



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Entwurf von geeigneten Schalenformen für die
“Pneumatic wedge method”

**ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von**

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. Johann Kollegger

und

Universitätsassistent Dipl.-Ing. Benjamin Kromoser

[E212-2]

Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Michael Sohm

Matrikelnummer: 0126767

Wien, am 01. April 2014

ABSTRACT

Entwurf von geeigneten Schalenformen für die “Pneumatic wedge method”

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die mögliche Bandbreite von geeigneten Schalenformen für die “Pneumatic wedge method” darzustellen und in weiterer Folge das Potential des Verfahrens zu veranschaulichen.

Der erste Teil befasst sich mit der Geschichte des Werkstoffes Beton bzw. Stahlbeton sowie der Entwicklung des Schalenbaus. Anhand von Analysen diverser repräsentativer Schalenbauwerke vom Anfang des 20. Jahrhunderts bis in die Gegenwart wird darauf genauer eingegangen.

Es folgt eine Beschreibung der Entstehung der “Pneumatic wedge method” sowie deren Funktionsweise. Durch die Analyse unterschiedlicher Geometrien bezüglich deren Tauglichkeit für dieses Verfahren wird ein breites Spektrum von möglichen Schalenformen aufgezeigt, die auf diese Weise konstruiert werden könnten. Es wurde zudem eine Form ausgewählt, die im Versuch im Maßstab 1:5 getestet wurde und momentan für einen 1:1-Großversuch vorbereitet wird.

Diese Vielzahl an möglichen Formen und Formvariationen zeigt das Potential der Methode. Mit Hilfe von Visualisierungen werden außerdem eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten der so konstruierten Schalen dargestellt.

Draft of potential shell shapes for the “pneumatic wedge method”

The aim of this diploma thesis is to show the possible range of shell shapes, which are applicable to be built using the “pneumatic wedge method”. Additionally the potential of the method will be clarified.

Firstly a short historical summary of concrete, respectively reinforced concrete together with the evolution of shell constructions, is given. To amplify on this, it is followed by descriptions of existing representative shell structures of the early 20th century until today.

Therein the development and functioning principles of the “pneumatic wedge method” are explained. The analysis of different geometries shows their suitability concerning the method and demonstrates the breadth of possible shapes that could be built by using this technique. Furthermore a particular form was chosen and tested on a scale of 1:5 and is currently being prepared for an actual size attempt.

This wide range of possible forms and form variations demonstrates the potential of the method. In addition, there are various possible fields of application for this technology which is illustrated by Visualisations.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Die Geschichte des Betons.....	01
2. Die Entwicklung der Schale.....	03
3. Auswahl an repräsentativen Schalenbauwerken	
3.1. Jahrhunderthalle Breslau (1913), Max Berg.....	06
3.2. Zeiss Planetarium Jena (1926), Dr. Walther Bauersfeld.....	07
3.3. Notre-Dame-du-Haut de Ronchamps (1955), Le Corbusier.....	08
3.4. Cristo Obrero Kirche (1958), Eladio Dieste.....	11
3.5. TWA - Flight Center / JFK Airport (1962) Eero Saarinen.....	12
3.6. Sydney Opera House (1973), Jørn Utzon.....	13
3.7. La Grande Cupola (1972)/Bini Shell, Dante Bini.....	15
3.8. Naturtheater Grötzingen (1977), Heinz Isler.....	16
3.9. L'Oceanografic (2002), Felix Candela.....	17
3.10. Auditorio de Tenerife (2003), Santiago Calatrava.....	19
4. Was spricht eigentlich für die Schale?.....	21
5. Forschung am Institut für Tragkonstruktion - Betonbau / TU Wien.....	23
5.1. Die "Polystyrene wedge method".....	24
5.2. Die "Pneumatic formwork method".....	27
5.3. Die "Segment lift method".....	29
5.4. Die "Pneumatic wedge method".....	31
6. Mögliche Konstruktionsformen mit der "Pneumatic wedge method".....	43
6.1. Die Halbkugel.....	44
6.2. Der Kugelabschnitt.....	47
6.3. Der Zylinder.....	50
6.4. Zylinder in Kombination mit 2 Halbkugelabschnitten.....	53
6.5. Das Halbellipsoid.....	56
6.6. Der Ellipsoidabschnitt.....	59
6.7. Das Paraboloid.....	62
6.8. Das Hyperboloid.....	65
6.9. Hyperbolisches Paraboloid.....	68
7. Mögliche Varianten der getesteten Formen.....	71
7.1. Varianten Kugelabschnitt.....	71
7.2. Varianten Zylinder.....	76
7.3. Varianten Ellipsoid.....	81
7.4. Weitere Varianten.....	86
8. Momentane Versuche.....	90
9. Mögliche Nutzungsszenarien für die "Pneumatic wedge method".....	97
10. Fazit.....	101
11. Literaturverzeichnis.....	102
12. Abbildungsverzeichnis.....	104
13. Danksagung.....	107

Die Geschichte des Betons

Schon vor über 10000 Jahren fing der Mensch an, Bindemittel für die Errichtung von Bauwerken zu verwenden. So belegen Funde aus dem Osten der heutigen Türkei, dass Handwerker schon zu dieser Zeit Mörtel kannten und mit diesem Ziegelmauern errichteten. Dessen Bestandteil war hauptsächlich gebrannter Kalk und Wasser. Durch Zugabe von vulkanischem Gestein schufen die Phönizier ca. vor 3000 Jahren ein Material, das sogar unter Wasser aushärtete [1,2].

Das über die Zeit erlangte Wissen über Materialien und Bautechniken erreichte ca. 300 v.Chr. über die Griechen schließlich auch Italien - das damalige römische Reich. Die Römer entwickelten den "Beton" weiter, in dem sie zusätzlich zum Kalk-Wasser-Gemisch weitere Materialien wie Sand und Ziegelmehl beimengten und nannten es OPUS CAEMENTIUM. Dieser Baustoff war zum einen von einer enormen Druckfestigkeit und bildete selbst bei großen Temperaturänderungen keine Risse. Überall in Europa wurden fortan für diese (und zum Teil noch heutige) Zeit fantastische Bauwerke wie etwa Aquaedukte, Tempel, Theater, Brücken, Strassen etc. gebaut. Allen voran das Pantheon (120 n.Chr.) mit einer Spannweite von über 43 Metern, die erst 1913 mit dem Bau der Jahrhunderthalle in Breslau übertroffen werden sollte [1,3].

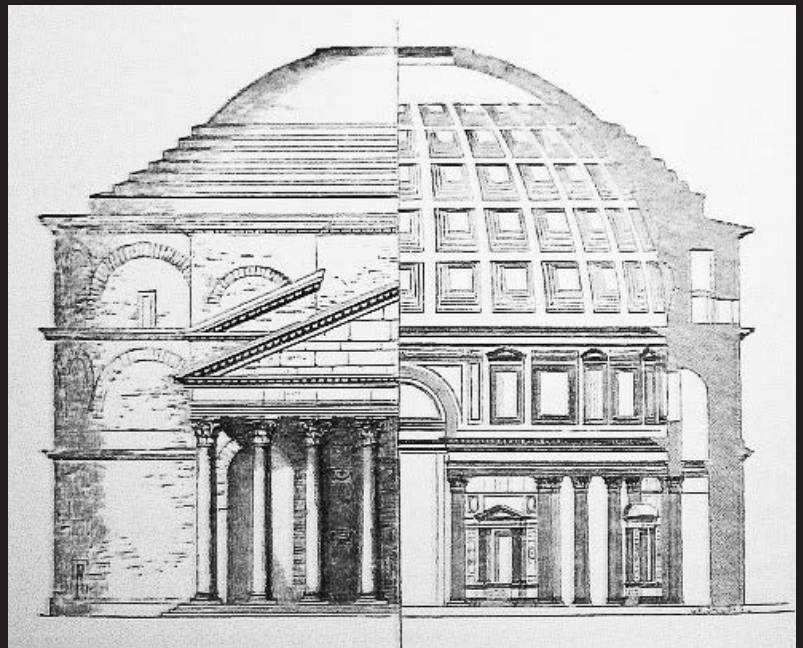


Abb. 001: Pantheon im Rom

Nachdem der Beton im Mittelalter beinahe in Vergessenheit geriet, wurde er zu Beginn des 17. Jahrhunderts wiederentdeckt und durch zahlreiche Verbesserungen und Entwicklungen in der folgenden Zeit zu dem Baustoff schlechthin [2].

Um 1750 etwa führte John Smeaton zahlreiche Versuche mit gebrannten Kalken und Tonen durch, wobei er feststellte, dass ein bestimmter Tonanteil für selbsterhärtenden (hydraulischen) Kalk Voraussetzung ist [1].

Der Engländer James Parker erfand 1796 den Romanzement, indem er den in der Nähe von London abgebauten Septarienton, einen sehr tonhaltigen Kalkmergel, brannte [4].

Etwa drei Jahrzehnte später brannte der englische Maurer Joseph Aspdin den ersten Portlandzement, aber erst 1844 als Isaac Charles Johnson die Bedeutung des Sinterns (Er-

hitzen unter hohem Druck bis kurz vor dem Schmelzpunkt der Stoffe) für dessen Herstellung erkannte, war der Portland-Zement im heutigen Sinne erfunden. Dieser verfügte über enorme Härte und verdrängte daraufhin den Romanzement sehr schnell [2,5].

In den 1850ern folgte ein weiterer Meilenstein, als der französische Gärtner Joseph Monier stabilere Blumenkübel entwickelte. Er verband Beton mit einem Stahlgeflecht (Patent 1867) - die Idee des Stahlbetons war geboren und bescherte neue ungeahnte Möglichkeiten [1].

Bis heute werden die Verfahren und Techniken rund um den Beton- und Stahlbetonbau laufend perfektioniert, um auf jede erdenkliche bauliche Herausforderung entsprechend reagieren zu können. So wurde etwa 1890 der Spannbeton vom deutschen Ingenieur C.F.W. Döhring patentiert, folglich waren mit vorgespannter Armierung noch größere Spannweiten möglich. Durch zahlreiche weitere Innovationen wurden dem Beton verschiedenste Eigenschaften gegeben, zum Beispiel je nachdem besonders schnell abzubinden oder eben besonders langsam, besonders hart und druckfest zu werden oder aber auch besonders leicht. Verschiedenste Beimengungen sind erprobt, wie etwa Stahl-, Glas- oder Kunststoffasern, die wiederum die Eigenschaften des Betons in puncto Zugfestigkeit, Schlagfestigkeit oder Verformbarkeit beeinflussen [2].

Neueste Errungenschaften wie selbstverdichtender Beton, lichtdurchlässiger Beton oder sogar selbstreinigender Beton mit Lotusblüteneffekt zeigen zudem, dass die Weiterentwicklung dieses faszinierenden Materials auch bis heute stets vorangeht und machen ihn zu einem der HighTech-Baustoffe des 20. und 21. Jahrhunderts [2].

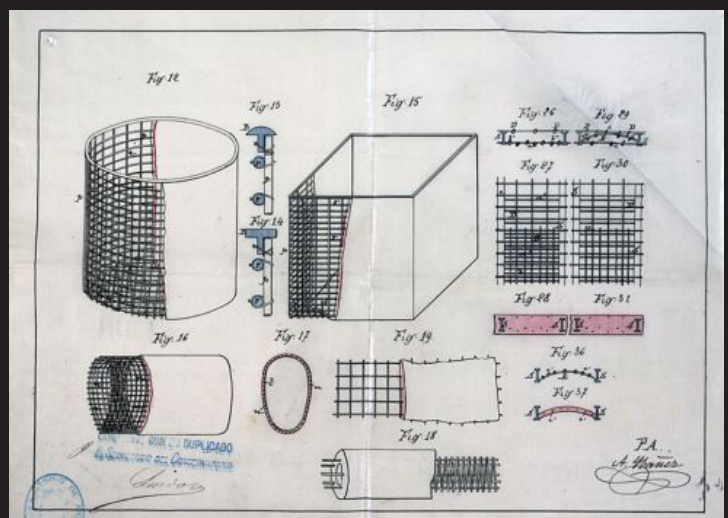


Abb. 002: Patent von Joseph Monier

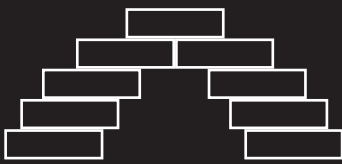


Abb. 003: lichtdurchlässiger Beton

Die Entwicklung der Schale

Schon sehr früh hatte man den Wunsch einen weiten Raum möglichst stützenfrei zu überdachen, allerdings war dies damals aufgrund der limitierten technischen Möglichkeiten ungemein schwierig zu verwirklichen.

In der Antike wandte man hauptsächlich die sogenannte Kragkuppelbauweise an, bei der die einzelnen (Stein- oder Ziegel-)Ringe - immer weiter nach innen kragend - eben aufeinander gesetzt werden. So entstand um 1300 v.Chr. das "Schatzhaus des Atreus" als einer der bedeutendsten Vertreter der mykenischen Kuppelgräber. Es hatte bereits einen Durchmesser von über 14 Meter sowie eine Höhe von mehr als 13 Metern und sollte bis zum Pantheon der größte Kreiskuppelbau bleiben [6].



Prinzip des Kraggewölbes

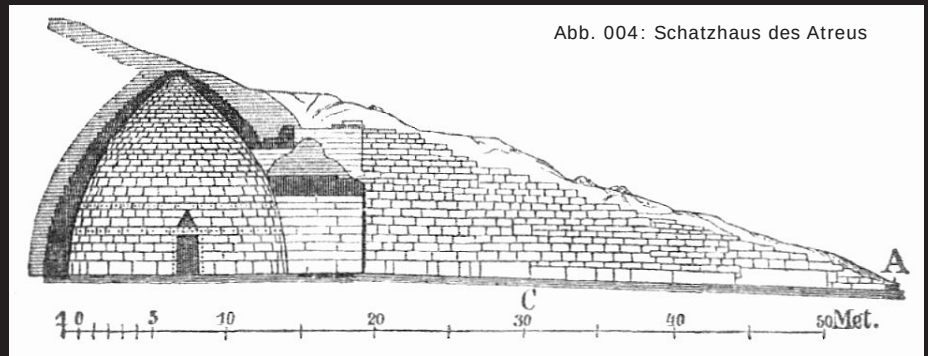


Abb. 004: Schatzhaus des Atreus

Erst mit der Entwicklung des "Opus Caementium" war ein Bauwerk wie das Pantheon (siehe Abb. 001; S 01) mit seinen gewaltigen 43 Metern Durchmesser möglich.

Neben dem Pantheon ist auch die Hagia Sophia eine der bedeutendsten und eindrucksvollsten Kuppelbauten der Antike. Sie entstand im 6. Jahrhundert n. Chr. und war im Gegensatz zum Pantheon nicht aus dem damaligen Beton (Opus Caementium) sondern in Ziegelbauweise gefertigt. Als ein Erdbeben im Jahre 558 ein Erdbeben die Kuppel zum Einsturz brachte, wurde sie bereits 563 in Form einer halbkreisförmigen Rippenkuppel wieder neu errichtet [7].

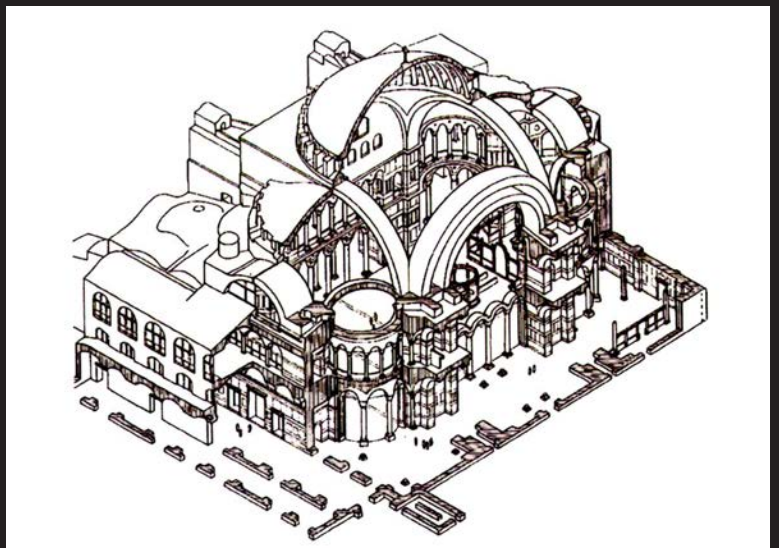
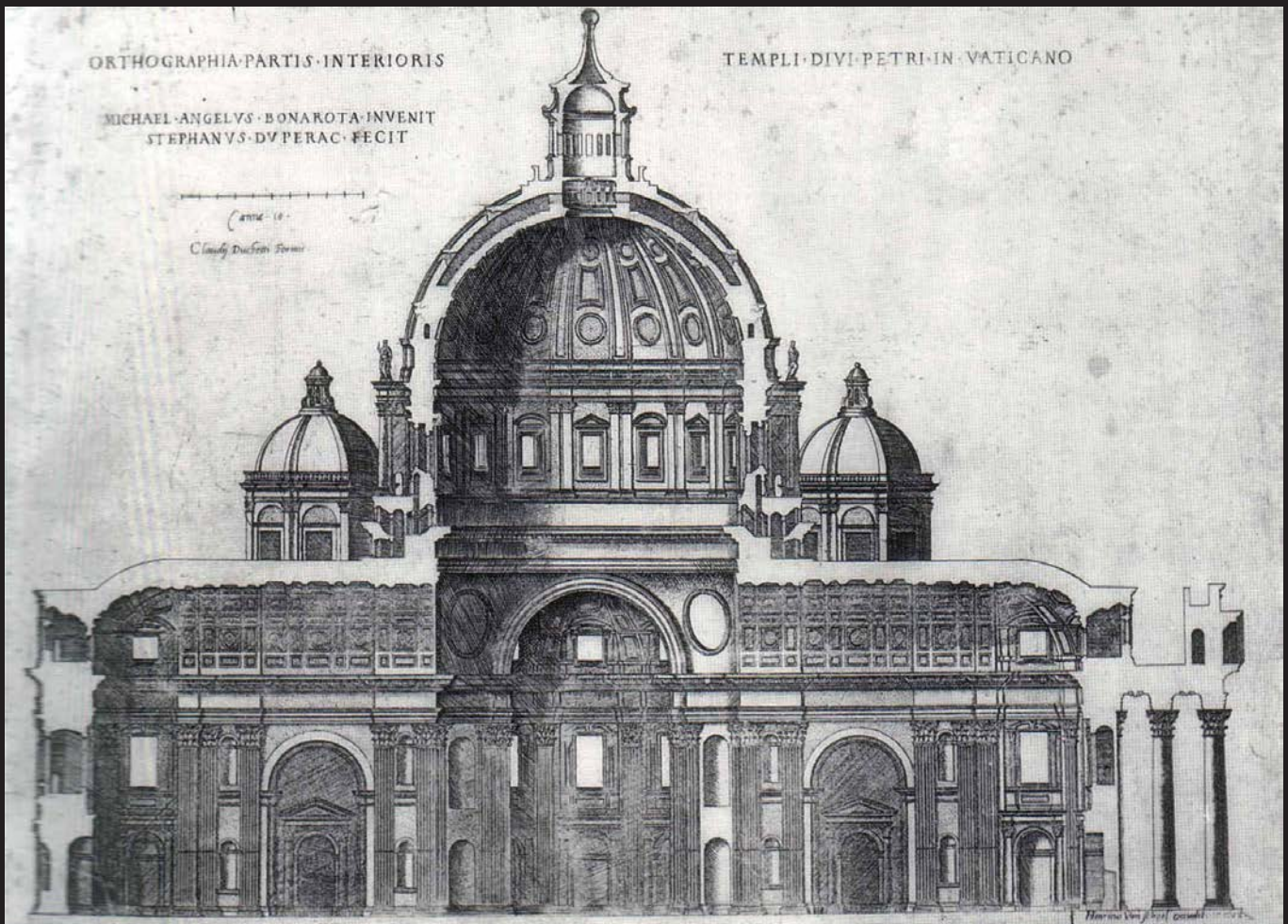


Abb. 005: Hagia Sophia

Wie auch schon bei den mykenischen Gräberbauten (Schatzhaus des Atreus) sollte auch später die Kuppel oft als Himmelsgewölbe symbolisierende Überdachung eines zentralen Raumes dienen. So auch bei einem der bedeutendsten Bauwerke für die Christenheit dem Petersdom in Rom. Der ursprünglich von Bramante stammende Entwurf wurde nach dessen Tod 1514 von den nachfolgenden Baumeistern immer wieder verändert. So auch von Michelangelo Buonarroti, der ab 1546 die Baustelle leitete. 1590 - zwei Jahre nach dem Tod Michelangelo wurde der Bau vollendet. Seither gilt die Kuppel des Doms als Wahrzeichen Roms [7].

Abb. 006: Petersdom in Rom, Plan von Michelangelo Buonarroti



Konstruktiv waren im Petersdom keine wesentlichen Neuerungen eingeflossen. Das Prinzip einer doppelten Ziegelschale und tragenden Rippen wurde zum Beispiel auch schon für Filippo Brunelleschi's Domkuppel in Florenz (1420 - 1468) angewandt [7].

Es sollten einige Jahrhunderte vergehen, bis mit der Entwicklung des Stahlbetons sich neue ungeahnte Möglichkeiten ergeben sollten. Man begann damit, kleinere Kuppeln nach dem "Monier-Verfahren (1867)" zu bauen - größere zerlegte man konstruktiv in Rippen und Balken. So wurde 1911 - 1913 die damals größte Kuppelkonstruktion - die Jahrhunderthalle in Breslau - von Max Berg errichtet. Mit einem überspannten Raum von 65 Meter übertraf diese die Spannweite der antiken massiven Kuppeln erstmals [6].

Fortan sollte die Zukunft des Kuppelbaus allerdings den dünnwandigen Kuppelschalen gehören. Bahnbrechend war in dieser Hinsicht sicherlich die Errichtung des Zeiss-Planetariums

in Jena (Eröffnung 1926). Dr. Walther Bauersfeld hatte für ein halbkugelförmiges Projektionsfeld eine Netzkuppel aus Stahlstäben entworfen. Um diese luftige Konstruktion flächig zu schließen wandte er sich an das Unternehmen Dyckerhoff & Widmann. Man fasste den Entschluss, dass die Methode des Betonspritzens, die erst kurz zuvor entwickelt wurde, wohl die geeignetste wäre. Das Schalungsstück, das nur örtlich erforderlich war, konnte so immer wieder versetzt und wiederverwendet werden. Die zweite Kuppel des Zeiss-Planetariums Jena hatte eine Spannweite von 25 Metern und nur 60 mm Schalenstärke. Dr. Bauersfeld und Franz Dischinger verfeinerten das Verfahren immer weiter, was schlussendlich zur Patentierung der Zeiss-Dywidag-Schalenbauweise führte [6,8].

In den folgenden Jahrzehnten sollten die Methoden der Schalenbauweise immer wieder verbessert werden, wobei hier einige Vertreter und Ingenieurspioniere ihrer Zeit wie etwa Eduardo Torroja, Felix Candela, Heinz Isler, Frei Otto, Ullrich Müther oder auch Santiago Calatrava erwähnt werden sollten. Ihnen ist es zu verdanken, dass immer wieder neue Formen, noch größere Spannweiten und noch effizientere Fertigungsmethoden realisiert werden konnten. Anhand einiger ausgewählter gebauter Beispiele wird auf den folgenden Seiten etwas genauer darauf eingegangen.

Abb. 007:
Gartencenter Wyss, Zuchwil
Heinz Isler



Abb. 008:
Hemispheric, Valencia
Santiago Calatrava

Repräsentative Schalenbauwerke:

Jahrhunderthalle Breslau (1913), Max Berg

Max Paul Eduard Berg (1870 - 1947) studierte von 1889 -1893 an der technischen Hochschule Charlottenburg. Nachdem er einige Zeit in seiner Heimatstadt Stettin gearbeitet hatte, bekam er die Stelle des Stadtbauinspektors in Frankfurt am Main, wo er viele neue architektonische Ideen und Impulse sammelte, welche er später in Breslau stetig weiterentwickeln sollte. 1908 wurde er zum Stadtbaurat von Breslau berufen, wo er bis 1925 tätig war. In dieser Zeit sollten seine bedeutendsten und größten Bauten entstehen, unter anderem zwischen 1911 und 1913 die Jahrhunderthalle in Breslau [9,10].



Abb. 009: Jahrhunderthalle Breslau

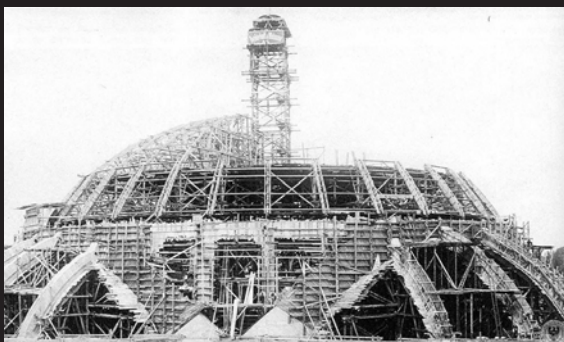


Abb. 010: Jhdt.-Halle Baugerüst



Abb. 011: Kabelkräne und Türme

Die Halle - bis heute von imposanter Größe - war für Großveranstaltungen und Ausstellungen gedacht. Die Einhundertjahrfeiern der Erhebung gegen die Herrschaft Napoleons waren Anlass für diesen gigantischen Bau, bei dem Eisenbeton als der zukünftige Baustoff sein Potential zeigen sollte. Max Bergs Entwurf demonstrierte dies eindrucksvoll: ein überspannter Raum von 65 Metern mit 9000 Sitzplätzen [11].

Der Bau war komplett eingerüstet und wurde über Kabelkräne, die zu zwei beweglichen Türmen gespannt waren, mit Material beschickt. Jedem Beteiligten soll die enorme Kühnheit des Projekts klar gewesen sein, so musste Berg selbst den ersten Absenkvorgang des Gerüsts ausführen, da die Arbeiter von ihrem Mut verlassen worden sein sollen [11].

