

HÄNGEMODELLE

**Formfindung für Bauwerke auf Basis von
physikalischen und digitalen Modellen**

Angefertigt von den Teilnehmern des Seminars

Ausgewählte Kapitel der Tragwerksplanung

an der

Fakultät für Architektur

Technische Universität Dresden

Betreut von

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger

Dr.-Ing. Tammam Bakeer

Dipl.-Ing. Alexander Peinelt

Vorwort

Der vorliegende Report wurde angefertigt von den Teilnehmern des "Seminars Ausgewählte Kapitel der Tragwerksplanung" zum Thema Hängemodelle, organisiert vom Lehrstuhl für Tragwerksplanung an der Fakultät Architektur der Technischen Universität Dresden.

Die Wichtigkeit der Thematik Hängemodelle beruht für den Architekten auf der Notwendigkeit die Beziehung zwischen Kraft und Form zu verstehen. Die Methoden bieten ein einfaches Werkzeug zur Entwicklung von druckbelasteten Strukturen. Sie basieren auf dem bekannten Prinzip der Umkehrung und erfordern kein weiterführendes Wissen in algorithmischer Geometrie oder rechnerischen Methoden der Optimierung.

Das Seminar zielt darauf ab, sich sowohl der physikalischen als auch der digitalen Herangehensweise aus verschiedenen Perspektiven zu nähern. Die Technik der Verwendung von physikalischen Modellen zur Formfindung wurde vorrangig durch Antoni Gaudí's Philosophie angeregt. Vorangehend wurden weniger komplexe Versuche von Heinrich Huebsch und Giovanni Poleni unternommen. Freiformschalendächer basierend auf physikalischen Hängemodellen wurden ausgiebig vom Schweizer Ingenieur Heinz Isler ab 1954 verwendet, welcher den Weg bereitete für Schalenstrukturen mit minimaler Wandstärke. Das Seminar stellte die Methoden und Materialien vor, die von Gaudí, Isler, Tomlow und anderen genutzt wurden. Der Hauptfokus lag aber darauf, von den heute verfügbaren Techniken und Materialien zu profitieren, sowie die Hängemodelle zu verfestigen und in umgedrehter Form präsentieren zu können.

Zusätzlich zu den physikalischen Werkzeugen behandelt das Seminar digitale Werkzeuge auf dem aktuellen Stand der Technik zur optimalen Formfindung mit Hilfe von Hängemodellen. Folgende verschiedene Methoden für digitale Hängemodelle wurden vorgestellt: Dynamische Entspannung, Partikel-Feder-Systeme, Finite Elemente, Querkraftdichte Methode und die Stützlinien-Netzwerk Analyse. Die Studenten im Seminar arbeiteten primär mit zwei verschiedenen digitalen Werkzeugen zur Modellierung von Freiformschalen. Das erste ist RhinoVAULT, welches ein Plug-in für die Software Rhinoceros ist und von der BLOCK Research Group entwickelt wurde. Es kann für die Gestaltung von effizienten Freiformschalen auf Basis der Stützlinien-Netzwerk Analyse verwendet werden. Das zweite ist Blender, eine Open-Source Software zur 3D-Modellierung und Animation. Die „Softbody-Funktion“ in Blender auf Basis der dynamischen Entspannung wurde erfolgreich zur Erstellung von Hängemodellen eingesetzt. Kurze Einführungen in die Benutzung der beiden Programme sind im Anhang beigefügt.

Die Studenten arbeiteten während des Seminars in kleinen Gruppen um ihre eigenen Hängemodell-Formen umzusetzen. Die kooperative Umgebung gab ihnen die Möglichkeit ihre eigenen Fähigkeiten auszuloten und Problemlösungsstrategien zu entwickeln. Berichte über den Arbeitsstand wurden von den Gruppen regelmäßig im Seminar vorgestellt. Der rege Erfahrungsaustausch förderte das kritische Denken und die Fähigkeit technische Informationen effizient zu kommunizieren.

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger Dr.-Ing. Tammam Bakeer Dipl.-Ing. Alexander Peinelt

Hanging Models - Formfinding of Structures Based on Physical and Digital Modeling



The present report was prepared by the attendees of the seminar advanced chapters of structural design for the topic of hanging models organised by the chair of structural design, Faculty of Architecture, Dresden University of Technology.

The importance of the subject of hanging models for architects originates from the need to understand the interrelation between the force and the shape by means of simple tools that satisfy a mechanical basis within the structural behaviour in compression.

Hanging models enable the designer to determine the optimal form of structures carrying loads purely in compression. It is based on the known principle of inverse and doesn't require any special knowledge in geometric computing and numerical methods of optimization.

The seminar intends to deal with the topic from different perspectives, and focuses on the two main approaches of physical and digital modelling. The technique of using physical models for form-finding was inspired basically by Gaudi's philosophy. Previously, less sophisticated attempts were made by Heinrich Huebsch and Giovanni Poleni. The design free-form shell roofs based on physical hanging models were extensively used by Swiss engineer Heinz Isler beginning in 1954 who pioneered shell structures with minimal thickness. The seminar introduced the methods and materials used in the by Gaudi, Isler, Tomlow, and others, more attention were made to benefit from today's available modelling materials, as well as, stiffening the hanging model to be presented in an inverse form.

In addition to the physical tools, the seminar deals with the state of the art digital tools for optimal form finding approaches based on hanging models. Several methods were proposed for digital hanging modelling, namely: Dynamic Relaxation, Particle-Spring systems, Finite Elements, Force density method and Thrust Network Analysis. The seminar was focused mainly on two digital tools to be used by students for modelling of free form shells. The first is RhinoVAULT, which is a plug-in for Rhino developed at the BLOCK Research Group. This tool can be used for the design of efficient freeform shells

based on the Thrust Network Analysis. The second is Blender which is free and open-source 3D computer graphics software. The soft body tool based on Dynamic Relaxation in Blender has been used efficiently for hanging modelling. Short tutorials for the use of both digital tools are added to this report in Appendixes.

The students worked in small groups during the seminar to establish their own hanging model forms. This cooperative environment gave them the possibility to explore their own intellectual capabilities and to develop problem-solving strategies. Several oral stage reports were presented during the seminar by each group. The presentation environment was very suit to foster critical thinking and to share the ideas and encourage each other with their excitement as well as practicing the skills of effectively communicating technical information.

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger Dr.-Ing. Tammam Bakeer Dipl.-Ing. Alexander Peinelt

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 3 |
| 1 Eine Fahrradstation am Campus der TU Dresden auf der Grundlage eines Hängemodells | 11 |
| 1.1 Einführung | 12 |
| 1.2 Inspiration | 13 |
| 1.3 Entwicklung eines digitalen Modells..... | 14 |
| 1.3.1 Formfindung..... | 14 |
| 1.3.2 Arbeiten mit CAD-Programmen..... | 15 |
| 1.4 Ergebnisse..... | 18 |
| 1.4.1 Rapid Prototyping | 18 |
| 1.4.2 Photogrammetrie | 19 |
| 1.5 Auswertung..... | 21 |
| 1.5.1 Überlegungen zur Realisierung..... | 21 |
| 1.5.2 FEM-Analyse | 21 |
| 1.6 Literaturverzeichnis..... | 22 |
| 2 Form Überprüfung von bestehenden Hängemodell Bauten - Fallstudie des Dachgeschosses der Casa Milá | 23 |
| 2.1 Einführung | 23 |
| 2.2 Überprüfung des Modells | 24 |
| 2.2.1 Materialwahl..... | 25 |
| 2.2.2 Wachsmodell | 25 |
| 2.3 Untersuchung der Bogenform | 26 |
| 2.4 Auswertung der Ergebnisse | 29 |
| 2.5 Erstellung des Modells..... | 29 |
| 2.6 Literaturverzeichnis..... | 32 |
| 3 Nutzung physikalischer und digitaler Hängemodelle zur Formfindung von Dachkonstruktionen – Fallstudie Tramstation in Albertplatz Dresden. | 33 |
| 3.1 Einführung | 33 |
| 3.2 Inspiration..... | 34 |
| 3.3 Entwicklung des Modells..... | 34 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3.1 | Versuch 1: Gipsmodelle mit Leinen- und Baumwollstoff | 35 |
| 3.3.2 | Versuch 2: Glasfasermodelle mit Epoxidharz | 37 |
| 3.3.3 | Digitalisierung mit Blender | 38 |
| 3.3.4 | Digitalisierung anhand einer Photogrammetrie | 38 |
| 3.4 | Entwurf | 39 |
| 3.4.1 | Überlegungen zur Realisierung | 42 |
| 3.5 | Auswertung der Ergebnisse | 42 |
| 3.5.1 | Auswertung Versuch 1 Gipsmodelle | 42 |
| 3.5.2 | Auswertung Versuch 2 Glasfasermodelle | 42 |
| 3.5.3 | Auswertung Digitalisierung mit Blender | 42 |
| 3.5.4 | Auswertung Digitalisierung anhand einer Photogrammetrie | 42 |
| 3.5.5 | Auswertung der FEM-Analyse | 43 |
| 3.6 | Allgemeines Fazit und Entscheidung | 43 |
| 3.7 | Literaturverzeichnis | 44 |
| 4 | Nutzung physikalischer und digitaler Hängemodelle zur Formfindung von Dachkonstruktionen – Fallstudie Straßenbahnhaltestelle in Dresden Bühlau | 45 |
| 4.1 | Einführung | 46 |
| 4.2 | Inspiration | 46 |
| 4.3 | Entwicklung des Modells | 48 |
| 4.4 | Auswertung der Ergebnisse | 52 |
| 4.5 | Literaturverzeichnis | 53 |
| 5 | Freiformfindung einer studentischen Mehrzweckhalle in Dresden | 55 |
| 5.1 | Einführung | 55 |
| 5.2 | Inspiration | 56 |
| 5.3 | Entwicklung des Modells | 56 |
| 5.3.1 | Materialauswahl | 56 |
| 5.3.2 | Physikalisches Modell | 57 |
| 5.3.3 | Digitalisierung | 60 |
| 5.4 | Auswertung der Ergebnisse | 61 |
| 5.5 | Literaturverzeichnis | 62 |

| | | |
|----------|----------------------|-----------|
| 6 | Anlagen | 63 |
| 6.1 | RhinoVAULT..... | 63 |
| 6.2 | Blender | 68 |

1 Eine Fahrradstation am Campus der TU Dresden auf der Grundlage eines Hängemodells

DRAUSCHKE, MARIUS; FLIEGEL, HERMANN; HANEL, JASMIN; HEIMHARDT, KATJA & WELSCHER, BENJAMIN

Ziel der Arbeit war es mit Hilfe von Hängemodellen eine Form zu finden, die als Fahrradstation in zentraler Lage am Campus für die Studenten der TU Dresden fungieren kann. (Bild. 1) Sie sollte nach unseren Vorstellungen eine gewisse Leichtigkeit und Flexibilität ausstrahlen, welche durch eine Vielzahl von Zugängen und die organische Integration in den vorhandenen Baumbestand realisierbar ist. Dazu haben wir uns von einigen Projekten bekannter Architekten und Ingenieure wie Frei Otto und Heinz Isler, inspirieren lassen. Im besonderen Maße hat uns eine Entwurfsarbeit der Universität Innsbruck beeindruckt. Nach dem Festhalten erster Ideen in Skizzenform haben wir uns mit verschiedenen CAD-Programmen wie Blender und Rhinoceros 4.0 mit der digitalen Umsetzung vertraut gemacht und mit einer Reihe von Versuchen verschiedene Entwurfsvarianten ausprobiert. Im langwierigen Entwicklungsprozess mit Rhinoceros 4.0 erarbeiteten wir eine ringförmige Schalenform, die unserer geplanten Nutzung optimal gerecht wird. Auf der Grundlage der digital erstellten Datei entstand unter Verwendung von Rapid Prototyping ein aufgeschichtetes Gipsmodell. Mit diesem Verfahren des 3D-Druckens erhielten wir ein Modell mit einer homogenen Oberfläche. Nach der Umsetzung unseres digitalen Entwurfes in ein physisches Objekt, erfolgte erneut die Entwicklung einer digitalen Form anhand der Photogrammetrie, einer Methode zur Zusammensetzung von Modellfotos durch mathematische Formeln. Dies ermöglichte einen abschließenden Vergleich der digital entstandenen Schalen und das Aufzeigen von Differenzen.

Hangin model based design for a bike station at the campus of TU Dresden

The work focuses on form-finding of a free-form shell at the central campus location of TU Dresden which can be used as student's bike station. It should satisfy lightness, several entries and organic integration with the existing trees. The work has been inspired by a number of projects of well known architects and engineers, mainly: Frei Otto or Heinz Isler. The authors of the work were impressed in the special design way of the University of Innsbruck. Following the first drafts, several trials of the form-finding with many variations were performed using different CAD-Software like Blender and Rhinoceros 4.0 for digital conversion. The setup of the form is based on circular shape considering the architectural aspects of the construction. The final form is digitally optimized using RhinoVAULT plug-in. A rapid prototype model has been generated based on the digital data. With this method of 3D-printing it was possible to get a smooth surface of the model. To evaluate the possible errors in transforming the model from digital to physical or vice versa, the digital model has been regenerated based on the photogrammetry data of the physical one. The comparison between the original digital model and the transformed one has been demonstrated the errors in transformation processes.

1.1 Einführung

Architekturen, die auf der Grundlage von Hängemodellen entstehen, können ganz unterschiedliche Funktionen übernehmen. Uns war es wichtig mit dieser Art der Formfindung einen Ort zu schaffen, der besonders für uns als Studenten der TU Dresden von Nutzen sein kann. Da ein großer Teil der Studenten jeden Tag den Weg zur Uni mit dem Fahrrad bestreitet, haben wir es uns zur Aufgabe gemacht eine Station für das Unterstellen von Fahrrädern zu entwerfen, da nach unserem Empfinden solche geschützten Stellplätze in organisierter Form dringend notwendig sind.



Bild. 1 Schaubild Fahrradstation

Fig. 1 Side view of the bike station

Durch eine zentrale Lage auf dem Campus soll die Fahrradstation für alle schnell zu erreichen sein und zu einem neuen Treffpunkt für den mobilen Studenten werden. Als Ort, an dem der Entwurf seinen Platz finden soll, haben wir uns die Freifläche vor dem Beyer-Bau ausgesucht. (Bild. 2) Mit der unmittelbaren Nähe zum Hörsaalzentrum und der Neuen Mensa stellt die bisher ungenutzte Grünfläche den idealen Platz für eine solche Station dar. Aufgrund des großen Baumbestandes, den es zu erhalten gilt, eignet sich das Arbeiten mit Schalen besonders gut, da sich die entstehende organische Form optimal in den naturbelassenen Ort einfügt und einen Kontrast zu den umgebenen Gebäuden darstellt. Zudem unterstreicht sie den Charakter von Mobilität, den die neue Fahrradstation ausstrahlen soll. Mit ihrer offenen Gestaltung soll sie möglichst einladend wirken und zudem von allen Seiten zugänglich sein, was ein schnelles Unterbringen der Fahrräder und Verlassen der Station ermöglicht.

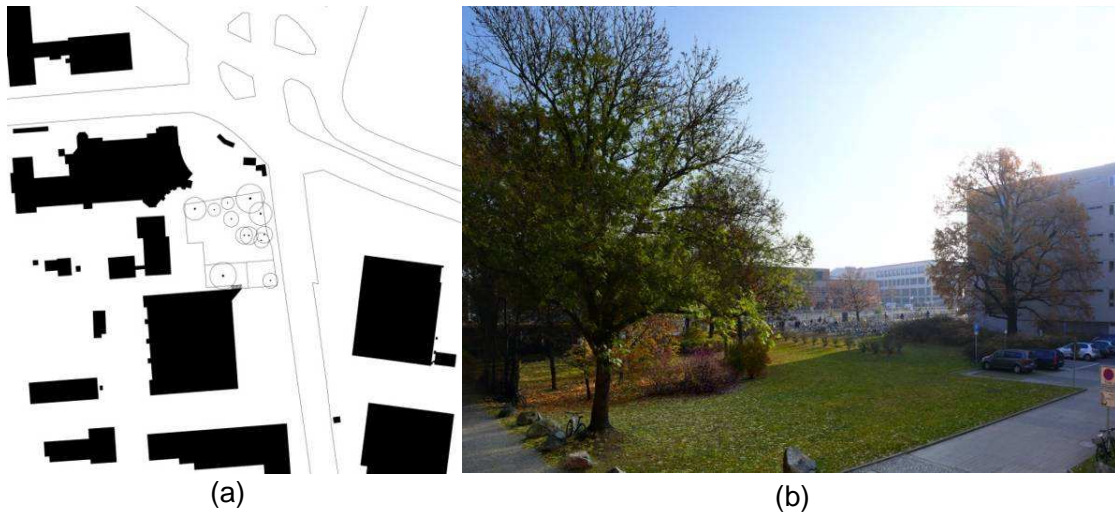


Bild. 2 a) Lageplan [1] b) Blick auf Grundstück

Fig. 2 a) Floor plan b) View of the site

1.2 Inspiration

Im Vorfeld haben wir uns bereits umgesetzte Arbeiten aus Versuchen mit Hängemodellen angesehen und uns mit den Methoden und Herangehensweisen verschiedener Architekten auseinandergesetzt. (Bild. 3) Die Möglichkeiten im Bezug auf Form und Materialität sind sehr vielfältig und beeindruckend. Als besondere Inspiration empfanden wir die Entwürfe von Frei Otto, der durch seine Arbeiten im Leichtbau, mit Seilnetzen, Gitterschalen und anderen zugbeanspruchten Konstruktionen zu einem der bedeutendsten Architekten des 20. Jahrhunderts wurde. Zu erwähnende Beispiele wären die Multihalle in Mannheim aus dem Jahr 1975, der Japanische Pavillon auf der Expo 2000 in Hannover oder auch der geplante Bahnhof des Projektes Stuttgart 21 in Zusammenarbeit mit Christoph Ingenhoven. Auch Heinz Isler, der mit einer Vielzahl von geplanten und realisierten Schalenträgwerken, einer der weltweit bedeutendsten Schalenbauer ist, stellte für uns ein großes Vorbild dar. Insbesondere durch sein Modell eines Betonschalendaches der Autobahn-Raststätte Deitingen Süd oder auch das Tennis- und Freizeitzentrum Brühl, Solothurn.

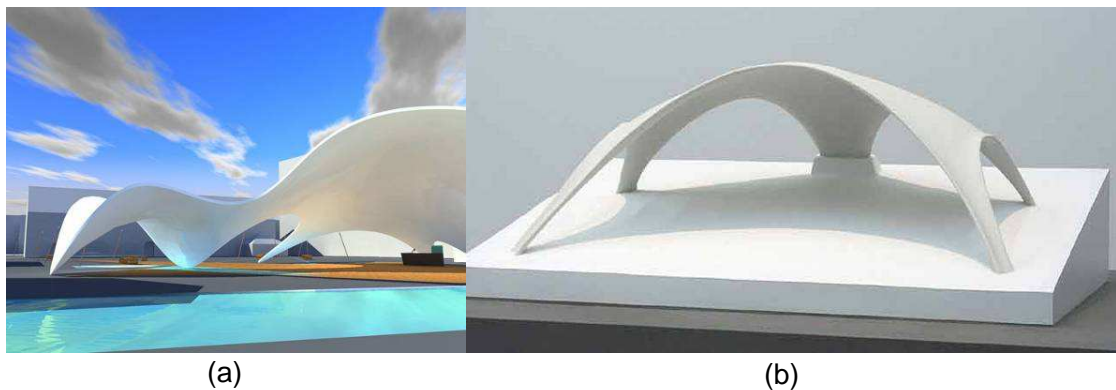


Bild. 3 a) Perspektive der Freibar [2], b) Modell eines Betonschalendaches [3]

Fig. 3 a) Viewpoint of the Freibar, b) Model of a concrete shell roof

Neben den Arbeiten von berühmten Architekten haben wir uns aber auch durch Schaubilder inspirieren lassen, die uns interessant und ansprechend erschienen und sie auf den möglichen Einsatz als Fahrradstation an dem von uns gewählten Ort hin untersucht. Dabei sind wir auf einige sehr interessante Modelle gestoßen, die uns auch einen Überblick darüber gegeben haben, welche Schalenform tatsächlich realisiert werden kann. Als besonders beeindruckend und auch für unser Vorhaben passend empfanden wir die Freibar des Entwurfteams Martin Gasser, Martin Irschara und Manuel Pallaoro vom Institut für Konstruktion und Gestaltung der Universität Innsbruck. Die Leichtigkeit und flexible Nutzung der Schale durch das Schaffen von unterschiedlichen Bereichen und die Größe der Zugänge lieferten uns neue Ansätze für den Entwurf und die Realisierung unseres eigenen Projektes.

1.3 Entwicklung eines digitalen Modells

1.3.1 Formfindung

Zur Realisierung unseres physischen Endmodells war es Voraussetzung in verschiedenen Arbeitsschritten ein digitales Modell zu entwickeln. Zur Vorbereitung darauf, haben wir uns genauer mit dem Ort beschäftigt und uns mit den Abläufen, sowie der Umgebung auseinandergesetzt. Dabei notierten wir zunächst Beobachtungen bezüglich der Bewegungsflüsse, um daraus wichtige Schlüsse für spätere Ausrichtung und Zugänge unserer Fahrradstation zu ziehen. Des Weiteren hielten wir die Umgebung, insbesondere den vorhandenen Baumbestand, in Fotos fest. Im Anschluss an die Ortsanalyse fanden Überlegungen zu der Frage statt, welche Form für die Unterbringung von Fahrrädern an diesem Ort am besten geeignet ist. Daraufhin wurden anhand von den oben erwähnten Referenzbildern erste Ideenskizzen angefertigt. Hierbei haben wir versucht verschiedene Varianten aufzuzeigen. Zunächst gab es die Idee den Baumbestand in die Konstruktion mit einzubinden, in dem wir große Öffnungen im oberen Bereich dafür vorgesehen haben. Des Weiteren entwickelten wir Entwürfe, die sich über die freien Grünflächen zwischen den Bäumen erstrecken ohne sie zu integrieren. Zum Einen haben wir eine längliche, weiter auf dem Grundstück auslaufende Form ausprobiert, die durch geschlossene Elemente die Stellplätze differenziert. Zum Anderen stellten wir uns eine schlichtere, großräumig überspannende Möglichkeit vor. (Bild. 4) Jedoch zeigen alle Ideen große, offene Zugänge auf, die die fließenden Abläufe unterstützen sollen.

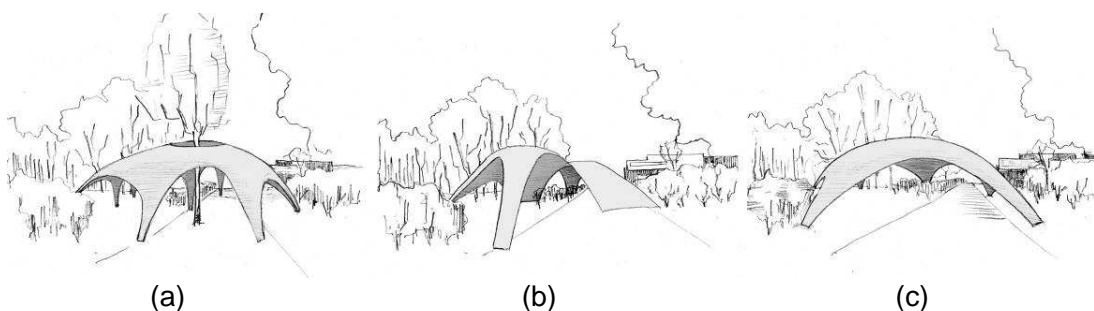


Bild. 4 a) integrierter Baumbestand b) auslaufende Schale c) großräumig überspannt
Fig. 4 a) Integrated trees b) Outbounding shell c) Large spanning shell

1.3.2 Arbeiten mit CAD-Programmen

Nach den ersten handgezeichneten Entwürfen begannen wir mit CAD – Programmen zu arbeiten, welche uns die digitale Umsetzung am Computer ermöglichten. Da wir uns für den Weg vom digitalen zum physischen Modell entschieden haben, war es notwendig sich in kurzer Zeit mit der Handhabung, der uns zur Verfügung gestellten Software vertraut zu machen. Nachdem uns grundlegende Kenntnisse vermittelt wurden, versuchten wir zunächst mit Blender unsere Vorstellungen umzusetzen, insbesondere in Bezug auf die Höhen, Öffnungen und Zahl der Zugänge. (Bild. 5, Bild. 6) Dies war anfangs eine relativ einfache Möglichkeit, um Vieles auszuprobieren und unsere Ideen schnell zu übertragen.

