmaßen abhängen, sollten diese zuvor anhand der Beschreibung der jeweiligen Grundform (3.4 Modell-Technik, S. 65) definiert und nötigenfalls angepasst werden.

3.3.1 Modell-Platte

Aufwand[1]: **ca. 15 min** Komplexität[2]: **niedrig** **Kosten: € 3 - 10**

Material (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39.)

- Weichfaserplatte, Stärke: 10 - 20 mm: L x B: 200 x 200 mm

Werkzeug

- Geodreieck, Lineal
- Cutter, Schneidematte
- Stifte 0,5 mm (rot, grün, schwarz)

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

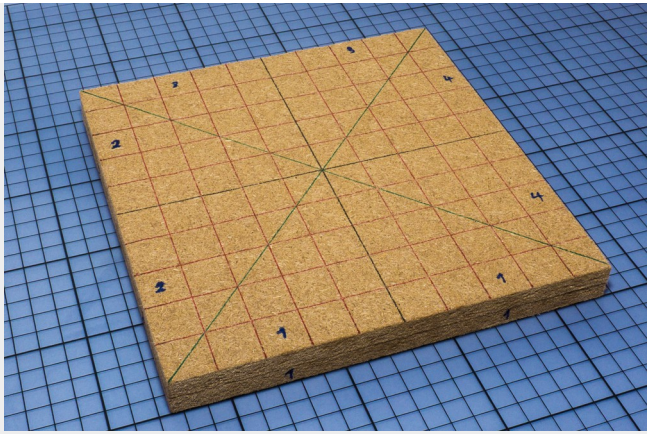

Abb. 66: Modell-Platte

Die Modell-Platte dient als Basis für das Modell, an der die Unterstützung der Membran (Seitenwand, Mast, Seil, Bogen etc.) angebracht sowie der Stoff (mittels Landkartennadeln) befestigt wird.

Zuschneiden

- Die Platte in der benötigten Größe zuschneiden (200 x 200 mm, Abb. 66).

  (i) Die Größe und Form einer Modell-Platte entsprechen üblicher Weise dem Grundriss der Membran-Fläche.

  (i) Eine Platten-Stärke von 15 - 20 mm wird vor allem dann benötigt, wenn eine Membran-Unterstützung (z. B. Mast oder Bogen) in der Platte befestigt werden soll. Außerdem kann eine stärkere Platte vermeiden, dass sich diese bei hoher Membran-Spannung zu sehr verbiegt.

  (i) Eine Polystyrol-Hartschaumplatte ist eine (mögliche, aber nicht empfohlene) Alternative zur Weichfaserplatte (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39).

1 Herstellungszeit: **Zuschneiden**: 5 min; **Raster** (Markierungen): 10 min

2 Schwierigkeitsgrad: Es bedarf keiner besonderen Vorkenntnisse, um die Schritte (präzise) ausführen zu können.

Raster

- Mit einem Overhead-Marker oder Filzstift das Raster auftragen:
  20 mm Raster (rot)
  Diagonalen (grün)
  Mittellinien (schwarz)

  (i) Ein kleinteiliges Raster (ca. 20 mm) kann bei komplexen Membran-Formen Vorteile bei der Kontrolle der Spannung oder der Wahrnehmung der Oberflächenkrümmung bieten (s. a. 3.2.2 Grundlegende Modell-Technik: Raster, S. 37).
  Werden diese Eigenschaften nicht benötigt, kann auch ein größerer Rasterabstand verwendet werden.

  (i) Werden mehrere Modell-Platten benötigt, kann das Raster gleichzeitig über mehrere Platten gezeichnet werden, bevor diese auseinandergeschnitten werden, um die Herstellungszeit zu verkürzen.

  (i) Es empfiehlt sich, die Modell-Platte an den Seiten mit einer Nummerierung zu versehen, um nach dem Abfotografieren von der Seite und von oben anhand der Fotos eine klare Zuordnung treffen zu können.

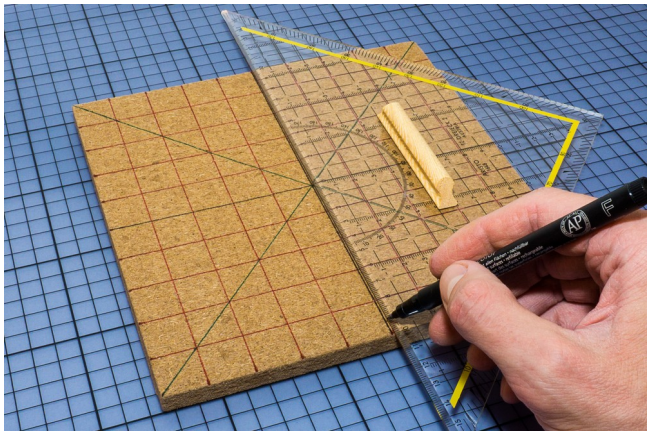

Abb. 67: Raster aufzeichnen

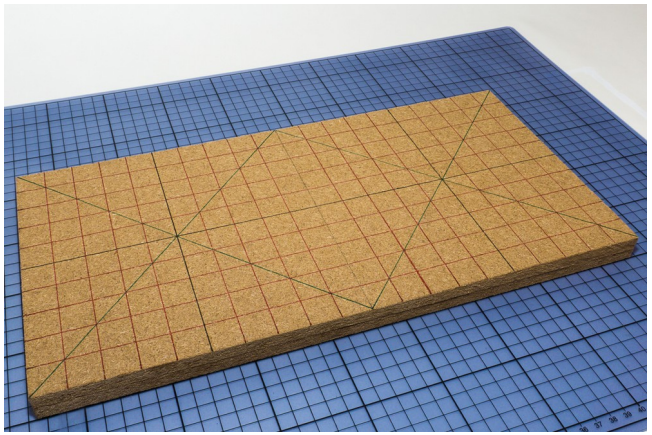

Abb. 68: 2 Modell-Platten in einem Schritt

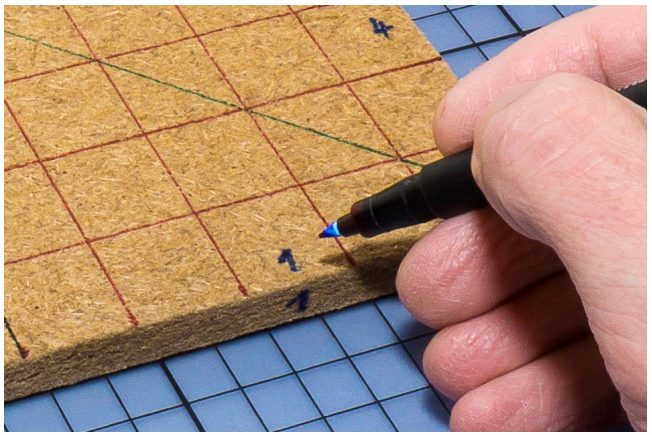

Abb. 69: Überprüfung: Konzentrizität

3.3.2 Spann-Platte

Aufwand[1]: **ca. 15 min** Komplexität[2]: **niedrig** **Kosten: € 5 - 15**

Material (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39.)

- Weichfaserplatte, Stärke: 10 - 20 mm: L x B: 400 x 400 mm

Werkzeug

- Geodreieck, Lineal
- Stifte 0,5 mm (rot, grün, schwarz)
- Cutter, Schneidematte

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

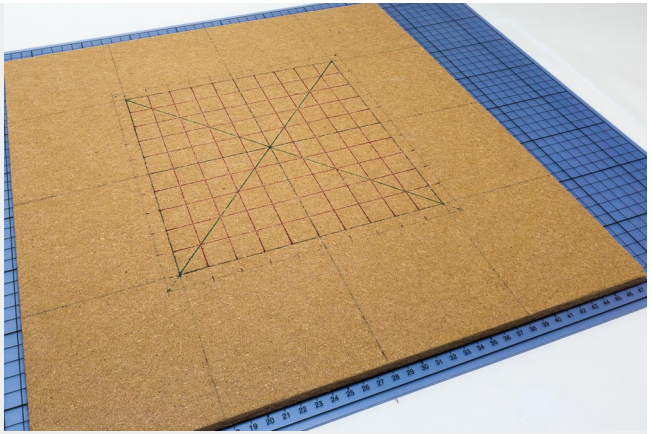

Abb. 70: Spann-Platte mit Raster

Die Spann-Platte dient dazu, das Raster auf einen darauf gleichmäßig ausgebreiteten und befestigten Stoff zu übertragen.

Zuschneiden

- Die Platte in der benötigten Größe zuschneiden (400 x 400 mm, Abb. 70; s. a. 3.3.1 Modell-Platte: Zuschneiden, S. 52).

  (i) Die Größe der Spann-Platte bzw. des Rasters muss entsprechend der Größe des benötigten Strumpf-Stoffs gewählt werden. Für die in dieser Arbeit beispielhaft ausgeführten Modelle entspricht die benötigte Größe des Stoffs, und damit die Größe des Rasters auf der Spann-Platte, 200 x 200 mm.

  (i) Die Spann-Platte benötigt zumindest 10 mm Überstand über das Raster, um den Strumpf-Stoff darüber spannen zu können.

Raster

- Mit einem Overhead-Marker oder Filzstift das Raster (200 x 200 mm) mittig auf die Platte auftragen (s. a. 3.3.1 Modell-Platte: Raster, S. 53): 20 mm Raster (rot), Diagonalen (grün), Mittellinien (schwarz)

  (i) Zur Befestigung des Stoffs mit gleichmäßigem Überstand über das Raster (hier 10 mm) eine Markierung anbringen, an der der mit gleichmäßig gespannt befestigt werden kann (mittels Landkartennadeln).

1 Herstellungszeit: **Zuschneiden**: 5 min; **Raster** (Markierungen): 10 min

2 Schwierigkeitsgrad: Es bedarf keiner besonderen Vorkenntnisse, um die Schritte (präzise) ausführen zu können.

3.3.3 Strumpf-Stoff

Aufwand[1]: **ca. 20 min** Komplexität[2]: **mittel** **Kosten: € 2 - 10**

Material (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39.)

- Damenstrumpfhose XL (hell): zugeschnitten: L x B: ca. 200 x 200 mm

Werkzeug

- Geodreieck, Lineal
- Cutter, Schneidematte
- Schere
- Stifte 0,5 mm (rot, grün, schwarz)
- Stecknadeln (ca. 45)
- optional: Rollschneider, Schneidelineal

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

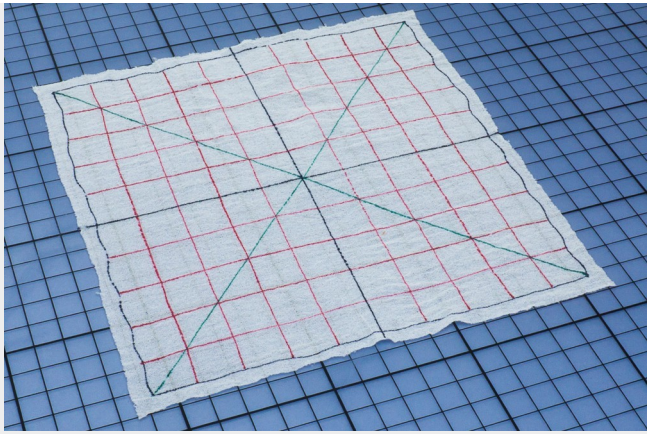

Abb. 71: Strumpf-Stoff mit Raster

Der Strumpf-Stoff dient dazu, die Form einer doppelt gekrümmten Membran-Fläche (ohne aufwendiges Zuschnittsmuster) annähern zu können. Das aufgezeichnete Raster erleichtert das Ausrichten und gleichmäßige Spannen des Stoffs am Modell.

Eigenschaften

Strumpfhosen werden meist aus Polyamid (Nylon) und einem geringen Anteil Elasthan (ca. 5 %) hergestellt [wikipedia.org 2017b].
Dabei wird der Stoff maschinell gewirkt (als Rundwirkware). Der gewirkte Stoff zeichnet sich durch seine große Elastizität (im Vergleich zu anderen Herstellungsformen) aus und wird deshalb auch zur Herstellung von Bekleidung verwendet.
Weitere Einflussfaktoren auf die Eigenschaften des Stoffs sind die Feinheit des Garns und die Maschendichte [wikivisually.com 2017].

Der für die Umsetzung in dieser Arbeit verwendete Strumpf-Stoff:
95% Polyamid, 5 % Elasthan, Gr. 4 (46 - 48), weiß.

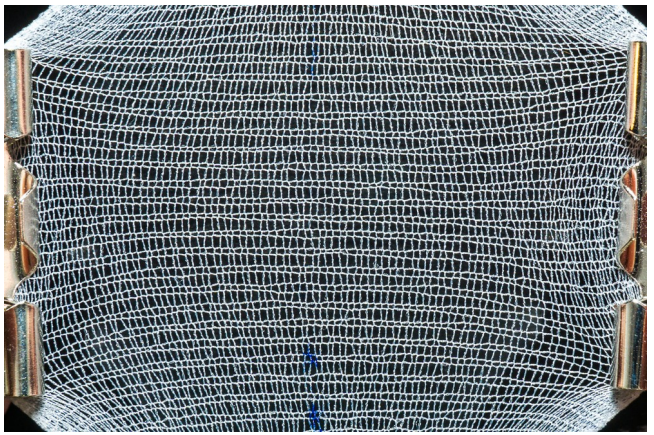

Abb. 72: Gespannter Strumpf-Stoff

1 Herstellungszeit: **Zuschneiden**: 5 min; **Spannen**: 5 min; **Raster** (Markierungen): 10 min

2 Schwierigkeitsgrad: Besonders für das Zuschneiden und Spannen ist hohe Genauigkeit in Ablauf und Ausführung erforderlich, um ein gleichförmiges (hier quadratisch) und gleichmäßig gespanntes Stoff-Stück zu erhalten.

- **Dehnungsverhalten: Ausdehnung**
  Ein kleiner Test verdeutlicht die Eigenschaft des Strumpf-Stoffs, sich stark auszudehnen:

  Wird der Strumpf gedehnt, kommt er nicht mehr in die ursprüngliche Form zurück, sonder bleibt etwas ausgedehnt.
  Reicht man aber bei weiterem Dehnen näher an die maximale Dehnung heran, wird der Stoff nicht mehr so stark ausgedehnt und kommt wieder näher an die vorherige Form zurück.
  S. a. Nachtrag: Dehnungsverhalten 1, S. 59.

Abb. 73: Strumpf-Stoff: Ausgangsform

  Diese Eigenschaft ist besonders zu berücksichtigen, wenn das Modell in eine Richtung wesentlich schmaler ist als in die andere und der Stoff dadurch beim Bespannen des Modells ungleichmäßig ausgedehnt wird, was zu einer ungleichmäßigen Form und Spannungsverteilung führen kann.

Abb. 74: Strumpf-Stoff: Dehnung

Abb. 75: Strumpf-Stoff: Ausgedehnt

  Der Strumpf-Stoff sollte dann zuvor oder bei der Form-Kontrolle gleichmäßig ausgedehnt werden.
  S. a. 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring: Nachtrag: Stoff Dehnungsausgleich, S. 80.

- **Dehnungsverhalten: unterschiedliche Dehnung**
  Eine weitere bei vielen Geweben übliche Eigenschaft ist das unterschiedliche Dehnungsverhalten in den beiden Webrichtungen (Kette und Schuss). Um dennoch eine möglichst ausgeglichenes Dehnungsverhalten zu erreichen, kann die Richtung mit der stärkeren Dehnung durch eine Verkürzung des Stoffs kompensiert werden.
  S. a. Nachtrag: Dehnungsverhalten 2, S. 60 f.

Zuschneiden

- Das Hosenbein am oberen Ende des Oberschenkels abschneiden und davon ein ca. 200 mm langes Stück zuschneiden.

  (i) Das Glatt-Ziehen sowie ein Rollschneider erleichtern das gleichmäßige Zuschneiden des Stoffs.

Abb. 76: Glatt-Ziehen des Strumpf-Stoffs

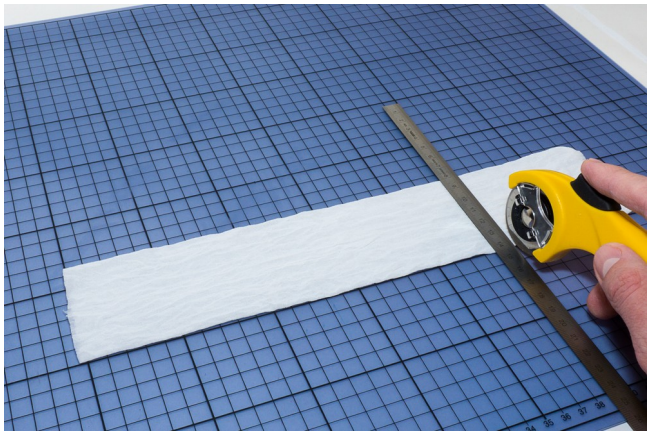

Abb. 77: Zuschneiden des Oberschenkelteils

- Vor dem Aufschneiden des Stoffs der Länge nach auf den Längsseiten Mitte und Enden markieren.

  (i) Die Markierungen dienen zur Kontrolle des Schnitts und später zur Ausrichtung des Stoffs über der Mitte des Rasters und entlang der Mittelachsen der Spann-Platte.

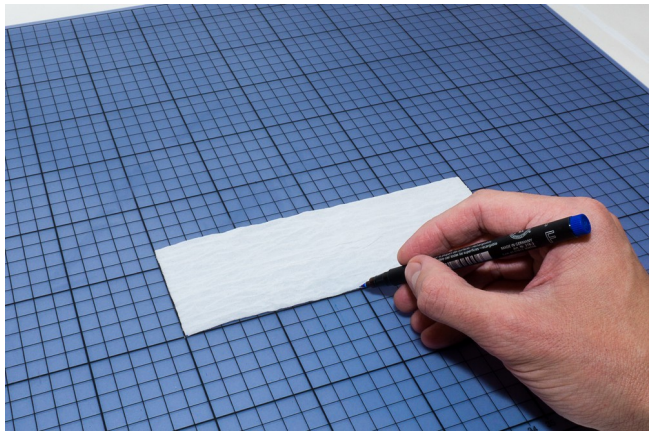

Abb. 78: Markierung der Mitten und Enden

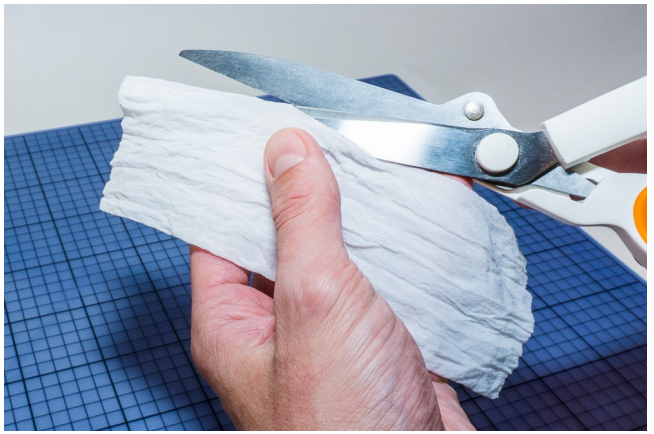

Abb. 79: Aufschneiden in Längsrichtung

  (i) Mit 2 Linealen kann der Stoff zur weiteren Bearbeitung gut geglättet werden.

  (i) Die Randmarkierungen sowie den Mittelpunkt der Fläche kontrollieren und falls nötig nachzeichnen.

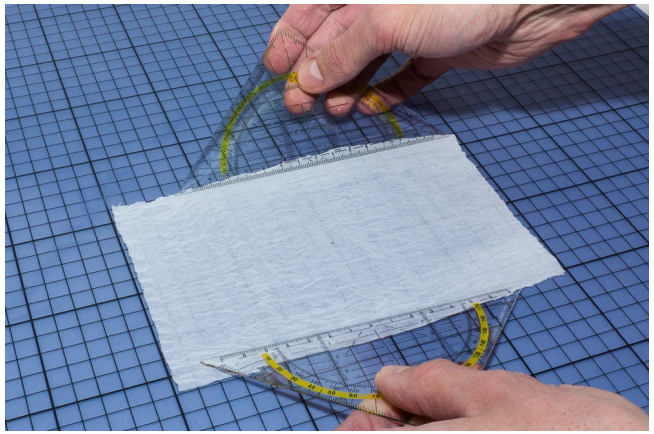

Abb. 80: Glätten des Stoffs

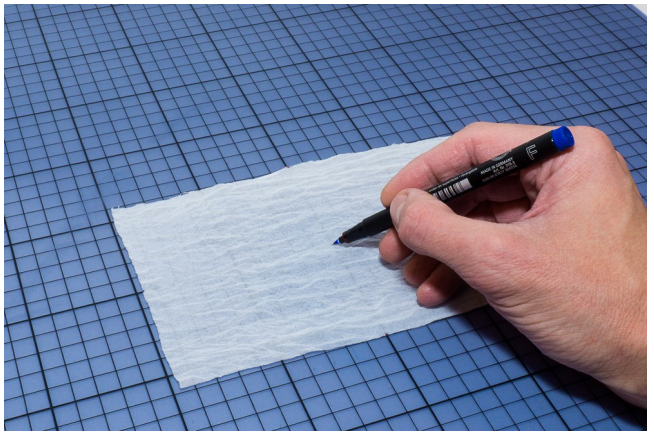

Abb. 81: Randmarkierung / Mittelpunkt

Raster

- Das Stoff-Stück mit einer Stecknadel mittig am Raster der Spann-Platte befestigen.

  (i) In Kombination mit geeigneten Stiften kann das Raster gleichzeitig auf 2 Stoff-Stücke durchgezeichnet werden, um die Herstellungszeit zu verkürzen.

- Beim Spannen die Stecknadeln zuerst an den Mittelachsen anbringen und in Folge abwechselnd (längs und quer) in Richtung Ecken arbeiten.

  (i) Die Stecknadeln dabei etwas außerhalb des Rasters (ca. 10 mm Überstand) anbringen.

  (i) Der Stoff sollte dabei möglichst gleichmäßig (also mit symmetrischem Überstand) gespannt werden, damit das Raster eine ausgeglichene Spannungs-verteilung im Stoff wiedergibt.

- Mit einem Overhead-Marker oder Filzstift das Raster (analog zu 3.3.1 Modell-Platte: Raster, S. 53) auf den Stoff übertragen.

Abb. 82: 2 Stoff-Stücke mittig am Raster befestigt

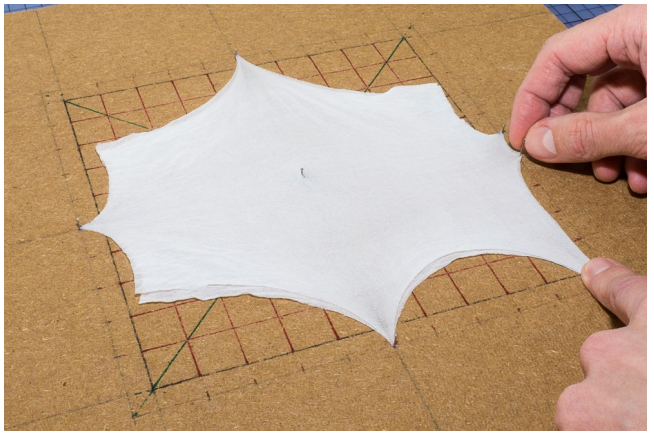

Abb. 83: Spannen ausgehend v. den Mittelachsen

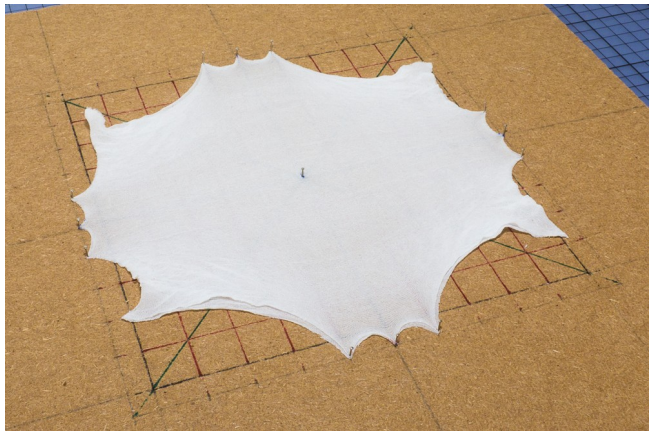

Abb. 84: Abwechselnd zu den Ecken hin arbeiten

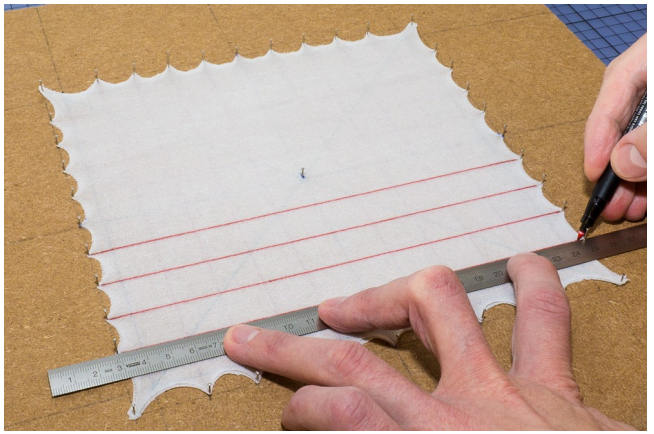

Abb. 85: Nachzeichnen des Rasters

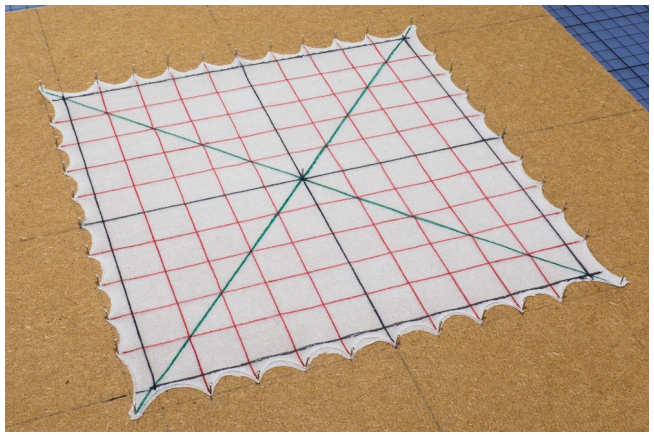

Abb. 86: Diagonalen, Mittel- und Raster-Linien

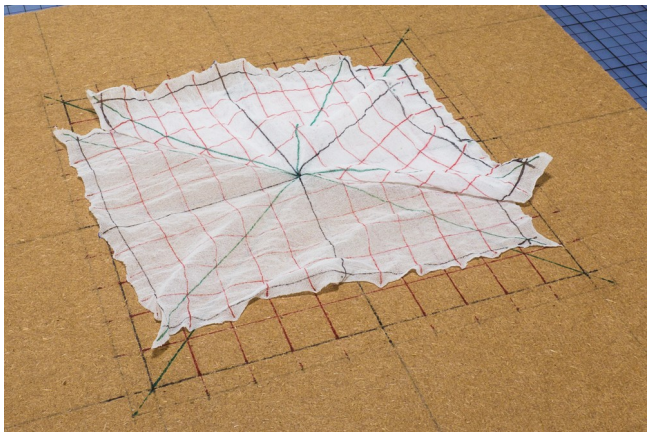

Abb. 87: Durchzeichnung am unteren Stoff

Nachtrag: Dehnungsverhalten 1

Da die Eigenschaften des Strumpf-Stoffs und deren Kontrolle einen starken Einfluss auf die Qualität der gefundenen Form bzw. den Grad der Annäherung an eine im Bauwerk realisierbare Form haben, sollen 2 kleine Tests diese Eigenschaften verdeutlichen.

- **Maximal-Dehnung entlang der beiden Gewebe-Achsen**
  Zunächst wird auf den Stoff (2 Lagen übereinander) ein Quadrat aufgezeichnet und dabei Längs- und Quer-Richtung unterschiedlich markiert (quer zum Hosenbein: Strichlinie; längs zum Hosenbein: Punktlinie) und (mit dem Rollschneider) zugeschnitten.

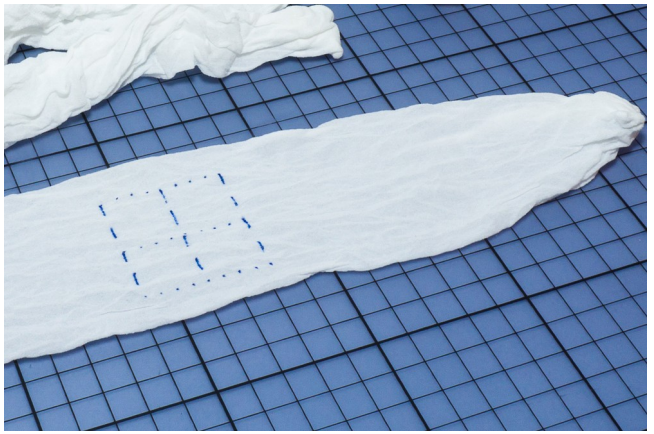

Abb. 88: Anzeichnen des Test-Musters

- Die beiden Stoff-Stücke werden nun an einer Seite auf einer Platte befestigt, um sie in die Länge ziehen zu können. Dabei sind die Stoff-Stücke zueinander um 90 Grad verdreht (das untere Stück wird in Längs- und das obere in Quer-Richtung gedehnt).

  Beide Stücke werden bis zur maximalen Dehnung ausgezogen und in der Position fixiert.

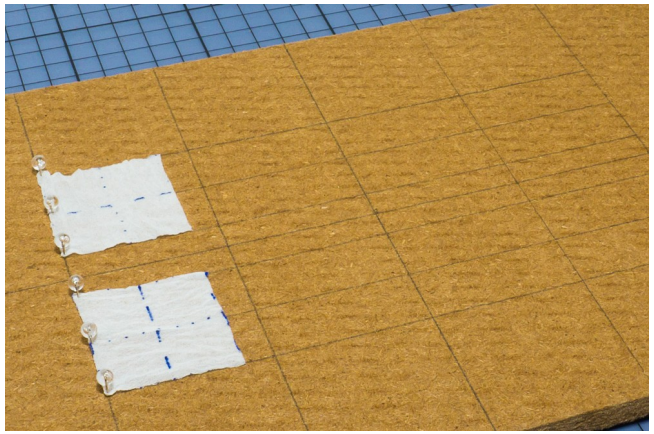

Abb. 89: 2 Stoff-Stücke 90 ° zueinander verdreht

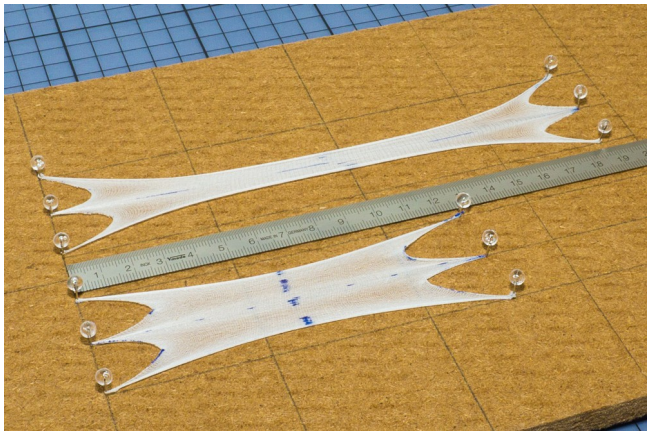

Abb. 90: Maximal-Dehnung (längs und quer)

Das Ergebnis zeigt klar, dass der Stoff in Längs-Richtung (des Hosenbeins) eine deutlich geringere maximale Dehnung aufweist als quer dazu.

Würde der Stoff gleichzeitig in beide Richtungen gespannt, würde der Dehnungsunterschied in beiden Richtungen wohl geringer ausfallen.
Die wesentliche Erkenntnis liegt in der Tatsache, dass sich der Strumpf-Stoff bei der Dehnung entlang seiner Hauptachsen unterschiedlich verhält.

Nachtrag: Dehnungsverhalten 2

Um das Dehnungsverhalten genauer einschätzen zu können, soll herausgefunden werden, wie stark sich die Dehnung zwischen den beiden Gewebe-Achsen unterscheidet.

- Die Anordnung der Zugversuche für verschiedene Richtungen ist in Abb. 92 dargestellt [Gaß 1990: S. 6.10].

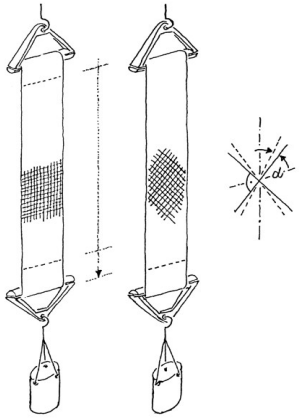

Abb. 91: Einachsige Zugversuche

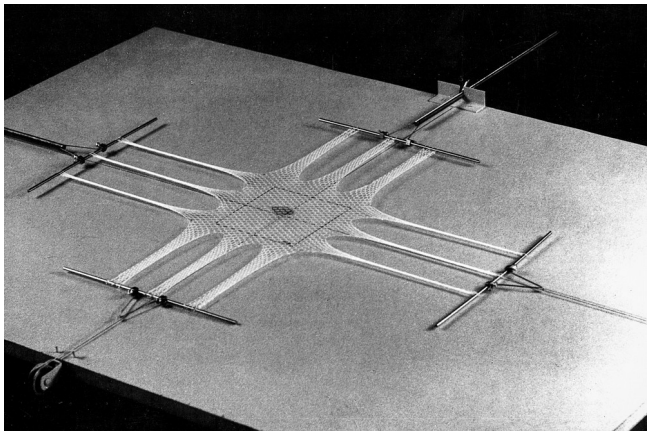

Abb. 92: Dehnungsversuch mit Sechsecknetz

- Abb. 93 zeigt einen biaxialen Dehnungsversuch mit Sechsecknetz [Gaß 1990: S. 4.0].

- **Versuch zur näherungsweisen Ermittlung des Dehnungsverhältnisses**
  Es werden wieder quadratische Stoff-Stücke der gleichen Größe mit unterschiedlicher Markierung von Längs- und Quer-Richtung zugeschnitten.

- Auf einer Hängevorrichtung werden beide Stoff-Stücke (das 2. um 90 Grad verdreht) eingespannt und mit jeweils den gleichen Gewichten beschwert.

Abb. 93: 2 deckungsgleiche Stoff-Stücke

- Das Ergebnis bestätigt wiederum einen großen Unterschied beim Dehnungsverhalten in Längs- und Quer-Richtung und liefert Werte, mit denen im Folgenden eine Kompensierung des Dehnungsverhalten vorgenommen werden kann.

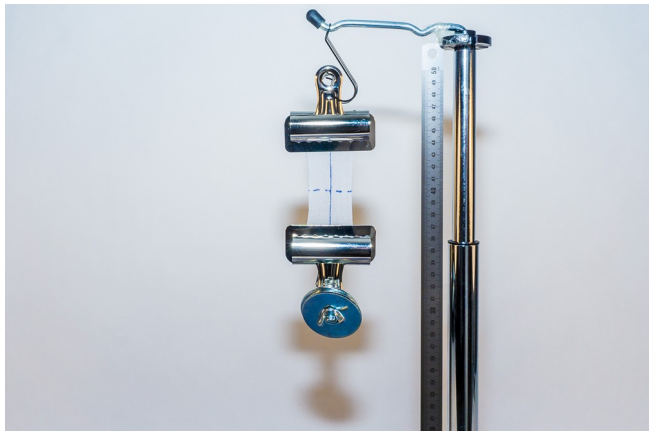

Abb. 94: Dehnung: Längs-Richtung

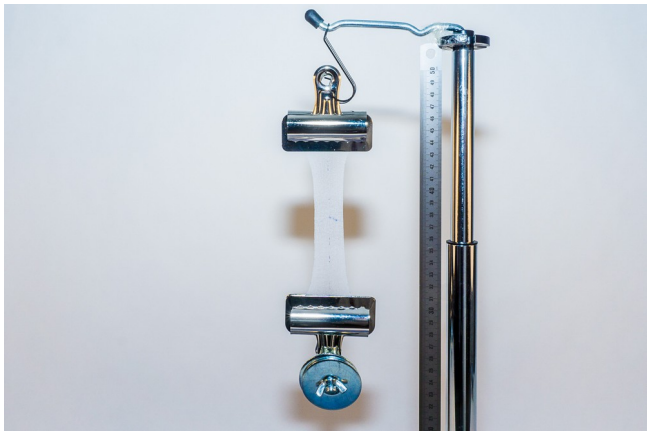

Abb. 95: Dehnung: Quer-Richtung

- (i) Eine genauere Bestimmung des Dehnungsverhalten kann durch Spannen des Stoffs gleichzeitig in beide Richtungen erreicht werden (wie auch bei einem biaxialem Materialtest). Dafür wird ein quadratisches Stoff horizontal auf einem Tisch liegend auf allen 4 Seiten eingespannt. Eine gleichmäßige Spannung wird dann durch Befestigung gleich schwerer Gewichte an allen Seiten erreicht. Dabei hängen die Gewichte über den Tischrand und müssen gleichmäßig entlang der Seiten verteilt sein (Abb. 96) [Gaß 1990: S. 5.10].
  Diese Methode erzielt durch das gleichzeitige Berücksichtigen beider Richtungen eine realistischere Simulation das tatsächliche Verhalten des Stoffs (bei gleichmäßiger Spannungsverteilung). Dieser Grad der Genauigkeit ist angesichts des relativ hohen Aufwands zur Entwicklung der Entwurfsidee nicht erforderlich.

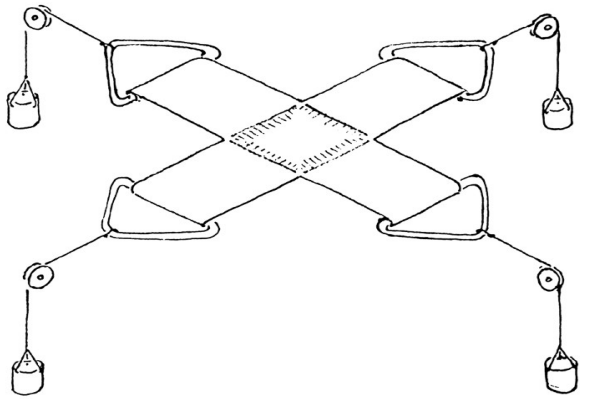

Abb. 96: Versuch mit biaxialem Zug

Nachtrag: Dehnungskompensation

Die Messungen aus dem vorausgegangenen Dehnungsversuch mit 4 unterschiedlichen Gewichten werden nun analysiert.
Das Ziel ist, dadurch das tatsächliche Dehnungsverhalten bei gleichzeitiger Dehnung in beide Richtungen einschätzen zu können.

- Abb. 97 zeigt die am Lineal abgemessene Dehnung an den 4 vorgenommenen Messpunkten in Prozent an, wobei ab dem 3. Messpunkt die Gewichtszunahme linear verläuft.

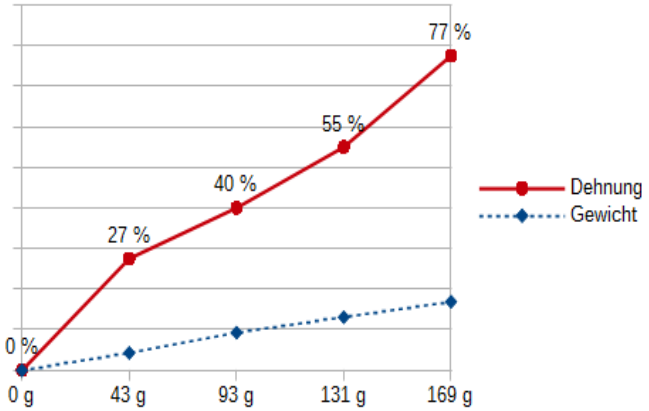

Abb. 97: Dehnung bei 4 unterschiedl. Gewichten

- Die Dehnung in Richtung A (längs zum Hosenbein) verläuft moderat mit 55 % bei 131 g Zuggewicht (Abb. 98). Abb. 99 zeigt die tendenzielle Steigerung der Dehnungszunahme relativ zur Gewichtszunahme in Prozentpunkten.

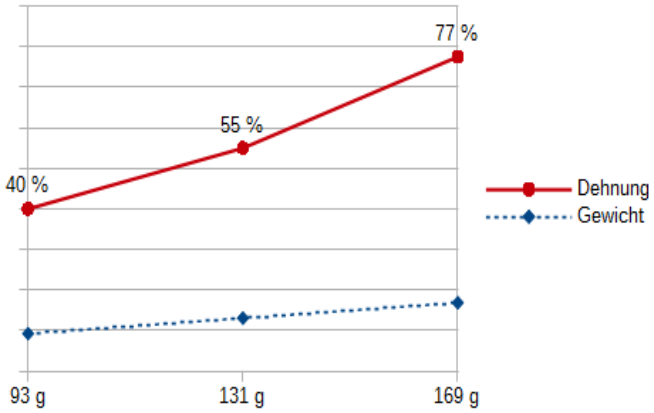

Abb. 98: Moderate Dehnung in Richtung A

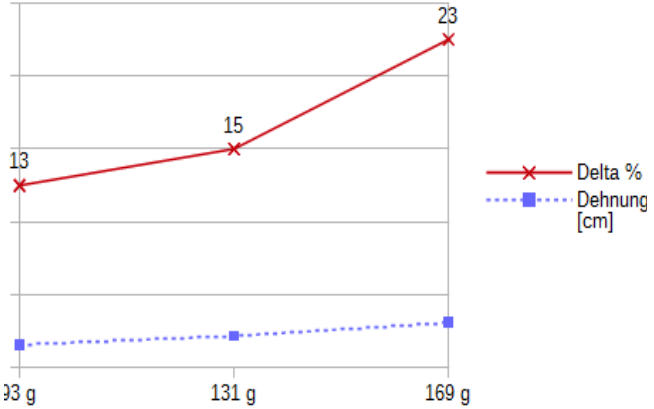

Abb. 99: Dehnung steigend (relativ zu Gewicht)

- In Richtung B (quer zum Hosenbein) fällt die Dehnung mit 203 % bei 131 g Zuggewicht wesentlich stärker aus (Abb. 100), wobei die Dehnungszunahme anfangs recht hoch ausfällt und relativ zur Gewichtszunahme abnimmt (Abb. 99).

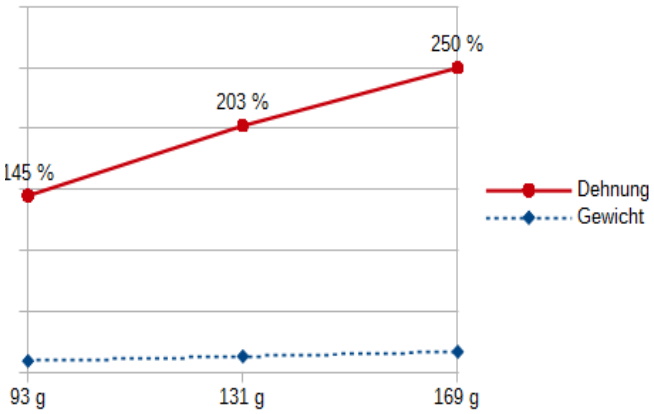

Abb. 100: Starke Dehnung in Richtung B

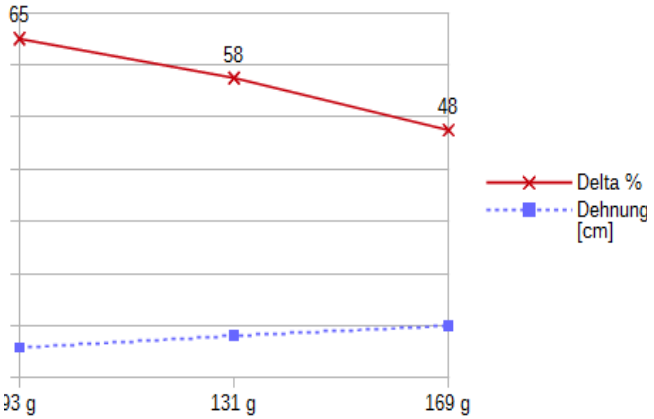

Abb. 101: Dehnung sinkend (relativ zu Gewicht)

- Abb. 102 zeigt den Dehnungsunterschied von B relativ zu A - der für ein ideales Dehnungsverhalten des Stoffs bei 0 liegen sollte. Allerdings zeigt sich anfangs ein steiler anstieg des Dehnungsunterschieds, der bis auf 368 % ansteigt und danach wieder rückläufig wird.

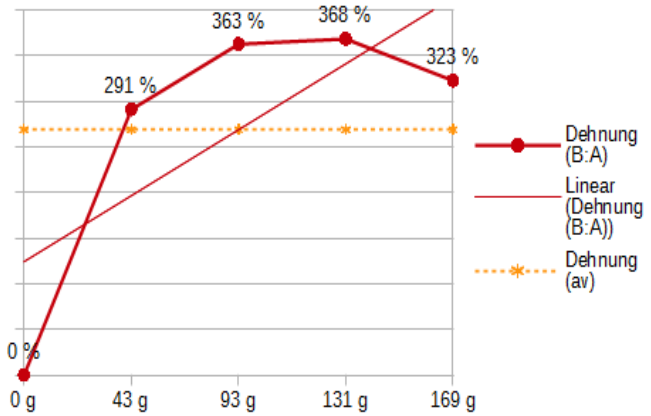

Abb. 102: Dehnung B relativ zu A (Ø 270 %)

- Für die weiteren Berechnungen wird der durchschnittliche Dehnungsunterschied von 270 % (Faktor 2,7) verwendet.

- Um das tatsächliche Verhalten des Stoffs bei biaxialem Zug anzunähern, wird der Dehnungsunterschied auf den Faktor 1,3 halbiert.

  (i) Bei der Verwendung des Stoffs am Modell werden beide Gewebe-Achsen gleichzeitig gespannt und dabei beeinflussen sich beide Richtungen gegenseitig. Durch eine Erhöhung der Spannung in die eine Richtung wird die Dehnung in die andere abgemindert.

- Der Kehrwert zum Dehnungsunterschied ergibt den gesuchten Kompensationsfaktor von ca. 0,75.

  Das bedeutet also, dass eine Kompensation auf ca. 75 % der Stofflänge in Richtung B einen Ausgleich auf ein annähernd gleiches Dehnungsverhalten in beiden Richtungen herbeiführen würde.

- Zur Dehnungskompensation wird nun also ca. ¼ der Stofflänge in Quer-Richtung gekürzt, um den Dehnungsausgleich herzustellen.

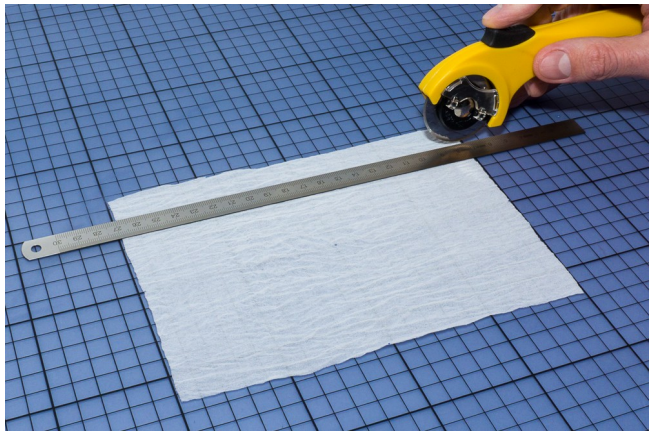
Abb. 103: Kürzen der stärkeren Dehn-Richtung

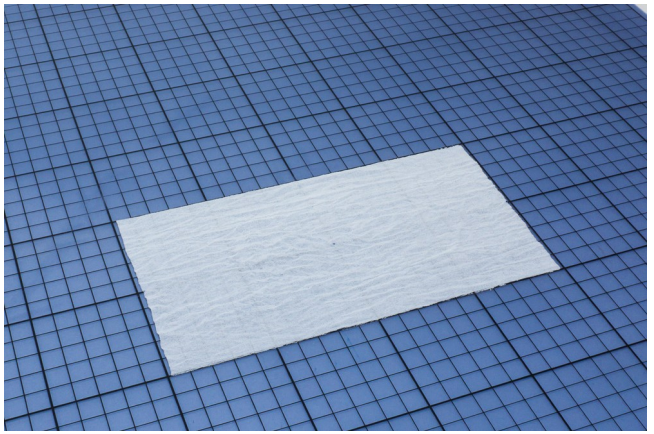
Abb. 104: Stoff-Stück mit Dehnungskompensation

(i) Dieser Versuch und dessen Auswertung sollte für ein Stoff-Stück jeder Produktserie wiederholt werden, da sich die Eigenschaften unterschiedlicher Produkte und Hersteller stark unterscheiden können.

(i) Diese Dehnungskompensation stellt keine exakte Methode der Materialprüfung dar, sonder ist eine experimentelle Annäherung mit einfachen Mitteln, um das Verhalten des Stoffs zu optimieren und die Qualität der Modelle zu erhöhen.

Dabei wird darauf abgezielt, eine schnelle und unkomplizierte Möglichkeit zur Einschätzung der Stoff-Eigenschaften bereitzustellen, die im Rahmen der näherungsweisen Genauigkeit des Vorentwurfsmodells, eine präzise und leichtere Kontrolle der Form ermöglicht.
Da das teilweise erheblich unterschiedliche Dehnungsverhalten in den beiden Gewebe-Achsen des Stoffs zu einer ungleichen Formbildung und damit zu unerwünschten Ergebnissen führen kann, ist das Verständnis über dieses Dehnungsverhalten sowie dessen Kontrolle und Kompensation ein wichtiger Faktor, der das Arbeiten am Modell erleichtert und die Qualität des Ergebnisses verbessert.

(i) Die Genauigkeit kann noch weiter erhöht werden, wenn zur Berechnung der Dehnungskompensation jener Messwert verwendet wird, der dem Gewicht entspricht, das auch benötigt werden würde, um den Stoff am Modell bis zur Befestigung zu dehnen.

Nachtrag: Spann-Tisch

Der Spann-Tisch stellt eine weitere und sehr exakte Möglichkeit dar, eine gleichmäßige Spannung im Stoff zu erreichen.
Wenn auf größtmögliche Genauigkeit Wert gelegt wird, kann die Anfertigung einer entsprechenden Vorrichtung von Vorteil sein.

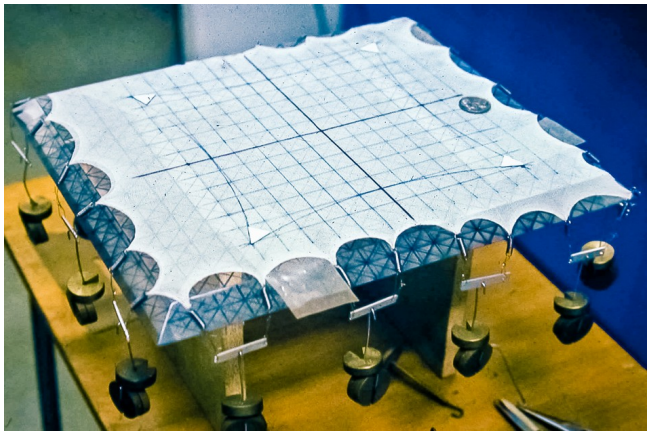

Abb. 105: Spann-Tisch der LSRU

- Wird das Spannen durch angehängte Gewichte bewerkstelligt (Abb. 105), so ist durch den gleichmäßigen Zug mit der gleichen Kraft von allen Seiten sichergestellt, dass der Stoff sich ausgeglichen spannt - unabhängig davon, ob die Dehnung in den Gewebe-Achsen unterschiedlich ist)

- Wird das Raster in diesem Zustand aufgetragen, kann der Stoff damit auch am Modell mit einer ausgeglichenen Spannung ohne zusätzliche Dehnungskompensation befestigt werden.

  (i) Die Gewichte sollten ungefähr der Kraft entsprechen, die nötig ist, um das gleich Stück Stoff (gleiche Größe) am Modell zu Spannen (die Dehnungsstrecken sollten sich in etwa entsprechen).

3.4 Modell-Technik

Im folgenden Kapitel wird die Umsetzung der Modell-Technik exemplarisch anhand der Grundformen in einer Schritt-für-Schritt-Anleitung beschrieben:

- Flächenunterstützung: keine
  - 3.4.1 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche, S. 66
- Flächenunterstützung: **punktförmig**
  - 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring, S. 72
  - 3.4.3 Typ 3: Hochpunkt - Mast mit Buckel, S. 82
  - 3.4.4 Typ 4: Hochpunkt - Mast mit Rosette, S. 83
  - 3.4.5 Typ 5: Hochpunkt - Mast mit Augschlaufe, S. 91
- Flächenunterstützung: **punktförmig / linienförmig**
  - 3.4.6 Typ 6: Hochpunkt - Mast mit Seil, S. 96
- Flächenunterstützung: **linienförmig**
  - 3.4.7 Typ 7: Bogengestützt, S. 105
- Anpassungsmöglichkeit: **Seilrand**
  - 3.4.8 Typ 8: Seilrand am Beispiel Mast mit Ring, S. 115

3.4.1 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche

Aufwand[1]: **ca. 1 h 25 min** Komplexität[2]: **niedrig** **Kosten: € 5 - 15**

Material / Werkzeug (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39)

- Weichfaserplatte, Stärke: 10 - 20 mm: L x B: 200 x 200 mm, 230 x 200 mm
- Strumpf-Stoff (weiß) L x B: ca. 200 x 200 mm
- Geodreieck
- Kleber (Heißkleber, Express-Holzleim...)
- Stifte 0,5 mm (rot, grün, schwarz)
- Landkartennadeln (52[3] Stk.)
- Schneidematte (optional)

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

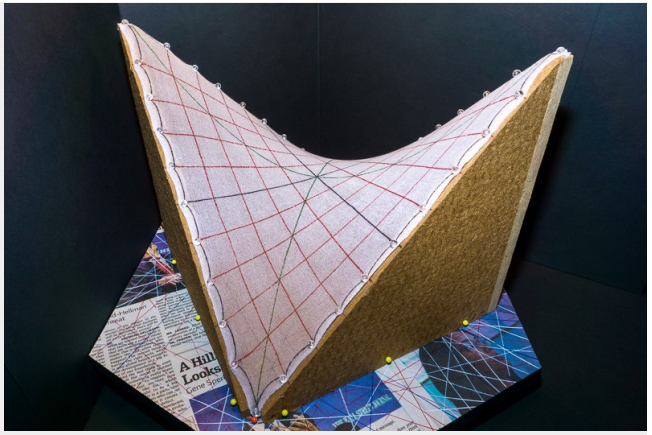

Abb. 106: HP-Fläche

Da das HP-Zelt keine Flächenunterstützung besitzt, wird die Krümmung über die Ränder erzeugt.