Glücklicherweise wurde die Jahrhunderthalle im 2. Weltkrieg kaum in Mitleidenschaft gezogen und bildet noch heute einen faszinierenden Ort für Großveranstaltungen. Seit 2006 ist sie Weltkulturerbe der UNESCO [12].

Zeiss Planetarium Jena (1926), Dr. Walther Bauersfeld

Dr. Walther Wilhelm Johannes Bauersfeld wurde 1879 in Berlin geboren. Er studierte an der technischen Hochschule Charlottenburg Maschinenbau, diplomierte 1904 und promovierte schließlich zwei Jahre später. Er fing 1905 bei Carl-Zeiss Jena als Konstruktionsingenieur an und wechselte 1908 in die Geschäftsleitung [13].

Ende der 20er Jahre hatte Oskar von Miller, Gründer des Deutschen Museums in München, die Idee eines "begehbaren Himmelsglobus" und trat mit dieser an Dr. Bauersfeld heran. Dies sollte den Beginn einer zufälligen Verkettung darstellen, die einen neuen Quantensprung in der Entwicklung der Schalenbauweise bedeuten sollte. Erst war die Intention den Himmelsglobus mechanisch zu realisieren, was aber als kaum umsetzbar galt. Dr. Walther Bauersfeld entwickelte daraufhin ein Projektionsgerät, für welches er ein halbkugelförmiges Projektionsfeld benötigte. Um ein solches in entsprechender Größe zu erhalten, entwarf er eine sehr präzise Konstruktion aus Stahlstäben. Die so entstandene Netzwerkkuppel war zwar sehr stabil und äußerst steif aber ebenso luftig und daher noch nicht als Projektionsfläche geeignet.

Um die Kuppel flächig zu schließen, zog er den ehemals großen deutschen Baukonzern Dyckerhoff und Widmann AG hinzu. Von den zuständigen Ingenieuren kam der Vorschlag, das Vorhaben mit der Methode des Betonspritzens (torkretieren) umzusetzen. Das Verfahren wurde erst kurze Zeit zuvor entwickelt und sollte sich als sehr praktikabel erweisen. So konnte man ein Schalungsstück, das an die Netzkuppel angehängt wurde, immer wieder versetzen und so vervollständigte sich die Betonschale Schritt für Schritt. Das Netzwerk aus den Stahlstäben war nun im Beton eingebettet und bildete somit zugleich dessen Bewehrung.

Die Firma Dyckerhoff und Widmann setzte für dieses Projekt Dr. Franz Dischinger ein, welcher von dem Verfahren derart fasziniert und überzeugt war, dass er viele weitere Jahre mit Dr. Walther Bauersfeld zusammenarbeitete. Die beiden entwickelten die Methode immer weiter und ließen selbige schließlich als die "Zeiss-Dywidag-Schalenbauweise" patentieren. In der Folgezeit sollten viele Kuppelbauten nach diesem Prinzip entstehen. Dr. Dischinger widmete sich auch sehr intensiv der Erforschung und Berechnung zylindrischer Tonnenschalen und das sehr erfolgreich. Die Tatsache, dass solche Tonnenschalen eine rechteckige Fläche überspannten, ermöglichte ein wesentlich größeres Einsatzspektrum. Der erste Großauftrag für eine solche Tonnenschale sollte 1926 die Überdachung der Gesolei-Ausstellungshalle in Düsseldorf sein.



Abb. 012: Netzwerk aus Stahl

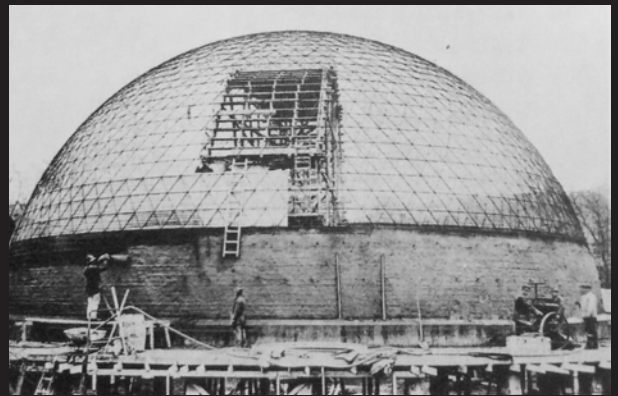


Abb. 013: Bau der Kuppel

Abb. 014: Das Planetarium heute

Einer der großen Vorteile der Zeiss-Dawydag-Bauweise war, dass es nicht mehr notwendig war, das komplette Bauwerk einzurüsten. Auf der anderen Seite war es eigentlich schade die recht komplexen Netzwerke aus Stahlstäben einzubetonieren und selbige als Bewehrung zu verwenden. So fing Dischinger an, das Verfahren etwas abzuändern und legte das Netzwerk fortan unter die eigentliche Schale. So musste zwar eine zusätzliche Schalhaut und darauf eine einfache Rundstahlbewehrung aufgebracht werden, aber das Netzwerk als Stützkonstruktion konnte wiederverwendet werden [14].

Notre-Dame-du-Haut de Ronchamps (1955), Le Corbusier

Le Corbusier - einer der wohl bedeutendsten und einflussreichsten Architekten des 20. Jahrhunderts - wurde 1887 als Charles Édouard Jeanneret-Gris in La Chaux-de Fonds in der Schweiz geboren. Bereits als 14-jähriger war sein ausgeprägtes künstlerisches Talent offen-

sichtlich und so wurde er an der École d'art in La Chaux de Fonds aufgenommen. Nach der Ausbildung zum Maler, Graveur und Goldschmied fing er dort auch das Studium der Architektur an. Als 20-jähriger begann eine Zeit in der er sehr viel unterwegs sein sollte, so führten ihn seine Reisen unter anderem nach Paris, Deutschland, Ost- und Südeuropa, wo er zahlreiche neue Erkenntnisse mitnehmen konnte. So erkannte er schon früh die ungeahnten Möglichkeiten des Baustoffs Beton.

1917 ließ er sich dann in Paris nieder und widmete sich fortan vermehrt der Malerei. 1922 tat er sich mit seinem Cousin Pierre Jeanneret zusammen. Mit dieser Zusammenarbeit begann ein jahrzehntelanger Kampf für eine neue Architektur als Ausdruck ihrer Zeit. Nach zahlreichen Publikationen (wie etwa "Vers une architecture"), immer größeren Arbeiten (wie zum Beispiel dem Centrosoyus in Moskau) und vielen Vortragsreisen in fast alle größeren Städte der Welt, zieht er sich in den Kriegsjahren zurück in die freie Zone Frankreichs und gab sich eher der Malerei und theoretischen Studien ("Modulor") hin. Als er aber 1944 wieder in sein Pariser

Abb. 015:

Notre-Dame-du-Haut de
Ronchamps



Abb. 016: Innenaufnahme

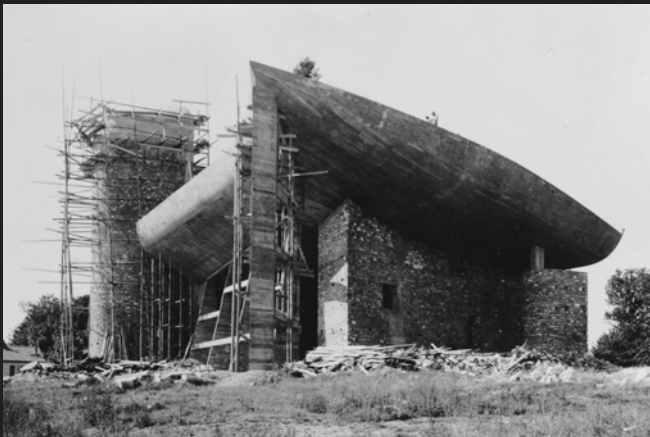


Atelier zurückkehrte, begann für ihn eine äußerst intensive Periode. So konnte er zahlreiche seiner Ideen von der industriell hergestellten Wohnzelle bis zum großen Wohnblock (Unité d'habitation) umsetzen. Sogar seine städtebaulichen Ideen konnte er durch den Auftrag der indischen Regierung, die neue Hauptstadt des Pandschab Chandigarh zu planen, realisieren. Ein Gebäude allerdings, sollte seine Bekanntheit in die ganze Welt hinaustragen: Die 1955 fertiggestellte Pilgerkapelle Notre-Dame-Du-Haut de Ronchamp. Gemeinsam mit den Unités ist es wohl sein bekanntestes Werk [15].

Es wird vermutet, dass der Hügel von Ronchamp schon zur Zeit der Kelten als Kultstätte diente. Bereits seit Ende des 11. Jahrhunderts steht eine Kirche auf dem Hügel von Ronchamp. Von einem Blitzschlag 1913 zerstört, sollte 1923 -1926 ein Neubau im neugotischen Stil errichtet werden, aber auch diese wurde im Laufe des 2. Weltkrieges auf dem strategisch wichtigen Hügel zerstört. So konnte in der Nachkriegszeit Le Corbusier nach einigem Zögern dafür gewonnen werden, sich des Neubaus der Kapelle von Ronchamp anzunehmen [16].

Der Boden der Kapelle ist der Form des Hügels angepasst und sinkt zum Altar hin ab. Die Wände bestehen aus konkav bzw. konvex geformten Mauern, die durch ihre Form ihre Stabilität erhalten. Die bis zu 2,7 Meter dicken Wände sind allerdings nicht massiv, sondern beste-

Abb. 017 und 018: Die Kapelle im Bauzustand



hen aus betonierten Pfeilern, deren Zwischenräume zum Teil mit Bauschutt der alten Kapelle gefüllt wurden. Das ganze wurde schließlich mit Spritzbeton überzogen um den Eindruck des einheitlichen Materials zu erzeugen. Die Südwand ist von vielen verschiedenen großen Fenstern durchdrungen [17].

Zu einem guten Teil mitverantwortlich für die auffallende Erscheinung der Kapelle ist allerdings das Sichtbetondach. Die zwei rund 2,3 Meter übereinander liegenden Decken sind dem Panzer eines Krebses nachempfunden und bilden schon von weitem den "Hut" des Gebäudes. Von innen gesehen wirkt es wie ein durchhängendes Tuch und zusammen mit der Tatsache, dass das Dach nicht durchgehend auf den Außenmauern aufliegt, sondern nur punktuell, scheint es unglaublich leicht, fast schwebend. Der so entstehende Schlitz zwischen Dach und Wand sorgt gemeinsam mit den Fenstern für gezielte spektakuläre Lichteinfälle. Das Dach wurde zweischalig auf einem aus Holz errichteten Gerüst betoniert und ist sowohl Wasserdicht als auch temperaturregulierend [16,18].

Cristo Obrero Kirche (1958), Eladio Dieste

Eladio Dieste ist in dieser Reihe kein Vertreter der gekrümmten Betonschalen, sehr wohl aber der gekrümmten "Ziegelschalen" und wie eindrucksvoll diese auch sein können, demonstriert sein wohl bekanntestes Werk die "Cristo Obrero-Kirche" in Atlantida (Uruguay).

Eladio Dieste war ein aus Uruguay stammender Architekt und Bauingenieur. Er wurde 1917 in Artigas geboren und studierte von 1933 -1943 an der Universidad de la Republica in Montevideo. Ebendort war er bis 1965 Professor für technische Mechanik und zwischen 1953 und 1973 für Brücken und Großbauten. Vor allem in Uruguay beauftragte man Dieste mit zahlreichen industriellen, kommerziellen aber auch sakralen Bauten. Er hatte zudem zahlreiche Patente inne und wurde bei vielen Großprojekten wie zum Beispiel auch bei Staudämmen als Berater herangezogen [19].

Bevorzugt arbeitete Dieste mit armiertem Ziegelmauerwerk und entwickelte diese Technologie immer weiter. Die Bauten und ihre jeweiligen Räume erfuhren durch die gekrümmten Ziegelformen eine enorme Aufwertung und waren so - obwohl relativ günstig - ästhetisch und expressiv. Eine Besonderheit der Cristo Obrero-Kirche ist die konstruktive Verbindung des Gewölbes, welches in Form einer Gaußschen Glockenkurve gewellt ist, mit den ebenso wellenförmigen Außenwänden [20].

Es scheint fast so, als würde Dieste seine Formsprache dem Material nicht unterwerfen. In dem er Bewehrungen zwischen den einzelnen Ziegellagen einbaut, ist es für das Mauerwerk möglich Zugkräfte aufzunehmen und somit viel freier formbar. Dieste formte allerdings nicht völlig "frei", sondern auch die Form selbst verbesserte durch ihre Krümmung das Tragverhalten der Mauer. Erst so wurden die hohen und trotzdem schlanken Wände sowie auch die weitgespannten Decken in der Cristo Obrero-Kirche möglich [21].

Abb. 019:

Cristo Obrero-Kirche

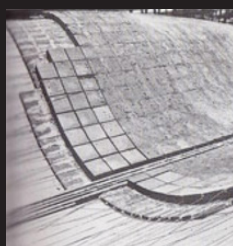


Abb. 020 und 021: Bau der Kirche

TWA - Flight Center / JFK Airport (1962) Eero Saarinen

Eero Saarinen war im 20. Jahrhundert einer der bedeutendsten Architekten und Designer. Er erblickte am 20. August 1910 in Kirkkonummi, Finnland das Licht der Welt. Als er 13 Jahre alt war, wanderte seine Familie in die USA aus, wo er später zu studieren begann und schließlich 1934 das Architekturstudium an der Yale-Universität abschloss.

Nach einer langen Studienreise in Europa und hier vor allem in Finnland, kehrte er 1936 in die USA zurück und begann im Büro seines Vaters, der ebenfalls Architekt war, zu arbeiten. Anfang der 40er Jahre wurde er Partner und baute in den Folgejahren unter anderm auch gemeinsam mit Robert Swanson einige bedeutende Gebäude. 1940 entwarf er zudem gemeinsam mit Charles Eames mehrere Objekte für einen Wettbewerb am Museum of Modern Art in New York, darunter auch den berühmten "Organic Chair", und gewannen gleich in mehreren Kategorien.

1950 gründete er dann sein eigenes Büro und entwickelte seinen Stil, der anfangs eher an die kubischen Formen eines Ludwig Mies van der Rohe erinnerte, weiter und fand in den Jahren immer mehr zu expressiveren Formen, welche er in zahlreichen innovativen Gebäuden - darunter auch das TWA - Flight Center am JFK Airport (NY) - an der amerikanischen Ostküste manifestierte. Saarinen war es auch, der 1956 in der Jury zum Wettbewerb des Opernhauses in Sydney den Vorsitz hatte und entscheidende Impulse zur Umsetzung des Entwurfs von Jörn Utzon setzte [22].

Abb. 022:

TWA Flight Center

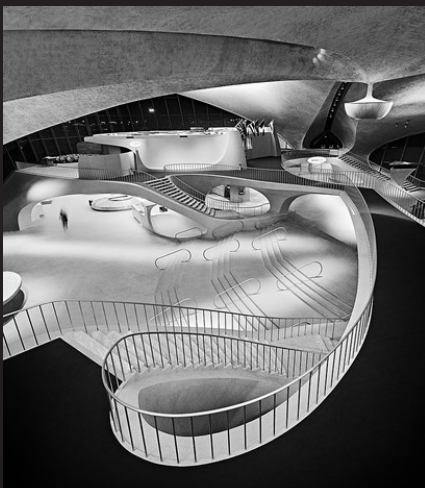


Abb. 023:

TWA Center Innen



Abb. 024:

Baustelle

Für das TWA - Terminal wurde er damals von der Betreibergesellschaft des New Yorker Flughafens Idlewild (später JFK) direkt beauftragt, da man einen innovativen Entwurf wollte und Saarinen schon damals als sehr aufgeschlossen und experimentierfreudig galt. Saarinen wandte sich von der "Maschinen-Ästhetik" des Bauhausstils ab und setzte mit seinem expressiven Bau ein Zeichen des Aufbruchs in der amerikanischen Architekturgeschichte. Das Gebäude vermittelt mit seinen freien Formen gleichzeitig Geborgenheit und Dynamik, der Raum fließt, Decken und Wände verschmelzen ineinander und formen schließlich eine ästhetische Skulptur [23].

Konstruktiv war das Gebäude auf der einen Seite sehr innovativ und zeigte, wozu man im modernen Schalenbau in der Lage war, auf der anderen Seite zeigte es wie auch Ronchamp von Le Corbusier eine gewisse Problematik auf: Es musste vor Ort ein imposantes Gerüst samt Schalung aufgebaut werden, in welche dann die eigentliche Schale aus Leichtbeton gegossen wurde. So war es notwendig eigentlich 2 hochkomplexe Konstruktionen zu errichten - im Sinne der Wirtschaftlichkeit nicht optimal.

Sydney Opera House (1973), Jørn Utzon

Das Opernhaus von Sydney ist wohl eines der markantesten und berühmtesten Gebäude überhaupt. Es ist Unesco Weltkulturerbe und das Wahrzeichen Sydneys. Entworfen



Abb. 025:

Sydney Opera House

wurde es von dem dänischen Architekten und Pritzker-Preisträgers Jørn Utzon.

Utzon wurde 1918 in Kopenhagen geboren. Von 1937 -1942 studierte er Architektur in Kopenhagen und arbeitete danach in mehreren Büros unter anderem auch bei Paul Hedqvist oder auch bei Alvar Alto. 1950 wurde er dann selbständig und führte fortan sein eigenes Architekturbüro mit dem er schnell Bekanntheit erlangte [24].

Weltberühmt sollte er allerdings 1957 werden, als sein Entwurf als Sieger des Wettbewerbs zur Gestaltung des neuen Opernhauses in Sydney hervorging. Utzon wurde daraufhin mit zahlreichen großen Projekten beauftragt, das Opernhaus von Sydney sollte allerdings nur sehr schwer in die Gänge kommen. Die Kosten für das Projekt schienen zu explodieren und das ursprünglich veranschlagte Budget von 3,5 Mio. £ reichte bei weitem nicht mehr aus. Doch selbst als die Kosten die 50 Mio. £-Grenze überschritten, weigerte sich Utzon von seinen Entwürfen abzurücken und Kompromisse einzugehen. Als der Bau längst zum Politikum in New South Wales geworden war, wurde Utzon folglich vom Projekt ausgeschlossen und sein Werk von jungen australischen Architekten fertig gestellt. Seine Sorge, die Kompromisse im Inneren des Gebäudes würden sein Projekt zerstören, sollten sich zum Teil bestätigen. Die Innenräume werden dem fantastischen Äußeren nicht gerecht - wie manche Kritiker meinen. Utzon setzte danach nie wieder einen Fuß auf australischen Boden [25].



Abb. 026:
Baustelle

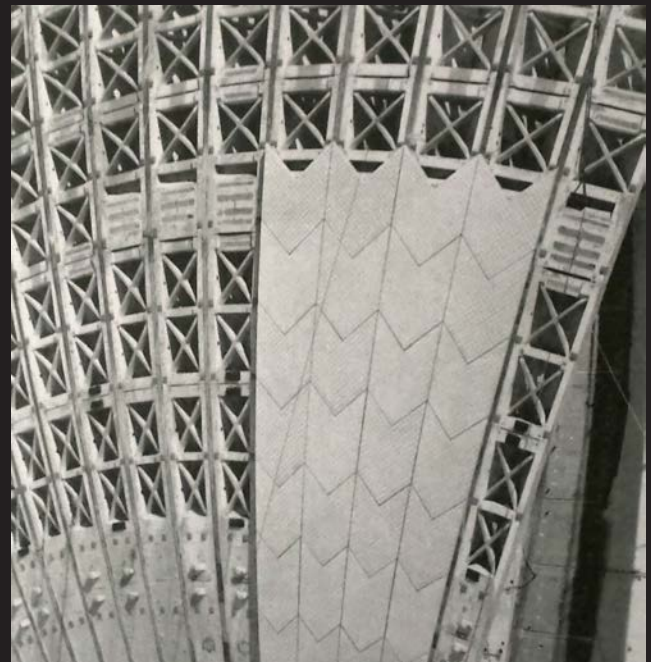


Abb. 027:
Schalenkonstruktion

In seinem spektakulären Entwurf löste Utzon das Dach von der Plattform los. Das Dach war ursprünglich etwas anders geplant, die freiförmigen paraboloiden Schalen waren allerdings zu schwierig zu berechnen und so entwickelte er eine Form bei der die einzelnen Schalen Segmenten einer Kugel mit 90 Metern Durchmesser entsprachen. Es war ein langer Weg bis zu diesem Ergebnis, so musste allein die Dachschaale 12 mal neu entworfen werden, was natürlich auch ein Grund war, warum die Kosten derart in die Höhe schnellten. Mit diesem Modell war es dann endlich möglich, das Dach zu berechnen und sogar auch mittels innovativer Fertigbaumethoden zu konstruieren. Die Schalen bestehen aus Betonrippen, zwischen welchen vorgefertigte stabilisierende Füllwände aus Ziegel angebracht wurden [25,26,27].

Utzon war dadurch einer der ersten, dem es gelang, seine organischen Formen mittels Fertigbaumethoden, die zu der Zeit stark im Kommen waren, zu realisieren. Schlussendlich verzögerte sich die geplante Fertigstellung trotz aller Bemühungen um 8 Jahre von 1965 auf 1973. Heute ist das Opernhaus von Sydney mit etwa 2500 Events und rund 4 Mio. Besuchern jährlich eines der größten Kulturzentren der Welt [25].

La Grande Cupola (1972) / Bini Shell, Dante Bini

Einen Weg, wie die zuvor erwähnte Problematik des enormen Aufwands den die Errichtung freier Betonschalenformen normalerweise mit sich bringt, vermieden werden könnte, hat sich Dante Bini überlegt. Bini ist ein italienischer Architekt, Jahrgang 1932 der sich vor allem im Bereich der automatisierten Bausysteme einen Namen machte. Inspiriert von den großen Architekten und Ingenieuren dieser Zeit wie etwa Frei Otto, Felix Candela oder Heinz Isler, die sich damals ebenfalls schon sehr intensiv mit dünnwandigen Schalen sowie Netz- und Seiltragsystemen beschäftigten, entwickelte Dante Bini in den frühen 60ern das "Binishell"-System [28].

Für die Errichtung einer "Binishell", die prinzipiell einen kreisrunden Grundriß sowie einen elliptischen Querschnitt hat, wird erst eine Betonscheibe als Fundament hergestellt und darauf ein pneumatisches Kissen ausgelegt. Auf dem wiederum werden sämtliche flexiblen Bewehrungen wie Federn und Stahlseile vorbereitet um dann das ganze mit langsam aushärtendem Beton auszugießen. Über die fertige in der Ebene betonierten Platte wird eine weitere Membran gelegt und dann die Form von Innen heraus aufgeblasen. Die Schalen, die

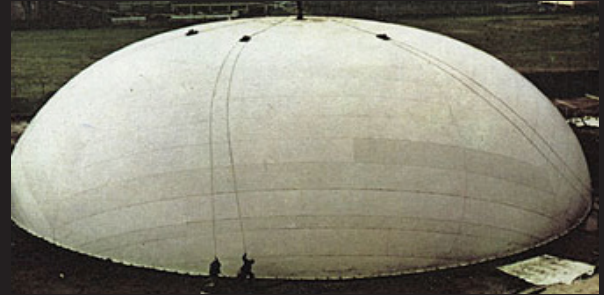
Abb. 028: La grande Cupola



in Durchmessern von 12 - 40 Metern hergestellt werden, können auf diese Weise in 60 -120 Minuten errichtet werden. Der Beton härtet aus und die Membranen können wieder entfernt werden. Etwaige Öffnungen werden aus der fertigen Kuppel einfach herausgeschnitten [29].

Laut "binishells.com" wurden schon über 1500 Gebäude in 23 Ländern auf diese Weise realisiert. Eines der bekanntesten ist wohl "La grande Cupola" auf Sardinien, das Haus das

Abb. 029:
Entstehung
einer Binishell



der Regisseur Michelangelo Antonioni und die Schauspielerin Monica Vitti bauen ließen. Die ganze Gegend in der Nähe der Costa Paradiso auf Sardinien gehörte damals einem gewissen Signor Tozzini der damals viele seiner Freunde aus Rom, darunter eben auch Antonioni und Vitti, hierher brachte. Tizzoni soll es auch gewesen sein, dem die futuristischen Binishells sehr imponierten und der das prominente Paar davon überzeugte sich ein solches Haus bauen zu lassen. Heute wird das Haus leider immer mehr zur Ruine, hat aber immer noch Spuren des glamourösen Charmes von damals [30].

Naturtheater Grötzingen (1977), Heinz Isler

Heinz Isler (geboren 1926 in Zürich) fing schon in früher Jugend an Gegebenheiten und Vorgänge in der Natur genau zu beobachten. Durch unzählige Versuche zum Beispiel mit kissenförmigen Pneus, hängenden nassen Tüchern oder Eis, das er verwendete um Fließformen zu generieren, war es ihm möglich physikalische Prinzipien zu erkennen und folglich auch in seinen Formfindungsprozessen und Entwürfen anzuwenden [31].

So auch bei der Überdachung des Naturtheaters in Grötzingen bei Stuttgart, das er 1977 gemeinsam mit Architekt Michael Balz realisierte. Die ermittelte Schalenform ging aus Hängerversuchen hervor, wodurch das Dach hauptsächlich Druckspannungen aufweist. Dies wiederum hat zur Folge, dass so gut wie keine Risse zu erwarten sind und die Schale auch ohne zusätzliche Dacheindeckung relativ unterhaltsfrei bleiben wird. Der unbehandelte Beton nimmt mit der Zeit immer mehr das Aussehen eines Natursteins an [32].

Die Überdachung überspannt einen 800 Personen fassenden Zuschauerbereich von 28 * 42 Metern. Als Auflager dienen 5 Punkte im Gelände, die sich auf unterschiedlichen Höhenniveaus befinden [33].

Auf den ersten Blick könnte man meinen, die Konstruktion eines Schiffsrumpfes vor

sich zu haben, wenn man die Schalung und deren Gerippe betrachtete. Jeder einzelne Schalungsträger unterschied sich vom anderen und musste präzise aus einem Formmodell herausgemessen werden. Auf das so entstandene Gerippe wurden schließlich noch Holzfaser- und Sperrholzplatten verlegt [32].