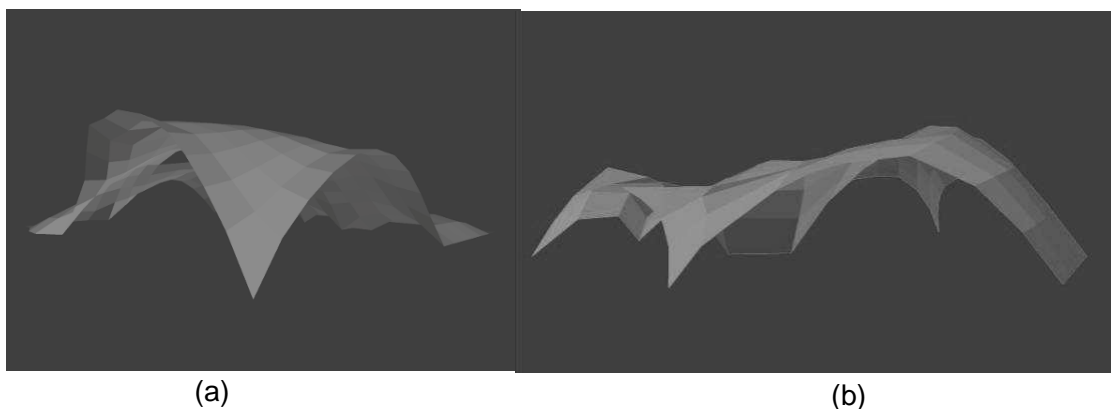


Bild. 5 a) Versuch Öffnungen im Dach, b) Differenzierung von Zugängen und Höhen
Fig. 5 a) Trial with opening in the roof, b) Differentiation of entry and height

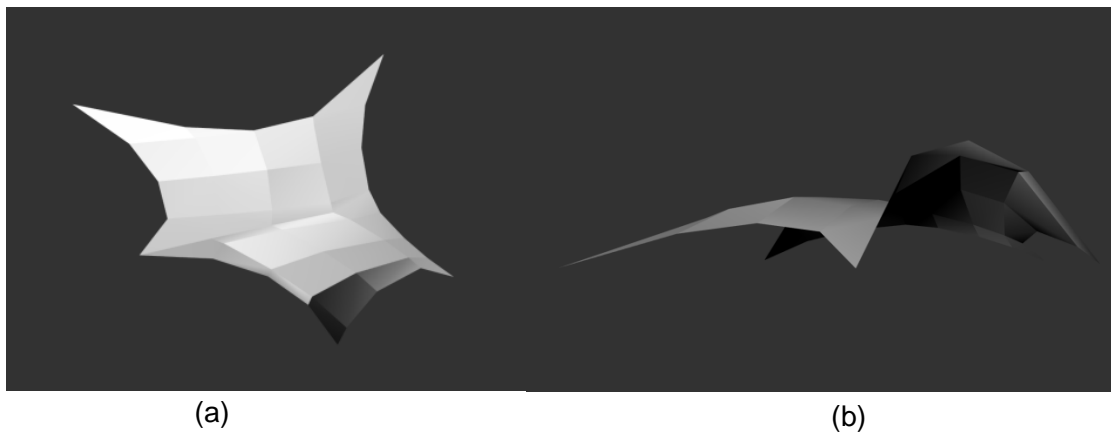


Bild. 6 a) Draufsicht b) Ansicht von vorn
Fig. 6 a) Top view, b) Front view

Parallel dazu arbeiteten wir mit Rhinoceros 4.0, um uns einen Überblick über die Funktionsweise eines weiteren Programms zu verschaffen. Nach anfänglichen Schwierigkeiten, aufgrund von geringen Vorkenntnissen und der Komplexität des Programms, gelang es uns eine Entwurfsvariante darzustellen. Dies war jedoch im Gegensatz zum Arbeiten mit Blender mit größerem Zeitaufwand verbunden. Wir entschieden uns aber letztendlich mit Rhinoceros 4.0 weiterzuarbeiten, da dieses CAD-Programm ein detaillierteres, maßstäblicheres konstruieren ermöglicht. Außerdem

konnten wir unseren geplanten, organischen Grundriss auf anspruchsvollere Weise im Vergleich zu Blender realisieren, da keine geometrische Grundform vorgegeben war.

Dies ermöglichte ein genaueres Einpassen in die gegebene Örtlichkeit, da der Lageplan im Maßstab importiert werden konnte. Anschließend wurde der geplante Grundriss erstellt und mit einem Netz belegt, welches für die Entstehung der Schale eine wichtige Voraussetzung war. Hierzu nutzen wir das uns zur Verfügung gestellte Erweiterungsmodul RhinoVAULT, welches die Realisierung von Schalenformen erst ermöglicht. Je mehr Knotenpunkte das Netz enthält, desto feingliedriger kann später die Oberfläche erscheinen. Allerdings besteht die Gefahr, dass der Rechner durch die Positionsberechnung der einzelnen Punkte überlastet wird. Die aus der Grundrissform generierte Punktwolke stellt die Idealform einer Schale dar. An dem parallel entstandenen Kraft-/Stressdiagramm können nun willkürlich gebildete Höhen individuell nachjustiert werden. (Bild. 7)

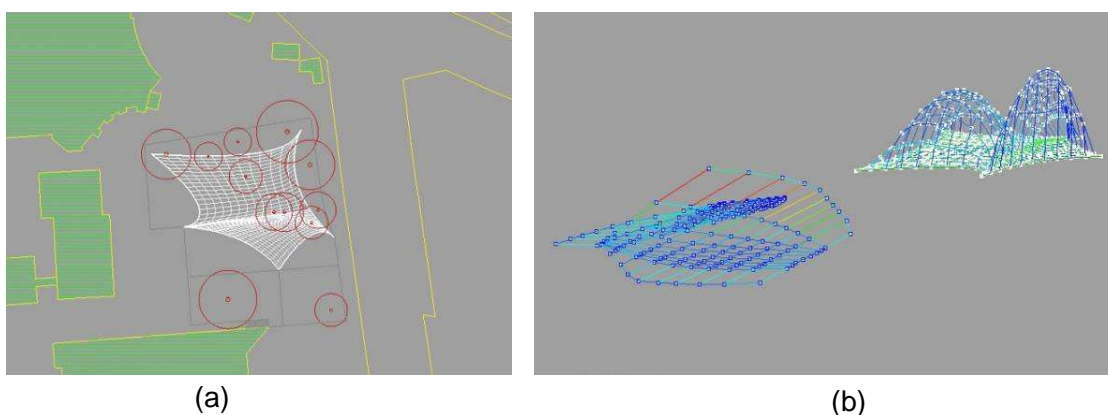


Bild. 7 a) Grundriss mit Netz b) Stressdiagramm/Punktwolke mit intuitiven Höhen
Fig. 7 a) Ground plan, b) force diagram / Pointcloud

Da die Ergebnisse der eingegebenen Werte für die Schalenhöhe häufig eher intuitiv und nicht vorhersehbar waren, traten Komplikationen auf, sodass wir kleine Änderungen bezüglich der Form der Fahrradstation vornehmen mussten. Im langwierigen Arbeitsprozess stellte sich dann heraus, dass eine ringförmige Architektur besser für den Ort geeignet ist, als eine, die das komplette Grundstück überspannt und diese auch besser mit Hilfe des Plug-ins RhinoVAULT realisierbar ist.

Durch die Kombination von einzelnen Aspekten anfänglicher Entwürfe, wie das Erstrecken der Schale über die Freiflächen und das Integrieren des Baumbestandes, entstand eine zufriedenstellende finale Form, die der geplanten Nutzung auf optimale Art gerecht wird. (Bild. 8, Bild. 9)

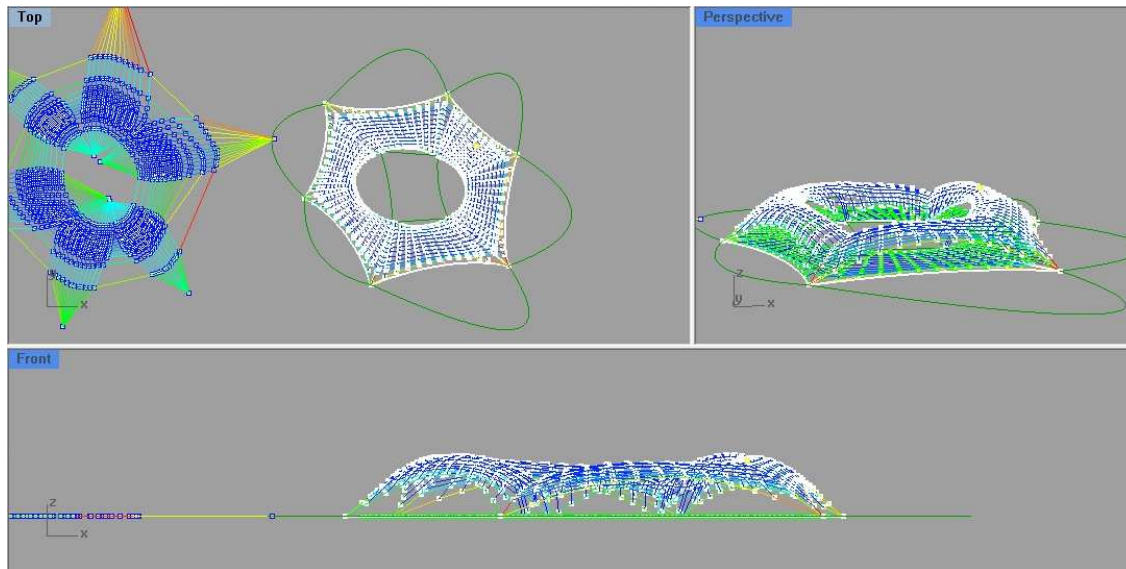


Bild. 8 Finale Schalenform

Fig. 8 Final form

Nun stellte sich für uns die Frage, wie wir der gekrümmten Fläche eine gewisse Plastizität verleihen können. Das Programm Rhinoceros 4.0 ermöglicht dies mit der Option „offset“, wodurch eine weitere Schale mit einem konstanten, definierten Abstand über die vorhandene dupliziert wird. Durch das Schließen der Randbereiche bekam die Station zur Unterbringung von Fahrrädern erstmals ein Volumen. Abschließend war es nötig, die spitz aufkommenden Fußpunkte zu stützen, um ein entsprechendes Auflager für die Standfläche zu erzeugen.

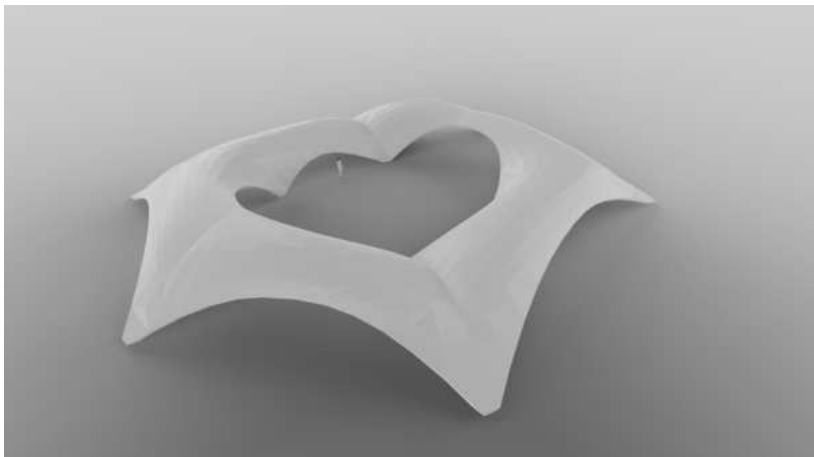


Bild. 9 Finale Schalenform gerendert

Fig. 9 Rendering of the final form

1.4 Ergebnisse

1.4.1 Rapid Prototyping

An diesem Punkt kam es zur Umsetzung des digitalen Modells in ein Physisches. Dazu nutzten wir das 3D-Labor der TU Dresden, in dem die Möglichkeit besteht, aus der von uns zur Verfügung gestellten Datei ein in mehreren Schritten aufgeschichtetes Gipsmodell zu erzeugen. Die im Bereich des Produktdesigns und des Maschinenbaus genutzte Technologie des „rapid prototyping“ kam dabei zur Anwendung. Dies ist ein Fertigungsverfahren, in dem aus vorhandenen CAD-Daten möglichst ohne manuelle Umwege direkt und schnell Modelle erzeugt werden können. Nach der Aushärtung unserer in einem additiven Verfahren hergestellten Schale wurde zum Schutz und zur zusätzlichen Stabilisierung eine Schicht aus Epoxidharz aufgetragen. Bei der Vorbereitung für den Druck war es besonders wichtig darauf zu achten, dass beim digitalen Modell alle einzelnen Polygone, die durch das aufgespannte Netz entstanden sind, mit der richtigen, durch Normalen-Vektor angezeigten Ausrichtung versehen werden. Die Unterscheidung der Seiten erfolgt in einer dreidimensionalen Darstellung durch helle und dunkle Flächen, wobei nur eine einheitliche Farbgebung einen sauberen Druck gewährleistet. (Bild. 10)

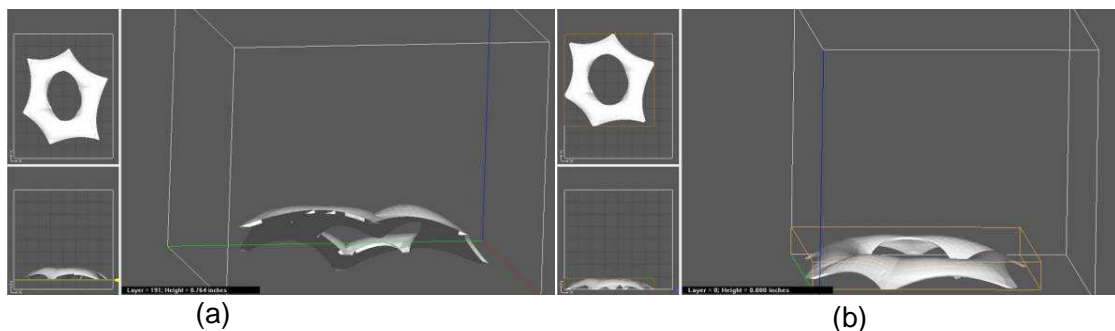


Bild. 10 a) Flächen mit verschiedener Farbgebung b) Flächen mit einheitlicher Farbgebung
Fig. 10 a) Areas with different colours b) Areas with one colour

Diesen Vorgang konnten wir im Voraus mit Hilfe des Druckertreibers „Z print“ durch die Ausgabe der einzelnen Druckerschichten in einer schwarz-weißen Grafik auf eventuelle Fehlerhaftigkeit überprüfen und nachträglich mit Rhinoceros 4.0 korrigieren. (Bild. 11)

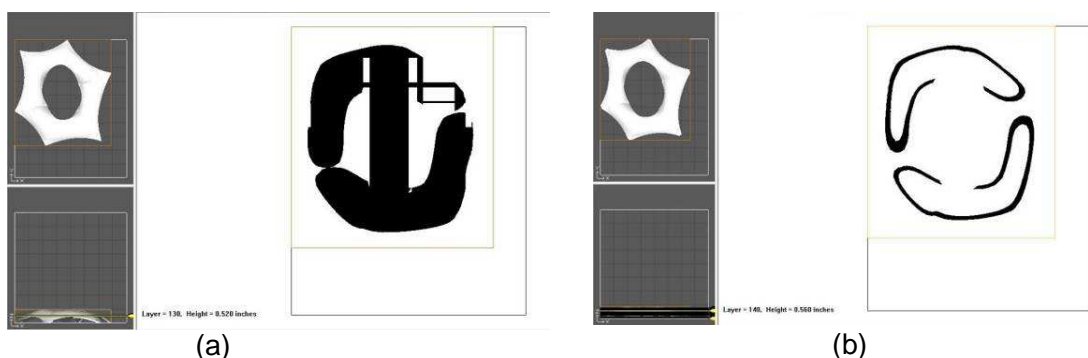


Bild. 11 a) fehlerhafte Ausgabe der Druckerschichten b) korrigierte Ausgabe der Druckerschichten

Fig. 11 a) Out of order display of the printing layers b) Corrected display of the printing layers

Als Resultat unserer Arbeit können wir nun ein Gipsmodell aus einer digital erarbeiteten Schalenform vorweisen. (Bild. 12)

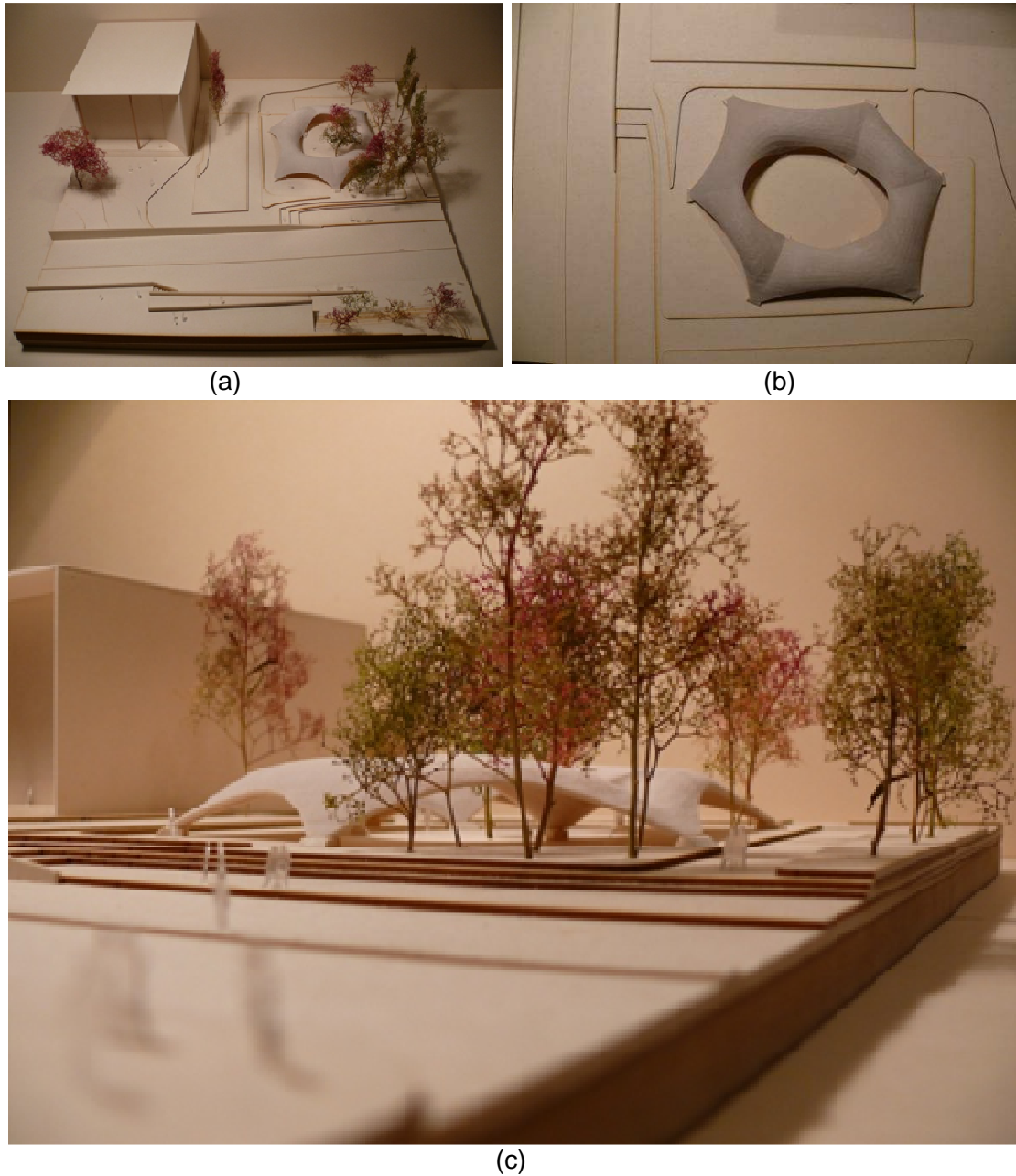


Bild. 12 a) Gipsmodell mit Umgebung b) Modell in der Draufsicht (c) Modell in der Perspektive
Fig. 12 a) Model with surroundings, b) Top view of the model, c) Viewpoint of the model

1.4.2 Photogrammetrie

Es besteht allerdings auch die Möglichkeit einer umgekehrten Vorgehensweise. Hierbei wird ein zunächst per Hand entwickeltes Modell mit einem photogrammetrischen Auswertungsverfahren in eine digitale Form transformiert. Um zu sehen inwiefern die

zwei, mit Hilfe des Computers erhaltenen Ergebnisse übereinstimmen, haben wir diese Methode im Anschluss an unser Projekt getestet. Dazu können verschiedene Programme eingesetzt werden, wie beispielsweise Autodesk 123D Catch, welches bei unserem Vorgehen Verwendung fand. Als Grundlage haben wir zunächst ca. 50 bis 60 Fotos von unserem Gipsmodell angefertigt, indem wir uns in kleinen Schritten in einem Abstand von 5 bis 10° oberhalb um das Modell bewegt en. Für die optimale Verarbeitung der Fotos durch das von uns gewählte Programm sollte eine gute Bildschärfe vorhanden sein, um eine Verwendbarkeit der Fotos zu gewährleisten. Desweiteren tragen ausreichende Lichtverhältnisse und ein möglichst heterogener, nicht reflektierender Hintergrund zur genauen Erkennung der Form bei. Im Folgenden wurde die entstandene Bilderserie in Autodesk 123D Catch hochgeladen und anhand von mathematischen Berechnungsverfahren zusammengesetzt. (Bild. 13)



Bild. 13 a) strukturierter Hintergrund für Photogrammetrie b) Kamerapositionen 123D Catch
Fig. 13 a) Textured background for the photogrammetry b) Camera positions in 123D Catch

Die aus der Photogrammetrie erhaltene Form bildet nur die Oberseite des Modells ab, da das Programm, wie im vorherigen Versuch festgestellt, nicht in der Lage war, eine Rundumansicht darzustellen. Anschließend musste der strukturierte Hintergrund entfernt und die vom Programm geschlossenen Zugänge der Schale wieder geöffnet werden (Abb. Hermann 29). Vergleichend mit dem von uns im Rhinoceros 4.0 entwickelten digitalen Modell lassen sich große Übereinstimmungen erkennen. (Bild. 14) Die im Grunde geringen Abweichungen können eventuell mit der Unschärfe der Bilder, sowie unzureichenden Lichtverhältnissen erklärt werden. Zudem weist unser Gipsmodell eine gewisse Homogenität und Helligkeit auf, welche reflektierend wirken und dem Programm das Erkennen von Fixpunkten erschweren.

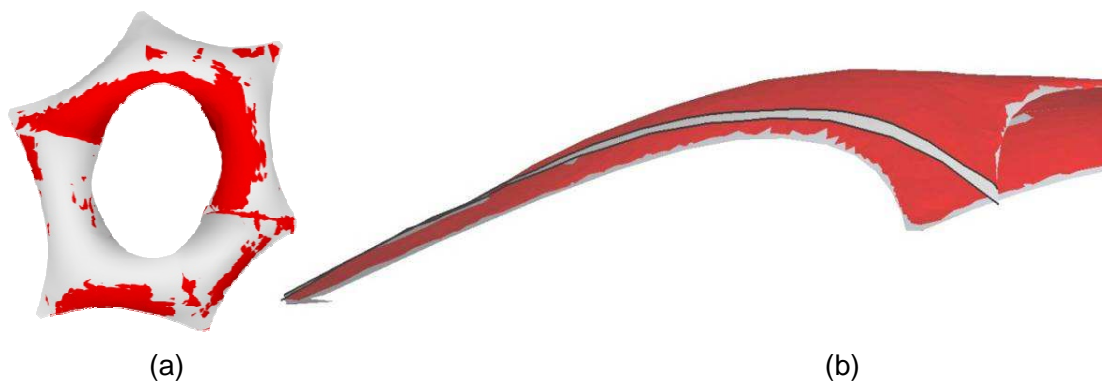


Bild. 14 a) weiß: mit CAD-Programm | rot: photogrammetrisch b) maximale Abweichung von 4 % Abweichung / Gesamthöhe

Fig. 14 a) The two digital model combined: the white from CAD-software and the red from photogrammetry, b) maximum difference of 4 % related to the height

1.5 Auswertung

1.5.1 Überlegungen zur Realisierung

Im Bezug auf die Umsetzung unserer Schale in die Realität ziehen wir eine optische Gestaltung, ähnlich wie sie das Gipsmodell bereits transportiert, in Erwägung. Diese beinhaltet vor allem eine helle Farbgebung, eine homogene Oberfläche und eine geringe Konstruktionshöhe. Im Zusammenspiel der genannten Komponenten soll eine möglichst leichte und filigrane Erscheinung entstehen, welche die Offenheit und die Mobilität der Fahrradstation verstärkt. Mit der Verwendung von Textilbeton, welcher mit weißen Pigmenten versehen in eine speziell vorgefertigte Schalung gegossen wird, könnte die organische Überdachung nach unseren Vorstellungen realisiert werden.

1.5.2 FEM-Analyse

Abschließend wurde die Konstruktion unserer geplanten Station hinsichtlich auftretender Kräfte geprüft, um die tatsächliche Umsetzbarkeit einschätzen zu können. Hierbei kam die FEM- Analyse (Finite-Element-Methode) zur Anwendung, welche ein weit verbreitetes, numerisches Verfahren im Ingenieurwesen darstellt. Mit diesem modernen Simulationswerkzeug kann das Strukturverhalten von Bauteile besser vorhergesagt, bewertet und optimiert werden. Zur Durchführung der Analyse war es nötig, ein neues Netz für unsere Schale zu generieren. Dazu wurden die Außenlinien der digitalen Ausgangsform auf den Grundriss projiziert und mit Linien versehen. Nun erfolgte die Übertragung des neu entstandenen Netzes, welches nicht mehr aus Dreiecken, sondern einer Struktur aus Rechtecken besteht, auf das Ursprüngliche. In Bild. 15 sind die Ergebnisse einer Berechnung mit beispielhaften, realitätsnahen Materialkennwerten und Dimensionen zu sehen. Die starke Verformung an den Fußpunkten war aufgrund ihrer Schlankheit und des flachen Winkels zu erwarten. Im restlichen Modell treten keine nennenswerten Verformungen auf. Der Großteil des Modells ist frei von Momenten. Die geringen auftretenden Momente können auf Fehler während der manuellen Umwandlung des RhinoVAULT Modells für die FEM-Software zurückgeführt werden.