Vorbereitung: Modell-Platte

- Die Modell-Platte wie in 3.3.1 Modell-Platte, S. 52 beschrieben vorbereiten.

  (i) Eine Stärke von 15 - 20 mm wird vor allem dafür benötigt, z. B. Masten in die Modell-Platte stecken zu können oder um zu verhindern, dass die Vorspannung im Stoff die Platte zu stark durchbiegt. Ist das nicht der Fall - wie beim aktuellen Modell - kann auch eine Platten-Stärke von 10 mm ausreichend Stabilität bieten. Die Vorteile dieser Platten-Stärke liegt in der leichteren Verarbeitbarkeit (vor allem beim Schneiden) und eine eventuell leichtere Verfügbarkeit.

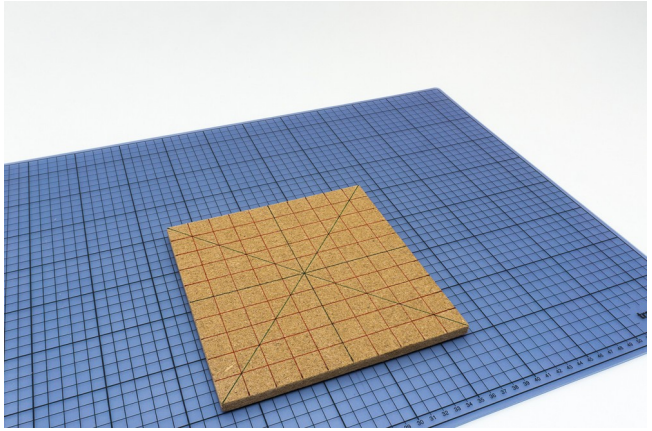

Abb. 107: Modell-Platte

s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34
s. a. 3.3 Vorarbeiten zum Modellbau, S. 51

1 Herstellungszeit: **Grundplatte**: 5 min; **Seitenwände**: Zuschneiden: 15 min, Verbinden: 15 min, **Raster**: 15 min; **Strumpf-Stoff**: 20 min; **Membran**: Aufspannen: 15 min.

2 Schwierigkeitsgrad: Es bedarf keiner besonderen Vorkenntnisse, um die Schritte (präzise) ausführen zu können.

3 Landkartennadeln: 12 Stk. zur Fixierung beim Zusammenfügen oder Verkleben; 40 Stk. zur Befestigung des Stoffs

- Die Seitenteile in der gewünschten Höhe zuschneiden.

  (i) Proportion der HP-Fläche: ein Verhältnis von 1:1 bei Seite zu Höhe führt zu stärkeren Krümmungen in der Membran-Fläche und damit zu geringeren Spannungen und hilft auch Problemen mit eventuell zu flachen Stellen (Regensack) vorzubeugen.

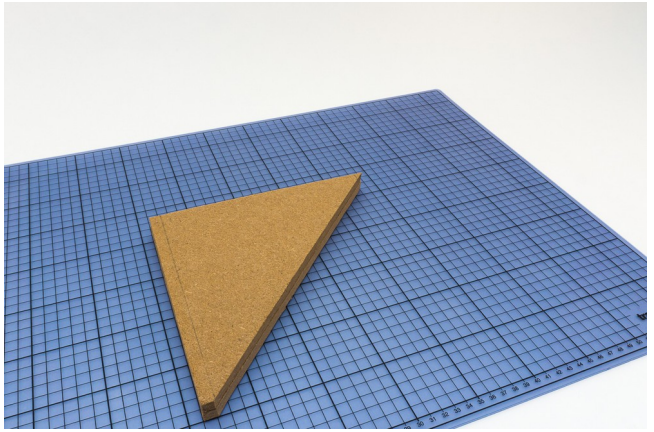

Abb. 108: Seitenteile: zugeschnitten

- Verbinden der Teile (mittels Klebstoff und fixieren durch Landkartennadeln oder mit Heißkleber).

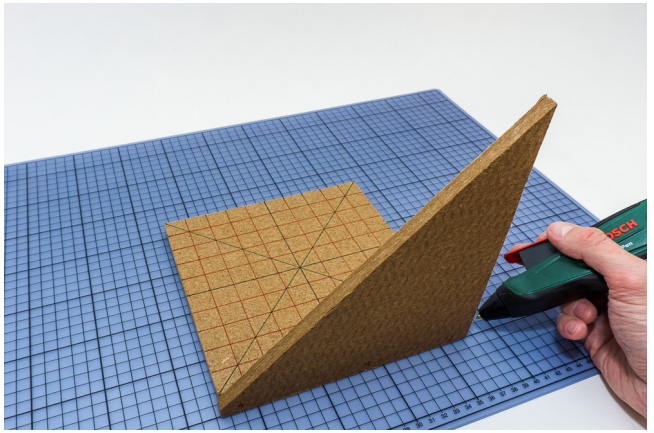

Abb. 109: Verbindung der Teile

- Die Nummerierung der Teile sowie die Markierung der Verbindungsstellen erleichtert das korrekte zusammensetzen (vor allem bei komplexeren Formen).

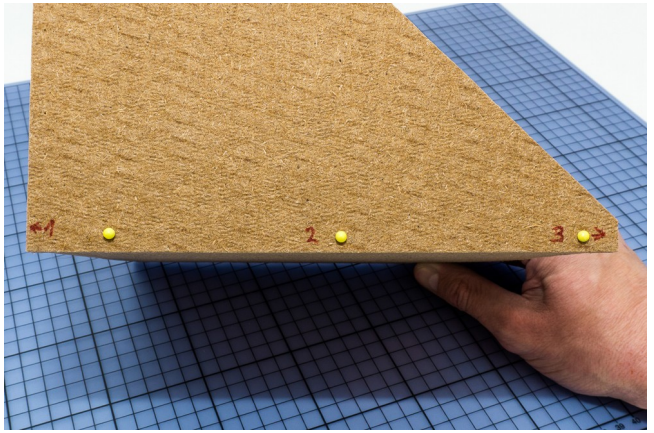

Abb. 110: Markierung der Teil

- Die Raster-Linien mit dem Geodreieck auf die Seitenteile übertragen. Diese dienen dann als Anhaltspunkt für die spätere Befestigung des Stoffs.

Modell: Stoff-Bespannung

- Den Stoff wie in 3.3.3 Strumpf-Stoff, S. 55 beschrieben vorbereiten.

- Den Stoff analog zum Aufspannen auf die Spann-Platte (3.3.3 Strumpf-Stoff: Raster, S. 58) gleichmäßig und symmetrisch am Modell befestigen. Dabei abwechselnd (längs und quer) von den Mittelachsen ausgehend (Abb. 112) die Landkartennadeln anbringen und in Richtung Ecken arbeiten.

  (i) Befestigung Stoff: Alternativ zu der Befestigung, wie in Abb. 113 gezeigt, kann der Stoff auch seitlich an den Modell-Platten befestigt werden (mit kürzeren Landkartennadeln, die nicht aus der Modellwand ragen). Das Stoff-Stück muss dafür allerdings genügend groß sein.

  (i) Ränder: Bei dem gezeigten Modell ergibt sich an den Rändern die Situation, dass der Stoff oben über die Innenkante der Seitenteile gespannt wird, sich unten aber von der Innenkante abhebt. Dadurch verläuft der Rand der Membran nicht einheitlich an der Innenkante der Seitenteile, sondern verschiebt sich unten in Richtung Außenkante entlang der Befestigung des Stoffes. Dies liegt bei dem hier verwendeten Maßstab bzw. den Materialien innerhalb der erzielbaren Genauigkeitsschwankungen (wie z. B. das unterschiedliche Dehnungsverhalten entlang der Achsen des Strumpf-Stoffs auch zu leicht unterschiedlichen Krümmungen führt, die erst in einem größeren Maßstab und mit einem anderen Stoff kontrolliert erstellt werden können). Für den hier demonstrierten Zweck der Entwicklung der Entwurfsidee kann die generierte Form durchaus als Basis für den Vorentwurf dienen.
  Für eine exakte Begrenzung der Membran-Fläche (in einem größeren Maßstab) gibt es zwei Möglichkeiten:
  A) Begrenzung an der Außenkante der Seitenteil: Dabei wird der Stoff an der Außenfläche der Seitenteile befestigt. Damit die Begrenzung im oberen Bereich der Seitenteile auch an der Außenkante verlaufen kann, muss dort eine Abschrägung

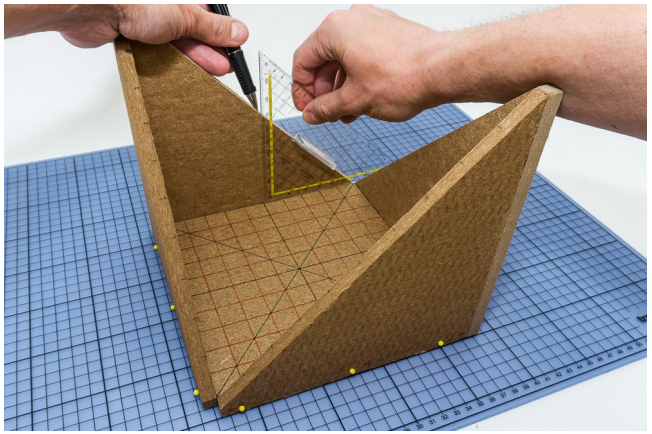

Abb. 111: Raster auf Seitenteile übertragen

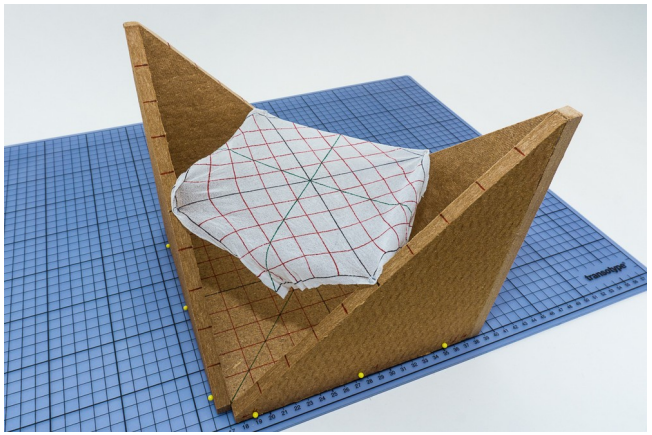

Abb. 112: Stoff-Befestigung: ausgehend: mittig

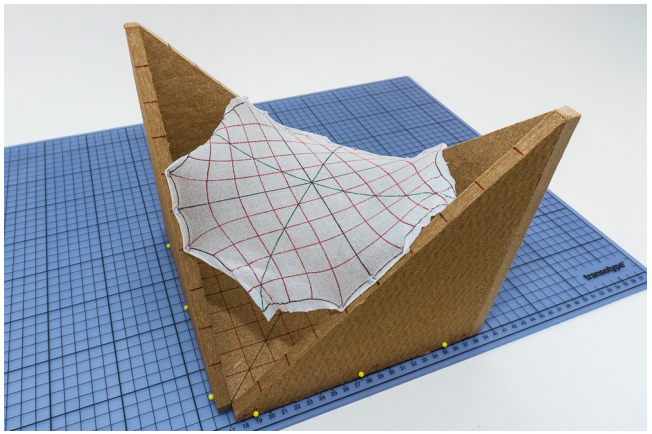

Abb. 113: Befestigung: zu d. Ecken hin

zur Innenkante hin vorgenommen werden, damit der gespannte Stoff dort nicht mehr aufliegt sonder nur an der Außenkante. In diesem Fall würde vorab die Seitenteile nicht außen an die Modell-Platte montiert werden, sondern auf der Modell-Platte bündig mit der Außenkante.
B) Begrenzung an der Innenkante der Seitenteile: Um die Begrenzung der Membran-Fläche an der Innenkante der Seitenteile verlaufen zu lassen, kann über dem Stoff eine Leiste (aus Holz oder Karton) mit der Breite entsprechend der Stärke der Seitenteile angebracht werden, die das Abheben des Stoffs von der Innenkante im unteren Bereich verhindert. Das vorhergehende Spannen und Befestigen des Stoffs sollte, wie oben beschrieben, an der Außenfläche der Seitenteile erfolgen.

- Das fertige Modell mit der gleichmäßig gespannten Membran-Fläche.

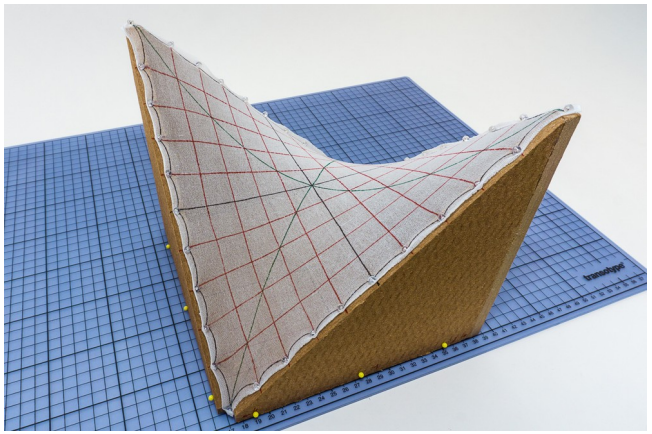

Abb. 114: Die fertig gespannte Membran-Fläche

(i) Form-Kontrolle:
Raster: Das Raster dient als Kontroll-Hilfe, um eine möglichst gleichmäßige Spannung des Stoffs in allen Bereichen des Modells zu erreichen. Wichtig ist dabei, dass die Mittelachsen und Diagonalen des Stoffs über denen der Modell-Platte liegen und die Raster-Linien gleichmäßig verteilt sind (dabei spielt es keine Rolle, ob der Rand des Rasters sich mit jenem der Modell-Platte deckt - die beiden Raster dienen nur dazu, um z. B. an allen Seiten einen gleichmäßigen Überstand sowie gleichmäßige Abstände zwischen den Raster-Linien des Stoffes herstellen zu können.
Kommt der Scheitelpunkt nicht in der Mitte der Modellhöhe zum liegen, könnte es daran liegen, dass der Stoff ein unterschiedliches Dehnungsverhalten in den Hauptachsen aufweist (und somit die Achse die nach unten führt stärker zieht, als die Achse, die nach oben führt). Dies könnte dadurch ausgeglichen werden, dass entlang der Achse mit der stärkeren Dehnung der Stoff stärker gespannt wird (also die Landkartennadeln gleichmäßig auf beiden sich gegenüberliegenden Seiten im Stoff nach innen versetzt befestigt werden). Zu beachten ist jedenfalls, dass die Mittellinien und Diagonalen der beiden Raster sich decken.

Analyse: Hauptkrümmungen

Da die Seitenteile des Modells die frontale Erfassung beider Hauptkrümmungen am Foto verhindern, wurde die Oberfläche mittels Photogrammetrie digitalisiert und die Hauptkrümmungen vom 3D-Modell ermittelt (s. a. 4.3 Formerfassung mittels Photogrammetrie, S. 133).

S. a. 4.2.6 Umgang mit komplexen Formen, S. 131).

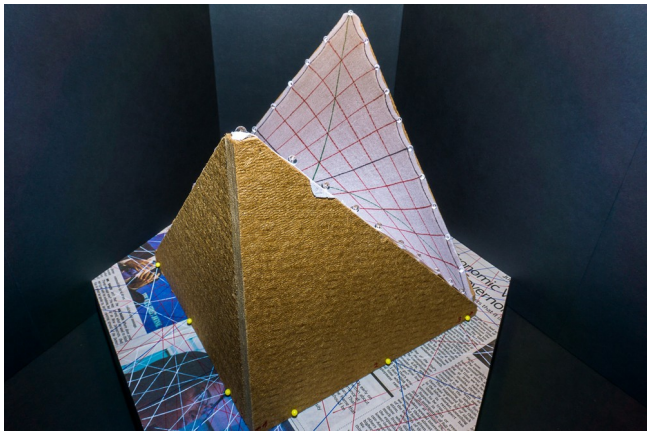

Abb. 115: Hauptkrümmung verdeckt

Für weitere Informationen s. a. 4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell, S. 118.

Die Analyse der Hauptkrümmungen zeigt einen leichten Unterschied zwischen dem physischen Modell (rot Linien) und der digitalen Formfindung (Software: Formfinder; türkise Linien). Dieser ergibt sich aus dem ungleichmäßigen Dehnungsverhalten in den Web-Achsen des Stoffs und generellen Genauigkeitsschwankungen aufgrund des kleinen Maßstabs.
Gleichzeitig ist der Unterschied aber so gering, dass er für den Vorentwurf keine Rolle spielt.

(i) Es muss ohnehin damit gerechnet werden, dass sich durch die Optimierung im Laufe des Entwurfs die Form leicht ändert. So kann z. B. die am physischen Modell gefundene Form beim Lastfall Schnee durch die stärkere Krümmung der oberen (also Schneelast tragenden) Krümmungslinie besser geeignet sein, als die idealisierte Form der digitalen Formfindung. Für den Lastfall Wind könnte sich allerdings das Umgekehrte Verhältnis (also stärkere Krümmung in der unteren Krümmungslinie) als günstiger erweisen.

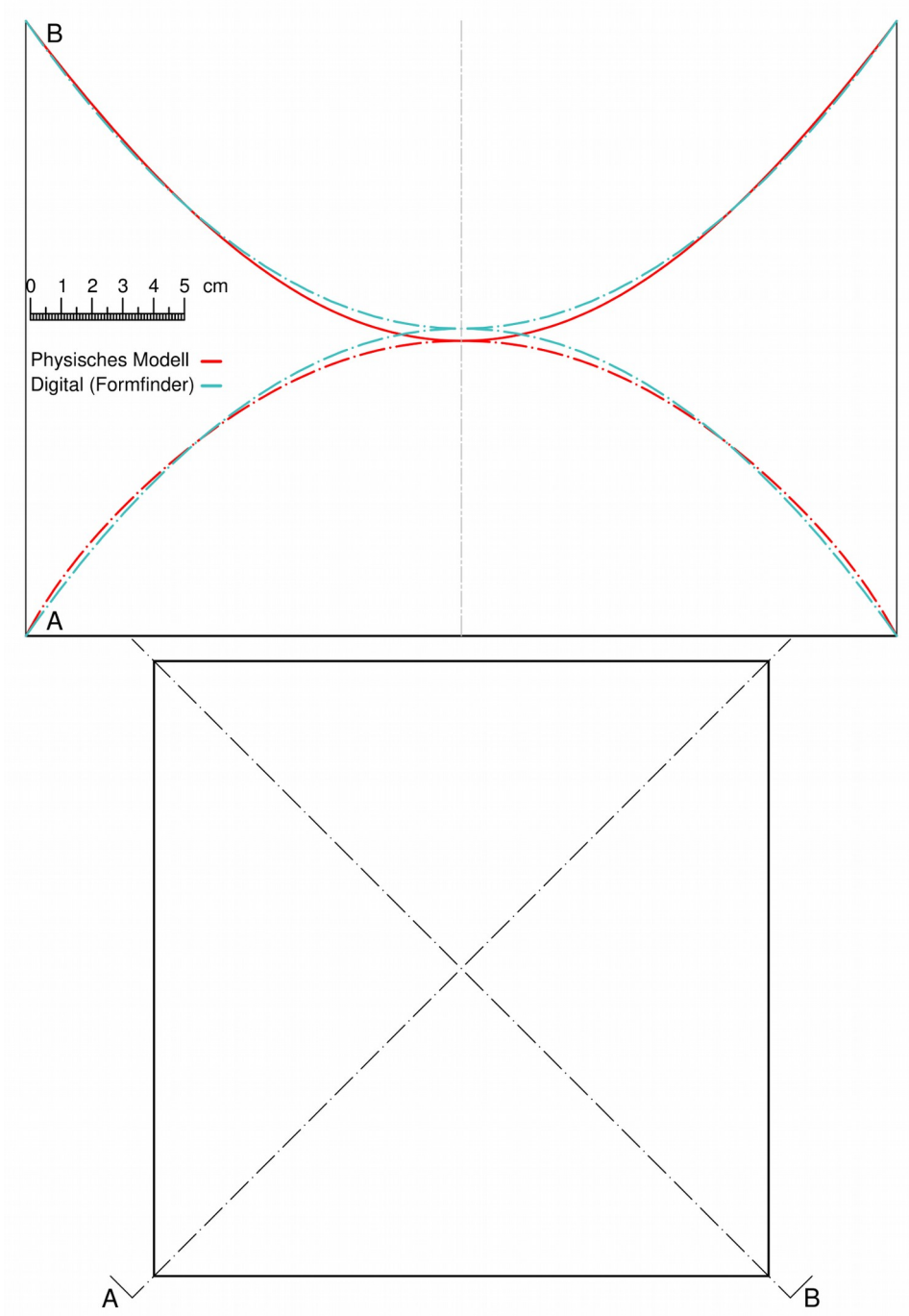

Abb. 116: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring

Aufwand[1]: **ca. 1 h 5 min** Komplexität[2]: **niedrig** **Kosten: € 5 - 20**

Material / Werkzeug (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39)

- Weichfaserplatte, Stärke: 15 - 20 mm: L x B: 200 x 200 mm
- Holzdübel, d: 5 mm: L: 85 mm (+ Platten-Stärke - 5 mm)
- Strumpf-Stoff (weiß) L x B: ca. 200 x 200 mm
- Scheibe (Karton), r: 20 mm, Stärke: 1- 2 mm Kugel (Styropor), r: 20 mm
- Geodreieck, Lineal
- Cutter, Schere
- Stift
- Heißkleber, Kleber (f. Styropor), Sekundenkleber
- Landkartennadeln (45[3] Stk.)
- (Hand-)Bohrer: d: 3 - 4 mm; d: 0,5 - 1 mm (optional)
- optional: Sandpapier, Zirkelschneider, Zahnstocher / Spieß, Klemmen, Schneidematte, Kreuzlinienlaser (m. Stativ)

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

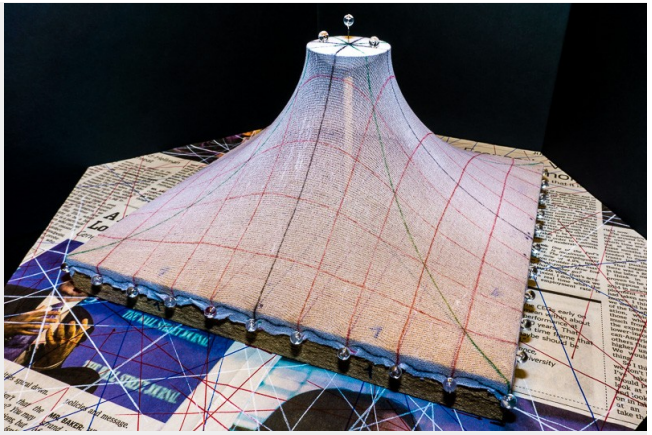

Abb. 117: Hochpunkt - Mast mit Ring

Die Membran-Fläche wird durch einen Mast unterstützt. Die Membran selber wird durch einen Ring mit dem Mast verbunden, um die hohe Belastung der punktförmigen Auflagerung zu minimieren. Der Ring verteilt die Kräfte auf eine größere Fläche und muss zumindest so groß sein, dass die Membran den entstehenden Spannungen standhalten kann.

Vorbereitung: Modell-Platte

- Die Modell-Platte wie in 3.3.1 Modell-Platte, S. 52 beschrieben vorbereiten.

- Die Position des Masts bestimmen und mit einem (Hand-)Bohrer (etwas schmaler als der Durchmesser des Holzdübels) die Aufnahme des Masts vorbereiten.

  (i) Für eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung sollten Unterstützungen so gewählt und positioniert werden, dass sich möglichst gleich große Unterteilungen der Fläche ergeben.

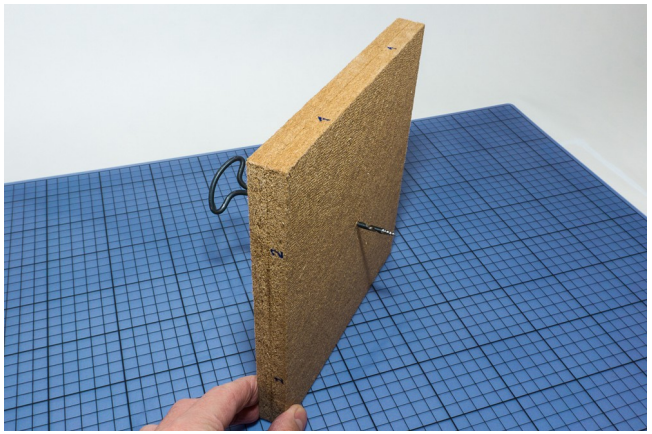

Abb. 118: Modell-Platte: Bohrung für Mast

1 Herstellungszeit: **Grundplatte**: 5 min; **Raster**: 15 min; **Mast**: 5 min; **Strumpf-Stoff**: 20 min; **Membran**: Aufspannen: 15 min; **Ring**: Einrichten: 5 min

2 Schwierigkeitsgrad: Es bedarf keiner besonderen Vorkenntnisse, um die Schritte (präzise) ausführen zu können.

3 Landkartennadeln: 40 Stk. zur Befestigung des Stoffs; 1 - 5 Stk. am Ring (Fixierung, Anpassung der Vorspannung)

Dabei sollten sich entsprechende Bereiche (z. B. zwei gegenüberliegende Hochpunkte auch symmetrisch ausgeführt werden - wobei der Mast möglichst normal zur entstehenden Membran-Fläche stehen sollte.

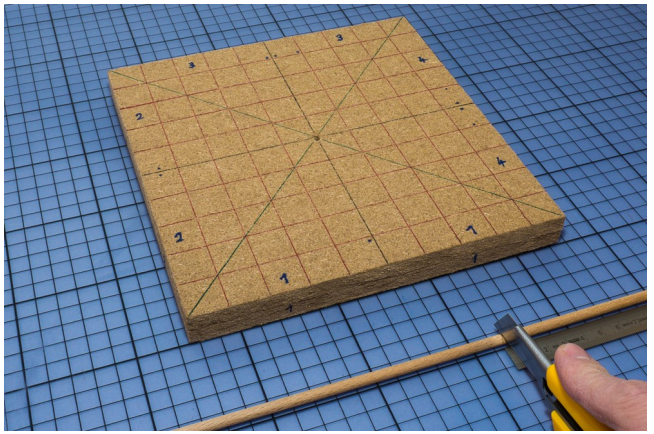

Abb. 119: Mast zuschneiden

Modell: Mast

- Zuschneiden des Masts

  (i) Ist keine Säge zur Hand, kann die Schnittstelle mit dem Messer mehrfach geritzt (Markierte Stelle mit etwas Druck unter dem Messer rollen) und gebrochen werden. Das Ende dann eventuell mit Sandpapier glätten und abrunden.

- Um ein Durchrutschen des Masts (unter Belastung) zu verhindern, empfiehlt es sich, den Holzdübel 5 mm vor dem Austritt des Bohrlochs enden zu lassen und das Loch mit (Heiß-)Kleber zu verfüllen.

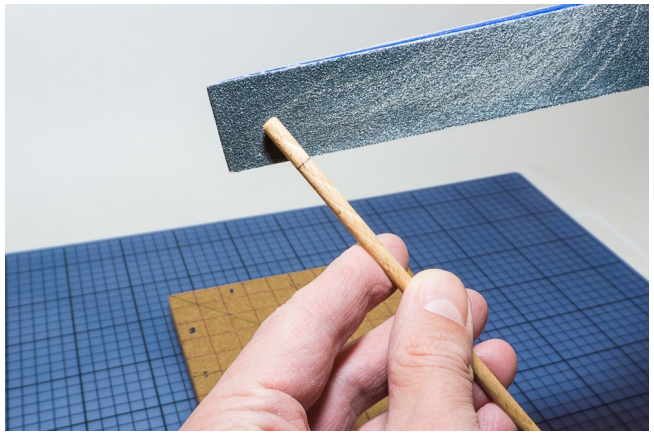

Abb. 120: Mast-Ende mit Sandpapier abrunden

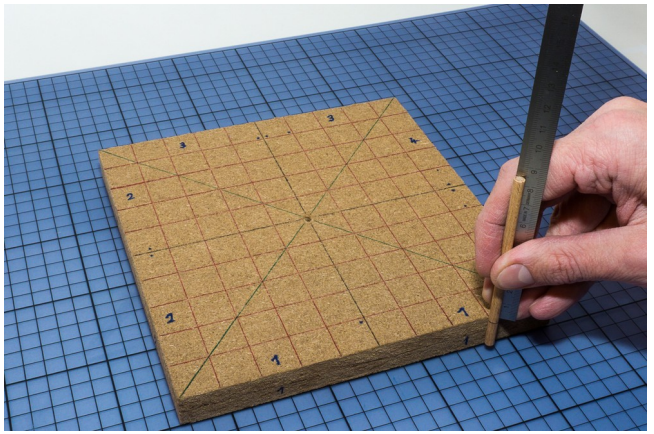

Abb. 121: Mast: Höhe über Platten-Oberkante

- Den Mast zuschneiden: Länge + Plattenstärke minus 5 mm. Dabei die Länge des Masts (über der Modellplatte) am Holzdübel markieren und diesen bis zur Markierung in die Platte pressen.
  Anschließend wie oben beschrieben den Mast an der Platten-Unterseite mit Kleber fixieren.

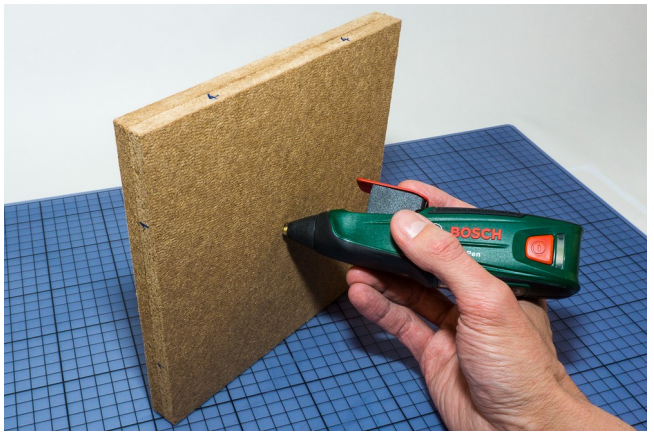

Abb. 122: Mast: Fixierung auf Unterseite

- Ausrichten des Masts: Überprüfung bzw. Korrektur der Lage des Masts durch Anlegen eines rechten Winkels in den beiden Hauptachsen der Modell-Platte.

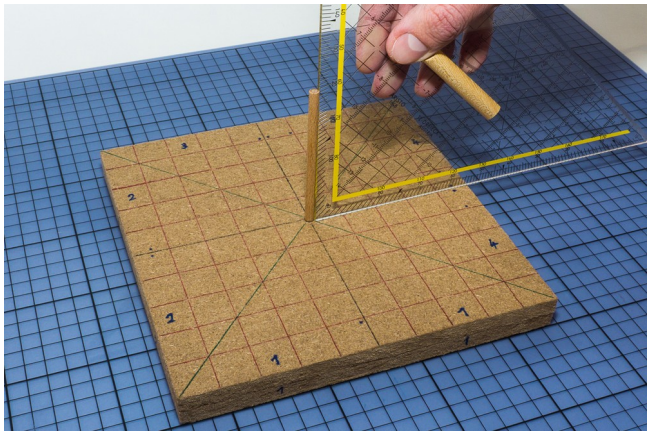

Abb. 123: Ausrichten des Masts

Modell: Ring

- An der Mast-Spitze ist ein geeignetes Auflager für die Stoff-Membran anzubringen (z. B. Rundscheibe aus Karton).

- Die Scheibe in der benötigten Größe (hier 20 mm Radius) ausschneiden (mit Schere oder Zirkelschneider).

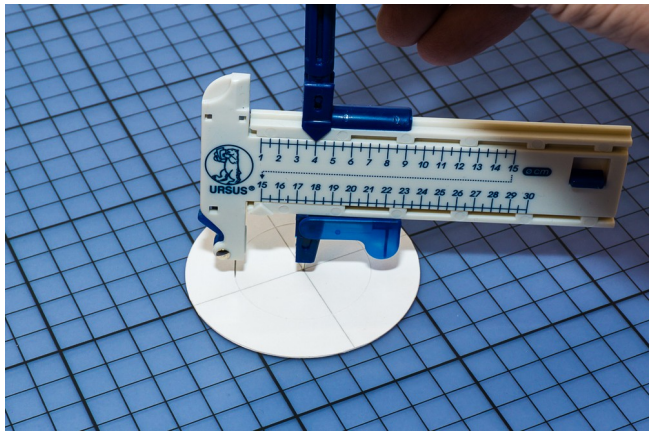

Abb. 124: Rundscheibe aus Karton ausschneiden

- Aus Styropor ein Kugelsegment zur Auflage der Scheibe zuschneiden. Mit einem Zahnstocher oder einem Spieß (etwas dünner als der Holzdübel) ein Loch zur Befestigung am Mast ausweiten.

Abb. 125: Auflager der Scheibe aus Styropor

- Zur leichteren Fixierung der Scheibe mittels Landkartennadel mit einem kleinen Bohrer ein Loch in die Mast-Spitze bohren.

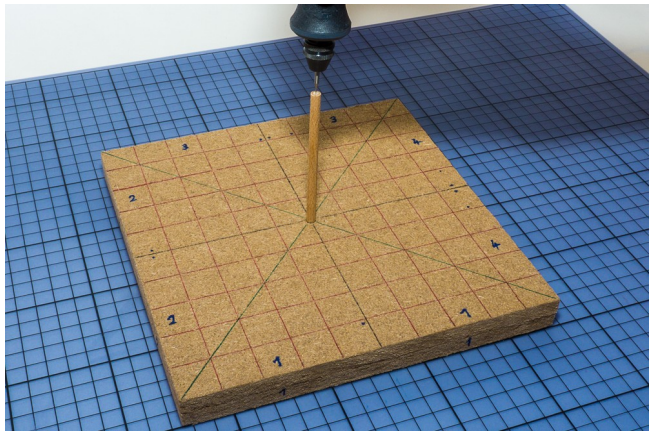

Abb. 126: Raster auf Seitenteile übertragen

- Mit einem Kleber (für Styropor geeignet) die Auflage am Mast befestigen.

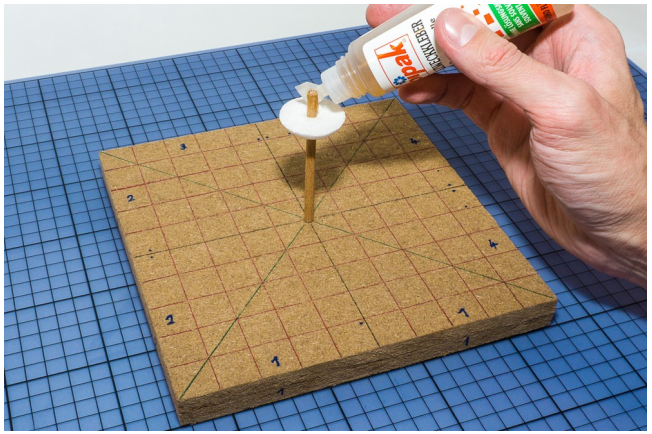

Abb. 127: Ankleben der Styropor-Auflage

- Die Scheibe auf die Auflage kleben (und zum Trocknen eventuell mit Klemmen fixieren).

- Bevor mit dem Bespannen des Stoffs begonnen wird, sollte die senkrechte Lage des Masts und vor allem die horizontale Lage der Scheibe überprüft werden (s. a. Nachtrag: Mast ausrichten, S. 79)

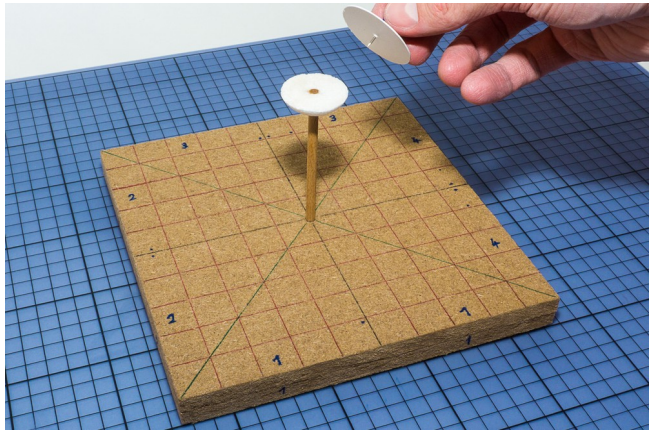

Abb. 128: Ankleben der Scheibe auf der Auflage

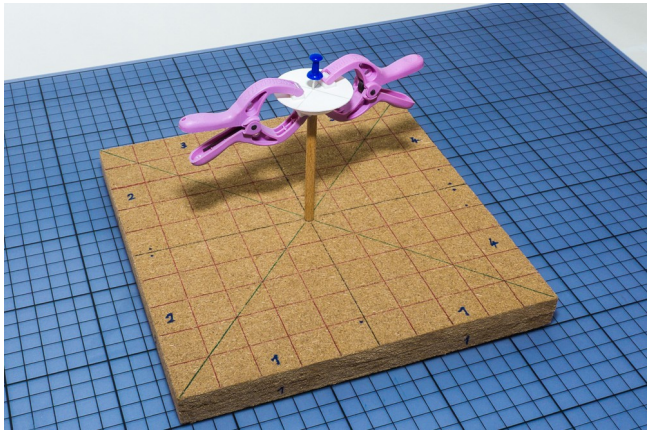

Abb. 129: Fixierung der Scheibe zum Trocknen

Modell: Stoff-Bespannung

- Den Stoff wie in 3.3.3 Strumpf-Stoff, S. 55 beschrieben vorbereiten.

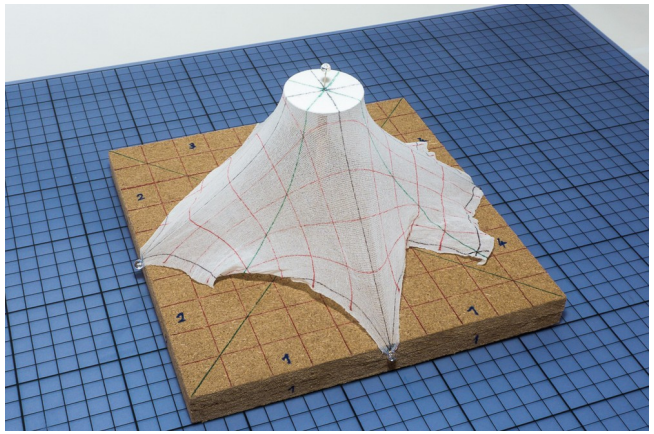

Abb. 130: Befestigung: ausgehend: mittig

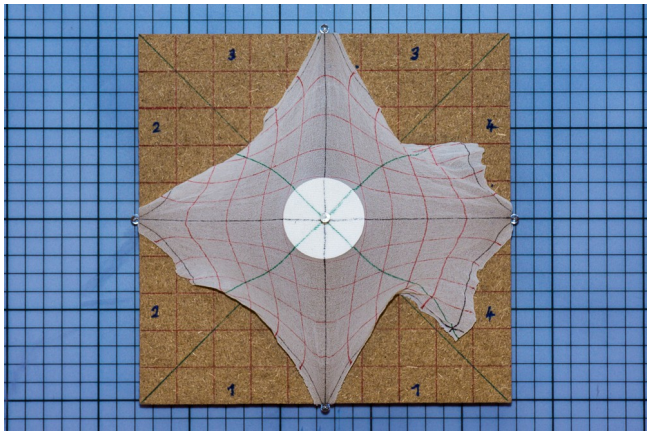

Abb. 131: Stoff-Bespannung: 1. mittig

- Den Stoff analog zum Aufspannen auf die Spann-Platte (3.3.3 Strumpf-Stoff: Raster, S. 58) gleichmäßig und symmetrisch über die Konstruktion spannen. Dabei abwechselnd (längs und quer) von den Mittelachsen ausgehend die Landkartennadeln anbringen und in Richtung Ecken arbeiten.

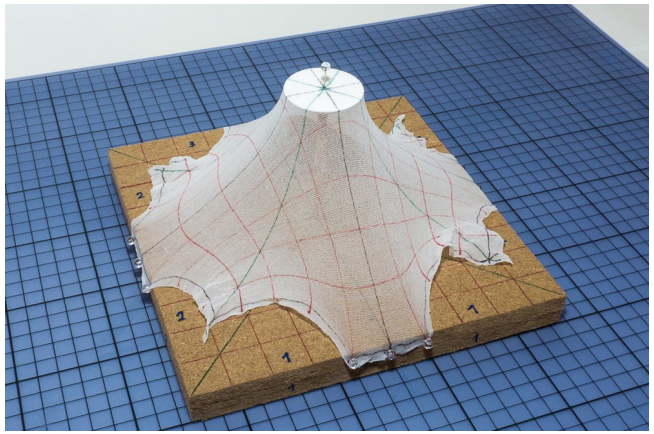

Abb. 132: Befestigung: schrittweise zu d. Ecken hin

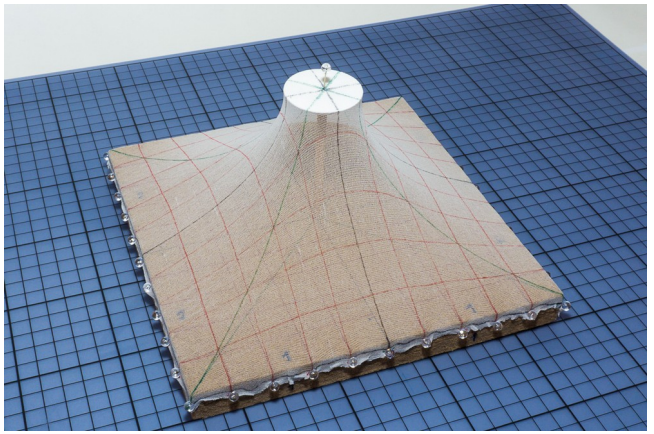

Abb. 133: Stoff-Bespannung: komplett

Modell: Form-Kontrolle

(i) Die Projektion horizontaler und vertikaler Schnittlinien auf das Modell und deren Vergleich erleichtern das bestimmen der Krümmungen in der Fläche und die Kontrolle einer gleichmäßig ausgebildeten Form (s. a. Nachtrag: (Kreuz-)Linienlaser, S. 79).

- Besonders hilfreich sind dazu Höhenschichtlinien, die hier konzentrisch (zum Ring) ausgebildet sein sollten. Abb. 135 zeigt eine leicht ovale Form durch eine geringere Spannung im Stoff entlang der X-Achse.

- Die seitliche Betrachtung zeigt, dass sich knapp unter dem Ring eine leichte Einschnürung ausgebildet hat (die engste Stelle in der Membran-Fläche hat einen geringeren Durchmesser als der Ring - was eine ungünstige Form darstellt; Abb. 136 f.).

- Dies wird hier dadurch korrigiert, indem an den beiden problematischen Seiten der Stoff auf der Scheibe (Ring) mit Landkartennadel stärker gespannt wird (Abb. 138 f.).

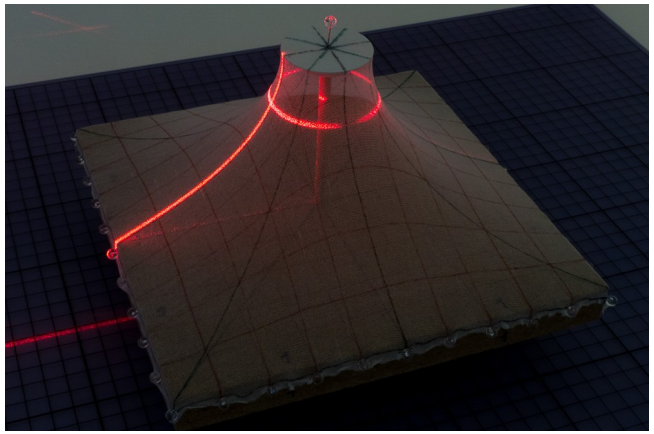

Abb. 134: Auf das Modell projizierte Laserlinien

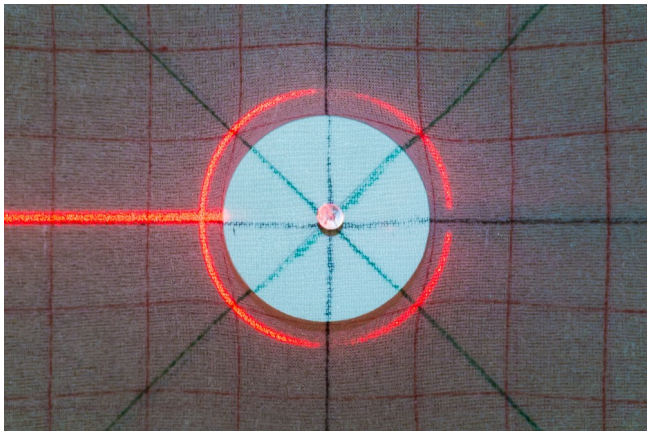

Abb. 135: Überprüfung: Konzentrizität

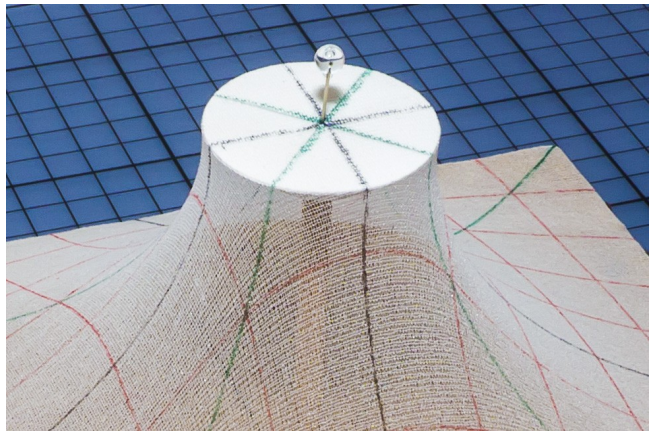

Abb. 136: Leichte Einschnürung unter dem Ring

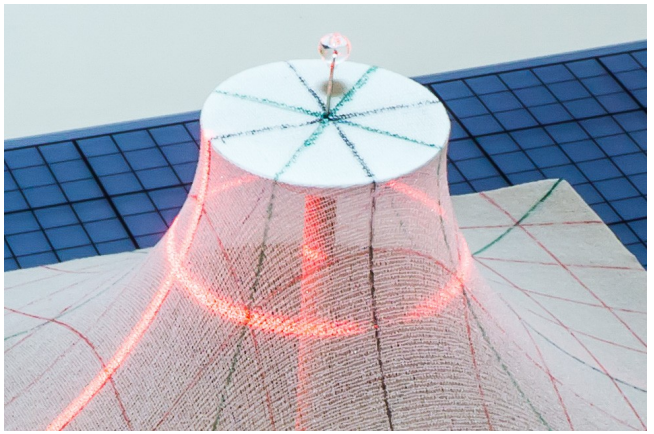

Abb. 137: Überprüfung mit Kreuzlinienlaser

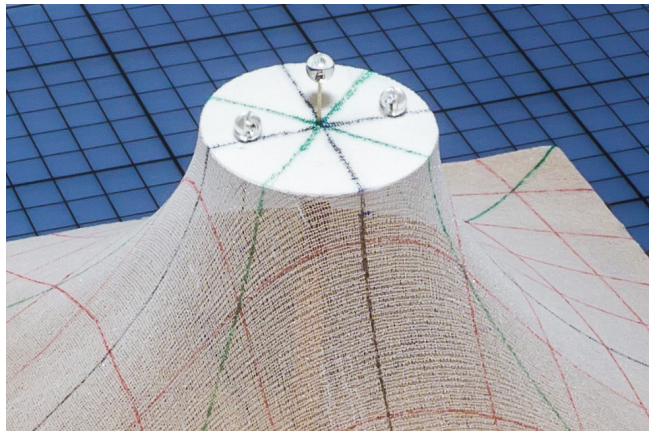

Abb. 138: Straffung des Stoffs am Ring

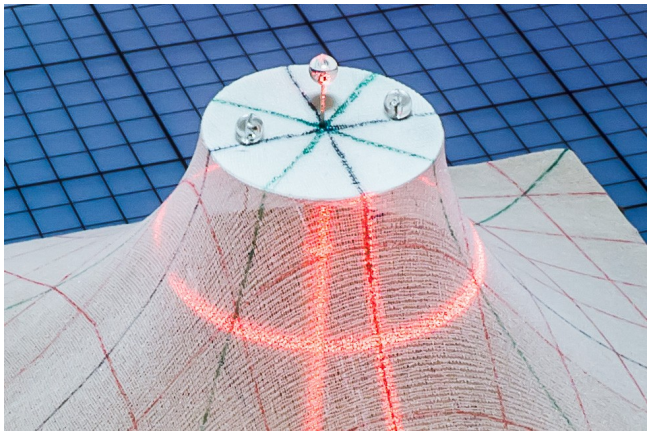

Abb. 139: Überprüfung mit Kreuzlinienlaser

Analyse: Hauptkrümmungen

Die Hauptkrümmungen werden zunächst anhand der frontal fotografierten Ansichten und der vom Modell abgenommenen Dimensionen (eventuell in Verbindung mit einem Foto der Aufsicht) festgehalten.

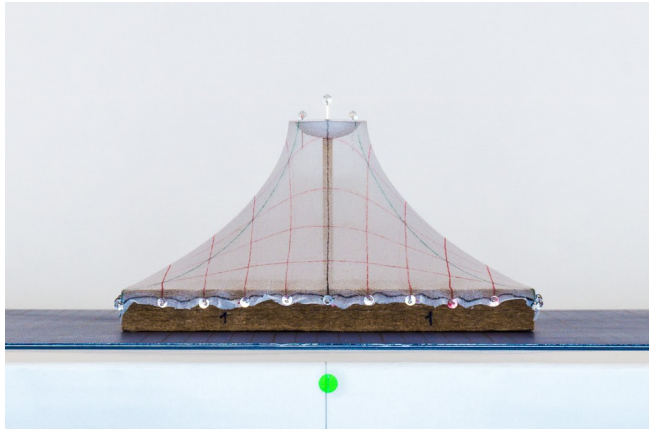

Abb. 140: Hauptkrümmung 1

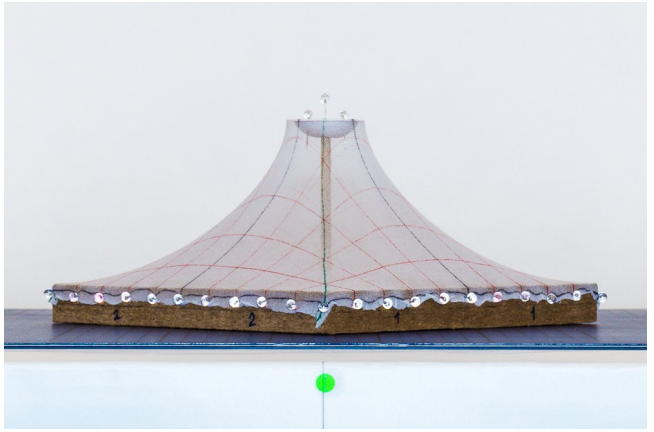

Abb. 141: Hauptkrümmung 2

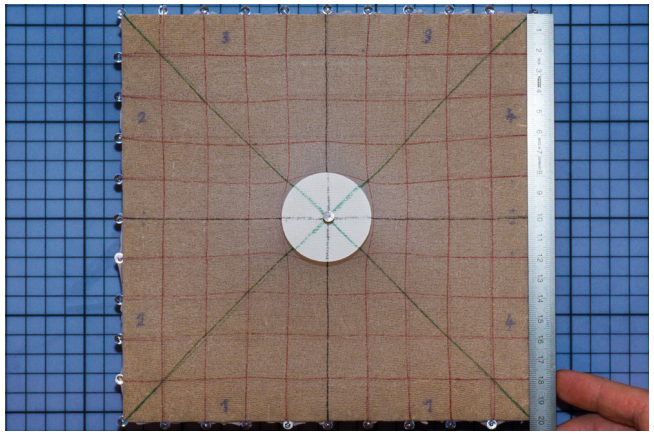

Abb. 142: Aufsicht

Anschließend werden in der digitalen Bearbeitung auf Basis der Fotos und Abmessungen die Hauptkrümmungslinien erstellt und in Bezug mit dem Grundriss dargestellt.

Für genauere Angaben dazu siehe:

- im Generellen: 4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell, S. 118;
- im Speziellen: 4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD, S. 123.

Die Analyse der Hauptkrümmungen (rot Linien des physischen Modells) zeigt die relativ starke Krümmung in der Membran-Fläche und eine leichte Verengung bzw. Zunahme der Krümmung zum Hochpunkt hin.

Im Gegensatz dazu weist das Modell der digitalen Formfindung (Software: Formfinder; türkise Linien) einen umgekehrten Krümmungsverlauf auf, der am Hochpunkt recht gering ausfällt und sich nach unten hin leicht steigert.

Dieser sensible Bereich des Hochpunkts in der Membran-Fläche bedarf in der Ausarbeitung des Entwurfs und der statischen Analyse besonderer Aufmerksamkeit, um eine effiziente wie auch stabile Lösung zu finden.

Für die vorläufige planerische Ausarbeitung könnte eine Mittelung beider Modelle (also der entsprechenden Hauptkrümmungslinien) verwendet werden.