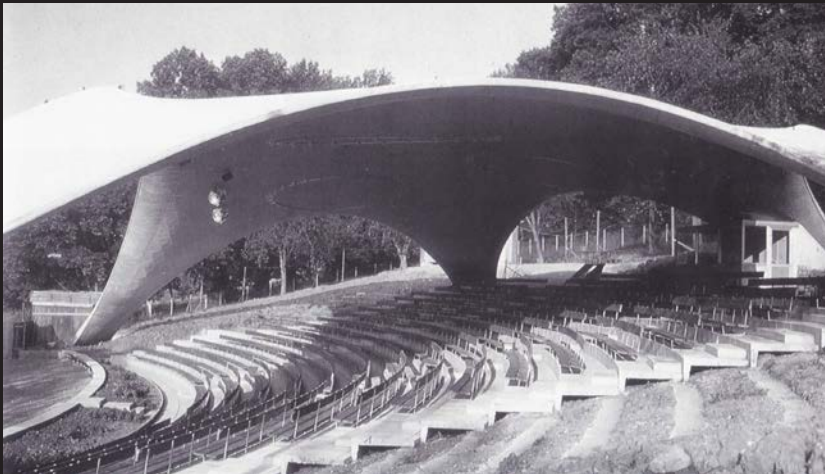


Abb. 030: Naturtheater Grötzingen

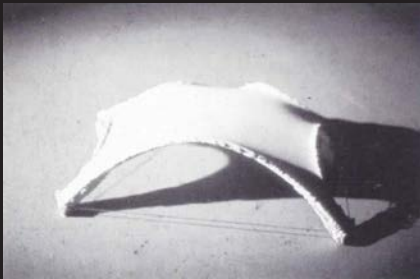


Abb. 031: Modell



Abb. 032 und 033: Schalungskonstruktio



Die Schale ist zu allen Seiten hin geöffnet, wobei die Form nicht nur statisch optimiert wurde, sondern auch was die Sprachverständlichkeit der Schauspieler betrifft, erstaunliche Ergebnisse hervor brachte. Eine weitere Besonderheit ist, dass bei Regen so gut wie keine Tropfgeräusche zu vernehmen sind [33].

L'Oceanografic (2002), Felix Candela

Felix Candela gilt als Meister und einer der Pioniere im Bereich des modernen Betonschalenbaus. Er arbeitete auch sehr "technisch", beschäftigte sich viel mit Materialien, Strukturen und auch der Mathematik, was in seinen zahlreichen Projekten auch sehr deutlich wird.

Geboren wurde Candela 1910 in Madrid, wo er auch sein Studium der Architektur an der Escuela Superior de Arquitectura absolvierte. Nach seinem Abschluss 1935 war er auch als Offizier und Ingenieur im spanischen Bürgerkrieg und war daraufhin 1939 gezwungen als politischer Flüchtling nach Mexiko zu gehen. Nachdem er sich hier niedergelassen und geheiratet hatte, erlernte er den Beruf des Bauingenieurs und fing an, auch auf dem Gebiet der Mathematik und damit einhergehend auch in der strukturellen Mechanik von Flächentragwerken zu forschen.

1952 wurde der "Pavillon für kosmische Strahlenforschung" errichtet, der zugleich Be-



Abb. 034:

L'Oceanographic

ginn einer imposanten Schaffensphase Candelas war. In den darauf folgenden 30 Jahren sollte er sich verantwortlich zeigen für nicht weniger als 896 Gebäude. 1971 emigrierte er in die USA, legte seine Tätigkeit als Leiter der Bauprojekte nieder und war fortan in seinem eigenen Beratungsbüro sowie als Professor in Chicago tätig [34].

Candelas Gebäude entstanden im wesentlichen stets nach zwei Gesichtspunkten, zum einen waren seine Entwürfe meist in Form und Dimension äusserst spektakulär, gleichzeitig ging er aber immer mit mathematischer Methode an das Projekt heran, was zur Folge hatte, dass sich seine komplexen geometrischen Formen räumlich voll entfalten konnten, mit erstaunlicher Leichtigkeit überzeugten und zusätzlich mit verhältnismäßig geringem Material- und Konstruktionsaufwand bauen ließen. Nicht zuletzt auch deswegen zählt Candela zu einem der wichtigsten Konstrukteure in der Geschichte der Betonschalen [35].

In den 1980ern begann Candela in Spanien tätig zu werden, auch als Berater für Projekte in den Bereichen Entwurf und Konstruktion wurde er gerne als Berater herangezogen. So entstand im Laufe der Jahre auch die berufliche Verbindung zu Santiago Calatrava, der ihn sehr verehrte. Calatrava war es auch, der ihn einlud am Projekt "Ciudad de las Artes y las Ciencias en Valencia" (Stadt der Künste und Wissenschaften in Valencia) mitzuarbeiten. Neben allgemeinen beratenden Funktionen übernahm er auch das Projekt "L'Oceanografic" - einen Themenpark mit Großaquarium. Es wurde leider erst 2002 - und damit 5 Jahre nach Candelas

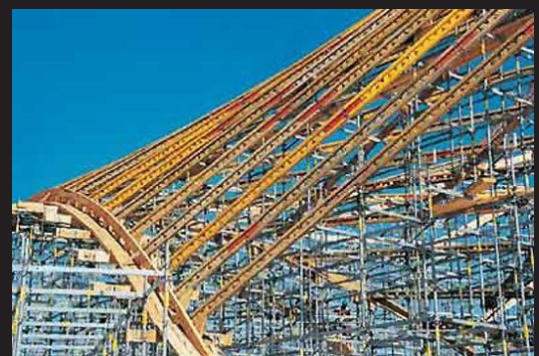


Abb. 035 u. 36: Schalungsbau des L'Oceanografic

Tod - eingeweiht [36].

Besonders im überhalb des Wassers liegenden Teil des Gebäudes, bei der Überdachung des Eingangs- und Restaurantbereichs, zeichnet sich Candelas Formensprache ab: Ähnlich wie bei einem seiner früheren Werke, dem Restaurant "Los Manantiales" in Xochomilco, Mexiko-Stadt besteht das Gebäude aus vier gigantischen Hyparen (hyperbolische Paraboloiden), die sich auf rundem Grundriß gegenseitig durchdringen. Durch die Grate (Außenkante) der Schale werden die Spannungen abgeleitet, für den Betrachter ist die Stärke der Grate aber kaum wahrnehmbar - gemeinsam mit der Tatsache, dass die komplette Schale nur auf acht Punkten steht, führt dies dazu, dass das Gebäude extrem leicht und transparent wirkt. Durch seine "Hypar"-Form schaffte es Candela zudem mit relativ geringen Mitteln - eine aus geraden Brettern bestehende Schalung, Stahlbewehrung und Ortbeton - den baulichen Aufwand in Grenzen zu halten [35].

Im "Oceanografic" ist derzeit das größte Aquarium Europas und es ist somit ein Anziehungspunkt für Touristen aus aller Welt [37].

Auditorio de Tenerife (2003), Santiago Calatrava

Wie man am Beispiel der vorangegangenen Bauwerke erkennen kann, macht erst das Zusammenspiel von genialer Architektur und großartiger Ingenieurskunst ein Gebäude faszinierend, einzigartig und somit zu einem Teil der Baugeschichte. Nur so werden immer wieder neue Methoden entwickelt, immer kühnere Formen baubar, immer noch größere Spannweiten, Höhen und Auskragungen möglich.

Ein Vertreter beider Zünfte, der auch schon als großer Bewunderer Felix Candelas Erwähnung fand, ist Santiago Calatrava. In der Gegenwart ist er einer der die Grenzen des Machbaren ausreizt wie kaum ein anderer. Das Zitat "Die Schwerkraft ist für einen Ingenieur das was für einen Maler die Farben sind" [38] sagt schon alles aus.



Abb. 037 : Auditorio de Tenerife



Abb. 038 - 040: Schalungsbau
des Auditorio



Calatrava wurde 1951 in Benimàmet (Valencia), Spanien geboren. Er begann in Valencia Kunst zu studieren, bevor er sich für Architektur inskribierte und 1973 diplomierte. Im Anschluss daran zog es ihn nach Zürich, wo er an der ETH Bauingenieurwesen studierte und schließlich 1981 mit dem Thema "Zur Faltbarkeit von Fachwerken" promovierte. Mittlerweile betreibt er Büros in Zürich, Paris und Valencia. In seinen Werken wird meist das Tragwerk das bestimmende gestalterische Element, oft ähnelt es einer natürlichen biomorphen Struktur und erhält nicht zuletzt dadurch auch meist einen skulpturalen Charakter. So auch das "Auditorio de Tenerife", das durch seine Gesamtwirkung und seine Lage am Wasser auch an Jørn Utzons Opernhaus in Sydney erinnert. Und doch geht es im gewissen Sinne noch einen Schritt weiter, während in Sydney die zu einem skulpturalen Ensemble aufgestellten Kugelkalotten die Funktion des Daches erfüllen, dient der gewaltige Bogen, der sich über das Auditorio erhebt und der auch durchaus einen markanten Anteil an den Baukosten hatte, keinem wirklichen Zweck. Im Prinzip ist in ihm nur die Aussenbeleuchtung für das Auditorio untergebracht, seine eigentliche Bestimmung allerdings erfüllt er mit Bravour - das Erzeugen von Emotion. Die Spitze dieses alles überragenden Bogens wurde auf dem Festland hergestellt und mit dem Schiff zur Insel gebracht, wo sie dann an die hohle Spannbetonkonstruktion anbetoniert wurde [39,40,41].

Für den Bau wurden modernste Schalungstechniken verwendet. Der Großteil des Sichelbogens und auch der anderen biomorph geformten Teile wurde mittels variabler Kletterschalung, die sich hydraulisch Takt für Takt verschieben lässt, ausgeführt. Mit Hilfe eines Modulgerüsts wurden die in Ausführung befindlichen Bauteile gestützt. So waren etwa für den Bogen 32 Betonierabschnitte mit lediglich zwei Zwischenstops zum Anpassen der Schalungselemente notwendig [42]. Die Optik der Oberflächen unterscheidet sich in Untersicht und exponierter Aussenfläche, so sind fast alle Untersichten als brettverschalter Beton erkennbar, wurden die nach außen liegenden Oberflächen mit glasierten weißen Fliesen belegt. Ähnlich wie in Sydney das Opernhaus ist das Auditorio de Tenerife mittlerweile auch zum Wahrzeichen der Inselhauptstadt avanciert und zieht jährlich eine Vielzahl von Besuchern an [39,40].

Was spricht eigentlich für die Schale?

„Unter Schale versteht man in der Festigkeitslehre einen nach einer krummen Fläche gebildeten Körper, dessen Dicke im Verhältnis zu seiner übrigen Ausmaßen äußerst gering ist. Auch die Benennung „Schale“ weist darauf hin, dass es sich um einen Körper handelt, dessen Dicke verhältnismäßig ebenso klein ist wie die der Eierschale“ [43]

Seit jeher spielt die Schale in der Geschichte des Bauens eine große Rolle, so gilt sie einerseits aufgrund ihrer runden Form als sehr ästhetisch und ist gleichzeitig aus technischer Sicht sehr effizient. Die Schale gehört zu der Familie der Flächentragwerke und bildet durch ihre Wölbung im Prinzip eine selbsttragende Membran. Auftretende Lasten werden in Längs- und Biegekräfte umgewandelt und in Richtung Auflager abgeleitet. Je kleiner die Schalendicke im Vergleich zur Spannweite ist, desto mehr muss gewährleistet sein, dass ein Membranspannungszustand erreicht wird, es treten fast nur mehr Längskräfte in der Konstruktion auf. Durch diese gleichmäßige, homogene und effiziente Lastenverteilung sind zum Teil enorme Spannweiten bei geringer Materialstärke möglich, und dies erhöht das ästhetische Potential der Schale zusätzlich. In der Architektur ist es schon seit jeher ein Wunsch, große Räume und

Abb. 041: Versuchsschale, Scheiteldicke der Schale: 15mm



Abb. 042 : Hoto Fudo / Takeshi Hosaka Architects

Weiten möglichst stützenfrei zu überbauen und die Schale wird hier vielen Anforderungen gerecht. Einerseits ist sie in der Formgebung fast unlimitiert, was viel Gestaltungsfreiraum schafft, andererseits entsteht ein verhältnismäßig geringer Materialaufwand und damit einhergehend weist die Konstruktion eine ungeheure Leichtigkeit auf. Egal ob die Schale massiv ausgeführt wird (z.B.: Stahlbeton, Mauerwerk) oder als Gittertragwerk (Stahl, Holz, Verbundstoffe etc.), sie wird immer auch durch ihre „Dreidimensionalität“ und höchste Planungsanforderung einen hohen Level an Ingenieurskunst darstellen. Bezüglich der „Berechenbarkeit“ der Formen hat sich in den letzten Jahren sehr viel getan, vor allem auch durch das Heranziehen

von geometrischen Grundformen (Kegel, Hyperboloid etc.) bzw. auch ein Kombinieren verschiedener solcher als Berechnungsgrundlage schaffte hier neue Möglichkeiten (siehe Problematik beim "Sydney opera house", Kugelkalotten).

Abb. 043: Beispiel Gitternetzschale; Multihalle Mannheim /

Frei Otto



Vor allem bei den Gitternetzschalen wird sehr oft die Möglichkeit der Vorfabrikation genutzt, was wiederum erlaubt, große und imposante Gebäude nicht nur schnell sondern auch wirtschaftlich zu bauen. Aber auch bei den massiven Schalen, die vor einigen Jahrzehnten noch sehr mühevoll mittels meist sehr aufwendiger Holzschalungen (siehe Naturtheater Grötzingen, Heinz Isler) errichtet wurden, konnte man Fortschritte erzielen. Durch bewegliche Gerüste und teilweise flexible Metallschalungen konnte hier der Aufwand für den Bau einer freiförmigen Schale reduziert werden (siehe Auditorio de Tenerife, Calatrava). Gerade aber bei den Massivschalen wird eine gewisse Problematik augenscheinlich. Bei einigen der in dieser Arbeit vorgestellten Meisterwerke der Baukunst wurde spätestens bei genauerem studieren der Konstruktionsmethoden offensichtlich, dass trotz Einsatzes von zur jeweiligen Zeit modernster Technologien ein immenser Schalungs- und parallel dazu auch ein enormer Materialaufwand entstanden ist, um diese doppelt gekrümmten Schalen herstellen zu können. Oft müssen die Schalungssysteme sogar eigens für dieses eine Bauwerk konzipiert und hergestellt werden. Aus diesem Grund waren schon viele Ingenieure inspiriert, diesbezüglich neue Wege zu gehen und andere Möglichkeiten auszuprobieren (siehe Dante Bini).

Auch am Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau der TU Wien wird seit Jahren an unterschiedlichen sehr einfachen und vergleichsweise schnellen Methoden für den Bau doppelt gekrümmter Schalen (vorerst im speziellen Kuppeln, in weiterer Folge auch frei geformter Schalen) geforscht. Unter großem Einsatz aller Beteiligten am Institut über viele Jahre hinweg, sowie großzügiger zusätzlicher Unterstützung aus der Privatwirtschaft, konnten schon einige bemerkenswerte Ergebnisse und Prototypen realisiert werden.

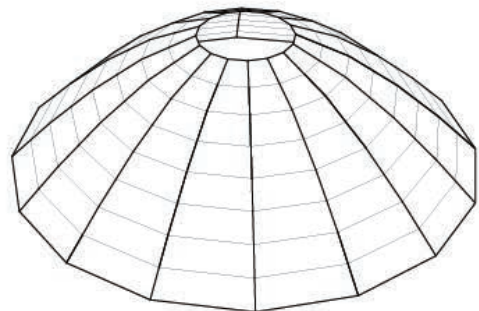
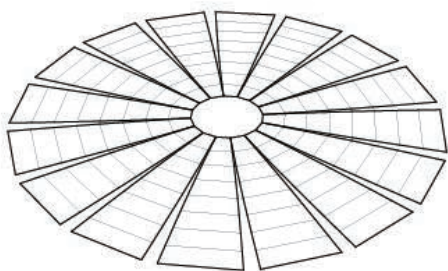
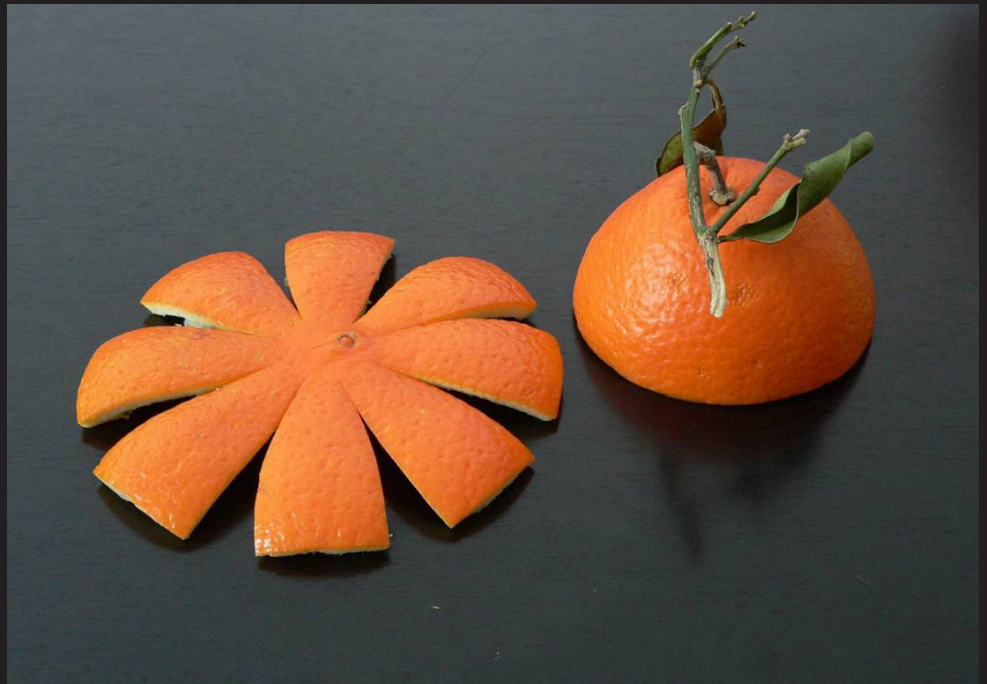
Da die Konstruktion einer frei geformten Schale eine sehr komplexe Angelegenheit ist, wurde für das Testen der verschiedenen neuen Methoden erst einmal die Form der Kuppel gewählt. Die Kuppel, die ja zur Familie der doppelt gekrümmten Schalen gehört, ist mit ihren geometrischen Eigenschaften - wie zum Beispiel als angenäherte Form der Halbkugel mit einem Scheitelpunkt, stehend auf einem runden, vieleckigen oder ovalen Grundriß und die Nutzung des ganzen Umfangs des Grundrisses als Widerlager [44]- prädestiniert für die ersten Versuche zur Untersuchung der später beschriebenen Methoden. Sollte dann eine gewisse Sicherheit bei der Anwendung der jeweiligen Methode bestehen, kann zu weiteren Schritten übergegangen werden. Nach der Erläuterung der einzelnen Methoden wird theoretisch überlegt, was für Konstruktionsformen fortan möglich sein könnten.

Forschung an neuen Methoden zur Herstellung doppelt gekrümmter Betonschalen am Institut für Tragkonstruktion - Betonbau an der TU Wien:

In den letzten Jahren wurden am Institut für Betonbau der technischen Universität Wien zahlreiche neue Methoden erforscht, bei denen in der flachen Ebene betonierte Platten beziehungsweise Segmente, mittels pneumatischer Schalung sowie Hebe- und Spannvorrichtungen, in doppelt gekrümmte Schalen transformiert werden. Im Zuge dessen wurden schon einige eins zu eins Großversuche realisiert, wobei es sich meist um Kuppeln aus Beton oder aber auch aus Eis mit ca. 10 Metern Durchmesser handelte. Hinzukommen natürlich eine Vielzahl an Modellversuchen im kleineren Maßstab aus diversesten Materialien. Auf den folgenden Seiten wird noch tiefergehend auf die einzelnen Methoden eingegangen.

Grundlegendes Prinzip, das bei all diesen Methoden zum Tragen kommt: Flache in der Ebene ausgehärtete Betonteile (oder auch Eis) werden in eine doppelt gekrümmte Schalenstruktur transformiert:

Abb. 044 - 045: Funktionsprinzip



Die “Polystyrene wedge method”

Für diese Versuchsanordnung wurde die Form einer einfachen Kuppel mit ca. 12 Meter Durchmesser und 2,16 Meter Höhe ausgewählt (siehe Abb. 049).

Wie in Abbildung 046 sichtbar, wurde eine flache Scheibe, im Durchmesser 13 Meter betoniert. Die Segmente, die eingespart werden mussten, um die Transformation zur Kuppel zu ermöglichen, wurden mit 32 Styroporkeilen ausgespart, sie werden im späteren Transformationsprozess auf ein Minimum zusammengedrückt. Um zu vermeiden, dass sich die Scheibe beim Aufblasen der Pneu am äußeren Rand zuerst anhebt, wurde der Randbereich “massiv” (10 cm stark) und der innere Teil der Scheibe als 5 cm Styropor- und 5 cm Betonsandwich ausgeführt (siehe Abb. 047).



Abb. 046: Versuchsanordnung Polystyrene wedge method

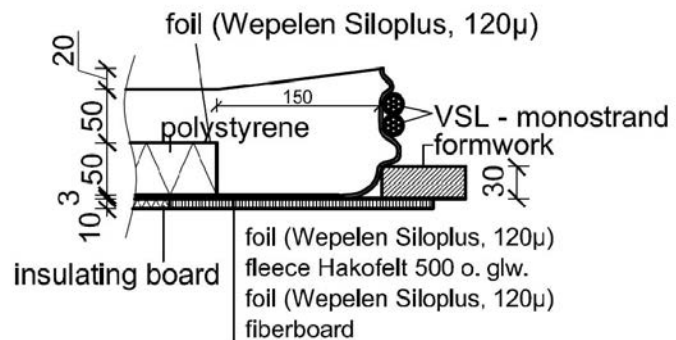


Abb. 047: Detail Außenrand



Abb. 048: Spannstelle

Das Ganze liegt auf einer nur 0.12 mm starken handelsüblichen Silofolie (Reißfestigkeit ca. 3.3 N/mm^2), die später die Funktion des Pneu übernimmt, auf und wird von zwei Spannlitzen, die außen anliegen, eingefasst. Durch zwei Ankerblöcke, die sich gegenüberliegen, werden

die Litzen durch eine jeweils dort angebrachte Vorspannhydraulik (Abb. 048) angezogen was zusammen mit dem Aufblasen des Pneus die Transformation der Scheibe zur Kuppel bewirkt.

Bei dieser Formumwandlung entstehen starke Spannungen, die in Ringrichtung von den Styroporkeilen kompensiert, und in Meridianrichtung von den Betonsegmenten und deren Bewehrung aufgenommen werden. Um die gewünschte Kuppelhöhe von 2,16 Metern zu erreichen, mussten sich einerseits die Styroporkeile auf 25% der ursprünglichen Breite (im äußersten Bereich von 144 mm auf 38 mm) stauchen und gleichzeitig die Betonsegmente

Abb. 049: Funktionsprinzip
Spannring und Luftkissen

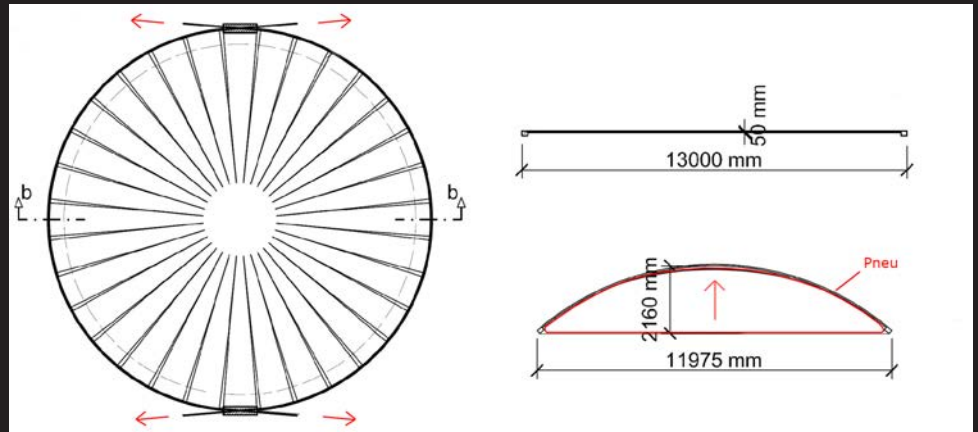


Abb. 050: Vgl. Innenhöhe zu
Radius

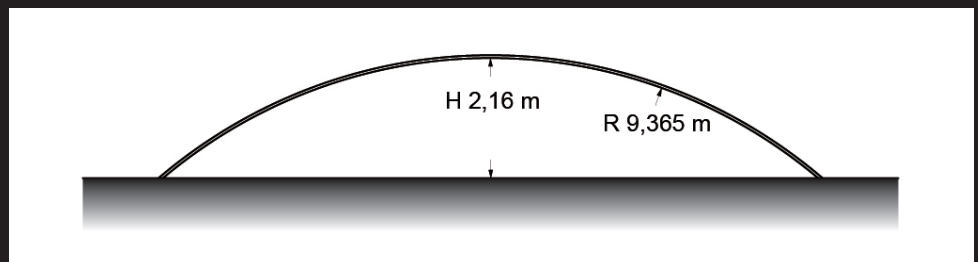


Abb. 051: Diagramm - Höhenent-
wicklung Fortschritt

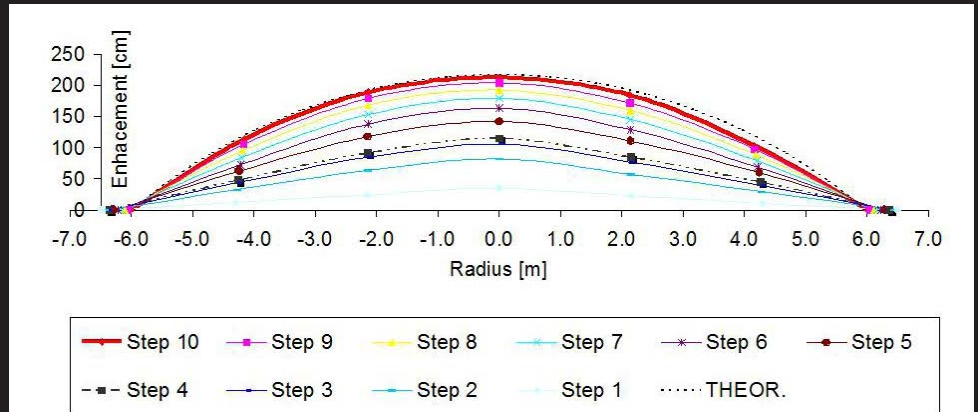


Abb. 052: fertige Kuppel

eine entsprechende Krümmung zulassen (Radius 9,365 Meter). Aufgrund der Eigenschaft des Betons, wesentlich mehr Druck- als Zugkräfte aufnehmen zu können, entstehen bei der Durchbiegung Mikrorisse auf der Außenseite. Eine 6 mm starke Bewehrung im Abstand von 70 mm sorgt jedoch dafür, dass die Zugkräfte im erforderlichen Maß aufgenommen werden können.