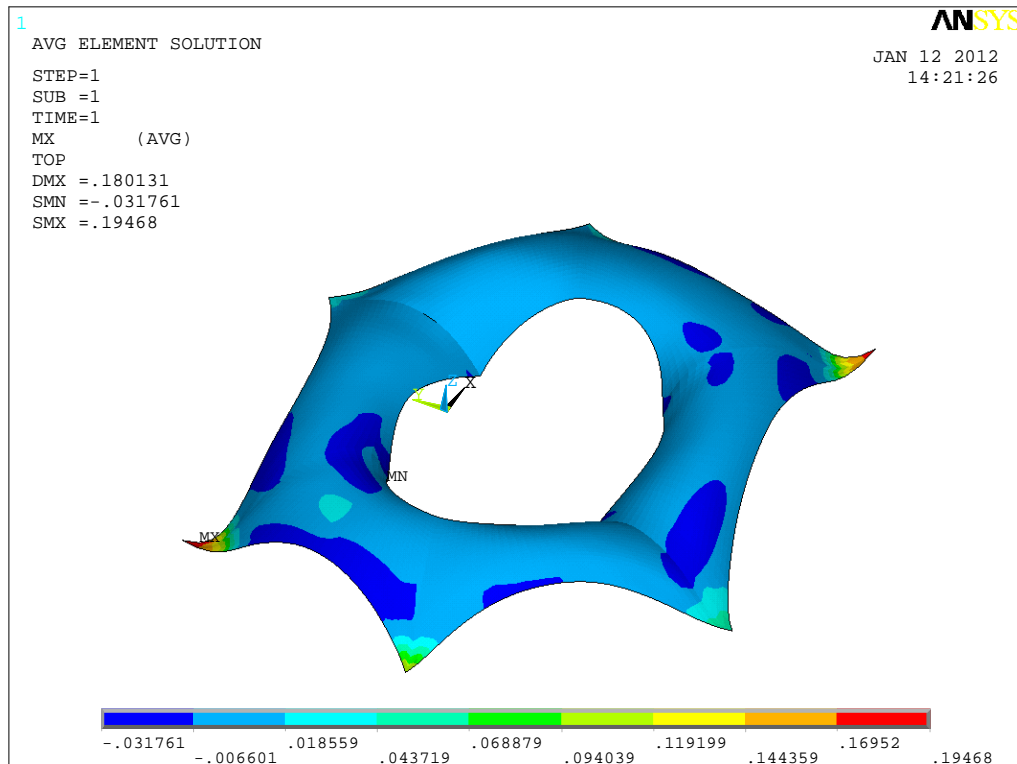


Bild. 15 Ergebnis der FEM-Analyse, Momente und Deformation der Form

Fig. 15 Result of the FEM-calculation, moment M_x on the deformed shape

1.6 Literaturverzeichnis

- [1] TU Dresden; Fakultät Architektur; Lehrstuhl für Baukonstruktionen und Entwerfen
- [2] www.zementindustrie.at, Webseite der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, 24.10.2011
- [3] www.archiv.ethlife.ethz.ch, Webseite der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 24.10.2011

2 Form Überprüfung von bestehenden Hängemodell Bauten - Fallstudie des Dachgeschosses der Casa Milá

RIEDEL, CHRISTOPHER; WERNER, THOMAS; HRIBERNIK, ANDREJ; ŠMIGOC, KLARA & SCHREIER, ALEXANDRA.

Motivation für unsere Arbeit war die Untersuchung und Erstellung eines Hängemodells des Dachgeschosses der Casa Milá. In den darauf aufbauenden Schritten haben wir einzelne Bögen hinsichtlich ihrer Form untersucht und versucht, geeignete Materialien für den Modellbau zu finden.

Im Maßstab 1:10 führten wir mehrere Belastungsversuche an einem selbst vermessenen, beispielhaften Bogen durch, bei denen wir Unterschiede zwischen dessen Form und der unbelasteten Kettenlinie feststellten. Jedoch fanden wir anhand unserer Möglichkeiten heraus, dass eine Kette verhältnismäßig belastet durch die Eigenlasten des Bogens deckungsgleich mit der unbelasteten Kettenlinie war.

Aufgrund mangelnder Informationen konnten wir dennoch nicht klären, ob die realisierte Bogenform auf einer belasteten oder unbelasteten Katenoide basiert. Beim Nachbau eines Abschnitts des Daches im Maßstab 1:50 haben wir ein Hängemodell ohne belastete Ketten verwendet.

Checking the form of an existing construction based on hanging models – Case study: the roof of Casa Mila

The work intends to check the form of the roof of Casa Milá based on hanging models. Single arches have been generated to check the existing forms and to be used for modelling the roof of Casa Milá. Several attempts were performed to find the suitable materials for modelling.

Loading tests have been performed on an arch measured in Casa Milá. Differences have been noticed between the form of the arch and the catenary. However, it has been noticed that a chain loaded with the self weights of that arch is hanging in the same way like a non weighted chain. The final results were adopted to create a 1:50 scale model for the roof of Casa Milà.

2.1 Einführung

Die "Casa Milá" zählt zu den bekanntesten Bauten Barcelonas. Sie ist stilistisch ein Vertreter des Modernisme Catalá und wurde von 1906 -1910 von Antoni Gaudí errichtet. Aufgrund der markanten, organischen Fassade hebt sie sich deutlich von den umgebenden Häusern ab und wurde früher auch spöttisch als "La Pedrera", der Steinbruch bezeichnet. Das Haus ruht auf tragenden Stützen, weitestgehend ohne tragende Innenwände, was eine flexible Raumaufteilung ermöglichen sollte [1]. Ein besonders bemerkenswerter Teil des Gebäudes ist das Dachgeschoss. Dies war auch das Thema für unsere Arbeit.

Das Tragwerk des Daches bilden ca. 270 unterschiedliche, sehr schmale Mauerwerksbögen. (Bild. 1) Der Architekt Antoni Gaudí bestimmte deren Abmessungen mit Hilfe des Prinzips der "Kettenlinie", indem er biegeschlaffe Materialien, wie Seile oder Ketten zwischen zwei Punkten aufhängte und so deren Form ermittelte. Auf den Kopf gestellt erhält man so die ideale Form eines Bogens, in dem theoretisch nur Druckkräfte auftreten.[2] Belastet man die Kettenlinie mit Gewichten, kann man die Form und damit den Kräftefluss maßgeblich beeinflussen.



Bild. 1 Einzelne Bögen im Dachgeschoss der Casa Milá

Fig. 1 Several arches in the roof of Casa Milá

Es ist nicht ganz geklärt, in welcher Weise Gaudí die Bögen plante, beispielsweise ob er sich ausschließlich an der unbelasteten Kettenlinie orientierte, oder mit Gewichten arbeitete, um die tatsächlichen Belastungsfälle zu simulieren. Es ist allerdings erwiesen, dass in den Bögen Risse entstanden, die jedoch bei Sanierungsarbeiten wieder ausgebessert wurden. Zur weiteren Sicherheit hat man bereits Ringanker in die Steine eingesetzt. [2]

2.2 Überprüfung des Modells

Unser primäres Ziel war es, das Dachgeschoss der Casa Milá zu untersuchen und basierend auf den Ergebnissen ein Hängemodell zu bauen. Wir haben zuerst das Verhalten einzelner Mauerwerksbögen im Maßstab 1:10 untersucht, bevor wir uns mit der Nachbildung des Gesamtgrundrisses befassten.



Bild. 2 3D Print Modell des Dachgeschosses in Casa Milá Ausstellung

Fig. 2 3D print model of the roof in Casa Milá exhibition

2.2.1 Materialwahl

Uns war von Anfang sehr wichtig, wie wir unser Hängemodell in eine selbsttragende Struktur bringen können. Einerseits haben wir nach einem Material gesucht, welches genügend Eigengewicht hat, um die Bogenform hängend nachzubilden, andererseits experimentierten wir mit verschiedenen Bindemitteln und Klebstoffen, um letztendlich ein Architekturmodell aus dem Hängemodell zu entwickeln.

2.2.2 Wachsmodell

Zur Veranschaulichung der Tatsache "Kettenlinie als ideale Umkehrung der Stützlinie" haben wir kleinere Modell - Prototypen aus Metallketten und Wachs gebaut. Dabei haben wir die Ketten auf einen Rahmen aus Pappe aufgebracht und dann in heißes Wachs getaucht. Allerdings war die Bogenform im Maßstab 1:100 etwas ungünstig, da die Kettenglieder zu steif waren. Ein Versuch mit Bindfäden führte zu besseren Ergebnissen. (Bild. 3)

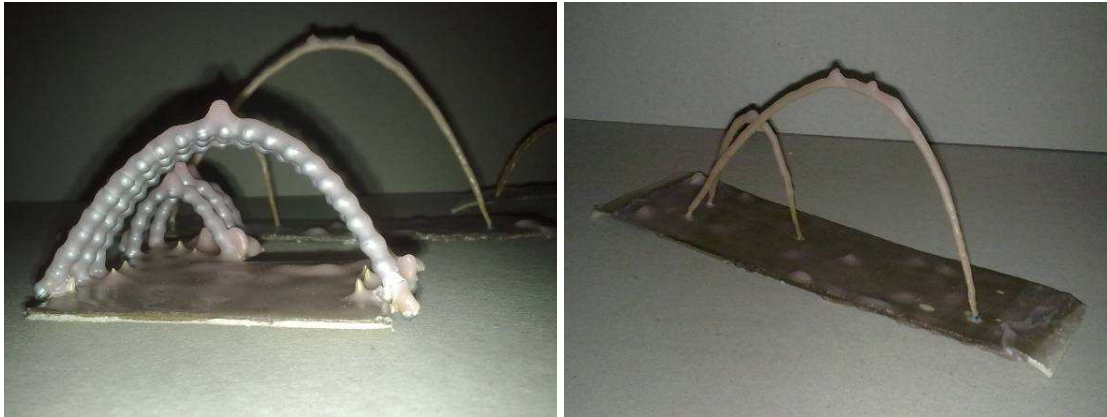


Bild. 3 Erste Wachmodelle aus Ketten und Bindfäden

Fig. 3 First wax models using chains and ropes

2.3 Untersuchung der Bogenform

Zu Beginn unserer Untersuchung haben wir vor Ort ein Aufmaß vorgenommen und einen Bogen separat gemessen. (Bild. 4)



Bild. 4 Vermessener Mauerwerksbogen

Fig. 4 Measured masonry arch

Im 1:10 Modell haben wir schließlich eine Kette mit Gewichten belastet um ein mögliches Lastbild nachzuvollziehen. Anhand unserer Abmessungen und geschätzten Materialkennwerten konnten wir eine mögliche Lastverteilung überschlagen. (Bild. 5)

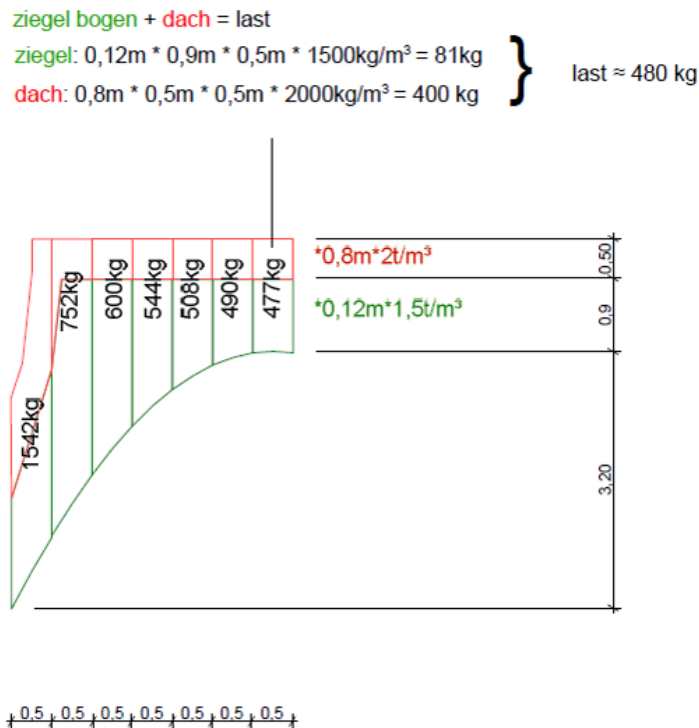


Bild. 5 Berechnung der Lasten

Fig. 5 Calculation of the loads

Für das Modell mit Gewichten benötigten wir die Informationen über die Länge des Bogens, was wir mit Hilfe des Programms MS Excel berechnet haben. (Bild. 6)

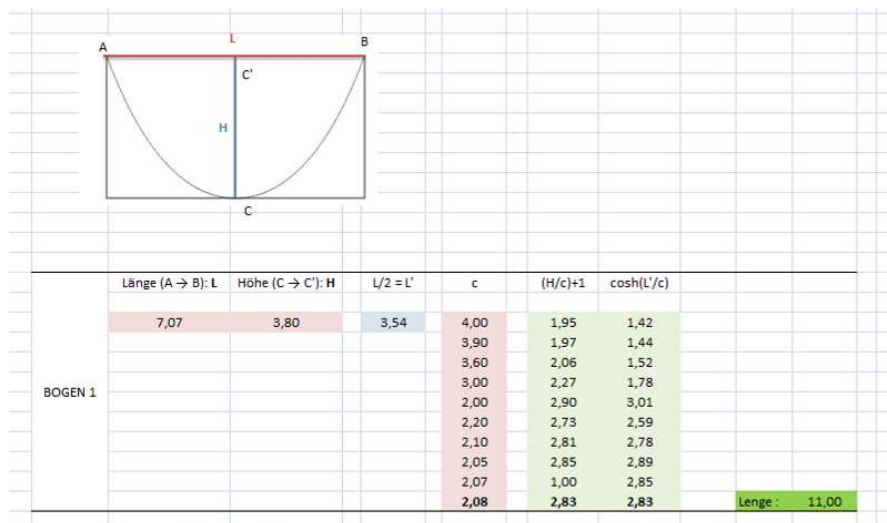


Bild. 6 Berechnung der Bogenlänge mit MS Excel

Fig. 6 Calculation of arch length with MS Excel

Beim Vergleichen der Kurvenbilder von gemessener Kurve und belasteter Kette fielen jedoch nur sehr geringe Unterschiede auf. (Bild. 7) Daher kam die Vermutung auf, das Antoni Gaudí seine Bögen anhand einer unbelasteten Kettenlinie gebaut haben könnte.

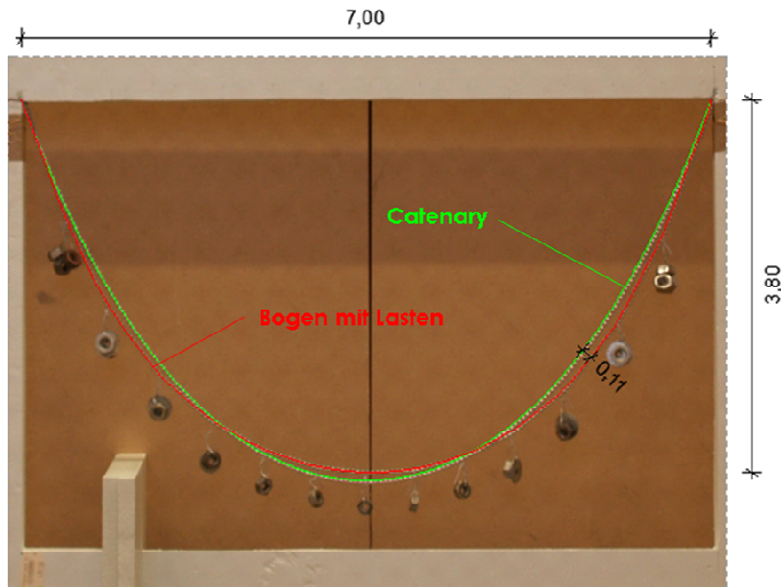


Bild. 7 Vergleich unbelastete Kette und Kette mit Eigenlast des Bogens und Dachlast
Fig. 7 Comparing non weighted chain and chain loaded with selfweight of the arch and weight of the slab

Zur genaueren Untersuchung haben wir die Lasten aus Decke und Außenwand vernachlässigt und nur die Eigenlast des Mauerwerksbogens berücksichtigt. Wir haben die Flächen des Bogens in ein Raster von 2,5 cm eingeteilt und die Einzelteile aus Tonscheiben nachgebildet, (Bild. 8) welche wir schließlich an unser 1:10 Kettenmodell angebracht haben.

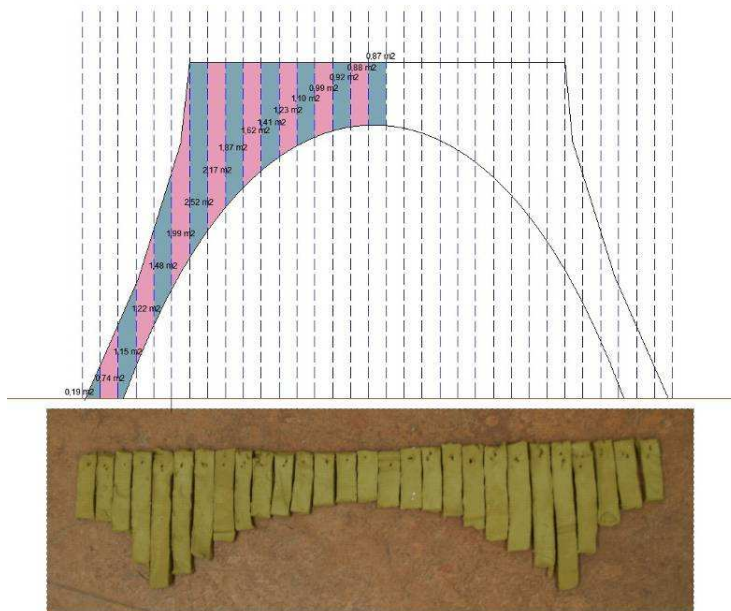


Bild. 8 Berechnung der Eigenlast des Mauerwerksbogens
Fig. 8 Calculation of the selfweight of masonry arch

Das Ergebnis dieses Versuches war unerwartet, da es bis auf sehr geringe Abweichungen eine ideale Nachbildung der unbelasteten Kettenlinie ergab. (Bild. 9)

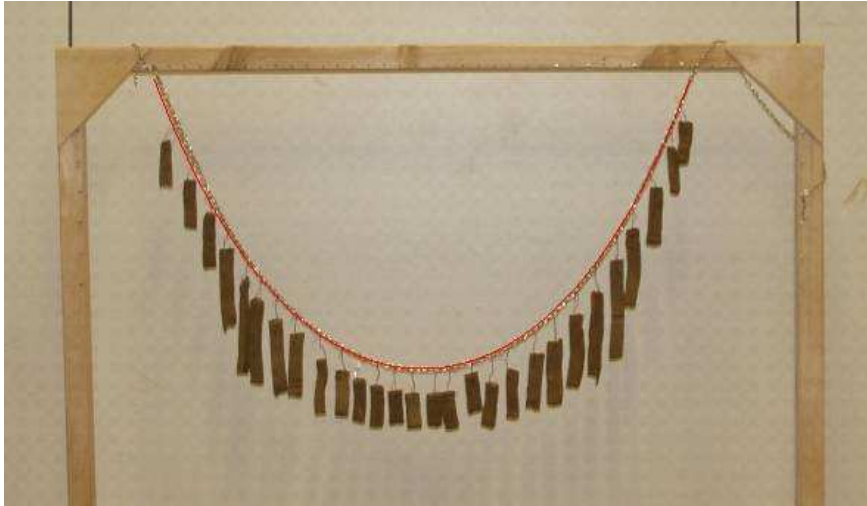


Bild. 9 Bogenlinie des Modells mit Lasten des Mauerwerksbogen
Fig. 9 Curve of the chain loaded with selfweight

2.4 Auswertung der Ergebnisse

Aus diesen Untersuchungen haben wir geschlussfolgert, dass Gaudi sich möglicherweise nur an der unbelasteten Kettenlinie orientiert hat. Selbst wenn wir die Deckenlasten im Modell mit einbezogen haben, war es stets möglich durch geringe Umverteilung oder ein feineres Raster, die Form der Kettenlinie zu erlangen.

Die im Gebäude entstandenen Schäden am Mauerwerk haben wir zuerst auf eine fehlerhafte Form der Bögen zurückgeführt. Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass Schäden aufgrund der Bogenform entstanden sind. Die beobachteten Unterschiede der unbelasteten und belasteten Modelle waren zu gering, um Risse in den Steinen ausschließlich darauf zurückzuführen. Die Kettenlinie als umgekehrte Stützlinie eignet sich in erster Linie auf den Abtrag von Vertikallasten, jedoch nicht für horizontale Windlasten oder Schwingungen am Bauwerk. Auch auf Setzungen der Auflager reagieren solche Bögen sehr empfindlich. (Peinelt [2]) Daher kommen diese Faktoren wohl eher als ursächlich für die Schäden in Frage.

Ungeachtet dieser Überlegungen ist es uns gelungen, ein Modellausschnitt des Daches, auf Basis eines Hängemodells zu bauen. Es ist also definitiv möglich, tragende Strukturen anhand der Kettenlinie zu entwickeln und zu bauen.

2.5 Erstellung des Modells

Um die von Gaudi entworfene Systematik für den Dachaufbau der ‚Pedrera‘ zu veranschaulichen, bauten wir einen Ausschnitt des Daches im Maßstab 1:50 nach. Als Informationsgrundlage diente dabei auch ein Kunststoffmodell der gesamten Casa Milá,

welches sich in der Ausstellung in der Casa Milá befindet. (Bild. 2) Die einzelnen Konstruktionsschritte werden als Schichten nacheinander entblößt, beginnend bei den Rippenbögen, über deren Aufmauerung bis hin zur Decke und der äußeren Gestalt der Dachlandschaft. Die Basis dafür bildet ein echtes Hängemodell aus einzelnen Ketten. (Bild. 10)

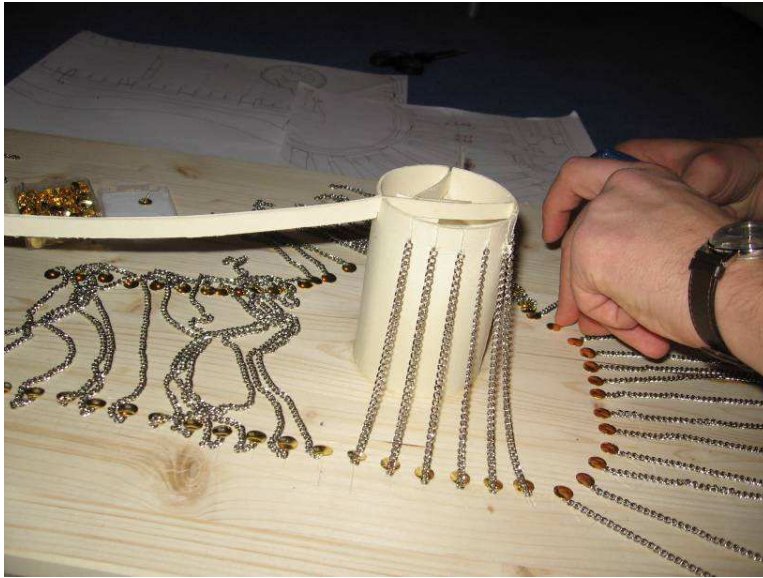


Bild. 10 Befestigung der Ketten
Fig. 10 Fixing the chains

Die Ketten fixierten wir mit einem Zwei-Komponenten Epoxidkleber. (Bild. 11) Sie konnten nicht in den zähflüssigen Kleber getränkt werden, sondern mussten einzeln bestrichen werden. Durch sein Fließverhalten verteilte sich der Klebstoff jedoch sehr gleichmäßig um und zwischen die Kettenglieder. Nach einem Tag der Trocknung drehten wir das Modell um und begannen mit dem Aufbau des Daches. (Bild. 12)

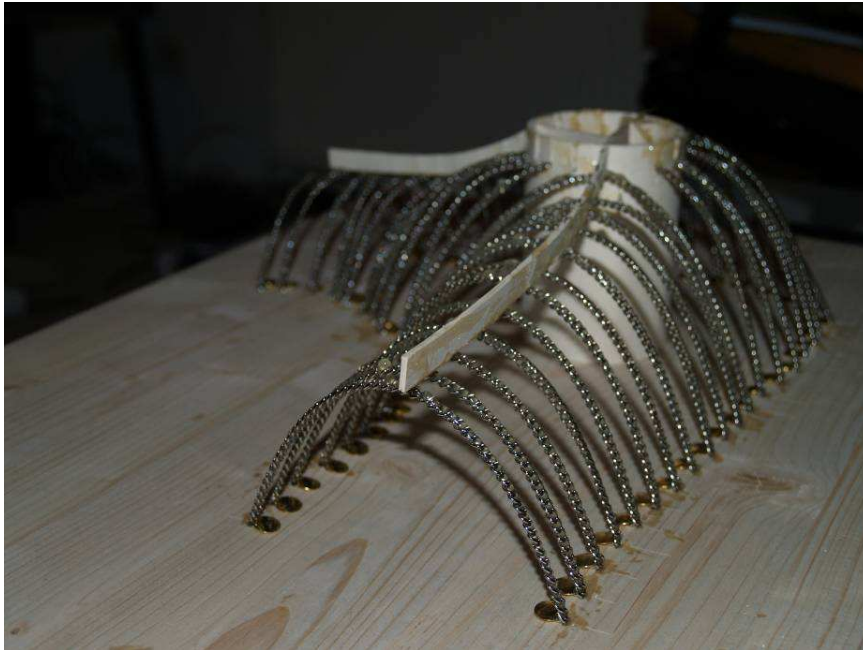


Bild. 11 Mit Zwei-Komponenten Epoxidkleber fixierte Ketten
Fig. 11 Chains fixed with glue

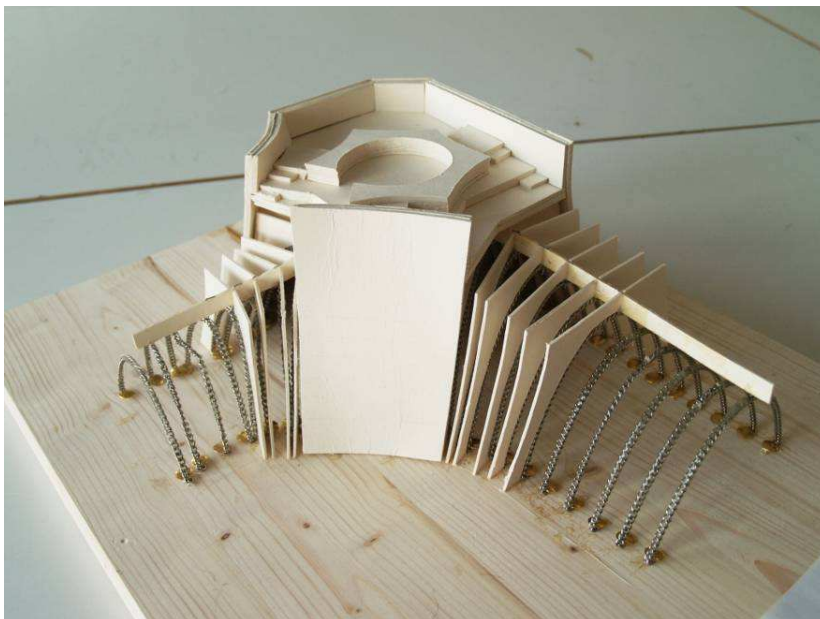


Bild. 12 Fertiggestelltes Modell einer Ecke der Dachgeschosses im Maßstab 1:50
Fig. 12 Final model of one part of Casa Milás roof, scale 1:50

2.6 Literaturverzeichnis

- [1] Giordano, C. & Parmesan N.: Visual guide of La Pedrera, Casa Milá, Dos de Arte Ediciones: Barcelona 2009.
- [2] Peinelt, A.: Analyse der Tragstruktur der Casa Milá und Bewertung eines Monitoringprogramms im Zusammenhang mit dem Bau des Provença-Tunnels in Barcelona. Diplomarbeit: Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, 2011.