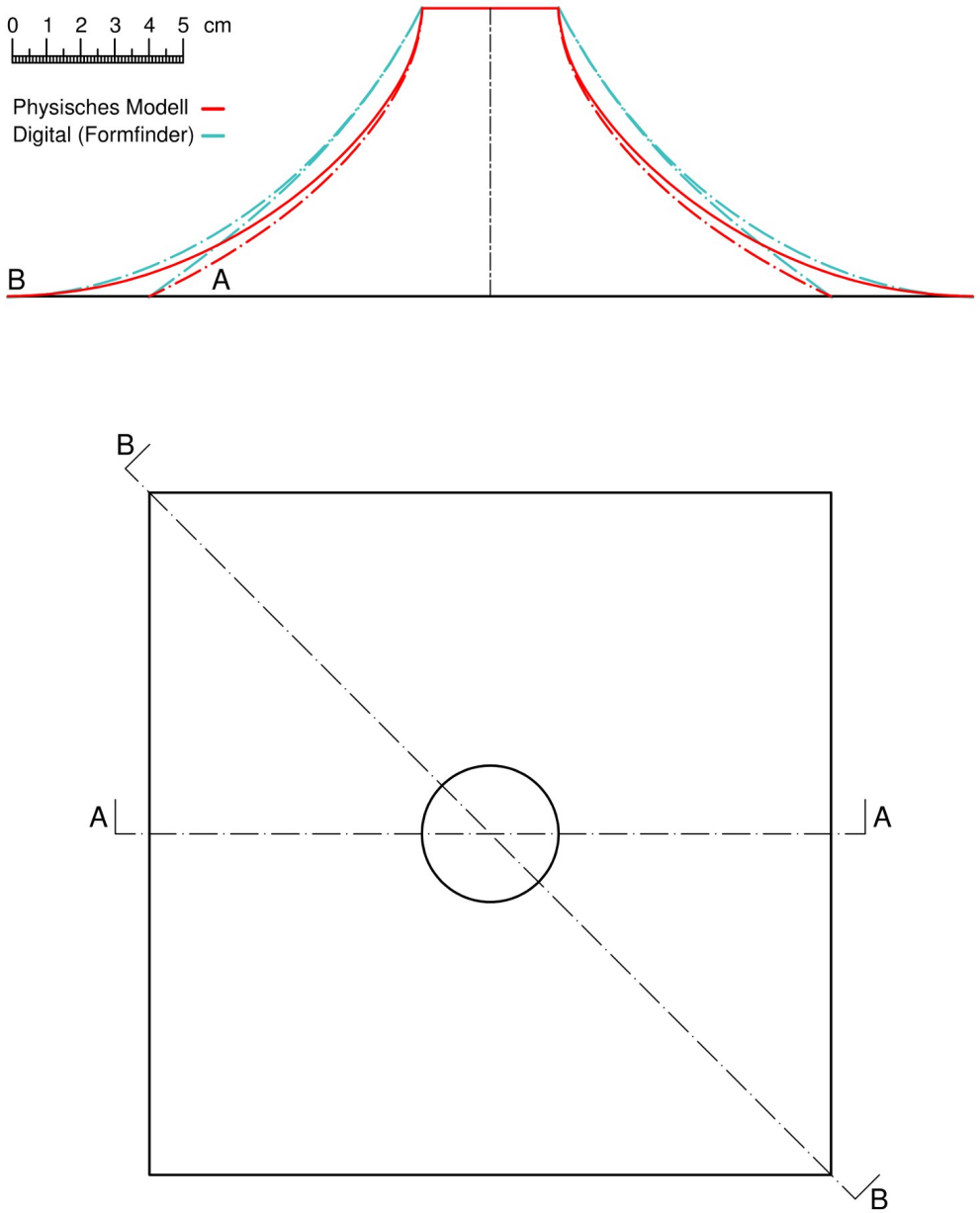

Abb. 143: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

Nachtrag: (Kreuz-)Linienlaser

(i) Der Kreuzlinienlaser ist ein hilfreiches und einfach anzuwendendes Mittel, um horizontale und vertikale Schnittlinie am Model darzustellen. Der Kreuzlinienlaser unterscheidet sich vom Linienlaser dadurch, dass er gleichzeitig eine horizontale und vertikale Linie darstellen kann - was hilfreich sein kann, aber keine Voraussetzung ist. Eine nützliche Option ist die Funktion mancher Geräte, den Linienlaser zu fixieren und damit durch Schrägstellen des Geräts Linien mit einer beliebigen Neigung projizieren zu können.

- Ein Stativ ist Voraussetzung dafür, um den Kreuzlinienlaser einfach und flexibel anwenden zu können. Hilfreich ist dabei eine Ausführung mit Kurbel zur einfachen und genauen Anpassung der Höhe.
  Abb. 144 f. zeigen die Aufstellung vor dem Modell, um durch Anpassung der Höhe des Stativs unterschiedliche Höhenschichtlinien darstellen zu können.

- Um die Schichtlinien gut überprüfen und vergleichen zu können, empfiehlt sich die Betrachtung direkt frontal oder in der Aufsicht. Noch besser eignen sich dazu Fotos aus diesen Positionen, vor allem, wenn Stative zur Verfügung stehen, die das Fotografieren aus immer den exakt gleichen Positionen ermöglichen (s. a. Nachtrag: Hauptkrümmungen: Hilfsmittel, S. 81 sowie 3.2.4 Arbeitsumgebung, S. 48)

Abb. 144: Kreuzlinienlaser: Aufstellung

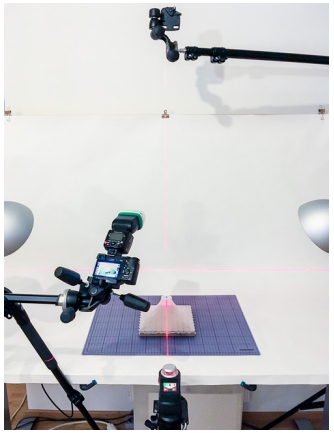

Abb. 145: Kreuzlinienlaser und Foto-Tisch

Nachtrag: Mast ausrichten

- Die senkrechte Lage des Masts kann einfach mit dem Kreuzlinienlaser überprüft werden (auf 2 aufeinander normalen Achsen).

- Horizontale Ausrichtung der Scheibe durch Positionierung einer horizontalen Laserlinie am oder knapp unter dem Ring.

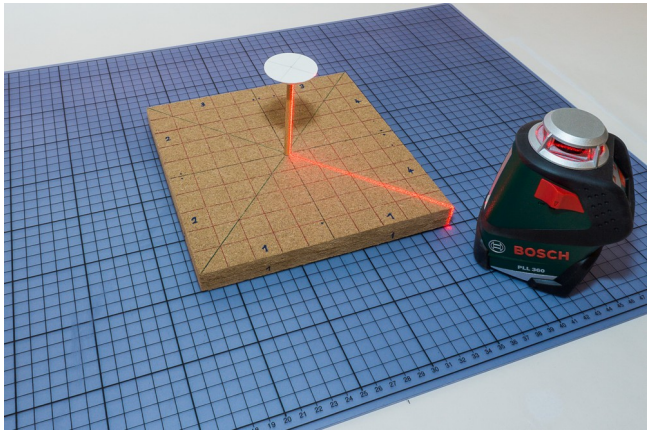

Abb. 146: Mast ausrichten: Richtung B

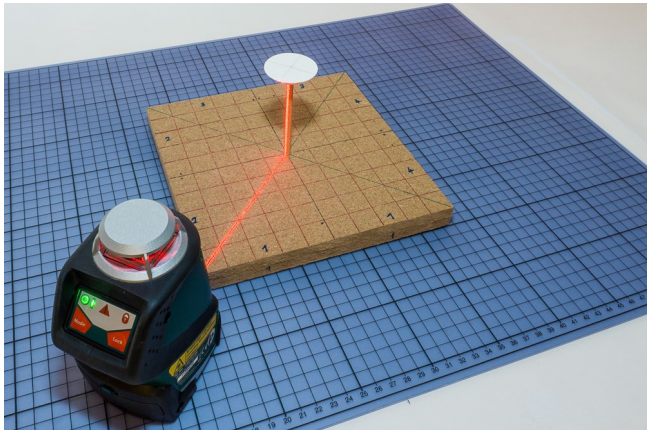

Abb. 147: Mast ausrichten: Richtung A

Nachtrag: Stoff Dehnungsausgleich

Da Strumpf-Stoff in den Web-Richtungen (Kette und Schuss) üblicher Weise ein unterschiedliches Dehnungsverhalten aufweist und dieses bei der Vorbereitung des Stoffs ohne Dehnungstest nur schwer auszugleichen ist, kann es leicht passieren, das sich am Modell (trotz symmetrischer Form und exakter Stoff-Bespannung) unterschiedliche Krümmungen entlang der Web-Richtungen ergeben (s. a. 3.3.3 Strumpf-Stoff: Eigenschaften, S 55). In Abb. 148 wird dies durch die ovale Form der Höhenschichtlinie angezeigt, die bei diesem Modell kreisrund sein sollte.
Wie in 3.3.3 Nachtrag: Dehnungsverhalten 1, S. 59 beschrieben, kann diesem Verhalten bei der Vorbereitung des Stoffs entgegengewirkt werden.

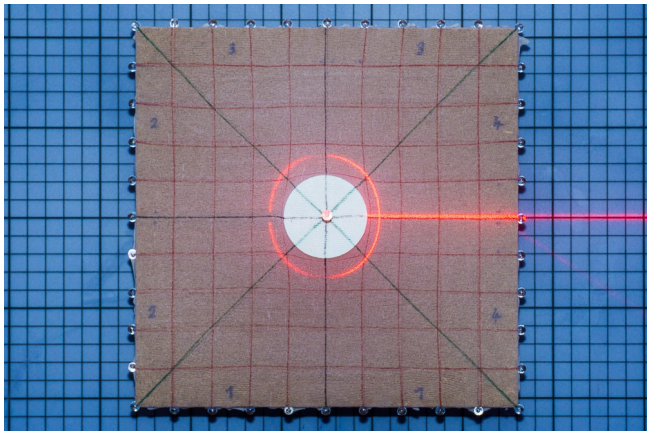

Abb. 148: Ungleichmäßige (ovale) Form

(i) Eine Möglichkeit, dem ungleichmäßigen Dehnungsverhalten des Strumpf-Stoffs am Modell zu begegnen, ist das Überdehnen des Stoffs in der stärker gespannten Richtung, bis sich ein ungefähr gleiches Dehnungsverhalten einstellt. Dies ist relativ leicht möglich, da der Strumpf-Stoff bei starker Dehnung nicht mehr in die gleiche Ausgangsdehnung zurückkehrt. Der Strumpf-Stoff besitzt eine maximale Dehnung, bei der die Fäden im Gewirk gestreckt sind. In seinem anfänglichen Zustand (ungedehnt, aus der Packung) ist der Strumpf-Stoff leicht auszudehnen, so dass er nicht mehr ganz in die ursprüngliche Form zurückkehrt. Je näher man sich der maximalen Dehnung nähert, desto stärker muss der Stoff gedehnt werden und desto weniger bleibt der Stoff in dieser gedehnten Form. Solange der Stoff also noch nicht zu nahe an seiner maximalen Dehnung gespannt ist, kann er auch am Modell für kleinere Korrekturen noch ausgedehnt werden. Die bessere Strategie ist allerdings die Kontrolle des Dehnungsverhaltens schon bei der Vorbereitung.

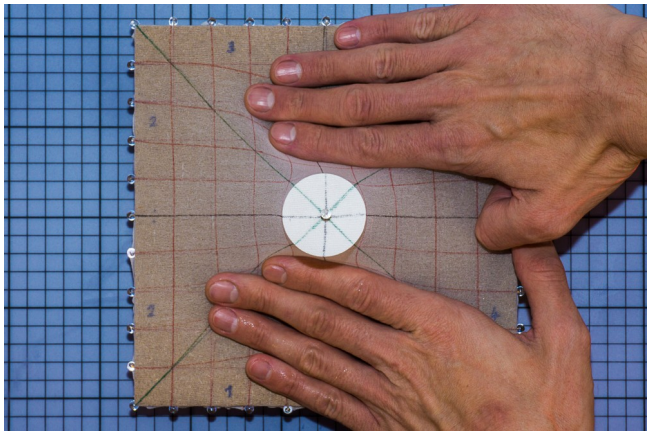

Abb. 149: Stärker gespannte Richtung dehnen

- Für den Dehnungsausgleich den Stoff vorsichtig mit den Händen in der stärker gespannten Richtung schrittweise immer stärker dehnen, bis sich die Dehnung der schwächer gedehnten Richtung angleicht (die Höhenschichtenlinie wird kreisrund).

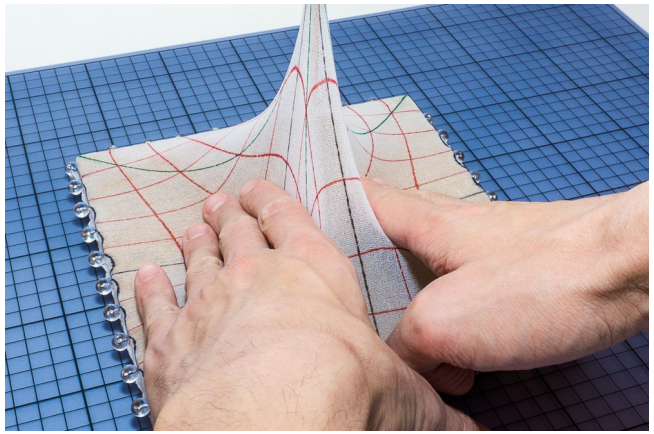

Abb. 150: Stoff vorsichtig Dehnen

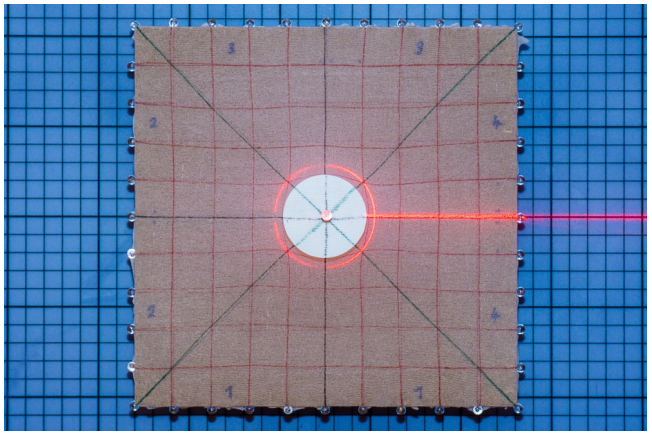

Abb. 151: Gleichmäßige (konzentrische) Form

Nachtrag: Hauptkrümmungen: Hilfsmittel

Für die Erfassung der Hauptkrümmungslinien mittels Fotografie müssen vor allem 3 Dinge berücksichtigt werden:

- Exakte Ausrichtung von Modell und Kamera-Objektiv.
- Möglichst größer Abstand zum Modell bei Verwendung eines Teleobjektivs.
- Notierung wesentlicher Dimensionen in Grundriss und Ansicht, die auch deutlich markiert sind, damit sie später auf dem Foto ersichtlich sind. Diese dienen dann dazu, das Foto in eine maßstäbliche Relation zu bringen.

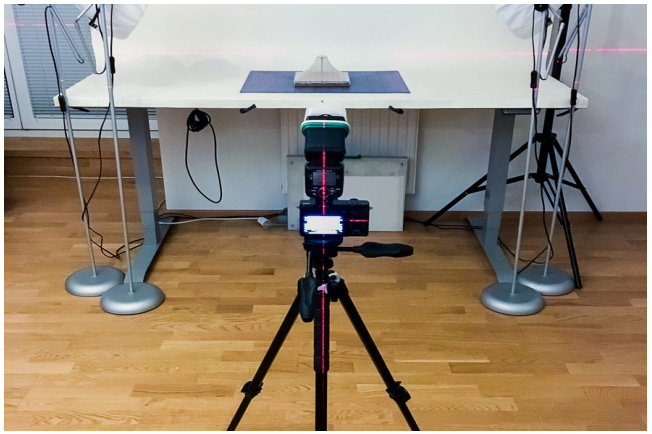

Abb. 152: Ausrichtung von Modell und Kamera

Stativ(e) und ein Kreuzlinienlaser sind dabei Hilfsmittel, die nicht unbedingt nötig sind, aber rasche und genau Ergebnisse wesentlich unterstützen.

S. a. 4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD: Anordnung: Modell - Kamera, S. 123.

3.4.3 Typ 3: Hochpunkt - Mast mit Buckel

Die Erstellung des Modells mit Mast / Buckel entspricht dem Modell des Tragsystems Hochpunkt mit Mast / Ring - allerdings mit der Abweichung, dass anstatt des Rings eine Kugel, z. B. aus Styropor, verwendet wird.

S. a. 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring.

Die Membran wird über die Auflage (Kugel) geführt und berührt diese tangential. Kugeldurchmesser und Winkel der berührenden Tangenten zueinander stehen daher in Verbindung.

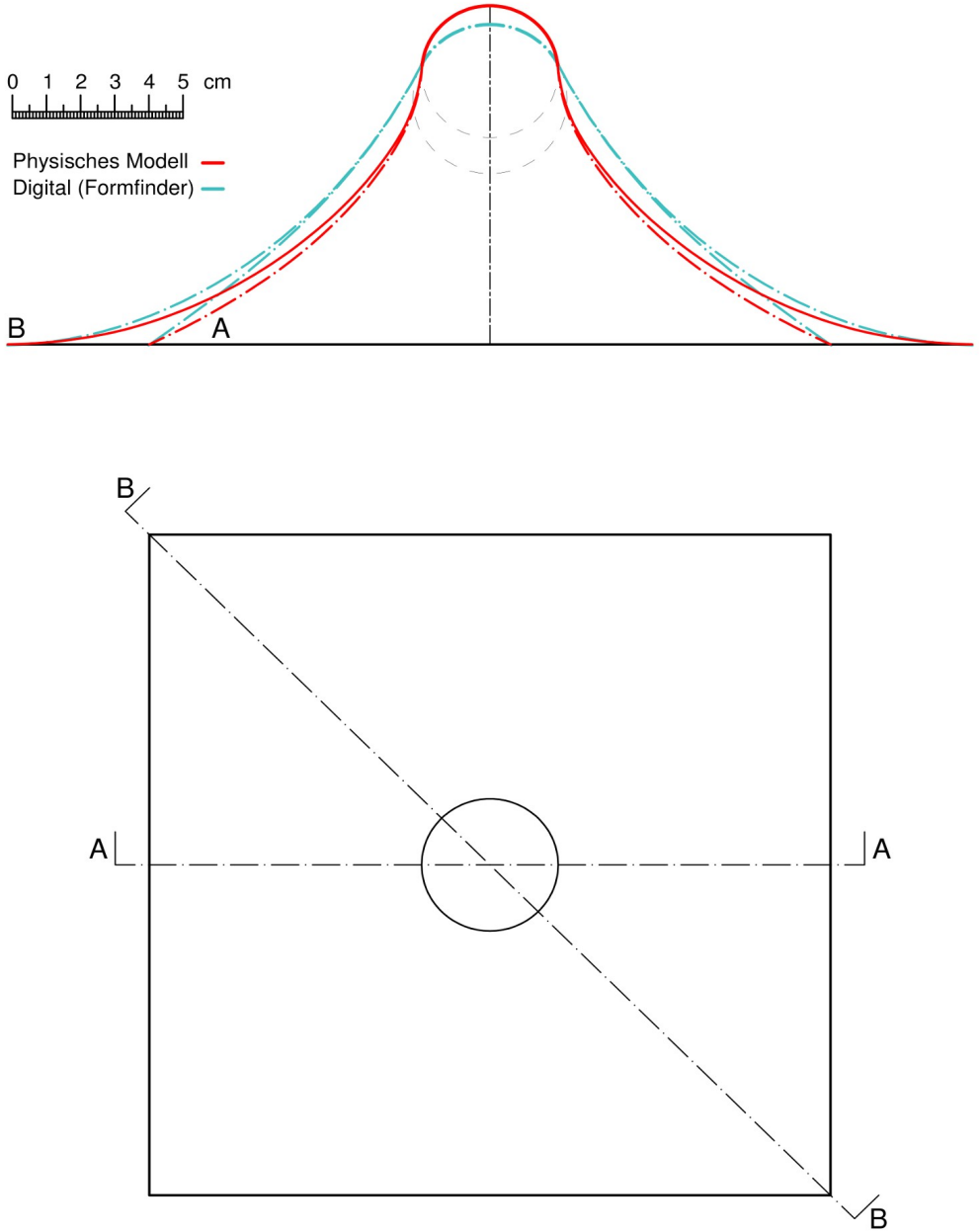

Abb. 153: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

3.4.4 Typ 4: Hochpunkt - Mast mit Rosette

Aufwand[1]: **ca. 1 h** Komplexität[2]: **mittel** **Kosten: € 5 - 20**

Material / Werkzeug (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39)

- Weichfaserplatte, Stärke: 15 - 20 mm: L x B: 200 x 200 mm
- Holzdübel, d = 5 mm: L: 160 mm (+ Platten-Stärke - 5 mm)
- Strumpf-Stoff (weiß) ca. 200 x 200 mm
- Scheibe (Karton), r: 25 mm, Stärke: 1- 2 mm Lotschnur (ca. 800 mm)
- Geodreieck, Lineal
- Cutter, Schere
- Stift
- Heißkleber, Sekundenkleber
- Landkartennadeln (45[3] Stk.)
- (Hand-)Bohrer: 3 - 4 mm; 0,5 - 1 mm (optional)
- optional: Pinzette, Zahnstocher / Spieß, Sandpapier, Zirkelschneider, Kreuzlinienlaser (m. Stativ)

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

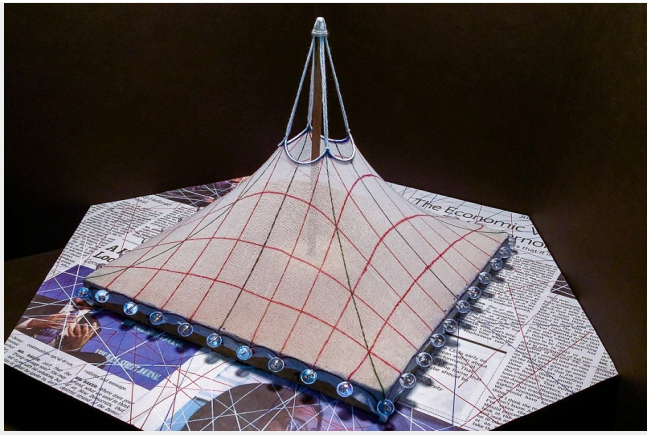

Abb. 154: Hochpunkt - Mast mit Rosette

Die Membran-Fläche wird durch einen Mast unterstützt. Die Membran selber wird am Hochpunkt durch eine rosettenartiges Seil eingefasst, das wiederum durch Seile vom Mast abgehängt ist. Die Rosette dient dazu, eine zu hohe Belastung der Membran bei einer punktförmigen Auflagerung direkt am Mast zu vermeiden.

Vorbereitung: Modell-Platte

Die anzuwendenden Schritte entsprechen der Anleitung in Kapitel:
3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring:

- Vorbereitung: Modell-Platte, S. 72
- Modell: Mast, S. 73 f.
  Der Mast ist für das hier angewendete Beispiel mit einer Höhe von 160 mm (über der Oberkante der Modell-Platte) und ohne Ring auszuführen.

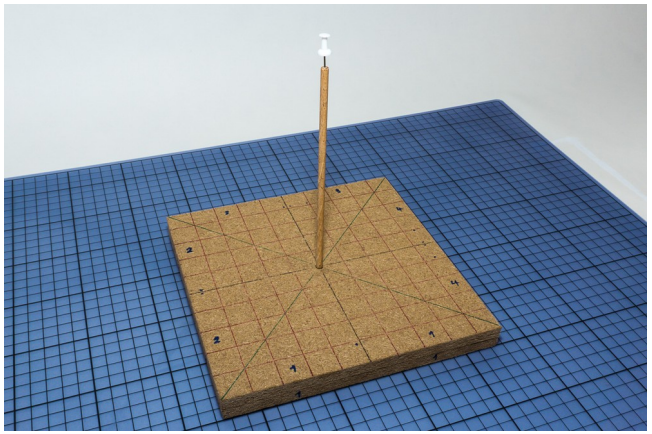

Abb. 155: Vorbereitete Modell-Platte mit Mast

1 Herstellungszeit: **Grundplatte**: 5 min; **Raster**: 15 min; **Mast**: 5 min; **Strumpf-Stoff**: 20 min; **Membran**: Aufspannen: 15 min, Schablone: 5 min, Rosette: 30 min.

2 Schwierigkeitsgrad: Die Ausführung und v. a. die Anbringung der Schlaufen für die Rosette erfordert etwas Geschicklichkeit wie Augenmaß, um eine gleichförmige Rosette zu erhalten.

3 Landkartennadeln: 40 Stk. zur Befestigung des Stoffs; 1 - 5 Stk. an der Rosette (temporäre Fixierung)

Modell: Stoff-Bespannung

- Den Stoff wie in 3.3.3 Strumpf-Stoff, S. 55 beschrieben vorbereiten.

- Den Stoff analog zum Aufspannen auf die Spann-Platte (3.3.3 Strumpf-Stoff: Raster, S. 58) gleichmäßig und symmetrisch über die Konstruktion spannen. Dabei abwechselnd (längs und quer) von den Mittelachsen ausgehend die Landkartennadeln anbringen und in Richtung Ecken arbeiten.

Modell: Form-Kontrolle

(i) Vor dem Einbau der Rosette sollte der Stoff auf eine gleichmäßige Spannung und korrekt ausgebildete Form überprüft werden, da danach Anpassungen kaum noch möglich sind.

- Die ungleiche Spannung kann durch vorsichtiges Ausdehnen des Stoffs in der stärker gespannten Richtung (Längsrichtung des Ovals) ausgeglichen werden (kreisrunde Form; s. a. 3.4.2, Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring: Nachtrag: Stoff Dehnungsausgleich, S. 80).

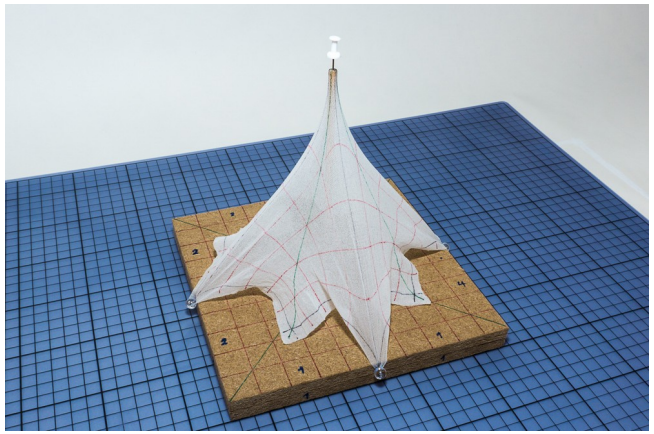

Abb. 156: Befestigung: ausgehend: mittig

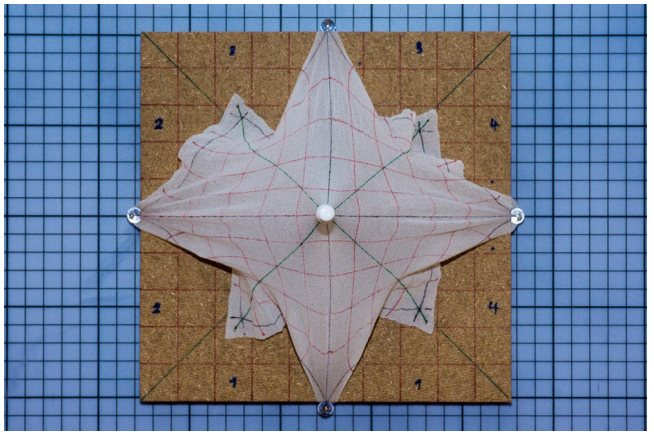

Abb. 157: Stoff-Bespannung: 1. mittig

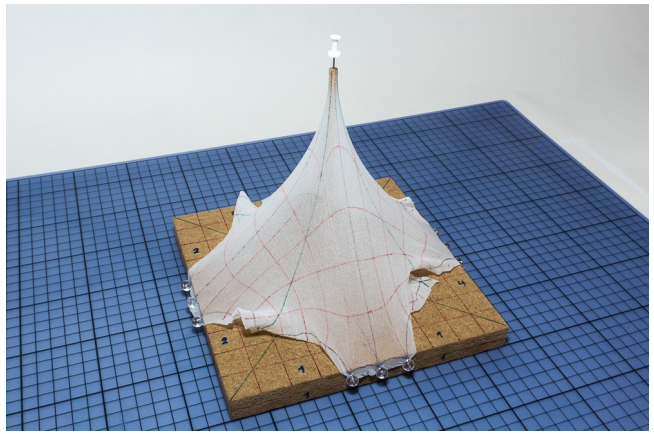

Abb. 158: Befestigung: schrittweise zu d. Ecken hin

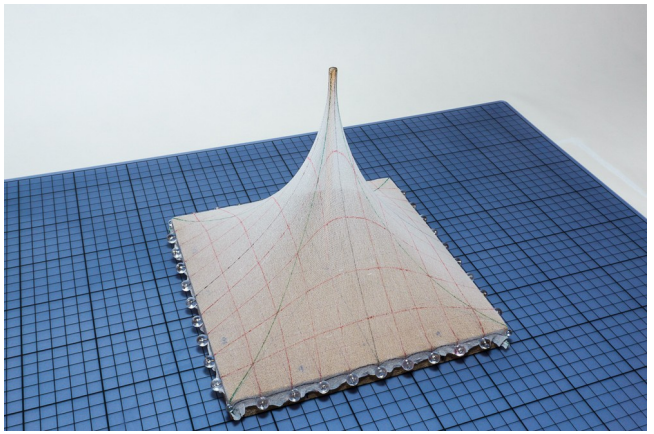

Abb. 159: Stoff-Bespannung: komplett

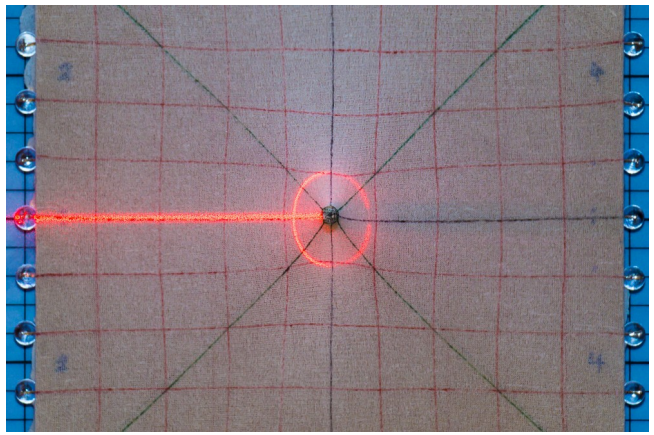

Abb. 160: Ungleichmäßige (ovale) Form

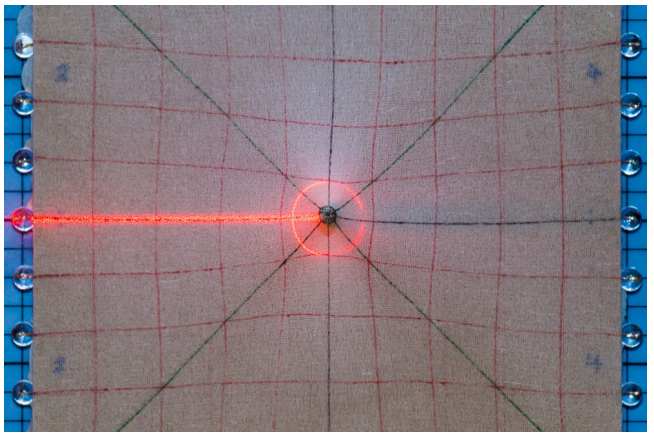

Abb. 161: Korrigierte (kreisrunde) Form

Modell: Rosette

- Um den Durchmesser der Rosette bestimmen zu können, muss zunächst die Höhe der Rosette festgelegt werden und dann der Durchmesser am Stoff ermittelt werden. Dabei ist die Verwendung einer Schieblehre und eines Kreuzlinienlasers (Markierung Schnitthöhe) sehr hilfreich (s. a. 3.4.2 Nachtrag: (Kreuz-)Linienlaser, S. 79).

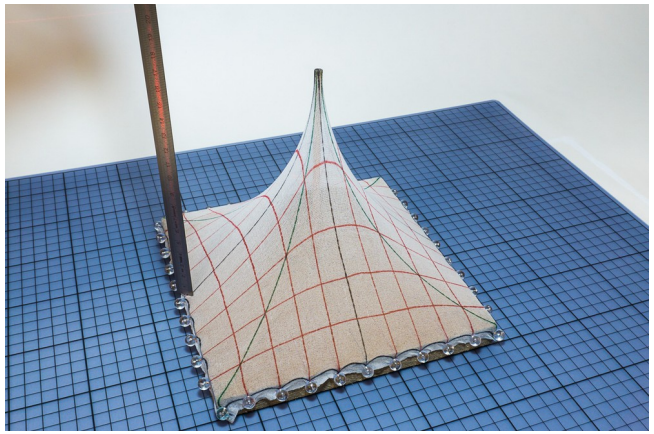

Abb. 162: Höhe der Rosette bestimmen

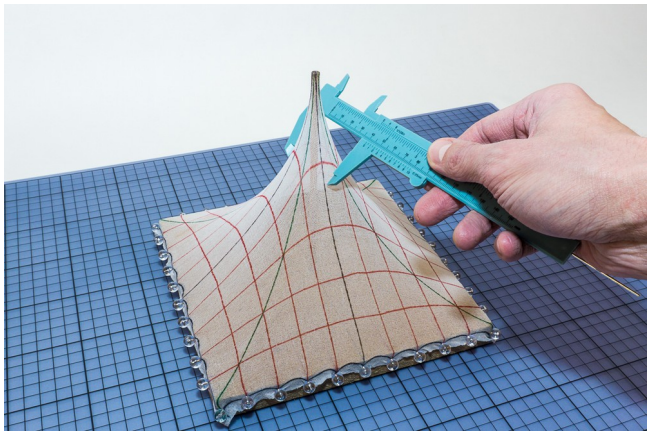

Abb. 163: Innen-Durchmesser für Schablone

- Eine Ring-Schablone mit dem gerade ermittelten Innen-Durchmesser aus Karton ausschneiden (ein Zirkelschneider erleichtert den Vorgang). Aus dem Reststück ein Bogensegment ausschneiden für die Schablone der 4 Rosetten-Bögen (s. a. Nachtrag: Rosette - Vorlage, S. 90).

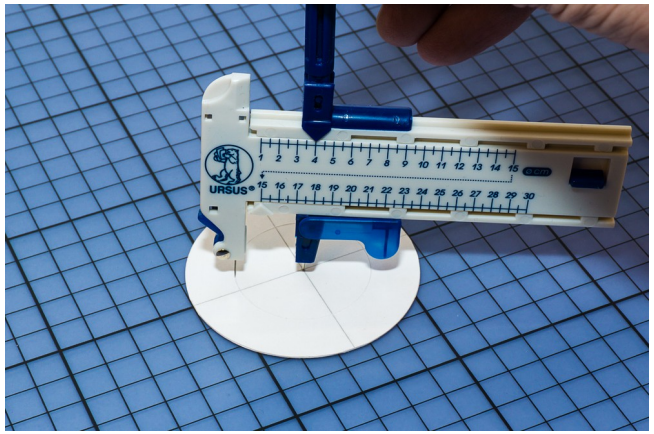

Abb. 164: Schablone: Ring ausschneiden

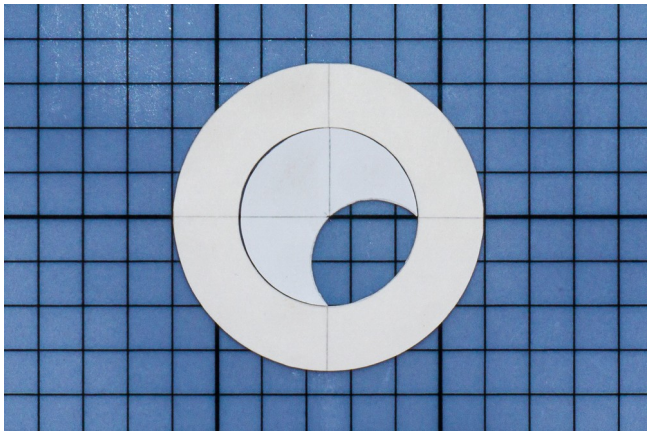

Abb. 165: Schablone für 4 Rosetten-Bögen

- Die Ring-Schablone auf dem Stoff platzieren und eventuell mit dem Kreuzlinienlaser Höhe und horizontale Lage ausrichten. Die 4 Ansätze der Rosetten-Bögen markieren (an den Diagonalen) und mit der 2. Schablone dazwischen die Bögen anzeichnen.

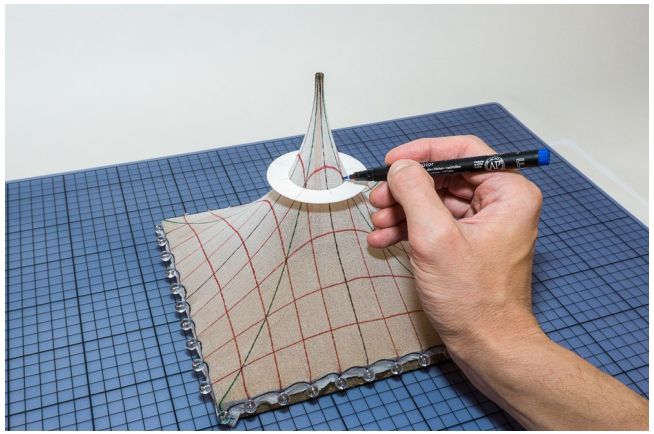

Abb. 166: 4-Teilung der Rosette anzeichnen

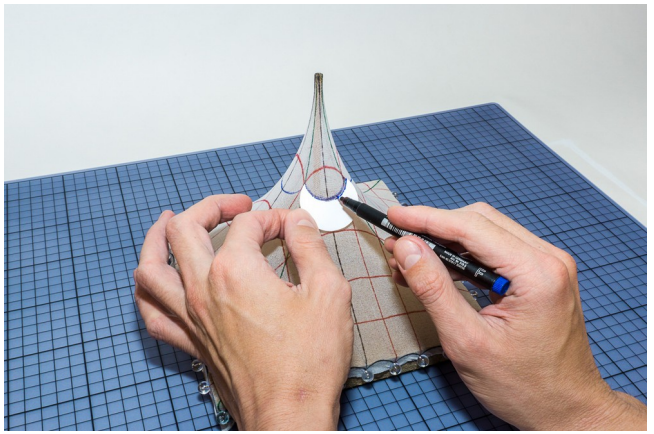

Abb. 167: Bögen der Rosette anzeichnen

- Aus Lotschnur eine genügend lange Schlaufe (zumindest bis zur Mast-Spitze) zuschneiden und mit Landkartennadeln temporär über dem angezeichneten Bogen fixieren und mit Sekundenkleber befestigen.

- Während des Trocknens sind Zahnstocher und Pinzette hilfreiche Mittel, um ein Verrutschen der Schlaufe zu verhindern (dabei die Lotschnur sanft andrücken)

- Jeweils 2 Schlaufen an den Stößen der Rosetten-Bögen mit Nähfaden aneinanderbinden

- Den Knoten bei Bedarf mit Sekundenkleber fixieren.

- Die Schlaufen-Enden leicht zur Mast-Spitze hin spannen, ohne dass sich dabei die Position der Rosette ändert. Die Fixierung der Schnüre mit einem Gummiband erleichtert den Vorgang. Die gleichmäßig gespannten Schnüre an die Mast-Spitze binden.

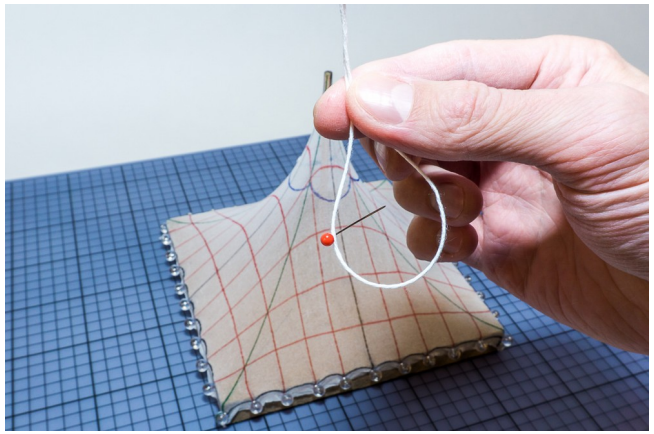

Abb. 168: Schlaufe temporär fixieren

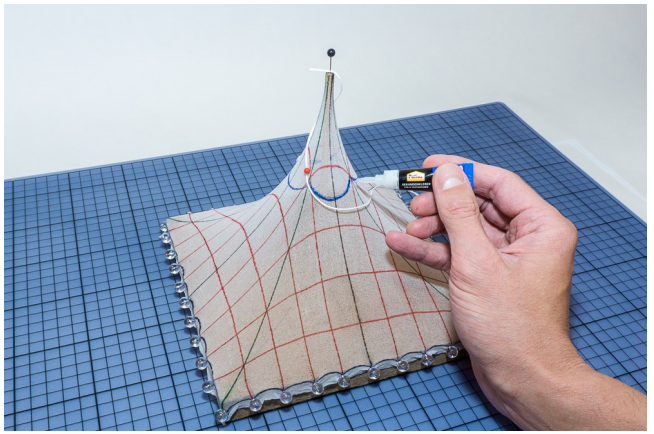

Abb. 169: Fixierung mit Sekundenkleber

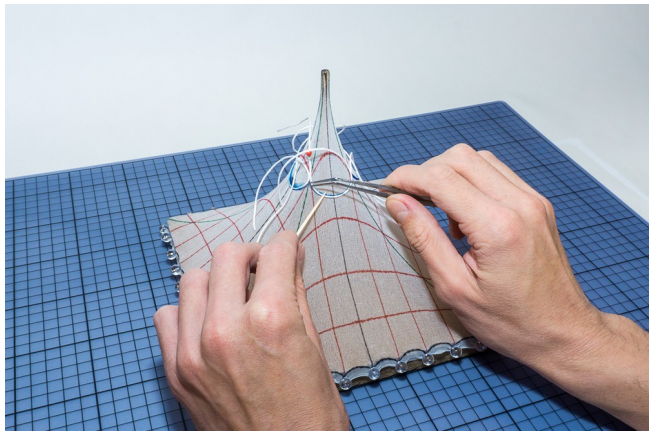

Abb. 170: Leichtes Andrücken beim Trocknen

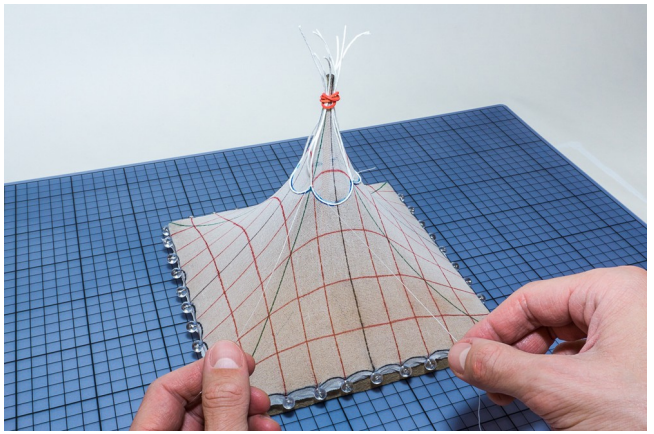

Abb. 171: Seilschlaufen aneinanderbinden

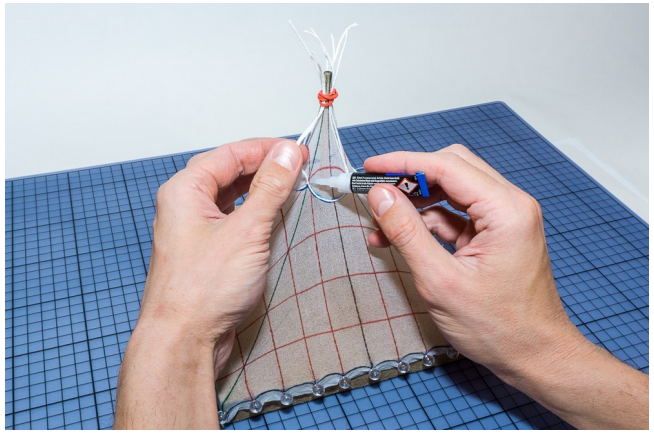

Abb. 172: Fixierung des Fadens mit Kleber

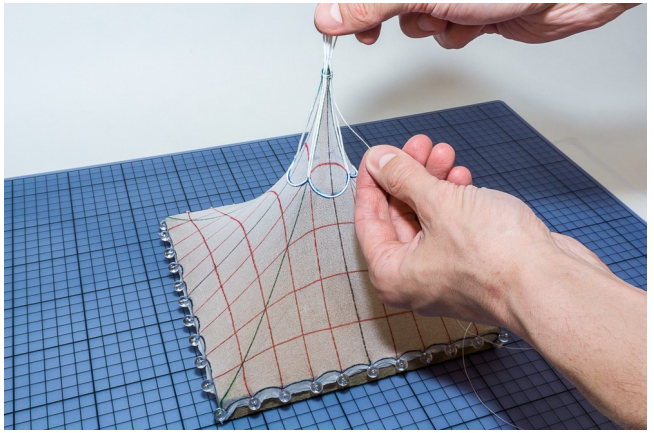

Abb. 173: Schlaufen an Mast-Spitze binden

- Das Verkleben (mittels Heißkleber) der Schlaufen über der Mast-Spitze verhindert deren Verrutschen.

- Die Rosette vorsichtig mit einem scharfen Modellmesser ausschneiden.

  (i) Um ein Einreißen des Stoffs zu vermeiden, das Messer entlang der angeklebten Schnur nach außen ziehen und mit einer Pinzette die Schnur entgegenhalten.

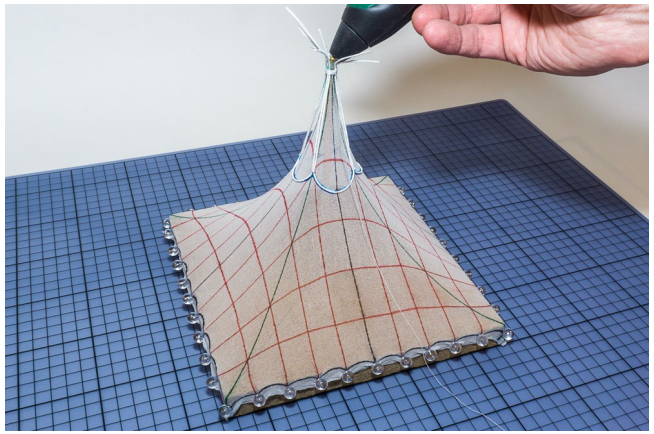

Abb. 174: Schlaufen am Mast fixieren

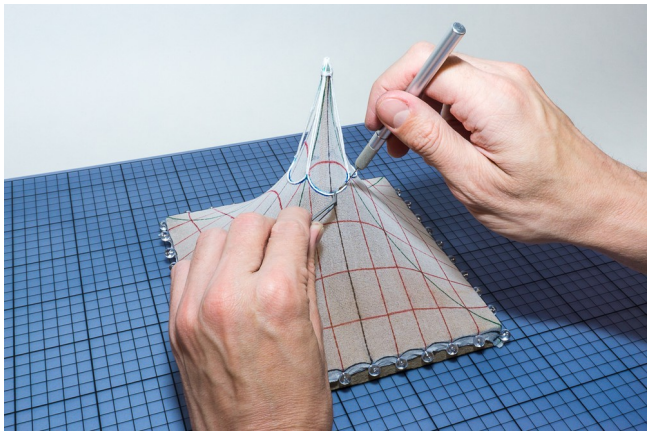

Abb. 175: Ausschneiden der Rosette

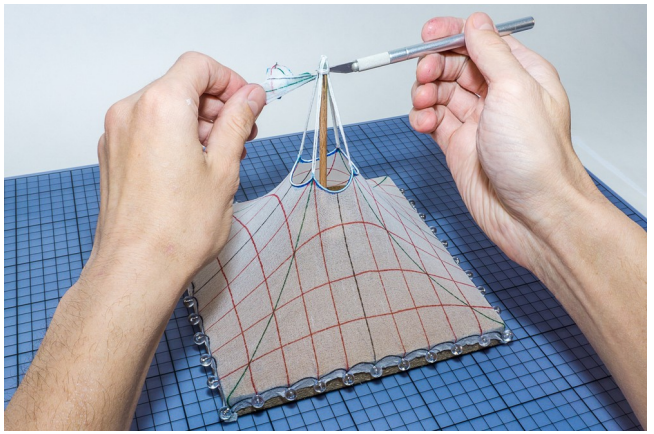

Abb. 176: Fertiges Modell mit Rosette

Analyse: Hauptkrümmungen

Die Hauptkrümmungen werden zunächst anhand der frontal fotografierten Ansichten und der vom Modell abgenommenen Dimensionen (eventuell in Verbindung mit einem Foto der Aufsicht) festgehalten.

Abb. 177: Hauptkrümmung 1

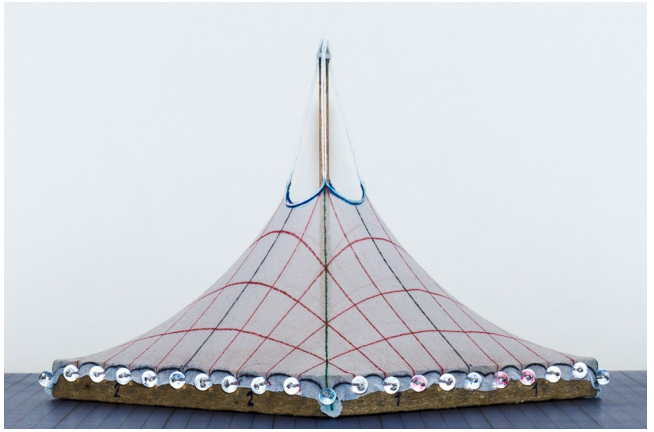

Abb. 178: Hauptkrümmung 2

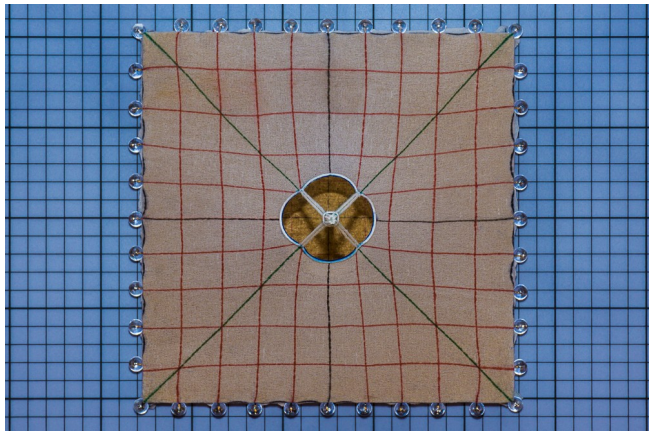

Abb. 179: Aufsicht

Anschließend werden in der digitalen Bearbeitung auf Basis der Fotos und Abmessungen die Hauptkrümmungslinien erstellt und in Bezug mit dem Grundriss dargestellt.

Für genauere Angaben dazu siehe:

- im Generellen: 4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell, S. 118;
- im Speziellen: 4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD, S. 123.

Aufgrund der Komplexität der Form und der Schwierigkeit, diese im Formfinder als digitales Modell zu erstellen, wurde hier auf den Vergleich zwischen physischem und digitalen Modell verzichtet.

(i) Die Erstellung der Form in Formfinder ist möglich, allerdings sind dafür komplexe Schritte und Einstellungen nötig, da kein spezialisiertes Werkzeug für die Generierung dieser Form zur Verfügung steht.

Die Analyse der Hauptkrümmungen zeigt relativ gute und gleichmäßige Krümmungen in der Membran-Fläche, die allerdings bei Schnitt A recht flach ausfallen.

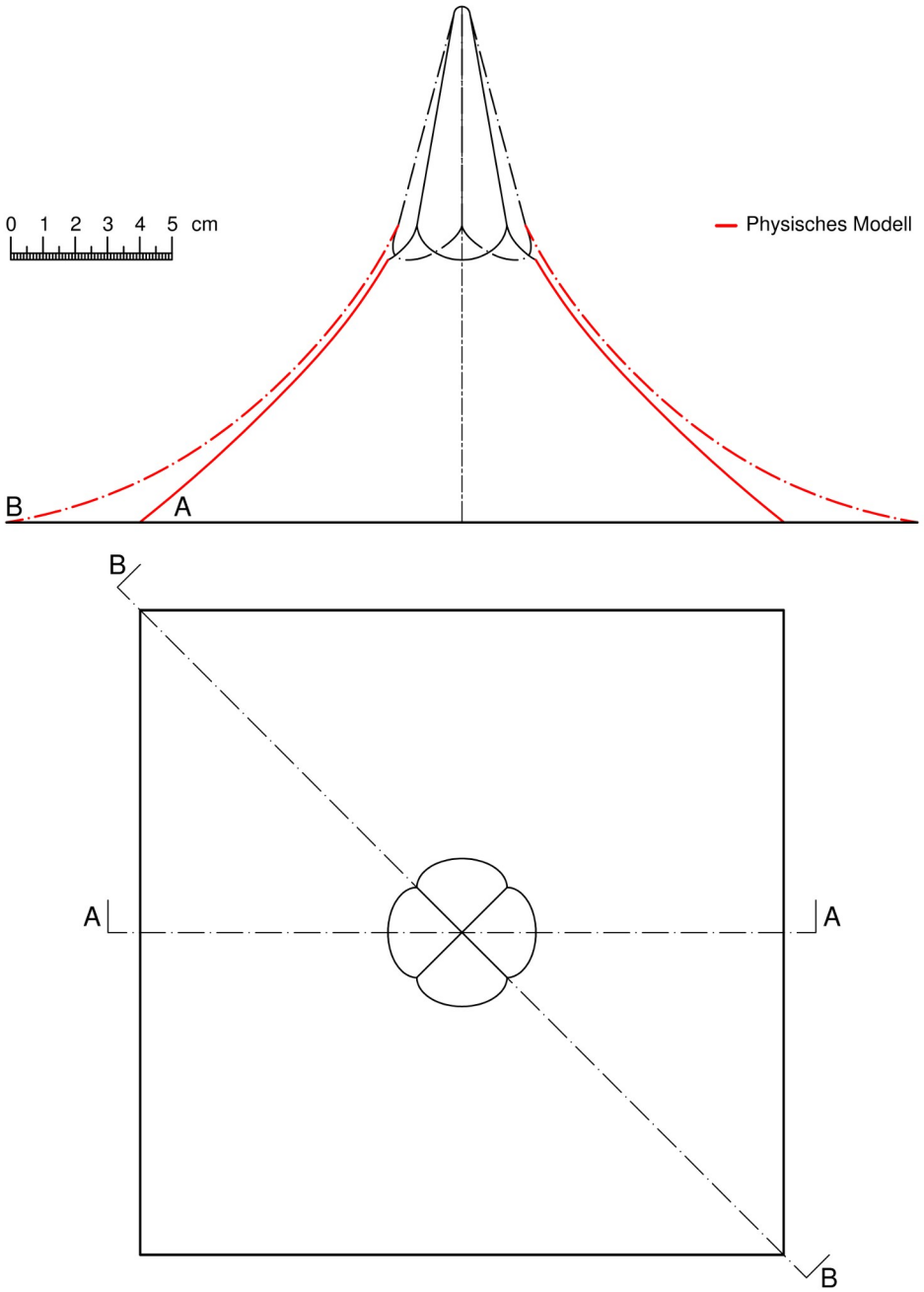

Abb. 180: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

Nachtrag: Rosette - Vorlage

Eine Vorlage der Rosetten-Form bzw. Schablonen für Innen-Durchmesser und Bögen erleichtern das Anzeichnen der Form auf dem Stoff.