Um die Transformation in Gang zu setzen, wird das unter der Platte befindliche Pneu mit maximal 6 mbar aufgeblasen, bis sich die Plattenmitte anhebt. Sobald eine deutliche Wölbung erreicht ist kommt auch die Spannvorrichtung ins Spiel und zieht die außenliegenden Spannlitzen zusammen, um einerseits Position und Form zu stabilisieren aber auch, um den weiteren Transformationsprozess aktiv zu bewirken. Die Vorgänge werden fortgeführt, bis die gewünschte Kuppelhöhe erreicht ist (Abb. 045). Die Spannlitzen werden fixiert, die Luft kann aus dem Kissen ausgelassen werden, die Kuppel steht. Die Biegungen und Spannungen in den Betonsegmenten sind im zulässigen Bereich.

Nach dieser Methode wurde 2005 in Obergurgl auch eine Eiskuppel gebaut (Abb. 047 und 048). Auf den Abbildungen ist gut zu erkennen, dass die Styroporkeile auch in der finalen Struktur bestehen bleiben, was als Nachteil dieser Methode zu werten ist. Zudem sind die realisierbaren Radien limitiert, es ist daher nur möglich eher flache Kuppeln zu errichten [45].



Abb. 053 und 054: Eiskuppel in Obergurgl

(Fotos: Günter R.Wett)



Die “Pneumatic formwork method”

Bei diesem Verfahren wird die Kuppel von vorn herein in einzelne planare Elemente zerlegt und ergibt daher streng genommen keine Kuppel, sondern ein Polyeder (ein von mehreren Flächen begrenzter Körper). Bei dem im folgenden dargestellten Beispiel wurde die Kuppel in 16 Segmente zerlegt und diese wiederum in 6 Elemente unterteilt. Somit ergeben sich 96 planare vorfabrizierbare Einzelteile, die vor Ort miteinander verbunden werden, sowohl in Ringrichtung, als auch radial. Erstere sind über Winden verbunden, um die Segmentringe während der Transformation engerziehen und in finaler Position fixieren zu können (Abb. 057).

Abb. 055 und 056: Kuppel als Polyeder aus 96 Flächen

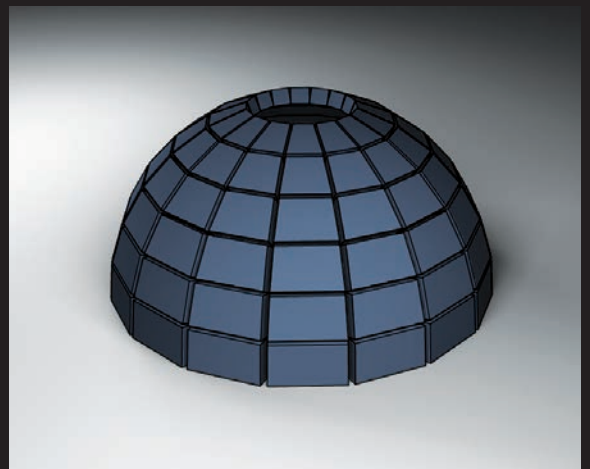


Abb. 057: Anordnung und Verbindung der Segmente

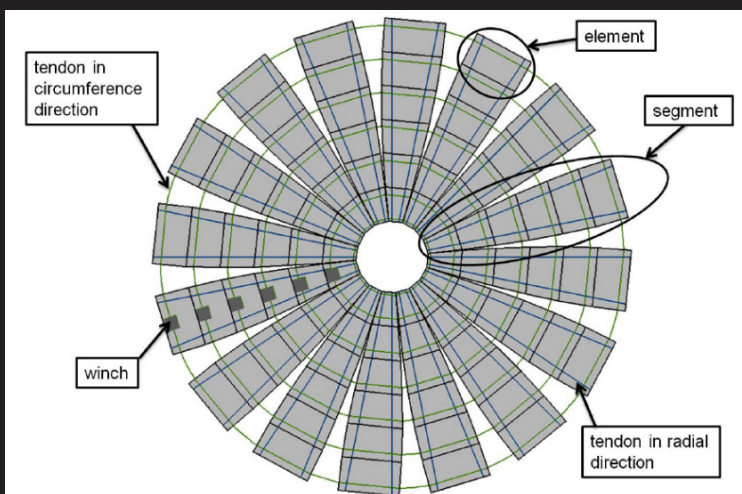


Abb. 058: Testpneu

Für das pneumatische Schalungs- bzw. Hebekissen wurden verschiedene Naht-Varianten getestet, um für die Polyvinylchlorid(PVC)-Membran (Stärke: 670g/m², Reißfestigkeit: 146 N/mm²) die bestmögliche Stabilität und Reißfestigkeit zu gewährleisten. Durch die Tatsache, dass eine Halbkugel keine abwickelbare Außenfläche hat, kann das Luftkissen der Form der Halbkugel nur angenähert werden (siehe Abb. 058, aufgeblasenes Testpneu). Auch die Dehnung der PVC-Membran während des Prozesses wurde miteinbezogen und der Umfang der losen Membran um 5% gegenüber der finalen Form reduziert, sodass sie erst im aufgeblasenen und ausgedehnten Zustand der gewünschten Geometrie entspricht.

In einigen Feldversuchen gelang es auch, mit dieser Methode eine Betonkuppel zu errichten. Ihr Durchmesser von 10 Meter und ihre Höhe von 4 Meter waren schon beachtlich, allerdings muss auch erwähnt werden, dass einige vorangegangene Versuche scheiterten, da die Folie den mechanischen Beanspruchungen während des Anhebeprozesses nicht standhielt. Der erforderliche Druck im Pneu, um das Anheben zu ermöglichen war bis zu 37 mbar.

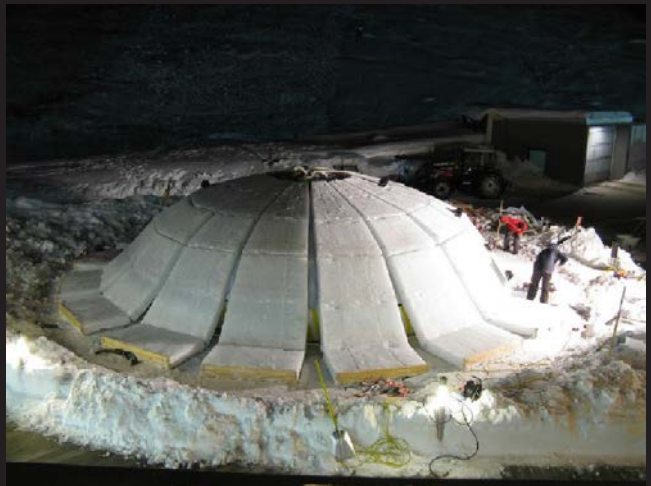


Abb. 059 und 060: Versuchsanordnung große Kuppel

Im Winter 2008/2009 wurde die Methode im auf fast 2000 Meter Seehöhe liegenden Obergurgl in Tirol erneut getestet, diesmal allerdings nicht mit Betonelementen, sondern mit Eis. Es gab zwei Versuchsanordnungen, die prinzipiell einen identischen Aufbau hatten, allerdings von der Dimensionierung her unterschiedlich waren - die kleinere Schale hatte in der Ebene einen Plattendurchmesser von 6 Metern und eine Stärke von 12 cm, bei der größeren betrugen diese Maße 13 Meter bzw. 20 cm. Während der Versuch bei der Anordnung mit kleinerem Durchmesser funktionierte und eine Halbkugel mit 4 Meter Durchmesser und 2 Meter Höhe ergab, scheiterte der andere leider, da der innerste Zugring der Belastung nicht standhielt [45].

Die Conclusio nach einer Reihe von Experimenten war, dass sich diese Methode eher für kleinere Schalen mit einem Durchmesser von nicht mehr als 10 Meter eignet und alles, was darüber geht, kritisch wird, da die erforderlichen Kräfte den Pneu und die verbindenden Teile an ihre Grenzen bringen.

Die “Segment lift method”

Das Prinzip der “Segment lift method” besteht darin, dass 16 liegende, radial angeordnete Keilelemente in einem ersten Prozess gebogen und daraufhin die im Zentrum liegenden Enden jeweils soweit angehoben werden, bis eine geschlossene Kuppel entsteht. So gesehen handelt es sich auch hier genau genommen nicht um eine frei geformte Schale, sondern ein Kloostergewölbe mit Hexadecagon (16-Eck) als Basis.

Abb. 061: Prinzip “Segment lift method”

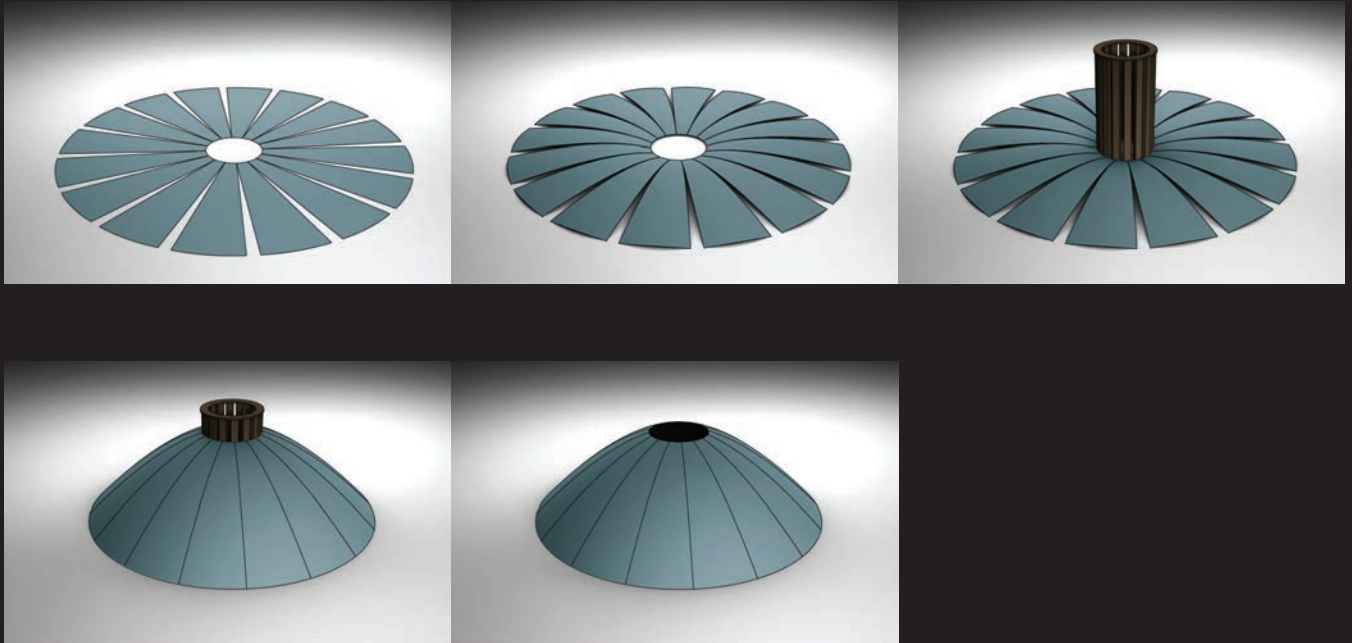
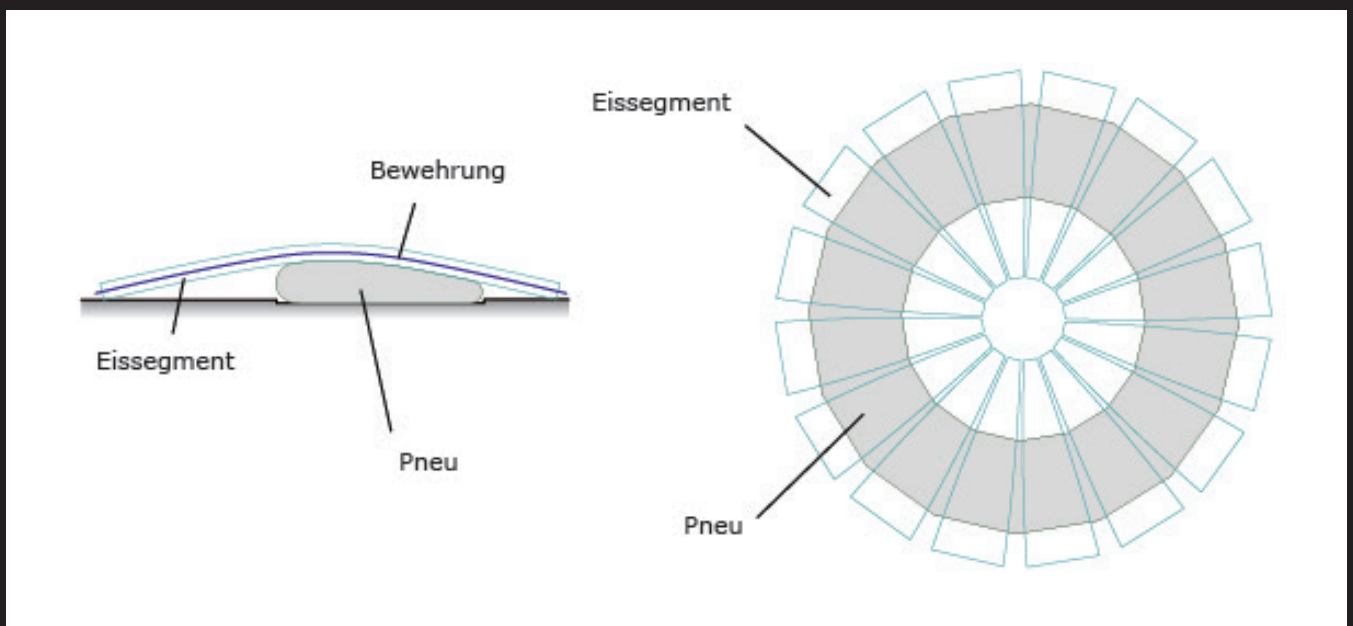


Abb. 062: Biegen der Eissegmente mittels Pneu



Auch diese Methode wurde bereits erfolgreich getestet. Wiederum in Obergurgl wurden in den zwei Saisonen 2009/10 sowie 2010/11 Eiskuppeln mittels der "Segment lift method" errichtet. Beide male waren die Abmessungen der Kuppeln mehr oder weniger ident. Da auch viele andere Details ähnlich waren, bestand der größte Unterschied jedoch darin, dass in der Saison 2010/11 zum Biegen der Eissegmente eine, auf Hölzern aufgelagerte, mechanische Hebekonstruktion und nicht wie im Jahr zuvor ein Pneu verwendet wurde.

Abb. 063 und 064: Hebeprozess und fertige Eiskuppel (Segment lift method) in Obergurgl



Nun aber zu den einzelnen Schritten: Erst werden die Segmente in der Ebene vorproduziert. In einer bereits aufgeständerten Schalungsvorrichtung, in der auch schon die erforderliche Bewehrung angebracht wurde, wird nach und nach Wasser gegeben, bis dieses zu fertigen, armierten Eissegmenten erhärtet. Daraufhin werden die Segmente mittels Pneu (siehe Abb. 062) bis zum gewünschten Radius gebogen (Versuch Saison 2009/10). Während die Enden des Segments fixiert sind, wird der Pneu aufgeblasen und hebt so die Mitte an, was zu einer Kriechverformung des Eises führt. Die Biegung der Segmente wird durch Anbringen von Ketten fixiert. Nacheinander können nun die Segmente an einem in der Mitte positionierten Hebeturm angehoben werden und ergeben so nach und nach die finale Form. Sobald alle Segmente ihre Position erreicht haben, kann außen ein Spannseil angebracht werden, das fortan die im Auflager nach außen wirkenden Kräfte aufnimmt. Der Hebeturm und die die Biegung der Segmente fixierenden Ketten können entfernt werden und die fertige Kuppel ist von nun an verwendbar. In diesem Falle hatte sie einen Winter lang die Funktion einer Eisbar und bot Platz für bis zu 80 Personen [45].

Abschließend muss bei der "Segment lift method" leider auch erwähnt werden, dass in Summe doch ein relativ großer Aufwand betrieben werden muss und nicht nur einiges an Zeit sondern auch an Hilfskonstruktionen sowie technischer Vorbereitung notwendig ist, um eine Kuppel mit dieser Methode zu bauen.

Die “Pneumatic wedge method”

Die “Pneumatic wedge method” ist das Ergebnis aus dem Bestreben einen neuen Weg zu entwickeln, der die jeweiligen Vorteile der verschiedenen vorangegangenen Methoden bestmöglich vereint. Auf sie wird im folgenden deutlich tiefer eingegangen, da sie den momentanen Stand der Forschung am Institut für Betonbau der TU Wien darstellt.

Jede der bereits vorgestellten Methoden konnte mittels zahlreichen Tests und Versuchen auf ihre Funktionalität hin überprüft und auch bestätigt werden, allerdings kamen im Laufe der Zeit neben den angestrebten Vorteilen gegenüber konventionellen Konstruktionsverfahren eben auch Limitierungen beziehungsweise Nachteile der einzelnen Verfahren zum Vorschein. Zusammenfassend kann man festhalten:

-**“Polystyrene wedge method”**: es handelt sich um ein relativ simples Prinzip, Material- und Konstruktionsaufwand für den Schalungsbau sind gering, auch einfache technische Ausführbarkeit ist absolut gegeben und die eingesetzten Materialien sind günstig und leicht erhältlich. Außerdem ließen sich auch sehr große Kuppeln (> 10 Meter) relativ einfach realisieren. Dem gegenüber steht die eingeschränkte mögliche Krümmung - je größer die Krümmung der Kuppel, desto mehr muss im “ebenen Zustand” zwischen den Segmenten ausgespart werden, was wiederum bedeutet: das temporäre Füllmaterial (in diesem Fall die



Abb. 065: “Polystyrene wedge method”

Styroporkeile) muss eine sehr große Stauchung aufnehmen können und sollte gleichzeitig stabil genug sein, um Gleichmäßigkeit beim Aufrichten und Biegen der Betonsegmente zu gewährleisten sowie genug Gegendruck zum Hauptpneu aufbringen. Je größer die Abstände zwischen den Segmenten werden - vor allem an den äußeren Bereichen, desto weniger kann Styropor diesen Anforderungen gerecht werden. Hinzukommt außerdem, dass das gestauchte Material in der finalen Struktur verbleiben wird, was wiederum aus ästhetischer Sicht leider auch ein Nachteil ist.

-**“Pneumatic formwork method”**: auch hier hält sich der “technische” Aufwand in Grenzen, wenngleich das Ganze schon aus deutlich mehr Einzelteilen und damit auch Verbindungen besteht. Das Pneu selbst besteht zwar nicht mehr wie bei der “Polystyrene wedge method” aus Silofolie, aber auch das verwendete PVC lässt sich einfach bearbeiten und für den gewünschten Zeck einsetzen. Und ist die Versuchsanordnung erst einmal vorbereitet,



Abb. 066: "Pneumatic formwork method"

gestaltet sich das Anheben und damit die Transformation in die Kuppel als Prozess von überschaubarer Komplexität. Das Problem hier ist die Limitierung der Kuppelgröße, denn je größer die ganze Anordnung wird, desto größer werden auch die wirkenden Kräfte auf Verbindungselemente, Zugringe, Pneu usw.. Im Zuge der zahlreichen Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass 10 Meter wohl der maximal erreichbare Durchmesser ist, da von hier an die Belastungen zu groß werden. Bei einer Kuppel dieser Größe müsste ein deutlich größerer Krümmungsradius gewählt werden, damit der erforderliche Druck im Pneu nicht zu hoch wird. Es entstehen immer größer werdende Reibungen zwischen Beton/Eis und Pneu, welche das verhältnismäßig dünne Membranmaterial irgendwann überfordern. Im Zuge des großen Eisversuchs in Obergurgl stellte dann auch der innerste Verbindungsring eine Schwachstelle dar, der leider vor der Finalisierung des Hebeprozesses geplatzt ist.

- **"Segment lift method"**: dieses Verfahren wiederum ermöglicht die Herstellung von Kuppeln fast jeder Größe und Rundung, keines der verwendeten Schalungs- oder Konstruktionselemente wird in übermäßiger Form be- oder gar überlastet, und im Gegensatz zur "Polystyrene wedge method" bleiben keine Überreste der Schalung bzw. Teile der Konstruktion in der Schale zurück. Hier bleibt der Nachteil des relativ hohen konstruktiven



Abb. 067: "Segment lift method"

und zeitlichen Aufwandes: jedes Segment für sich muss hergestellt werden, die vorgegebene Krümmung muss für jedes Segment eingestellt und fixiert werden und zusätzlich bedarf es

einer Hebekonstruktion und/oder eines Krans, der die so produzierten Elemente anhebt und in Position bringt. Hier ist der Übergang zu einem konventionellen Konstruktionsverfahren, bei dem Einzelteile vorgefertigt und dann zusammengesetzt werden, fließend.

Im Prinzip ist die **“Pneumatic wedge method”** eine technische und konstruktive Weiterentwicklung der **“Polystyrene wedge method”**, denn bei diesem Verfahren sind die ursprünglichen Anforderungen, einen einfachen und gleichzeitig effektiven Weg zu finden, eine doppelt gekrümmte Schale zu konstruieren, absolut gegeben. Das Manko der limitierten Krümmatur, die durch das Verwenden von Styropor als Material für die Keile zwischen den Betonsegmenten verursacht wurde, wird nun behoben, indem man sie durch pneumatische Keile ersetzt. Dies erhöht einerseits zwar den Schalungs- und Montageaufwand in der Vorbereitungsphase, bietet aber dafür entscheidende Vorteile während des Transformationsverfahrens selbst und wirkt sich zusätzlich positiv auf das fertige Schalenergebnis aus, da keine gestauchten Materialrückstände verbleiben. Während der Transformation bzw. des Aufrichtungsprozesses der Schale kann der Druck und somit der Widerstand der einzelnen Keilpneus variabel gesteuert werden. Sobald die Transformation abgeschlossen und die äußeren Spannlitzen fixiert sind und somit die Konstruktion stabilisiert ist, kann der Druck aus den Keilpneus abgelassen und das Membranmaterial fast restlos entfernt werden. Lediglich an manchen Stellen wird das Material zu fest zwischen die Betonsegmente geklemmt und kann nur äußerlich entfernt werden. Es verbleibt aber nichts sichtbares, daher kann dies als vernachlässigbar angesehen werden und hat keinen Einfluss auf die Ästhetik der Kuppel.