3 Nutzung physikalischer und digitaler Hängemodelle zur Formfindung von Dachkonstruktionen – Fallstudie Tramstation in Albertplatz Dresden

FENSTERER, CLAUDIA; SEEMANN, ANNELIE & WELLER, CHRISTOPHER M.

Ziel unserer Arbeit war es, einen auf den Erkenntnissen aus der Hänge- und Schalenmodellkonstruktion basierenden Entwurf für eine Schale mit idealen Eigenschaften zu entwickeln. Zuerst entschieden wir uns für eine Umsetzung eines physischen Modells, um die Freiheit von einschränkenden Parametern bei der Entwicklung der Freiform zu gewährleisten. In folgenden Schritten wurden diese Modelle in verschiedenen Varianten digitalisiert. Hierfür nutzten wir die Photogrammetrie und den Nachbau in der 3D-Modellierungssoftware Blender.

Using physical and digital hanging modelling for form finding of roofed constructions – Case study: Tram station in Albertplatz Dresden

The work deals with the form-finding of a roofed construction for tram station. The creation of the model is based on physical hanging modelling verified by digital tools. The advantage of using physical model is having more flexibility in form finding, not to be fixed on specific parameters of digital modelling. Digital models were generated to verify the physical models. Our conclusion will be the comparison of both possibilities for the realization of a hanging or shell model.

3.1 Einführung

Um uns den Einstieg zu erleichtern, wählten wir eine realistische Funktion für die Freiform. Schließlich entschieden wir uns für eine Überdachung der Tramstation am Albertplatz in der Dresdner Neustadt. Der Albertplatz ist einer der großen Verkehrsknoten des Dresdner Innenstadtbereichs. (Bild. 1)

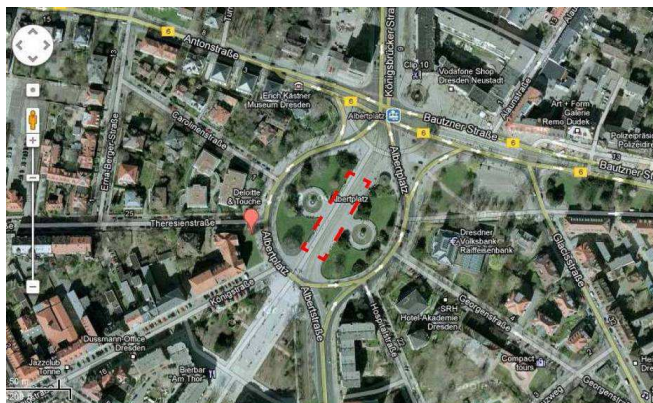


Bild. 1 Lageplan

Fig. 1 Floor plan

Momentan sind die sich dort befindenden kleinen Überdachungen nicht ausreichend für die Menge der Fahrgäste und es fehlt somit ein ausreichender Witterungsschutz.

Unsere Freiform soll den Aufenthalt an der Haltestelle angenehmer gestalten, den Witterungsschutz gewährleisten und dem Albertplatz als Eingang des Szeneviertels Neustadt ein neues Gesicht geben.

3.2 Inspiration

In den letzten Jahren zeigt sich gerade an Haltestellen für öffentliche Verkehrsmittel in Europa aufgrund ihrer klaren Anforderungen und des gewachsenen Anspruchs an ansprechende Aufenthaltsorte im Haltestellenbereich eine gewisse Experimentierfreudigkeit mit Form und Material. Folgende Beispiele wirkten als Inspiration:

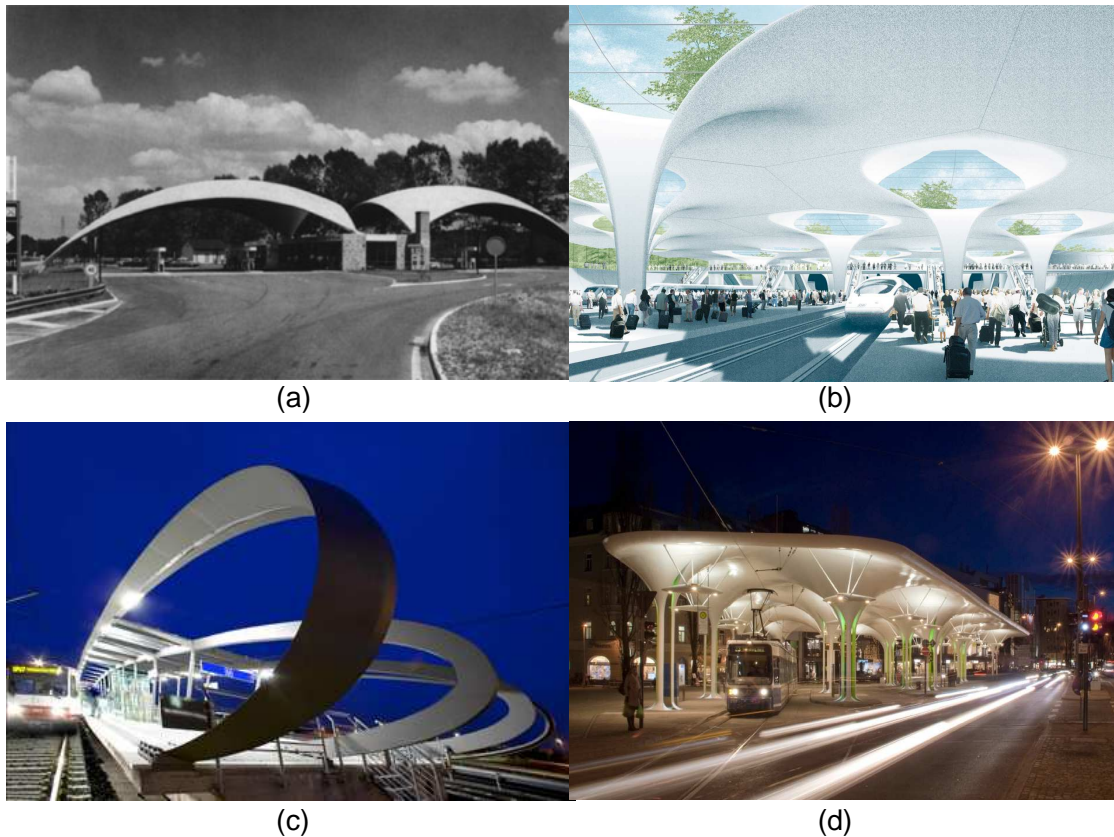


Bild. 2 (a) Tankstelle Deitingen Nord, Heinz Isler [1], (b) Stuttgart 21, Christoph Ingenhoven [2], (c) Haltestelle Hauptfriedhof, Dortmund [3], (d) Haltestelle Münchner Freiheit, München [3]

Fig. 2 (a) Gas station in Deitingen Nord, Heinz Isler, (b) Stuttgart 21, Christoph Ingenhoven, (c) Train station Hauptfriedhof, Dortmund, (d) Train station Münchner Freiheit, München

3.3 Entwicklung des Modells

Zunächst testeten wir in einer Versuchsreihe verschiedene Formen, die sich als Überdachung einer Bushaltestelle eignen.

3.3.1 Versuch 1: Gipsmodelle mit Leinen- und Baumwollstoff

Wir nutzten hierfür die Materialien Leinen und Baumwolle als Trägermaterial mit Gips als Bindemittel. Als erstes tauchten wir den trockenen Stoff in das Gipsgemisch ein, was sich als problematisch herausstellte, da der Stoff dem Gips sofort die Feuchtigkeit entzog und eine körnige Oberfläche entstand. Durch vorhergehende Befeuchtung konnte dem entgegen gewirkt und eine glattere Oberfläche erzeugt werden. (Bild. 3), (Bild. 4)

Als Ausgangsform nutzten wir zunächst einfache Formen, wie gleichschenklige Dreiecke, Quadrate und Kreise. Im zweiten Schritt versuchten wir durch Gewichte und Variationen der Formen, wie zum Beispiel durch ein Loch in der Schale, herauszufinden, in wie weit sich die Wölbung verändert.

Dabei kristallisierte sich in unserer Versuchsreihe heraus, dass in einem physischen Modell einfache Formen, wie Dreiecke, dem idealen Bogen besonders nahe kommen.

Die einfache, klare Form der Dreiecke reduziert Fehlerquellen. Fehlerquellen entstehen durch ungenaue Aufhängung bzw. durch Materialschwächen. Durch die materialsparende Struktur der Dreiecksform treten diese Fehler nur in geschwächter Form auf.

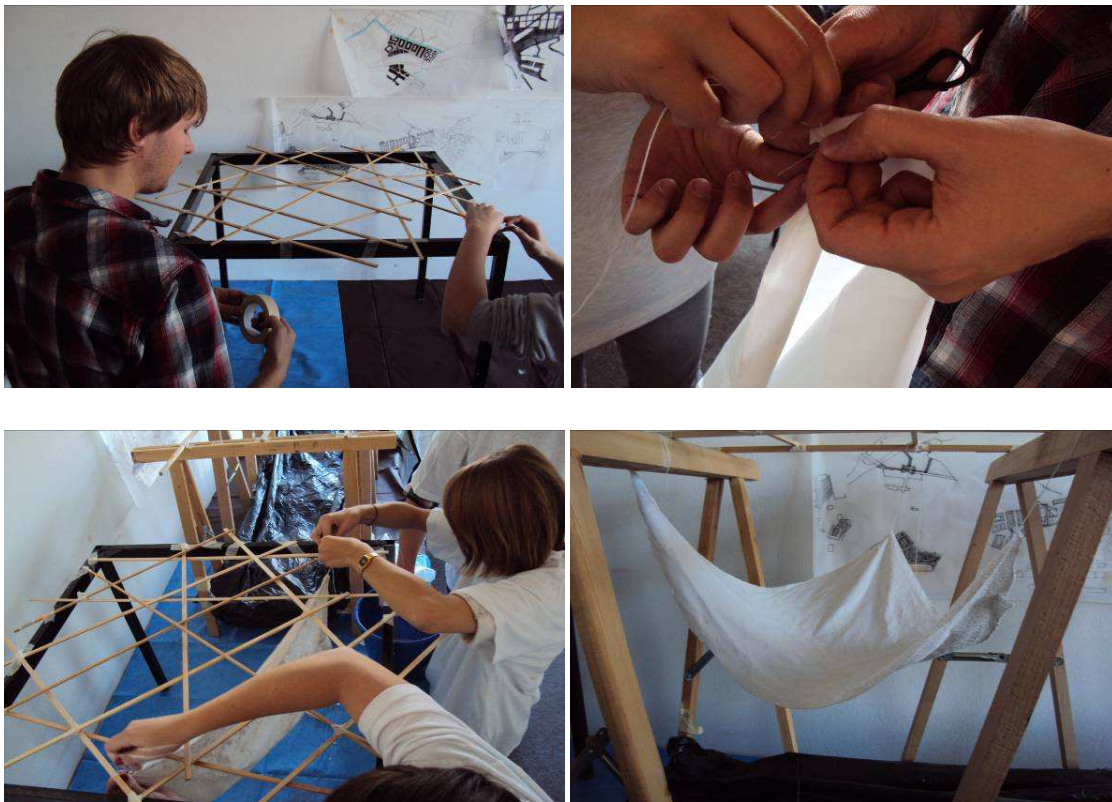


Bild. 3 Arbeitsschritte zur Erstellung des Gipsmodells
Fig. 3 Working steps for the creation of gypsum models

Aus der ersten Versuchsreihe lässt sich außerdem entnehmen, dass der Gips sich durch seine raue Oberfläche gut für eine Photogrammetrie eignet und außerdem robuste Eigenschaften aufweist. Allerdings bilden sich bei dem Leinenstoff starke Falten, was zu Ungenauigkeiten und einem falschen Ergebnis führt.



Bild. 4 Versuche mit komplexeren Formen
Fig. 4 Trials with more complex forms

3.3.2 Versuch 2: Glasfasermodelle mit Epoxidharz

Nach der Fehlerauswertung des ersten Versuchs besorgten wir flexiblere Materialien, die eine stärkere Wölbung zulassen. So kamen wir zu dünner Glasfaser, die wir mit einem Epoxidharzgemisch anstrichen. Parallel wurde auch der Leinenstoff mit dem Harzgemisch bestrichen.

Die Stoffe wurden in diesem Versuch noch in trockenem Zustand an dem Gerüst aufgehängt und ausgerichtet und erst anschließend mit dem Harz bestrichen. Die leicht gewebte Glasfaser zeigte sofort eine deutliche Wölbung. Bild. 5

Als Fazit des zweiten Versuches lässt sich zusammenfassen, dass die Glasfaser zwar nahezu die perfekte Wölbung ausbildet, jedoch aufgrund ihrer extrem dünnen Materialstärke als Modell nicht sehr robust ist. Der Leinenstoff hingegen schafft aufgrund seiner Dicke und Materialstruktur ein äußerst robustes Modell.

Fehlerquellen dieser Modellbauvariante können von dem Epoxidharzgemisch ausgehen, das bis auf ein Gramm genau gemischt werden muss, da das Harzgemisch bei leichten Abweichungen des Mischverhältnisses weich bleibt und nicht aushärten kann. Das Material ist aufgrund seiner Durchsichtigkeit und seiner glänzenden Oberfläche nicht besonders geeignet für eine Photogrammetrie. Hierfür muss das Modell nachträglich noch mit Farbe bearbeitet werden.



Bild. 5 Versuche mit Epoxidharzkleber

Fig. 5 Trials with epoxy glue

3.3.3 Digitalisierung mit Blender

Im nächsten Schritt haben wir versucht, die physischen Modelle zu digitalisieren. Hierfür bauten wir zuerst im Programm Blender unsere Gipsschalenmodelle nach. Die maßstäblichen Proportionen wurden hierfür in das Programm übertragen. Die Herausbildung der Bögen und der Bedienoberfläche sehr intuitiv erscheint, geht jedoch viel Freiheit im Entwurf dadurch verloren, dass man mit festen Parametern arbeiten muss. (Bild. 6)

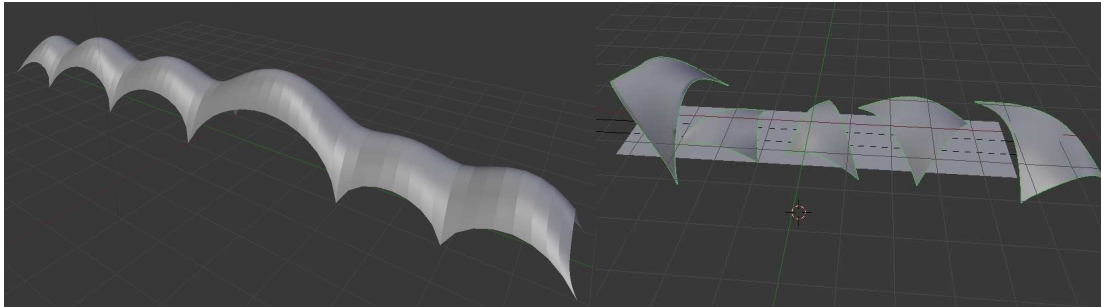


Bild. 6 Vorentwürfe mit Blender

Fig. 6 Form-finding using Blender

3.3.4 Digitalisierung anhand einer Photogrammetrie

Anschließend versuchten wir eine andere Form der Digitalisierung des physischen Modells, die Photogrammetrie. Bei dieser Methode wird die Oberfläche des Modells bearbeitet, falls diese nicht schon matt und strukturiert ist. Dies ist wichtig, da glatte, glänzende Oberflächen bei der Digitalisierung nicht erkannt werden. Ebenso muss der Untergrund eine unregelmäßig strukturierte Oberfläche besitzen. Anschließend haben wir eine Fotoreihe von ca. 70 Fotos rund um das Modell angelegt. Diese Fotos wurden anschließend in eine Software geladen, welche die Fotos online auswerten lässt und zu einem digitalen Modell formt. (Bild. 7) Wir verwendeten für unsere Photogrammetrie Autodesk 123D Catch.

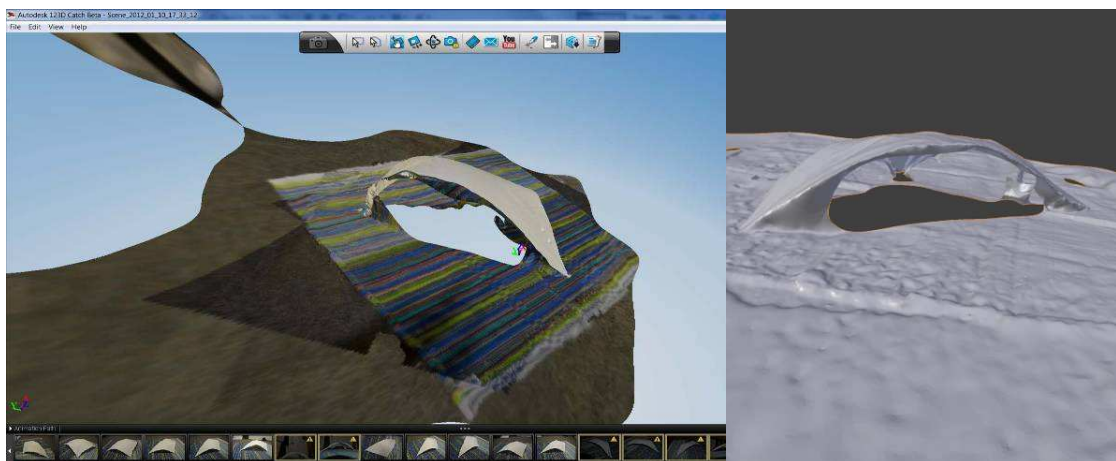


Bild. 7 Photogrammetrie in Autodesk 123D Catch

Fig. 7 Photogrammetry in Autodesk 123D Catch

Bei dieser Methode ist Erfahrung gefragt und die Randbedingungen müssen stimmen. Sobald der Untergrund nicht ausreichend heterogen ist oder die Oberfläche nicht genügend strukturiert ist, wird das Ergebnis unbrauchbar.

3.4 Entwurf

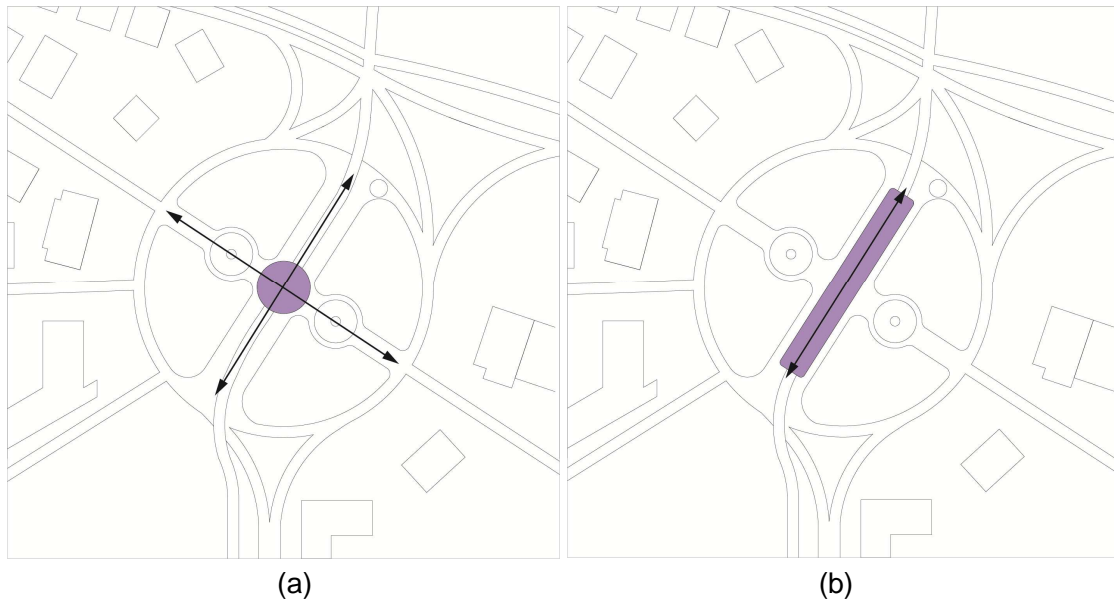


Bild. 8 (a) Punktförmige Lage, (b) Längliche Ausbildung
Fig. 8 (a) Point-shaped orientation, (a) elongate orientation

Eine komplette Überdachung über den gesamten Trambereich hätte zwar den Vorteil, dass ein Witterungsschutz komplett gegeben wäre, allerdings auch kaum Licht einfallen kann. Eine punktförmige Überdachung an nur einem Ort bietet nicht genug Unterstellmöglichkeiten und kann den gesamten Bereich nicht verbinden. (Bild. 8)

Durch die vorangegangenen Ergebnisse haben wir für uns festgestellt, dass sich die Dreiecksform am besten als Überdachungsmöglichkeit für eine Straßenbahnhaltestelle eignet, da sie flexibel, modular und besonders einfach ist. Durch die modulare Bebauung können wir sowohl die gesamte Strecke überdachen, als auch genügend Belichtung gewährleisten. (Bild. 9, Bild. 10, Bild. 11)

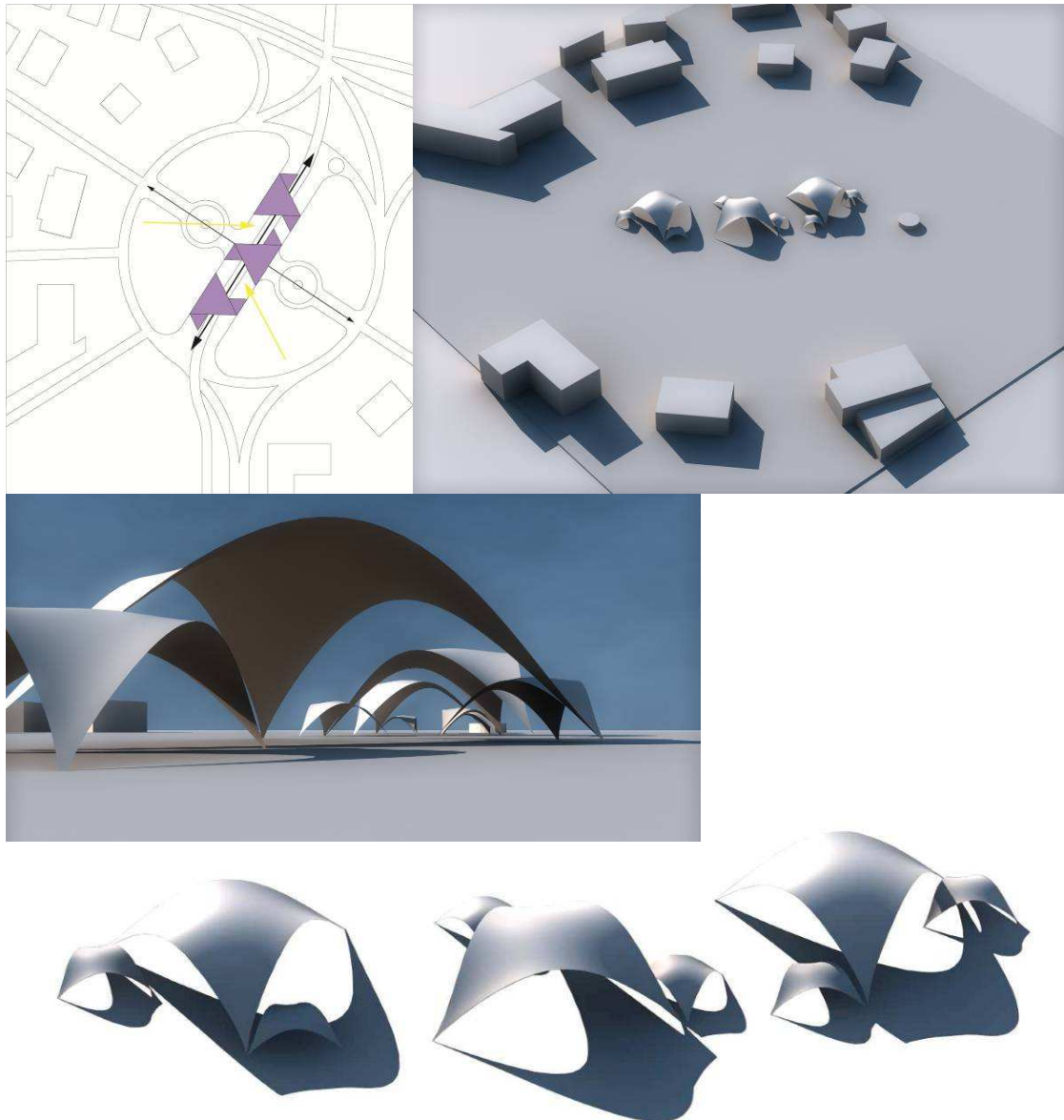


Bild. 9 Konzept und Entwurfsvorschlag
Fig. 9 Konzept and design proposal



Bild. 10 Entwurf im Bestand
Fig. 10 View of the design with surroundings



Bild. 11 Atmosphäre des Entwurfes am Albertplatz
Fig. 11 Atmosphäre of the design at Albertplatz

3.4.1 Überlegungen zur Realisierung

Um den viel frequentierten Verkehrsknotenpunkt in der Dresdner Neustadt nicht durch eine große Baustelleneinrichtung zu beeinträchtigen, schlagen wir eine Vorfertigung der kleinen Schalen im Werk vor. Wegen der besseren Rahmenbedingungen bei einer Vorfertigung im Werk, erwarten wir eine höhere Qualität der Betonmodule. Aufgrund ihrer Ausmaße wird dies bei den drei großen Schalen nicht möglich sein. Diese müssen mit Hilfe eines Lehrgerüsts vor Ort angefertigt werden. Für die kleinen vorgefertigten Schalen werden die Fundamente gesetzt und die Schalen anschließend nur noch montiert.