(i) Mittels der Ring-Schablone (Innen-Durchmesser) und der aufgezeichneten Achsen können die Ansätze (Stoßpunkte) der Rosetten-Bögen einfach auf einem ebenen Niveau markiert werden (Abb. 166, S. 85). Mit der Schablone für die Bögen können diese dann durch Anlegen an die Markierungen angezeichnet werden (Abb. 167, S. 85).

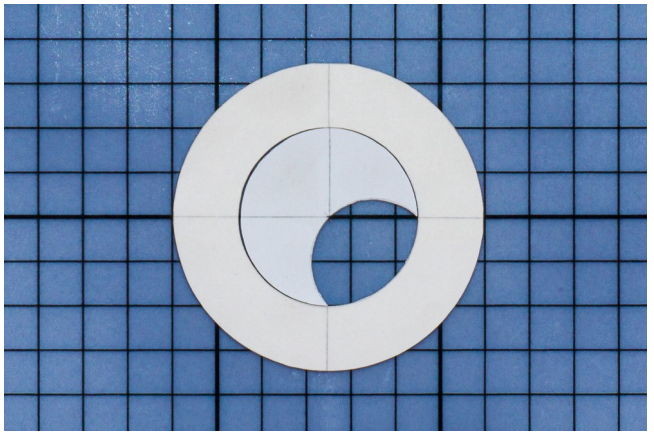

Abb. 181: Schablonen für Durchmesser und Bögen

- Rosetten-Geometrie: Ausgangspunkt zur Konstruktion ist der Innen-Durchmesser (Abb. 182, roter Kreis) der Rosette, der zuvor am Modell ermittelt wurde.
- Eine Möglichkeit, die Rosetten-Bögen zu definieren, ist die Teilung des Rings in 4 gleichgroße Segmente, in die ein Kreis eingeschrieben wird, der den Mittelpunkt des roten Kreises und die Enden des Segments berührt.

  Dabei stellt die Verbindung der beiden Segment-Enden den Durchmesser des blauen Kreises dar.

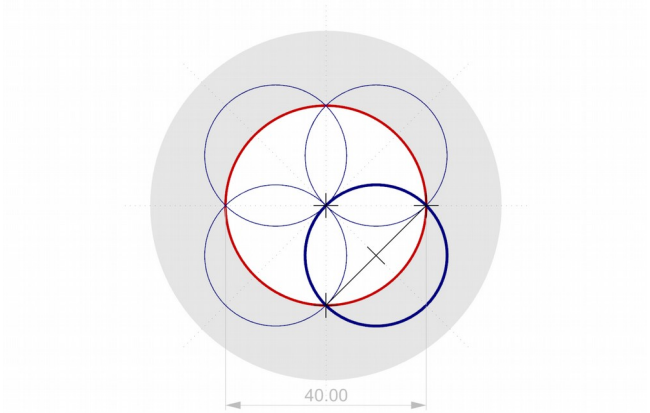

Abb. 182: Konstruktion der Rosetten-Bögen

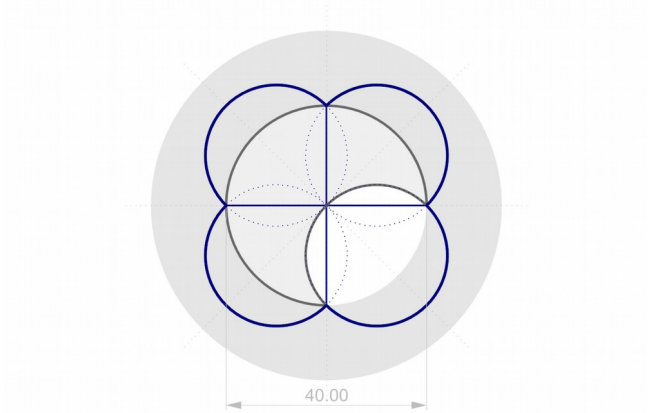

Abb. 183: Bogen-Schablone (innere Scheibe)

- Dieser blaue Kreis dient nun als Vorlage für die Rosetten-Bögen. Um dafür eine Schablone herzustellen, kann aus einer Scheibe (z. B. der inneren Scheibe der Ring-Schablone) oder einem Blatt Papier ein Halbkreis mit dem Radius des blauen Kreises ausgeschnitten werden.

  (i) Diese Schablone kann nun an den bereits markierten Ansatzpunkten angelegt werden, um die Form des Rosetten-Bogens auf den Stoff aufzuzeichnen (dabei die Schablone eventuell leicht biegen, um sie der Oberflächenkrümmung der Membran anzupassen; Abb. 167, S. 85).

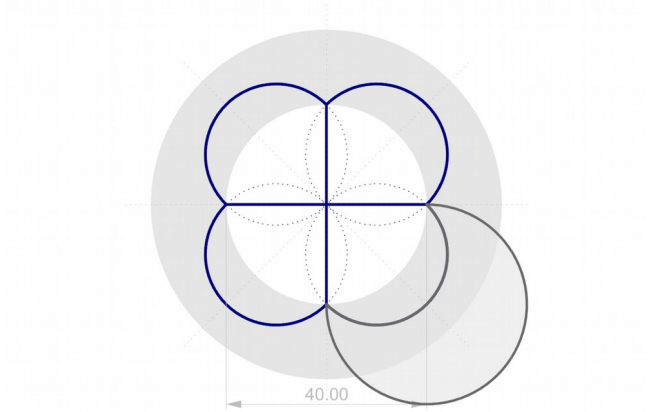

Abb. 184: Bogen-Schablone (außen)

3.4.5 Typ 5: Hochpunkt - Mast mit Augschlaufe

Aufwand[1]: **ca. 1 h 40 min** Komplexität[2]: **hoch** **Kosten: € 5 - 20**

Material / Werkzeug (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39)

- Weichfaserplatte, Stärke: 15 - 20 mm: L x B: 200 x 200 mm
- Holzdübel, d = 5 mm: L: 160 mm (+ Platten-Stärke - 5 mm)
- Strumpf-Stoff (weiß) ca. 200 x 200 mm
- Lotschnur (ca. 200 mm)
- Geodreieck, Lineal
- Cutter, Schere
- Stift
- Heißkleber, Sekundenkleber
- Landkartennadeln (50[3] Stk.)
- (Hand-)Bohrer: 3 - 4 mm; 0,5 - 1 mm (optional)
- optional: Pinzette, Zahnstocher / Spieß, Sandpapier, Zirkelschneider, Kreuzlinienlaser (m. Stativ)

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

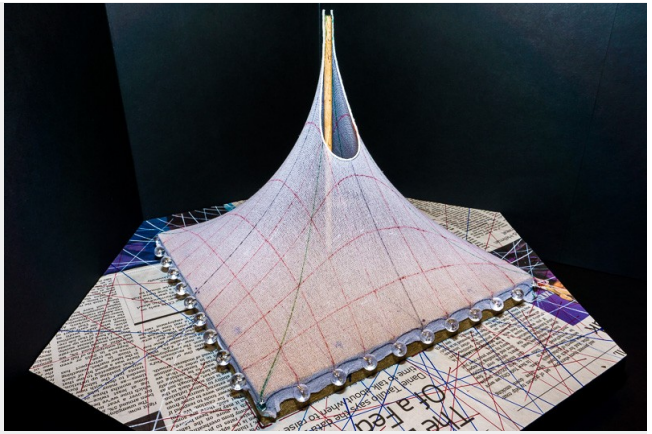

Abb. 185: Hochpunkt - Mast mit Augschlaufe

Die Membran-Fläche wird durch einen Mast unterstützt. Die Kräfte aus der Membran werden durch eine „tropfen-“ oder „augförmige“ Seilschlaufe aus der Fläche in den Mast geleitet. Dadurch wird eine zu hohe Belastung der Membran bei einer punktförmigen Auflagerung direkt am Mast vermieden.

Vorbereitung: Modell-Platte

Die anzuwendenden Schritte entsprechen der Anleitung in Kapitel:
3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring:

- Vorbereitung: Modell-Platte, S. 72
- Modell: Mast, S. 73 f.
  Der Mast ist für das hier angewendete Beispiel mit einer Höhe von 160 mm (über der Oberkante der Modell-Platte) und ohne Ring auszuführen.

3.4.4 Typ 4: Hochpunkt - Mast mit Rosette:

- Modell: Stoff-Bespannung, S. 84
- Modell: Form-Kontrolle, S. 84

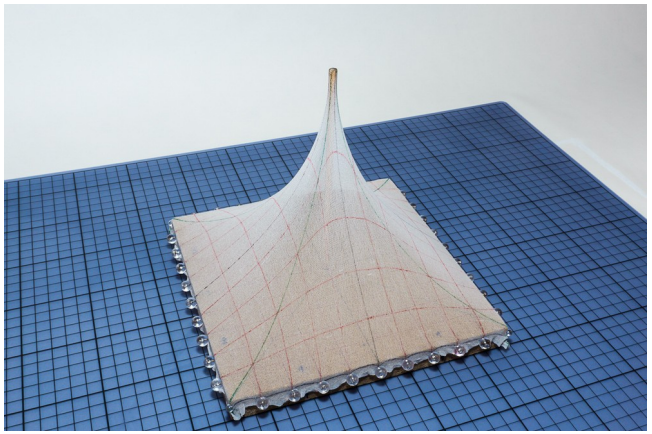

Abb. 186: Stoff-Bespannung: komplett

1 Herstellungszeit: **Grundplatte**: 5 min; **Raster**: 15 min; **Mast**: 5 min; **Strumpf-Stoff**: 20 min; **Membran**: Aufspannen: 15 min, **Augschlaufe**: Einpassen: 20 min, Ankleben: 20 min.

2 Schwierigkeitsgrad: Die Ausführung und v. a. die Anbringung der Schlaufen für die Rosette erfordert etwas Geschicklichkeit wie Augenmaß, um eine gleichförmige Rosette zu erhalten.

3 Landkartennadeln: 40 Stk. zur Befestigung des Stoffs; 10 Stk. zum vorübergehenden anheften der Augschlaufe an den Stoff

Modell: Augschlaufe

- Zunächst wird die Lage bzw. der Scheitelpunkt der Augschlaufe festgelegt (hier durch den Linienlaser angezeigt).

- Am Scheitelpunkt vorsichtig mit einer Nähnadel einen Faden durch den Stoff fädeln und an dieser Stelle die Lotschnur der Augschlaufe anknoten.

  Entsprechend der nötigen Breite der Schlaufe etwa an den Viertel-Punkten links und rechts des Scheitelpunkts das Einfädeln und Anknoten wiederholen.

  (i) Zur Kontrolle der Form kann in der Aufsicht eine Ring-Schablone verwendet werden, in der sich die Schlaufe konzentrisch abbilden sollte.

- Die Krümmung der nun durch 3 Knoten gehaltenen Augschlaufe kann durch vorsichtiges Anpassen der Länge zwischen den Knoten (mittels Pinzette) kontrolliert werden.

- Die Form mit Sekundenkleber (und ev. einem Zahnstocher) fixieren.

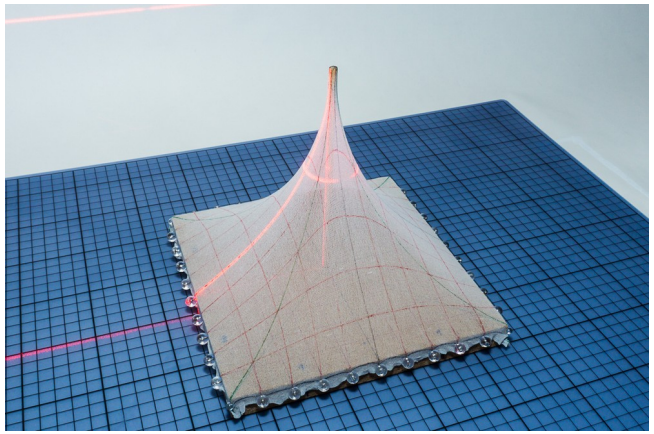

Abb. 187: Festlegung des Scheitelpunkts

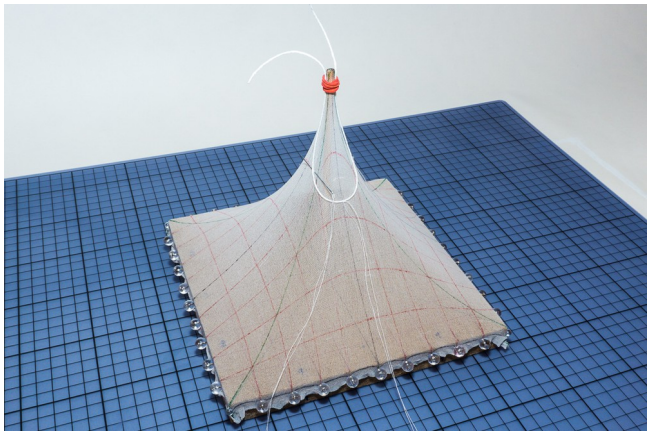

Abb. 188: Anknoten der Augschlaufe

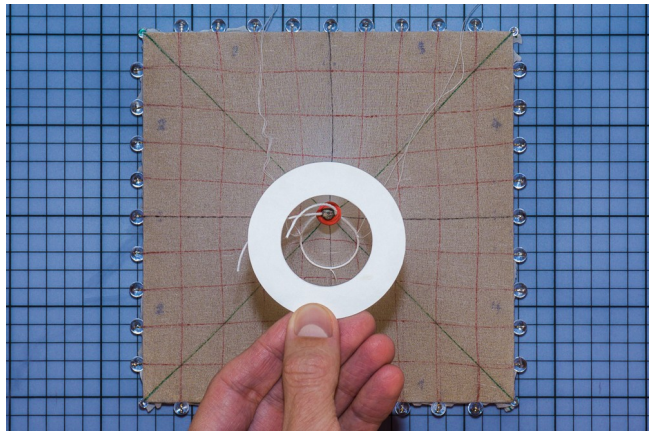

Abb. 189: Kontrolle einer konzentrischen Form

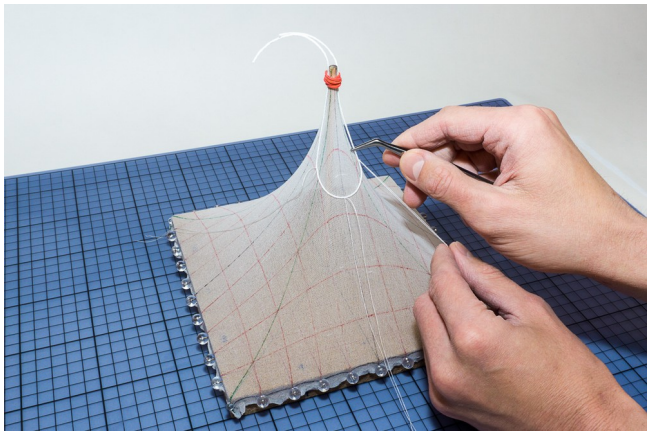

Abb. 190: Anpassung der Krümmung

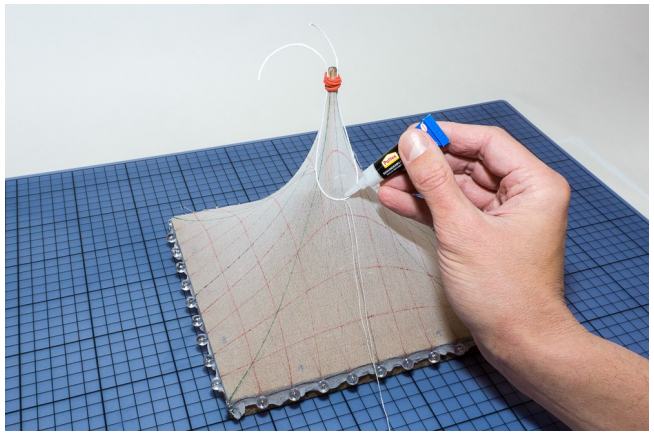

Abb. 191: Fixierung durch Sekundenkleber

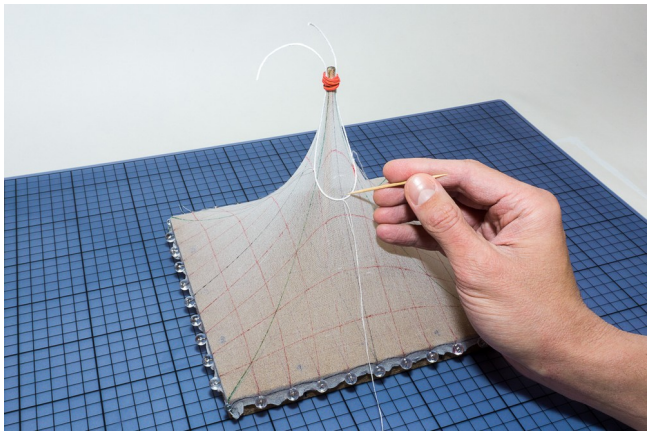

Abb. 192: Stabilisieren zum Trocknen

- Die Schlaufe vorsichtig mit einem scharfen Modellmesser ausschneiden.

  (i) Um ein Einreißen des Stoffs zu vermeiden, das Messer entlang der angeklebten Schnur nach außen ziehen und mit einer Pinzette die Schnur entgegenhalten.

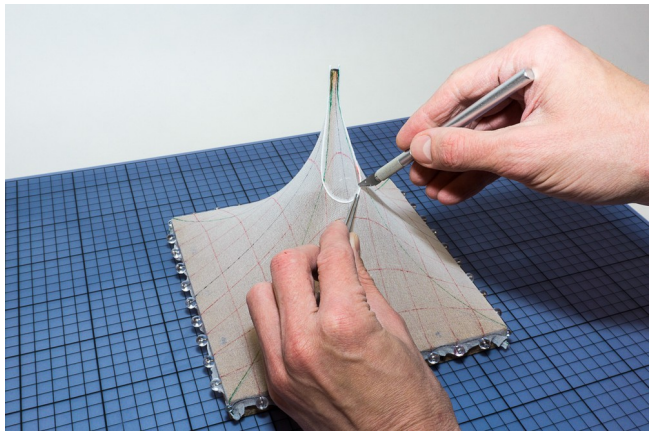

Abb. 193: Ausschneiden der Augschlaufe

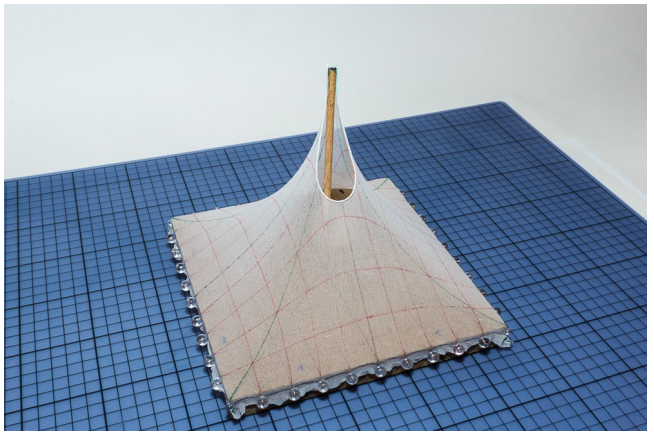

Abb. 194: Fertiges Modell mit Augschlaufe

(i) Vor allem das Ankleben der Schlaufe an den Stoff im Bereich der Mast-Spitze erfordert hohe Genauigkeit, um nicht zu viel Sekundenkleber zu verwenden, so dass sich nicht ein zu großer Teil der Schlaufe und des Stoffs entlang des Masts verklebt, und auch nicht zu wenig, damit sich der Stoff beim Ausschneiden nicht von der Schnur löst.

Analyse: Hauptkrümmungen

Die Hauptkrümmungen werden zunächst anhand der frontal fotografierten Ansichten und der vom Modell abgenommenen Dimensionen (eventuell in Verbindung mit einem Foto der Aufsicht) festgehalten.

Abb. 195: Hauptkrümmung 1

Abb. 196: Hauptkrümmung 2

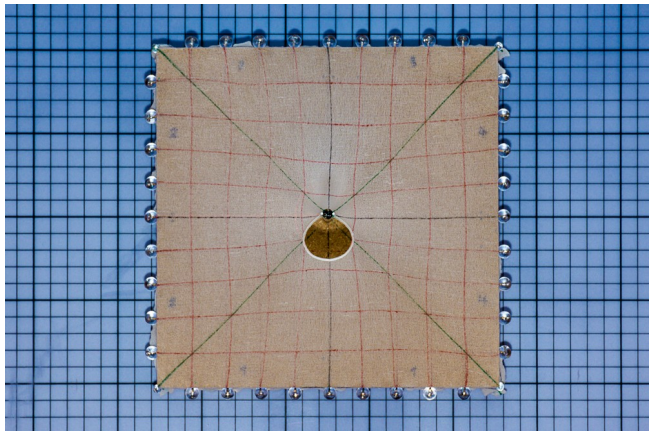

Abb. 197: Aufsicht

Abb. 198: Hauptkrümmung 3

Anschließend werden in der digitalen Bearbeitung auf Basis der Fotos und Abmessungen die Hauptkrümmungslinien erstellt und in Bezug mit dem Grundriss dargestellt.

Für genauere Angaben dazu siehe:

- im Generellen: 4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell, S. 118;
- im Speziellen: 4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD, S. 123.

Aufgrund der Komplexität der Form und der Schwierigkeit, diese im Formfinder als digitales Modell zu erstellen, wurde hier auf den Vergleich zwischen physischem und digitalen Modell verzichtet.

(i) Die Erstellung der Form in Formfinder ist möglich, allerdings sind dafür komplexe Schritte und Einstellungen nötig, da kein spezialisiertes Werkzeug für die Generierung dieser Form zur Verfügung steht.

Die Analyse der Hauptkrümmungen zeigt relativ gute und gleichmäßige Krümmungen in der Membran-Fläche.

Aufgrund der komplexen Form wurden 3 Schnitte angefertigt, um die Einschätzung und Rekonstruktion des Modells zu erleichtern.

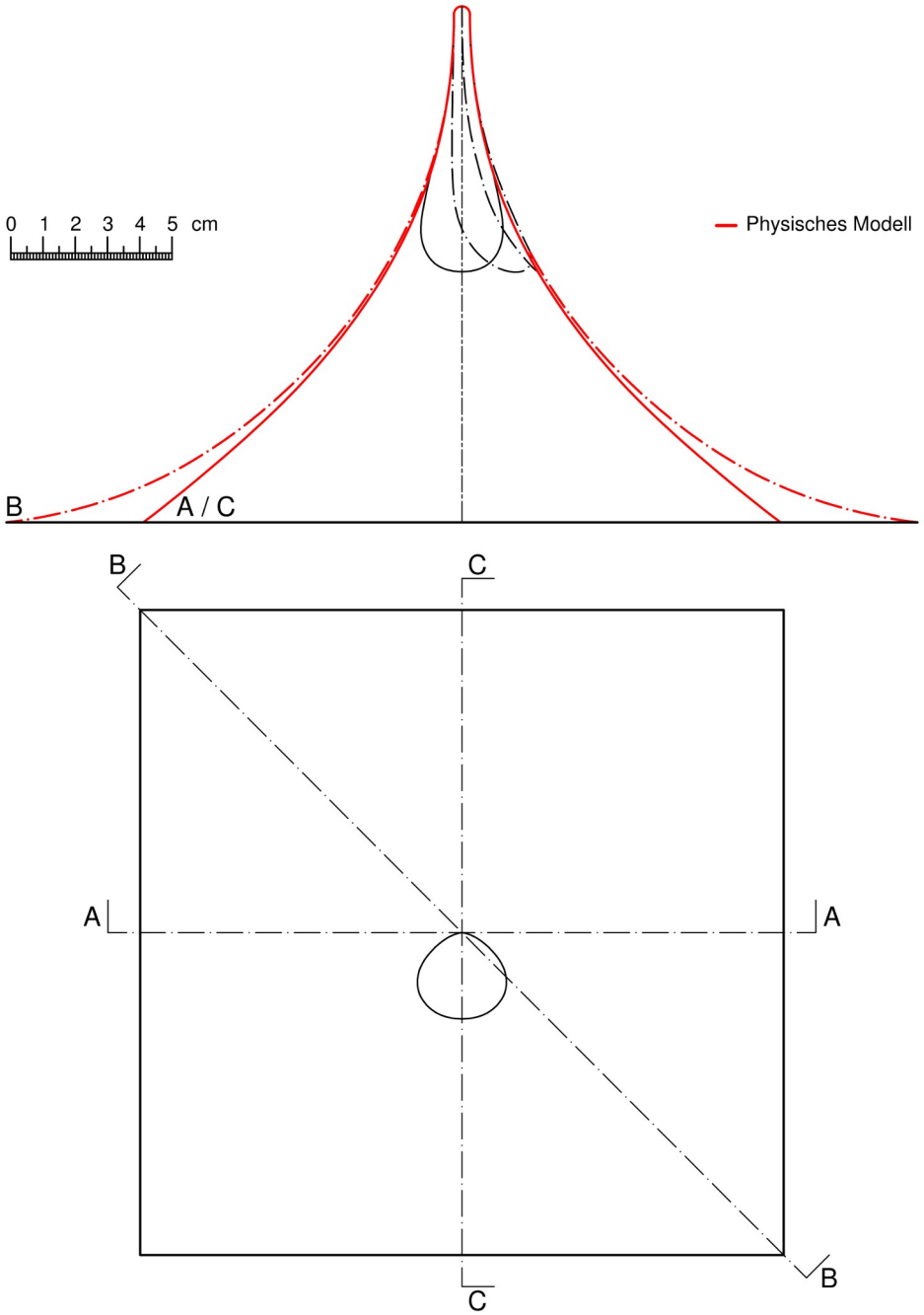

Abb. 199: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

3.4.6 Typ 6: Hochpunkt - Mast mit Seil

Aufwand[1]: **ca. 1 h 10 min** Komplexität[2]: **niedrig** Kosten: **€ 5 - 20**

Material / Werkzeug (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39)

- Weichfaserplatte, Stärke: 15 - 20 mm: L x B: 200 x 200 mm
- Holzdübel, d = 5 mm: L: 160 mm (+ Platten-Stärke - 5 mm)
- Strumpf-Stoff (weiß) ca. 200 x 200 mm
- Lotschnur (ca. 1200 mm)
- Geodreieck, Lineal
- Cutter, Schere
- Stift
- Heißkleber
- Landkartennadeln (45[3] Stk.)
- (Hand-)Bohrer: 3 - 4 mm; 0,5 - 1 mm (optional)
- optional: Pinzette, Zahnstocher / Spieß, Sandpapier, Kreuzlinienlaser (m. Stativ)

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

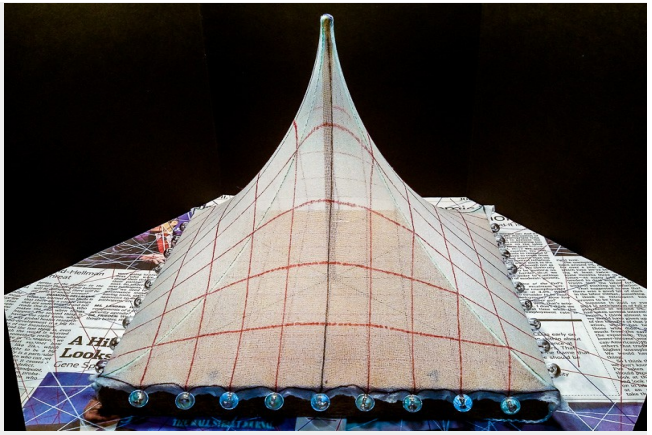

Abb. 200: Hochpunkt - Mast mit Seil

Die Membran-Fläche wird durch einen Mast unterstützt. Die Membran selber wird durch Seile linienartig unterstützt, die wiederum vom Mast abgehängt sind. Dadurch wird eine zu hohe Belastung der Membran bei einer punktförmigen Auflagerung direkt am Mast vermieden und außerdem die Form der Membran je nach Seil-Spannung leicht angepasst.

Vorbereitung: Modell-Platte

Die anzuwendenden Schritte entsprechen der Anleitung in Kapitel:
3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring:

- Vorbereitung: Modell-Platte, S. 72
- Modell: Mast, S. 73 f.
  Der Mast ist für das hier angewendete Beispiel mit einer Höhe von 160 mm (über der Oberkante der Modell-Platte) und ohne Ring auszuführen.

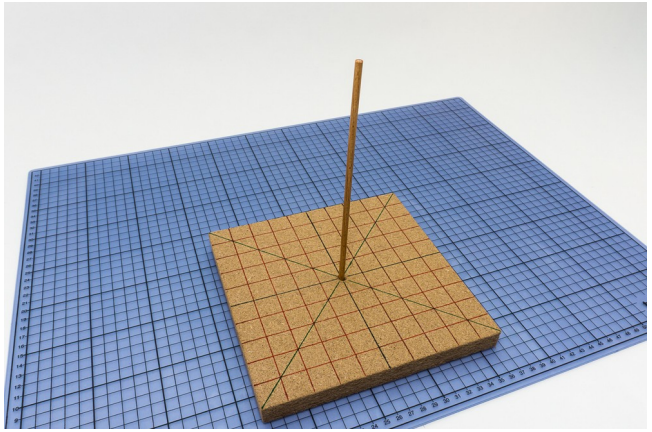

Abb. 201: Modell-Platte mit Mast

1 Herstellungszeit: **Grundplatte**: 5 min; **Raster**: 15 min; **Mast / Seile**: 10 min; **Strumpf-Stoff**: 20 min; **Membran**: Aufspannen: 15 min, **Seil-Anpassung**: 5 min.

2 Schwierigkeitsgrad: Es bedarf keiner besonderen Vorkenntnisse, um die Schritte (präzise) ausführen zu können.

3 Landkartennadeln: 40 Stk. zur Befestigung des Stoffs; 5 Stk. zur Fixierung der Schnüre.

Vorbereitung: Seile

- Die Seile aus Lotschnur mit genügend Überstand auf beiden Seiten (um spätere Anpassungen zu erleichtern) zuschneiden und in der Mitte am Mast mit einer Landkartennadel fixieren.

  (i) Ein Überstand von ca. 10 cm erleichtert spätere Anpassungen (wenn etwa eine Vergrößerung der Seillänge zum Mast getestet werden soll). Etwas Sekundenkleber an der Mast-Spitze hilft, ein Verrutschen der Seile zu vermeiden.

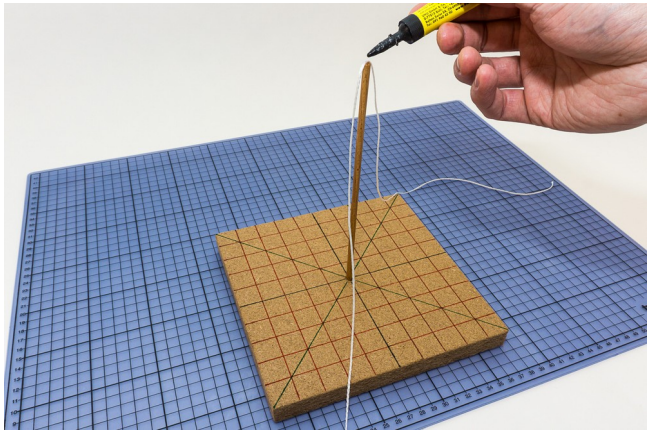

Abb. 202: Fixierung der Lotschnur am Mast

- Für die mittige Ausrichtung des Masts die Schnüre mit den gleichen Längen an den Ecken der Modell-Platte mit Landkartennadeln befestigen.

  (i) Bei Bedarf die Schnur mit 2 hintereinander durchgesteckten Nadeln in der Modell-Platte befestigen, um ein Ausfransen der Fäden und damit ein Nachlassen der Seil-Spannung unter höherer Belastung zu vermeiden.

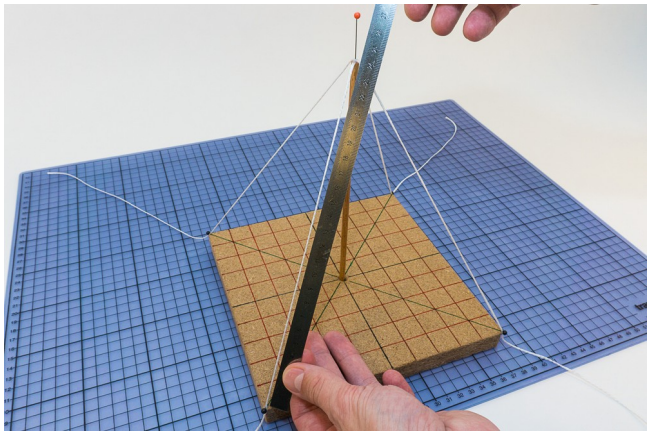

Abb. 203: Abstimmung aller 4 Seillängen

Modell: Stoff-Bespannung

Die anzuwendenden Schritte entsprechen der Anleitung in Kapitel:
3.4.4 Typ 4: Hochpunkt - Mast mit Rosette:

- Modell: Stoff-Bespannung, S. 84
- Modell: Form-Kontrolle, S. 84
  Sollte ein Dehnungsausgleich im Stoff nötig sein, kann die Fixierung der Seile an der Modell-Platte kurzfristig entfernt werden.

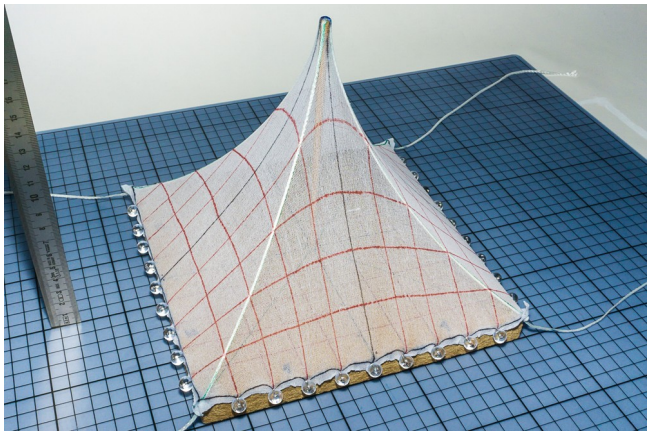

Abb. 204: Stoff-Bespannung: komplett

Modell: Form-Kontrolle

- Nun muss die Spannung der Schnüre angepasst werden, um der Membran eine günstige Form zu geben.

  (i) Die Membran sollte dabei möglichst wenig flache Stellen (mit geringer Krümmung) aufweisen (s. a. Nachtrag: Mast überhöht, S. 101 ff.).

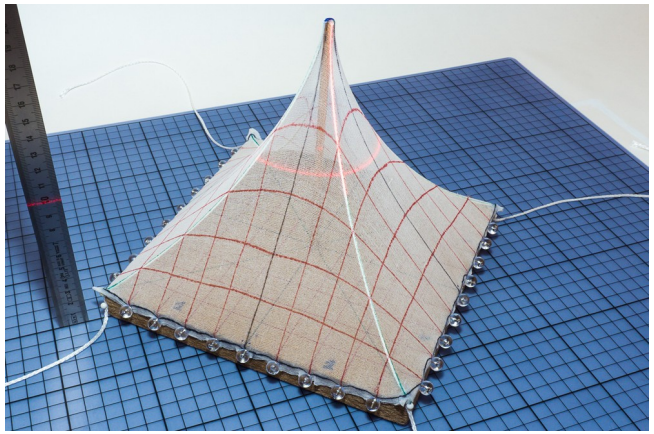

Abb. 205: Höhenschichtlinie von der Seite

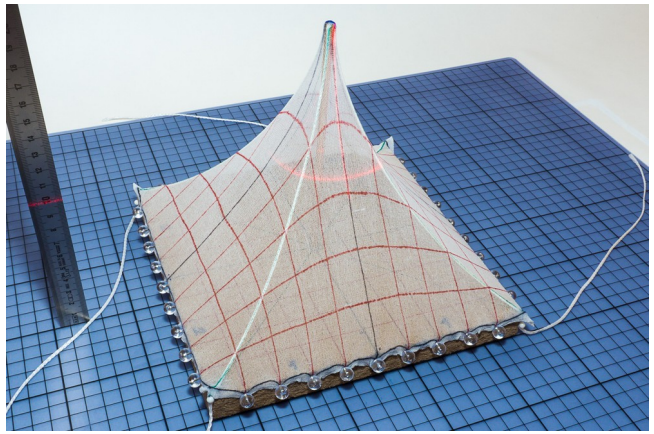

Abb. 206: Höhenschichtlinie von vorne

(i) Die Höhenschichtlinie mittels Kreuzlinienlaser ist ein zusätzliches Hilfsmittel, um die Krümmungen in der Membran-Fläche besser einschätzen zu können.

- Bei dem hier abgebildeten Modell wurde die Seil-Spannung so angepasst, dass die Membran von einem Seil (über die Mast-Spitze geführt) getragen wird.
  Da die Verwendung des 2. Seils nur dazu führen würde, dass sich die Krümmungen in der Membran-Fläche verringern (und der nachträgliche Ausbau schwierig ist), wurde die Spannung aus diesem Seil genommen und die Länge so angepasst, dass das Seil den Stoff nur mehr leicht berührt und sich somit nicht auf die Form der Membran auswirkt (was auch durch die gleichmäßige Krümmung in der Höhenschichtlinie im Bereich des losen Seils festgestellt werden kann).

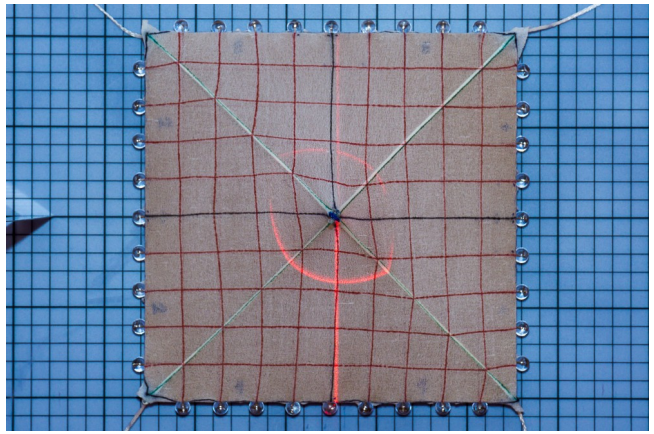

Abb. 207: Höhenschichtlinie von oben

(i) Ein flexibles Lineal, dass sich an die Krümmung der Schnur anpassen kann, eignet sich gut, um auf beiden Seiten des Masts die gleiche Seillänge einzustellen.
Außerdem kann mit dem Kreuzlinienlaser während der Anpassung der Seillänge die vertikale Position des Masts kontrolliert werden (welche durch ungleichmäßige Seil- oder Membran-Spannung verzogen werden könnte).

(i) Durch die relativ hohe Spannung in den Schnüren kann es nötig sein, die Enden mit mehreren Landkartennadeln an der Modell-Platte zu befestigen, um ein Nachlassen der Spannung zu verhindern.

Analyse: Hauptkrümmungen

Die Hauptkrümmungen werden zunächst anhand der frontal fotografierten Ansichten und der vom Modell abgenommenen Dimensionen (eventuell in Verbindung mit einem Foto der Aufsicht) festgehalten.

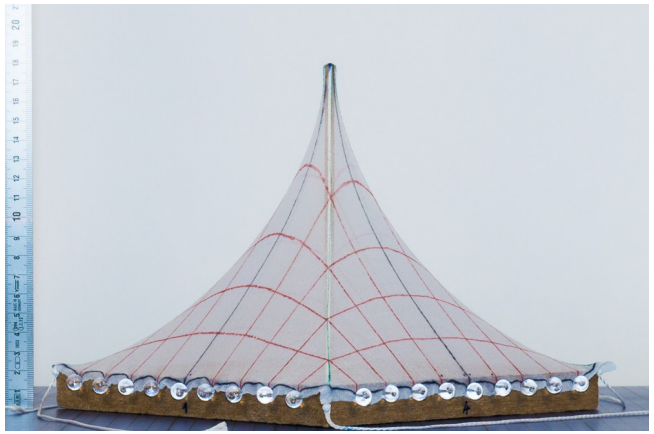

Abb. 208: Hauptkrümmung 1 (diagonal)

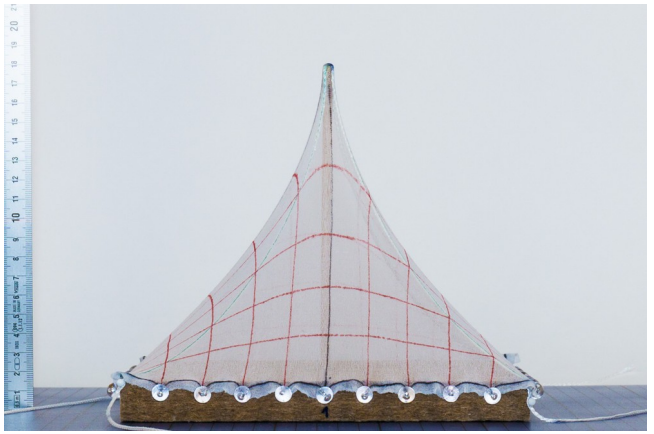

Abb. 209: Hauptkrümmung 3 (frontal)

(i) Da die Hauptkrümmung 3 (entlang der Mittel-Linie) über die Kontur (entlang der Diagonale) nur schwer erkennbar ist (Abb. 209), kann die Hauptkrümmung durch Verwendung des Kreuzlinienlaser besser am Foto sichtbar gemacht werden (s. a. 4.2.3 Ableitung der Hauptkrümmungen vom Foto , S. 125).

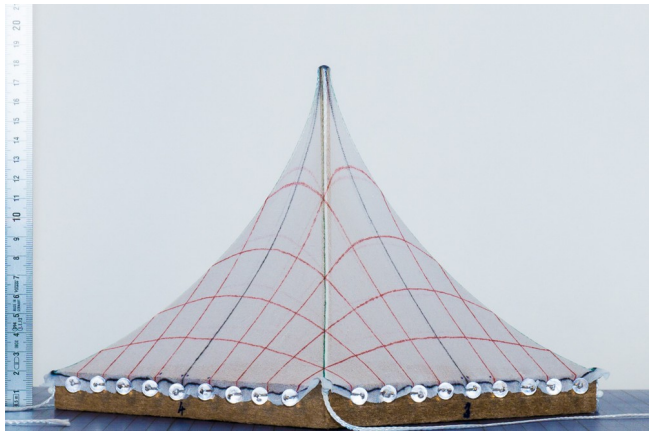

Abb. 210: Hauptkrümmung 2 (diagonal)

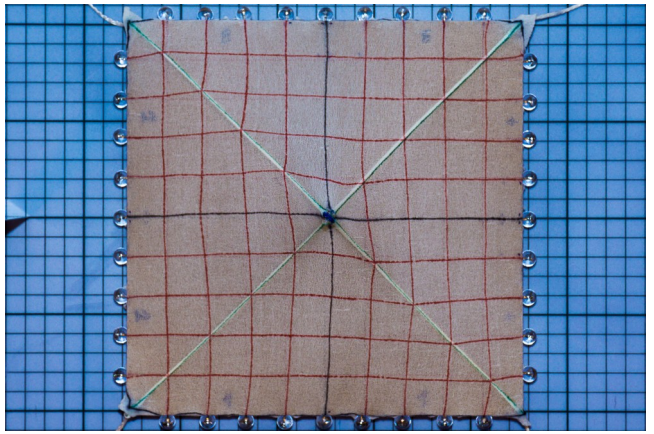

Abb. 211: Aufsicht

(i) Die aktuelle Form kann allerdings durch die beiden Diagonal-Schnitte ausreichend analysiert und annäherungsweise rekonstruiert werden (s. a. 4.2.5 Rekonstruktion als digitales Modell, S. 129).

Anschließend werden in der digitalen Bearbeitung auf Basis der Fotos und Abmessungen die Hauptkrümmungslinien erstellt und in Bezug mit dem Grundriss dargestellt.

Für genauere Angaben dazu siehe:

- im Generellen: 4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell, S. 118;
- im Speziellen: 4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD, S. 123.

Die Analyse der Hauptkrümmungen zeigt einen leichten Unterschied zwischen dem physischen Modell (rot Linien) und der digitalen Formfindung (Software: Formfinder; türkise Linien).

Auffällig ist der recht deutliche Unterschied bezüglich des Schnittes A, der beim digitalen Modell eine wesentlich stärkere Krümmung aufweist. Die Membran am physischen Modell wurde mit gleichmäßiger Spannung in alle Richtungen am Modell befestigt und wird durch die Schnur in einer Diagonale etwas stärker gespannt. Schnitt A und B sind sich hier viel ähnlicher.

Die unterschiedlichen Krümmungen an der gleichen Grundform deuten auf die grundsätzlich unterschiedlichen Arten der Formgenerierung und vor allem deren Kontrolle hin, die bei der digitalen Formfindung zusätzliche Kenntnisse über die Anpassungs-Parameter und deren Funktion erfordert. Diese Eigenheit tritt um so stärker bei jenen Formen hervor, die nicht durch spezielle Werkzeuge (wie z. B. dem Radial-Netz für Hochpunkte) erzeugt werden können und den gekonnten Umgang mit den Parametern der Tragwerkseigenschaften erfordern.

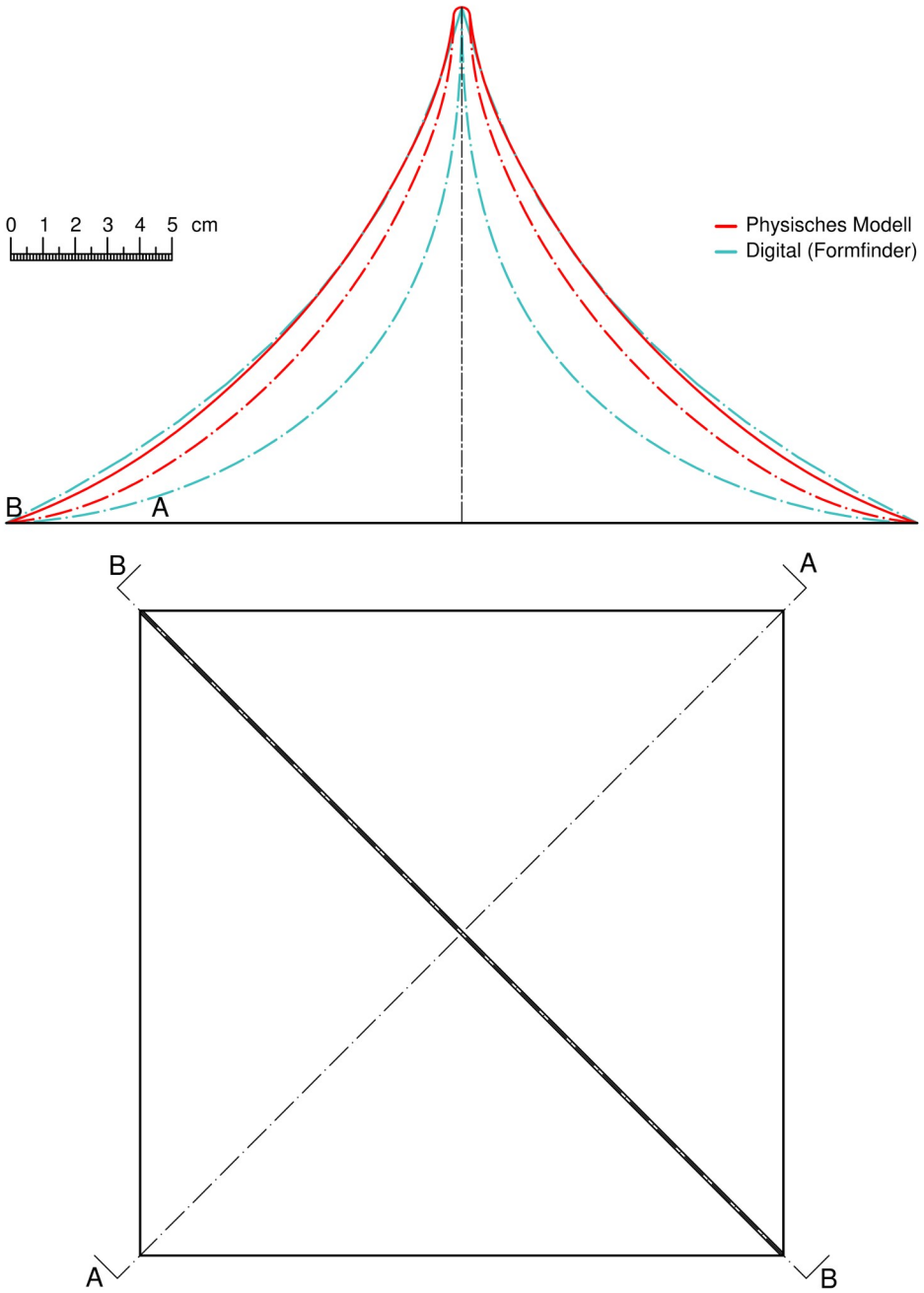

Abb. 212: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

Nachtrag: Mast überhöht

Ein überproportional hoher Mast führt bei dem dargestellten Tragsystem zu einer ungünstigen Form und hohem Materialverbrauch (durch eine größere Membran-Fläche, höhere Spannweiten, einer größeren Knicklänge etc.; s. a. 3.2.2 Grundlegende Modell-Technik: Modell-Größe und Form, S. 35).

(i) Ein zu langer Mast kann leicht gekürzt werden (Nachtrag: Mast anpassen, S. 102) und überdies auch dazu verwendet werden, um durch Verschieben durch die Platte hindurch die Mast-Höhe dynamisch anzupassen und so die Veränderung der Form zu beobachten.

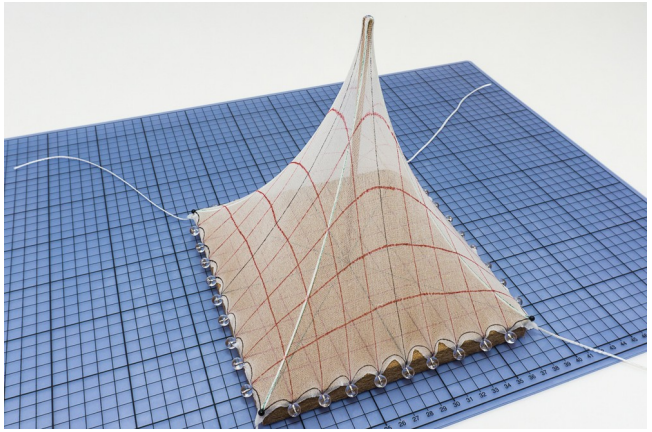

Abb. 213: Frontal-Ansicht

- Die Ansicht der Hauptkrümmungen zeigen die fast pyramidenartige Form der stark gespannten Membran-Fläche mit stark ausgedehnten Bereichen geringer Krümmung.

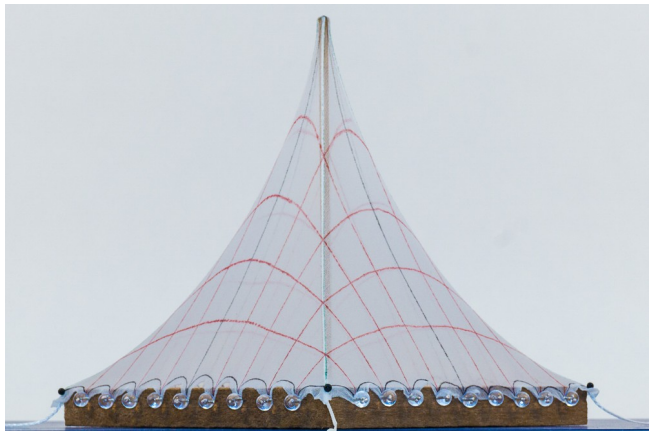

Abb. 214: Hauptkrümmung 1 (diagonal)

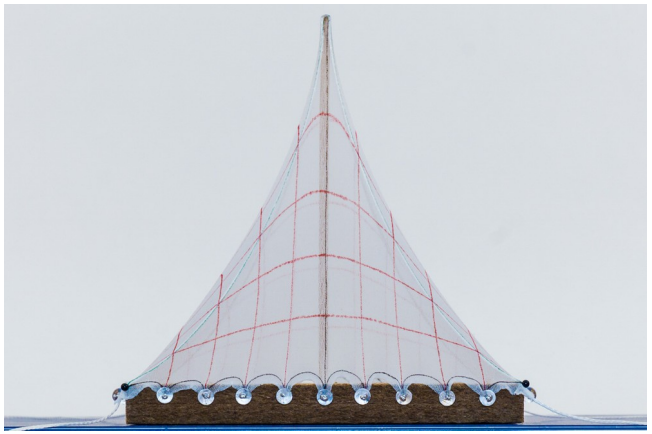

Abb. 215: Hauptkrümmung 2 (frontal)

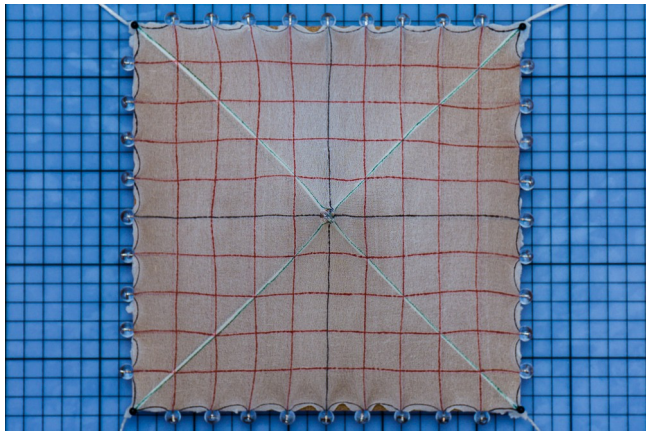

Abb. 216: Aufsicht

Nachtrag: Mast anpassen

Da sich der Mast als zu hoch erwiesen hat und zu einer ungünstigen Form führt, soll dieser gekürzt werden.