Im Jahr 2012 konnte auch für diese Methode ein Großversuch realisiert werden. Auf dem Werksgelände der Firma Doka in St. Martin/Karlsbach (Niederösterreich) konnte am

Abb. 068: Vorbereitung der Versuchsanordnung, rosa Keilpneu unter Aussparungsschalung



27. November 2012 nach wochenlanger Vorbereitung der eigentliche Hebeversuch ausgeführt werden. Nachdem man aus zahlreichen kleineren Versuchen, die sich mit sämtlichen Materialien, Vorspannung, Sollbruchstellen uvm. beschäftigten, wichtige Erkenntnisse ziehen konnte, wurde im Sommer 2012 damit begonnen, die Versuchsanordnung vor Ort auf einem von der Firma Doka zur Verfügung gestellten Areal auf deren Firmengelände, aufzubauen. Auf einem eigens errichteten ausnivellierten Plateau wurde erst eine Silofolie verlegt, darauf ein Schutzvlies und auf dieses kam dann wiederum eine Silofolie. Die Folien dienten später als Pneu und wird zum Anheben der Plattenmitte verwendet. Auf diese Schichten wurden dann die 16 Keilpneus ringförmig angeordnet und es konnte damit begonnen werden, die Schalung für die Betonelemente zu montieren. Wie auf Abbildung 068 ersichtlich, erhöhte sich die Schalung zum Außenrand hin, analog dazu sollten später die betonierten Segmente am äußersten Punkt eine Stärke von 10 cm aufweisen, die sich zur Mitte hin auf 5 cm reduzierte. Dies wurde aus dem Grund so konstruiert, da einerseits das relative Gewicht der Segmente somit entsprechend nach außen zunimmt und das Plattenzentrum beim Aufblasen des Hauptpneus zuerst angehoben wird, während das Gewicht der äußeren Bereiche das Pneu dicht hält und



Abb. 069: Blick von oben auf die Versuchsanordnung

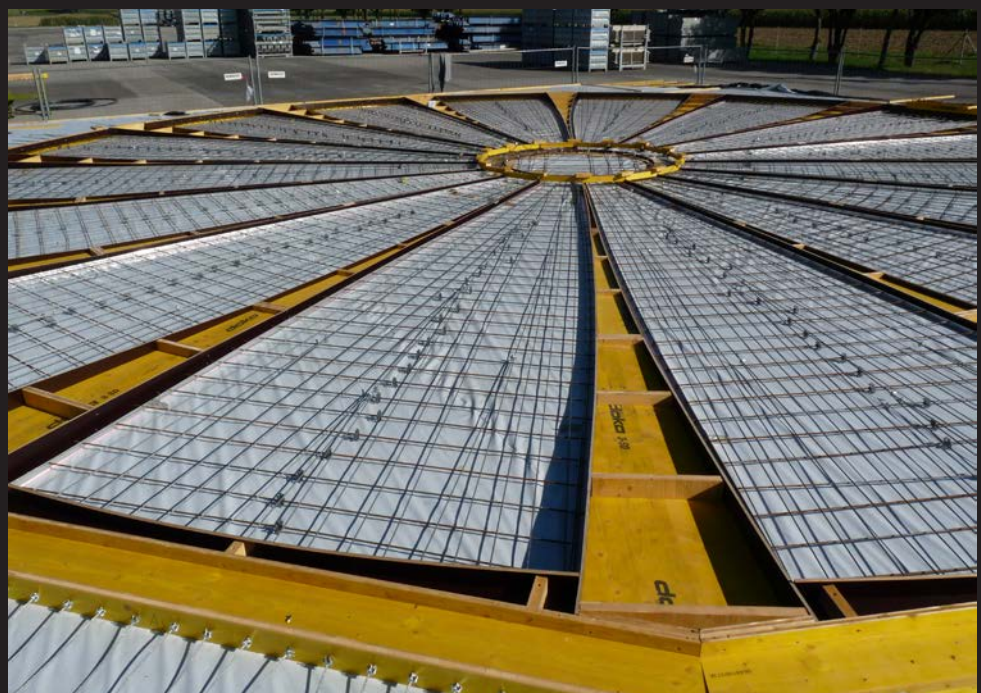


Abb. 070: Bewehrung

außerdem so auch eine entsprechende Auflagefläche für die umlaufenden Spannlitzen gebildet wird. Als nächster Schritt wurde die Bewehrung (Abb. 070) verlegt und montiert. Ausgehend von einem zentralen Metallring (Abb. 071) wurden die Stahlseile am Außenrand der Schalung befestigt - erst vorgespannt und dann fixiert. Normal zu den Seilen wurde zusätzlich im Abstand von 10 cm gewöhnliches Bewehrungsessen verlegt, von ihm wird im Gegensatz zu den Seilen später keine Biegeflexibilität abverlangt. Während des Aufbaus durfte auch auf die später notwendige Vorrichtung zur Anbringung der Vorspannhydraulik nicht vergessen werden, auch für diesen Block, an dem die Vorspannzylinder ansetzen,

Abb. 071: Stahlring im Zentrum



Abb. 072: Block zum Ansetzen der Vorspannhydraulik

konstruierte man eine Schalung und es wurden Führungsschläuche für die Spannseile in die Schalung integriert (Abb. 072).

Nachdem die Schalung fertig vorbereitet war, konnte mit der Betonage begonnen werden. Um genügend Zeit zu haben, den Beton noch nachzubearbeiten wurde ein Verzögerer hinzugefügt. Da man schon im Vorhinein wußte, dass durch die Krümmung der Betonsegmente an der Außenseite Risse entstehen würden, begünstigte man die Entstehung einer einheitlichen und homogenen Rissverteilung, indem bewußt Sollbruchstellen in die frisch betonierte Segmente eingefügt wurden. Im Abstand von ca. 5 cm wurden in den noch weichen Beton ca. 15 mm tiefe Rillen eingedrückt (Abb. 073). Nachdem alles fertig betoniert war und



Abb. 073: Eindrücken der Sollbruchstellen



Abb. 074: Resultat nach der Betonage

die letzten kleinen Details nochmal überprüft wurden, wie etwa ob die Lufteinlässe für die Pneus offen sind etc., wurde alles abgedeckt und der Beton bekam Zeit zum Aushärten. Drei Monate später war es dann soweit und es konnte mit dem Ausschalen begonnen werden. An sich keine allzu große Schwierigkeit, allerdings musste durchaus mit entsprechender Umsicht vorgegangen werden, da man die unter bzw. zwischen den Betonsegmenten befindlichen Folien und Pneus nicht beschädigen wollte.

Nachdem die Schalung entfernt war, konnten die weiteren Vorbereitungsschritte für den Anhebeversuch gestartet werden. Dem Ganzen war bis dato schon eine penible Vorbereitung und Planung vorausgegangen und so sollte auch beim weiteren Vorgehen nichts dem Zufall überlassen werden. Es musste dafür Sorge getragen werden, dass alle den Transformationsprozess bewirkenden und beeinflussenden Elemente wie Hauptpneu, Keilpneus und Spannvorrichtung korrekt angeschlossen und montiert werden. Der große Pneu wurde über einen 50 mm Schlauch an 2 Seitenkanalverdichter angeschlossen (Abb. 075 und 077). Die Seitenkanalverdichter haben den Vorteil, dass sich mit ihnen ein sehr hoher Volumenstrom erzeugen lässt. Während des Anhebens traten bei der Silofolie vermehrt undichte Stellen auf, was eine Erhöhung der Luftzufuhr notwendig machte. Weiters mussten auch die Druckluftleitungen zu den Keilpneus angeschlossen werden. Diese bestanden jeweils aus einer Leitung für die Luftzufuhr und einer zusätzlichen Leitung, die für die Druckmessung notwendig war.

Sie wurde unmittelbar vor dem Einlassventil am Pneu mittels T-Verbindung angesteckt (Abb. 076). Sämtliche Leitungen der Keilpneus wurden dann mit einer Steuereinheit (Abb. 077) verbunden, die von einem Kompressor mit Druckluft versorgt wurde. Somit war es möglich,

Abb. 075: Schlauch zum großen Pneu



Abb. 076: Luft und Messleitung
Keilpneu



Abb. 077: Steuereinheit mit Kompressor
und Seitenkanalverdichtern



Abb. 078: Spannstelle



Abb. 079: Hydraulischer Vorspannzylinder

via Laptop erstens die Drücke digital zu messen und natürlich auch zu regeln.

Nachdem alle pneumatischen Elemente angeschlossen, überprüft und für einsatzbereit befunden wurden, musste auch die Spannhydraulik angebracht werden. Dafür wurden 2 Spannlitzen entlang der Außenkante um die Betonsegmente gelegt und durch die ausgesparten Führungslöcher in den betonierten Spannstellen geschoben. An jeder Spannstelle wurden jeweils 2 hydraulische Spannzylinder - wie sie etwa beim Vorspannen der Bewehrung von Beton verwendet werden - angebracht (Abb. 079), die Seilenden wurden jeweils durchgesteckt und alles in Position gebracht. Die vier Zylinder mussten nun noch an das Hydraulikaggregat angeschlossen werden und waren somit auch bereit für ihren Einsatz.

Mehrere Foto- und Videokameras wurden für die Dokumentation des Versuches positioniert. Und nun war es endlich soweit, das Vorhaben die ebene Platte in eine doppelt gekrümmte Schale zu transformieren konnte gestartet werden. Der Kompressor wurde ge-

startet um die Keilpneus auf Druck zu bringen (ca. 30 mbar, konnte kurzfristig auf bis zu 150 mbar erhöht werden) und der Seitenkanalverdichter konnte damit beginnen, Luft unter die große Platte zu blasen. Schon wenig später war eine deutliche Wölbung wahrzunehmen. Nach einer gewissen Zeit wurde der zweite Seitenkanalverdichter zugeschaltet, um genügend

Abb. 080: Anfangsphase des Hebeprozesses



Abb. 081: Halbzeit



Abb. 082: Resultat

Luft für ein weiteres Heben der Platte zu fördern. Das Hebepneu war im Stande die Plattenmitte auf ca. 0,9 bis 1 Meter anzuheben, von dieser Höhe an, wurde der Hebeprozess durch die Spannvorrichtungen an den Außenseiten unterstützt.

Nach dem schrittweisen Anziehen der Spannlitzen wurde darauf folgend im Pneu wieder Druck aufgebaut, womit gewährleistet wurde, dass kein negatives Biegemoment (durch das Eigengewicht der Betonsegmente) entstehen konnte. Sobald der erforderliche Druck wieder erreicht wurde, konnte man die Spannlitzen weiter anziehen was wiederum die Kuppelmitte anhob. Diese Schritte wurden mehrfach wiederholt, erst Druck aufbauen dann wieder Litzen anziehen usw.. Es musste allerdings darauf geachtet werden, dass währenddessen der Druck im Pneu nicht zu sehr fiel. Vor allem in dem Abschnitt, in dem die Wölbung noch relativ flach war, war dies wichtig. Nach fortgeschrittenem Hebeprozess, als sich die Krümmung der Segmente nach außen bereits deutlich abzeichnete, war die Herausforderung, die Krümmung der einzelnen Segmente gleichmäßig zu halten. Mit fortschreitendem Verlauf des Hebeprozesses und des vermehrten Einsatzes der Spannhydraulik, deuteten sich an manchen Kanten der Segmente nicht korrekte bzw. leicht verschobene Stöße an, was in weiterer Folge auch zu Überlappungen der einzelnen Segmente führen könnte. Dem wurde, durch Erhöhen des Druckes sowohl im Hauptpneu als auch in den Keilpneus, versucht entgegenzuwirken, was auch im Prinzip gut gelang. Leider konnte es nicht überall ganz vermieden werden und so passierte es an 2 Stellen, dass sich ein Segment über das andere schob (Abb. 083).



Abb. 083: Überlappung

In Summe kann allerdings von einem sehr erfolgreichen Versuch gesprochen werden, vor allem in Anbetracht dessen, dass im Vergleich zu den vorherigen Methoden und den damaligen Versuchen, eine neue komplexe Technologie ihre Anwendung fand und die Kuppel erstmalig eine solche Größe in Verbindung mit einer so hohen Krümmung aufwies. So hat die Versuchsanordnung dank der peniblen Planung sowohl in der Vorbereitung, im Aufbau als auch in der Ausführung sehr gut funktioniert und zudem auch eine Vielzahl an neuen Erkenntnissen für künftige Testreihen geliefert. Die Notwendigkeit einer leichten Stabilisierung der Segmente, eventuell durch Führungsschienen, war eine davon. Außerdem stellte sich heraus, dass die nach außen dicker werdende Platte das Widerstandsmoment der Segmente zu stark beeinflusst, was die Krümmung im äußeren Bereich reduziert. Weiters musste während des Anhebeprozesses festgestellt werden, dass das reine Unterlegen einer Silofolie, die dann als

Hebepneu dient, den Anforderungen nicht ganz genügt. Je mehr sich die Kuppel erhob und die Segmente sich zusammenzogen, desto mehr hatte man auch mit dem Undichtsein der Folie zu kämpfen, da sie, verursacht durch die Reibung mit den Segmenten, viele kleine Beschädigungen aufwies und immer wieder abgedichtet werden musste.

Um auch den ästhetischen Anforderungen gerecht zu werden, wurde an der entstandenen Kuppel noch etwas nachgearbeitet und zum einen die Reste der Keilpneus entfernt sowie zum anderen die Außenseite verspachtelt, um ein homogenes Außenbild zu erhalten. Um auch einen Zugang zum Inneren der Kuppel zu ermöglichen, wurde in eines der Segmente ein Loch gestemmt.

Abb. 084: Fertige Kuppel



Abb. 085: Kuppel verspachtelt





Abb. 086: Kuppel - close up



Abb. 087: Kuppel "Eingang"



Abb. 088: Innenraum

Mögliche Konstruktionsformen mit der “Pneumatic wedge method”

Die “Pneumatic wedge method” stellte sich als sehr praktikables Verfahren heraus, mit dem eine Kuppel hergestellt werden kann. Klarerweise müssen gewisse Voraussetzungen gegeben sein, um das Verfahren anwenden zu können. Zum einen sollten die örtlichen Gegebenheiten entsprechen wie etwa ein ebener und stabiler Untergrund, zum anderen spielt natürlich auch die endgültige Position und Funktion der Kuppel eine Rolle - stellt die auf dem Boden stehende Kuppel selbst das Gebäude dar oder soll sie das Dach eines Gebäudes in 30 Meter Höhe bilden - je nach Entwurf und Einsatzgebiet der Kuppel kann sich das Verfahren gegebenenfalls als geeignet erweisen. Das Ziel ist es, die Anwendbarkeit der Methode aber auch die daraus resultierende Schale im Endergebnis stetig zu verbessern und zu optimieren.

Im Folgenden soll weiters auch untersucht werden, inwieweit die Methode geeignet wäre, um auch andere zweifach gekrümmte Schalen zu produzieren. Bisher stellte die Kuppel im Prinzip die am einfachsten herzustellende Form dar. Was müsste man gegebenenfalls beachten, wollte man eine Schale zum Beispiel in Form eines Ellipsoiden herstellen? Wäre das theoretisch überhaupt möglich und was bzw. wo wären die Limitierungen?

So wie sich generell in den letzten Jahrzehnten eine Methodik entwickelt hat, um Schalen zu berechnen, in dem man zu Beginn von verschiedenen analytisch beschreibbaren Geometrien ausgeht und diese falls erforderlich miteinander kombiniert, wird hier das Prinzip umgedreht. Es wird damit begonnen, verschiedene analytisch beschreibbare Flächen auf ihre Tauglichkeit hin zu untersuchen, um eine entsprechende Schale mittels der “Pneumatic wedge method” zu errichten. Bei den untersuchten Flächen handelt es sich um folgende:

- **Halbkugel**
- **Kugelabschnitt**
- **Zylinder**
- **Zylinder in Kombination mit 2 Halbkugelabschnitten**
- **halber Ellipsoid**
- **Ellipsoidabschnitt**
- **Paraboloid**
- **Hyperboloid**
- **Hyperbolischer Paraboloid**

Anhand dieser Flächen wird beschrieben, wie die ebene Platte segmentiert sein müsste, um nach der theoretischen Transformation ein Schalentragsystem von solcher Form zu ergeben, wenn überhaupt möglich. Das Krümmungsverhalten, der simulierte Verformungsprozess und die erforderlichen Keilformen können so miteinander verglichen werden. Weiters wird dann die vorerst am meisten geeignete Fläche tiefergehend getestet um festzustellen ob sie als Grundform für den nächsten Großversuch in Frage käme. Dies würde wiederum eine nächste “Evolutionsstufe” in der Entwicklung der “Pneumatic wedge method” bedeuten. Anhand von Visualisierungen werden zusätzlich realitätsnahe Verwendungsmöglichkeiten für die so errichteten Schalen dargestellt.

Die Halbkugel

Eine Kugel kann durch folgende Gleichung allgemein im Raum beschrieben werden:

$$(x_1 - a)^2 + (x_2 - b)^2 + (x_3 - c)^2 = r^2$$

Abb. 089: Halbkugel Geometrie



Die Kugel (wie auch die weiteren untersuchten Flächen) wird mit Hilfe einer 3D-Software namens Rhinoceros© erstellt und mittels eines Plug-Ins namens Evolutetools©, das geeignet ist, komplexe Geometrien in fassbare und abwickelbare Oberflächenstrukturen umzuwandeln, unterteilt. Rhinoceros© ist auch in der Lage, die Krümmung einer Oberfläche mittels sogenannter “Zebradarstellung” abzubilden und zeigt anhand des Verlaufs der Zebra-textur das Krümmungsverhalten. Zusätzlich wird noch mit Hilfe einer Visualisierungssoftware namens Cinema 4D© ein Transformationsprozess simuliert und ein theoretisches Resultat dargestellt.

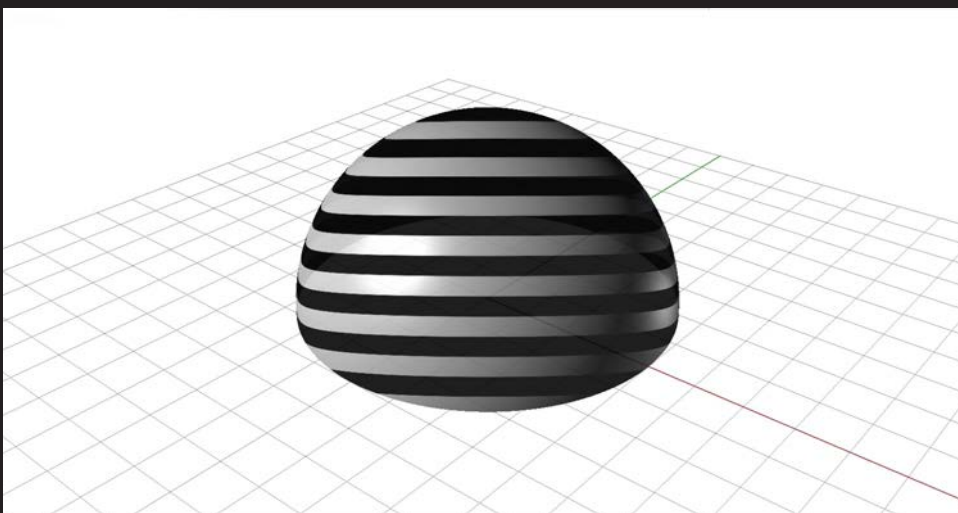


Abb. 090: Halbkugel Zebradarstellung;
Krümmungsverhalten

Die gleichmäßige parallele Texturierung lässt darauf schließen, dass die Krümmung der Halbkugel homogen und gleichbleibend ist. Es besteht eine gleichbleibende positive Gaußsche Krümmung.

Abb. 091: Ausgangsform Halbkugel, mit absolut runder und gleichmäßig gekrümmter Oberfläche, - ist in der Form nicht in eine Ebene zu bringen. Würde man sie zusammenpressen, würde sie zerstört bzw. völlig deformiert werden. Um die Halbkugel "transformierbar" zu machen, muss sie entsprechend segmentiert werden.



Abb. 092: Die Oberfläche der Halbkugel wird dafür entsprechend in 16 Segmente unterteilt. Das Zentrum bildet eine Platte an der die 16 Segmente andocken. Ihre Größe kann an sich frei gewählt werden, sollte allerdings so dimensioniert sein, dass sie in der Gesamterscheinung nicht zu sehr aus der Form fällt, andererseits aber genug Kantenlänge für die Verbindung zu den Segmenten bietet.

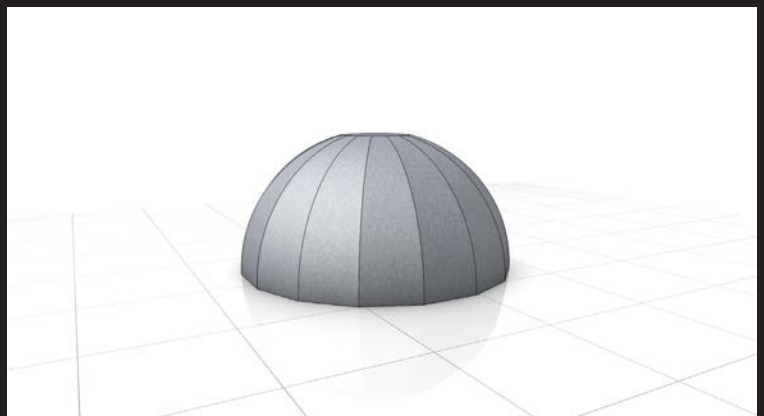
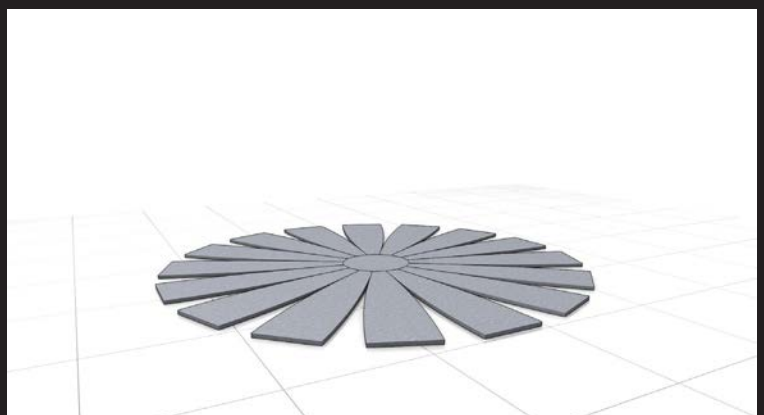


Abb. 093: Halbzeit auf dem Weg zur ebenen Platte. Die Segmente weisen weniger Biegung auf und spreizen sich nach außen. Durch die Spreizung entstehen Abstände zwischen den Segmenten.



Abb. 094: Die ebene Platte in dieser segmentierten Form würde die Ausgangslage darstellen, um mittels "Pneumatic wedge method" eine Schale in Form einer Halbkugel zu errichten.

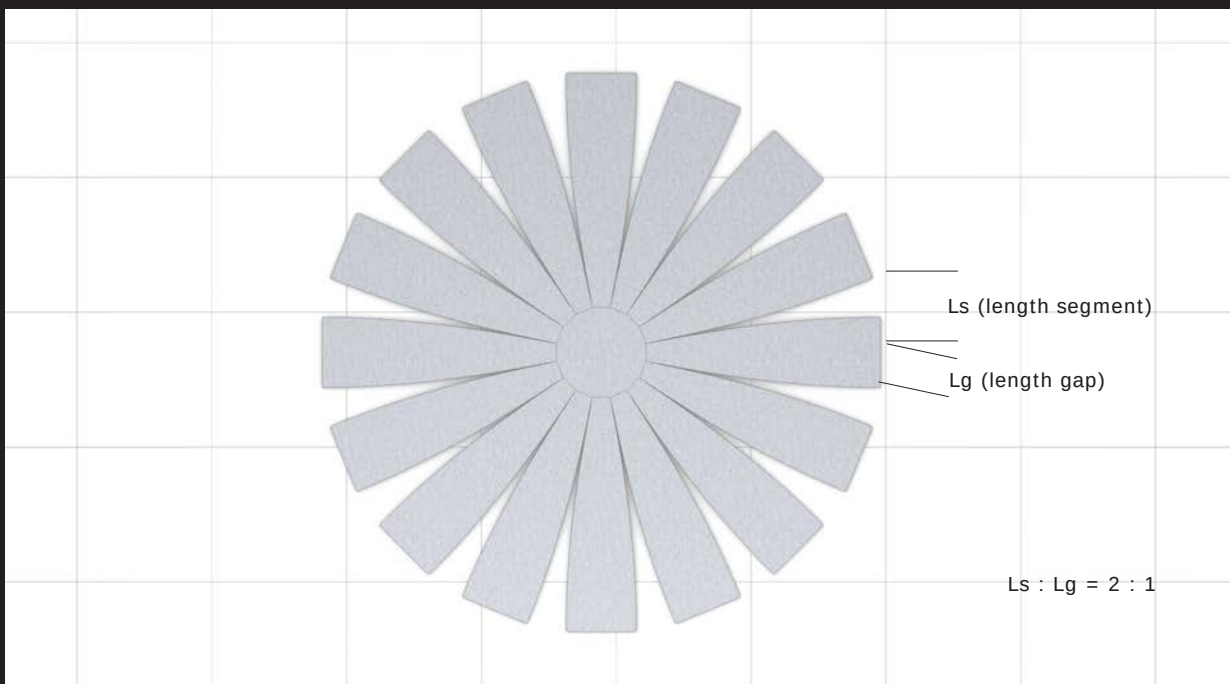


Aufgrund ihres Krümmungsverhaltens ist die Halbkugel als Form durchaus geeignet für die "Pneumaic wedge method". Sie ist einfach zu berechnen und aufgrund ihrer Symmetrie ist der Schalungsbau nicht zu komplex. Der Hebeplan muss keine spezielle Form aufweisen. Die außen anliegenden Spannsysteme können aufgrund der gleichmäßigen Rundung zur Unterstützung des Anhebeprozesses verwendet werden, da die Umlenkkräfte konstant sind. Die Keilpläne können alle in identischer Form hergestellt werden und in bekannter Form zum Einsatz kommen.

Abb. 095: So könnte eine einsatzbereite Schale (in Form angenähert an die Halbkugel) aussehen.



Abb. 096: Draufsicht Platte

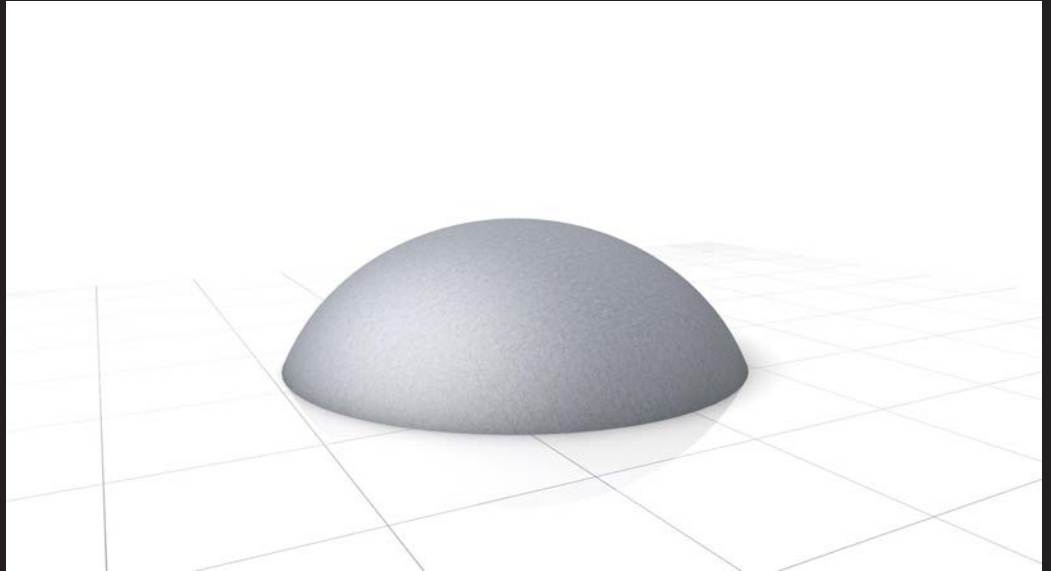


Das Verhältnis Ls zu Lg zeigt, dass der Spalt zwischen den Segmenten nach außen hin relativ breit wird. Hier muss gewährleistet sein, dass der Keilplan seine Funktion entsprechend erfüllen kann.