3.5 Auswertung der Ergebnisse

3.5.1 Auswertung Versuch 1 Gipsmodelle

Die Gipsmodelle sind von ihrer Struktur her schnell aushärtend und einfach zu verarbeiten. Der Gips ist einfach vorzubereiten und die Stoffe problemlos mit der Schere auszuschneiden. Problematisch ist die Reaktion der Materialien. Der Gips bildet eine nicht glatte Oberfläche, die das Bild von einer Schale verzieht. Als Arbeitsmodelle sind diese Modelle akzeptabel, doch für repräsentative Zwecke sind sie zu grob und ungenau. Grundsätzlich haben wir festgestellt, dass je größer der Bogen und je steiler die Kurve, umso steifer steht das Modell.

3.5.2 Auswertung Versuch 2 Glasfasermodelle

Die Glasfasermodelle sind deutlich aufwendiger und es gibt viele Randbedingungen zu beachten. Der Stoff ist aufgrund seiner leichten und flexiblen Struktur perfekt um die Wölbung im Modell herauszuarbeiten. Aufgrund seiner Leichtigkeit ist das Gewebe etwas schwieriger zuzuschneiden und in die Form zu hängen. Doch sobald das Gewebe mit dem Epoxidharzgemisch bestrichen wird, wird der Stoff beschwert und es bildet sich eine Wölbung. Problematisch ist bei Epoxidharz die Anfertigung des Harzgemischs. Sobald man von dem vorgegebenen Mischungsverhältnis um ein paar Gramm abweicht, bleibt das Harzgemisch weich und härtet nicht aus. Ebenso unpraktisch ist die lange Aushärtezeit von 48 Stunden. Das Ergebnis ist bei zu dünner Glasfaser zwar nicht sehr robust, aber fest genug und stellt ein ansprechendes Ergebnis dar, das auch für repräsentative Zwecken verwendet werden kann.

3.5.3 Auswertung Digitalisierung mit Blender

Blender besticht durch seine schnell begreifliche Oberfläche, die für ein 3D-Modellier Programm ein relativ intuitives Entwerfen zulässt. Jedoch verfällt man durch die Eingabe von Parametern sehr schnell in konstruktives Denken und das beachten technischer Möglichkeiten und Rahmenbedingungen. Ebenfalls bemerkenswert für das Programm ist, dass es als Freeware im Internet erhältlich ist.

3.5.4 Auswertung Digitalisierung anhand einer Photogrammetrie

Zur Erstellung der Photogrammetrie ist zu sagen, dass es eine ansprechende Variante ist, ein physisches Modell zu digitalisieren und so im Computer weiter bearbeiten zu können. Allerdings sind Vorkenntnisse wichtig und die Rahmenbedingungen für eine Photogrammetrie strikt einzuhalten, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Oftmals treten jedoch kleine Fehler auf, die durch Ungenauigkeiten in der Produktionskette verursacht

werden. Genauso sollte man über eine gute Kamera verfügen. Das Programm ist allerdings kostenlos. Angenehm ist der schnelle Onlinedienst, der zügig das fertige 3D-Modell zusendet.

3.5.5 Auswertung der FEM-Analyse

Wie in Bild. 12 zu sehen, treten allenfalls an den schlanken Fußpunkten leichte Verformungen auf. Das Momentenbild ist sehr gleichmäßig und nahezu überall treten keine signifikanten Momentwerte auf.

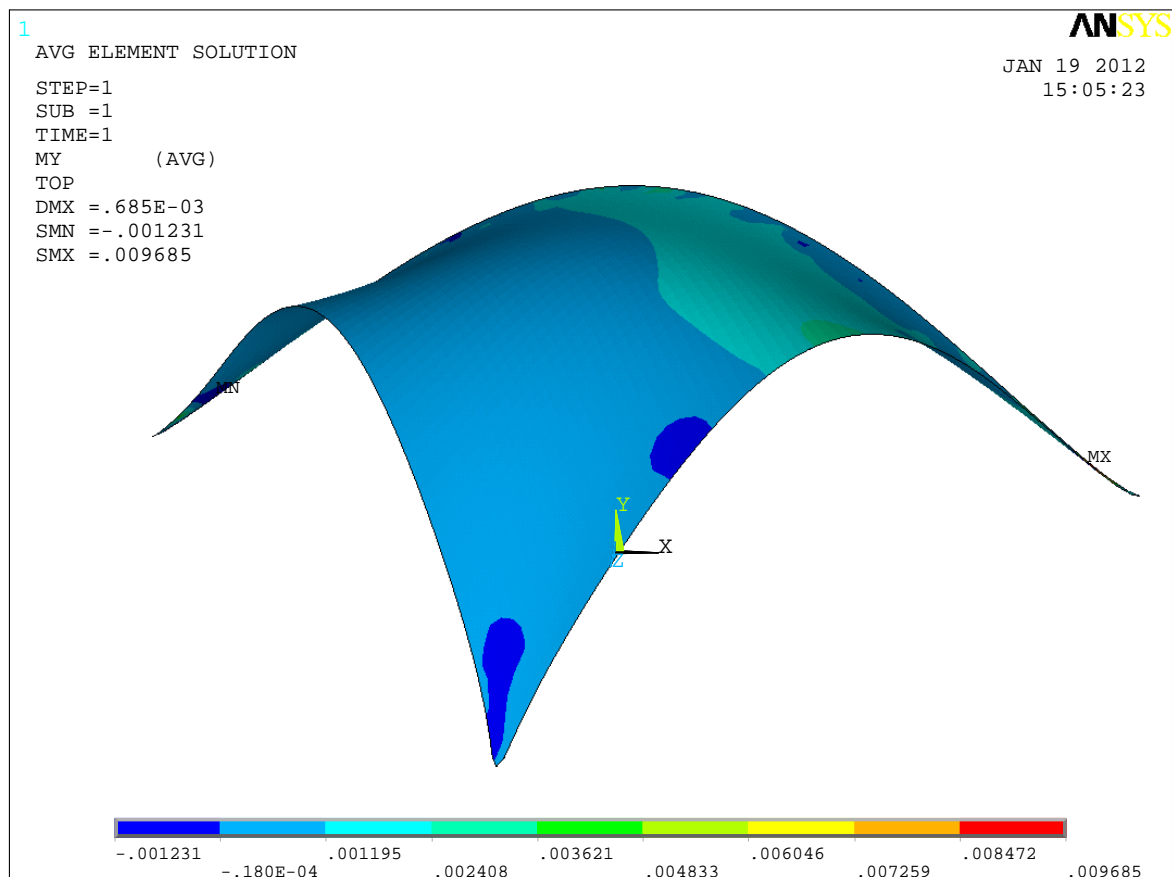


Bild. 12 Ergebnis der FEM-Analyse, Momente und Deformation der Form

Fig. 12 Result of the FEM-calculation, plot of moments in the deformed shape

3.6 Allgemeines Fazit und Entscheidung

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich für uns bei den unterschiedlichen Entwurfsmethoden die Erstellung eines physischen Modells als Einstieg in den Entwurf am besten eignet. Aufgrund der möglichen Formenvielfalt und der Einfachheit der Schalenmodelle werden bei einem physischen Bau schneller neue Ergebnisse und Formen entwickelt. Jedoch empfiehlt sich aufgrund der Genauigkeit und der Berechenbarkeit ein anschließendes Digitalisieren. Hierbei ist auch zu sagen, dass ein Übertragen der Form in Blender die genauesten Ergebnisse ermöglicht. Bei den

Entwürfen und Untersuchungen unserer Modelle in allen Varianten kristallisierte sich eine gleichschenklige Dreiecksform als optimales Prinzip für unsere Tramstation heraus. Durch das einsetzen einiger, sich in ihrer Größe unterscheidenden Form, lässt sich der langgestreckte Platz effizient mit viel Lichteintrag und wenig Baumasse überdachen. Ebenfalls die Schaffung eines modularen Systems, welches in einem Werk vorbereitet und auf der Baustelle nur noch auf die vorher gefertigten Fundamente aufgesetzt wird, erleichtert den Aufbau und behindert nicht durch ein großes Anlegen eines Lehrgerüsts und einer Baustelle den laufenden Verkehr an dem wichtigen Verkehrsknotenpunkt. Für die Schaffung des Endmodells haben wir uns aufgrund seiner Flexibilität für eine Baumwoll-Epoxidharz-Kombination entschieden, da dieses den repräsentativen Zwecken und der erforderlichen Wölbung der Schale am ehesten gerecht wird.

3.7 Literaturverzeichnis

- [1] www.baunetz.de, Webseite der BauNetz Media GmbH, 24.10.2011
- [2] www.barajas.de, Webseite von Benito Barajas, 24.10.2011
- [3] www.bauforumstahl.de, Webseite des deutschen Stahlbauforums, 24.10.2011

4 Nutzung physikalischer und digitaler Hängemodelle zur Formfindung von Dachkonstruktionen – Fallstudie Straßenbahnhaltestelle in Dresden Bühlau

BACHMANN, SINA; KLEEMANN, MARTIN; SCHMIDT, FALKO; VÖHRINGER CHRISTINE M.; WEDDE, ANDREAS

Von Hängemodellen abgeleitete Freiformschalen zeigen ein ideales statisches Verhalten wenn sie im realen Maßstab umgesetzt werden. Deshalb sind sie eine kosteneffiziente, Ressourcen schonende Konstruktionsmethode im Bereich des Konstruktiven Ingenieursbaus. Eingeführt von Frei Otto und Heinz Isler basierte die gängige Vorgehensweise bei der Formfindung solcher Strukturen auf physikalischen Elementen wie Kettennetzen, Stoffen oder ähnlichem. Anschließend wurden die erhaltenen Formen auf den Kopf gedreht, um freistehende Strukturen mit idealer Kräfteableitung zu erhalten. Diese Arbeit hat zum Ziel, neue Formfindungsmethoden auf Basis der 3-D Grafik Software Blender zu testen. Es wurde erfolgreich genutzt um eine Freiformschale zu erzeugen, die als Witterungsschutz für eine Straßenbahnhaltestelle in Dresden Bühlau dienen soll. Anschließend wurden Teile des Entwurfs mittels Rapid Prototyping in ein physisches Modell übertragen welches wiederum als Grundlage für die Fertigstellung des Gesamtmodells anhand traditioneller Modellierungsmethoden diente. Es wird gezeigt werden, dass Blender eine benutzerfreundliche Anwendung ist, welche einen einfachen Formfindungsprozess für statisch ausreichend akkurate Hängemodelle erlaubt. Darüberhinaus werden Methoden zur Übertragung von komplexen Formen von Rapid Prototyping Modellen diskutiert.

Using physical and digital hanging modelling for form finding of roofed constructions – Case study: Tram station in Dresden Bühlau

Free form shell structures derived from hanging methods exhibit an ideal behaviour when applied to real life applications. They are therefore a cost efficient, resource saving, building option in the field of structural engineering. Pioneered by Frei Otto and Heinz Isler, the usual way of finding such shapes was based on experimental hanging methods employing physical elements such as chain grids, fabrics and other similar means. Afterwards, the results were inverted in order to achieve a free standing structure with ideal force distribution. This project aimed at testing new form finding capabilities based on digital solutions with the 3D graphics software Blender. It was successfully used to generate a free form shell structure providing cover for a tram station in Dresden Bühlau. Afterwards, parts of the design were converted into a physical model with Rapid Prototyping and used as a foundation for finishing the physical model with traditional model building methods. It will be shown that Blender is an architectural friendly application allowing an easy-to-use form finding process for hanging models with sufficient accuracy. Beyond that, methods for copying complex shapes from rapid prototyping models will be discussed.

4.1 Einführung

Das Seminar hatte sich das Testen von Methoden zur Formfindung von Hängemodellen als Ziel gestellt. Mit Hilfe eines 3D-Design-Programmes wurde ein Hängemodell simuliert und im Anschluss als physisches Modell dreidimensional gedruckt und gebaut. Da die bisherige Vorgehensweise auf einer Umsetzung vom physischen in ein digitales Modell beruhte, sollte dieses Projekt Möglichkeiten des umgekehrten Weges ausloten.

Eine Haltestelle schien die ideale Entwurfsaufgabe um diese Herangehensweise durchzuarbeiten, da kein Raumprogramm von Nöten ist und der primäre Fokus auf die Hängekonstruktion gesetzt werden konnte. Daher wurde ein Entwurf aus dem Grundstudium des Dresdner Architekturstudiums neu aufgegriffen und bearbeitet. Es handelt sich dabei um die Endhaltestelle in Dresden Bühlau die mehrgleisig ist und dadurch das Experimentieren mit verschiedenen Schalenformen ermöglicht. Diese sollten miteinander kombiniert werden, um ein additives und erweiterbares Ganzes zu bilden. Die Überdachung dient hauptsächlich dem Schutz der Fahrgäste vor Witterung beim Warten sowie Ein- und Aussteigen.

In diesem Projekt wurde die Formfindung mit dem Programm *Blender 3D* auf Basis diskretisierter, gleichschenkliger Dreiecke untersucht. Es handelt sich dabei um eine Open-Source Anwendung mit integrierter Physikanwendung die eine Simulation von Hängemodellen erlaubt. Der Gestaltfindung auf Grundlage anderer Basisformen wurde aufgrund der Limitation des Programms nicht nachgegangen. Diese bestehen hauptsächlich darin, dass *Blender 3D* ein Mittel zur Erstellung von 3D-Grafiken darstellt und nicht der Tragwerkssimulation mit dafür vorgesehenen Diskretisierungsalgorithmen dient. Desweiteren wurde von einer konstanten Dicke der Schale ausgegangen. Es erfolgte keine Beachtung möglicher Kraftspitzen und deren statische Auswirkungen, da dies nicht den Schwerpunkt der Untersuchungen darstellte.

4.2 Inspiration

Als Inspiration für unseren Entwurf diente unter anderem das Krematorium in Kakamigahara, Japan. (Bild. 1, Bild. 2)



Bild. 1 Krematorium Kakamigahara, Toyo Ito and Associates [3]
Fig. 1 Crematory Kakamigahara, Toyo Ito and Associates



Bild. 2 Krematorium Kakamigahara, Toyo Ito and Associates [4]

Fig. 2 Crematory Kakamigahara, Toyo Ito and Associates

Aus dieser Inspiration entstanden erste Ideenskizzen für eine Form am gewählten Ort, welche zwei Gleise und einen Bussteig überdachen soll. (Bild. 3)

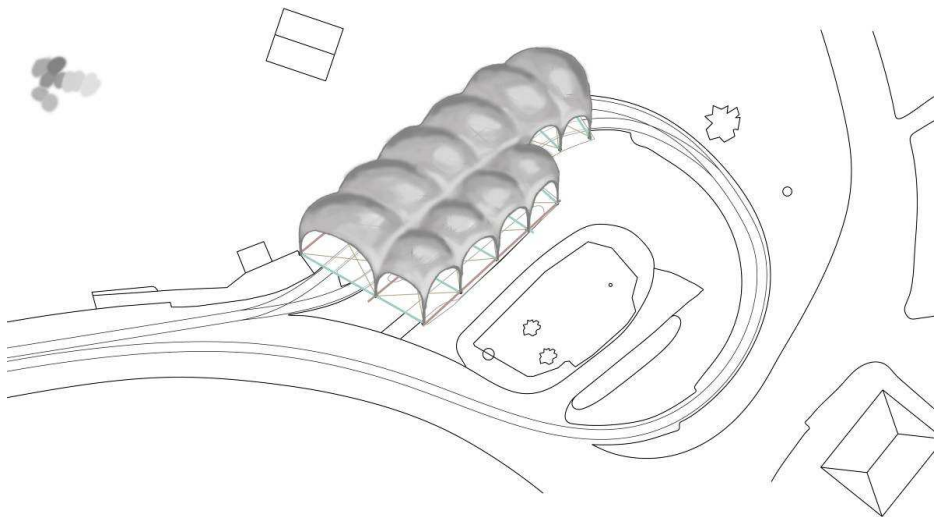


Bild. 3 Manuelle Skizze zum Entwurf

Fig. 3 Handdrawing of the design

4.3 Entwicklung des Modells

Nach Analyse des Ortes ergaben sich für den Entwurf folgende Bedingungen: Die Haltestelle hat eine ungefähre Ausdehnung von 16m mal 30m und sollte jeweils einen Bahn- und Bussteig überdachen. Aufgrund dieser Dimensionen wurden von Anfang an mehrere Schalen nebeneinander eingeplant, um die riesigen Spannweiten zu verringern.

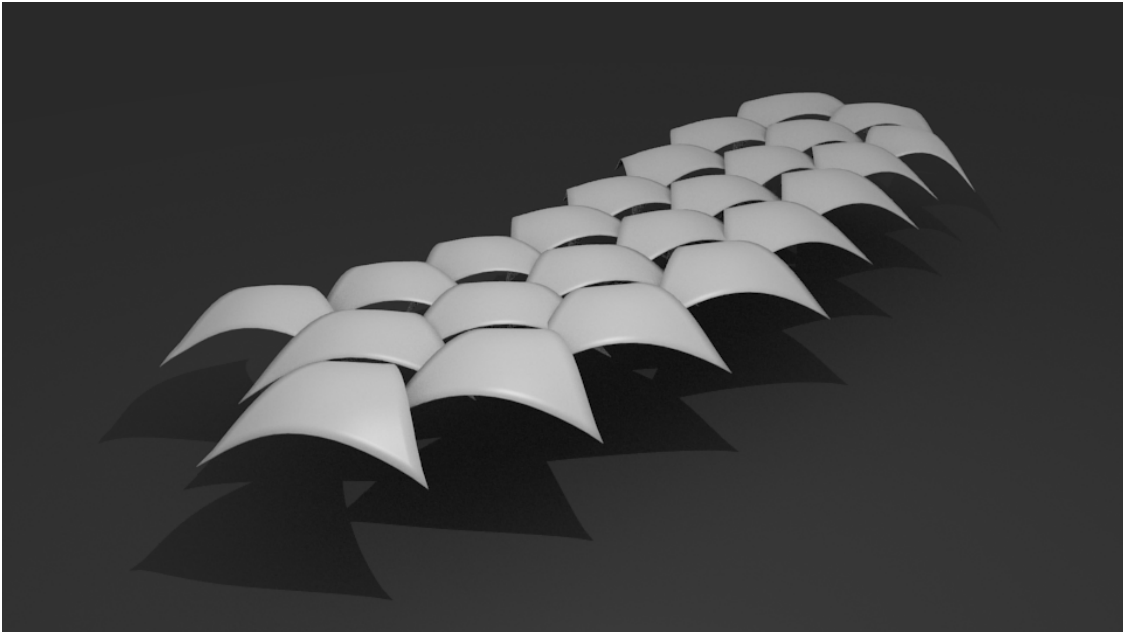


Bild. 4 Erste Entwurfsstudie als Dachausführung

Fig. 4 First design-study for a roofing

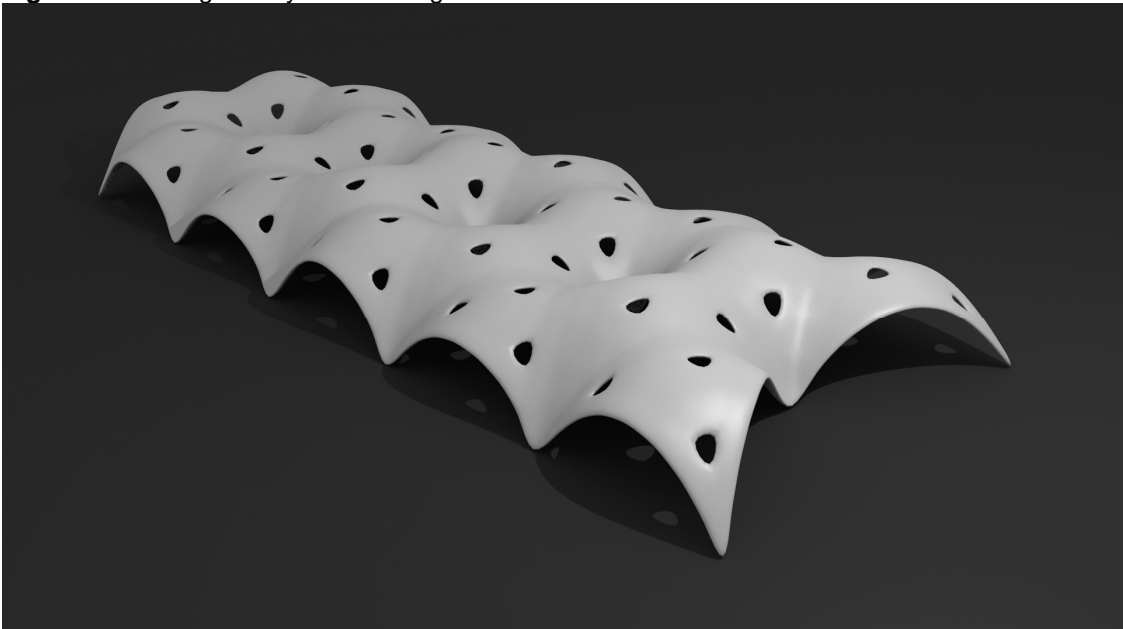


Bild. 5 Zweite Entwurfsstudie zum Haltestellenentwurf als selbsttragendes Hängemodell

Fig. 5 Second design-study as a self-supporting hanging model

Verschiedene Referenzprojekte dienten zur Ideen- und Formfindung, Skizzen wurden angefertigt. Auf dieser Basis konnten nun erste digitale Varianten erstellt werden, (Bild. 4, Bild. 5) wobei sich in Konsultation mit dem Lehrstuhl eine bevorzugte Lösung herauskristallisierte. Es folgte eine abschließende Optimierung des Entwurfs in Bezug zum Ort und der zu erfüllenden Anforderungen (Höhe der Straßenbahn, Breite der Bahnsteige und Gleise).