(i) Die passende Höhe kann zuvor durch Verschieben des Masts durch die Modell-Platte hindurch und den entsprechenden Formänderungen festgestellt werden.

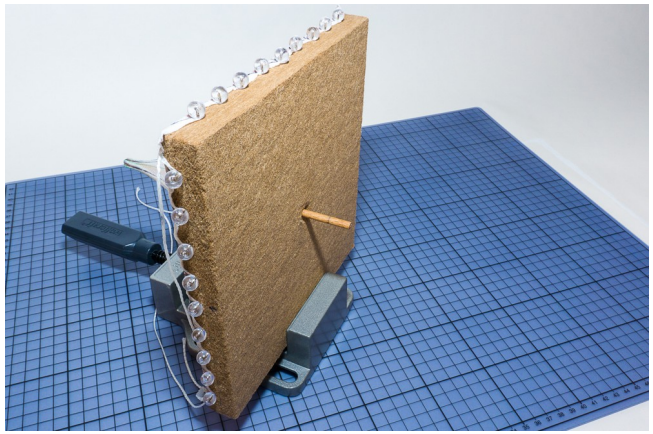

Abb. 217: Mast

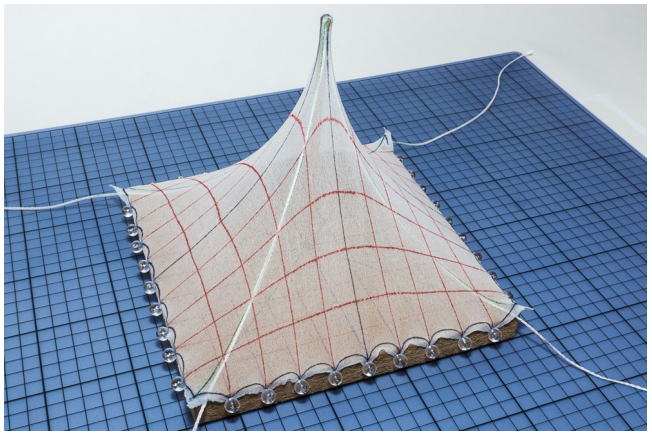

Abb. 218: Frontal-Ansicht

(i) Die Fixierung der Modell-Platte am Schraubstock hilft, Beschädigungen am Modell und im Besonderen am Stoff zu vermeiden.

- Den Mast vorsichtig in Richtung Mast-Fuß durch die Modell-Platte schieben und die Kürzung am Mast markieren. Dabei auch die Platten-Stärke berücksichtigen sowie einen ca. 5 mm kürzeren Mast-Fuß in dem Bereich, der in der Platte steckt, um den Mast mit Kleber gegen Durchrutschen fixieren zu können (s. a. 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring: Modell: Mast, S. 73).
  Der Holzdübel kann mit einer Laubsäge (oder einem Cutter auf einer Unterlage) zugeschnitten werden.

Nachtrag: Seile gleichmäßig gespannt

Ausgehend von dem Modell mit dem zuvor gekürzten Mast wird nun untersucht, wie sich das gleichmäßige Spannen beider Schnüre auf die Form und Oberflächenkrümmung auswirkt.

(i) Dazu werden für das hier dargestellte Modell bei einer Mast-Höhe von 160 mm alle 4 Seiten auf eine Seillänge von 218 mm gebracht (aufgrund der Seil-Krümmung abgemessen mit einem flexiblen Lineal).

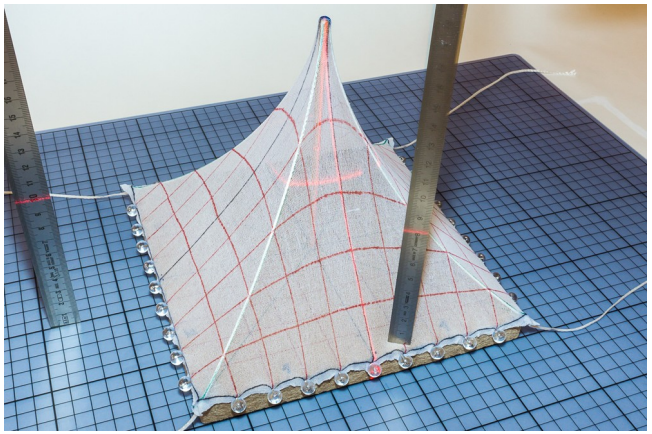

Abb. 219: Ansicht (schräg m. Mittelmarkierung)

- Die geringere Mast-Höhe wirkt sich positiv auf die Form, Proportionalität und den Materialverbrauch aus.

  Allerdings entsteht durch die gleichmäßige Spannung der Seile eine ungünstige Form ähnlich einer vierseitigen Pyramide mit geringer Krümmung in der zwischen den Seilen gespannten Fläche.

Abb. 220: Hauptkrümmung 1 (diagonal)

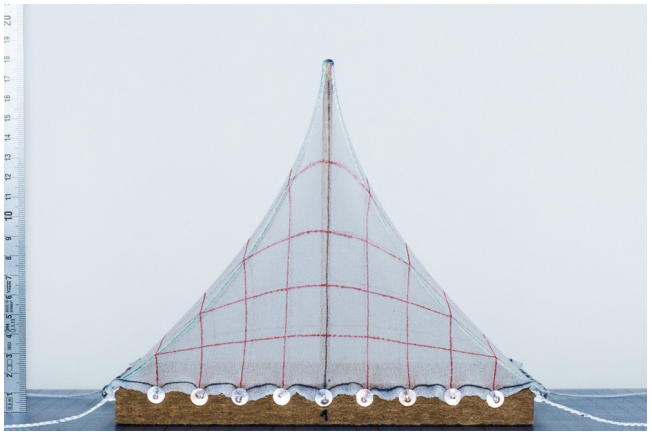

Abb. 221: Hauptkrümmung 2 (frontal)

(i) Der Abschnitt Modell: Form-Kontrolle, S. 98 zeigt im Vergleich dazu ein günstige Form des gleichen Modells mit nur einem gespannten Seil.

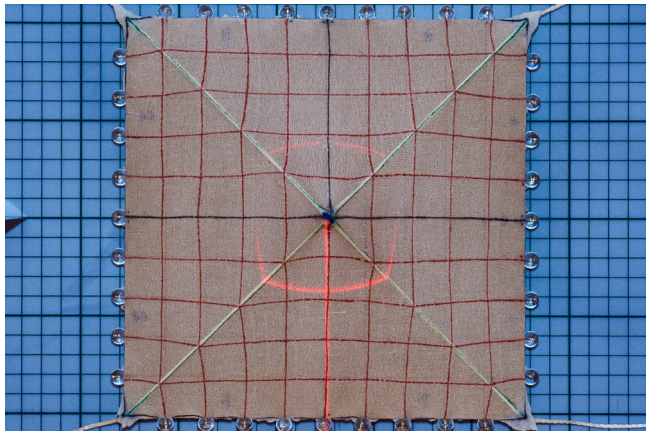

Abb. 222: Aufsicht

Nachtrag: Seil übermäßig gespannt

Ausgehend von dem Modell mit den vorhergehenden Anpassungen von Mast und gleichmäßiger Seilspannung wird nun untersucht, wie sich eine ungleichmäßige Spannung der beider Schnüre auf die Form und Oberflächenkrümmung auswirkt.

(i) Dazu wird für das hier dargestellte Modell bei einer Mast-Höhe von 160 mm nur eine Schnur gespannt - diese dafür stärker mit einer Seillänge von jeweils 214 mm auf beiden Seiten des Masts. Die zweite Schnur ist mit einer Seillänge von 224 mm je Seite gerade so stark gespannt, dass sie den Stoff nur leicht berührt und keine tragende (und damit formgebende) Funktion übernimmt.

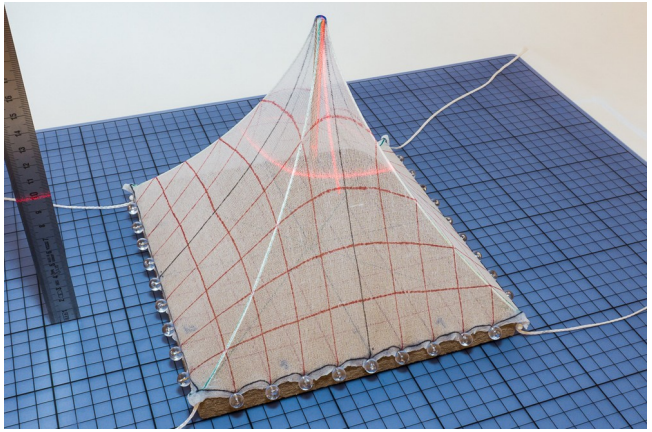

Abb. 223: Ansicht (schräg m. Mittelmarkierung)

- Da der Stoff nun nur an 2 Seiten durch die Schnur angehoben wird, kann die Membran nun eine stärkere und damit günstigere Krümmung ausbilden.

- Allerdings ist nun feststellbar, dass das Seil (Abb. 226) eine sehr geringe Krümmung aufweist, was wiederum hohe Spannungen im Seil erwarten lässt.

  (i) Der Abschnitt Modell: Form-Kontrolle, S. 98 zeigt im Vergleich dazu ein günstige Form des gleichen Modells mit nur einem mäßig gespannten Seil.
  Durch die geringere Seil-Spannung kann die Ausbildung flacher Bereiche nahe dem Seil etwas abgemildert werden.

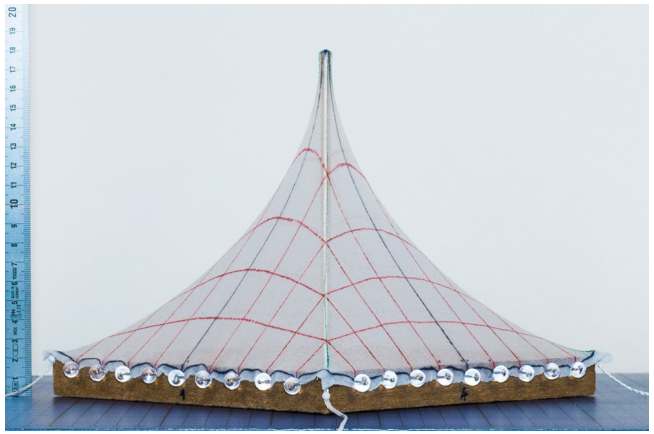

Abb. 224: Hauptkrümmung 1 (diagonal)

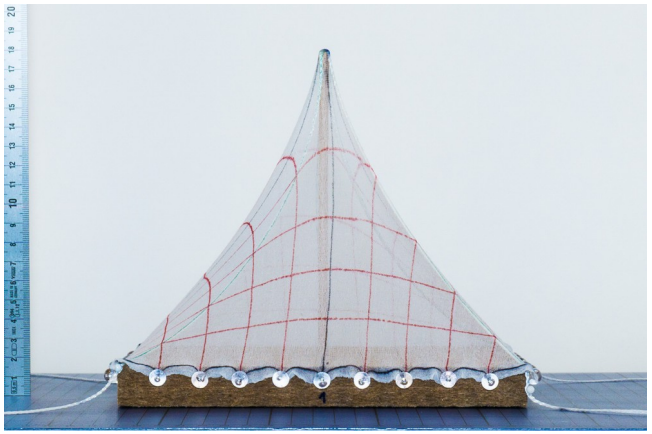

Abb. 225: Hauptkrümmung 2 (frontal)

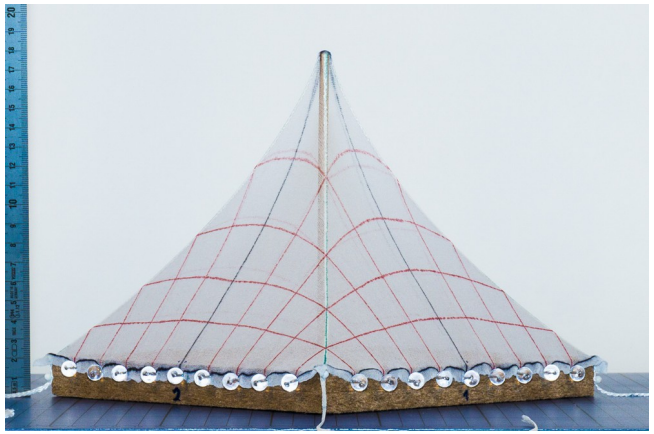

Abb. 226: Hauptkrümmung 3 (diagonal)

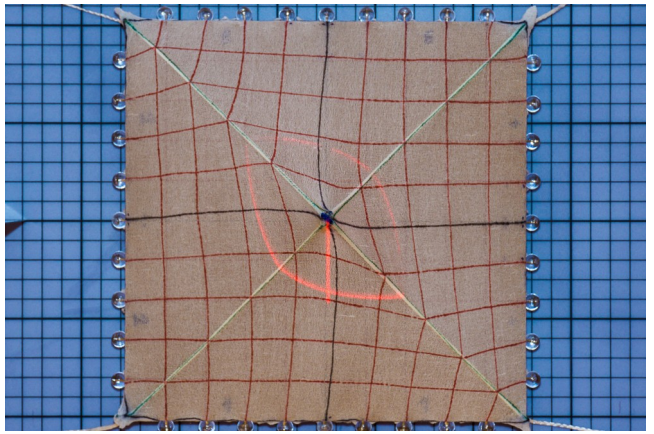

Abb. 227: Aufsicht

3.4.7 Typ 7: Bogengestützt

Aufwand[1]: **ca. 1 h 25 min** Komplexität[2]: **mittel** Kosten: **€ 5 - 20**

Material / Werkzeug (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39)

- Weichfaserplatte, Stärke: 10 - 20 mm: L x B: 200 x 200 mm, 4 x: ca. 80 x 80 mm
- Draht-Kleiderbügel, d = 2 - 3 mm: L: ca. 400 mm (ungebogenes Stück)
- Strumpf-Stoff (weiß) ca. 200 x 200 mm
- Faden (weiß) ca. 500 mm (optional)
- Geodreieck, Lineal
- Cutter, Schere
- Kombizangen: 2
- Stift
- Express-Holzleim (oder Kleber, schnell trocknend)
- Landkartennadeln (40[3] Stk.)
- Stecknadeln: 2 (Flachkopf)
- (Hand-)Bohrer: 3 - 4 mm; 0,5 - 1 mm (optional)
- optional: Sekundenkleber, Zahnstocher, Klemmen, Nähnadel, Schneidematte, Kreuzlinienlaser (m. Stativ), runde Objekte unterschiedlicher Krümmungsradien (z. B. Einmachglas, Küchentopf…)

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

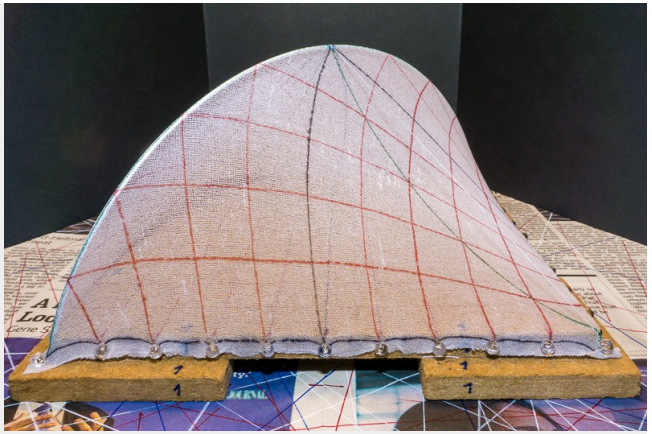

Abb. 228: Typ 6: Bogen

Die Membran-Fläche wird durch einen Bogen linienartig unterstützt. Durch die Wirkung der Kräfte aus der Membran normal zur Bogen-Achse ist der Bogen als Kreissegment zu wählen (und nicht etwa als Kettenlinie (Katenoide) wie bei vorwiegend vertikaler Belastung).

Vorbereitung: Modell-Platte

Die hier angewendete Methode zeigt eine 10 mm starke Modell-Platte mit 4 angeklebten Eck-Sockeln zur Befestigung des Bogens möglichst genau in den Ecken der Modell-Platte.

(i) Ein Alternative dazu wäre die Verwendung einer stärkeren Modell-Platte und einer Bohrung zur Aufnahme des Bogens etwas vom Eck nach innen gerückt oder der Befestigung des Bogens direkt am Eck mit (Heiß-)Kleber.

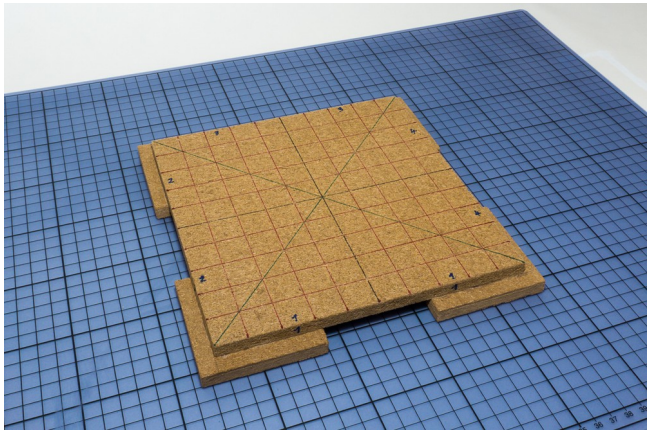

Abb. 229: Modell-Platte mit Eck-Sockel

1 Herstellungszeit: **Grundplatte:** 10 min; **Raster**: 15 min; **Bogen**: Vorlage: 10 min; Herstellung: 10 min; **Strumpf-Stoff**: 20 min; **Membran**: Aufspannen: 15 min; Abspannung: 5 min.

2 Schwierigkeitsgrad: Die Ausführung und im Besonderen die Herstellung eines gleichmäßig gekrümmten Bogens erfordert etwas Geschicklichkeit bzw. Routine im Umgang mit dem Material.

3 Landkartennadeln: 40 Stk. zur Befestigung des Stoffs.

Die dabei eventuell auftretenden Ungenauigkeiten bei der Platzierung des Bogens und des Anschluss der Membran am Modell-Rand spielen bei diesem Maßstab und zum Zweck der Entwicklung der Entwurfsidee keine Rolle.

- Die Modell-Platte wie in 3.3.1 Modell-Platte, S. 52 beschrieben vorbereiten.
- 4 Eck-Sockel zuschneiden (ca. 80 x 80 mm) und ca. 10 mm Überstand markieren (eine Linie 10 mm nach innen gerückt jeweils an 2 nebeneinanderliegenden Seiten).
- Die Eck-Sockel bis zur Überstands-Markierung mit Express-Holzleim bestreichen, glatt streichen und aneinander drücken
- Mit Klemmen oder alternativ mit Gewicht-Beschwerung fixieren und (je nach Herstellerangaben) ca. 1 h trocknen lassen.

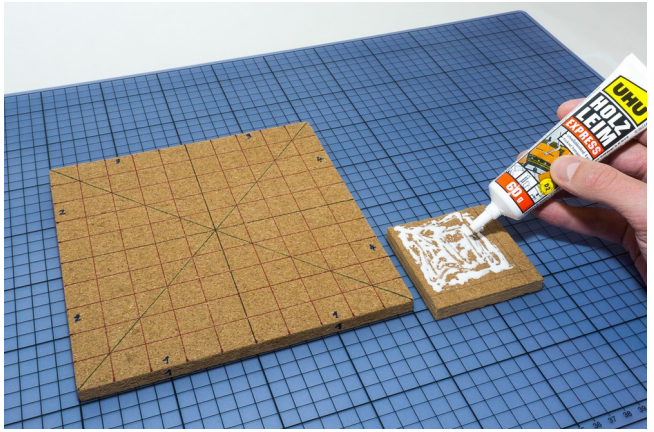

Abb. 230: Eck-Sockel mit Holzleim bestreichen

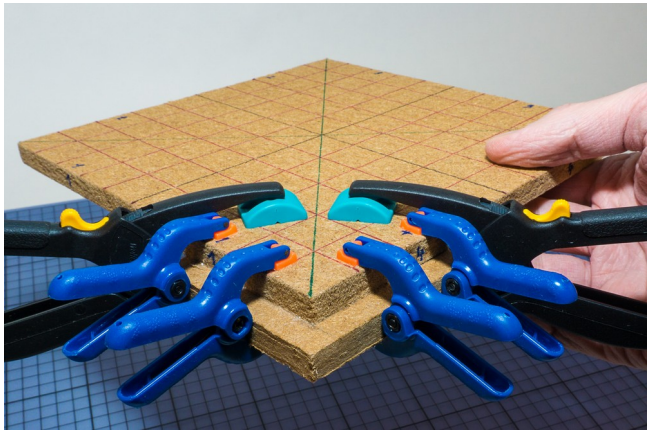
Abb. 231: Eck-Sockel mit Überstand fixieren

Vorbereitung: Bogen

Zur Herstellung des Bogens wird die Verwendung eines Draht-Kleiderbügels empfohlen, der die nötige Steifigkeit besitzt, um sich gleichmäßig biegen zu lassen und die Form auch unter Belastung zu behalten.

- Zunächst wird der Radius für den Bogen definiert - hier mit einer Stichhöhe von 95 mm (entspricht einen Radius von 150 mm) und eine Vorlage angefertigt (s. a. Nachtrag: Bogen - Vorlage, S. 113).
- Vom Draht-Kleiderbügel mit einer Zange ein 400 mm langes ungebogenes Stück abschneiden (360 mm Bogen + 2 x 20 mm für Befestigung in der Platte).

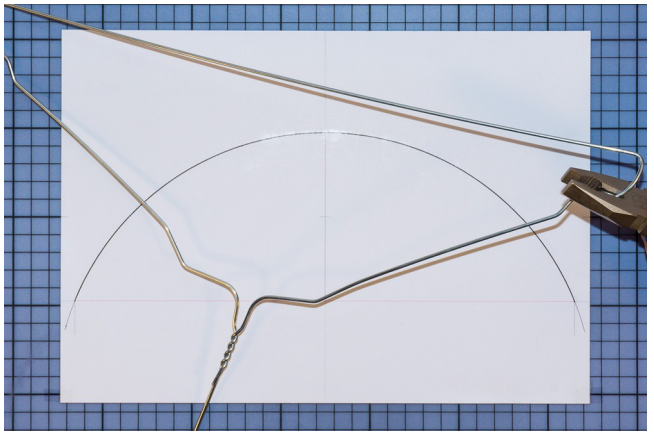
Abb. 232: Kleiderbügel zuschneiden

- Anhand der Vorlage den Draht schrittweise in die benötigte Krümmung biegen - dabei den Druck möglichst gleichmäßig über das gesamte zu biegende Stück verteilen. Empfohlen wird die Zuhilfenahme von Schablonen (etwas kleiner als der angestrebte Krümmungsradius).

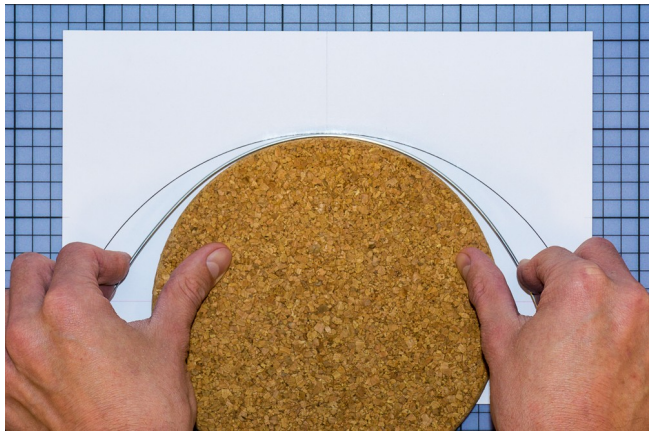

Abb. 233: Draht an Schablone biegen

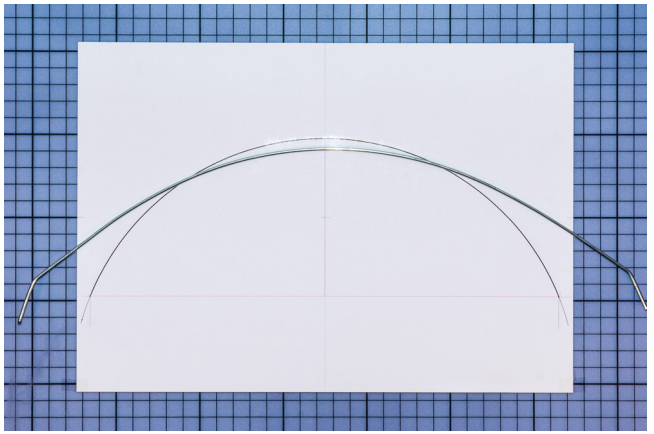

Abb. 234: Schrittweise Annäherung an Form

- Ungleichmäßige Krümmungen können vorsichtig an kleineren Schablonen korrigiert werden.

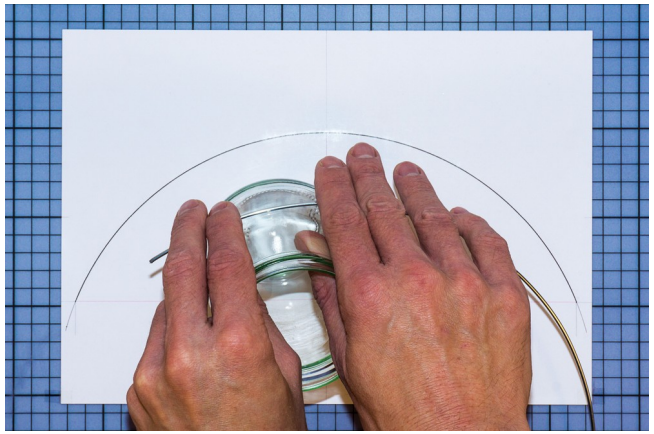

Abb. 235: Ungleichm. Krümmung ausgleichen

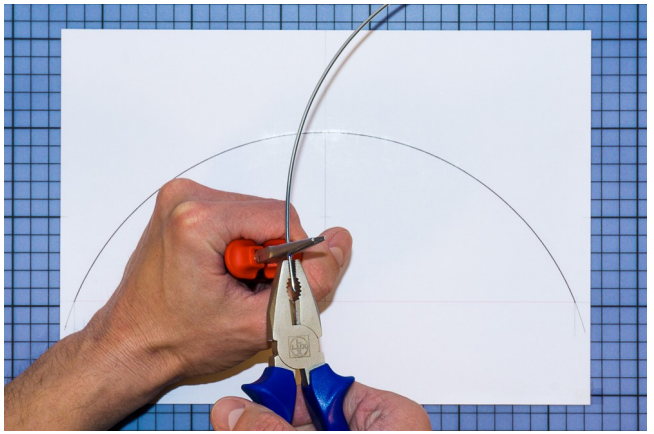

Abb. 236: Bogenfuß zurechtbiegen

- Den Bogenfuß mit 20 mm Überstand so zurechtbiegen, dass dieser senkrecht in die Modell-Platte geschoben werden kann (vertikale Striche in der Vorlage). Dazu mit einer Zange den Bogen direkt vor dem Bogenfuß fassen und mit einer andern Zange den Bogenfuß direkt über die Kante der ersten Zange biegen.

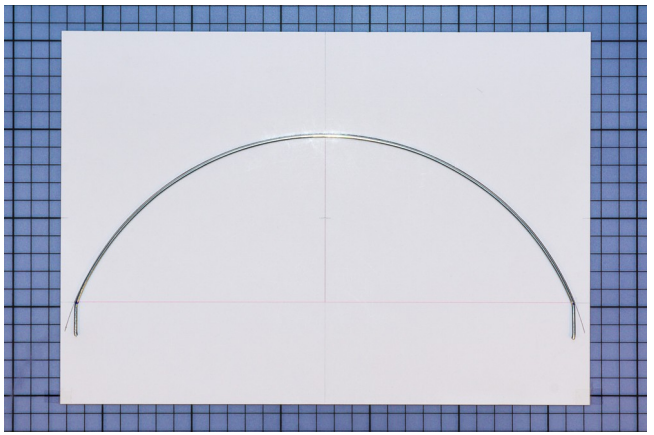

Abb. 237: Überprüfung der Form

Modell: Bogen

- Direkt im Eck mit dem (Hand-)Bohrer senkrecht in die Modell-Platte und den Eck-Sockel bohren, sodass der später darin befestigte Bogen mit der Außenkante der Modell-Platte bündig ist. Das Loch sollte etwas schmaler als der Querschnitt des Bogens sein, damit es etwas Widerstand gegen verrutschen bietet.

- Den Bogen in die vorbereiteten Löcher stecken und bei Bedarf ebenfalls Zahnstocher als Keil in die Löcher stecken zur Fixierung der Position.

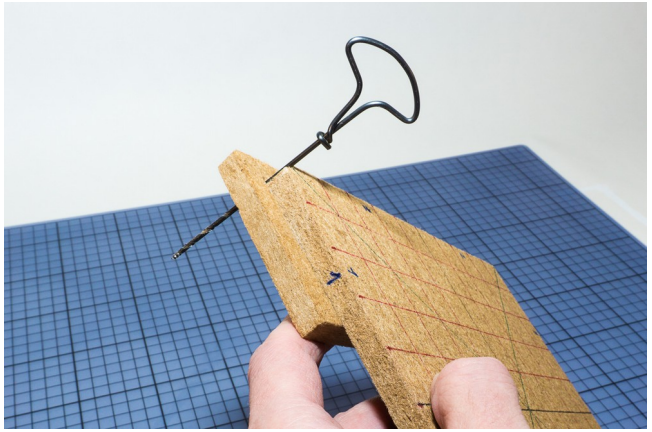

Abb. 238: Loch zur Befestigung des Bogens

- Mit einem rechten Winkel (Geodreieck) die senkrechte Ausrichtung des Bogens über der Diagonale sowie die Höhe des Bogens überprüfen.

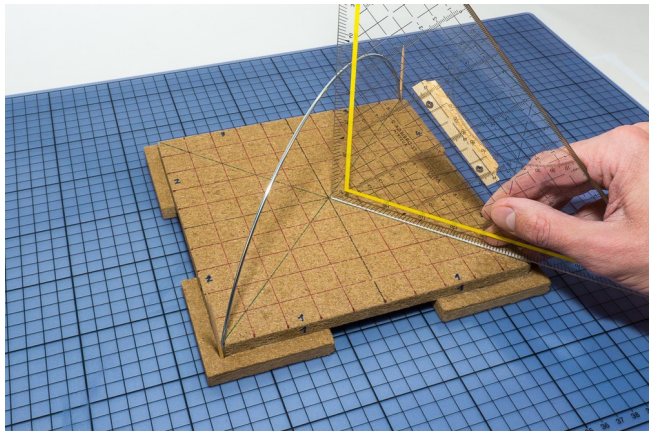

Abb. 239: Ausrichtung des Bogens über Achse

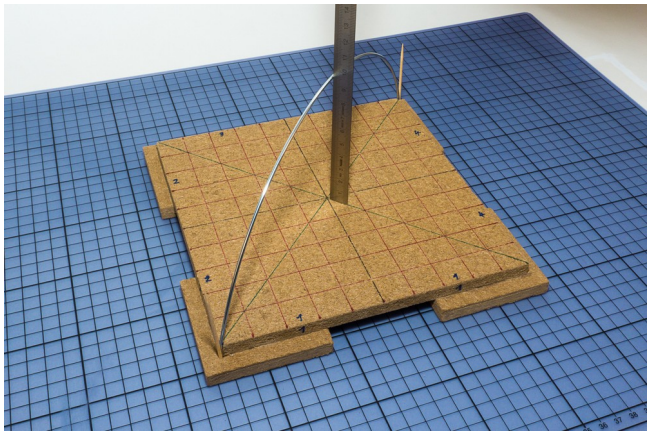

Abb. 240: Überprüfung der Bogen-Höhe

- Nach korrekter Positionierung den Bogenfuß mit Kleber fixieren und gegebenenfalls die Zahnstocher entfernen.

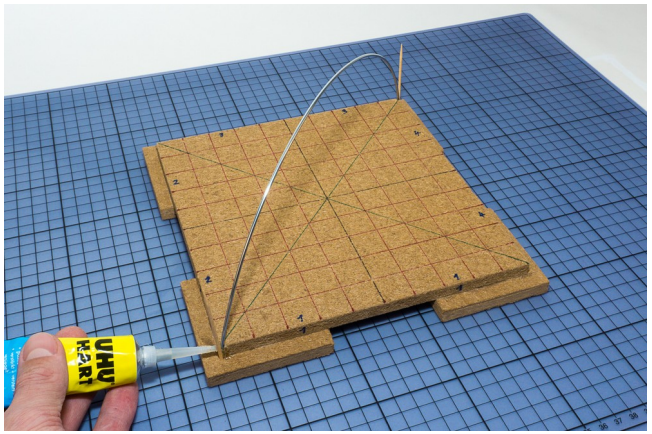

Abb. 241: Bogenfuß mit Kleber fixiert

Modell: Stoff-Bespannung

- Den Stoff wie in 3.3.3 Strumpf-Stoff, S. 55 beschrieben vorbereiten.

- Den Stoff analog zum Aufspannen auf die Spann-Platte (3.3.3 Strumpf-Stoff: Raster, S. 58) gleichmäßig und symmetrisch über die Konstruktion spannen. Dabei abwechselnd (längs und quer) von den Mittelachsen ausgehend die Landkartennadeln anbringen und in Richtung Ecken arbeiten.

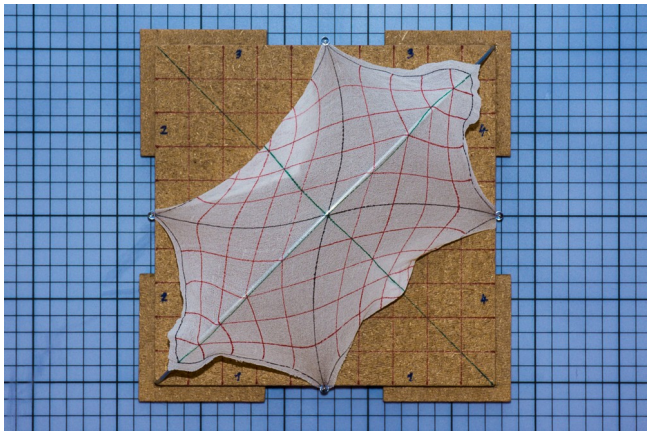

Abb. 242: Stoff-Bespannung: 1. mittig

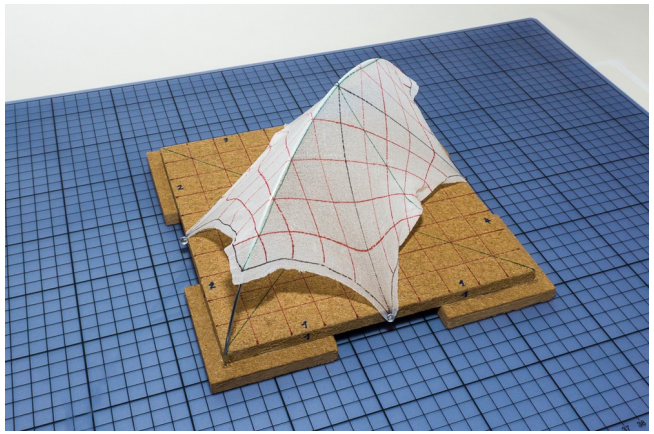

Abb. 243: Befestigung: ausgehend: mittig

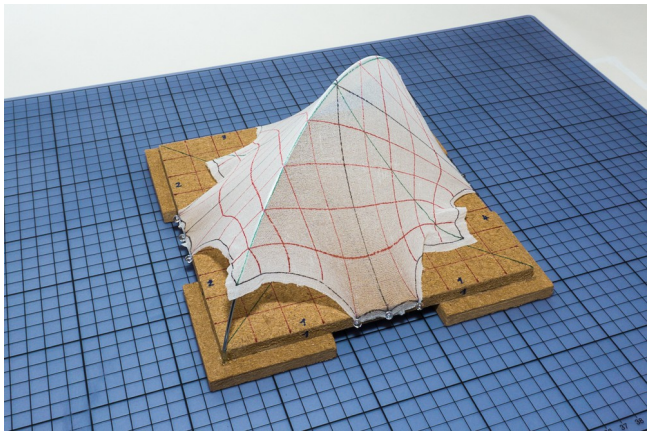

Abb. 244: Befestigung: schrittweise zu d. Ecken hin

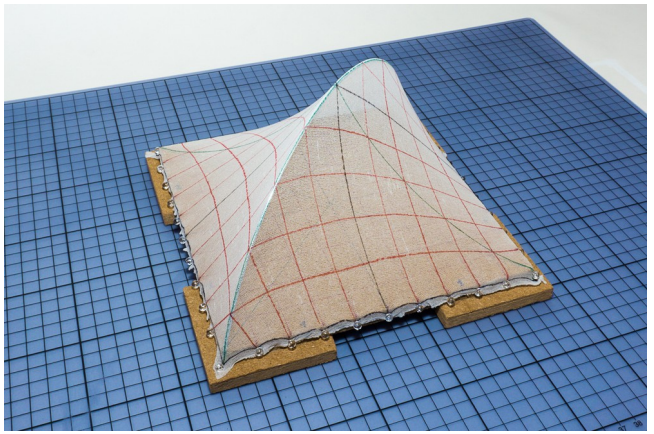

Abb. 245: Stoff-Bespannung: komplett

Modell: Form-Kontrolle

- Bei Bedarf kann die senkrechte Ausrichtung des Bogens mit einem (Kreuz-)Linienlaser einfach überprüft werden (sowie gleichzeitig die Mitte des Bogens zur Anbringung der Fixierungs-Abspannung ermittelt werden (s. a. 3.4.2 Nachtrag: (Kreuz-)Linienlaser, S. 79).

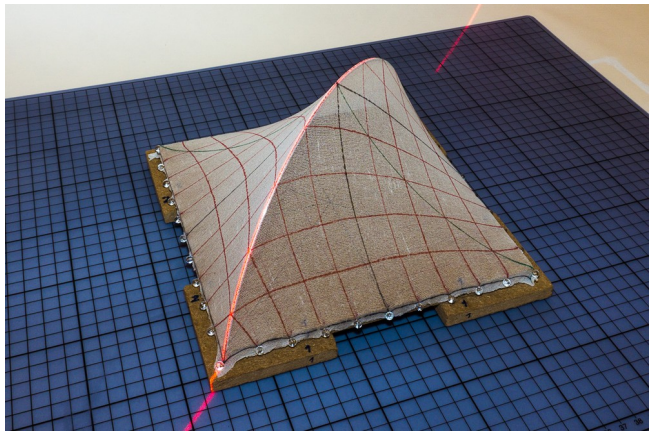

Abb. 246: Linienlaser: Bogenausrichtung

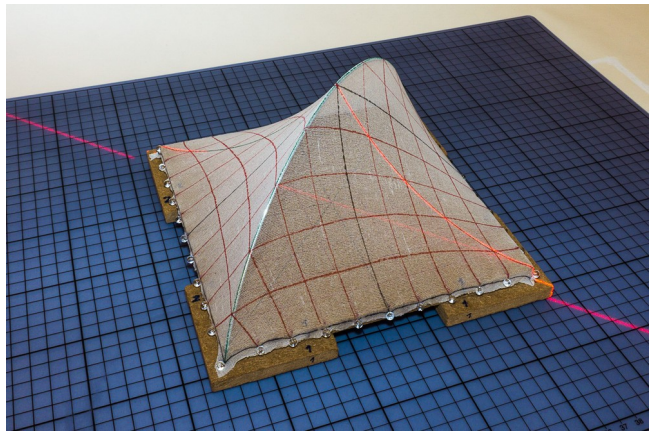

Abb. 247: Linienlaser: Bogenmittelpunkt

- Zuletzt kann die Lage des Bogens durch eine Abspannung von der Mitte des Bogens zu den Ecken fixiert werden.

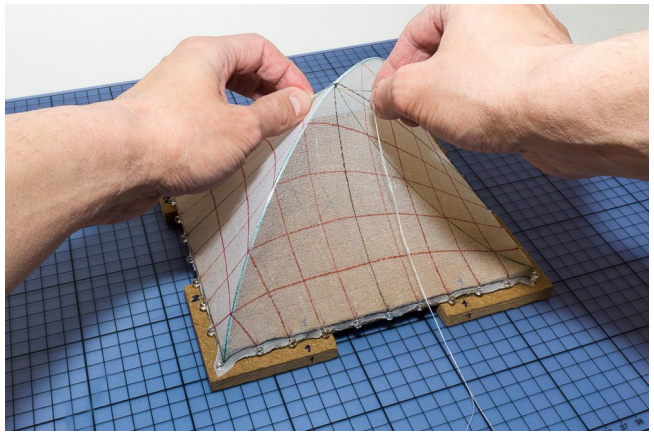

Abb. 248: Bogenfixierung: Seil (Bogenmitte)

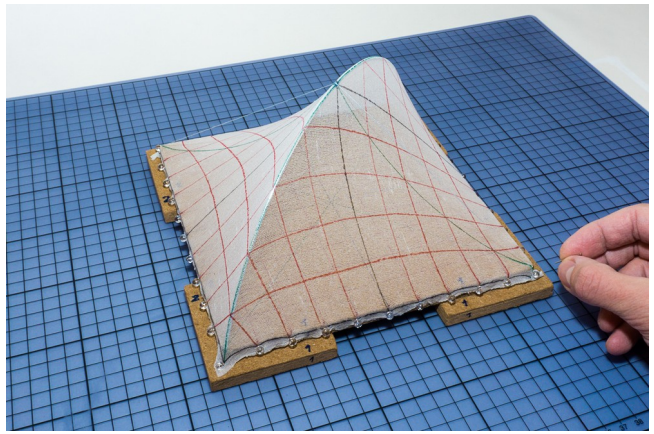

Abb. 249: Bogenfixierung: Seil (Basisverankerung)

Der Bogen kann samt des Stoffs mit einem weißen Nähfaden umwickelt werden. Dazu den Faden vorsichtig (da der gespannte Stoff leicht einreißt) mit einer Nähnadel direkt unter dem Bogen durch den Stoff ziehen und an der Oberseite des Bogens verknoten (Abb. 248) und bei Bedarf mit einem Tropfen Sekundenkleber den Knoten fixieren. Den Faden zum Eck spannen und an einer dort angebrachten Stecknadel verknoten (eine Stecknadel ist durch ihren flachen Kopf bei Abmessungen an der Membran-Fläche weniger störend als es eventuell eine Landkartennadel mit einem größeren Kopf wäre; Abb. 249).

Analyse: Hauptkrümmungen

Die Hauptkrümmungen werden zunächst anhand der frontal fotografierten Ansichten und der vom Modell abgenommenen Dimensionen (eventuell in Verbindung mit einem Foto der Aufsicht) festgehalten.

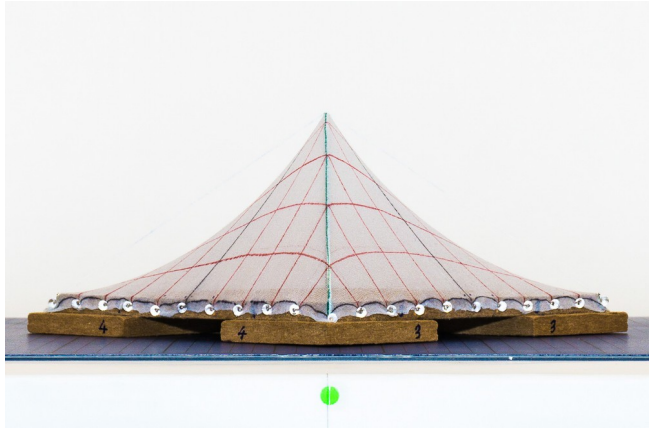

Abb. 250: Hauptkrümmung 1

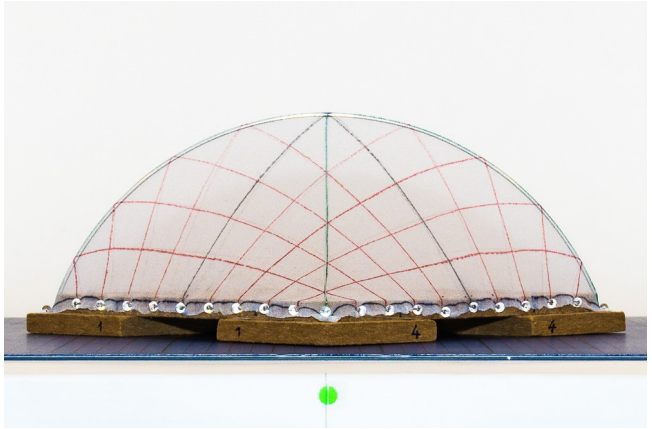

Abb. 251: Hauptkrümmung 2

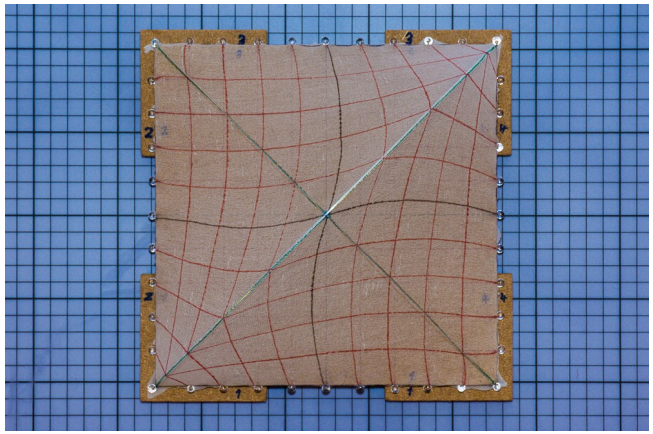

Abb. 252: Aufsicht

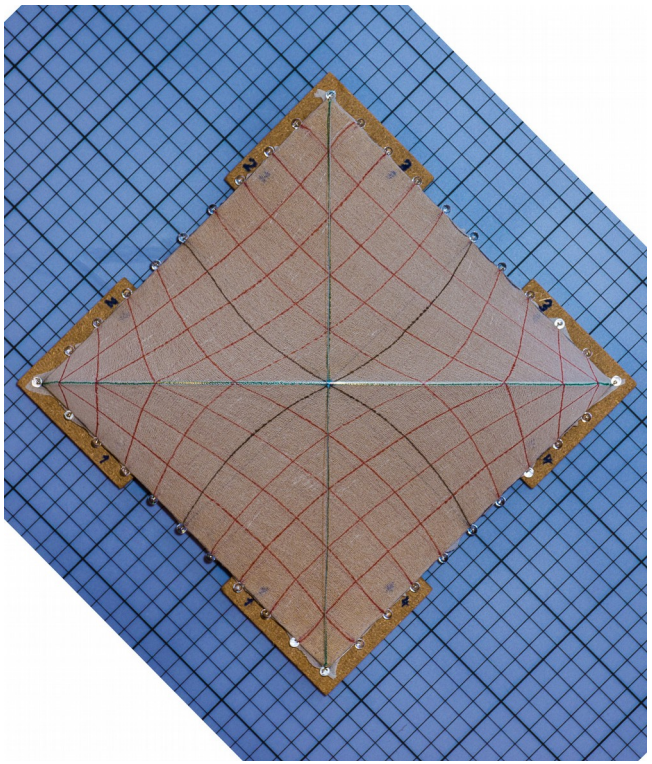

Abb. 253: Aufsicht (skaliert und ausgerichtet)

Anschließend werden in der digitalen Bearbeitung auf Basis der Fotos und Abmessungen die Hauptkrümmungslinien erstellt und in Bezug mit dem Grundriss dargestellt.

Für genauere Angaben dazu siehe:

- im Generellen: 4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell, S. 118;
- im Speziellen: 4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD, S. 123.

Die Analyse der Hauptkrümmungen zeigt einen minimalen Unterschied zwischen dem physischen Modell (rot Linien) und der digitalen Formfindung (Software: Formfinder; türkise Linien).
Der Unterschied ist aber so gering, dass er für den Vorentwurf keine Rolle spielt.

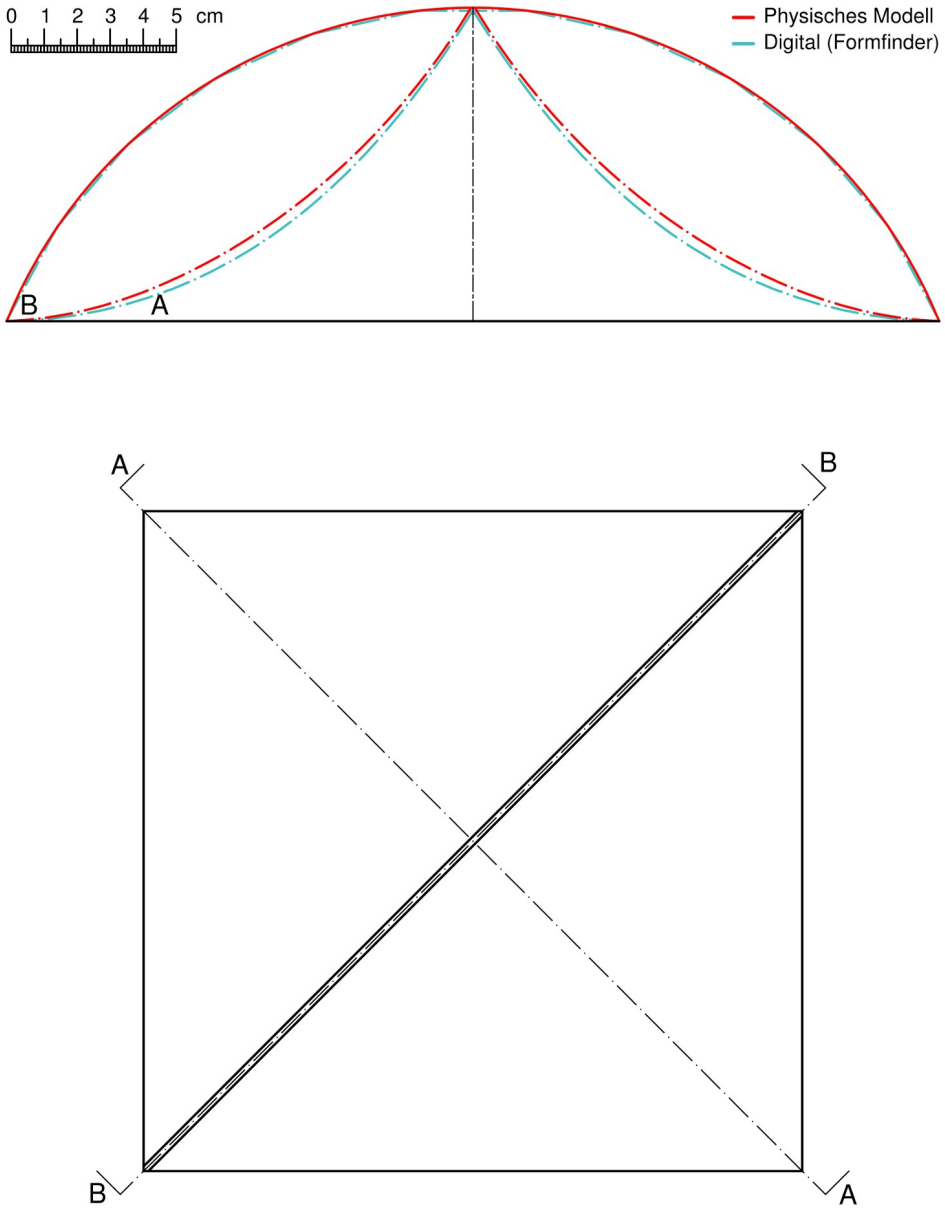

Abb. 254: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

Nachtrag: Bogen - Vorlage

Der Bogen wird meist nicht als Halbkreis, sondern als Bogensegment mit geringerer Stichhöhe ausgeführt. Falls ein Zirkel in entsprechender Größe nicht zur Verfügung steht, kann die Vorlage auch recht einfach am PC ausgedruckt werden.

(i) Als Ersatz für einen Zirkel kann auch eine Schur in entsprechender Länge mit Schlaufen oder Ringen an den Enden (und jeweils einem Spieß und einem Stift) verwendet werden.

- Zunächst wird die Länge des Bogens auf der Grundplatte (Kreissehne) bestimmt - für dieses Modell die Platten-Diagonale (s = 280 mm).

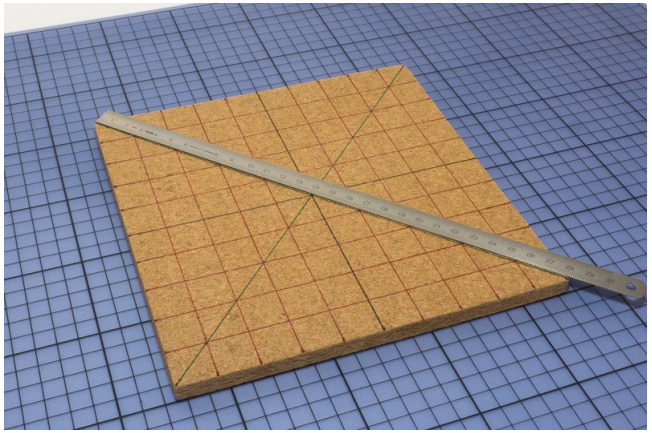

Abb. 255: Bogen-Dimensionen (Kreissehne)

- Nun wird die passende Stichhöhe des Bogens festgelegt (für dieses Modell h = 95 mm, (s. a. 3.2.2 Grundlegende Modell-Technik, S. 35: Modell-Größe und Form).
  Daraus kann mit der Formel $r = (4h^2 + s^2)/8h$ der Radius von 151 mm berechnet werden [wikipedia.org 2017a].