Der Kugelabschnitt

Der Kugelabschnitt verhält sich klarerweise in vielerlei Hinsicht ähnlich wie die Halbkugel, die genau genommen auch nichts anderes als ein exakt in der Hälfte der Kugel geschnittener Kugelabschnitt ist. Entsprechend gilt auch die gleiche Formel zur Beschreibung der Geometrie.

Abb. 097: Kugelabschnitt
Geometrie



Hier wurde ein Kugelabschnitt mit geringerer Höhe gewählt. Er verhält sich in Punkto Symmetrie und Krümmung genau gleich wie die bereits dargestellte Halbkugel. Je flacher allerdings der Abschnitt desto mehr ändert sich das Tragwerksverhalten und es treten in der Schale fast nur noch Druckspannungen auf, die tangential in Richtung Auflager abgeleitet werden. Ein flacher Kugelabschnitt stellt die am einfachsten herstellbare Geometrie mittels "Pneumatic wedge method" dar. Ebenso wie bei der Halbkugel hält sich die Komplexität des Schalungsbaus in Grenzen, die geringe Höhe kann mittels simplem Hebepneu, in Kombination

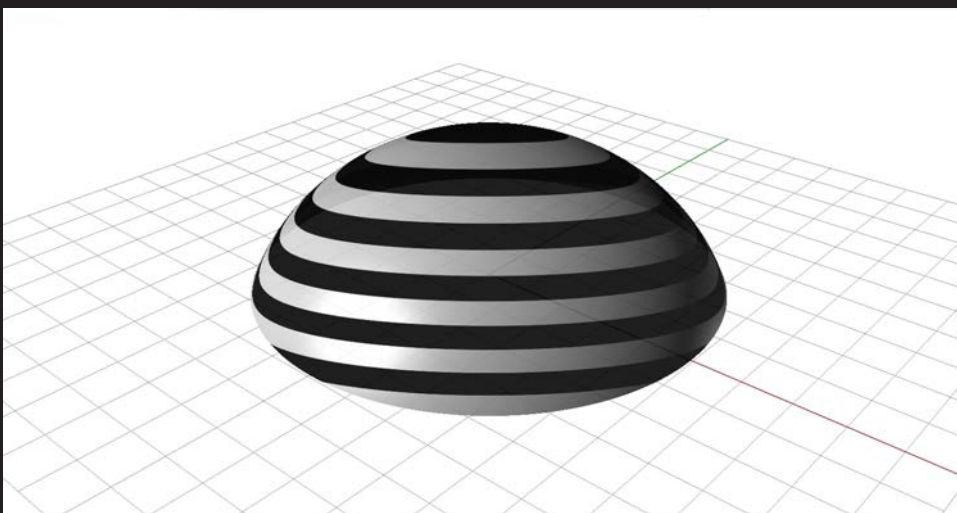


Abb. 098: Kugelabschnitt
Zebradarstellung;
Krümmungsverhalten

mit ringförmiger Vorspannung erreicht werden. Bei einem sehr flachen Kugelabschnitt könnte auf die Vorspannung während des Anhebeverfahrens sogar verzichtet werden. Die Spannlitzen müssten nur noch die Fixierung der transformierten Schale gewährleisten.

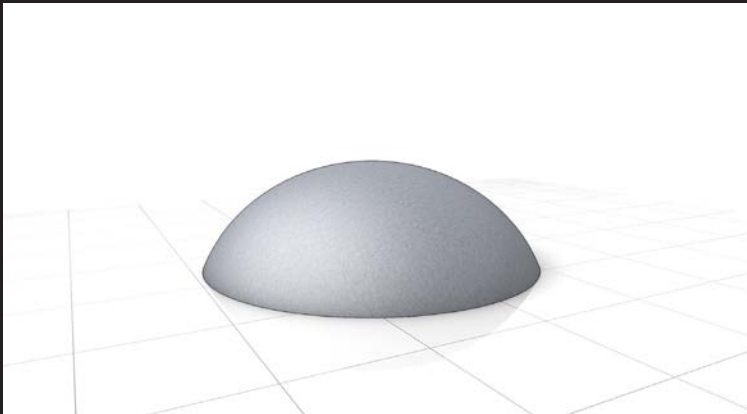


Abb. 099: Ausgangsform flacher Kugelabschnitt, mit absolut runder und gleichmäßig gekrümmter Oberfläche - ähnlich dem Kugelabschnitt - ist in der Form nicht in eine Ebene zu bringen.

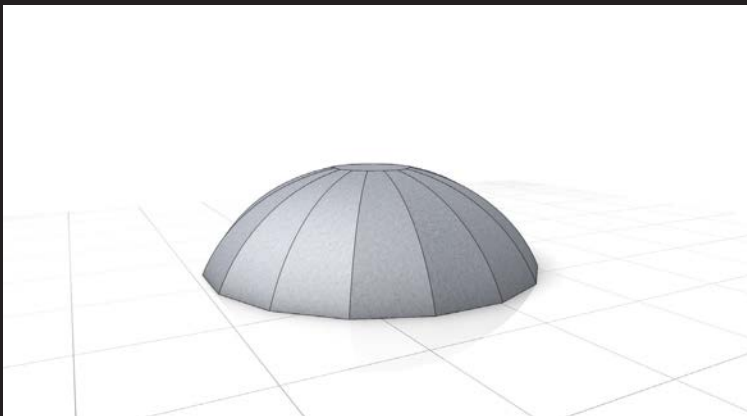


Abb. 100: Die Oberfläche des Kugelabschnittes wird wiederum in 16 Segmente unterteilt. Das Zentrum bildet eine Platte an der die 16 Segmente andocken.



Abb. 101: Halbzeit auf dem Weg zur ebenen Platte. Die Segmente weisen weniger Biegung auf und spreizen sich nach außen. Durch die Spreizung entstehen Abstände zwischen den Segmenten.

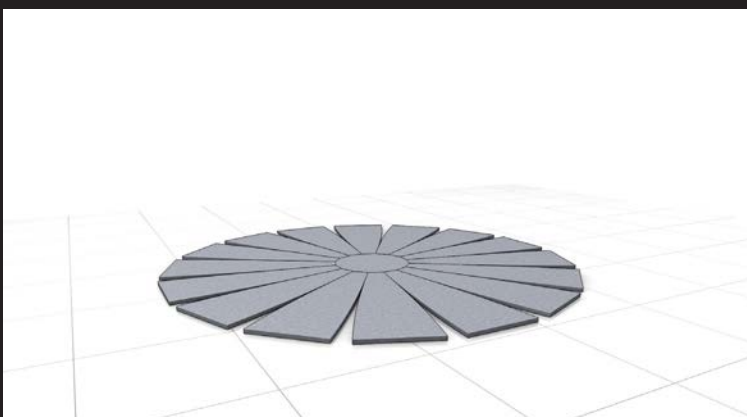


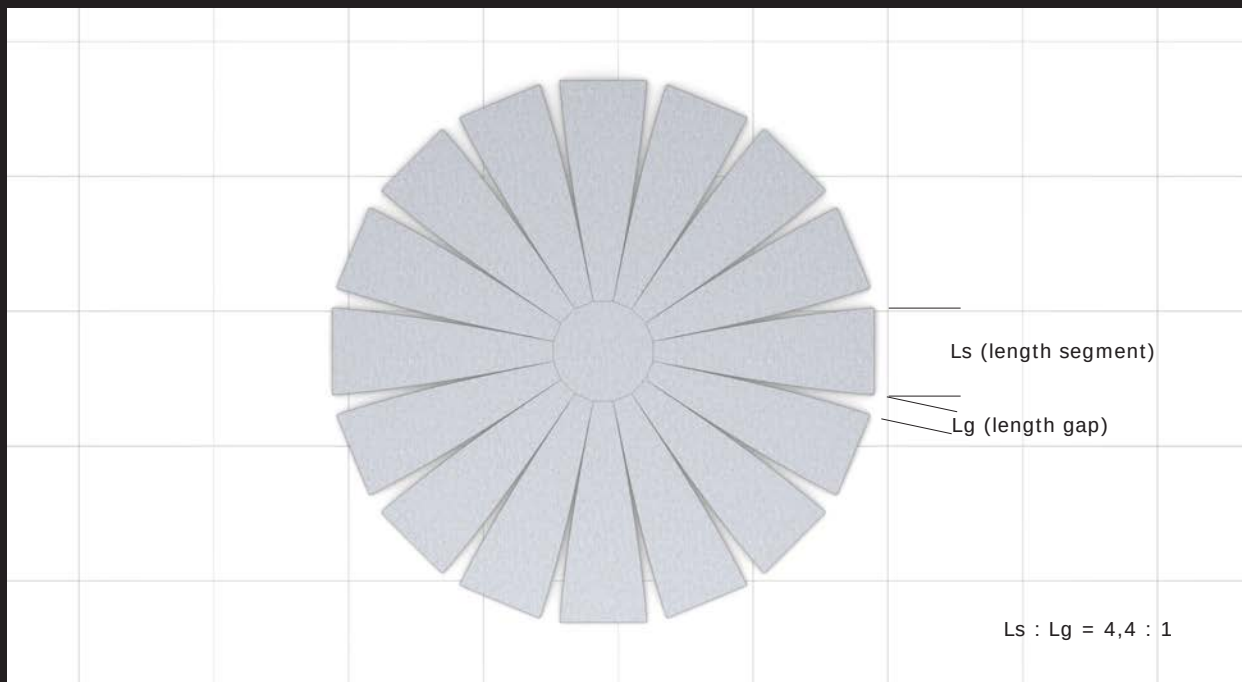
Abb. 102: Die ebene Platte in dieser segmentierten Form würde die Ausgangslage darstellen, um mittels "Pneumatic wedge method" eine Schale in Form eines Kugelabschnittes zu errichten. Deutlich zu sehen: der Abstand zwischen den Segmenten ist wesentlich kleiner als bei der Halbkugel.

Die Spaltbreite zwischen den Segmenten ist vergleichsweise klein, was wiederum bedeutet, dass die Aufgabe der Keilpneus wesentlich einfacher wird. Dies ist der wesentlichste Unterschied zur Halbkugel. Je weiter die gekrümmte Fläche von der segmentverbindenden Stelle in Relation entfernt ist, desto größer wird der Spalt zwischen den Segmenten in "flachgedrücktem" Zustand. Der "Wedge" muss nicht dieselbe Flexibilität aufweisen wie bei stärkerer Krümmung. Hier wird wiederum deutlich, weswegen der pneumatische Keil so wichtig ist und stärkere Krümmungen erst ermöglicht.

Abb. 103: So könnte eine einsatzbereite Schale (in Form angenähert an einen Kugelabschnitt) aussehen.



Abb. 104: Draufsicht Platte

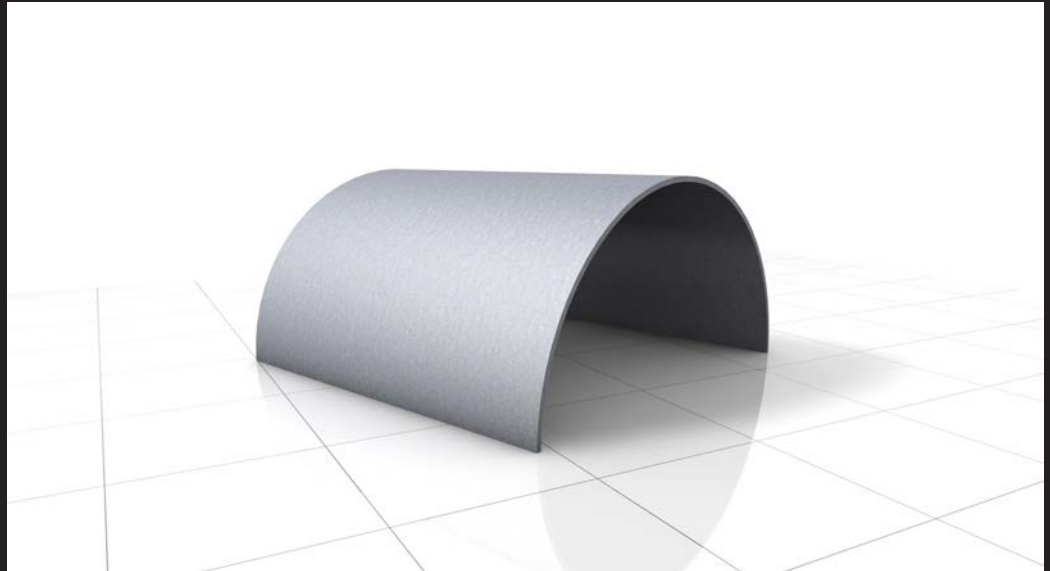


Der Zylinder

Der Zylinder lässt sich im Koordinatensystem wie folgt beschreiben:

Ein Zylinder entsteht durch die Rotation einer konstanten Funktion $f(x) = r$ um die x-Achse.

Abb. 105: Zylinder Geometrie



Der Zylinder muss eigentlich nicht auf seine Tauglichkeit bzgl. der “Pneumatic wedge method” hin untersucht werden, zumal er nur eine eindimensionale Krümmung aufweist und somit keine Keilöffnungen im ebenen Zustand als Platte entstehen. Die Zebradarstellung zeigt durch die parallele Texturierung einen gleichmäßigen Krümmungsverlauf an. Er ist als relativ einfache Geometrie durchaus mittels bereits getesteter Biegeverfahren herstellbar. Anstatt eines ringförmiges Spannsystems könnten hier einfache lineare Spannelemente zwischen den Segmenten angebracht werden, um den Biegevorgang zu unterstützen. Die Segmentierung

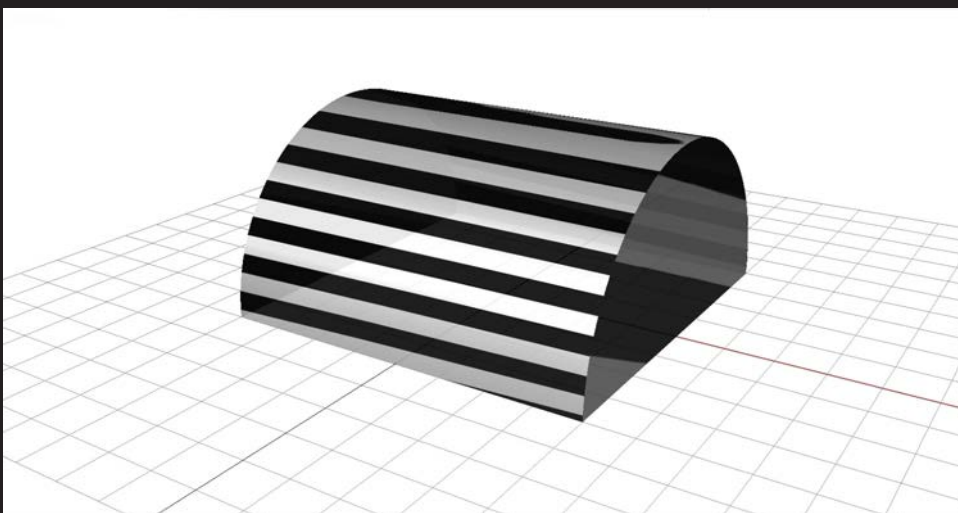


Abb. 106: Zylinder Zebradarstellung;
Krümmungsverhalten

wäre in dem Fall nur notwendig, um einen kontrollierteren Anhebe- bzw. Biegeprozess zu gewährleisten. Die hier gewählte Unterteilung in eine zentrale am Scheitel entlang durchgehende Platte und einzelne an dieser ansetzenden Bogensegmente, hat eher den Zweck, den

Abb. 107: Ausgangsform Zylinder. Theoretisch könnte man ihn auch unsegmentiert "einebnen"



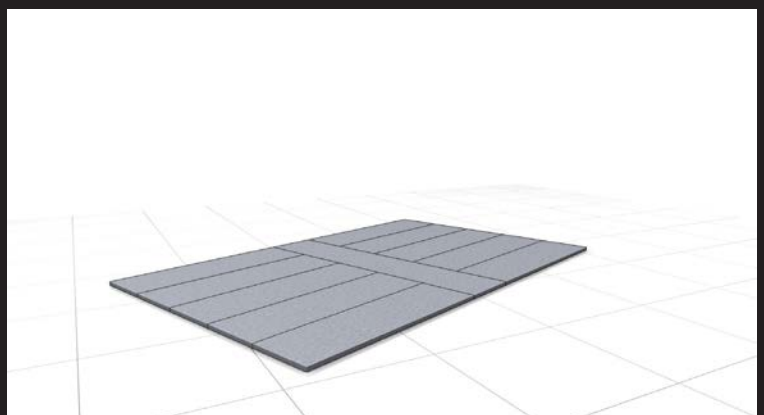
Abb. 108: Eine einzelne große Platte zu biegen würde allerdings aufgrund ihres niemals 100% homogen verteilten Biegemoments relativ unkontrolliert ablaufen. Entsprechend wurde eine Unterteilung in eine "Scheitelplatte" und beidseitig jeweils 5 angehängte Bogensegmente vorgenommen.



Abb. 109: Aufgrund der eindimensionalen Biegung entstehen im Gegensatz zu den vorangegangenen Geometrien keine Keilabstände zwischen den Segmenten.



Abb. 110: Die ebene Platte in dieser segmentierten Form könnte die Ausgangslage darstellen um mittels der getesteten Biegeverfahren (Pneu und linearer Spannelemente) einen Zylinder herzustellen.

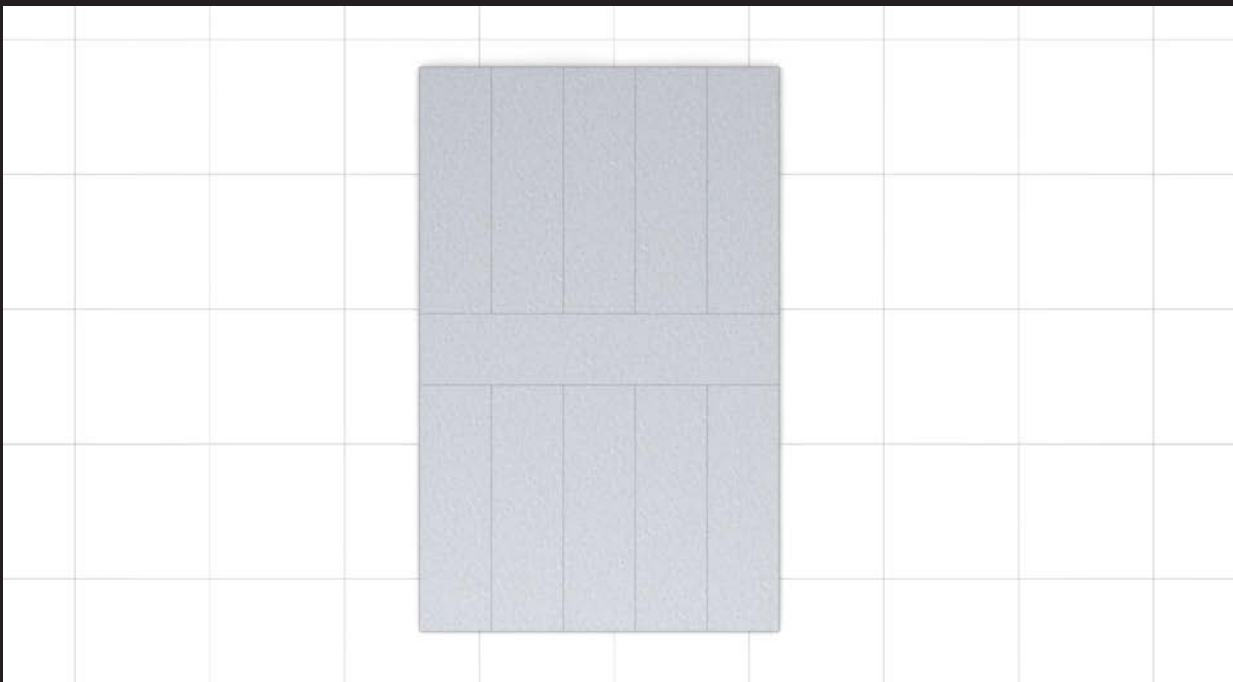


Zylinder so aus einem zusammenhängenden Bauteil erstellen zu können. Zusätzlich ist es aber auch die Absicht im Hinblick auf weitere längliche Formen, einem Unterteilungsprinzip treu zu bleiben. Theoretisch könnte man den Zylinder auch aus einzelnen von Auflager zu Auflager durchgehenden Bögen zusammensetzen, aber schon im nächsten Beispiel wird ersichtlich, warum diese Unterteilung gewählt wurde. Der Zylinder stellt in dieser Untersuchungsreihe mehr einen Übergang und ein Bindeglied zu weiteren möglichen und mittels "Pneu-

Abb. 111: So könnte eine einsatzbereite Schale (in Form angenähert an Zylinder) aussehen.



Abb. 112: Draufsicht Platte



matic wedge method" herstellbaren Formen dar. Würde man ihn bauen, dann wohl eher mittels konventioneller Schalungstechniken, die hier aufgrund seiner eindimensionalen Krümmung vergleichsweise einfach anzuwenden wären.

Zylinder in Kombination mit 2 Halbkugelabschnitten

Dieser Körper stellt eine Kombination aus zwei verschiedenen Grundkörpern dar - einem Zylinder und zwei Kugelabschnitten. Es handelt sich wiederum um einen Rotationskörper, der mittels Funktion (f) rotierend um die x-Achse beschrieben werden kann.

Abb. 113: Zylinder und zwei Halbkugeln



Durch die Kombination zweier verschiedener Körper stellt sich erstmals eine neue Komplexität in der Aufgabe und neue Parameter, die es zu berücksichtigen gilt. Entsprechend der vorangegangenen Ergebnisse, ist zu erwarten, dass im Bereich des Zylinders durch die rein eindimensionale Biegung keine Verzerrungen auftreten werden, während hingegen in den Bereichen der Halbkugeln durch ihre doppelte Krümmung wieder deutliche Verzerrungen in Ringrichtung entstehen. Nach außen hin werden in diesen Bereichen der Spalt bzw. die Keilaussparung zwischen den Segmenten breiter. Der Hebelneu sollte in diesem Fall eine der

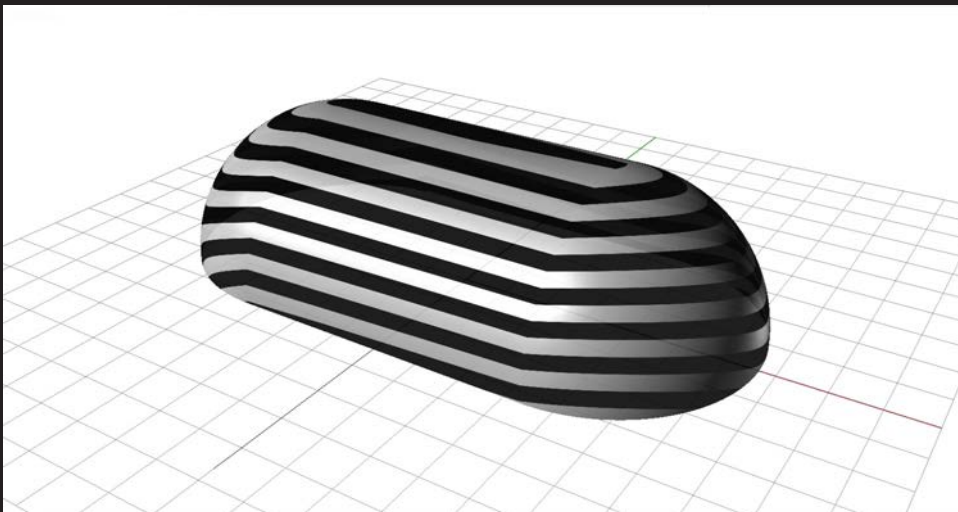


Abb. 114: Zylinder und zwei Halbkugeln - Zebra-darstellung; Krümmungsverhalten

gewünschten Geometrie angenäherte Form bilden. Bei der Anwendung zusätzlicher Vorspannsysteme zur Unterstützung der Transformation, muss beachtet werden, dass es an der Verbindungsstelle der beiden Körper aufgrund der abrupten Krümmungsänderung zu



Abb. 115: Ausgangsform Zylinder mit 2 Halbkugeln, auch vom Unterteilungsprinzip her eine Kombination aus den beiden Grundkörpern



Abb. 116: Am Scheitel entlang eine durchgehende Platte die das zentrale Bindeglied darstellt, und angehängt die Bogensegmente im Zylinderbereich und die keilförmigen Segmente im Halbkugelbereich.



Abb. 117: Auf halbem Wege wird schon deutlich wo die keilförmigen Aussparungen einzuplanen sind.