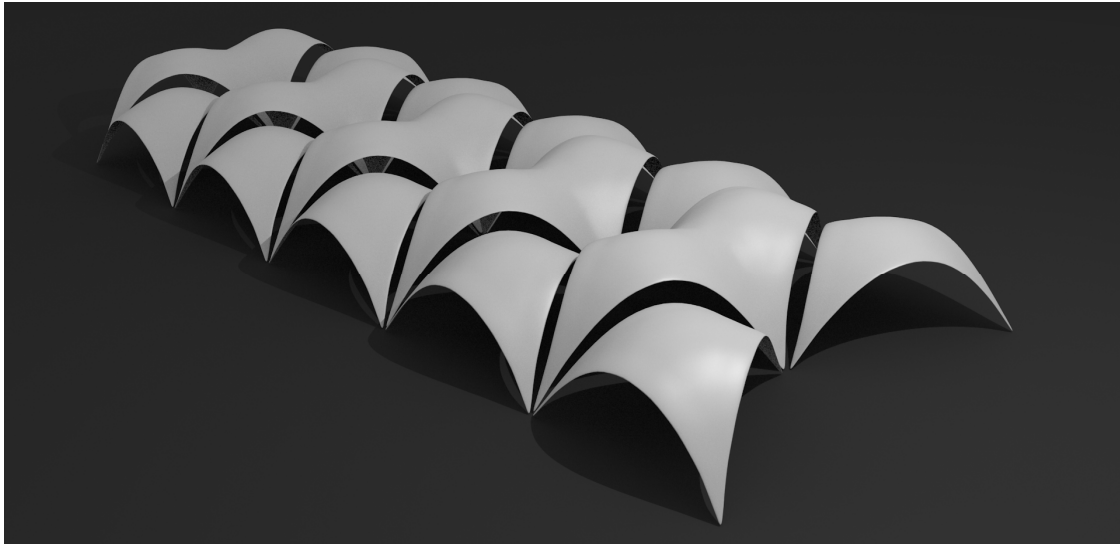


Bild. 6 Finaler Entwurf als selbsttragendes Hängemodell

Fig. 6 Final design as a self-supporting hanging model

Das finale digitale Modell wurde mit Hilfe des Programms *Blender 3D* generiert. Dabei bildeten gleichschenklige Dreiecke die Grundlage für die Module. (Bild. 6, Bild. 7, Bild. 9) Diese wurden anschließend hinreichend unterteilt um somit eine feingliedrige Mesh-Topologie zu erhalten. (Bild. 8) Den daraus resultierenden Knotenpunkten wurden Gewichte zugewiesen, die Ankerpunkte an den Ecken des Dreiecks fixiert. Die anschließende Hängesimulation wurde mithilfe von *Blenders* „Particle Spring System“ realisiert, eine Methode die eine Reihe an Möglichkeiten bietet. [2] So kann man während der laufenden Simulation z.B. die Gewichte ändern und erhält sofort eine entsprechende Antwort der sich daraufhin ändernden Freiform. Somit eignete sich Blender hervorragend um spielerisch, künstlerisch, aber auch konzeptionell, eine geeignete Form herzuleiten.

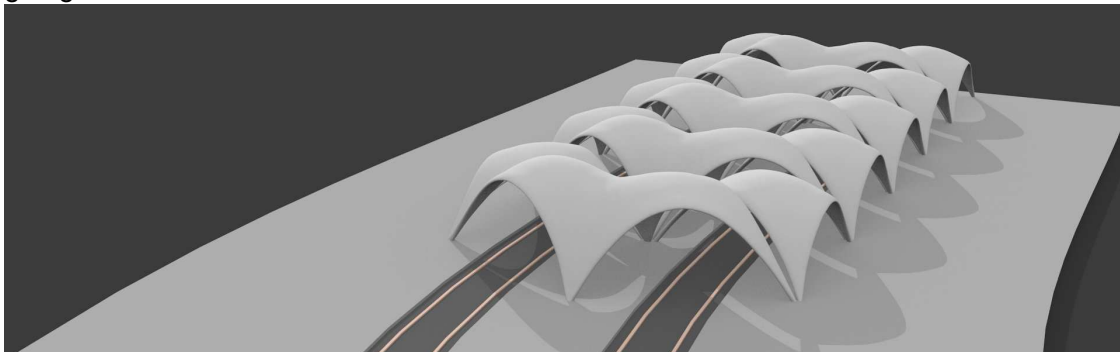


Bild. 7 Konzeptansicht mit Straßenbahngleisen zum finalen Haltestellenentwurf

Fig. 7 Conceptual view of the design with the tracks

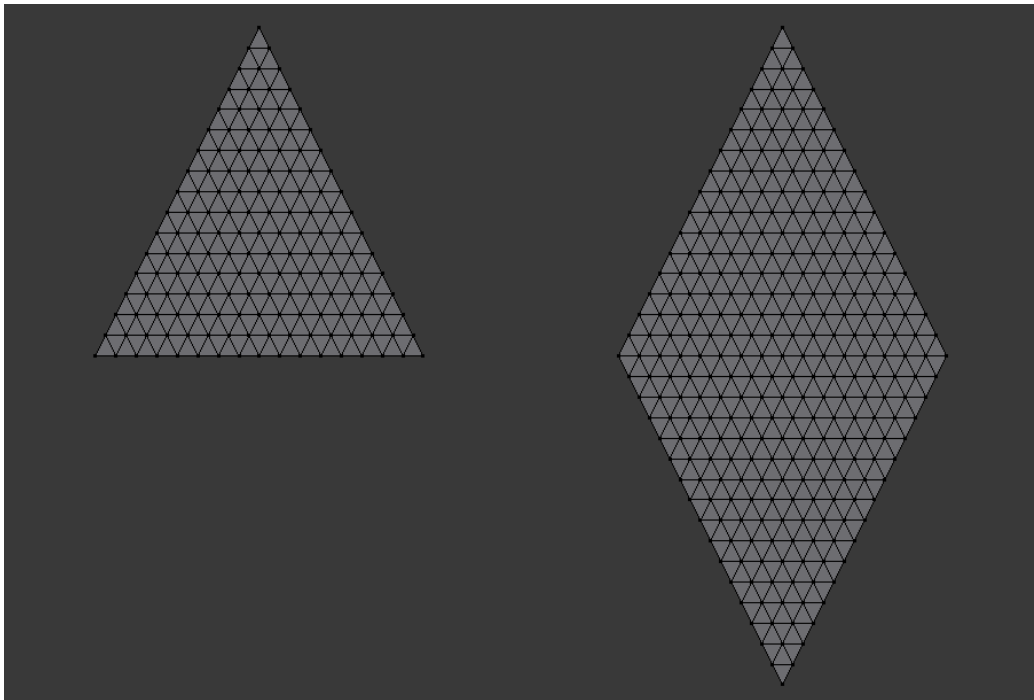


Bild. 8 Dreiecksmodule und ihre Diskretisierung. Links: Außenteile. Rechts: Mittelteile
Fig. 8 Discretization of the Triangular-modules



Bild. 9 Schaubild Haltestellenentwurf
Fig. 9 Visualization of the Design

Als Ergebnis entstand eine Serie von Modulen die sich aus zwei Komponenten zusammensetzte: Jeweils ein Hängemodell basierend auf einem einzelnen gleichschenkligen Dreieck sowie zwei miteinander gekoppelte Dreiecke.

Der digitale Entwurf sollte nun in ein reales Modell umgesetzt werden. Die naheliegendste und hinreichend genaueste Möglichkeit stellte das Rapid-Prototyping, ein haptischer 3D Druck, dar. Die beiden fertig simulierte Basiselemente wurden in eine separate Datei, dem STL Format, umgeschrieben. Dieses Datenformat war notwendig um die Module für die 3D Drucker Software lesbar zu gestalten. Komplikationen tauchten mit den gewählten Dimensionierungen auf, da die exportierte Blender-STL-Datei, das Format für den 3D-Druck, nicht mit der Software des 3D-Druckers abgestimmt war. Dadurch ergaben sich unterschiedliche Skalierungen bzw. Maßstäbe in beiden Programmen. Vor Ort musste das digitale Modell anhand von bekannten Seitenmaßen erneut auf die richtige Dimension gebracht werden. Die gleichen Probleme tauchten auch mit der Verwendung des Programms Rhino 4.0 auf. Weitere Einschränkungen ergaben sich aufgrund der Mesh Topologie der Module da ein auf Mesh Flächen basierendes Modell nur eine diskrete Annäherung an ein perfektes, kontinuierlich glattes, Hängemodell ist. Somit waren die zu druckenden Formen von vornherein mit einer Approximierung belastet die eine glatte Oberfläche von Beginn an ausschlossen. Es soll jedoch angemerkt werden das die Approximierung beliebig verfeinert werden hätte können – allerdings zu Lasten der eigentlichen Druckzeit.



Bild. 10 Links: Fertiges 3D-Druck-Modul. Oben rechts: 3D-Modul als Schablone für Gipsnachbildung. Unten rechts: Fertiges Modell aus Original- und Nachbauteilen.
Fig. 10 Left: 3D-print module. Top right: 3D-module as template for a gypsum model. Down right: Final Model.

Nach Abschluss des Druckvorgangs konnten die beiden Prototypen nun als Vorlagen für die restlichen Teile des Modells genutzt werden. (Bild. 10) In Vorversuchen stellte sich eine Kombination aus nassem, festem Baumwollstoff und Modellergips als die beste Möglichkeit heraus, den digitalen Entwurf physisch umzusetzen.

4.4 Auswertung der Ergebnisse

Beim Entwurf von Hängekonstruktionen eignet sich die Verwendung von 3D-Design-Programmen wie Blender sehr gut, da sich sehr schnell verschiedene Szenarien und Varianten generieren lassen. Es ist damit ein hilfreiches Instrument, um eine Vorstellung von Schalenformen und ihrer Hängewirkung zu bekommen. Ein physisches Arbeitsmodell würde sehr viel Zeit in Anspruch nehmen und führt in den meisten Fällen nicht gleich zur gewünschten Form die zudem auch noch mit größeren Ungenauigkeiten behaftet ist. Da sie designorientiert und weniger ingenieurslastig sind, eignen sich 3D-Design Programme hervorragend für die Anwendung in der Architektur wo oftmals auch auf spielerischem Wege neue Entwurfansätze gefunden werden. Allerdings stellen diese Programme kein Mittel zur statischen Berechnung solch komplexer, gekrümmter Formen dar und eine weitere Analyse in Ingenieursprogrammen ist erforderlich und gegebenenfalls eine Anpassung der Form nötig.

Untersuchungen mit dem Statik-programm ANSYS ergaben, dass die finalen Module in der Tat einem echtem Hängemodell sehr nahe kommen. Eine genaue Analyse ist aber noch ausstehend da die Mesh-Topologie für die statische Betrachtung geändert werden musste und somit neue Ungenauigkeiten in den Prozess einbezogen werden, welche das Auftreten von geringen Momenten erklären können. Bild. 11 Dennoch lässt sich abschließend zusammenfassen, dass das Programm Blender sehr akzeptable Ergebnisse liefert die keiner bzw, nur minimaler Korrekturen benötigen.

Der 3D-Druck versprach die akurateste Umsetzung des digitalen in das physische Modell. Wie erwartet war das Ergebnis sehr genau. Die durch das 3D-Programm durchgeführte Kantenglättung konnte nicht in die druckbare STL-Datei übernommen werden. Es entstanden Mesh-Flächen, die durch Erhöhung der Auflösung für den Druck ausgeglichen werden mussten. Im vorliegenden Fall wurde eine geringere Auflösung gewählt, um die Druckzeit und auch Kosten zu minimieren. Allgemein ist festzuhalten, dass der 3D-Druck eine sehr kostenintensive Variante des Modellbaus darstellt. Daher wurden nur die zwei Grundelemente gedruckt. Diese dienten als Muster für weitere Elemente aus Stoff und Gips.

Die genaueste und kostengünstigste Möglichkeit die Gipsmodelle der Originalform nachzuempfinden, war die Nutzung der im 3D-Druck erstellten Muster als Schablone. Dabei wurde den Schablonen ein festes Baumwollstofftuch übergelegt und gemäß der Vorlage zugeschnitten. Nach Befeuchtung des Stoffes wurde er mit Gips bestrichen, um die Form zu fixieren. Nach mehrmaligem Auftragen von Gipsschichten, stellte sich die erwünschte Materialstärke, Oberflächenstruktur und Festigkeit ein. Dabei kam es zu mehreren Komplikationen. Der Zuschnitt der Stoffgrundlagen konnte nur ungenau ausgeführt werden, so dass die Teile in ihrer Dimensionierung differieren. Desweiteren stellten sich keine homogenen Oberflächen durch die manuelle Materialauftragung ein. Dies hätte aber durch eine weitere Nachbearbeitung ausgeglichen werden können. Die getrockneten Modellteile sind stark bruchanfällig und nehmen Luftfeuchtigkeit auf, wodurch das Material weich wird und sich weiter verformt. Unter Verwendung dieser Formnachbildungsmethode ließ sich zwar das Modell resourceneffizient zu Ende

bauen, die Aufgabe einer hinreichenden Genauigkeit war jedoch der zu begehende Kompromiss.

Formbildungstests mit Kettenhängemodellen wurden getestet aber konnten auf die gewählte Form nicht angewendet werden.

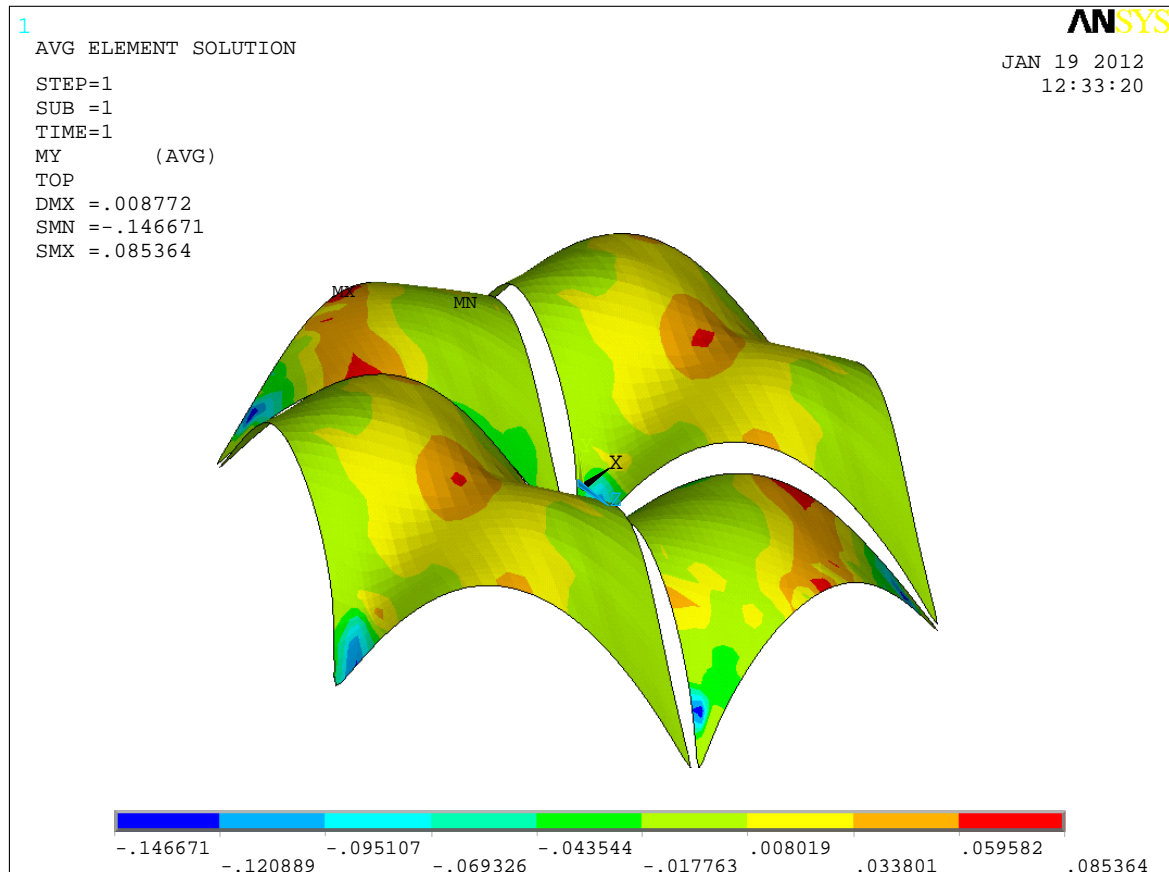


Bild. 11 Ergebnis der FEM-Analyse, Momente und Deformation der Form

Fig. 11 Result of the FEM-calculation, The plot of moments on the deformed shape

4.5 Literaturverzeichnis

- [1] Ramm, E. & Schnuck, E.: *Heinz Isler Schalen: Katalog zur Ausstellung*. Krämer: 1986.
- [2] Kilian, A. & Ochsendorf, J.: Particle-Spring Systems for Structural Form Finding. *Journal of The International Association For Shell And Spatial Structures*, Volume: 46, Issue: 147 (2005).
- [3] www.theaccounts.tumblr.com
- [4] www.detail.de, Webseite des Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 26.11.2011

5 Freiformfindung einer studentischen Mehrzweckhalle in Dresden

KADURA, SUSANN; MÄGEL, FRÄNZE; SCHMIDT, KAROLIN & WACKLER, TABEA

Hängemodelle stellen eine ideale Methode zu Formfindung von Tragwerken dar, da sie eine, den Materialeigenschaften gerecht werdende Lastabtragung gewährleisten. Sie zeigen viele Möglichkeiten in der freien Formfindung auf und bieten damit einen großen Spielraum für die Entwicklung der Primärstruktur. Diese Vorteile bilden die Grundlage dieser Arbeit, welche sich mit der Formfindung eines physikalischen Hängemodells auseinandersetzt. Ziel dieser Arbeit soll die Idee für eine Multihalle, als Bereicherung des Campus der TU Dresden, sein.

Formfinding of a Multi-purpose student hall in Dresden

Hanging models describe the ideal form of the construction to achieve the optimum load transmission. It provides many possibilities to create free form constructions which offer a wide scope for developing the primary structure. This work benefits from the advantages of hanging models. The aim of the work is giving proposal for a multi-purpose hall that can enrich the campus of the Dresden University of Technology.

5.1 Einführung

Auf dem Campus der TU Dresden gibt es keine Multifunktionshalle für die Durchführung größerer Veranstaltungen. Aus dieser Tatsache entwickelte sich der Gedanke mit Hilfe eines Hängemodells die Form für ein solches Gebäude zu kreieren. Als Standort fiel die Wahl auf das Grundstück zwischen dem Willersbau und dem Physikbau, da dieses genügend Freiraum bietet. (Bild. 1) Das Prinzip der Formfindung basiert auf der angestrebten Nutzungsunterteilung welche auch von außen zu erkennen sein soll. Es sind 3 Bereiche vorgesehen – eine Haupthalle für Veranstaltungen, daran gekoppelt eine Cafeteria und ein Lernbereich.



Bild. 1 Ort des Entwurfes

Fig. 1 Location of the design

5.2 Inspiration

Als Vorlage für den Entwurf diente in erster Linie die Multihalle in Mannheim von Frei Otto, die durch ihre organische Form inspiriert. (Bild. 2)



Bild. 2 Multihalle Mannheim [1]

Fig. 2 Multihalle Mannheim

Die Formfindung begann mit verschiedenen Versuchen, bei welchen auch das Verhalten im hängenden Zustand verschiedenen Materialien getestet wurde. Aus den Versuchen resultierte eine favorisierte Grundform, die sich aus drei aneinander gekoppelten Schalen zusammensetzt. (Bild. 3)

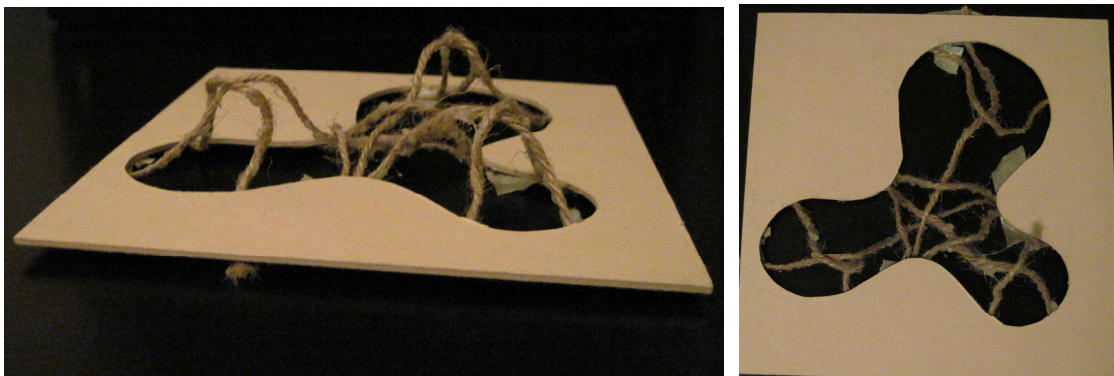


Bild. 3 Erstes Ideenmodell

Fig. 3 First conceptual model

5.3 Entwicklung des Modells

5.3.1 Materialauswahl

Aus den Materialstudien erfolgte der Entschluss ein Hängemodell aus Ketten zu realisieren, da sich dieses Material als sehr zweckmäßig auf Grund seines

Eigengewichtes herausstellte. Die gewählten feinmaschigen Ketten hängen ohne zusätzliches Gewicht in Form der Kettenlinie. Als Grundplatte des Hängemodells wählten wir eine stabile MDF Platte die durch die Last der Ketten keine Änderung der Form aufweist. Aus der Form resultierten verschiedene Problematiken. Die größte Herausforderung stellten die Verbindungen der einzelnen Schalen dar. Ein weiteres Problem ergab sich aus den Eingangssituationen. Die Herangehensweise an die Lösung dieser Aufgaben erfolgte über Experimente am physikalischen Modell.