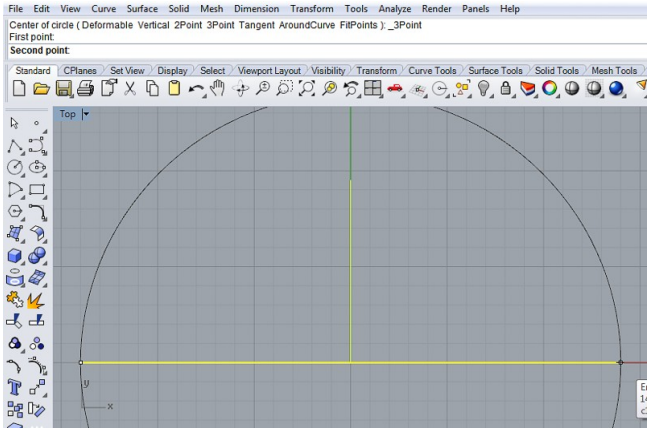

Abb. 256: 1. Halbkreis an der Kreissehne

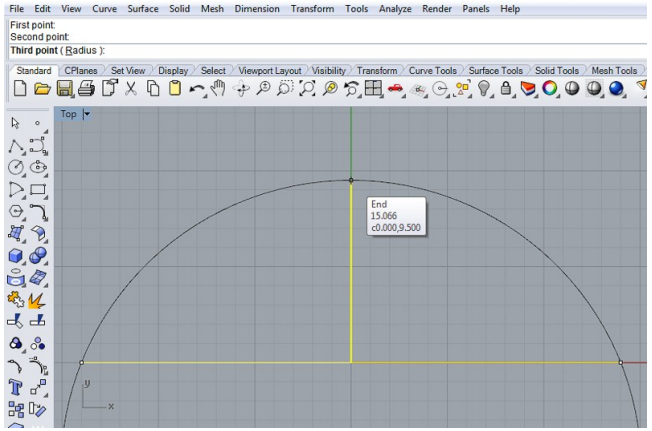

Abb. 257: 2. Kreis durch Stichhöhe angepasst

- Die Vorlage kann auch mit einem CAD-Programm erstellt werden: Dazu Kreissehne und Stichhöhe auftragen und über die 3 Endpunkte den entsprechenden Bogen definieren.
- Beim Ausdrucken darauf achten, das der Maßstab korrekt ist und der Drucker nicht skaliert (auf den druckbaren Bereich verkleinert).

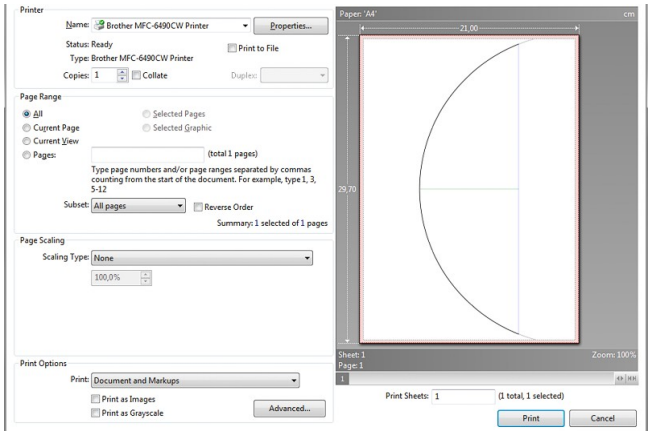

Abb. 258: 3. Ausdruck ohne Skalierung

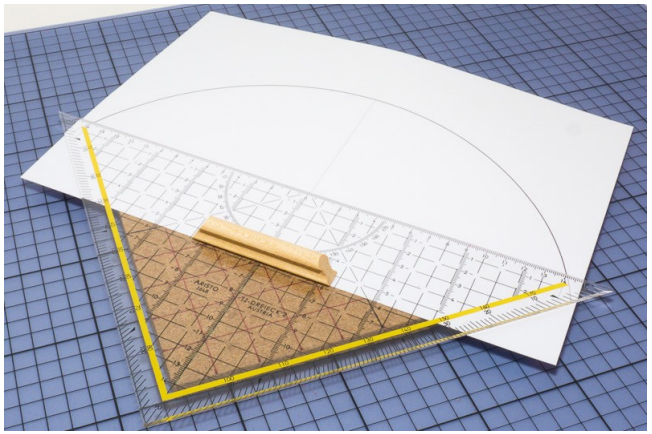

Abb. 259: Fertige Vorlage

Nachtrag: Bogen - Material

Handelsüblicher Draht stellt nur bedingt eine Alternative zum Draht-Kleiderbügel für die Herstellung des Bogens dar. Ist dieser auf einer großen Rolle aufgewickelt, hat er zwar eine günstige anfängliche Krümmung. Allerdings ist dieser Draht meist recht weich, was dazu führt, dass sich ein gleichmäßiges Biegen nur schwer kontrollieren lässt und der Draht auch leicht unabsichtlich „verbogen“ werden kann - was eventuell zu Problemen bei der weiteren Bearbeitung führt (Verformungen beim Bespannen mit dem Stoff oder anderen Manipulationen am Modell).

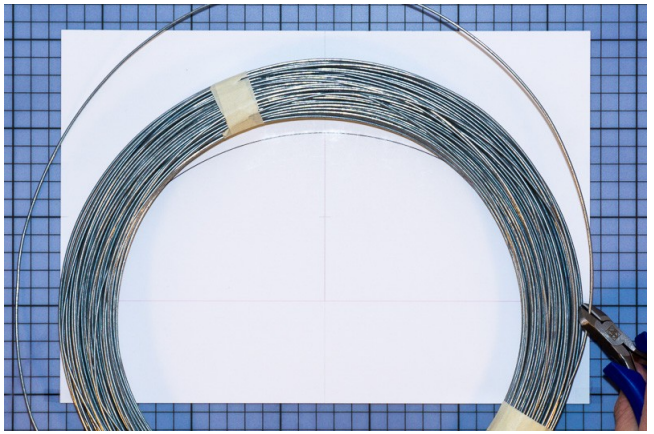

Abb. 260: Relativ steifer Draht von der Rolle

- Generell ist es vorteilhaft, den Draht unter möglichst gleichmäßiger Druckverteilung zu biegen, um einen gleichmäßigen Krümmungsverlauf zu erhalten.

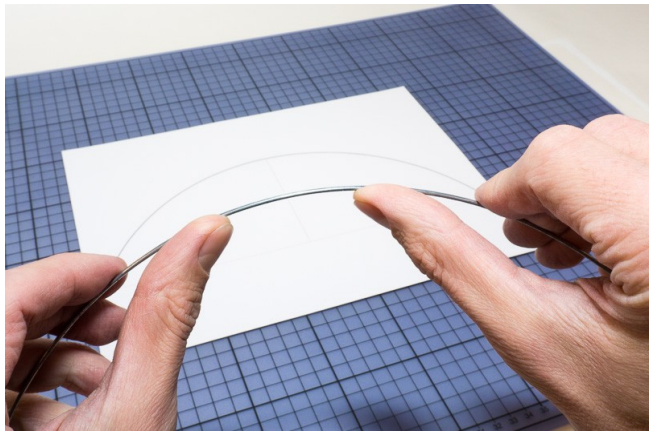

Abb. 261: Biegen unter gleichmäßigem Druck

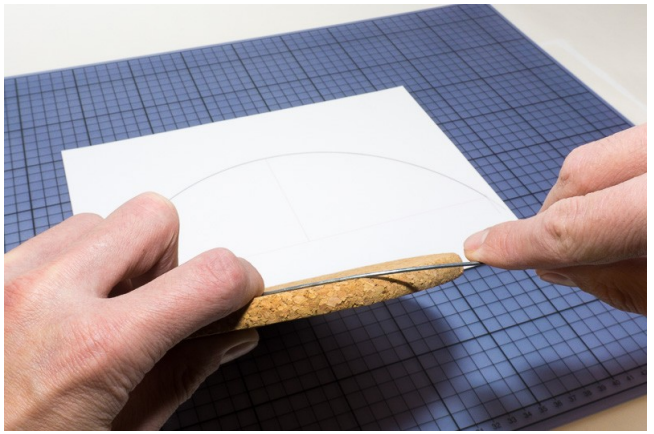

Abb. 262: Korrektur der Krümmung an einer Kante

- Änderungen im Krümmungsverlauf können präzise durchgeführt werden (ohne dass sich dabei durch den angewendeten Druck andere Stellen verbiegen), indem die zu ändernde Stelle an der Kante einer Unterlage platziert wird, das Stück auf der Unterlage gleich daneben flächig fixiert und das freie Ende gleich neben der Kante in die ausgleichende Richtung gedrückt wird.

3.4.8 Typ 8: Seilrand am Beispiel Mast mit Ring

Aufwand[1]: **ca. 50 min** Komplexität[2]: **niedrig** Kosten: ca. **€ 1 - 5**

Erstellung der Grundform s. 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring, S. 72

Material / Werkzeug (s. a. 3.2.3 Material und Werkzeug, S. 39)

- Geodreieck, Lineal
- Modellmesser, Schere
- Stift
- Sekundenkleber
- Landkartennadeln (10 Stk.)
- optional: Schneidematte, Rollschneider

Grundlegende Information: s. a. 3.2 Vorbereitung, S. 34

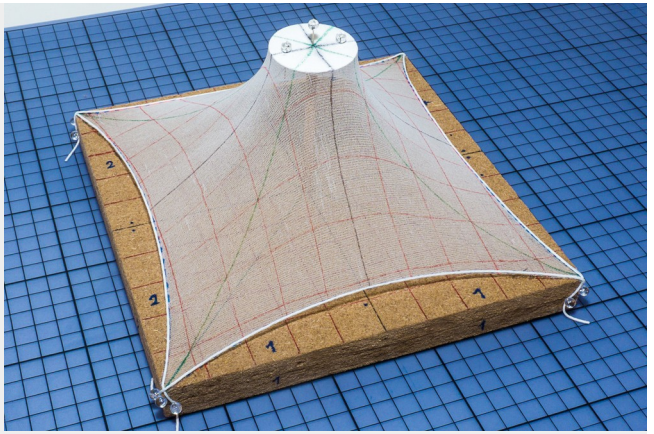

Abb. 263: Hochpunkt - Mast mit Ring m. Seilrand

Der Seilrand ist eine Alternative zu einem biegesteifen Rand (der konstruktiv aufwendig sein kann) und stellt eine gute Möglichkeit dar, die Kräfte aus der Fläche zu sammeln und abzuleiten.

Vorbereitung: Stichhöhe

Die Krümmung des Seilrands wird mit der Stichhöhe (zwischen 1:8 bis 1:12) angegeben und als Kreisbogen ausgeführt.

- Der Stich wird aufgezeichnet oder wie dargestellt am PC als Vorlage erstellt und ausgedruckt.

- Nach dem Ausschneiden der Krümmung an der Vorlage kann diese an das Modell geheftet und die Krümmungslinie angezeichnet werden.

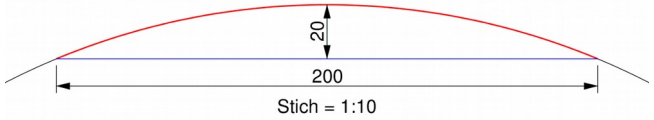

Abb. 264: Ausdruck mit maßstäblichem Stich

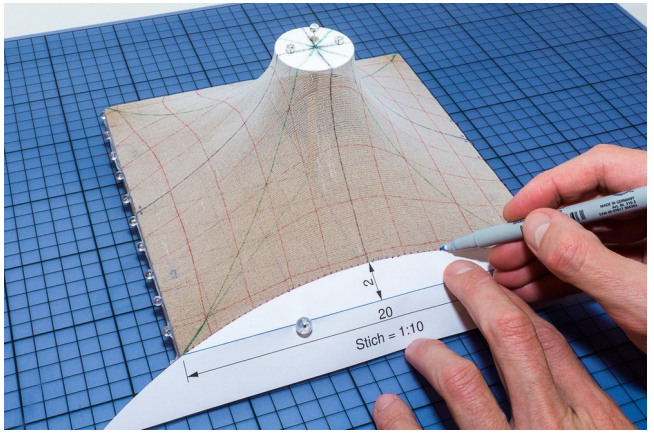

Abb. 265: Anzeichnen des Stichs

1 Herstellungszeit: **Schablone**: 10 min; **Anzeichnen**: 5 min; **Ankleben**: 20 min; **Ausschneiden**: 15 min

2 Schwierigkeitsgrad: Es bedarf keiner besonderen Vorkenntnisse, um die Schritte (präzise) ausführen zu können.

Seilrand: Einbau

Die Landkartennadel sind wichtig zur Fixierung der Schnur, damit diese beim Trocknen leichter in Position gehalten und dabei auch leicht gespannt werden kann. Dafür muss die Schur an einem Ende mit einer Landkartennadel auf der Modell-Platte fixiert und bei fortschreitendem Andrücken am anderen Ende leicht gezogen werden.

(i) Um zu verhindern, dass der Stoff sich zu sehr mit der Modell-Platte verklebt, kann es in den Ecken hilfreich sein, den Kleber dünn aber durchgängig auf die Schur aufzutragen, und dann leicht an den Stoff zu drücken.

(i) Beim Ausschneiden mit dem Modellmesser mit der Pinzette gegenhalten, um eine Reißen des Stoffs zu verhindern.

(i) Eine Alternative zum Seilrand ist die Versteifung (und eventuelle Fixierung eines eingenähten Fadens) mittels Flüssigkleber [Gaß 1990: S. 6–4, 3].

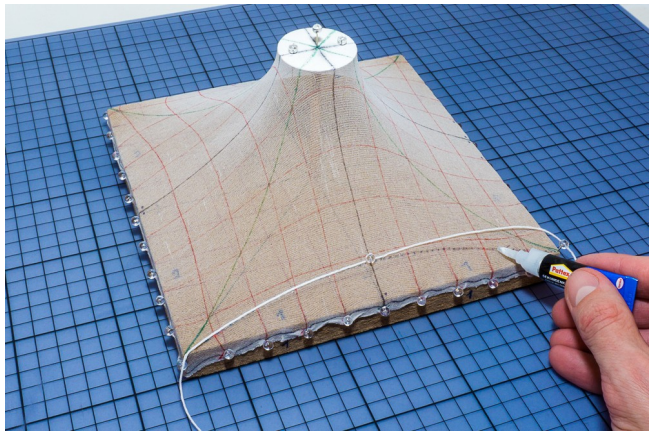

Abb. 266: Dünn aufgetragener Sekundenkleber

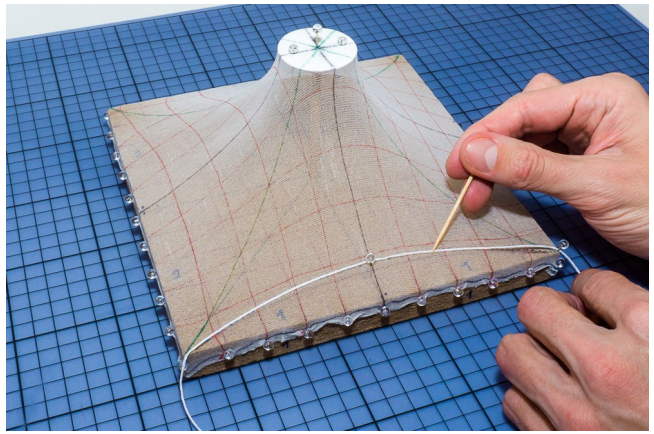

Abb. 267: Andrücken unter leichter Spannung

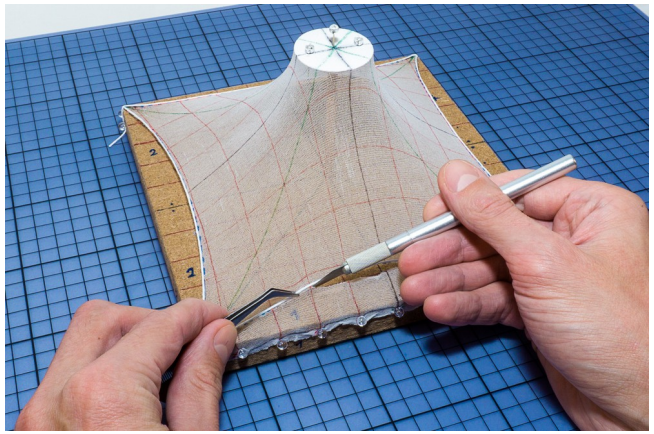

Abb. 268: Ausschneiden mit Gegendruck

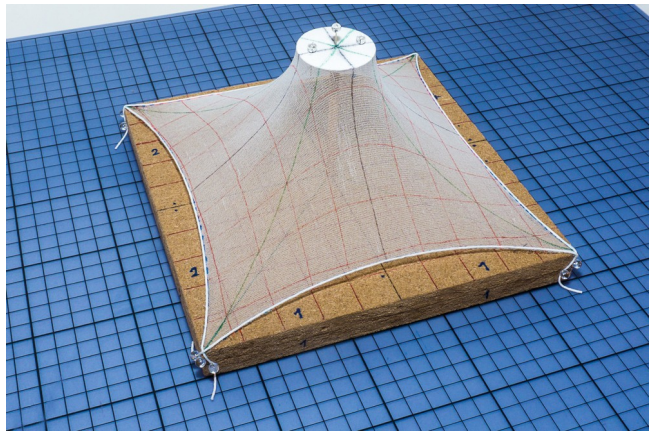

Abb. 269: Fertiges Modell mit 4 Seilrändern

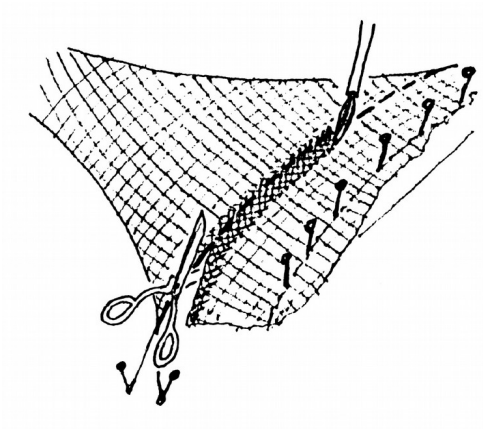

Abb. 270: Eingenähter Fade / Flüssigkleber

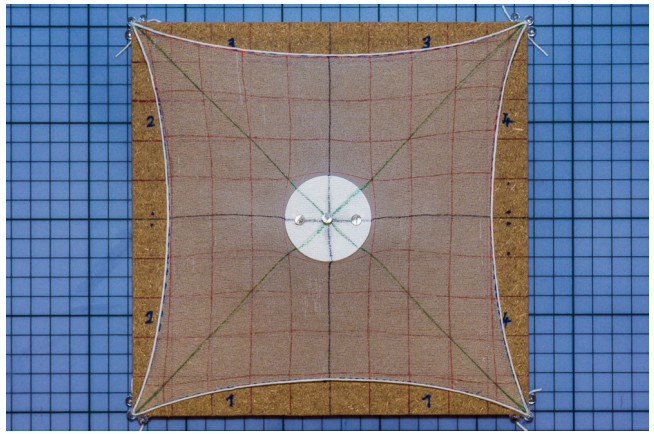

Abb. 271: Aufsicht

Analyse: Hauptkrümmungen

Die Analyse der Hauptkrümmungen bezüglich des Seilrands zeigt einen minimalen Unterschied zwischen dem physischen Modell (rot Linien) und der digitalen Formfindung (Software: Formfinder; türkise Linien) im Vergleich zu dem relativ großen Unterschied in den Grundformen (s. a. 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring, S. 72).

Für genauere Angaben zur Erstellung der Hauptkrümmungen siehe:
4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell, S. 118,
4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD, S. 123.

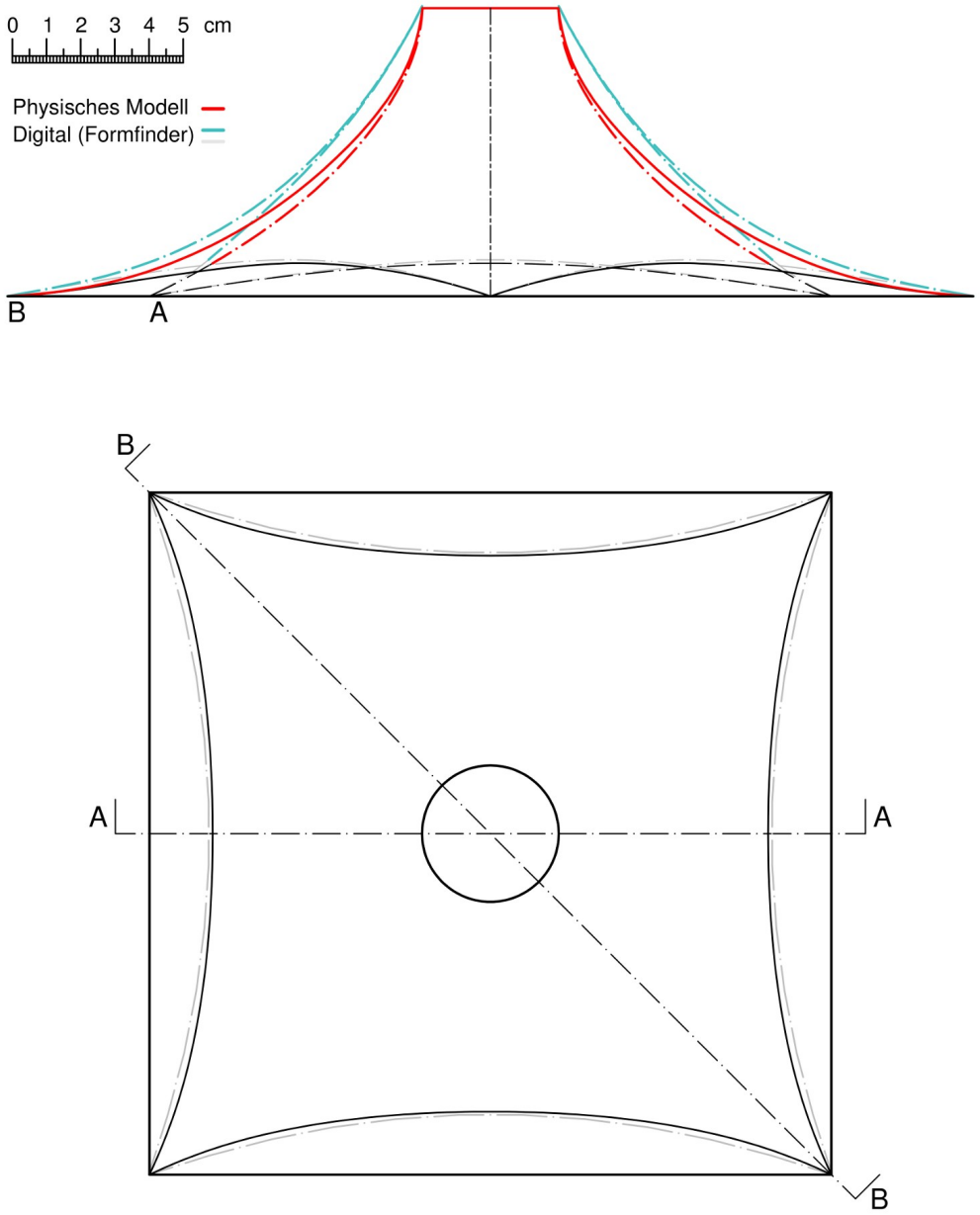

Abb. 272: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

4 Integration physischer und digitaler Methoden

4.1 Analysemöglichkeiten am physischen Modell

Zur Analyse der Form (Geometrie, Proportion, Krümmung etc.) gibt es viele Möglichkeiten, die zur Überprüfung und planerische Weiterentwicklung der Entwurfsidee eine wichtige Rolle spielen. Da die meisten dieser Aufgaben gut und effizient in entsprechenden Programmen am Computer durchgeführt werden können, ist die Digitalisierung der Form ein wichtiger Schritt zur Weiterentwicklung des Entwurfs.
Allerdings beginnt die grundlegende Einschätzung des Entwurfs schon viel früher, nämlich während des Erstellens des Modells selber. Einer der großen Vorzüge des physischen Modells liegt darin, dass durch die Auseinandersetzung mit der Materialität des Modells ein Verständnis für das Zusammenwirken von Kraft, Form und Material geradezu entwickelt werden muss, um das Modell erfolgreich bauen zu können.
Das bedeutet, dass die grundlegenden Erkenntnisse über die Form und das Verhalten des Tragwerks während des Modellbaus den ersten und wichtigsten Schritt zur Einschätzung der Entwurfsidee darstellt. Oft liegt der Wert in diesem Prozess nicht darin, dass die Erstellung des Modells möglichst problemlos verlaufen ist, sondern in den Erkenntnissen, die sich durch Probleme oder ungünstige Eigenschaften der Form zeigen, wie z. B. einer ungleichmäßigen Form durch unterschiedliche Dehnungsverhältnisse im Stoff oder eine Durchbiegung der Grundplatte durch die Spannung der Membran und der dabei oft unterschätzten Kräfte, etc.
Diese Art der Erkenntnisse ermöglicht die intuitive Entwicklung der Entwurfsidee, die durch den Prototyp physisches Modell immer auch zugleich auf ihre Realisierbarkeit überprüft werden kann: ist eine funktionstüchtige Form am Modell realisierbar, muss sie auch am Bauwerk umsetzbar sein.

Nach dem ersten Test der Entwurfsidee am physischen Modell können vertiefende Erkenntnisse aus der Analyse der digitalisierten Form gewonnen werden, die die Grundlage zur planerischen Weiterentwicklung des Entwurfs bilden.
S. a. 2.2 Entwurfsprozess, S. 29.

In einem nächsten Schritt kann die am physischen Modell gefundene Form mit einem computergenerierten Modell verglichen werden. Oft kommt es dabei durch die Idealisierung des Algorithmus bzw. die Vereinfachung der Einflussfaktoren sowie durch die im Vergleich dazu komplexeren Eigenschaften am physischen Modell (unterschiedliches Dehnungsverhalten des Stoffs in den beiden Webrichtungen etc.) zu leicht unterschiedlichen Formen und Krümmungen. Diese Unterschiede können auf Bereiche aufmerksam machen, die in der Weiterentwicklung des Entwurfs besonderer Aufmerksamkeit bedürfen.
Außerdem ermöglicht das Abfragen numerischer Eigenschaften in der Computer-Simulation die Einschätzung des Verhaltens des Tragsystems sowie der quantifizierbaren Auswirkungen von Änderungen in der Form, z. B. auf die Spannung in der Membran-Fläche oder die Kräfte in den Randseilen etc.

Diese Informationen sind beim Einstieg in diesen Themenbereich etwas abstrakt und schwer in die Zusammenhänge des Tragwerkverhaltens einzuordnen. In Kombination mit dem am physischen Modell erworbenen intuitiven Erkenntnissen zum Tragwerk kann dieses Einschätzungsvermögen am digitalen Modell konkretisiert und verfeinert werden.

Im Zuge der Analyse und Weiterentwicklung des Entwurfs (am Computer) können nötige Optimierungen eine Anpassung des Tragsystems bewirken oder sich alternative Lösungsansätze in Teilbereichen des Entwurfs ergeben, die wiederum auf das physische Modell übertragen und der realitätsnahen Überprüfung unterzogen werden können.

Möglichkeiten der Digitalisierung:

- 4.2 Formerfassung mittels Hauptkrümmungen, S. 120
- 4.3 Formerfassung mittels Photogrammetrie, S. 133

Möglichkeiten der digitalen Formfindung bzw. Rückführung zur physischen Form:

- 4.4 Digitales Modell mittels Computer-Simulation, S. 137
- 4.5 Erstellung eines Zuschnitts der Membran-Fläche, S. 145

4.2 Formerfassung mittels Hauptkrümmungen

Die Hauptkrümmungen einer Membran-Fläche werden durch eine Auswahl relevanter Schnitte definiert, die eine möglichst exakte Rekonstruktion der Fläche ermöglichen.
Bei Rotationskörpern, wie z. B. Membrankonstruktionen mit einem zentralen Mast auf rundem Grundriss, wird die Fläche durch 1 Schnitt durch die Rotationsachse (Mast) ausreichend definiert, um sie digital nachbauen zu können.
Bei dem gleichen Tragsystem auf einem quadratischen Grundriss sind allerdings 2 Schnitte für eine Rekonstruktion nötig - und zwar der Schnitt mit jeweils der kürzesten und der längsten Projizierenden auf der Grundplatte. Dies entspricht auch den Schnitten mit der geringsten bzw. der stärksten Krümmung (s. a. 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring: Analyse: Hauptkrümmungen, Abb. 143, S. 78).
Oft verlaufen diese Schnitte auch entlang der Spiegelachsen.

Grundsätzlich gilt, dass jeder frei spannende Bereich einer Membran-Fläche rekonstruiert werden kann (mit ausreichender Genauigkeit für die planerische Weiterentwicklung des Entwurfs), wenn die 4 eingrenzenden Kurven der Fläche bekannt sind.

Daher ist es nötig, die definierten Hauptkrümmungslinien mit dem Grundriss in Verbindung zu bringen, um deren Lage am Modell und somit die gesamte Fläche rekonstruieren zu können.

Bei manchen Modellen kann eine Projektion der Hauptkrümmungen nicht möglich sein - z. B. durch verdeckende Seitenteile etc. Hier kann auf das Vermessen der Krümmung (anhand einer Auswahl relevanter Punkte) zurückgegriffen werden oder durch Scannen ein 3D-Modell der Form erstellt werden.

S. a. 4.2.6 Umgang mit komplexen Formen, S. 131.

4.2.1 Parallellichtmethode

Bei der Parallellichtmethode wird die Kontur der Hauptkrümmung auf eine zur Schnittebene parallele und zur Projektionsachse normale Mattscheibe projiziert, von der die Kontur abgenommen werden kann [Gaß 1990: S. 0.18].
Um Parallellicht kontrolliert herstellen zu können, ist Spezialgerät nötig. Abb. 273 und Abb. 274 zeigen die Anordnung einer optischen Bank, mit deren Hilfe exakte und verzerrungsfreie Konturlinien auf der Mattscheibe hergestellt werden können [Gaß 1990: S. 3.4].
Alternativ kann aber auch Sonnenstrahlung verwendet werden, z. B. mit einer Vorrichtung, um Modell und Projektionsebene zum Lichteinfall auszurichten oder über Spiegel zu lenken.

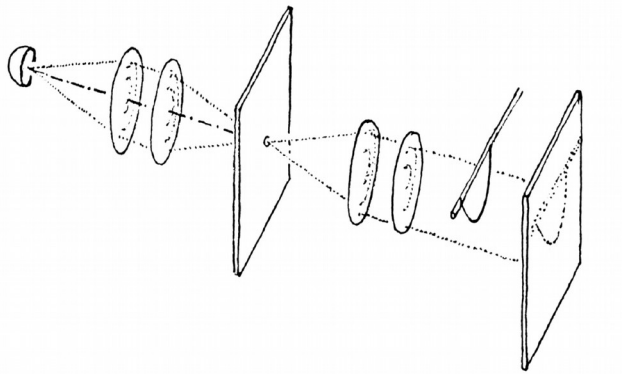

Abb. 273: Optische Bank für Parallellicht

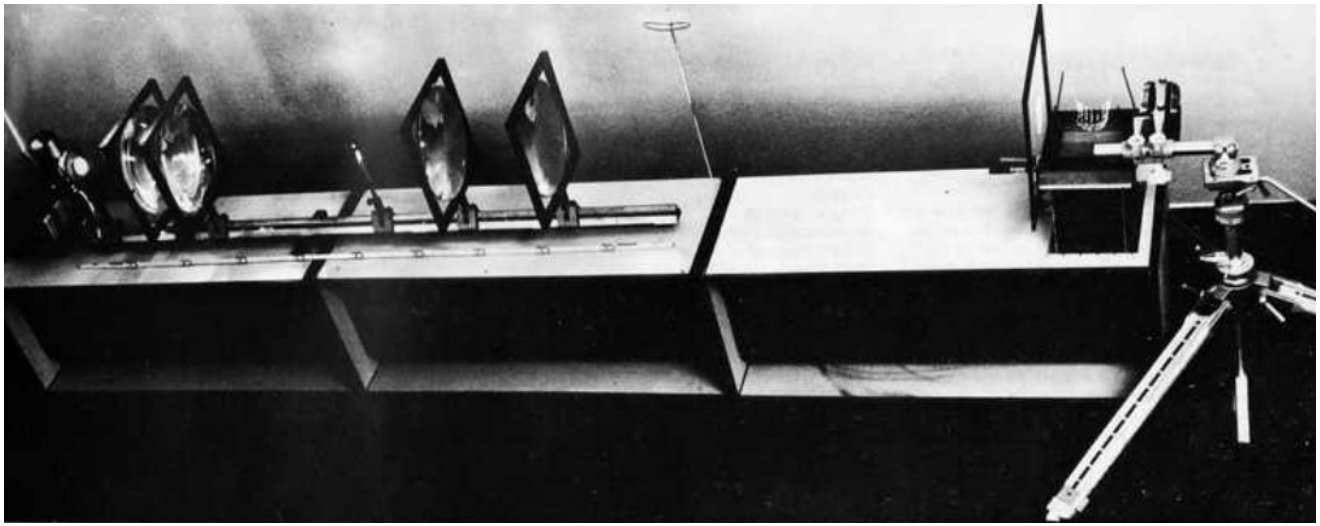

Abb. 274: Umsetzung einer optischen Bank mit Parallellicht für verzerrungsfreie Konturen

4.2.2 Zentralprojektion

In einer abgewandelten Form der in 4.2.1 Parallellichtmethode, S. 121 beschriebenen Methode kommt hier durch die Verwendung einer punktförmigen Lichtquelle die Zentralprojektion zur Anwendung. Durch die Anordnung einer punktförmigen Lichtquelle und dem Modell nachgelagerten Mattscheibe wird die Kontur des Modells auf der Mattscheibe vergrößert dargestellt. Durch einen Abgleich mit den realen Maßen am Modell kann die Vergrößerung wieder zurückskaliert werden.

Nach dem Festhalten der auf der Mattscheibe abgebildeten Kontur kann diese Krümmungslinie durch Ablesen einzelner Koordinaten digitalisiert werden. Alternativ kann die Krümmungslinie auch abfotografiert und wie im folgenden Kapitel digitalisiert werden.

- Abb. 275 zeigt die Anordnung von Kamera und Beleuchtung in einem abgedunkelten Raum, die sich besonders für die Abbildung von Seifenhautmodellen eignet, aber genauso gut zur Erfassung der Kontur geeignet ist. Allerdings empfiehlt sich beim Stoff-Modell, auf die Abdunkelung zu verzichten und das Modell zusätzlich auch direkt zu beleuchten.

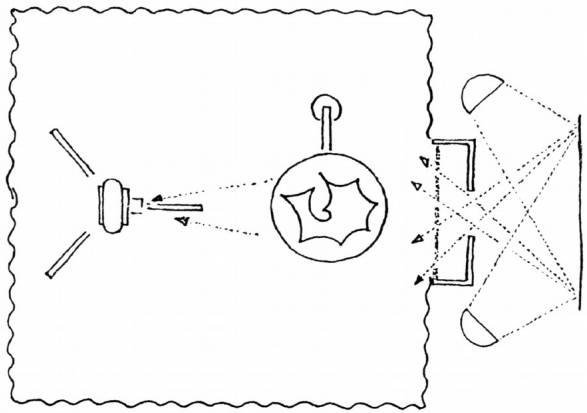

Abb. 275: Anordnung von Kamera / Beleuchtung

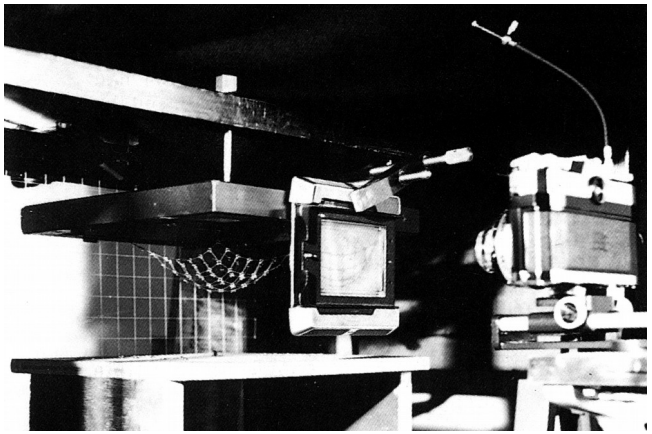

Abb. 276: Optische Bank mit Mattscheibe

4.2.3 Digitalisierung mittels Fotografie / CAD

Die Formerfassung vom Foto basiert auf der in Kapitel 4.2.2 Zentralprojektion, S. 122 beschriebenen Methode, nur das hier der Zwischenschritt des Abzeichnens der Kontur auf der Mattscheibe abgekürzt wird und die Krümmungslinie direkt im CAD-Programm auf der Foto-Vorlage erstellt wird und zur weiteren planerischen Bearbeitung digital verwendet werden kann.

Anordnung: Modell - Kamera

Mittels Kreuzlinienlaser können Modell und Kamera einfach auf einer horizontalen Achse ausgerichtet werden. Wichtig ist dabei, dass das Kamera-Objektiv und Mittelpunkt des Models auf einer horizontalen Achse liegen. Dabei muss das Modell so positioniert werden, dass die gesuchte Krümmungslinie in einer parallelen Ebene zur Bildebene der Kamera liegt und der Mittelpunkt aus der maximalen horizontalen und vertikalen Ausdehnung der Krümmungslinie (entspricht der Kontur) gebildet wird.

(i) Eine Krümmungslinie am Modell kann in jeder Ebene abgebildet werden, die nicht in der Objektiv-Achse der Kamera liegt, allerdings muss dabei die optische Verkürzung im Vergleich zum realen Maß berücksichtigt und ausgeglichen werden.

Durch die Anordnung wie oben beschrieben parallel zur Bildebene ergibt sich aus der Zentralperspektive keine Verkürzung der Krümmungslinie [Ender 2012] so dass diese nur noch auf die maßstäbliche Größe skaliert werden muss.

- Zunächst wird der Kreuzlinienlaser auf einem Stativ frontal zur Modell-Mitte ausgerichtet (ca. in 3 m Entfernung, um noch genügend Platz zum Aufstellen der Kamera zu haben).

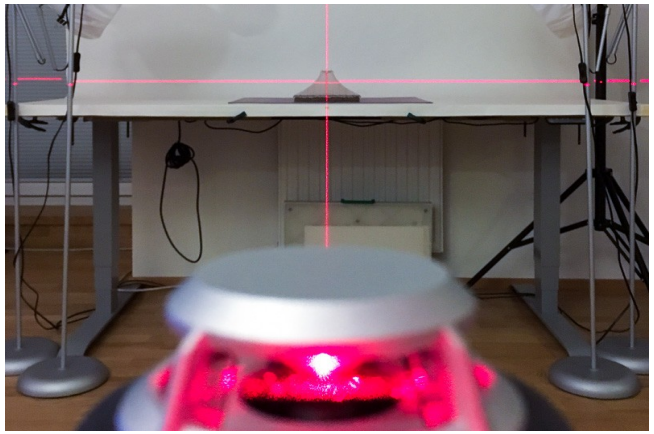

Abb. 277: Linienlaser: Ausrichten des Modells

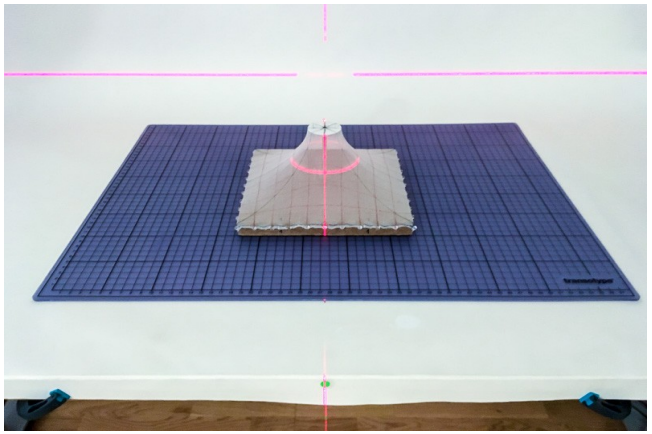

Abb. 278: Ausrichtung frontal mittig am Modell

- Nun wird die Kamera auf einem Stativ aufgestellt und die Objektiv-Mitte ebenfalls am Kreuzlinienlaser ausgerichtet.

  (i) Die Kamera sollte dabei in genügend großer Entfernung (hier knapp 2 m) zum Modell aufgestellt werden, um die Verzerrung gering zu halten.

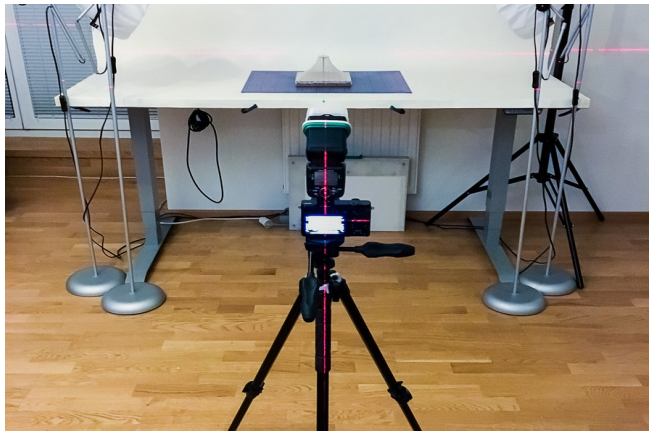

Abb. 279: Kamera (Objektiv) auf Fotoachse

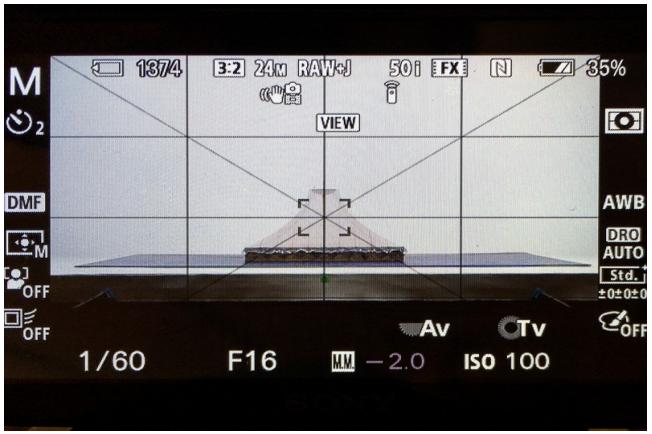

Abb. 280: Kamera auf Modell-Mitte ausgerichtet

  (i) Dabei sollte ein Zoom- oder Teleobjektiv verwendet werden, um das Modell ausreichend groß am Foto abbilden zu können.

- Ist die Kamera richtig positioniert, sollte die Bild-Mitte noch auf die Modell-Mitte ausgerichtet werden.

  (i) Zur Ausrichtung der Bild-Mitte ist es hilfreich - wenn verfügbar - Teilungslinien am Bildschirm anzeigen zu lassen.

Ableitung der Hauptkrümmungen vom Foto

Zur Bestimmung der Hauptkrümmungen werden die Fotos der jeweiligen Hauptkrümmung in ein CAD-Programm geladen und die Hauptkrümmungslinie darauf eingezeichnet.

(i) Voraussetzung dafür ist ein Foto, auf dem der Verlauf der Hauptkrümmungslinie gut sichtbar ist (und parallel zur Bildebene liegt).
Da am Foto die Dimensionen des Modells nicht abgelesen werden können, empfiehlt es sich, mit jedem Foto z. B. Anfangs- und End-Punkt der Krümmungslinie zu markieren und die Koordinaten sowie relevante Abmessungen des Grundrisses zu notieren.
Hilfreich sind auch am oder neben dem Modell platzierte Lineale, um die entsprechenden Dimensionen am Foto feststellen zu können.

Außerdem ermöglichen Markierungen wie z. B. Nummerierung der Seiten am Modell später eine exakte Zuordnung von Fotos und gemessenen Dimensionen.

(i) Sollte sich die Kontur mit zu wenig Kontrast vom Hintergrund abheben, wäre bei hellem Stoff die Verwendung eines dunklen Hintergrunds möglich.
Allerdings ermöglicht die Anwendung des Linienlasers eine exaktere Abbildung der Krümmungslinie (die durch die Perspektive teilweise verdeckt sein kann) - unabhängig vom Hintergrund: durch Verwendung von Stativ und einer längeren Belichtungszeit kann die auf das Modell projizierte Laserlinie noch deutlicher sichtbar gemacht werden (s. a. Umgang mit komplexen Formen, S. 131).

(i) Um Ungenauigkeiten durch Verzerrung (aufgrund der optischen Eigenschaften des Objektivs) zu vermeiden, können die Fotos mit speziellen Bildbearbeitungs-Programmen, wie z. B. Adobe Lightroom, entzerrt werden - für viele Objektive kann diese Anpassung automatisch durchgeführt werden.

- Das Foto wird als Vorlage in das CAD-Programm geladen. Hier wurde das Programm Rhino 5 verwendet. Der Befehl dazu lautet: *PictureFrame* [mcneel.com 2017b].

  S. a. 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring, S. 35.

- Zunächst werden bekannte Dimensionen auf dem Foto markiert, die in Folge als Referenz zur Skalierung des Bilds dienen sollen.
  Hier sind dies der Durchmesser des Rings sowie die Mittelachse der Modell-Platte und die Mitte der Mast-Achse (auf die die Kamera ausgerichtet war).

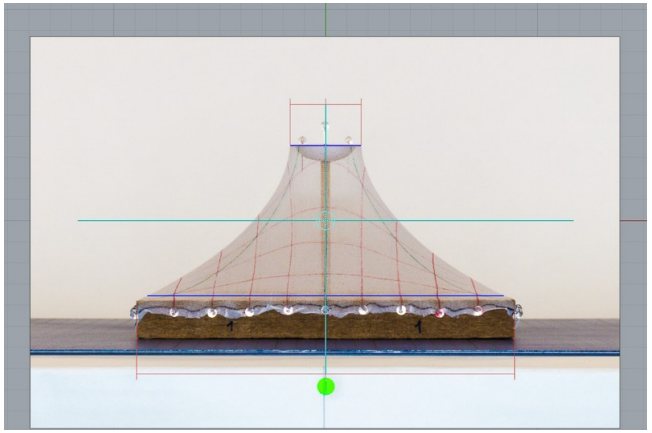

Abb. 281: Foto als Vorlage im CAD-Programm

- Die Mittelachse der Modell-Platte wird als größte und bestgeeignetste Dimension (grüne Linie) zur Skalierung ausgewählt.

  Die entsprechende Referenz-Strecke (orange Linie) wird in der abgemessenen Größe (200 mm) erstellt.

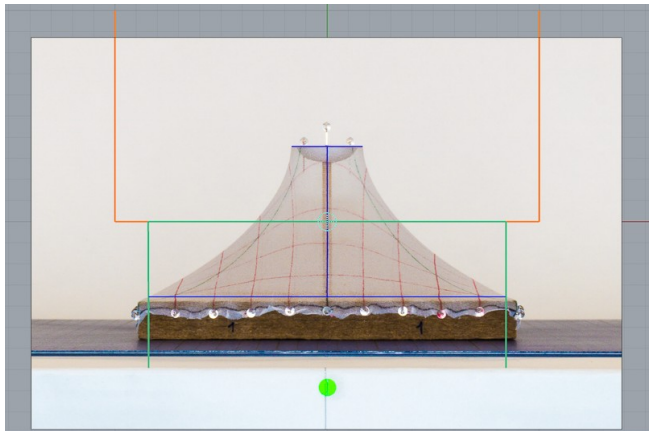

Abb. 282: Skalierung mittels Referenz-Strecke

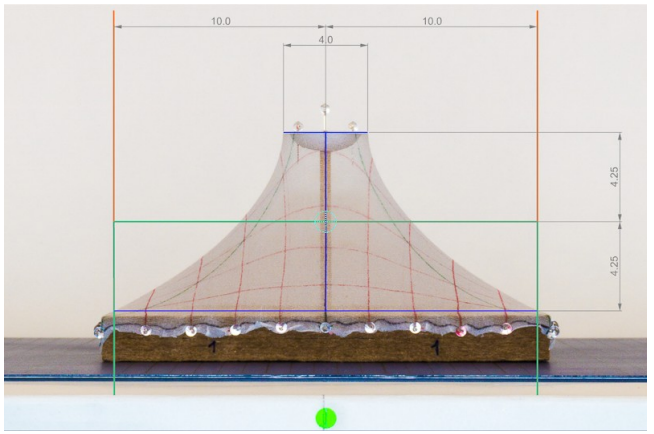

Abb. 283: Skaliertes Foto

- Zur Skalierung werden Foto und Markierungen ausgewählt (ohne die orange Ziel-Größe) und ausgehend vom Mittelpunkt wird nun die grüne Referenz-Strecke soweit skaliert, dass sie der orangen realen Größe im Modell-Maßstab entspricht (Abb. 273).

- Oft sind Markierungen am Modell - z. B. die Mittelachse der Modell-Platte - am Foto nicht gut erkennbar. In der Zentralperspektive (hier mit dem Fluchtpunkt in der Mitte der Mast-Achse, Abb. 284) können diese leicht rekonstruiert werden:
  Die Mittelachse liegt dabei im Schnittpunkt der Platten-Diagonalen, die über die Platten-Ecken konstruiert werden können.

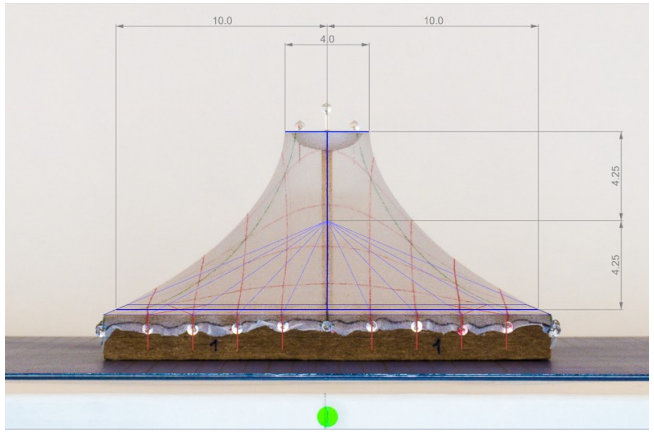

Abb. 284: Rekonstruktion mittels Fluchtlinien

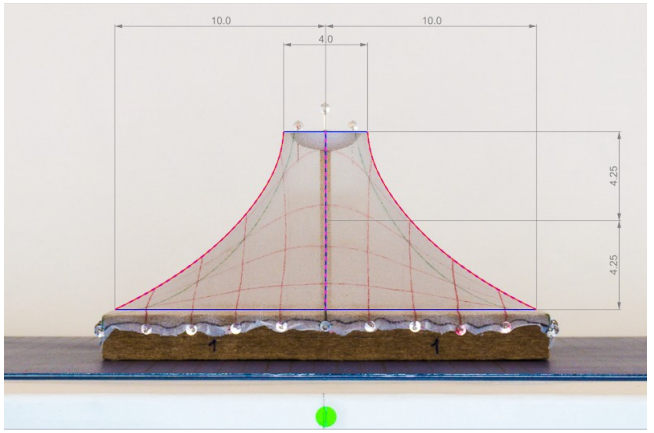

Abb. 285: Krümmungslinien und Spiegelachsen

- Nun kann zwischen den definierten Begrenzungen (Mittelachse der Modell-Platte und Durchmesser des Rings) entlang der Kontur der Membran-Fläche die Hauptkrümmungslinie eingezeichnet werden. Der Befehl für diese interpolierte Kurve (Spline) lautet: *InterpCrv* [mcneel.com 2017a].

- (i) Um Ungenauigkeiten am Modell auszugleichen, kann bei symmetrischen Tragsystem-Hälften, wie beim gezeigten Beispiel, eine Mittelung der beiden Seiten vorgenommen werden. Dazu werden beide Kurven in der Symmetrieachse (Mast) gespiegelt.

Weichen Original und gespiegelte Linie voneinander ab, kann eine Mittel-Linie aus beiden erstellt werden. Der Befehl dazu lautet: *TweenCurves* (mit der Option: *MatchMethod: SamplePoints*) [mcneel.com 2017f].

- Abb. 175 zeigt die fertige Hauptkrümmungslinie (rot)

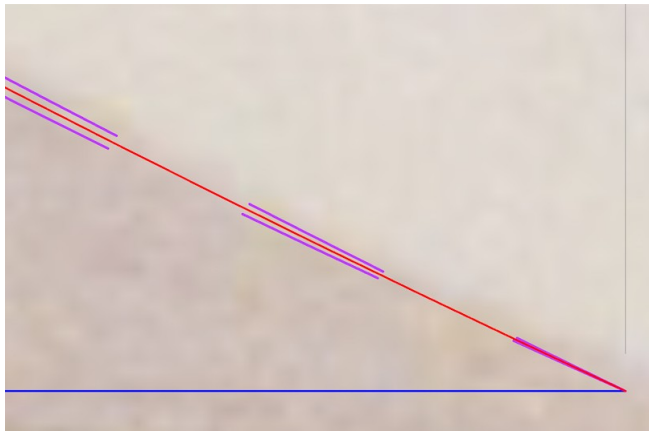

Abb. 286: Mittelung der Krümmungslinien (rot)

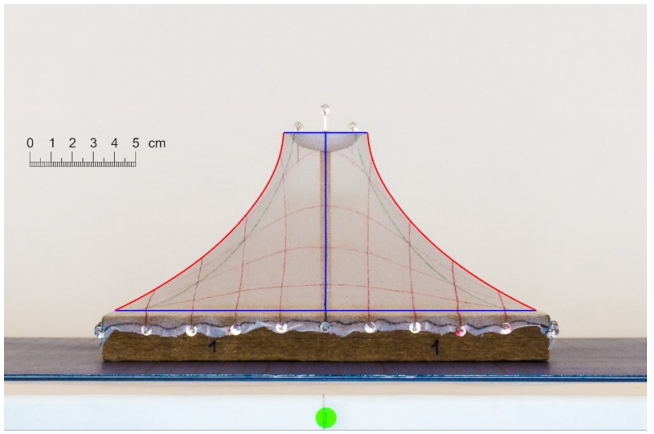

Abb. 287: Fertige Hauptkrümmungslinie 1

- Die Schritte werden nun für die 2. Hauptkrümmungslinie (hier entlang der Diagonale der Modell-Platte) wiederholt.

- Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Referenz-Linien der unterschiedlichen Fotos aufeinander abgestimmt sind und es somit nicht zu unterschiedlichen Skalierungen kommt.

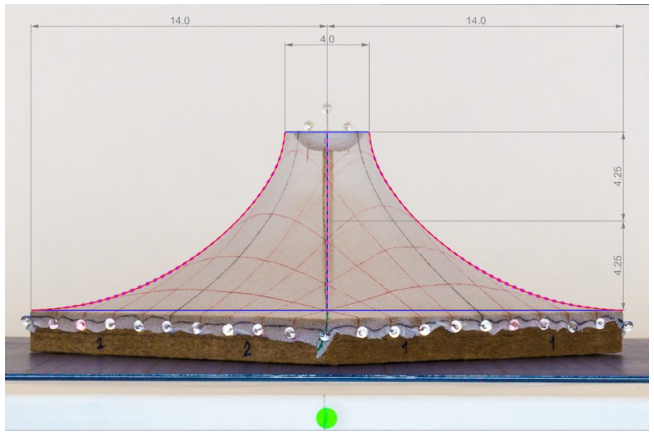

Abb. 288: 2. Hauptkrümmungslinie gespiegelt

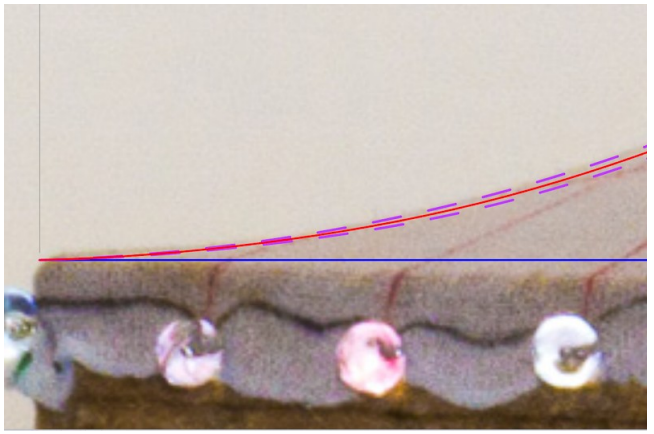

Abb. 289: Mittelung der Krümmungslinien (rot)

(i) Die Skalierung weiterer Fotos kann vereinfacht werden, indem diese über ein bereits skaliertes geladen und mit Hilfe bereits bestehender Referenzpunkte angepasst werden.

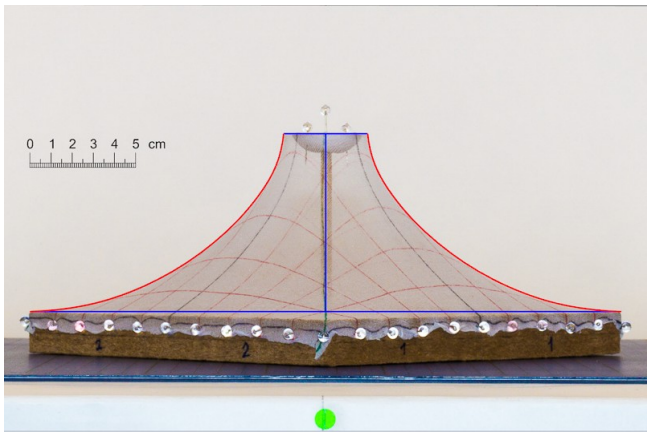

Abb. 290: Fertig: Hauptkrümmung 2

4.2.4 Analyse der Hauptkrümmungen

Abb. 291 zeigt die Darstellung der Hauptkrümmungen in Bezug zum Grundriss.
Die roten Linien geben die Form des physischen Modells wieder - durch Schnitt A und Schnitt B.
S. a. 3.4.2 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring: Analyse: Hauptkrümmungen, S. 72.

In der Analyse der Hauptkrümmungen können durch die überlagerte Darstellung in der Ansicht und der Zuordnung des Grundrisses die grundlegenden Eigenschaften der Form rasch erkannt werden.
Diese ermöglicht auch einen guten Vergleich zwischen verschieden Formen anzustellen. Dazu wurden hier auch die Hauptkrümmungen des Computer-Modells (türkis) eingeblendet, das mit den gleichen Randbedingungen (Grundriss, Mast, Ringdurchmesser) simuliert wurde.

Diese Membran-Fläche weist eine wesentlich geringere Krümmung auf und zeigt die unterschiedlichen Ergebnisse, die sich - ohne Anpassung der Eigenschaften / Grundeinstellungen - zwischen physischem Modell und Computer-Simulation ergeben können.

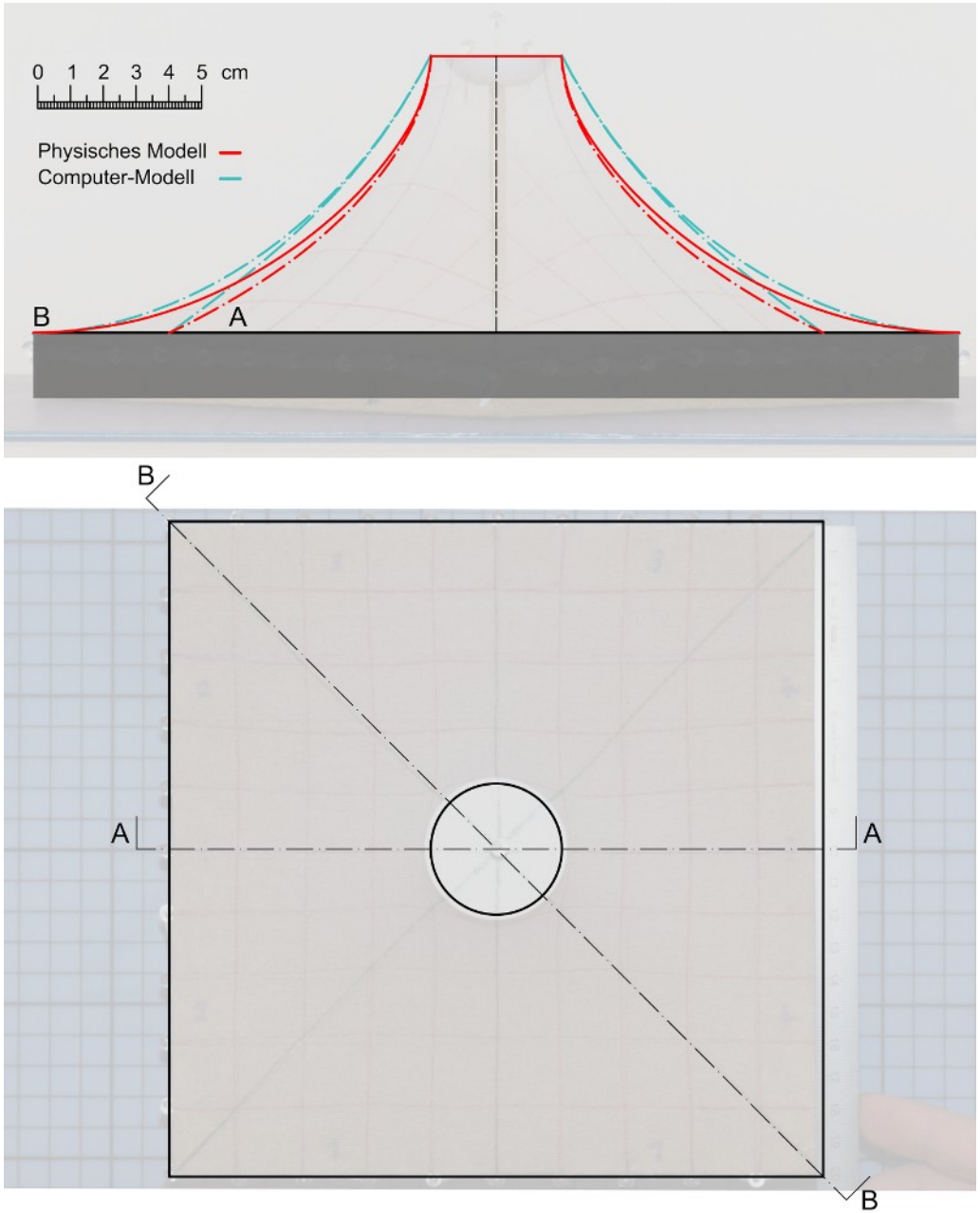

Abb. 291: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell

Derartige Auffälligkeiten können auf Problembereiche hindeuten, die im Zuge der planerischen Ausarbeitung durch Ingenieursfachwissen präzisiert werden müssen - um, wie in diesem Fall, hohe Spannungen durch geringe Krümmungen zu vermeiden, aber genauso eine Einschnürung (Krümmungslinie verläuft vom Ring aus zunächst näher an den Mast anstatt stetig von diesem weg) zu verhindern, die die Stabilität der Form beeinträchtigt.

4.2.5 Rekonstruktion als digitales Modell

Mit den digitalisierten Hauptkrümmungslinien kann relativ einfach ein 3D-Modell am Computer rekonstruiert werden.

(i) Dieses digitale Modell stellt eine Annäherung an die in der experimentellen Formfindung gefundene Form dar. Die zwischen den Krümmungslinien generierte Fläche basiert auf der Geometrie und stellt keine tatsächliche Formfindung unter Berücksichtigung von Kräften dar. Diese Ungenauigkeiten liegen hier aber meist unter denen des ursprünglichen physischen Modells und spielen für die Entwicklung des Vorentwurfs keine Rolle.

- Zunächst werden die Krümmungslinien aus dem Schnitt über dem Grundriss in ihre räumliche Lage gebracht. Der Befehl dazu lautet: *Orient3Pt* [mcneel.com 2017b].

- Da die Formbildung besonders im Eck problematisch ist, wird die Fläche über 2 sich an der Ecke berührende Felder generiert.

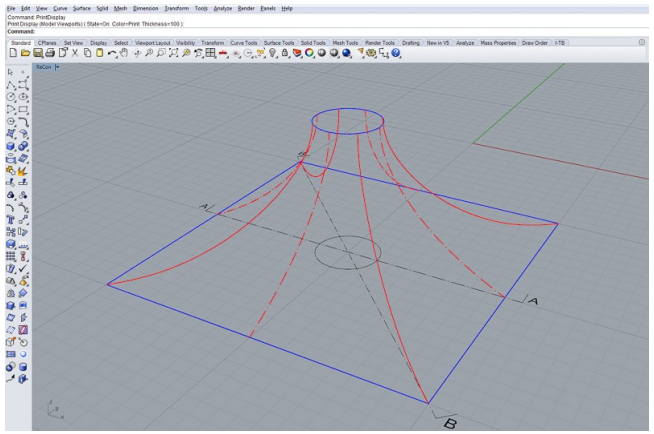

Abb. 292: Räumlicher Aufbau über Grundriss

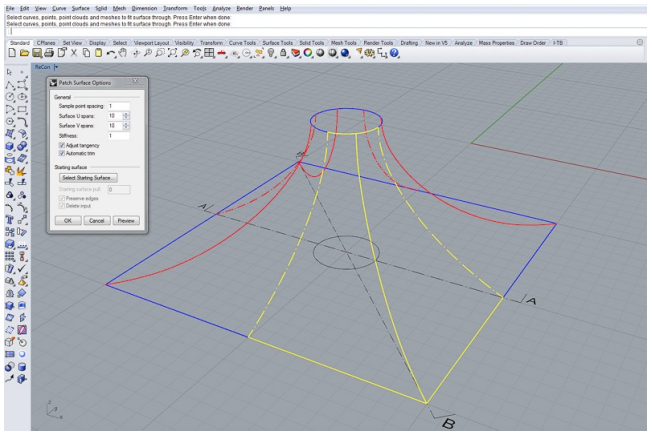

Abb. 293: Formgenerierung über 2 Felder am Eck

(i) Andere Möglichkeiten zur Erstellung der Fläche, z. B. über 4 begrenzende Kurven der Fläche, würden über die Krümmungslinie im Eck keine durchgängige Krümmung erzeugen.

Im Zweifelsfall (z. B. bei der Ausbildung von Kanten, die in der gespannten Membran-Fläche nicht möglich sind) sollte die Fläche in einem Schritt über alle Felder generiert werden - allerdings nur innerhalb der Begrenzungen durch die Flächenunterstützung, wie z. B. einer Bogen- oder Seilunterstützung.

- Der Befehl dazu lautet: Patch (mit der Option: Automatic trim) [mcneel.com 2017c].

  (i) Die Erfahrung hat gezeigt, dass oft mehrere Anläufe nötig sind, damit der Befehl die Fläche in der gewünschten Form generiert.

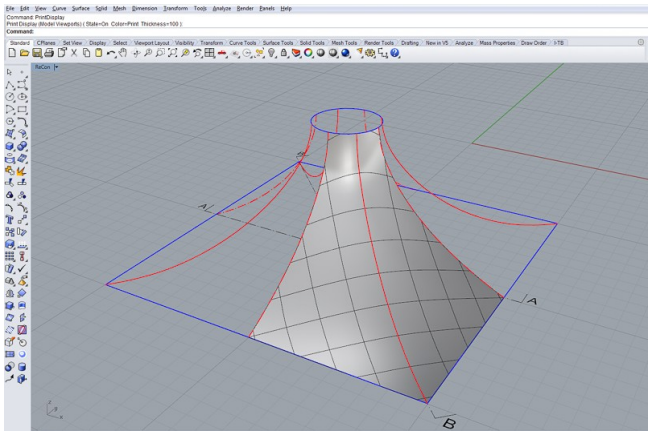

Abb. 294: Rekonstruktion mittels Fluchtlinien

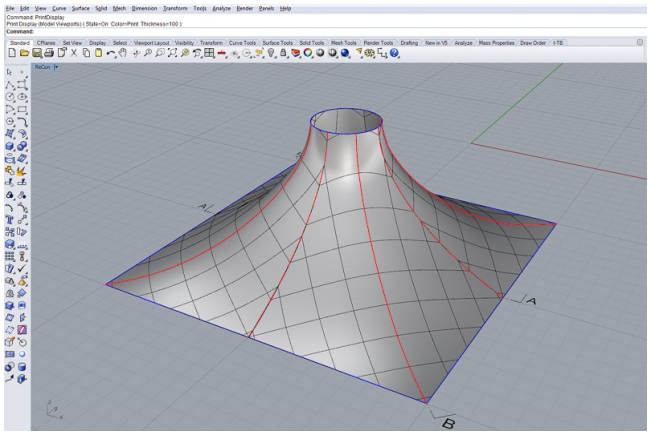

Abb. 295: Krümmungslinien und Spiegelachsen

- Aufgrund der Symmetrieachsen zwischen den Feldern kann die erzeugte Fläche in Folge auf die restlichen Felder gespiegelt werden.

4.2.6 Umgang mit komplexen Formen

Die Formerfassung über die Hauptkrümmungen kann auf Schwierigkeiten stoßen, wenn z. B. nicht alle Hauptkrümmungen frontal abgebildet werden können, da diese durch Seitenteile des Modells verdeckt werden (Abb. 296, s. a. 3.4 Modell-Technik: Analyse: Hauptkrümmungen, S. 70).

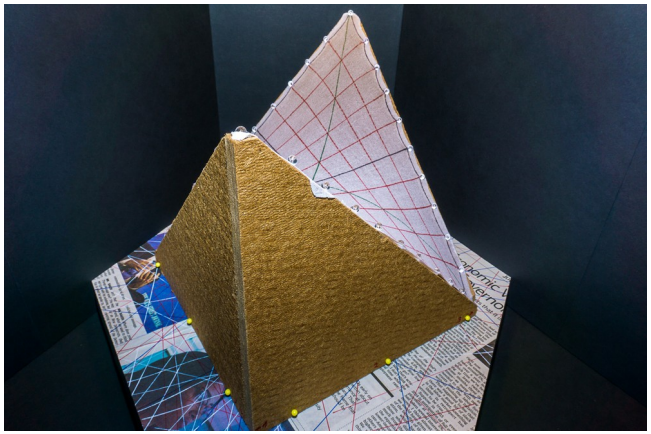

Abb. 296: Verdeckte Hauptkrümmung (in Ansicht)

- In diesem Fall kann auf ein Vermessen einzelner Koordinaten entlang der Krümmungslinie zurückgegriffen werden (z. B. durch spannen von Schnüren von Seitenteil zu Seitenteil und Erfassung der Koordinaten sowie der Entfernung zur Hauptkrümmungslinie mittels Lot).

- Alternativ kann auch beim Fotografieren die Position der Kamera soweit angehoben werden, dass die verdeckte Krümmungslinie gerade wieder sichtbar ist (Abb. 297).

  Da die Krümmungslinie nun nicht mehr parallel zur Bildebene verläuft, wird diese verkürzt dargestellt. Diese Verzerrung kann aber durch Skalieren (wie in 4.2.3 Ableitung der Hauptkrümmungen vom Foto , S. 125 beschrieben) einfach ausgeglichen werden - allerdings wird hierbei nur in der Verzerrungs-Achse skaliert. Der Befehl dazu in Rhino lautet: *Scale1D* [mcneel.com 2017e].

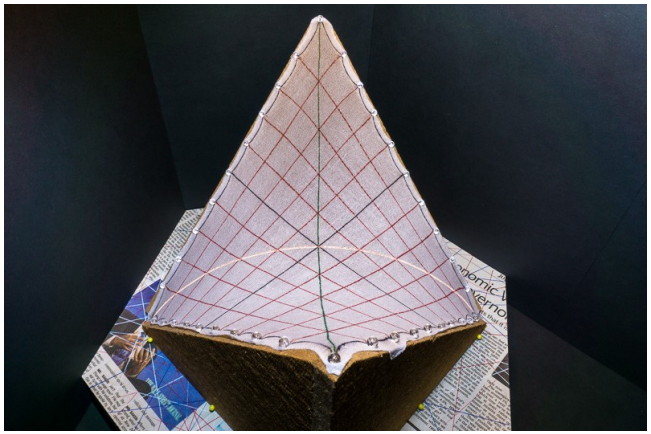

Abb. 297: Perspektive mit Hauptkrümmung

- Außerdem kann nicht mehr auf die Kontur der Membran-Fläche als Verlauf der Hauptkrümmungslinie zurückgegriffen werden und die Linie muss auf anderem Weg am Foto sichtbar gemacht werden:
  entweder durch vorsichtiges anzeichnen (in Form von Punkten, um ein Verzerren der Membran-Fläche zu vermeiden),
  oder besser durch Verwendung des Kreuzlinienlasers.

Generell empfiehlt sich die Formerfassung über die Hauptkrümmungen vor allem bei einfachen (regelmäßigen) Formen, die durch 1 - 2 Schnitte einfach zu fotografieren sind und rasch am Computer bearbeitet und rekonstruiert werden können.

Allerdings können komplexere Formen, wie das in Abb. 298 gezeigte Kissen, die auch keine Spiegelachsen aufweisen, bei dieser Methode Schwierigkeiten in der Bearbeitung und Rekonstruktion bereiten.

- Das Abnehmen von nur 2 Hauptkrümmungen würde zwar immer noch eine Basis für die weitere grundlegende planerische Bearbeitung bieten.

  Allerdings wären daraus rekonstruierte 3D-Modelle recht ungenau bzw. würden das Risiko relativ großer Abweichungen zur tatsächlichen Form am Modell in sich bergen.

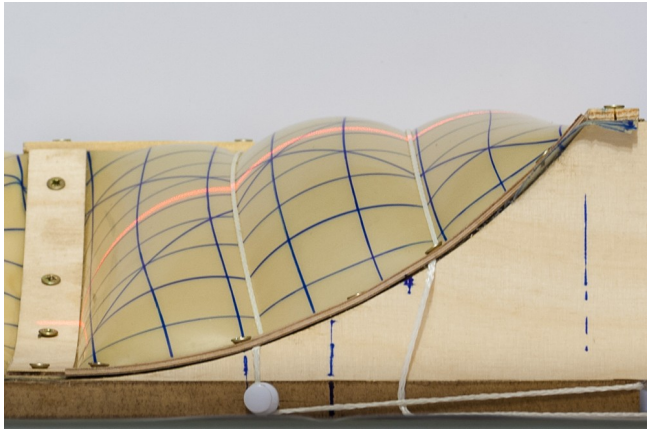

Abb. 298: Krümmungslinie einer komplexen Form

- Es müssten also mehrere parallel versetzte (oder eventuell auch diagonale) Krümmungslinien abgenommen und dann in ihren räumlichen Bezug (über die Positionierung am Grundriss) gesetzt werden, um die Genauigkeit der Rekonstruktion zu erhöhen.

  (i) Um die Projektion des Kreuzlinienlasers am Foto besser sichtbar zu machen, kann es hilfreich oder nötig sein, ein Stativ und längere Belichtungszeiten zu verwenden

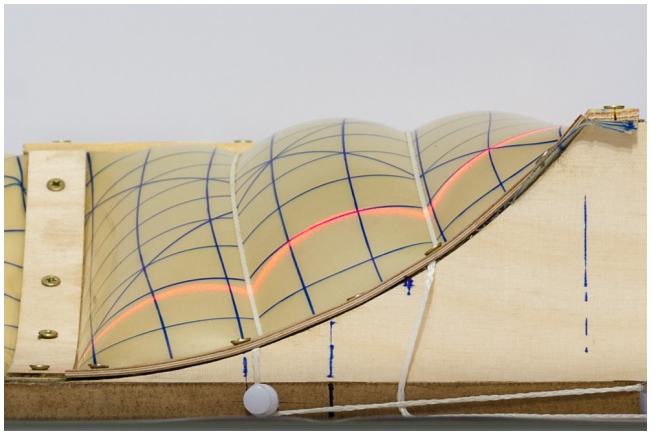

Abb. 299: Versetzte Krümmungslinie

Der Vorteil der Formerfassung über die Hauptkrümmungen liegt darin, dass damit relativ einfach und rasch eine Basis für die weitere planerische Ausarbeitung geschaffen werden kann - die in der Regel für den Zweck des Vorentwurfs ausreichend ist.

Wird eine höhere Genauigkeit angestrebt oder benötigt, können bei speziellen Tragwerks-Typen oder komplexeren Formen nötige Anpassungen der Methode einen wesentlichen Mehraufwand erzeugen.
Dabei stellt sich dann die Frage, ob nicht direkt die gesamte Oberfläche als 3D-Modell erfasst werden sollte.
Hier würde sich die Anwendung einer Photogrammetrie-App - direkt am Smartphone oder über Kamera und Computer - anbieten.
S. a. 4.3 Formerfassung mittels Photogrammetrie, S. 133.

4.3 Formerfassung mittels Photogrammetrie

Photogrammetrie - vor allem wenn am Smartphone angewendet - ist eine gute und relativ unkomplizierte Möglichkeit, die gesamte Oberfläche als 3D-Modell zu erfassen. Frei Otto verwendete diese Technik schon vor 1972 am IL. Dafür wurden Fotos aus zwei unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen, die eine räumliche Rekonstruktion des Objekts erlauben [Bubner 1972: S. 75].
Für die Anwendung am Smartphone (hier 123D Catch von Autodesk) werden in der Regel mehrere sich überlappende Fotos des gesamten Modells benötigt.

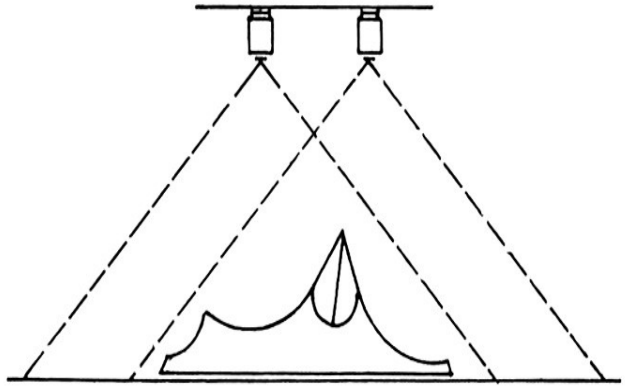

Abb. 300: Photogrammetrie am IL: Prinzipskizze

4.3.1 3D-Modell via App: 123D Catch

Gute Resultate hängen wesentlich von guter Beleuchtung, gutem Kontrast und von Mustern, die auf jedem Foto eindeutig einer bestimmten Lage zugeordnet werden können (hier hat sich das unregelmäßige Muster einer Zeitung als best geeignete Unterlage erwiesen). Ein Scan-Tisch wurde diesen Anforderungen entsprechend entwickelt.

(i) Kleinteilige Bereiche des Modells sollten besonders gut und gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Die Ausleuchtung sollte sich während der gesamten Fotoserie nicht verändern.

Es werden ca. 40 Fotos in 2 Höhenlagen rund um das Modell aufgenommen.
Die Fotos sollten sich dabei knapp zur Hälfte überlappen und möglichst scharf sein.

Abb. 301: Scan-Tische

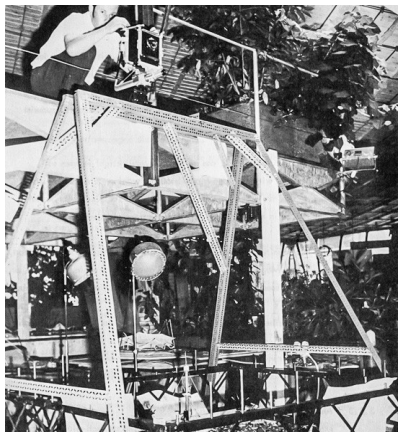

Abb. 302: Photogrammetrie am IL: Aufbau

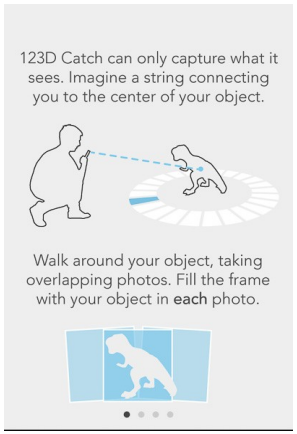

Abb. 303: 123D Catch: Fotoserie 1

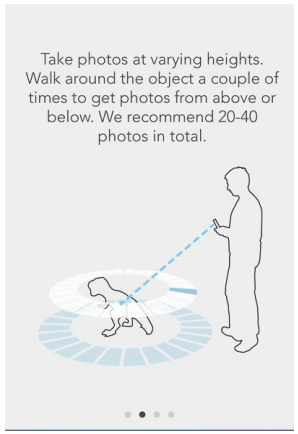

Abb. 304: 123D Catch: Fotoserie 2

Anordnung

Das von der Modell-Auflage separate Rückteil wurde analog zum Smartphone hinter dem Modell mitgeführt, um einen durchgängig dunklen Hintergrund zu erhalten.

(i) Der bewegliche Hintergrund muss absolut dunkel sein und darf auf den Fotos keine erkennbaren Strukturen hinterlassen, da dadurch die korrekte Berechnung der Modell-Oberfläche gestört werden könnte. Bei derartigen Problemen sollte auf das Rückteil verzichtet werden.

Abb. 305: Beweglicher Hintergrund: Position 1

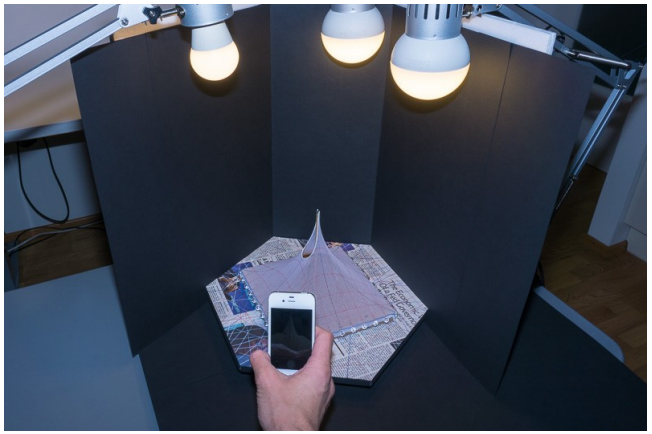

Abb. 306: Beweglicher Hintergrund: Position 2

3D-Modell

Nach dem Abfotografieren des Modells aus der App heraus werden die Bilder online verarbeitet. Je nach Qualität und Anzahl der Fotos kann der Vorgang bis zu einige Stunden dauern. Das Ergebnis, im Besonderen eine STL-Datei zur weiteren Bearbeitung, ist dann online wie in der App verfügbar.

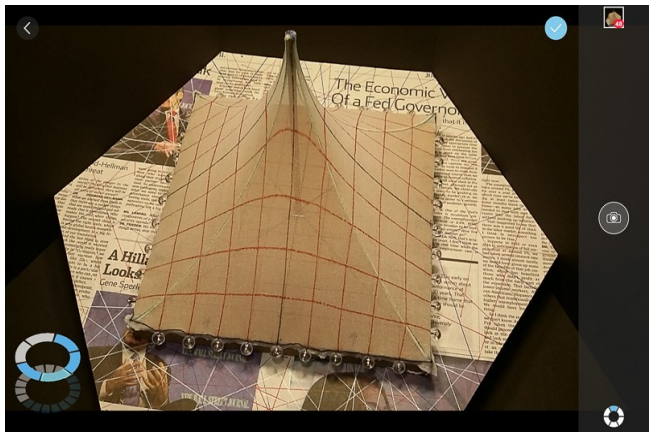

Abb. 307: Kamera-Modus der App

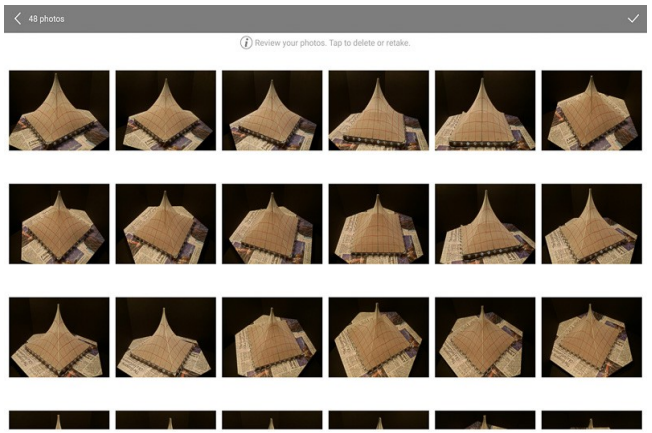

Abb. 308: Zu verarbeitende Fotoserie

(i) In der Praxis haben sich Fotoserien mit bis zu 60 Fotos bewehrt.

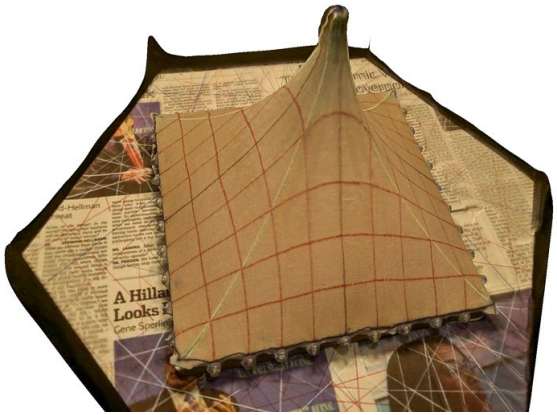

Abb. 309: Rekonstruierte 3D-Form

Nachbearbeitung des 3D-Modells

Für die weitere Verwendung des 3D-Modells empfiehlt es sich, dieses von unbenötigten Informationen zu bereinigen. Dazu wurde die Software Blender verwendet, die gut mit den rechenintensiven Dateien im Format STL umgehen kann.

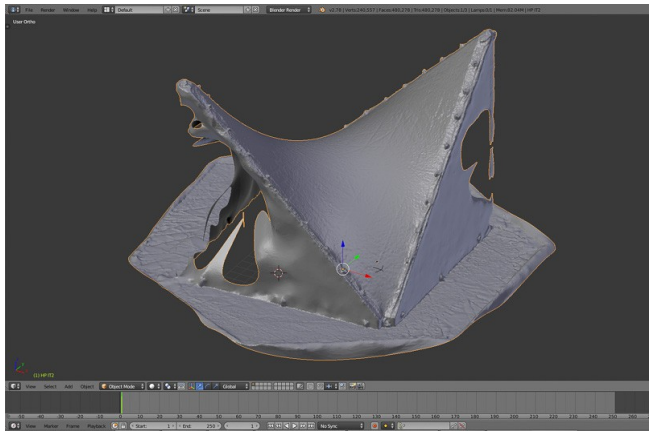

Abb. 310: Blender: STL Import des 3D-Modells

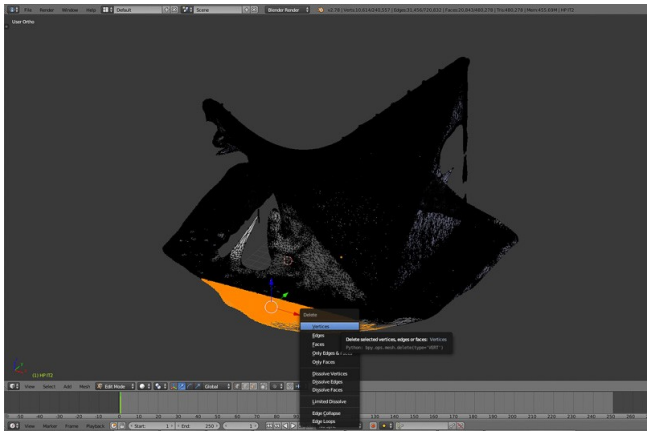

Abb. 311: Blender: Bereinigen des 3D-Modells

- Zunächst wird die durch Photogrammetrie generierte STL-Datei importiert.
- Im *Edit Mode* werden mit dem Lasso schrittweise alle überflüssigen Bereiche markiert und gelöscht (*Vertices*).

  (i) Das deaktivieren der Option *Limit Selection to Visible* erleichtert das zügige Löschen der Auswahl.

- Das bereinigte Modell wird wiederum als STL-Datei exportiert.

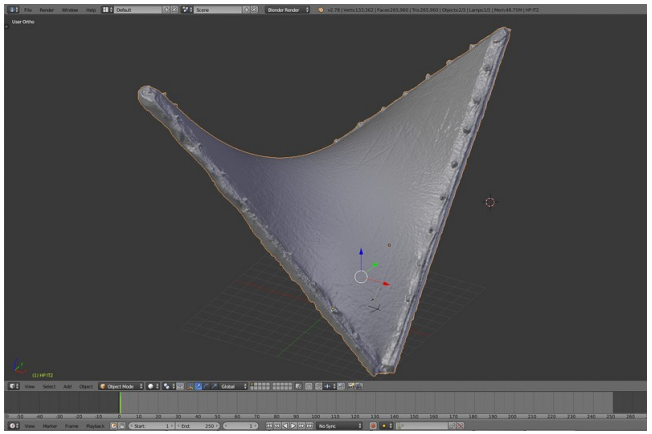

Abb. 312: Blender: Bereinigtes Modell

Ableitung der Hauptkrümmungen vom digitalisierten Modell

- Zunächst werden Anfangs- und Endpunkt der Hauptkrümmungslinien am importierten Modell (in Rhino) ermittelt und die jeweiligen Achsen durch diese Punkte gelegt.

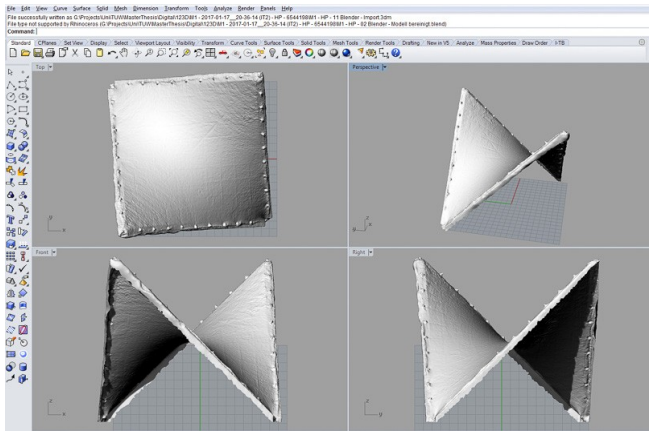

Abb. 313: Rhino: importiertes 3D-Modell (STL)

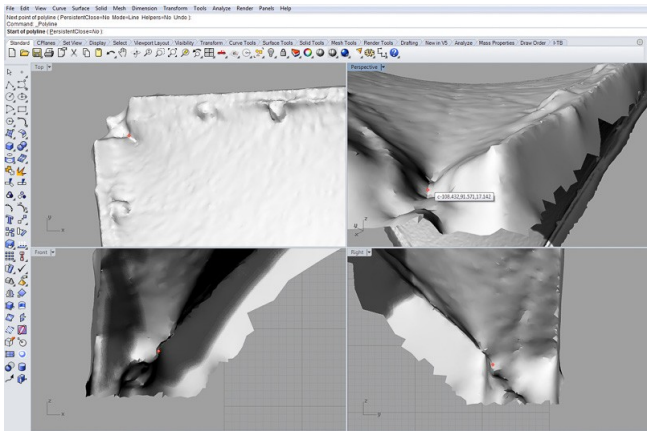

Abb. 314: Hauptkrümmung: Endpunkte

- Durch die Verbindung der beiden Achsen-Mitten entsteht ein Schnittpunkt in der Fläche, der zur Erstellung der Schnitte (über Schnittebenen: *Section*) verwendet wird.

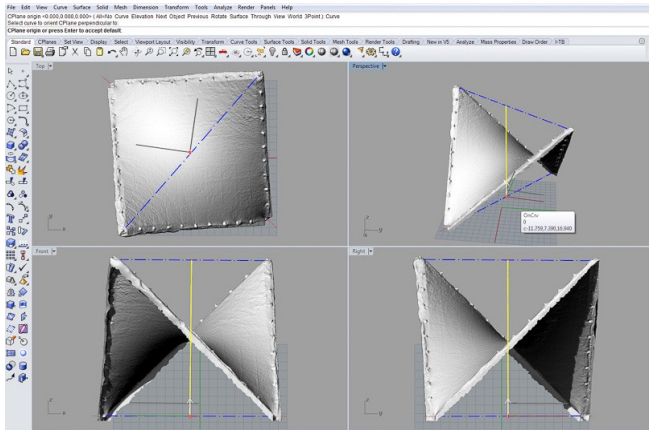

Abb. 315: Schnittebenen: Bezugsebene

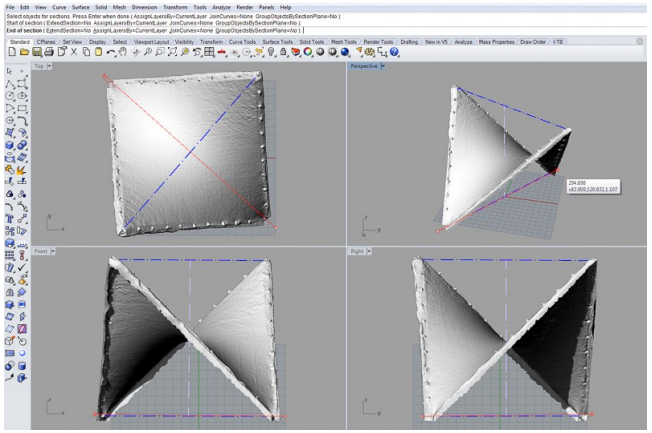

Abb. 316: Schnittebene (Section)

- Mit dem Befehl *Section wird über die definierten Schnittebenen die jeweilige Hauptkrümmung als Schnitt erstellt.*

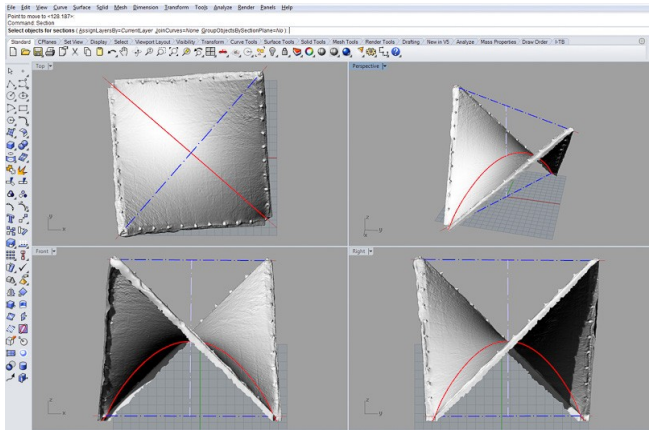

Abb. 317: Hauptkrümmung 1

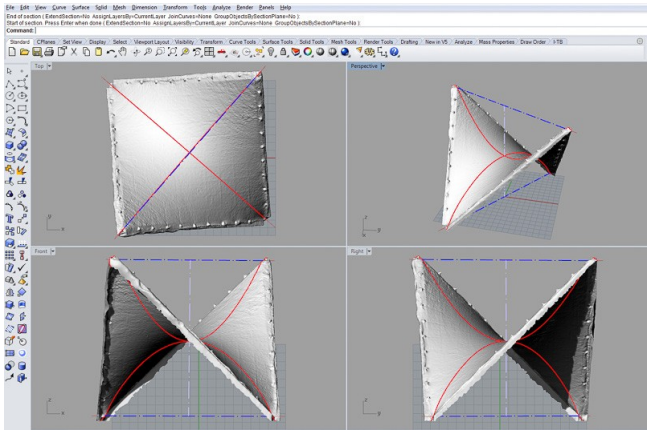

Abb. 318: Hauptkrümmungen 1 + 2

4.4 Digitales Modell mittels Computer-Simulation

4.4.1 Einführung

Durch die besonderen Anforderungen der Formfindung von Membrankonstruktion ist die Anzahl an Computer-Programmen, die dem Architekten zur Entwurfsentwicklung zur Verfügung steht - im Vergleich zu üblichen CAD-Programmen - recht gering. Hinzu kommt auch, dass große und auf Membranbau spezialisierte Büros oft Software aus eigener Entwicklung oder entsprechende Programmesysteme verwenden.

Eine Auswahl an Entwurfs-Programmen [Sastre 2017]:

- Formfinder (https://www.formfinder.at/formfinder/)
- RhinoMembrane / Grasshopper (http://www.ixray-ltd.com/index.php?option=com_content&view=article&id=82&Itemid=521)
- ixForten (http://www.ixforten.com/form-finding.htm)
- FerrariSketch (http://es.sergeferrari.com/serge-ferrari-sketch-4/)

Im Fokus dieser Programme liegt die Generierung einer Membran-Fläche, die zur Überprüfung der Entwurfsidee und der weiteren planerischen Ausarbeitung dient. Oft können auch grundlegende statische Eigenschaften des Tragwerks (wie z. B. Spannungen und Kräfte) angezeigt werden, die bei der Entwurfsentwicklung hilfreich sein können.

Im Gegensatz dazu können mit Programmsystem, wie z. B. Technet EASY, zwar auch Membran-Flächen visualisiert werden. Der Fokus liegt hier aber auf der Überprüfung eines bereits definierten Entwurfs und der Entwicklung zur Baureife (statische Analyse inkl. Primärstruktur, Zuschnittsberechnung etc.).

4.4.2 Formfinder

Da sich diese Software im Besonderen an Architekten wendet und zur intuitiven Verwendung konzipiert wurde, wird sie in dieser Arbeit exemplarisch verwendet.
Außerdem basiert die Entwicklung des Formfinders auf dem Formfindungs-Algorithmus der Technet EASY. Die Software wurde von Dr. Robert Roithmayr im Rahmen seiner Diplomarbeit konzipiert und seit 2006 in Kooperation mit Technet weiterentwickelt.

Der Formfinder verfügt überdies auch über weitere Funktionen, die im Prozess der Entwurfsentwicklung hilfreich sein können, wie z. B. die Visualisierung von Schnittebenen, die Simulation des Sonnen-Schattens und weitere Analysewerkzeuge. Diese erweiterten Aspekte des Entwurfs, die über die reine Formfindung hinaus gehen, werden aber in dieser Arbeit nicht behandelt.
Zur Verwendung dieser Werkzeuge empfiehlt sich die Lektüre der Formfinder eigenen Dokumentation.

Besonders hervorzuheben ist die Projekt-Datenbank, auf die der Formfinder zugreifen kann. Diese Datenbank basiert auf der SDA, die an der LSRU entwickelt wurde und enthält deren und weitere Projekte. Filtermöglichkeiten, wie eine typologische Zuordnung, ermöglichen eine gezielte Recherche zu realisierten Projekten.

Arbeitsweise

- Der Formfinder bietet die Möglichkeit, dreidimensionale Membran-Flächen in einfachen Schritten basierend auf deren Grundriss zu generieren.

  S. a. die exemplarische Anwendung: 4.4.3 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche, S. 141

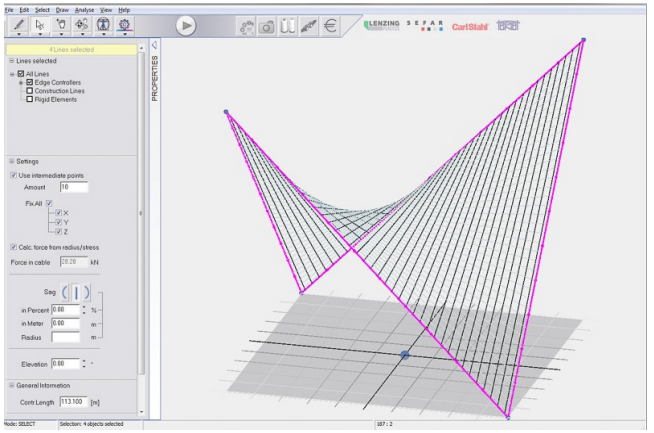

Abb. 319: Formfinder: Vom Grundriss zur 3D-Form

Ableitung der Hauptkrümmungen von der digitalen Formfindung

Die im Formfinder gefundene Form kann in Rhino importiert werden, um die Analyse der Hauptkrümmungen analog zu der in 4.3.1 Ableitung der Hauptkrümmungen vom digitalisierten Modell, S. 136 beschriebenen Methode durchzuführen.

So kann auch die digitale Formfindung mit dem vom physischen Modell digitalisierten Form verglichen werden.

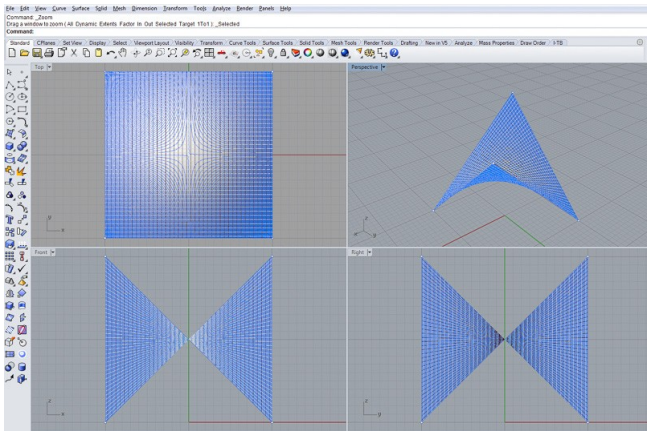

Abb. 320: Rhino: DXF-Import aus Formfinder

- Aufgrund der regelmäßigen und idealisierten Form können die Schnitte der Hauptkrümmungen ohne Anpassung der Bezugsebenen direkt angewendet werden. Der Befehl dazu lautet: *Section*.

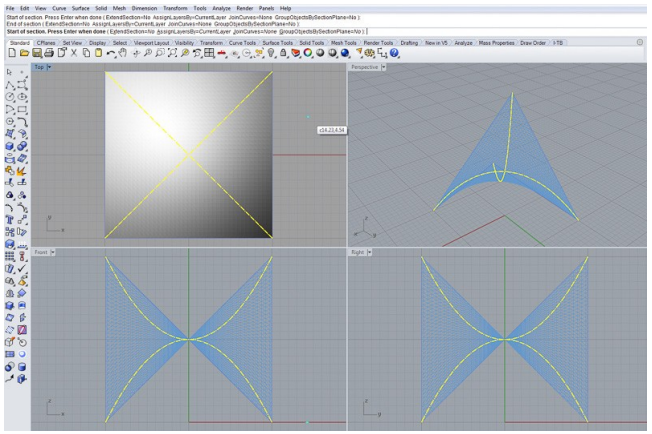

Abb. 321: Hauptkrümmungen (Formfinder)

Grundformen

Die Folgenden Grundformen können mit dem Formfinder dank spezieller Werkzeuge einfach erstellt werden.

- Flächenunterstützung: keine
  - 4.4.3 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche, S. 143
- Flächenunterstützung: **punktförmig**
  - 4.4.4 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring, S. 143
- Flächenunterstützung: **linienförmig**
  - 4.4.5 Typ 7: Bogengestützt, S. 144
- Anpassungsmöglichkeit: **Seilrand**

Die restlichen Grundformen des physischen Modells müssen im Bezug auf die Generierung im Formfinder als Sonderformen gesehen werden, da sie nur mit erheblichem Fachwissen und Kenntnis des Programms erstellt werden können.

4.4.3 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche

Aufwand: **ca. 10 min** Komplexität: **niedrig** Software: **Formfinder 4**

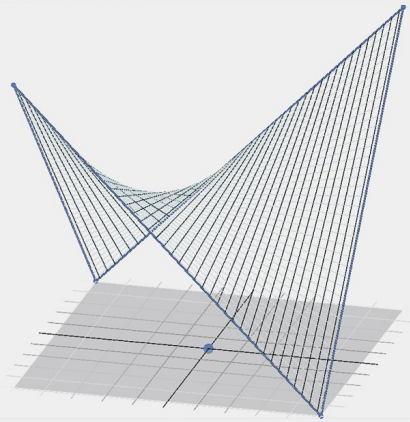

Abb. 322: HP-Fläche (Formfinder)

Formgenerierung

- Zunächst wird die der Grundriss in den entsprechenden Maßen der Membran-Fläche mit dem *Edge-Tool* aufgezeichnet.

  (i) Beim aufzeichnen des Grundrisses kann es hilfreich sein, das Raster auf die Maße der Membran-Fläche abzustimmen: *Optionen > Grid.*

- (I) In *Properties Panel* können die Koordinaten des jeweils ausgewählten Punkts überprüft werden.

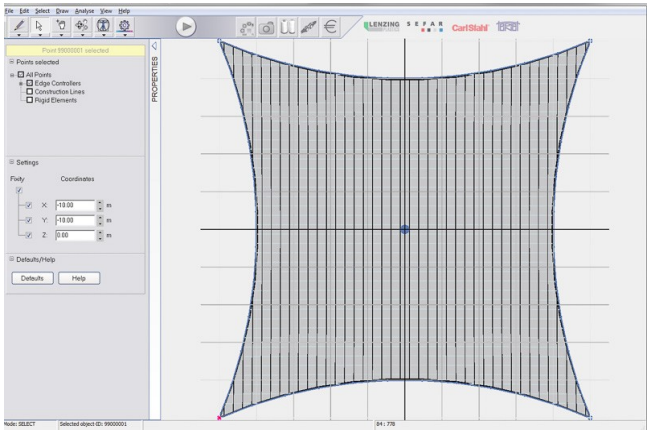

Abb. 323: Grundriss-Form

- Nun werden die 2 gegenüberliegenden Ecken angehoben, in dem beide ausgewählt werden und deren Z-Position im *Properties Panel* angepasst wird (hier auf 20 Einheiten entsprechend der Modellgröße von 20 cm).

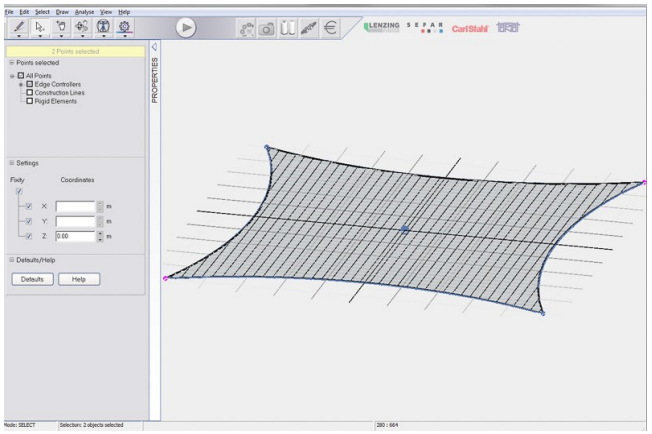

Abb. 324: Anheben der Ecken

- Zur Anpassung der Randeigenschaften von frei (Seilrand) zu fixiert (fest verbunden) werden alle Ränder (*Edge Controller*) ausgewählt.
  Im *Properties Panel* werden folgende Eigenschaften eingestellt:
  - *Fix All*
  - *Sag:* gerade

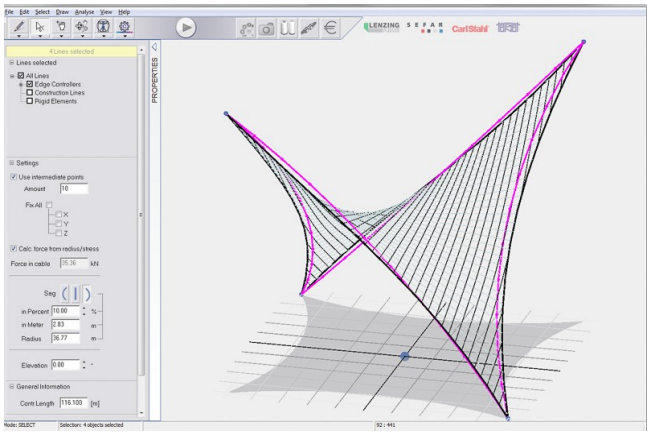

Abb. 325: Anpassen des Rands

- Die fertige Membran-Fläche kann zur weiteren Bearbeitung als DXF-Datei exportiert werden.