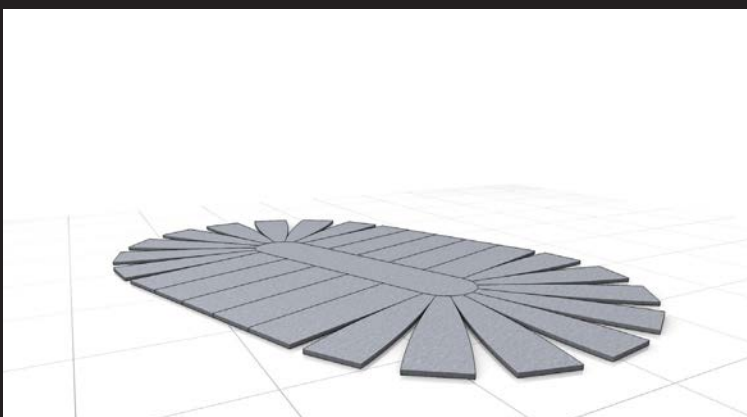


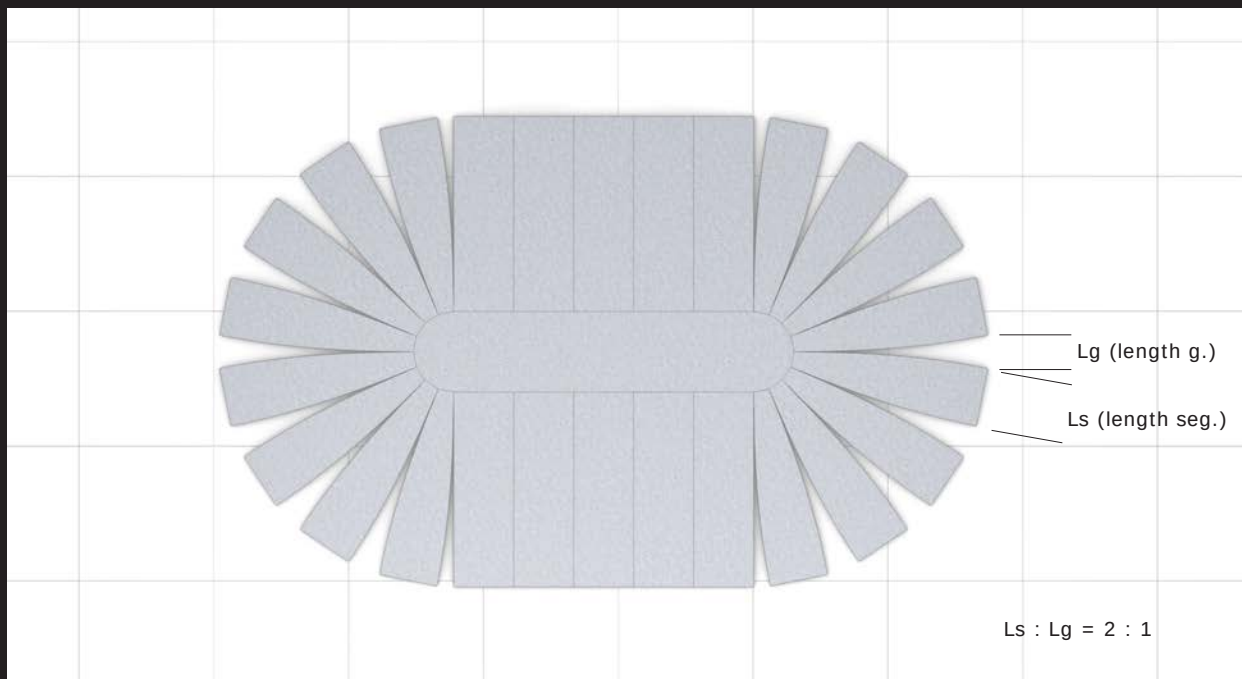
Abb. 118: Eine so segmentierte Platte könnte zu dieser aus zwei Ausgangskörpern kombinierten Form transformiert werden.

Spannungsspitzen in der Struktur kommt. Eventuell müsste man zwei verschiedenen Systeme anwenden. Die linearen im Bereich des Zylinders und die ringförmigen im Bereich der Halbkugeln. Auf der Zebradarstellung kann man gut erkennen, wie der Krümmungsverlauf am Übergang von Zylinder auf Halbkugel eine deutliche Änderung erfährt. Dies bedeutet folglich, dass auch bei der Herstellung des realen Bauwerks diesem Bereich besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden müsste.

Abb. 119: So könnte die einsatzbereite Schale (in Form angenähert an die Kombination Zylinder-Halbkugel) aussehen.



Abb. 120: Draufsicht Platte



Das Halbellipsoid

Ein Ellipsoid kann im Allgemeinen durch folgende Gleichung beschrieben werden (Halbachsen a,b,c; Mittelpunkt im Ursprung; Halbachsen parallel zur x1, x2 bzw. x3-Achse):

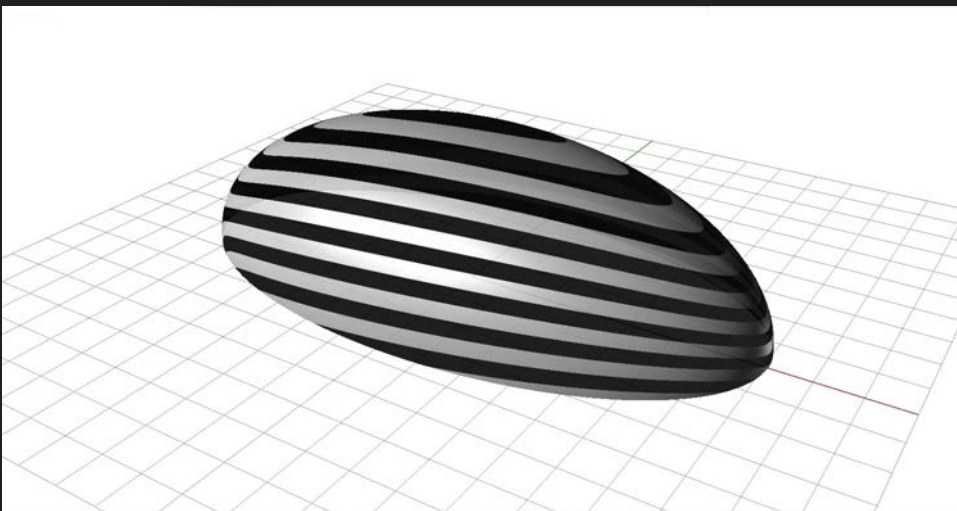
$$\frac{x_1^2}{a^2} + \frac{x_2^2}{b^2} + \frac{x_3^2}{c^2} = 1$$

Abb. 121: Ellipsoid Geometrie



Das Ellipsoid besitzt zwar ebenso wie die Kugel eine stetige positive Gaußsche Krümmung, diese ist aber nicht konstant sondern ändert sich kontinuierlich. Will man nun die “Pneumatic wedge method” anwenden um einen Halbellipsoid zu konstruieren, gilt es dies zu beachten. Die sich stetig ändernde Krümmung des Ellipsoids bedeutet auch eine sich stetig ändernde Krümmung der Spannlinie, die das Anheben des Halbellipsoids unterstützen könnte. Je weiter sich der Ellipsoid von der Kugel entfernt desto größer werden die Unterschiede bei den Umlenkkraften. Bei einem gestreckten Ellipsoid würde dies bedeuten, dass die Umlenk-

Abb. 122: Ellipsoid Zeb radarstellung;
Krümmungsverhalten



kräfte der Spannlitze im Bereich der Spitzen sehr stark wirken würden und auf den langen Seiten kaum. Von daher gilt, je gestreckter der Ellipsoid desto unwahrscheinlicher ist es, zusätzlich ein Spannlitzensystem zum Anheben des Ellisoids verwenden zu können - es sei

Abb. 123: Ausgangsform Ellipsoid. Auch hier gilt, es bedarf einer Segmentierung, um in die Ebene "gedrückt" werden zu können.



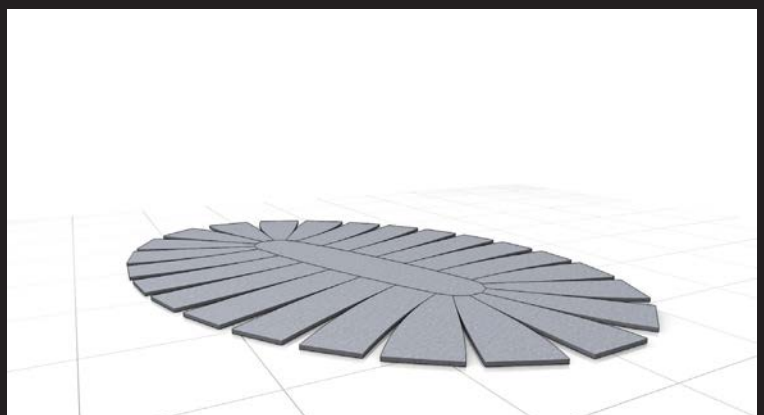
Abb. 124: Die Form des Ellipsoiden bietet an, entlang des Scheitels eine zentrale längliche Verbindungsplatte zu positionieren, entlang derer die entsprechenden Bogensegmente angebracht sind.



Abb. 125: Auf dem Weg in die "Horizontale" wird schon deutlich: die Auslässe an der Längsseite sind deutlich schmaler, als in den Bereichen der Spitze.



Abb. 126: Die ebene Platte in dieser segmentierten Form könnte die Ausgangslage darstellen um mittels "Pneumatic wedge method" einen Ellipsoid herzustellen.



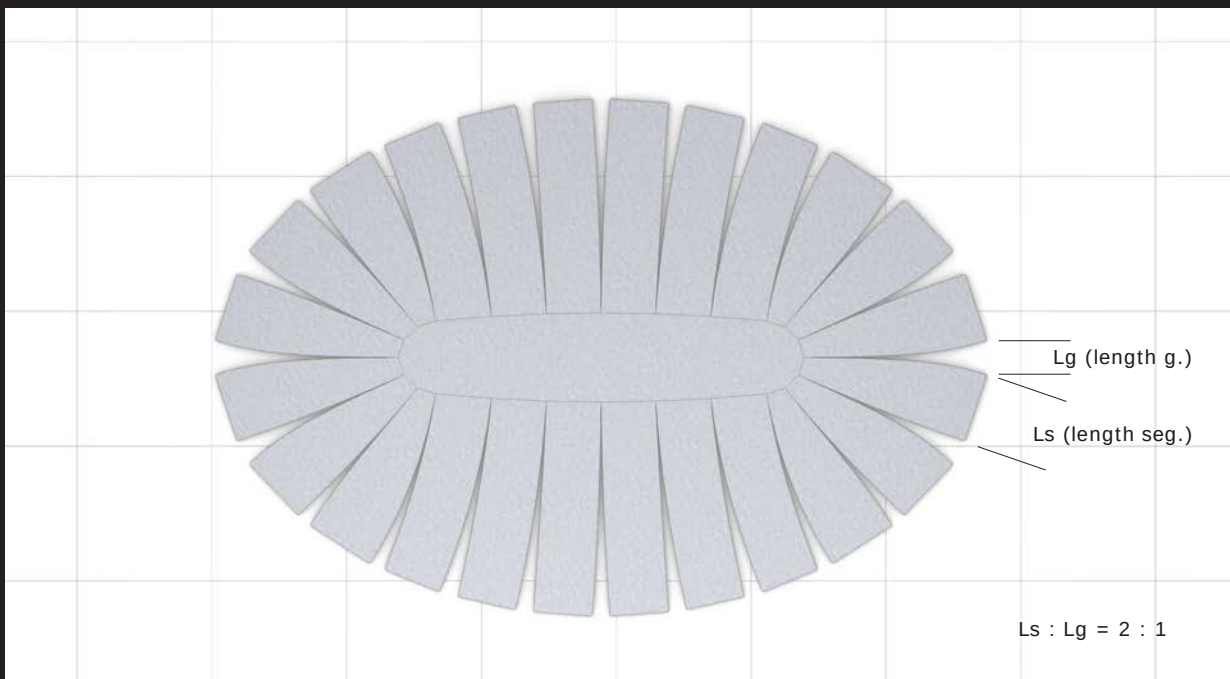
denn, es würde ein System Einsatz finden, mit dem sich die Umlenkkräfte auf jedes Segment gezielt regulieren ließen.

Durch seine Ballon-ähnliche Form ist er allerdings prädestiniert dafür, mittels Hebepneu in Form gebracht zu werden. Ein Pneu, der in die Form des Ellipsoids tendiert ist definitiv herstellbar. Bestenfalls würde der Hebeprozess hauptsächlich durch den Pneu vorangetrieben werden und der Einsatz der Spannlitzen eher im Sinne der Stabilisierung und Regulierung

Abb. 127: So könnte eine einsatzbereite Schale (in Form angenähert an das Ellipsoid) aussehen.



Abb. 128: Draufsicht Platte

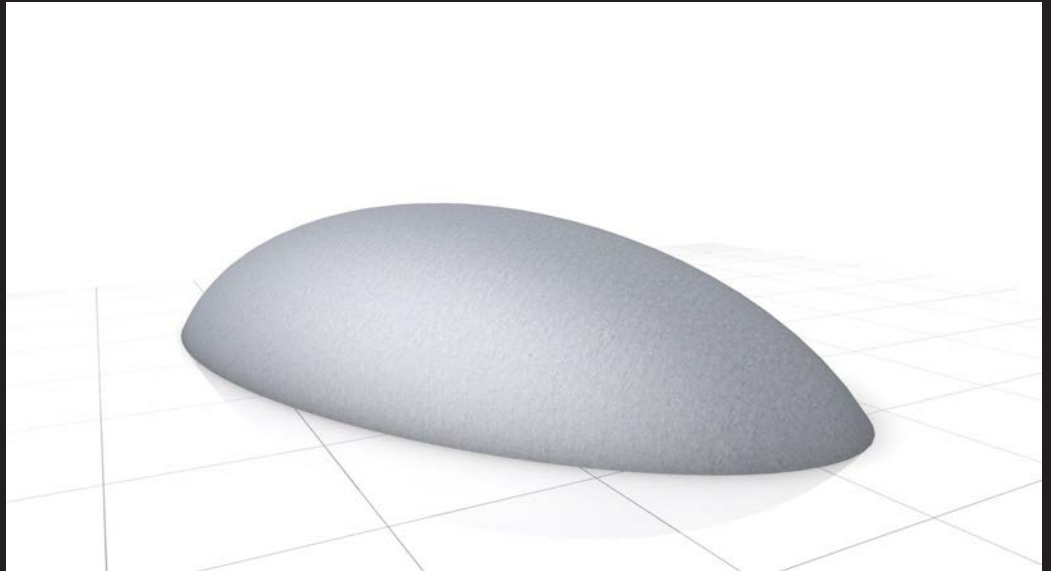


stattfinden. Prinzipiell spricht aber von der Geometrie her nichts dagegen, einen Halbellipsoid mittels “Pneumatic wedge method” herzustellen. Die Form lässt sich in geeigneter Weise segmentieren und die Verzerrungen in der Ebene können durch unterschiedlich große Keilaussparungen ausgeglichen werden. Diese sind im Bereich der Spitze (Lg1) aufgrund der stärkeren Krümmung größer.

Ellipsoidabschnitt

Für den Ellipsoidabschnitt gilt von Geometrie und Berechnung her dasselbe wie für das Ellipsoid bzw. das Halbellipsoid. Im Prinzip handelt es sich auch beim vorhin gezeigten Halbellipsoid um einen Ellipsoidabschnitt.

Abb. 129: Ellipsoidabschnitt



Für den Ellipsoidabschnitt gilt in puncto Unterschied zum Halbellipsoid ähnliches wie beim Unterschied zwischen Halbkugel und Kugelabschnitt. Je niedriger die Höhe des Ellipsoidabschnittes gewählt wird, desto geringer fällt auch die Krümmungsverzerrung aus, die entsteht, wenn man die Schale in die Ebene transformiert. Die Schale fällt flacher aus und geht in wesentlich spitzerem Winkel in die Auflager über. Es treten dort deutlich mehr Horizontalkräfte auf als beim Halbellipsoid, der die entstehenden Druckspannungen in der Schale fast vertikal ins Auflager ableitet. Im Umkehrschluss ist es auch hier so, dass das Anheben der

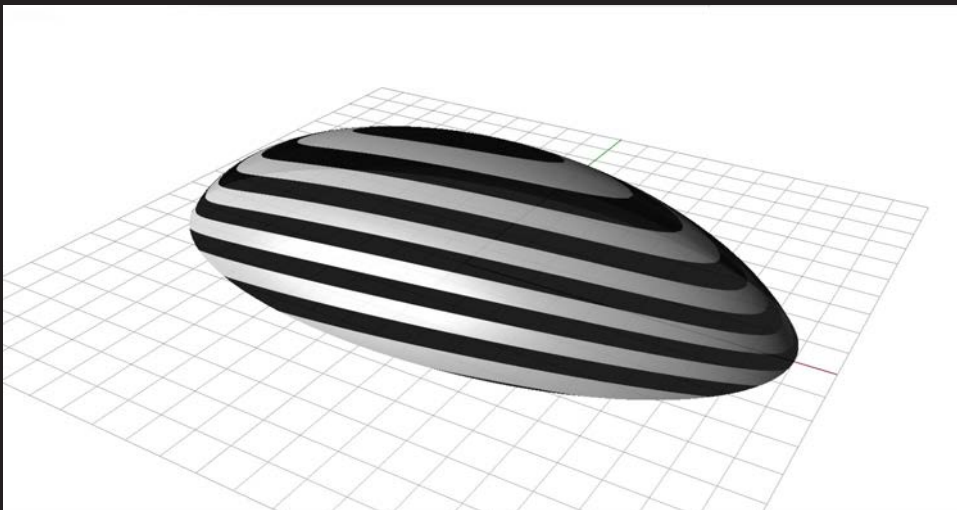


Abb. 130: Ellipsoidabschnitt - Zebra-
darstellung;
Krümmungsverhalten

Platte mittels Pneu relativ problemlos funktionieren sollte. Solange sich das Anheben allein mittels Pneu durchführen lässt und die Spannlitzen nicht zu viel Anhebefunktion übernehmen müssen, steht der Konstruktion einer Schale in Form eines Ellipsoidabschnittes mittels

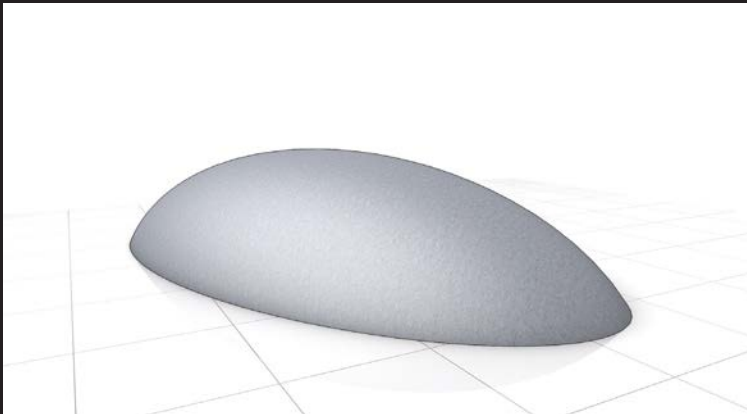


Abb. 131: Ausgangsform Ellipsoidabschnitt, bezüglich Segmentierung gilt hier das gleiche wie für den Halbellipsoid.



Abb. 132: Wiederum zentrale längliche Verbindungsplatte, und auch die gleiche Anzahl an Segmenten.



Abb. 133: Es ist bereits erkennbar, dass durch die geringere Krümmung folglich auch geringere Transformationsverzerrungen ausgeglichen werden müssen.

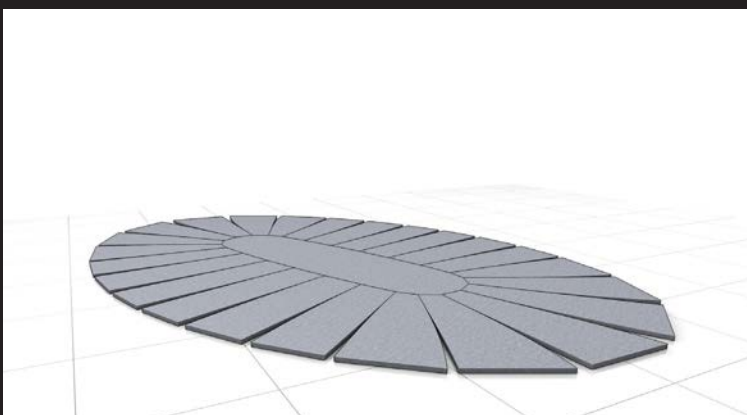


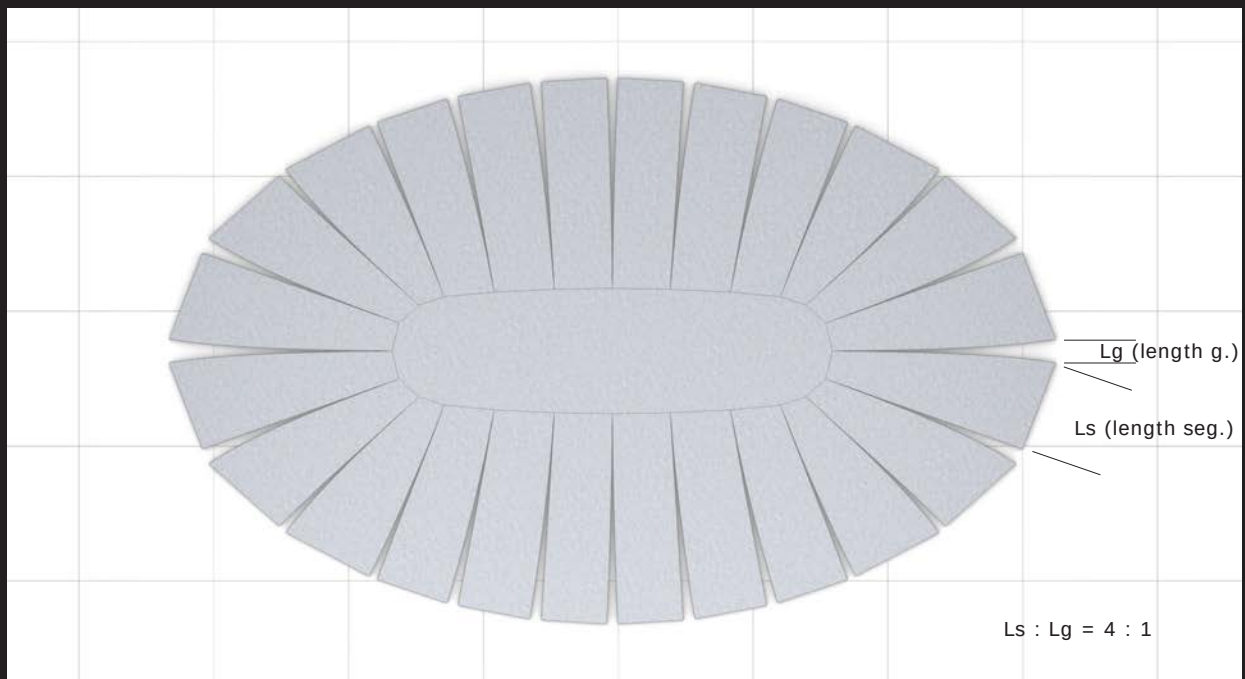
Abb. 134: Die Platte in der Ebene zeigt es noch deutlicher: die keilförmigen Aussparungen fallen hier deutlich kleiner aus, als beim Halbellipsoid.

“Pneumatic wedge method” nichts im Weg. Je flacher die Schale desto mehr kann die Biegung der Segmente durch Pneu und Schwerkraft erzeugt werden. Je steiler die Schale jedoch am Basiskreis ins Auflager übergeht - oder im Fall des Halbellipsoids, vertikal - desto weniger kann die Schwerkraft zur Biegung des Segments beitragen und muss folglich durch Spannsysteme unterstützt werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Errichten einer solchen Form zwar eine Stufe komplexer wäre als bei einem Kugelabschnitt, da jedes

Abb. 135: So könnte die einsatzbereite Schale (in Form angenähert an einen Ellipsoidabschnitt) aussehen.



Abb. 136: Draufsicht Platte



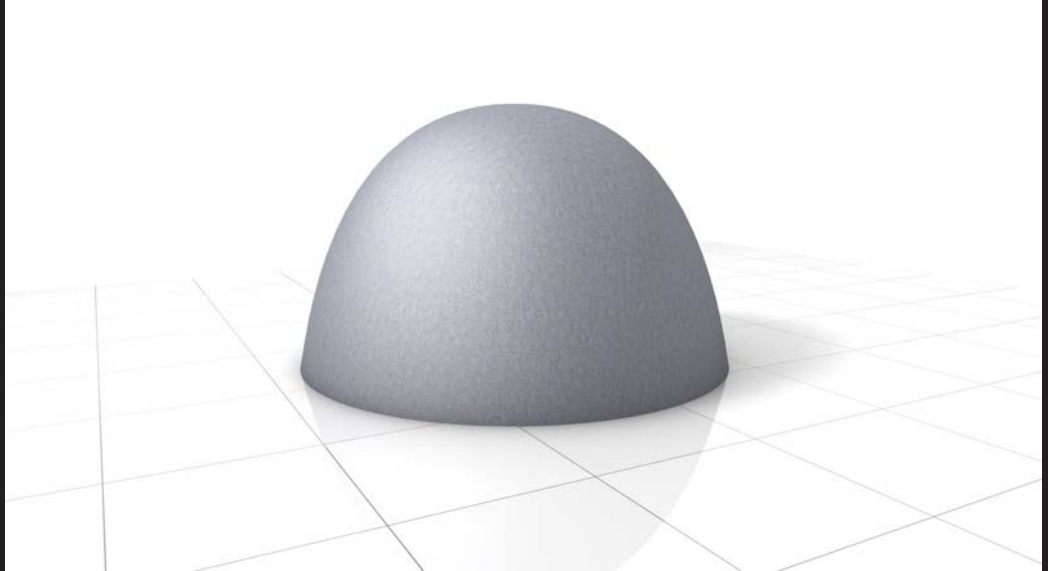
Segment eine eigene Form hat und entsprechend der Planungsaufwand sowie der Schalungsbau aufwendiger wären, aber technisch durchaus realisierbar ist. Durch den sich stetig ändernden Krümmungsverlauf des Ellipsoids wäre man der freien Form auf jeden Fall einen Schritt näher.