5.3.2 Physikalisches Modell

Der erste Schritt beinhaltete die Festlegung der organischen Grundrissform. Diese wurde dann auf die Grundplatte des Modells übertragen. Als Grundlage der Kettenpositionen wurde ein Raster, mit Achsabständen von 2,5 cm im Modell, auf den Grundriss projiziert. Die Schnittpunkte von Raster und Grundriss wurden mit Nägeln versehen, um die Befestigung der Ketten zu gewährleisten. (Bild. 4)

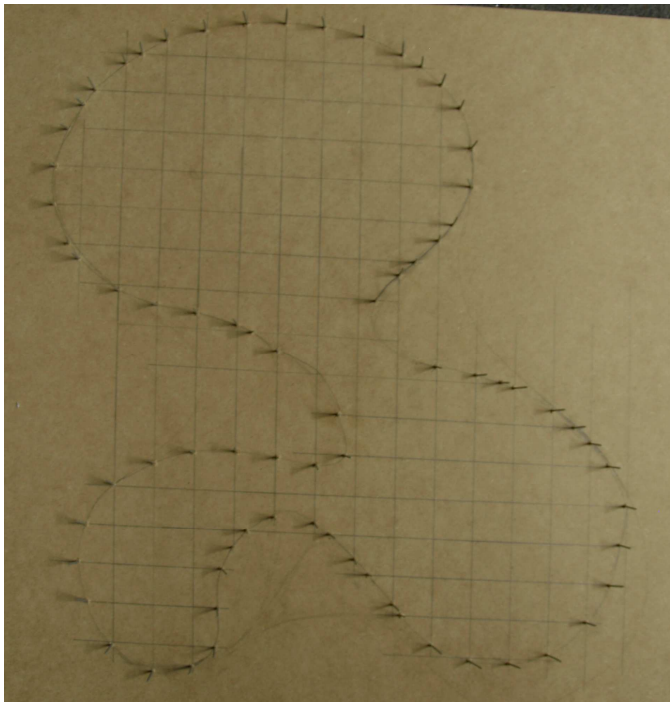


Bild. 4 Grundriss

Fig. 4 Floor plan

Als nächstes wurden die Höhen der einzelnen Schalen durch den später am Scheitelpunkt gelegenen Knoten bestimmt und mittels Ketten fixiert. Die erforderliche Länge wurde durch Experimentieren ermittelt. Im Bearbeitungsprozess wurden die Ketten temporär durch Styrodurelemente gehalten, um spätere Änderungen zu ermöglichen. Durch die unregelmäßige organische Form kam es zur Verschiebung der Parabelminima und somit zu einem Abweichen aus der elliptischen Form. (Bild. 5)

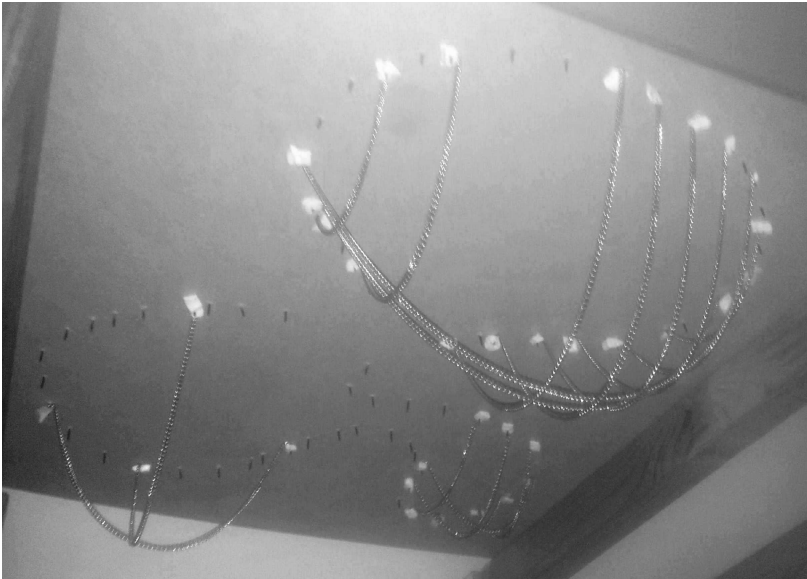


Bild. 5 Zwischenstand
Fig. 5 Intermediate result

Nach Versuchen ergab sich als Problemlösung die Teilung der längeren Ketten und einer Befestigung an den Querketten. Diese mussten anschließend neu justiert werden, da eine Last hinzu kam, die die Kettenform veränderte. (Bild. 6)



Bild. 6 Verbindung der verschiedenen Schalen
Fig. 6 Connection of the shells

Die Im Grundriss festgelegten Eingänge wurden auch im Modell eingearbeitet. Die Umsetzung erfolgte durch zusätzlich angebrachte Ketten die den Eingang definierten. Diese wurden entsprechend des Rasters in die Netzstruktur integriert, da auf ihnen weitere Anschlusspunkte entstanden. (Bild. 7)

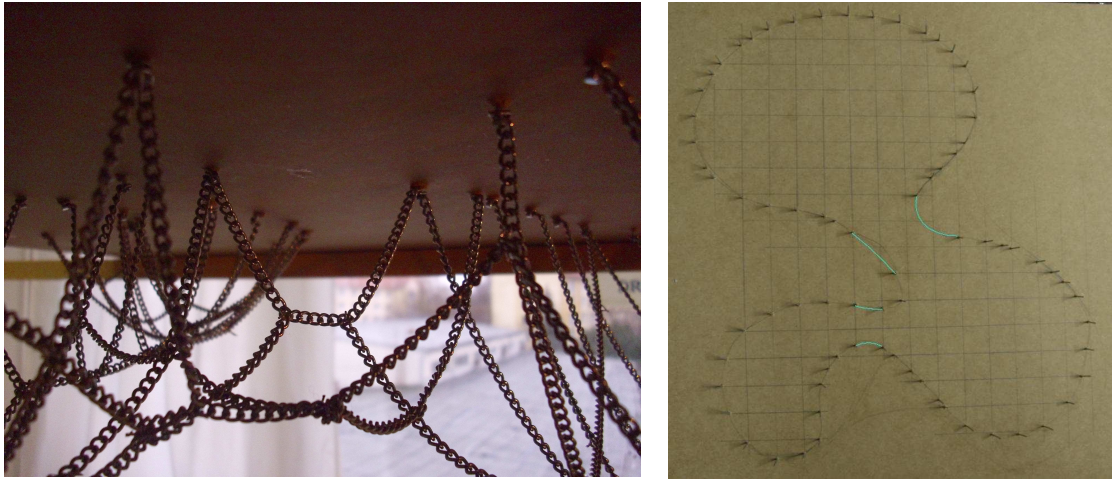


Bild. 7 Eingänge
Fig. 7 Entrances

Das kontinuierliche Anpassen und Nachjustieren der Ketten stellte die Grundlage für das Erreichen der optimalen Form dar. Dies hatte eine hohe Relevanz bei den Verbindungspunkten an den Durchgängen, welche ohne Veränderung der Kettenlinie erreicht werden sollten. Die Knotenpunkte wurden durch dünne Drähte fixiert.

Die temporäre Befestigung mittels Styrodur war nach der definitiven Formfindung nicht mehr notwendig und wurde durch eine endgültige Fixierung durch Nägel ersetzt. (Bild. 8)

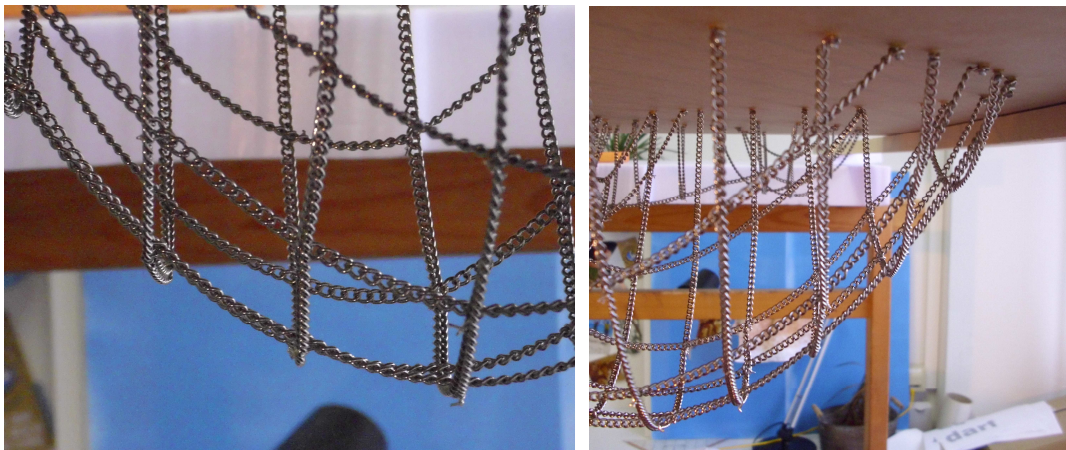


Bild. 8 Verbindungen
Fig. 8 Connections

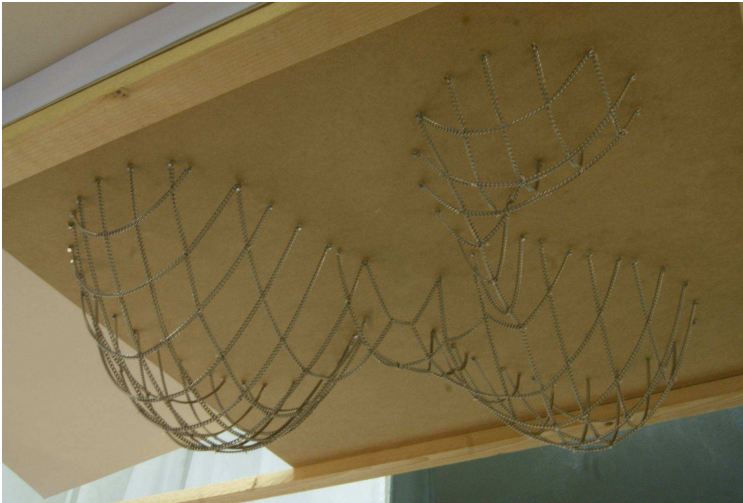


Bild. 9 Endstand des Modells

Fig. 9 Final model

5.3.3 Digitalisierung

Der nächste Schritt war die Umsetzung des finalen physikalischen Modells (Bild. 9) in ein dreidimensionales digitales Modell, welches mit Hilfe der Photogrammetrie und dem Programm 123D Catch [2] von Autodesk realisiert wurde. Um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen wurde mit verschiedenen Möglichkeiten experimentiert, die sich bei der Photogrammetrie von flächigen Objekten bereits bewährt hatten. Ein Beispiel ist die Beklebung der Grundplatte mit Zeitung um die Grundebene zu definieren und sie optisch mehr vom Kettenmodell abzuheben. Beides hatte jedoch nicht den gewünschten Erfolg. Das beste Ergebnis lieferte eine Fotoserie ohne Markierungen vor einem braunen Papphintergrund. Folglich scheint ein solches Kettenmodell etwas andere Anforderungen an den Bildaufbau zu stellen als geschlossene, flächige Formen.

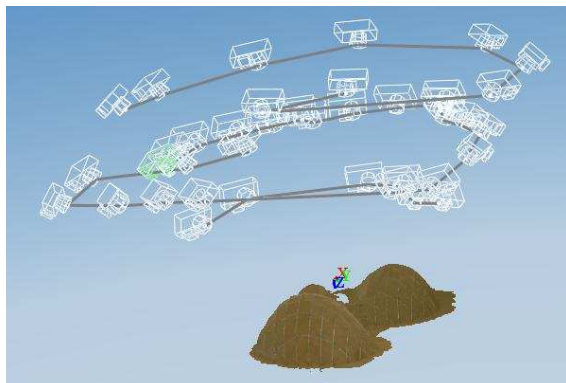
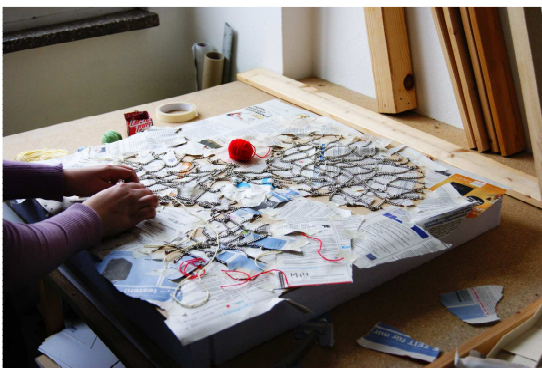


Bild. 10 Vorbereitung des Modells und Ergebnisse im 123D Catch

Fig. 10 Preparation of the model and results in 123D Catch

Die Digitalisierung erfolgt mittels Fotos, die in das Programm geladen werden. Daraus wird dann automatisch ein 3D-Modell generiert. (Bild. 10) In Rhinoceros [3] wurden die Ketten zuerst nachgezeichnet und die Verbindungspunkte markiert. Bild. 11 Aus diesen

Punkten lässt sich eine Fläche erzeugen, welche für die FEM Analyse verwendbar ist. (Bild. 11)

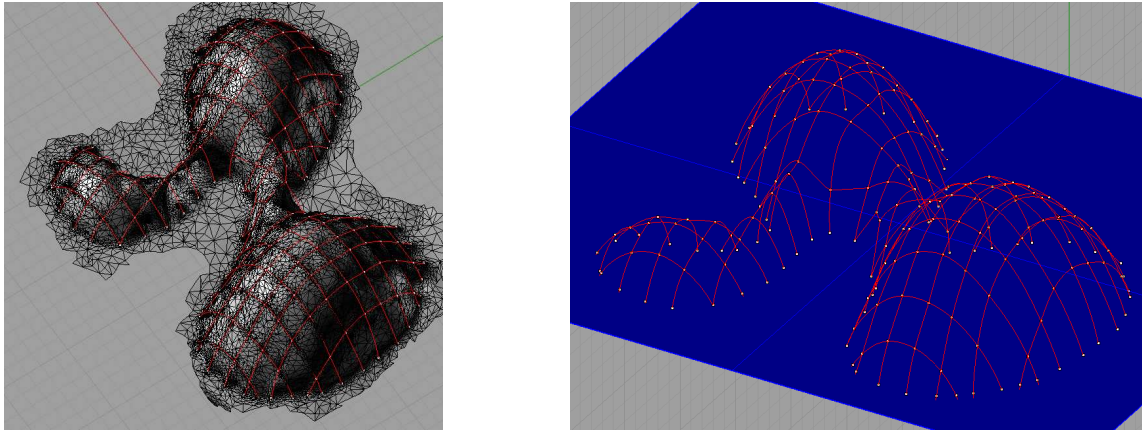


Bild. 11 Netz mit nachgezeichneten Ketten und Verbindungspunkten
Fig. 11 Mesh with retraced chains and connection points

Um die Vorteile unserer Form optimal auszunutzen, ist ein Material, welches vorrangig Druckkräfte aufnehmen kann am besten geeignet. Um Material zu sparen und eine ausreichende Belichtung zu gewährleisten, würde sich folglich Beton für das tragende Grundraster und transluzente Glas- oder Kunststoffplatten für die Eindeckung anbieten.

5.4 Auswertung der Ergebnisse

Bei der Formfindung eignet sich das Arbeiten mit einem physikalischen Modell in sofern, dass die Vorstellung der Form gefördert wird. Die Zusammenhänge von einzelnen Veränderungen auf die ganze Konstruktion sind begreifbar, und auf entstehende Probleme kann direkt reagiert werden. Andererseits ist beim Arbeiten mit einem digitalen Modell eine größere Genauigkeit zu erwarten, wodurch einige Probleme nicht auftreten. Allerdings lässt sich die optimale Form der Kettenlinie durch Experimente am physikalischen Modell besser erarbeiten, da man durch das Anbringen von Gewichten die Veränderung der Kettenlinie beobachten kann.

Da die Analyse auf dem Ergebnis der Photogrammetrie basiert, welche einige Abweichungen aufweist, zeigen sich auch in der FEM-Analyse Verformungen. Die Umwandlung und Aufbereitung des Polygonnetzes aus der Photogrammetrie stellt einen weiteren Bearbeitungsschritt dar, welche Fehlerquellen birgt. (Bild. 12, Bild. 13).

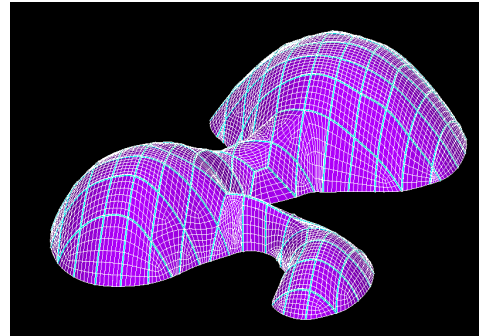
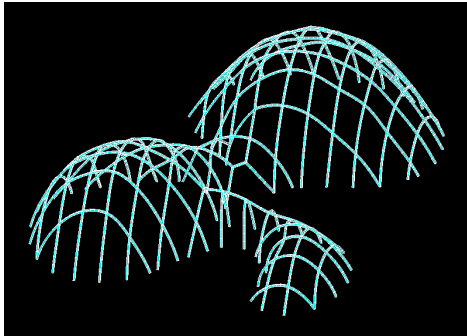


Bild. 12 Modell in FEM-Software Ansys
Fig. 12 Model in FEM-Software Ansys

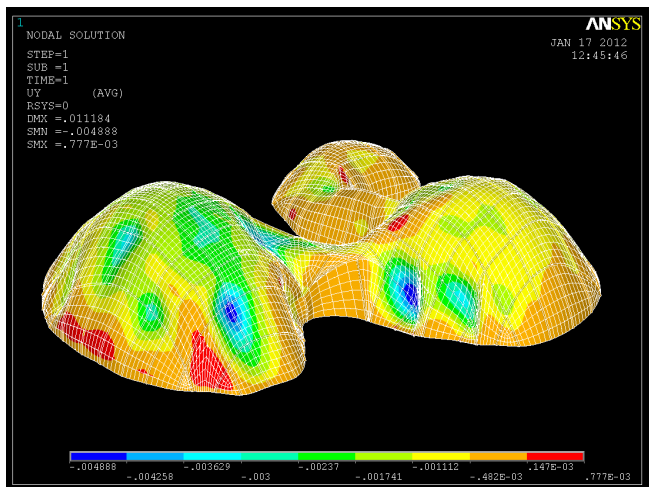


Bild. 13 Deformation im Modell in Ansys Analyse
Fig. 13 Deformation of the model in Ansys analysis

Zur Umsetzung könnten die Achsabstände der Tragkonstruktion überprüft werden, da man durch kleinere Abstände eine filigranen Erscheinung erzeugen können.

In der Realität findet man viele ähnliche Beispiele, die auf dem gleichen Prinzip basieren und schon lange bestehen. Insbesondere die experimentelle Entwicklung der Form mit Hilfe der Kettenlinie lässt eine hohe Stabilität bei geringem Materialeinsatz erzielen.

5.5 Literaturverzeichnis

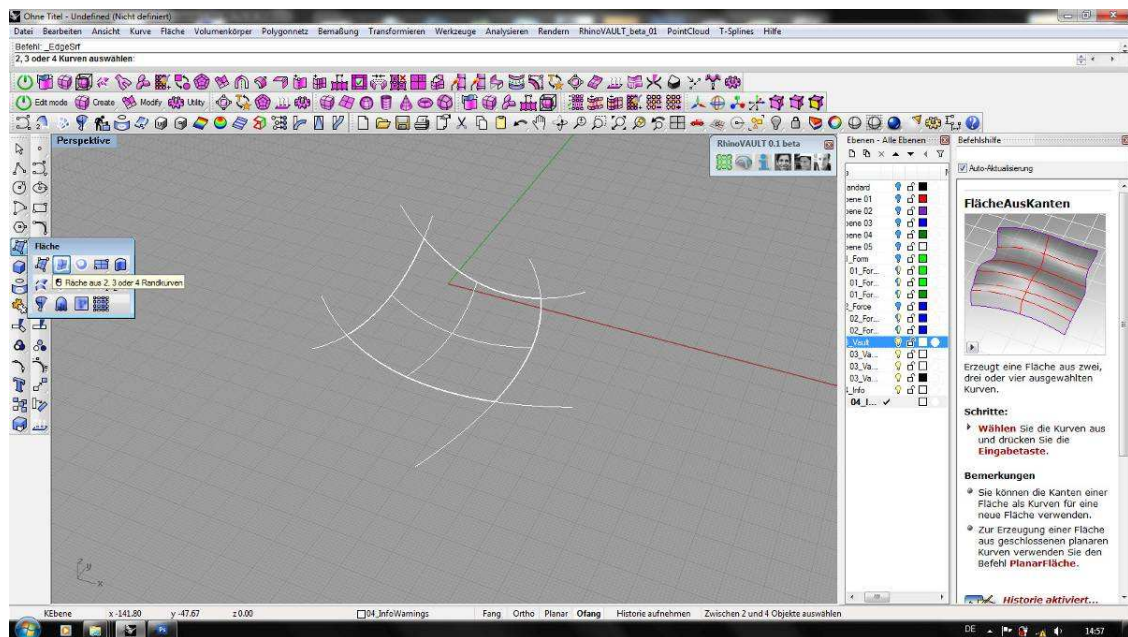
- [1] www.uni-stuttgart.de Webseite der Universität Stuttgart, Artikel über Frei Otto, 05.04.2006
- [2] Programm 123D Catch von Autodesk, www.123dapp.com/catch
- [3] Rhinoceros 4.0, www.rhino3d.com

6 Anlagen

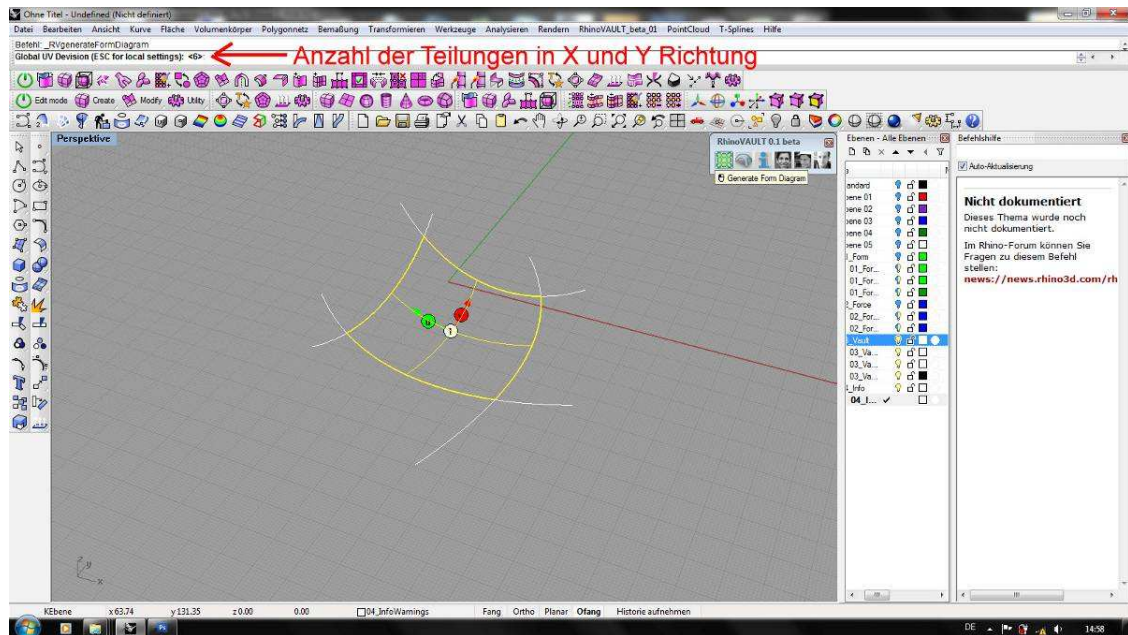
6.1 RhinoVAULT

RhinoVAULT ist ein Plug-In für die 3D Modellierungs-Software Rhinoceros®. Es wurde von Matthias Rippmann, Lorenz Lachauer und Philippe Block von der BLOCK Research Group der ETH Zürich entwickelt. Auf Basis des „Thrust Network Approach“ (Stützlinien-Netzwerk Verfahren) bietet es die Möglichkeit, weitestgehend intuitiv Formen zu entwickeln, in denen im Idealfall nur Druckkräfte auftreten.

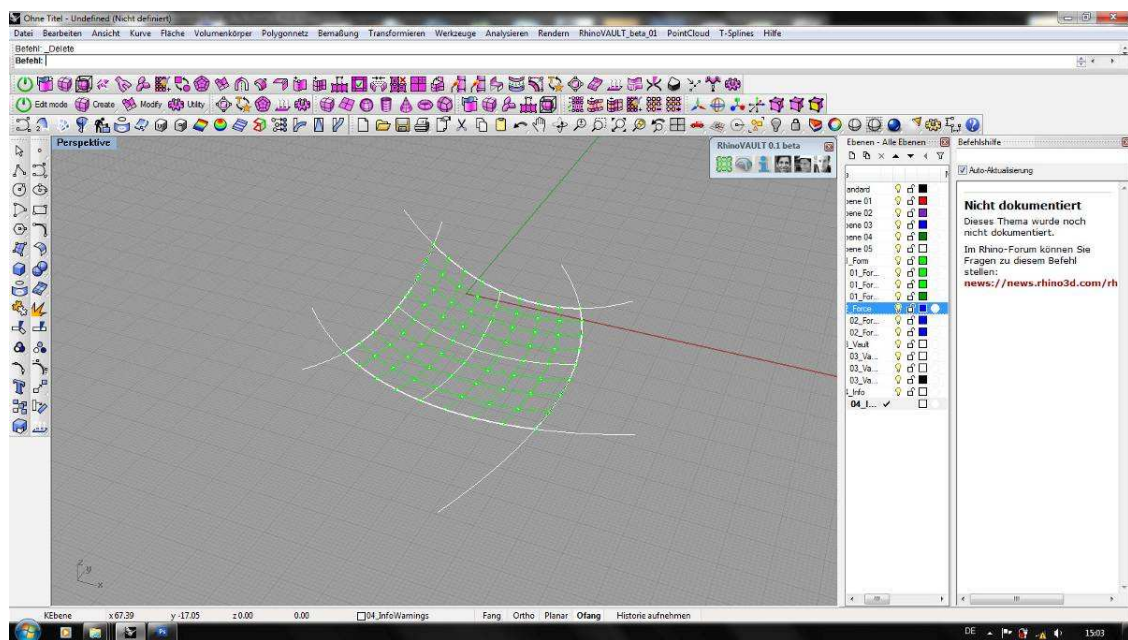
Vorgehensweise



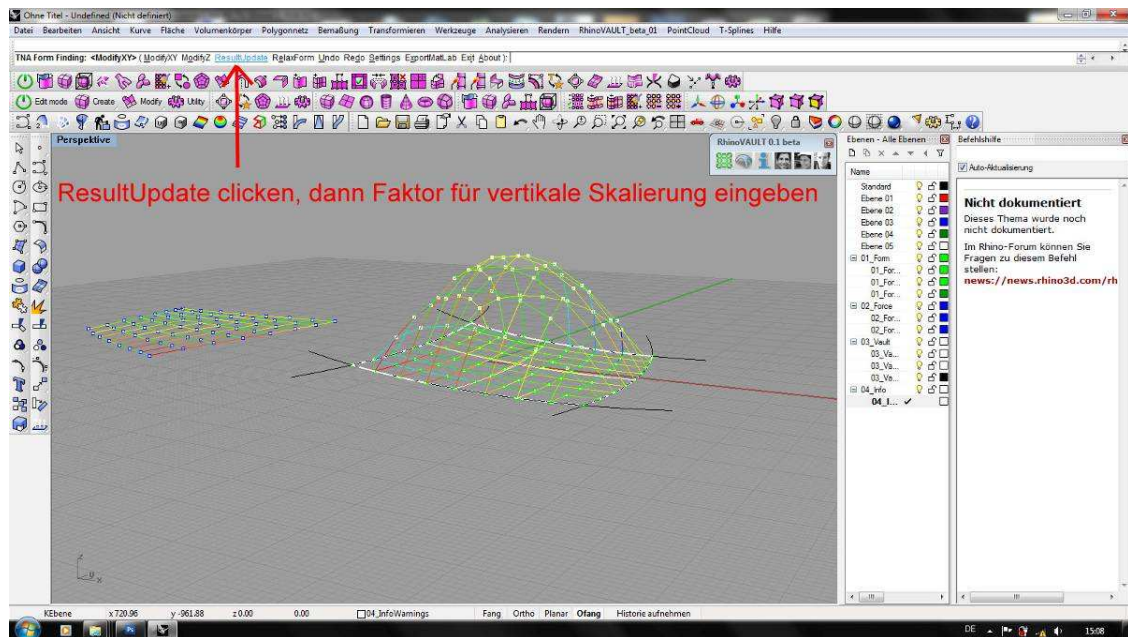
Als Basis für die Anwendung von VAULT wird eine Fläche benötigt. Bei sehr komplexen Formen oder Formen mit Öffnungen müssen diese unter Umständen aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden.