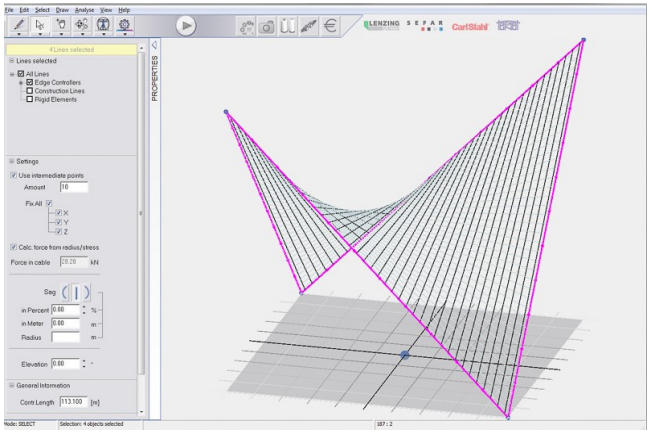

Abb. 326: Fertige HP-Fläche

Weitere Bearbeitungs-Möglichkeiten

Nach dem Import der DXF-Datei in Rhino kann die Analyse der Hauptkrümmungen analog zu der in 4.3.1 Ableitung der Hauptkrümmungen vom digitalisierten Modell, S. 136 beschriebenen Methode erfolgen und so auch mit der am physischen Modell gefunden Form verglichen werden.

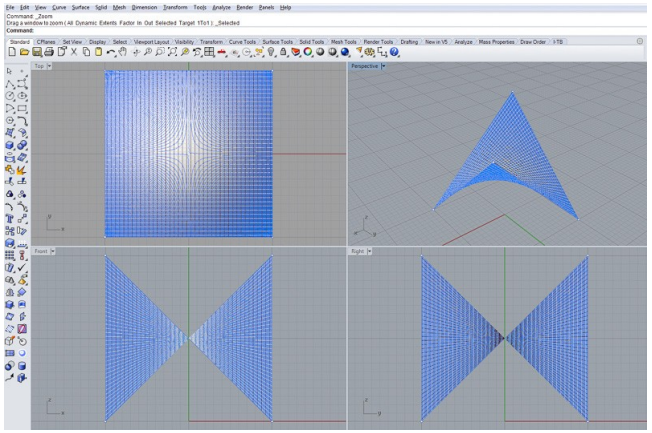

Abb. 327: Rhino: DXF-Import

4.4.4 Typ 2: Hochpunkt - Mast mit Ring

Aufwand: **ca. 10 min** Komplexität: **niedrig** Software: **Formfinder 4**

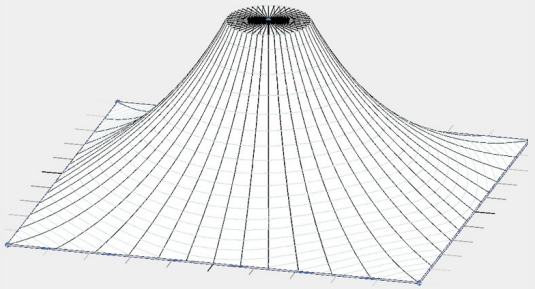

Abb. 328: Mast mit Ring (Formfinder)

Formgenerierung

- Zunächst wird mit dem *Edge-Tool* die gleiche Grundriss-Form, wie in 4.4.3 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche, S. 141 beschrieben, erstellt.

- Die Membran-Fläche wird ausgewählt und der Netztyp von *regular* auf *radial* gesetzt.
  Nun werden die Werte für der Hochpunkt (*Center Point*) und den Ring-Durchmesser (*inner radius*) angepasst (hier Höhe: 8.5 und Radius: 2).

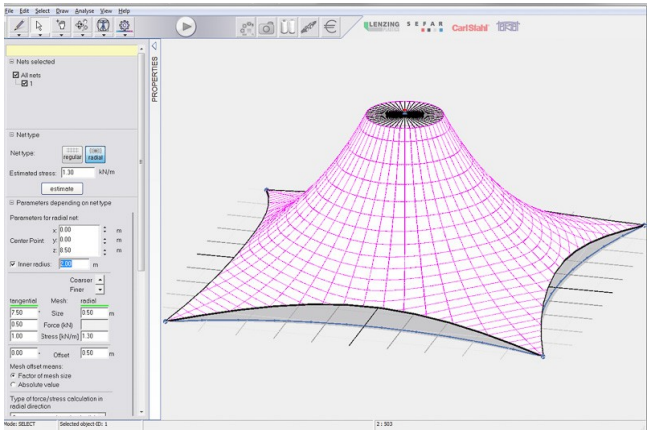

Abb. 329: Grundriss-Form, radialer Netztyp

- Anpassung des Rands werden alle *Edge Controller* ausgewählt und im *Properties Panel* folgende Eigenschaften eingestellt:
  - *Fix All*
  - *Sag:* gerade

- Die fertige Membran-Fläche kann zur weiteren Bearbeitung als DXF-Datei exportiert werden.

- Vergleich physisches / digitales Modell s. 3.4.2 Analyse: Hauptkrümmungen, S. 77.

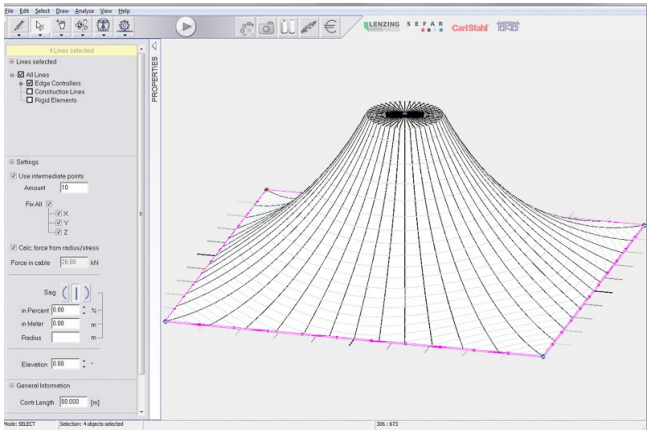

Abb. 330: Anpassen des Rands

4.4.5 Typ 7: Bogengestützt

Aufwand: **ca. 10 min** Komplexität: **niedrig** Software: **Formfinder 4**

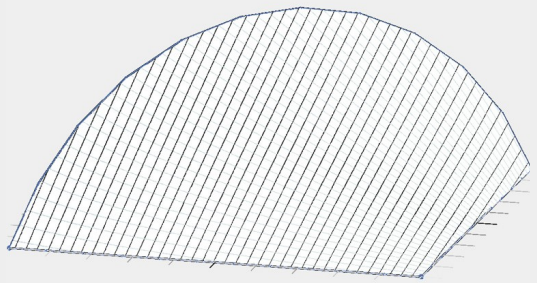

Abb. 331: Mast mit Ring (Formfinder)

Formgenerierung

- Zunächst wird mit dem *Edge-Tool* die gleiche Grundriss-Form, wie in 4.4.3 Typ 1: Freigespannt - HP-Fläche, S. 141 beschrieben, erstellt.

- Nach dem Zeichnen des Bogens im Grundriss mit dem Edge-Tool wird die Linie ausgewählt und *Elevation* auf -90 ° gesetzt und die Höhe auf 9.5 angepasst.

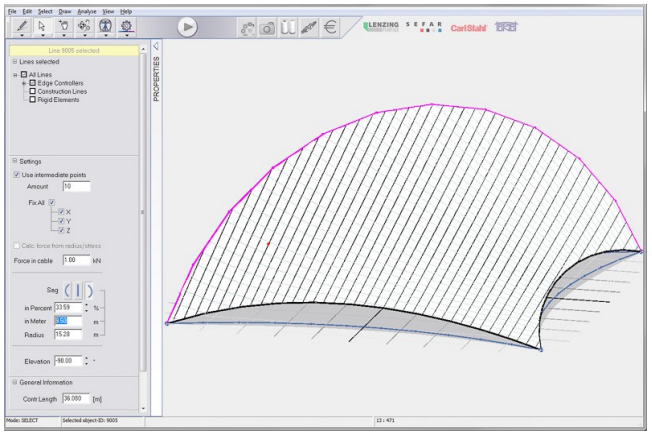

Abb. 332: Bogen: Höhe und Neigung

- Anpassung des Rands werden alle *Edge Controller* ausgewählt und im *Properties Panel* folgende Eigenschaften eingestellt:
  - *Fix All*
  - *Sag:* gerade

- Die fertige Membran-Fläche kann zur weiteren Bearbeitung als DXF-Datei exportiert werden.

- Vergleich physisches / digitales Modell s. 3.4.7 Analyse: Hauptkrümmungen, S. 77.

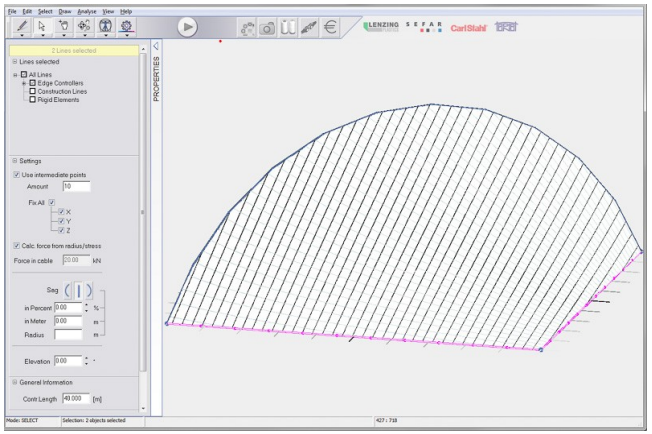

Abb. 333: Bogen (Rand)

4.5 Erstellung eines Zuschnitts der Membran-Fläche

Die Erstellung eines Zuschnittmusters der Membran-Fläche dient der Herstellung einer doppelt gekrümmten antiklastischen Form durch ebene Streifen eines Materials, das nur eine einfache Krümmung erlaubt, wie z. B. Gewebe-Bahnen.

Anwendungsszenarien

Die Übertragung der gefundenen Form in ein Zuschnittsmuster - ob am physischen oder digitalen Modell - erlaubt die Herstellung eines Prototypen in größerem Maßstab zur Überprüfung des Entwurfs.

Weiters könnte ein am digitalen Modell erstellter Zuschnitt - durch 3D-Druck der Stöße (Nähte) zwischen den Bahnen als linienartiges Gitter - genutzt werden, um das Zuschnittsmuster am physischen Modell sichtbar zu machen und die optische Wirkung (entsprechend dem Verlauf der Bahnen) überprüfen zu können.

4.5.1 Grundlagen des Zuschnitts am physischen Modell

Der Zuschnitt frei geformter Flächen kann vom Modell abgenommen werden, wobei Zuschnitte zu bevorzugen sind, deren Achsen geodätische Linien sind und deshalb in der Abwicklung eine Gerade bilden [Gaß 1990: S. 3.10, 1].

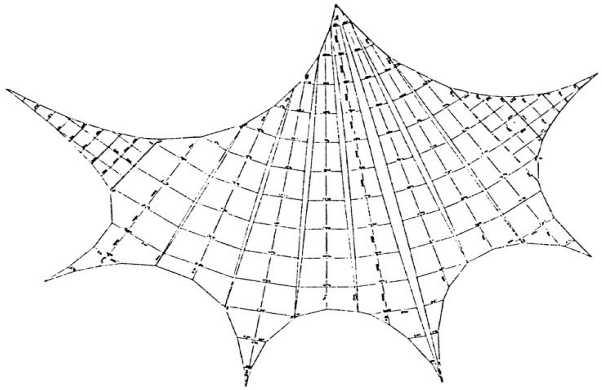

Abb. 334: Überprüfung Zuschnitt (ebene Bahnen)

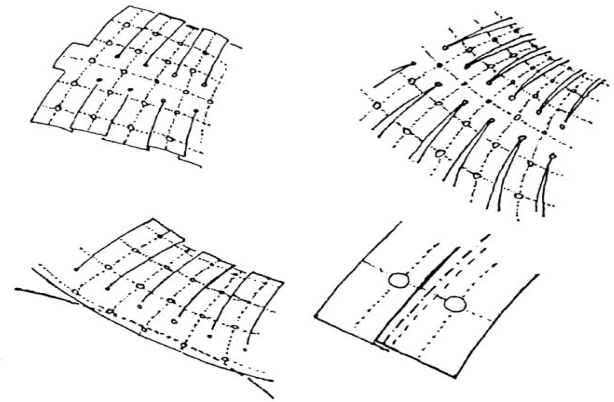

Abb. 335: Papierstreifen-Methode

Papierstreifen-Methode

Durch in ihrer Breite einer Bahn entsprechende Papierstreifen mit Messlinien und Löchern zur Befestigung auf dem Modell, lässt sich der Zuschnitt abnehmen. Bei paralleler Bahnenlage ergibt sich, von der Mitte ausgehend, auf synklastischen Flächen eine Überlappung, auf antiklastischen Flächen spreizen sich die Streifen auf. Es empfiehlt sich deshalb, vom Rand der Fläche auszugehen. Die Achse der Naht ergibt sich aus der halben Überlappung [Gaß 1990: S. 3.10, 3].

Anwendung am Beispiel Gipsmodells

- 10 mm breite Streifen (Millimeterpapier mit angezeichneter Mittelachse) auf die Oberfläche kleben. Die Streifen müssen sich dabei an allen Stellen überlappen und sollten bestmöglich geodätischen Linien (mit der kürzesten Verbindung zwischen den Endpunkten) folgen.

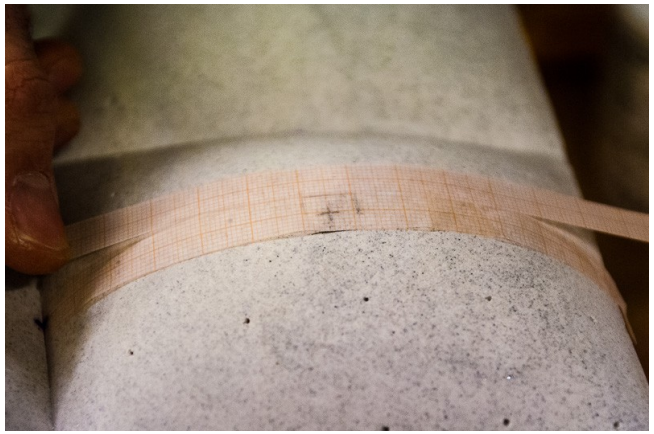

Abb. 336: Anbringen der Streifen

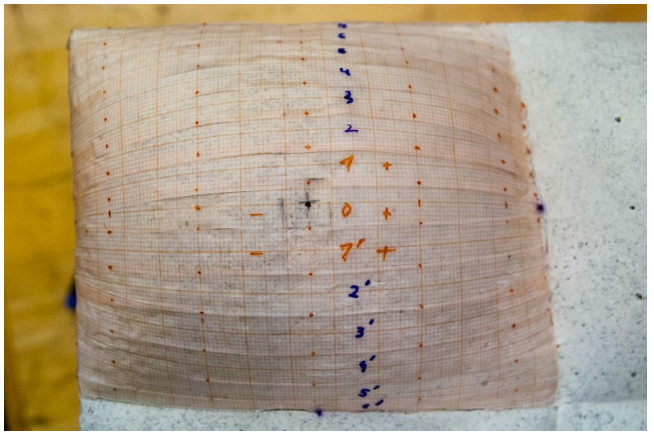

Abb. 337: Zuschnittsstreifen mit Messmarken

- In gleichmäßigen Abständen das Ausmaß der Überlappung abmessen (Mittle-Linie der Überlappung zu Mittel-Linie des Streifens).
  Die entsprechenden Abstände auf einer Zeichnung entlang der Mittelachse des Streifens markieren und quer zur Achse die abgemessene Überlappung auftragen [Sedlak 2012b].

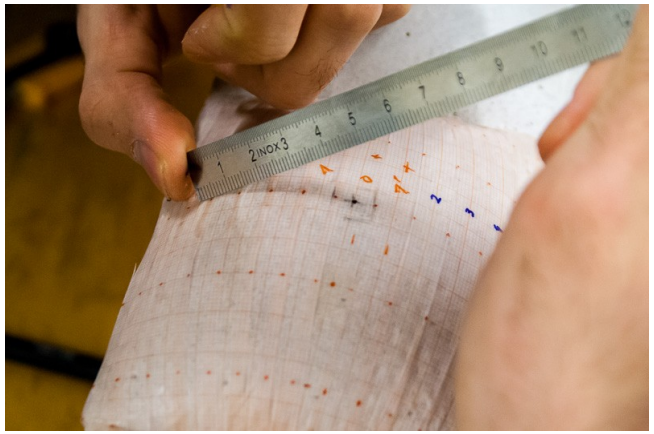

Abb. 338: Abmessen der Überlappung der Streifen

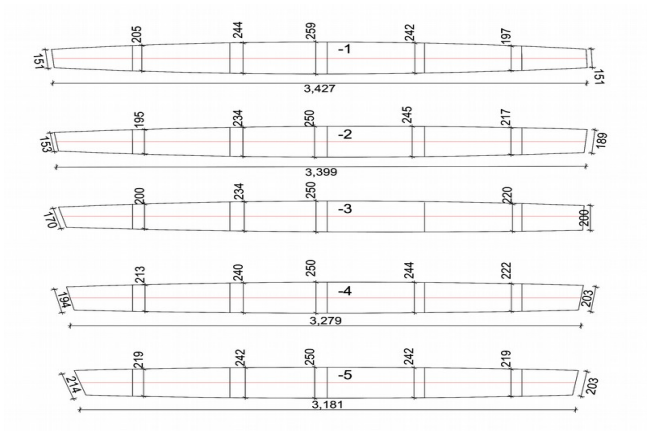

Abb. 339: Zuschnittsplan

Der Zuschnitt kann auch auf Gewebemodellen bestimmt werden - wie am Beispiel eines Zuschnittmodells des IL zu sehen [Hennicke 2012].

(i) Um die Oberfläche von elastischen Stoffen zu stabilisieren und härten, könnte ein Modellbau- oder Fixierlack verwendet werden [Hennicke 2012].

Abb. 340: Zuschnittsmodell des IL

Abb. 341: Zuschnittsmodell des IL

5 Schlussfolgerung

Die existierende Literatur und Dokumentation zur Modell-Technik mechanisch vorgespannter Membrankonstruktion wurde in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und in einer einfachen Schritt-für-Schritt-Anleitung ausgearbeitet. Mit der Absicht, auch Ungeübten einen möglichst raschen Einstieg zu ermöglichen, wurden eigene Erkenntnisse und Anwendungsempfehlungen in die Dokumentation aufgenommen.
Dabei wurden die ursprünglichen Modellmethoden, die zum Großteil aus den 1950er und 1960er Jahren stammen, für die Nutzung und die Bedürfnisse moderner Möglichkeiten weiterentwickelt. So wurden Adaptierungen entwickelt, die helfen, durch einfache und leicht verfügbare Mittel die Effizienz und Genauigkeit zu erhöhen, wie z. B. der Einsatz eines Kreuzlinienlasers, um das exakte Ausrichten von Modell und Kamera zu erleichtern oder Krümmungslinien auf dem Modell berührungslos analysieren zu können sowie die Verwendung von Photogrammetrie-Apps, um 3D-Modelle zu erstellen oder das Bemühen, mit einfachen Experimenten das Dehnungsverhalten des Strumpf-Stoffs zu veranschaulichen und zu kontrollieren.
Als besonders wichtig hat sich die Auseinandersetzung mit den Eigenschaften des Materials erwiesen. Besonders der Strumpf-Stoff kann durch das unterschiedliche Dehnungsverhalten in den Web-Achsen das Ergebnis negativ beeinflussen. Es wurden einfache Möglichkeiten zur Abschätzung des Dehnungsverhältnisses untersucht und Kompensations-Möglichkeiten entwickelt.

Für die weitere planerische Bearbeitung der gefunden Form wurden die vorhanden Methoden untersucht und auf die gegenwärtigen Bedürfnisse zur digitalen Bearbeitung weiterentwickelt. Die hocheffiziente und einfache Möglichkeit der Formerfassung über die Hauptkrümmungen - ursprünglich über die Konturen durch Schattenwurf - wurde auf eine kombinierte Verwendung von Fotografie und Linienlaser erweitert und die Schritte zur Rekonstruktion als digitales Modell beschrieben.
Alternative Ansätze zur Digitalisierung der gesamten Oberfläche mittels 3D-Scanner oder Photogrammetrie wurden ebenfalls aufgezeigt. Diese Methoden haben sich als genaue Möglichkeiten der Formerfassung erwiesen. Allerdings machte der hohe Zeitaufwand - vor allem zur Eliminierung möglicher negative Einflüsse wie ungünstige Beleuchtung, schlechter Kontrast oder nachteilige Hintergrund-Strukturen - den erhofften Vorteil gegenüber der Formerfassung mittels Hauptkrümmungen wieder zunichte.
Weiters wurden die Grundzüge der digitalen Formfindung anhand der Software Formfinder beleuchtet und deren Anwendung exemplarisch dokumentiert. Um die Einordnung von physischem und digitalem Ansatz der Formfindung zu ermöglichen, wurden die gefunden Formen beispielhaft anhand der Hauptkrümmungen verglichen.

Abschließend kann bemerkt werden, dass dem physischen Modell für den Entwurf von Membrankonstruktion eine wichtige und vor allem zur Aneignung der Grundkenntnisse eine bedeutende Rolle spielen kann. Diese Rolle wird aber aufgrund der steigenden Verfügbarkeit von Software-Lösungen in diesem Bereich oft übersehen.

Die Anwendung einer Software hängt von einer Vielzahl von Parametern ab - wie auch die Formfindung am physischen Modell. So kann etwa die Anpassung der Form am physischen Modell durch Veränderung der Spannungen bewirkt werden und ergibt sich aus der Systematik des Modellbaus und den zuvor durchgeführten Schritten zur Erstellung des Modells.
Dieser Zusammenhang zwischen Herstellung der Form und Veränderung deren Eigenschaften besteht am digitalen Modell nicht auf diese direkte Weise - ohne Kenntnis der jeweiligen Einstellungsmöglichkeiten (die bei der Erstellung der Form keine Rolle gespielt haben) können Eigenschaften wie die Spannung in Membran oder Seilen nicht angepasst werden.
Die Einflussfaktoren am bei der experimentellen Formfindung sind allerdings vom Anwender bewusst ausgewählt und meist recht überschaubar und die physischen Zusammenhänge zwischen Form - Unterstützung - Spannung erschließen sich in der Anwendung natürlich und zwangsläufig.
Diese Qualität des physischen Modells - der direkte Umgang mit Konstruktionen und deren Materialität - kann auch von den besten Software-Lösung nicht erreicht werden.

Es muss aber klar festgehalten werden, dass die digitale Formfindung hier nicht als eine schlechte Möglichkeit dargestellt werden soll. Im Gegenteil bietet sie viele Vorteile, die am physischen Modell nur schwer umgesetzt werden können, wie z. B. einfache Anpassbarkeit des Modells, numerische Analysemöglichkeiten (Spannungen in Seilen oder Membran etc.). Diese Vorteile kommen aber vorwiegend bei der Weiterentwicklung und Analyse einer bereits gefundenen Form zu tragen und können die Vorzüge des physischen Modells zur Entwicklung der Entwurfsidee - insbesondere bei einer ungewohnten und noch nicht angewendeten Form - nicht ersetzen.

Physische wie digitale Methoden haben ihre Vor- und Nachteile. Die Verbindung der physischen Formfindung mit der digitalen Analyse und Weiterbearbeitung des Entwurfs - wie in dieser Arbeit dargestellt - bietet vor allem jenen, die neu in das Gebiet einsteigen, einen raschen Zugang zur Entwurfsentwicklung von Membrankonstruktionen durch die Aneignung der Grundkenntnisse am physischen Modell.

Quellenangaben

Bubner, Ewald. **1972**. ***Zum Problem der Formfindung vorgespannter Seilnetzflächen***. Stuttgart: Krämer.

Drew, Philip. **1976**. ***Frei Otto - Form und Konstruktion***. Hatje.

Ender, Ursula. **2012**. ***„Unit Zentralperspektive - Theorie“***. 7. Mai 2017 (http://www.unitarchitektur.at/login/resources/unit-zentral-perspektive-theorie-ue-120528.pdf).

Gaß, Siegfried. **1990**. ***IL 25 - Form, Kraft, Masse. 5. Experimente***. Stuttgart: Krämer.

Hennicke, Jürgen. **2012**. ***„Modellbau am Institut für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart“***. 16. Oktober 2012 (Interview).

Hennicke, Jürgen. **2015**. ***„Frei Otto - Finding the Form“***. TU-Wien. 27. Mai 2015 (Vortrag).

mcneel.com. **2017a**. ***„InterpCrv | Rhino 3-D modeling“***. 9. Mai 2017 (http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/en-us/commands/interpcrv.htm).

mcneel.com. **2017b**. ***„Orient3Pt | Rhino 3-D modeling“***. 11. Mai 2017 (http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/en-us/commands/orient3pt.htm).

mcneel.com. **2017c**. ***„Patch | Rhino 3-D modeling“***. 11. Mai 2017 (http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/en-us/commands/patch.htm).

mcneel.com. **2017d**. ***„PictureFrame | Rhino 3-D modeling“***. 9. Mai 2017 (http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/en-us/commands/pictureframe.htm).

mcneel.com. **2017e**. ***„Scale1D | Rhino 3-D modeling“***. 11. Mai 2017 (http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/en-us/commands/scale1d.htm).

mcneel.com. **2017f**. ***„TweenCurves | Rhino 3-D modeling“***. 9. Mai 2017 (http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/en-us/commands/tweencurves.htm).

Meissner, Irene und Eberhard Möller. **2015**. ***Frei Otto: forschen, bauen, inspirieren; a life of research, construction and inspiration***. 1. Aufl. München: Detail - Institut für internationale Architektur-Dokumentation.

mls.tuwien.ac.at. **2017**. ***„Membrane Lightweight Structures: Arch. Dipl.-Ing. Jürgen Hennicke“***. 10. Mai 2017 (https://mls.tuwien.ac.at/program/faculty/faculty_member/?user_cecfaculty_pi1%5BshowUid%5D=1290&cHash=9b824a20efc5e6b23954c8097358b724).

Otto, Frei, Berthold Burkhardt, und Ilse Schmall, Hrsg. 1976. ***IL 16 - Zelte***. Stuttgart: Krämer.

ratgeber-und-hilfe.de. **2017**. ***„Größentabellen für Strumpfhosen und Strümpfe“***. 1. April 2017 (http://www.ratgeber-und-hilfe.de/groessentabellen-fuer-strumpfhosen-und-struempfe).

Roithmayr, Robert. **2017**. ***Formfinder Software (2005 - 2017)***. (https://www.formfinder.at/).

Roland, Conrad. **1965**. ***Frei Otto - Spannweiten: Ideen und Versuche zum Leichtbau; ein Werkstattbericht***. Berlin; Wien [u.a.]: Ullstein.

Sastre, Ramon. **2017**. ***„Software Tensile Architecture“***. 7. Mai 2017 (http://tecno.upc.edu/cotens/software.htm).

Sedlak, Vinzenz. **1979**. ***„Pneumatic Membrane Cushion Prototype - Course Report, Surface & Spatial Structures B“***. LSRU (USNW).

Sedlak, Vinzenz. **1990**. ***„Typologiestudien (LSRU 1976 - 1990)“***.

Sedlak, Vinzenz. **2012a**. ***„Tragwerksentwicklung am Modell“***. (Lehrveranstaltung an der TU-Wien).

Sedlak, Vinzenz. **2012b**. ***„Tragwerksentwicklung am Modell“***. (Bericht).

Sedlak, Vinzenz. **2012c**. ***„Tragwerksentwicklung am Modell - Modellbau-Workshop“***. (Anleitung).

Sedlak, Vinzenz. **2012d**. ***„Tragwerksentwicklung am Modell - Modellbau-Workshop“***. (Vorlesung).

Sedlak, Vinzenz. **2017a**. ***„Entwurf von Membrankonstruktionen anhand physischer Modelle“***. 15. Mai 2017 (Interview).

Sedlak, Vinzenz. **2017b**. ***SDA Conceptual Structural Design Aid (Datenbank, LSRU, University of New South Wales, Sydney. 1996 - 2017)***. (http://tomcat.formfinder.at/sda).

Sigmund, Bettina. **2016**. ***„Die Denkmodelle des Meisters des Leichtbaus erforschen“***. 4. Mai 2017 (http://www.detail.de/artikel/die-denkmodelle-des-meisters-des-leichtbaus-erforschen-28496).

tiss.tuwien.ac.at. **2017**. ***„TU-Wien Lehrangebot: Vinzenz Sedlak“***. 25. Mai 2017 (https://tiss.tuwien.ac.at/course/courseList.xhtml?dswid=5960&dsrid=93&windowId=a5d&lecturerOid=682961).

wikipedia.org. **2017a**. ***„Kreissegment“***. 12. April 2017 (https://de.wikipedia.org/wiki/Kreissegment).

wikipedia.org. **2017b**. ***„Strumpfhose“***. 5. April 2017 (https://de.wikipedia.org/wiki/Strumpfhose#Material).

wikivisually.com. **2017**. ***„Gewirke - WikiVisually“***. 5. April 2017 (http://wikivisually.com/lang-de/wiki/Gewirke).

Literatur

Modellmethoden

Gaß, Siegfried
1990 ***IL 25 - Form, Kraft, Masse. 5. Experimente***. Stuttgart: Krämer.

Roland, Conrad
1965 ***Frei Otto - Spannweiten: Ideen und Versuche zum Leichtbau ; ein Werkstattbericht***. Berlin ; Wien [u.a.]: Ullstein.

Bubner, Ewald
1972 ***Zum Problem der Formfindung vorgespannter Seilnetzflächen***. Stuttgart: Krämer.

Drew, Philip
1976 ***Frei Otto: Form und Konstruktion***. Hatje.

Sedlak, Vinzenz
1980 ***Membrane Structures & Application Proposal: Faculty Common Room - Course Report, Surface & Spatial Structures A***. LSRU (USNW).
1979 ***Pneumatic Membrane Cushion Prototype - Course Report, Surface & Spatial Structures B***. LSRU (USNW).

Bach, Klaus, Berthold Burkhardt, und Frei Otto
1988 ***IL 18 - Seifenblasen***. Stuttgart: Krämer.

Müller, Robert K.
1971 ***Handbuch der Modellstatik***. Berlin [u.a.]: Springer.

Hossdorf, Heinz
1971 ***Modellstatik***. Wiesbaden u.a.: Bau-Verlag.
2003 ***Heinz Hossdorf - Das Erlebnis Ingenieur zu sein***. Basel [u.a.]: Birkhäuser.

Höller, Ralf
1999 ***FormFindung : architektonische Grundlagen für den Entwurf von mechanisch vorgespannten Membranen und Seilnetzen***. 1. Aufl. Mähringen: Balistier.

Kern, Christian, und Florian Rist
2010 ***Integration physischer und digitaler Designmethoden***. Detail: Zeitschrift für Architektur + Baudetail 5: 442–443.

Membrankonstruktion

Nerdinger, Winfried, Irene Meissner, und Frei Otto
2005 ***Frei Otto - das Gesamtwerk: leicht bauen, natürlich gestalten ; [... anlässlich der Ausstellung „Frei Otto - Leicht bauen, natürlich gestalten“ im Architekturmuseum der TU München in der Pinakothek der Moderne vom 26. Mai bis 28. August 2005]***. Basel [u.a.]: Birkhäuser.

Otto, Frei
1962 ***Zugbeanspruchte Konstruktionen: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen. 1. Pneumatische Konstruktionen***. Frei Otto, Hrsg. Frankfurt [u.a.]: Ullstein.
1966 ***Zugbeanspruchte Konstruktionen: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen. 2. Grundbegriffe und Übersicht der zugbeanspruchten Konstruktionen***. Frei Otto, Hrsg. Frankfurt [u.a.]: Ullstein.

Blümel, Dieter, Rainer Graefe, Jürgen Hennicke, u. a.
1972 ***IL 5 - Wandelbare Dächer***. Uta Pankoke, Hrsg. Stuttgart: Krämer.

Drüsedau, Heide
1983 ***IL 15 - Lufthallenhandbuch***. Frei Otto, Hrsg. Stuttgart: Krämer.

Otto, Frei, Berthold Burkhardt, und Ilse Schmall, Hrsg.
1976 ***IL 16 - Zelte***. Stuttgart: Krämer.

Glaeser, Ludwig
1978 ***IL 17 - The Work of Frei Otto and His Teams 1955-1976***. Frei Otto, Hrsg. Institut für Leichte Flächentragwerke.

Krause-Valdovinos, Georgina
1984 ***IL 30 - Schattenzelte***. Stuttgart: Krämer.

Hoppe, Diether S.
2007 ***Freigespannte textile Membrankonstruktionen: geschichtliche, materialtechnische, konstruktive und gegenwärtige Entwicklungen***. Wien [u.a.]: Böhlau.

Seidel, Michael
2008 ***Textile Hüllen- Bauen mit biegeweichen Tragelementen: Materialien, Konstruktion, Montage***. Ernst & Sohn.

Knippers, Jan
2010 ***Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion***. München: Inst. f. Internat. Arch.-Dok.

Moro, José Luis, Bernes Alihodzic, Matthias Rottner, und Matthias Weißbach
2009 ***Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail: Band 2 Konzeption***. Berlin, Heidelberg: Springer.

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

Ishii, Kazuo
1999 ***Membrane Designs and Structures in the World***. Tokyo: Shinkenchiku-sha.

Forster, Brian, und Marijke Mollaert
2004 ***The European Design Guide for Tensile Surface Structures***. Tensinet.

Berger, Horst
2005 ***Light Structures, Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture***. AuthorHouse.

Digitale Ressourcen / Archiv

Sedlak, Vinzenz
2017 ***SDA Conceptual Structural Design Aid (Datenbank, LSRU, University of New South Wales, Sydney. 1996 - 2017)***. http://tomcat.formfinder.at/sda.

Roithmayr, Robert
2017 ***Formfinder Software (2005 - 2017)***. https://www.formfinder.at/.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Carlipp: Modelle mit Schraubenfedern [Gaß 1990] 12
Abb. 2: Seifenhautversuch (Tanzbrunnen) [IL] 14
Abb. 3: Entwurfsmodell (1957) [Roland 1965] 16
Abb. 4: Messmodell (1957) [Roland 1965] 16
Abb. 5: Zuschnittsmodell (1957) [Roland 1965] 17
Abb. 6: Gummihautmodell (1958) [Roland 1965] 17
Abb. 7: Höhenlinien-Tastgerät (1958) [Roland 1965] 18
Abb. 8: Linienraster (Modellversuch 1964) [Roland 1965] 18
Abb. 9: Vorentwurfsmodell 23
Abb. 10: Entwurfsmodell [IL] 23
Abb. 11: Tragwerksmodell [TU-Wien, ITI] 24
Abb. 12: Messmodell [IL] 24
Abb. 13: Zuschnittsmodell [IL] 24
Abb. 14: Sechsecknetz-Modell [Gaß 1990] 28
Abb. 15: Detail eines Gittertüll-Modells [Gaß 1990] 28
Abb. 16: Seifenhautgerät der LSRU [Sedlak 1979] 29
Abb. 17: Seifenhautgerät der LSRU [Sedlak 2012d] 29
Abb. 18: Seifenhautgerät (TU-Wien) 29
Abb. 19: Seifenhautgerät (Absenkvorrichtung) 29
Abb. 20: Gummihaut-Versuch 30
Abb. 21: Kissen mit Seilunterstützung 30
Abb. 22: Kissen mit Seilunterstützung 30
Abb. 23: Gummihautmodell mit Gips-Füllung 30
Abb. 24: Gipsmodell der Kissen-Oberseite 30
Abb. 25: Modell-Studien an der LSRU [Sedlak 2012d] 32
Abb. 26: Typologie-Studie an der LSRU [Sedlak 1990] 32
Abb. 27: Beispiel für die Kategorisierung von Membrankonstruktion der LSRU [Sedlak 1990] 33
Abb. 28: SDA Kategorisierung: Überblick [Sedlak 1990] 34
Abb. 29: 1. Modell-Basis 36
Abb. 30: 2. Strumpf-Stoff 36
Abb. 31: 3. Stoff-Bespannung am Modell 36
Abb. 32: 4. Form-Kontrolle / Korrektur 36
Abb. 33: 5. Form-Analyse 36
Abb. 34: Weichfaserplatte 42
Abb. 35: Polystyrol-Hartschaumplatte 42
Abb. 36: Damenstrumpfhose 42
Abb. 37: Lotschnur 43
Abb. 38: Landkartennadel 43
Abb. 39: Stecknadel 43
Abb. 40: Sekundenkleber 44
Abb. 41: Heißkleber 44
Abb. 42: Stifte: Overhead-Marker 44
Abb. 43: Lineal 45
Abb. 44: Geodreieck 45
Abb. 45: Schieblehre 45
Abb. 46: Zirkelschneider 46
Abb. 47: Cutter 46
Abb. 48: Modellmesser 46
Abb. 49: Rollschneider 47
Abb. 50: Schere 47
Abb. 51: Scherenschärfer 47
Abb. 52: Schneidematten 48
Abb. 53: Pinzette 48
Abb. 54: Zangen 48
Abb. 55: Kreuzlinienlaser 49
Abb. 56: Gestell für den Hintergrund 50
Abb. 57: Gestell: Befestigung am Tisch 50
Abb. 58: Gestell: Befestigung durch Zwingen 50
Abb. 59: Foto-Tisch mit Hintergrund 50
Abb. 60: Beleuchtung, Stative, Linienlaser 51
Abb. 61: Galgen-Stativ: Vertikale Ausrichtung 51
Abb. 62: Galgen-Stativ: Objektiv-Achse 1 51
Abb. 63: Galgen-Stativ: Objektiv-Achse 2 51
Abb. 64: Kamera: Ausrichtung via App 51
Abb. 65: Linienlaser: Ausrichtung Modell - Kamera 52
Abb. 66: Modell-Platte 54

Abb. 67: Raster aufzeichnen 55
Abb. 68: 2 Modell-Platten in einem Schritt 55
Abb. 69: Überprüfung: Konzentrizität 55
Abb. 70: Spann-Platte mit Raster 56
Abb. 71: Strumpf-Stoff mit Raster 57
Abb. 72: Gespannter Strumpf-Stoff 57
Abb. 73: Strumpf-Stoff: Ausgangsform 58
Abb. 74: Strumpf-Stoff: Dehnung 58
Abb. 75: Strumpf-Stoff: Ausgedehnt 58
Abb. 76: Glatt-Ziehen des Strumpf-Stoffs 59
Abb. 77: Zuschneiden des Oberschenkelteils 59
Abb. 78: Markierung der Mitten und Enden 59
Abb. 79: Aufschneiden in Längsrichtung 59
Abb. 80: Glätten des Stoffs 59
Abb. 81: Randmarkierung / Mittelpunkt 59
Abb. 82: 2 Stoff-Stücke mittig am Raster befestigt 60
Abb. 83: Spannen ausgehend v. den Mittelachsen 60
Abb. 84: Abwechselnd zu den Ecken hin arbeiten 60
Abb. 85: Nachzeichnen des Rasters 60
Abb. 86: Diagonalen, Mittel- und Raster-Linien 60
Abb. 87: Durchzeichnung am unteren Stoff 60
Abb. 88: Anzeichnen des Test-Musters 61
Abb. 89: 2 Stoff-Stücke 90 ° zueinander verdreht 61
Abb. 90: Maximal-Dehnung (längs und quer) 61
Abb. 91: Einachsige Zugversuche [Gaß 1990] 62
Abb. 92: Dehnungsversuch mit Sechsecknetz [Gaß 1990] 62
Abb. 93: 2 deckungsgleiche Stoff-Stücke 62
Abb. 94: Dehnung: Längs-Richtung 62
Abb. 95: Dehnung: Quer-Richtung 62
Abb. 96: Versuch mit biaxialem Zug [Gaß 1990] 63
Abb. 97: Dehnung bei 4 unterschiedl. Gewichten 64
Abb. 98: Moderate Dehnung in Richtung A 64
Abb. 99: Dehnung steigend (relativ zu Gewicht) 64
Abb. 100: Starke Dehnung in Richtung B 64
Abb. 101: Dehnung sinkend (relativ zu Gewicht) 64
Abb. 102: Dehnung B relativ zu A (Ø 270 %) 65
Abb. 103: Kürzen der stärkeren Dehn-Richtung 65
Abb. 104: Stoff-Stück mit Dehnungskompensation 65
Abb. 105: Spann-Tisch der LSRU [Sedlak 2012d] 66
Abb. 106: HP-Fläche 68
Abb. 107: Modell-Platte 68
Abb. 108: Seitenteile: zugeschnitten 69
Abb. 109: Verbindung der Teile 69
Abb. 110: Markierung der Teil 69
Abb. 111: Raster auf Seitenteile übertragen 70
Abb. 112: Stoff-Befestigung: ausgehend: mittig 70
Abb. 113: Befestigung: zu d. Ecken hin 70
Abb. 114: Die fertig gespannte Membran-Fläche 71
Abb. 115: Hauptkrümmung verdeckt 72
Abb. 116: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 73
Abb. 117: Hochpunkt - Mast mit Ring 74
Abb. 118: Modell-Platte: Bohrung für Mast 74
Abb. 119: Mast zuschneiden 75
Abb. 120: Mast-Ende mit Sandpapier abrunden 75
Abb. 121: Mast: Höhe über Platten-Oberkante 75
Abb. 122: Mast: Fixierung auf Unterseite 75
Abb. 123: Ausrichten des Masts 76
Abb. 124: Rundscheibe aus Karton ausschneiden 76
Abb. 125: Auflager der Scheibe aus Styropor 76
Abb. 126: Raster auf Seitenteile übertragen 76
Abb. 127: Ankleben der Styropor-Auflage 76
Abb. 128: Ankleben der Scheibe auf der Auflage 77
Abb. 129: Fixierung der Scheibe zum Trocknen 77
Abb. 130: Befestigung: ausgehend: mittig 77
Abb. 131: Stoff-Bespannung: 1. mittig 77
Abb. 132: Befestigung: schrittweise zu d. Ecken hin 77
Abb. 133: Stoff-Bespannung: komplett 77
Abb. 134: Auf das Modell projizierte Laserlinien 78
Abb. 135: Überprüfung: Konzentrizität 78
Abb. 136: Leichte Einschnürung unter dem Ring 78

Abb. 137: Überprüfung mit Kreuzlinienlaser 78
Abb. 138: Straffung des Stoffs am Ring 78
Abb. 139: Überprüfung mit Kreuzlinienlaser 78
Abb. 140: Hauptkrümmung 1 79
Abb. 141: Hauptkrümmung 2 79
Abb. 142: Aufsicht 79
Abb. 143: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 80
Abb. 144: Kreuzlinienlaser: Aufstellung 81
Abb. 145: Kreuzlinienlaser und Foto-Tisch 81
Abb. 146: Mast ausrichten: Richtung B 81
Abb. 147: Mast ausrichten: Richtung A 81
Abb. 148: Ungleichmäßige (ovale) Form 82
Abb. 149: Stärker gespannte Richtung dehnen 82
Abb. 150: Stoff vorsichtig Dehnen 82
Abb. 151: Gleichmäßige (konzentrische) Form 82
Abb. 152: Ausrichtung von Modell und Kamera 83
Abb. 153: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 84
Abb. 154: Hochpunkt - Mast mit Rosette 85
Abb. 155: Vorbereitete Modell-Platte mit Mast 85
Abb. 156: Befestigung: ausgehend: mittig 86
Abb. 157: Stoff-Bespannung: 1. mittig 86
Abb. 158: Befestigung: schrittweise zu d. Ecken hin 86
Abb. 159: Stoff-Bespannung: komplett 86
Abb. 160: Ungleichmäßige (ovale) Form 86
Abb. 161: Korrigierte (kreisrunde) Form 86
Abb. 162: Höhe der Rosette bestimmen 87
Abb. 163: Innen-Durchmesser für Schablone 87
Abb. 164: Schablone: Ring ausschneiden 87
Abb. 165: Schablone für 4 Rosetten-Bögen 87
Abb. 166: 4-Teilung der Rosette anzeichnen 87
Abb. 167: Bögen der Rosette anzeichnen 87
Abb. 168: Schlaufe temporär fixieren 88
Abb. 169: Fixierung mit Sekundenkleber 88
Abb. 170: Leichtes Andrücken beim Trocknen 88
Abb. 171: Seilschlaufen aneinanderbinden 88
Abb. 172: Fixierung des Fadens mit Kleber 88
Abb. 173: Schlaufen an Mast-Spitze binden 88
Abb. 174: Schlaufen am Mast fixieren 89
Abb. 175: Ausschneiden der Rosette 89
Abb. 176: Fertiges Modell mit Rosette 89
Abb. 177: Hauptkrümmung 1 90
Abb. 178: Hauptkrümmung 2 90
Abb. 179: Aufsicht 90
Abb. 180: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 91
Abb. 181: Schablonen für Durchmesser und Bögen 92
Abb. 182: Konstruktion der Rosetten-Bögen 92
Abb. 183: Bogen-Schablone (innere Scheibe) 92
Abb. 184: Bogen-Schablone (außen) 92
Abb. 185: Hochpunkt - Mast mit Augschlaufe 93
Abb. 186: Stoff-Bespannung: komplett 93
Abb. 187: Festlegung des Scheitelpunkts 94
Abb. 188: Anknoten der Augschlaufe 94
Abb. 189: Kontrolle einer konzentrischen Form 94
Abb. 190: Anpassung der Krümmung 94
Abb. 191: Fixierung durch Sekundenkleber 94
Abb. 192: Stabilisieren zum Trocknen 94
Abb. 193: Ausschneiden der Augschlaufe 95
Abb. 194: Fertiges Modell mit Augschlaufe 95
Abb. 195: Hauptkrümmung 1 96
Abb. 196: Hauptkrümmung 2 96
Abb. 197: Aufsicht 96
Abb. 198: Hauptkrümmung 3 96
Abb. 199: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 97
Abb. 200: Hochpunkt - Mast mit Seil 98
Abb. 201: Modell-Platte mit Mast 98
Abb. 202: Fixierung der Lotschnur am Mast 99
Abb. 203: Abstimmung aller 4 Seillängen 99
Abb. 204: Stoff-Bespannung: komplett 99
Abb. 205: Höhenschichtlinie von der Seite 100
Abb. 206: Höhenschichtlinie von vorne 100

Abb. 207: Höhenschichtlinie von oben 100
Abb. 208: Hauptkrümmung 1 (diagonal) 101
Abb. 209: Hauptkrümmung 2 (frontal) 101
Abb. 210: Hauptkrümmung 3 (diagonal) 101
Abb. 211: Aufsicht 101
Abb. 212: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 102
Abb. 213: Frontal-Ansicht 103
Abb. 214: Hauptkrümmung 1 (diagonal) 103
Abb. 215: Hauptkrümmung 2 (frontal) 103
Abb. 216: Aufsicht 103
Abb. 217: Mast 104
Abb. 218: Frontal-Ansicht 104
Abb. 219: Ansicht (schräg m. Mittelmarkierung) 105
Abb. 220: Hauptkrümmung 1 (diagonal) 105
Abb. 221: Hauptkrümmung 2 (frontal) 105
Abb. 222: Aufsicht 105
Abb. 223: Ansicht (schräg m. Mittelmarkierung) 106
Abb. 224: Hauptkrümmung 1 (diagonal) 106
Abb. 225: Hauptkrümmung 2 (frontal) 106
Abb. 226: Hauptkrümmung 3 (diagonal) 106
Abb. 227: Aufsicht 106
Abb. 228: Typ 6: Bogen 107
Abb. 229: Modell-Platte mit Eck-Sockel 107
Abb. 230: Eck-Sockel mit Holzleim bestreichen 108
Abb. 231: Eck-Sockel mit Überstand fixieren 108
Abb. 232: Kleiderbügel zuschneiden 108
Abb. 233: Draht an Schablone biegen 109
Abb. 234: Schrittweise Annäherung an Form 109
Abb. 235: Ungleichm. Krümmung ausgleichen 109
Abb. 236: Bogenfuß zurechtbiegen 109
Abb. 237: Überprüfung der Form 109
Abb. 238: Loch zur Befestigung des Bogens 110
Abb. 239: Ausrichtung des Bogens über Achse 110
Abb. 240: Überprüfung der Bogen-Höhe 110
Abb. 241: Bogenfuß mit Kleber fixiert 110
Abb. 242: Stoff-Bespannung: 1. mittig 111
Abb. 243: Befestigung: ausgehend: mittig 111
Abb. 244: Befestigung: schrittweise zu d. Ecken hin 111
Abb. 245: Stoff-Bespannung: komplett 111
Abb. 246: Linienlaser: Bogenausrichtung 112
Abb. 247: Linienlaser: Bogenmittelpunkt 112
Abb. 248: Bogenfixierung: Seil (Bogenmitte) 112
Abb. 249: Bogenfixierung: Seil (Basisverankerung) 112
Abb. 250: Hauptkrümmung 1 113
Abb. 251: Hauptkrümmung 2 113
Abb. 252: Aufsicht 113
Abb. 253: Aufsicht (skaliert und ausgerichtet) 113
Abb. 254: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 114
Abb. 255: Bogen-Dimensionen (Kreissehne) 115
Abb. 256: 1. Halbkreis an der Kreissehne 115
Abb. 257: 2. Kreis durch Stichhöhe angepasst 115
Abb. 258: 3. Ausdruck ohne Skalierung 115
Abb. 259: Fertige Vorlage 115
Abb. 260: Relativ steifer Draht von der Rolle 116
Abb. 261: Biegen unter gleichmäßigem Druck 116
Abb. 262: Korrektur der Krümmung an einer Kante 116
Abb. 263: Hochpunkt - Mast mit Ring m. Seilrand 117
Abb. 264: Ausdruck mit maßstäblichem Stich 117
Abb. 265: Anzeichnen des Stichs 117
Abb. 266: Dünn aufgetragener Sekundenkleber 118
Abb. 267: Andrücken unter leichter Spannung 118
Abb. 268: Ausschneiden mit Gegendruck 118
Abb. 269: Fertiges Modell mit 4 Seilrändern 118
Abb. 270: Eingenähter Fade / Flüssigkleber [Gaß 1990] 118
Abb. 271: Aufsicht 118
Abb. 272: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 119
Abb. 273: Optische Bank für Parallellicht [Gaß 1990] 123
Abb. 274: Umsetzung einer optischen Bank mit Parallellicht [IL] 123
Abb. 275: Anordnung von Kamera / Beleuchtung [Gaß 1990] 124
Abb. 276: Optische Bank mit Mattscheibe [Gaß 1990] 124

Abb. 277: Linienlaser: Ausrichten des Modells 125
Abb. 278: Ausrichtung frontal mittig am Modell 125
Abb. 279: Kamera (Objektiv) auf Fotoachse 126
Abb. 280: Kamera auf Modell-Mitte ausgerichtet 126
Abb. 281: Foto als Vorlage im CAD-Programm 127
Abb. 282: Skalierung mittels Referenz-Strecke 128
Abb. 283: Skaliertes Foto 128
Abb. 284: Rekonstruktion mittels Fluchtlinien 128
Abb. 285: Krümmungslinien und Spiegelachsen 128
Abb. 286: Mittelung der Krümmungslinien (rot) 129
Abb. 287: Fertige Hauptkrümmungslinie 1 129
Abb. 288: 2. Hauptkrümmungslinie gespiegelt 129
Abb. 289: Mittelung der Krümmungslinien (rot) 129
Abb. 290: Fertig: Hauptkrümmung 2 129
Abb. 291: Hauptkrümmungen: Überlagerung physisches und digitales Modell 130
Abb. 292: Räumlicher Aufbau über Grundriss 131
Abb. 293: Formgenerierung über 2 Felder am Eck 131
Abb. 294: Rekonstruktion mittels Fluchtlinien 132
Abb. 295: Krümmungslinien und Spiegelachsen 132
Abb. 296: Verdeckte Hauptkrümmung (in Ansicht) 133
Abb. 297: Perspektive mit Hauptkrümmung 133
Abb. 298: Krümmungslinie einer komplexen Form 134
Abb. 299: Versetzte Krümmungslinie 134
Abb. 300: Photogrammetrie am IL: Prinzipskizze [Bubner 1972] 135
Abb. 301: Scan-Tische 135
Abb. 302: Photogrammetrie am IL: Aufbau [Bubner 1972] 135
Abb. 303: 123D Catch: Fotoserie 1 [Autodesk 123D] 135
Abb. 304: 123D Catch: Fotoserie 2 [Autodesk 123D] 135
Abb. 305: Beweglicher Hintergrund: Position 1 136
Abb. 306: Beweglicher Hintergrund: Position 2 136
Abb. 307: Kamera-Modus der App 136
Abb. 308: Zu verarbeitende Fotoserie 136
Abb. 309: Rekonstruierte 3D-Form [Autodesk 123D] 136
Abb. 310: Blender: STL Import des 3D-Modells 137
Abb. 311: Blender: Bereinigen des 3D-Modells 137
Abb. 312: Blender: Bereinigtes Modell 137
Abb. 313: Rhino: importiertes 3D-Modell (STL) 138
Abb. 314: Hauptkrümmung: Endpunkte 138
Abb. 315: Schnittebenen: Bezugsebene 138
Abb. 316: Schnittebene (Section) 138
Abb. 317: Hauptkrümmung 1 138
Abb. 318: Hauptkrümmungen 1 + 2 138
Abb. 319: Formfinder: Vom Grundriss zur 3D-Form 140
Abb. 320: Rhino: DXF-Import aus Formfinder 141
Abb. 321: Hauptkrümmungen (Formfinder) 141
Abb. 322: HP-Fläche (Formfinder) 143
Abb. 323: Grundriss-Form 143
Abb. 324: Anheben der Ecken 143
Abb. 325: Anpassen des Rands 144
Abb. 326: Fertige HP-Fläche 144
Abb. 327: Rhino: DXF-Import 144
Abb. 328: Mast mit Ring (Formfinder) 145
Abb. 329: Grundriss-Form, radialer Netztyp 145
Abb. 330: Anpassen des Rands 145
Abb. 331: Mast mit Ring (Formfinder) 146
Abb. 332: Bogen: Höhe und Neigung 146
Abb. 333: Bogen (Rand) 146
Abb. 334: Überprüfung Zuschnitt (ebene Bahnen) [Gaß 1990] 147
Abb. 335: Papierstreifen-Methode [Gaß 1990] 147
Abb. 336: Anbringen der Streifen 148
Abb. 337: Zuschnittsstreifen mit Messmarken 148
Abb. 338: Abmessen der Überlappung der Streifen 148
Abb. 339: Zuschnittsplan [Sedlak 2012b] 148
Abb. 340: Zuschnittsmodell des IL 148
Abb. 341: Zuschnittsmodell des IL 148