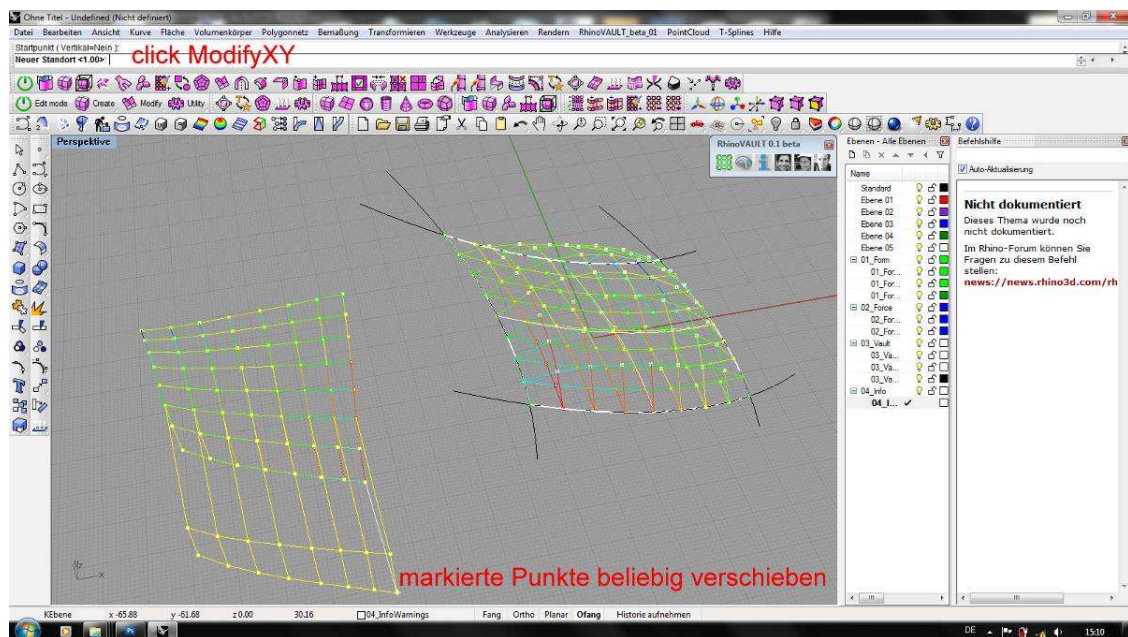
Auf diese Fläche kann dann der Befehl „Generate Form Diagram“ angewendet werden. Dabei wird die gewünschte Anzahl der Teilungen für das Raster angegeben.



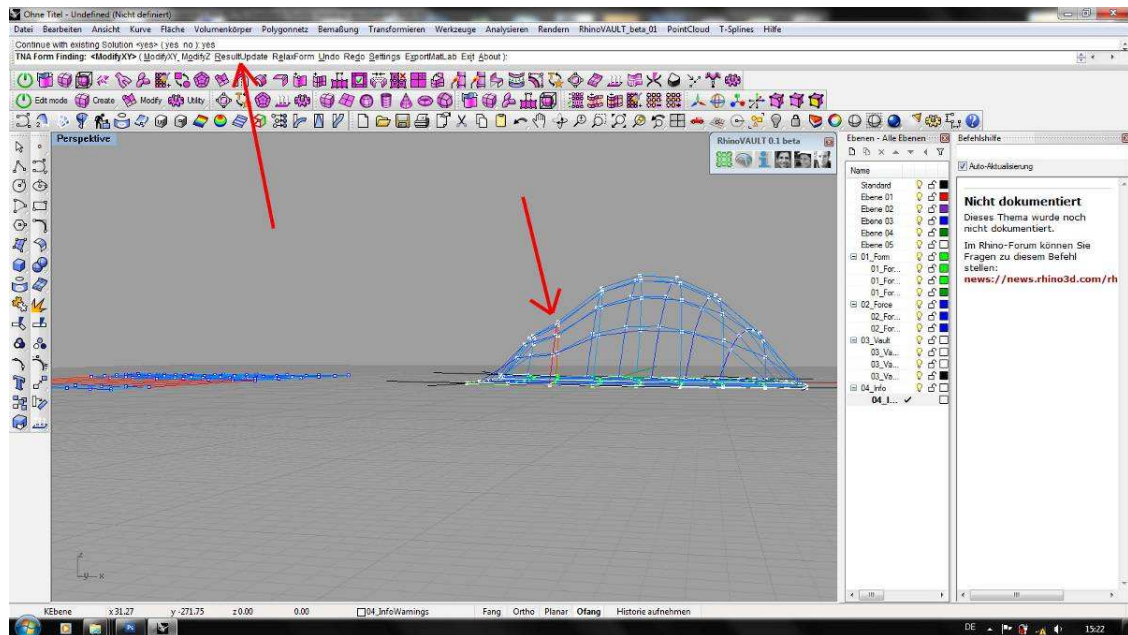
Das entstehende Raster besteht aus „FormBranches“, „FormNodes“ und „FormBoundaries“. Diese können auf den jeweiligen Ebenen verändert, gelöscht oder neu hinzugefügt werden, um die Form nach eigenen Wünschen anzupassen.



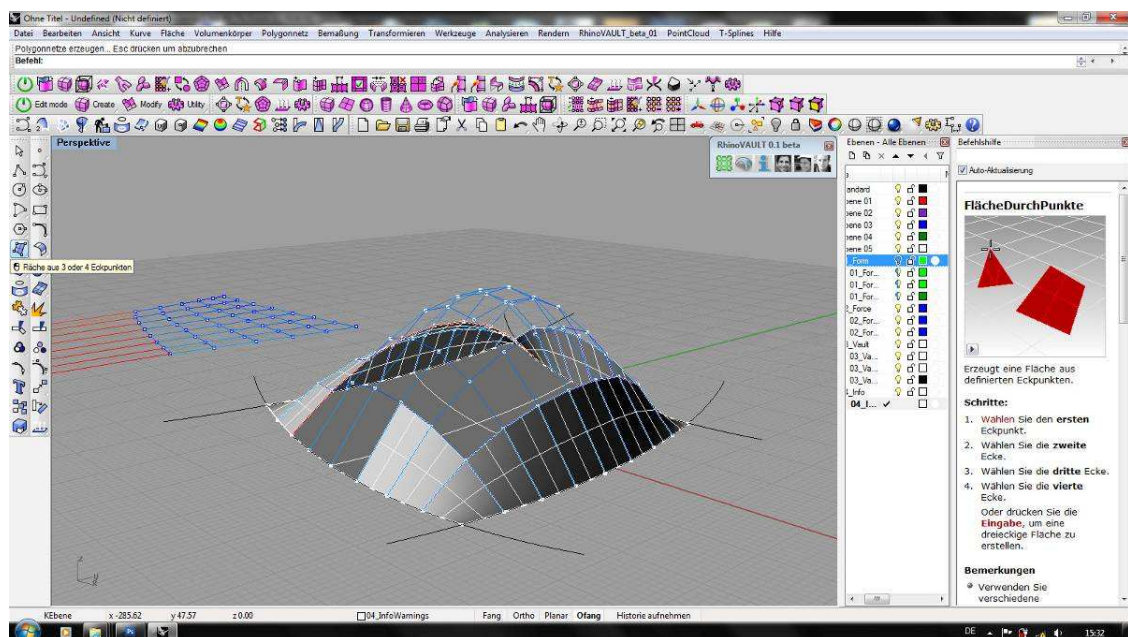
Mit dem Befehl „Generate Vault“ wird nun anhand dieses Formdiagramms ein Kräfte diagramm erstellt. Mit dem Befehl „ResultUpdate“ kann nun eine Höhenskalierung eingegeben werden. Dabei wird auch eher intuitiv vorgegangen, da keine genaue Angabe von Höheneinheiten gemacht werden kann.



Mit der Funktion „Modify“ kann nun auch noch die Position von einzelnen Punkten im Kräfte diagramm verändert werden.



Mit der erneuten Eingabe eines Höhenskalierungsfaktors wird diese Veränderung auch an der Gewölbeform erkennbar.



Nach Erreichen der finalen Form, kann das Punkt-Linien-Raster für die weitere Bearbeitung mit Flächen gefüllt werden. Dafür stehen mehrere Herangehensweisen zur Verfügung.



So entsteht, je nach Füllmethode, eine mehr oder minder gleichmäßige Oberfläche.

6.2 Blender

Blender ist eine Open-Source Grafiksoftware die das Modellieren, Texturieren, Animieren und Rendern von 3D Objekten ermöglicht. Obwohl die Software nicht für den praktischen Architektureinsatz entwickelt wurde, so kann man dennoch ansehnliche Resultate erzielen, insbesondere dank der eingebauten Physik-Engine. Diese erlaubt es unter anderem, mit ihrem integrierten Particle-Spring-System, Hängemodelle von hinreichender Genauigkeit zu erzeugen die relativ zügig für den praktischen Einsatz weiterentwickelt werden können. Ein Nachteil ist das Fehlen statischer Berechnungen sowie das Nichtvorhandensein gängiger Masseverteilungen da die Hängemodellsimulation über ein Verfahren gewonnen wird welches ursprünglich für das Erstellen von dynamischen realistischen 3D-Kleidungsstücken und Stoffen entwickelt wurde.

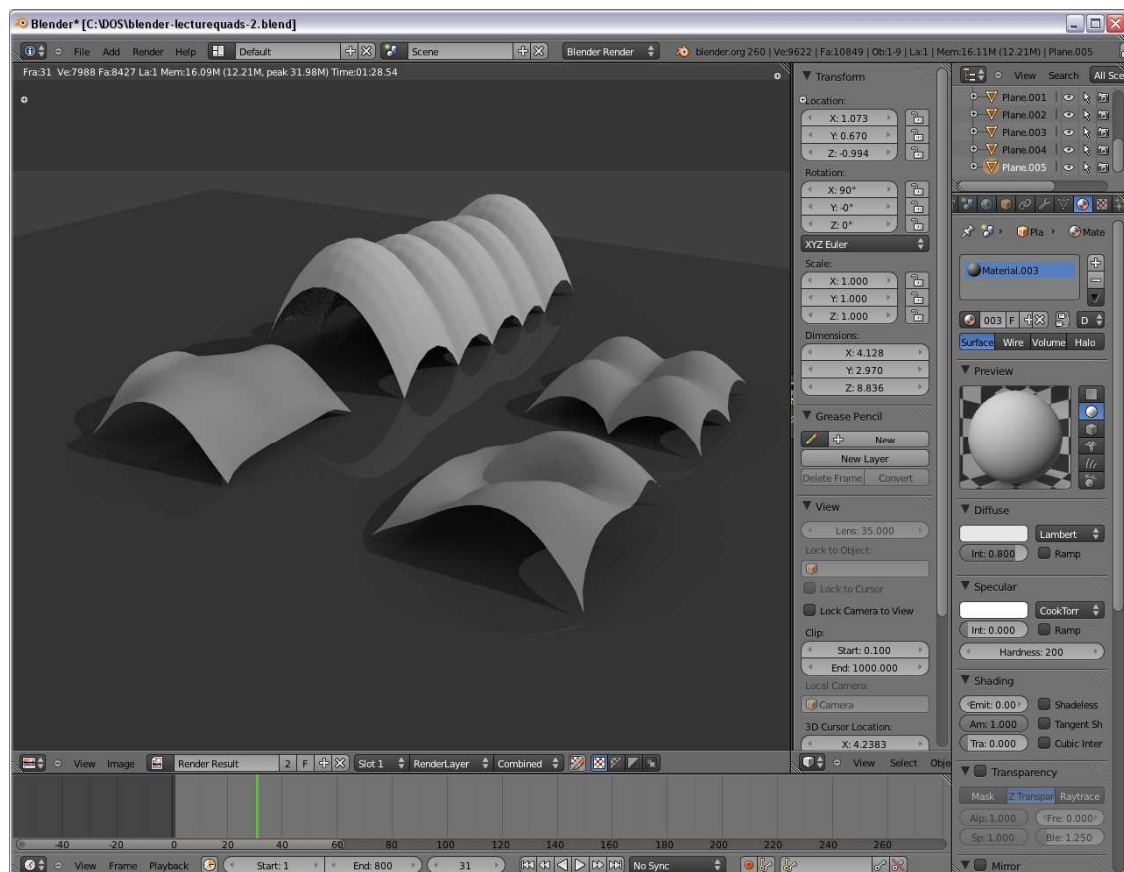


Bild. 1 *Blender* Entwicklungsumgebung.

Bevor man die die Hängemodellsimulation anwenden kann, muss man zunächst Grundprimitive erstellen. Damit sind geometrische, polygonale, Formen wie Rechtecke und Dreiecke gemeint die sich hinreichend unterteilen (diskretisieren) lassen. Dabei ist jedoch zu beachten das, aufgrund fehlender und optimierter Diskretisierungsalgorithmen, nur Grundformen mit einem gewissen Grad an Symmetrie (Gleichseitiges/Gleichschenkliges Dreieck, Quadrat, etc.) mit zufriedenstellenden Ergebnissen unterteilt werden können. Das Erstellen komplexerer Grundformen mit gleichförmiger Diskretisierung ist zwar darüber hinaus auch möglich, erfordert aber etwas mehr Arbeit da solch eine Funktion nicht von Haus aus unterstützt wird. Im nachfolgenden Beispiel wurde die Grundform durch die Kombination gleichschenkliger, bereits diskretisierter, Dreiecke erreicht.

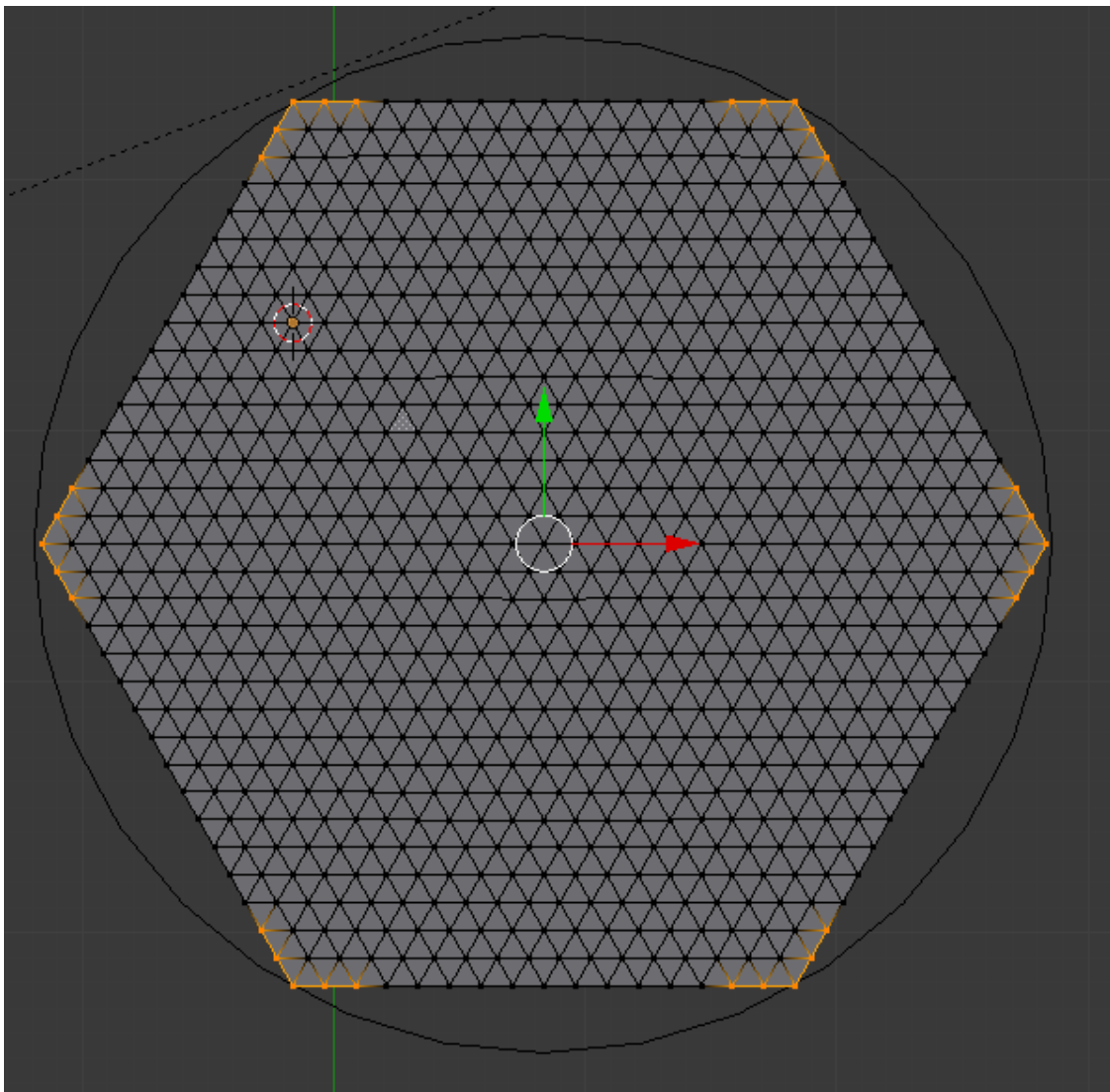


Bild. 2 Diskretisierte Grundform – Zusammensetzung aus sechs gleichschenkligen Dreiecken.

Anschließend wurden die Ankerpunkte gewählt welche bei der Simulation fixiert bleiben (gelb) während die restlichen Punkte (schwarz) die Hängesimulation nachstellen.

Nachdem die freifallenden und fixierten Knotenpunkte zugewiesen wurden, legt man noch einige Parameter in den *Blender* „Soft Body“ Physik Einstellungen fest. Diese umfassen Parameter wie Gravitation (negativer Wert um Aufwölben der Struktur zu ermöglichen), Stoffelastizität und bis zu welchem Grad die Ausbeulung bzw. wie stark die Amplitude des Hängevorgangs erfolgen soll. Anschließend lässt man die Simulation laufen und kann „live“ den Prozess des Hängens mitverfolgen. Dabei sind bei laufender Simulation jederzeit Parameteränderungen möglich worauf der Hängeprozess mit einer sofortigen Formänderung reagiert. Sobald man mit dem Ergebnis zufrieden und die Simulation zum Stillstand gekommen ist, kann man die Form in ein stationäres Mesh-Objekt umwandeln.

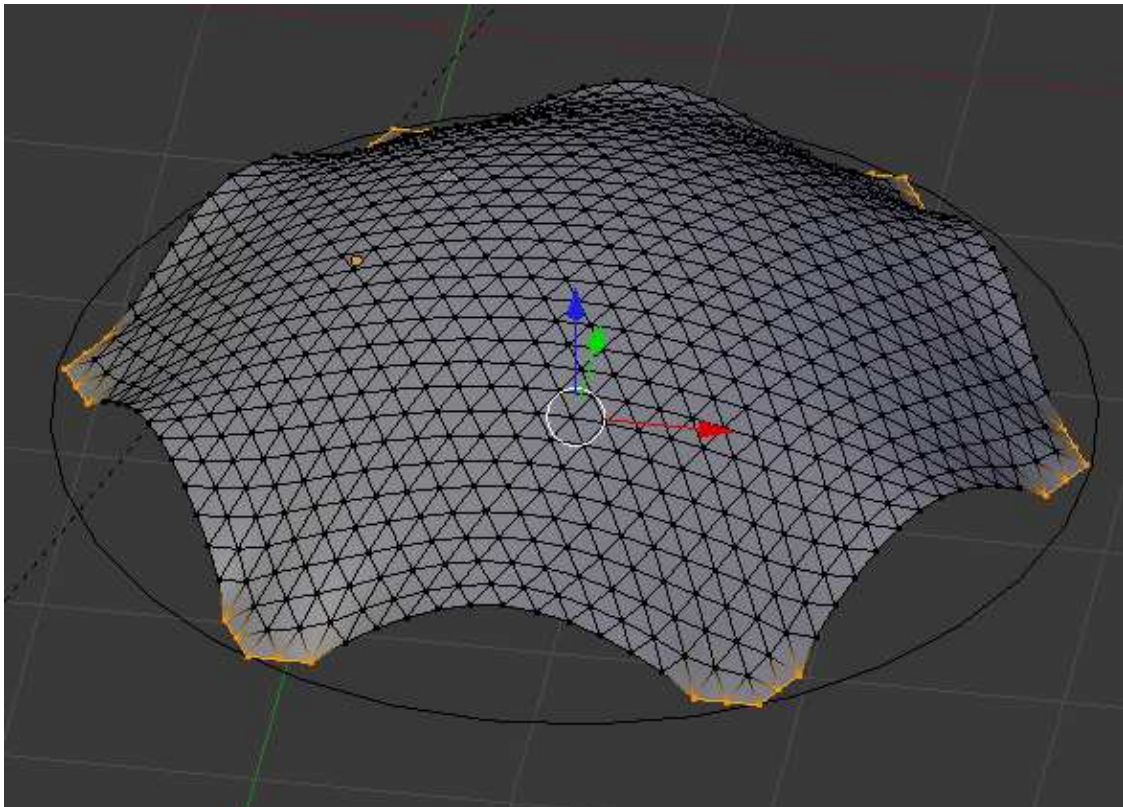


Bild. 3 Gewonnenes Hängemodell nach Anwendung der „Soft Body Dynamics“ Simulation.

Nachdem man das Mesh-Objekt erhalten hat, kann man dies weiter bearbeiten. So ist es möglich eine konstante Dicke der Schale zuzuweisen (*Blender* „Solidify Modifier“) und die diskretisierte Oberfläche weiter zu verfeinern („Subdivision Surface“ Modifier). Bei einer weiteren Unterteilung der Schale entsteht jedoch eine zunehmend komplexere Mesh Topologie die vorwiegend auf eine glatte Oberfläche abzielt, jedoch nicht auf eine statisch günstige Ausbildung. Es ist zudem auch möglich eine Dicke herauszuarbeiten die über den gesamten Verlauf der Schale variiert, jedoch erfordert auch dies etwas fortgeschrittenere Kenntnisse des Programms *Blender* sowie längerwierige Arbeitsschritte. Letztlich kann man die Form noch als .3ds und .stl Format exportieren um es in anderen 3D/CAD Programmen weiterzuverwenden oder es als haptisches Modell zu drucken.

Ein weiterer unmittelbarer Vorteil von *Blender* besteht darin, das man sein Modell direkt Rendern und bearbeiten kann (Texturierung, Öffnungen, etc.). So erlaubt es diese

Grafiksoftware auf schnellem Wege eine Hängeform zu erzeugen und diese auch unmittelbar präsentationsreif auszugeben.

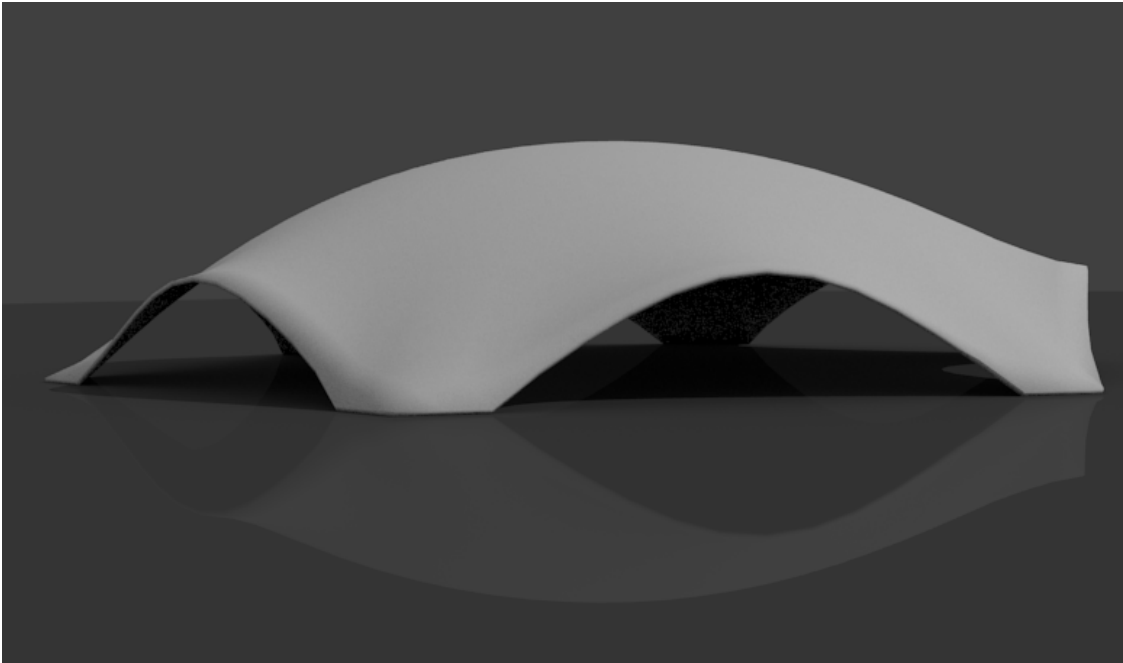


Bild. 4 Einfache Rendereingabe mit simpler Beleuchtung und keiner weiteren Texturierung der Oberfläche.