Das Paraboloid

Das Paraboloid ist ebenfalls ein Rotationskörper und entsteht wie abgebildet, wenn eine Parabel zentral um die Z-Achse rotiert. Er lässt sich im Allgemeinen wie folgt beschreiben (Scheitel im Ursprung):

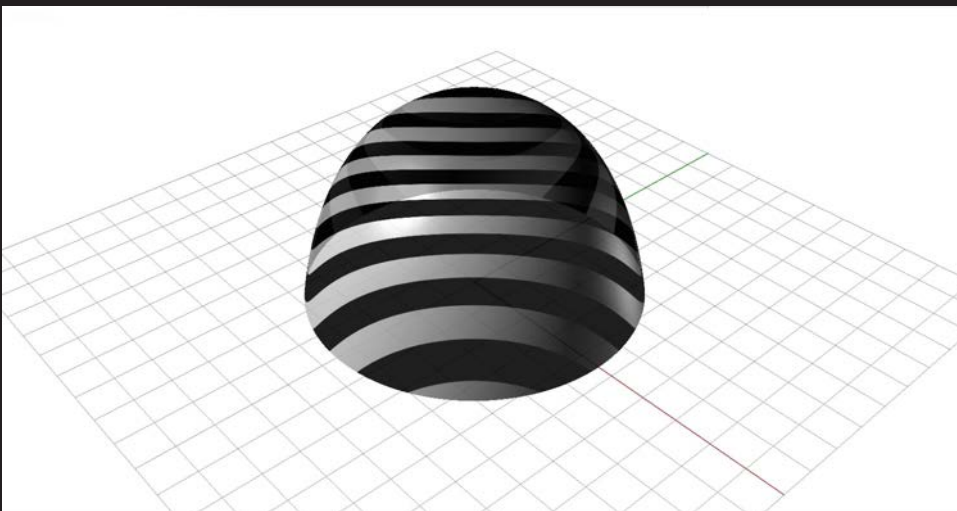
$$\frac{x_1^2}{a^2} \pm \frac{x_2^2}{b^2} - 2z = 1$$

Abb. 137: Paraboloid Geometrie



Der Paraboloidabschnitt kann mit dem Kugelabschnitt verglichen werden. Er ist genauso rotationssymmetrisch und weist ebenfalls eine durchgängig positive Gaußsche Krümmung auf. Diese ist allerdings nicht wie beim Kugelabschnitt gleichbleibend, sondern ändert sich mit zunehmender Entfernung vom Scheitelpunkt stetig. Der Vorteil einer Schale in Form eines Paraboloids wäre im Gegensatz zum Kugelabschnitt die höhere Raumhöhe bzw. auch die größere nutzbare Fläche im Inneren bei gleichem Durchmesser des Basiskreises. Die rotationssymmetrische Form lässt auch hier die Schlussfolgerung zu, dass Planungs- sowie

Abb. 138: Paraboloid Zebradarstellung; Krümmungsverhalten



Schalungsaufwand mit dem des Kugelabschnitts vergleichbar wären. Es kommt auch dieselbe Segmentierung zur Anwendung. Bei der Transformation des Paraboloidabschnitts in eine Platte fällt jedoch auf, dass die Verzerrungen vor allem im Außenbereich deutlich stärker sind.

Abb. 139: Ausgangsform Paraboloid. Die Segmentierung wird nach dem gleichen Schema wie bei Halbkugel bzw. Kugelabschnitt durchgeführt.

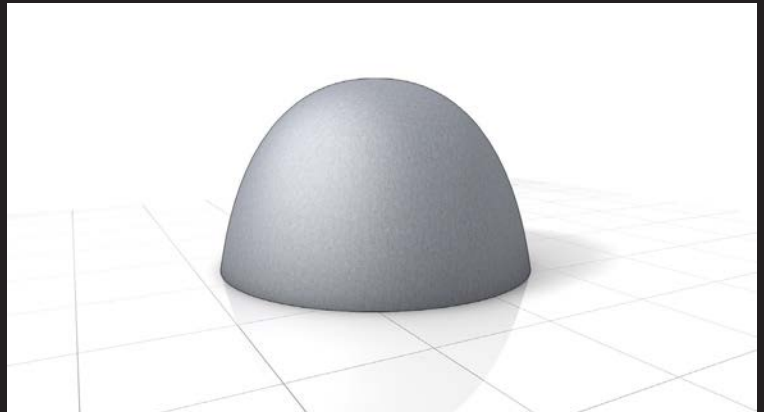


Abb. 140: Am zentralen Scheitelpunkt wird eine verbindende Platte vorgesehen, an der wiederum 16 Segmente andocken.

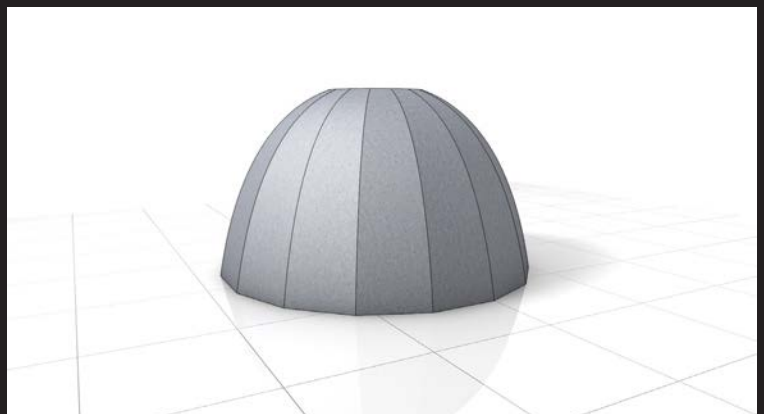
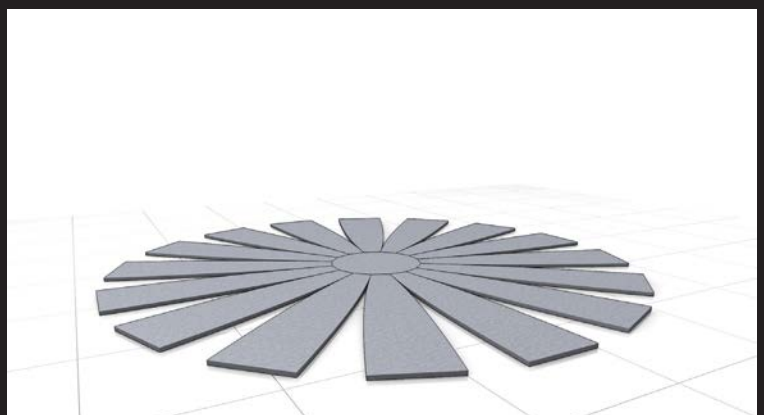


Abb. 141: Man kann hier auf der Abbildung schon deutlich erkennen, dass die keilförmigen Aussparungen relativ groß sein müssen.



Abb. 142: Die deutlicheren Verzerrungen zeigen sich in der Ebene: die Keilstücke müssen vergleichsweise große Lücken schließen.

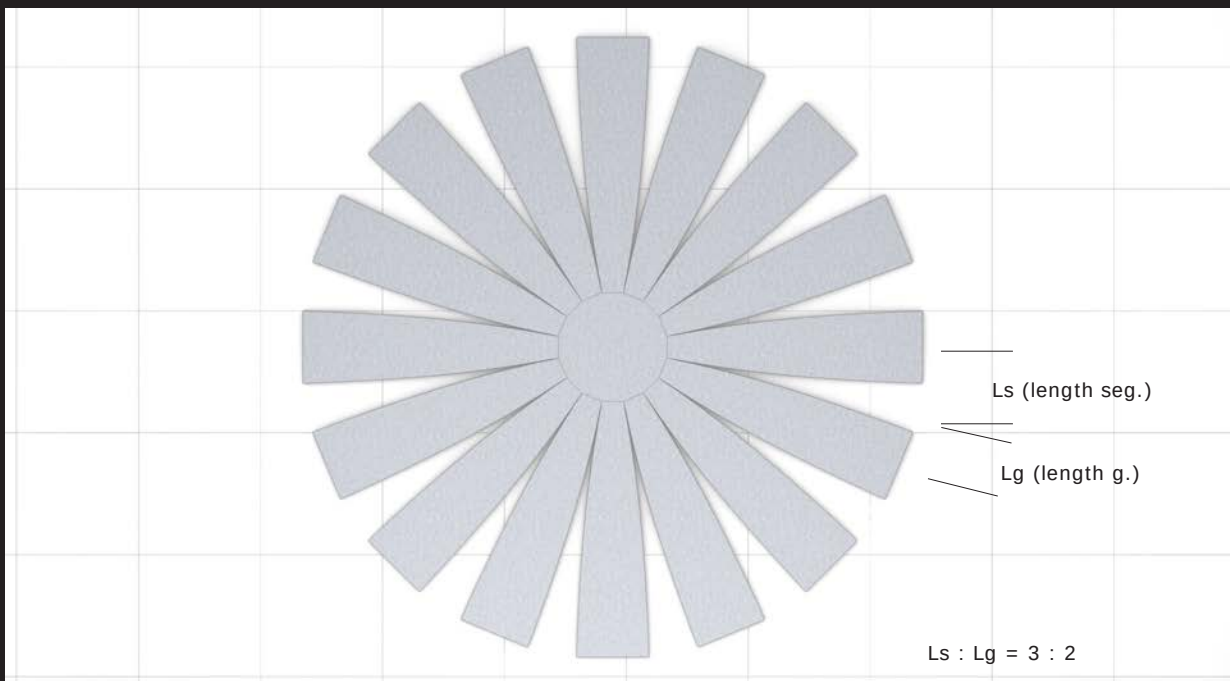


Somit sind die erforderlichen Aussparungskeile in der ebenen Platte deutlich größer. Der Einsatz von Spannritzen, die den Transformationsprozess unterstützen, wäre auf Grund des kreisrunden Grundrisses nicht nur möglich, sondern auch notwendig. Vor allem im späteren Stadium des Prozesses, wenn der äußere Bereich des Segments schon beinahe vertikal steht, kann die erforderliche weitere Biegung nicht mehr durch die Schwerkraft erreicht werden.

Abb. 143: So könnte eine einsatzbereite Schale (in Form angenähert an das Paraboloid) aussehen.



Abb. 144: Draufsicht Platte



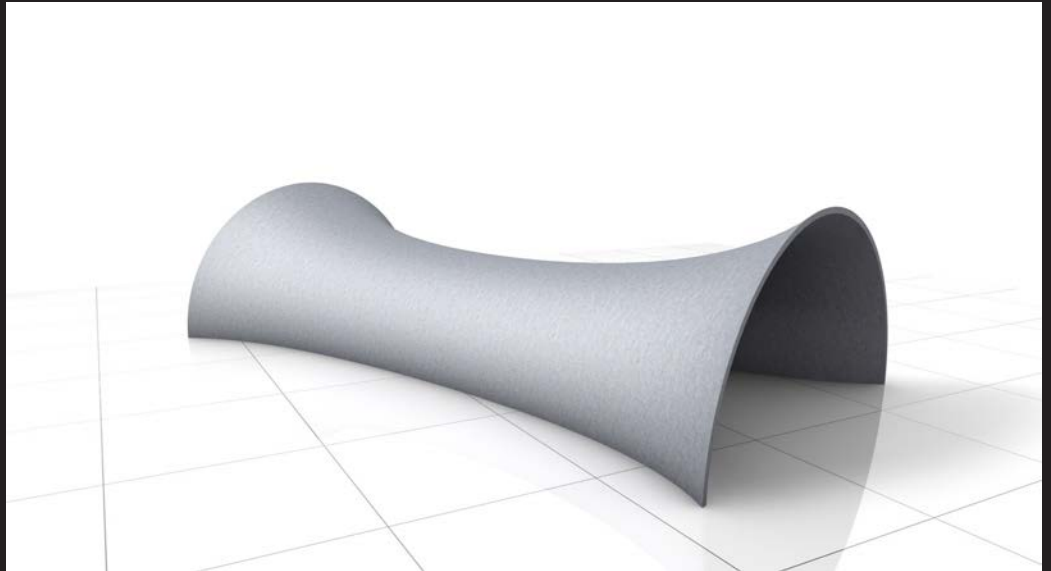
Durch die vergleichsweise großen Aussparungskeile sollte ein gleichmäßiger Ablauf des Anhebeprozesses gewährleistet sein. Einer möglichen Überlappung der Segmente aufgrund ungleicher Krümmung sollte durch steuerbare Keilpneus und evtl. eine temporäre Schienenkonstruktion, die die Segmente Stoß an Stoß führt, entgegengewirkt werden.

Das Hyperboloid

Das Hyperboloid, ebenfalls ein Rotationskörper, bei dem eine Hyperbel um eine Achse rotiert, kann im Allgemeinen mit folgender Gleichung beschrieben werden (Halbachsen a,b,c):

$$\frac{x_1^2}{a^2} + \frac{x_2^2}{b^2} - \frac{x_3^2}{c^2} = 1$$

Abb. 145: Hyperboloidabschnitt



Der Hyperboloidabschnitt unterscheidet sich in einem wesentlichen Punkt von allen bisher untersuchten Geometrien : er weist eine durchgehende negative Gaußsche Krümmung auf und ist deshalb nicht abwickelbar. Bei den vorangegangenen Formen mit positiver Gaußscher Krümmung war es stets der Fall, dass die Verzerrungen, die bei der Transformation in die Ebene auftreten, mittels Auseinanderdriften einzelner Segmente kompensiert werden konnten. Beim Hyperboloid ist dies nun nicht mehr der Fall. Im Gegenteil, würde man versuchen, den Hyperboloidabschnitt flach zu drücken, käme es in der Struktur zu Material-

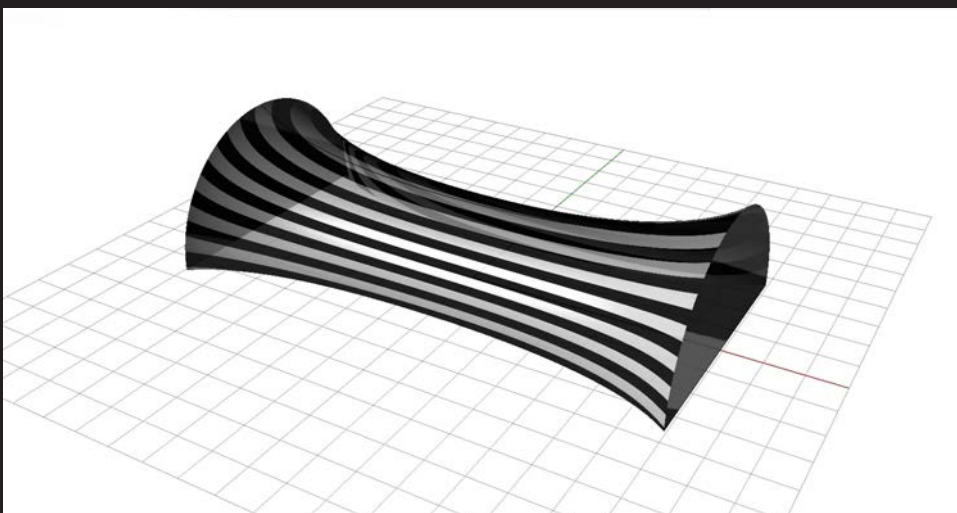


Abb. 146: Hyperboloidabschnitt -
Zebradarstellung;
Krümmungsverhalten

stauchungen. Von daher kann ausgeschlossen werden, dass die “Pneumatic wedge method” in der Form Anwendung finden könnte, um eine Schale in Form eines Hyperboloiden zu bauen. Theoretisch wäre natürlich auch ein Umdrehen des Prinzips möglich. Die Aussparungs-



Abb. 147: Ausgangsform Hyperboloidabschnitt, würde man ihn flach pressen käme es zu Stauchungen.



Abb. 148: Um zeigen was passiert, wird die Segmentierung nach bisherigen Prinzipien durchgeführt. Entlang des Scheitels eine durchgehende Verbindungsplatte, beidseitig in diesem Fall jeweils 10 Segmente.

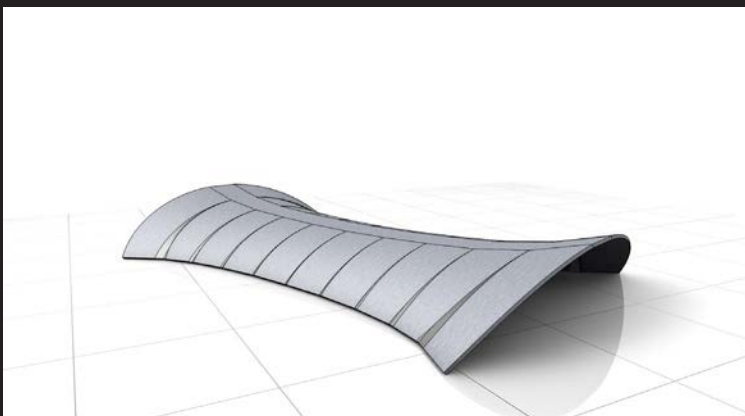


Abb. 149: Die Stauchung zeichnet sich schon ab. Die dunklen Bereiche in der Abbildung zeigen die Bereiche, in denen sich die Segmente überlappen würden bzw. eine Stauchung stattfinden würde.

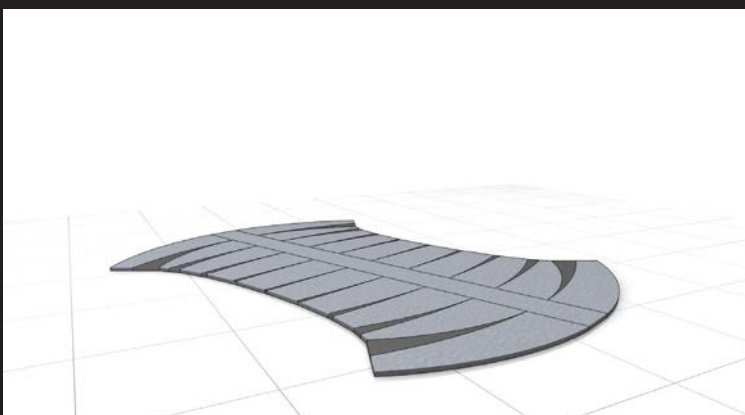


Abb. 150: In der ebenen Platte sieht man ganz deutlich, dass in den äußeren Bereichen die Stauchung massiv wäre

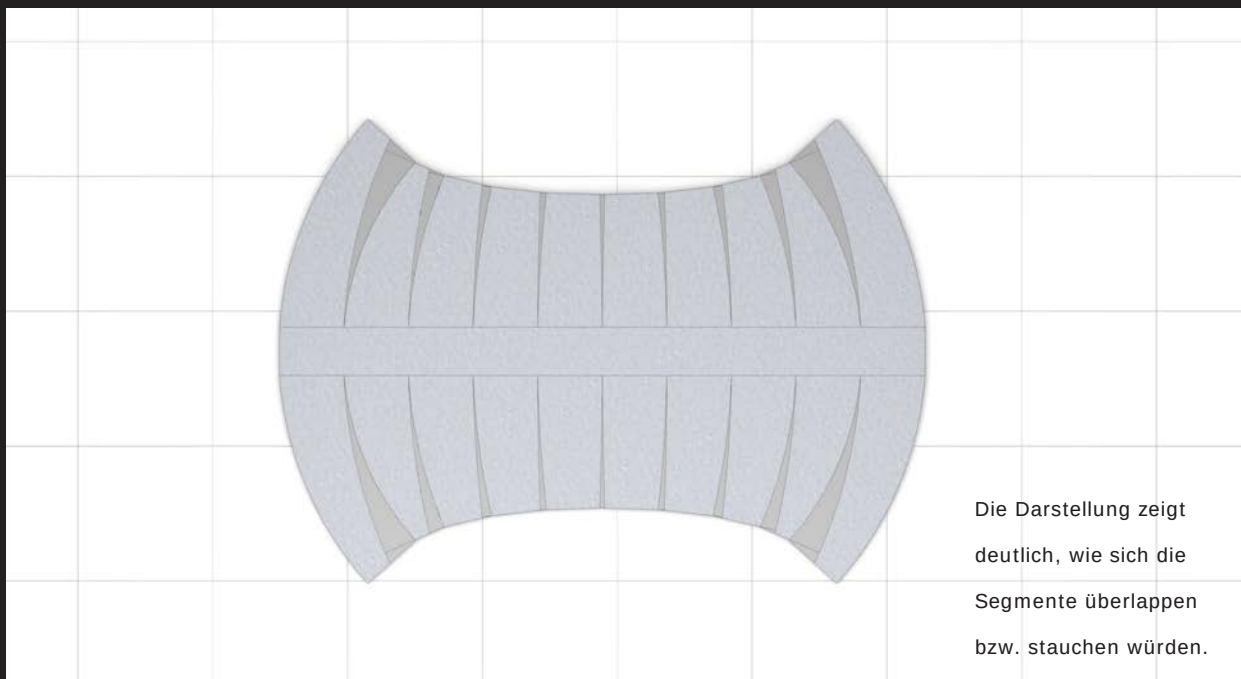
keile die bisher immer in der Ebene die “Transformationsverzerrungen” aufgenommen hatten, müssten nun folglich in der fertigen Struktur auftreten. Der Keilpneu könnte seine Funktion in genau umgekehrter Reihenfolge erfüllen, allerdings wäre das Schalenergebnis eine Rippenstruktur mit Keilaussparungen.

Wollte man dieses Verfahren zur Anwendung bringen, müssten noch einige Problemstellungen gelöst werden. Durch die auf zwei Seiten offene Form des Hyperboloidabschnitts

Abb. 151: Eine Schale könnte nur als Rippenstruktur erstellt werden. Die dunklen Füllkeile würden in der Ebene auf Null gestaucht



Abb. 152: Draufsicht Platte



Die Darstellung zeigt deutlich, wie sich die Segmente überlappen bzw. stauchen würden.

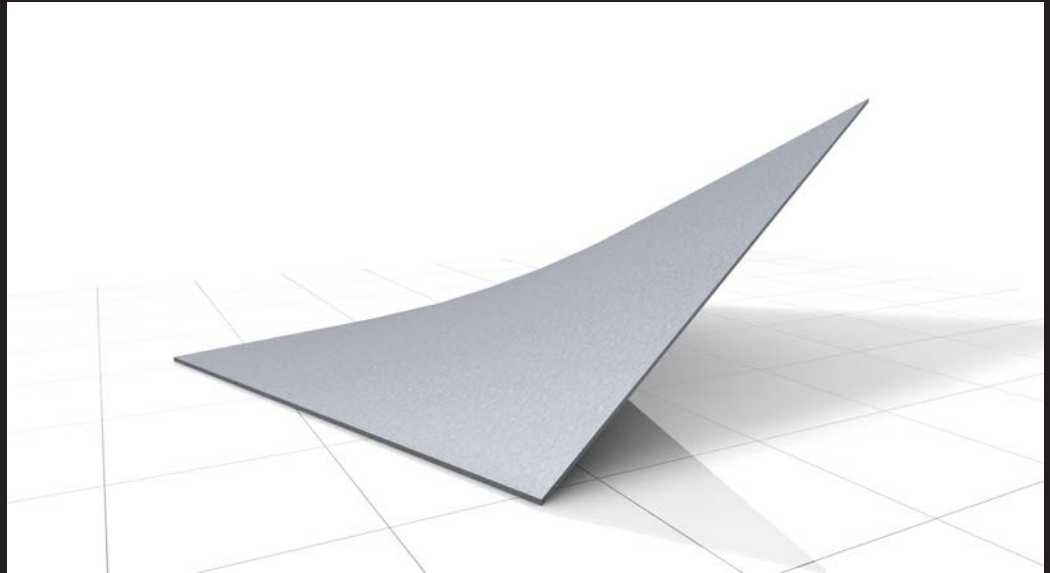
wäre es schwierig, ein entsprechendes Hebepneu einzusetzen. Auch die Verwendung von umlaufenden Spannlitzen die den Biege- und Anhebeprozess mit bewirken, könnte nicht wie bisher geschehen. Man müsste an bestimmten Punkten mehrere lineare Spannglieder anbringen. Kurzum, alles spekulativ aber eventuell in Zukunft für andere Verfahren denkbar. Als nicht abwickelbare Form ist der Hyperboloid vorerst nicht geeignet, um mittels “Pneumatic wedge method” konstruiert zu werden.

Hyperbolisches Paraboloid

Ein Hyperbolisches Paraboloid kurz HP-Fläche, ist in Normalaufstellung mittels folgender Gleichung beschrieben werden:

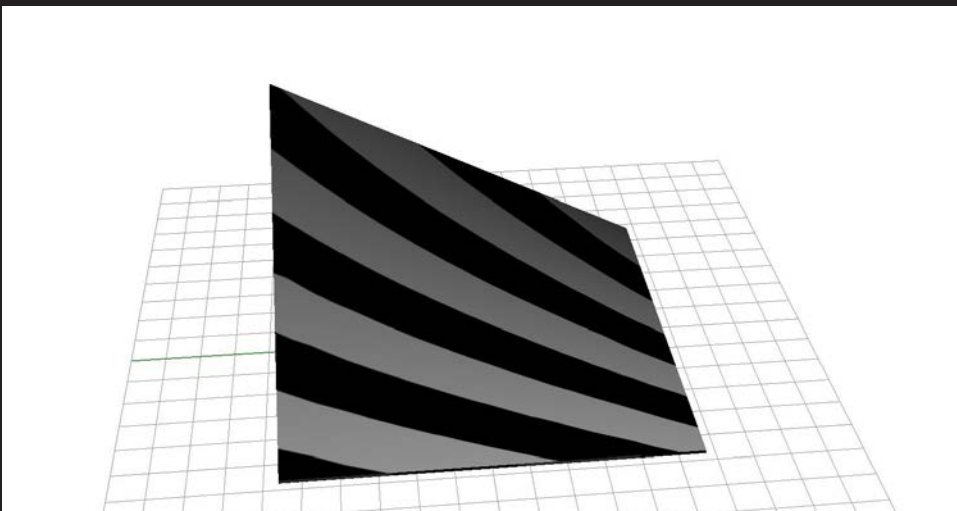
$$x^2/a^2 - y^2/b^2 + z = 0$$

Abb. 153: Hyperbolischer
Paraboloid Geometrie



Die HP-Fläche ist eine sogenannte Regelfläche, was bedeutet, dass sie sich aus Geraden zusammensetzen lässt. Sie weist eine durchgängige negative Gaußsche Krümmung auf und lässt sich somit nicht in die Ebene abwickeln. In diesen Eigenschaften ist sie dem Hyperboloiden ähnlich. Für die Untersuchung, ob das Konstruieren einer HP-Fläche mittels "Pneumatic wedge method" möglich wäre, lassen sich im Wesentlichen die gleichen Schlüsse ziehen, wie beim Hyperboloidabschnitt. Durch die negative Gaußsche Krümmung würde es bei einem Versuch den Hyperbolischen Paraboloid in die Ebene zu drücken, ebenfalls zu Stauchungen

Abb. 154: HP-Fläche Zebradarstellung;
Krümmungsverhalten



führen. Je stärker die Krümmung der Fläche ausfällt, desto massiver würden auch die Stauungen bei einer Transformation in die Ebene sein. Zur Veranschaulichung wurde auch hier eine Segmentierung durchgeführt. Als verbindendes Element wurde die in der Abbildung

Abb. 155: Ausgangsform Hyperbolischer Paraboloid. Die erste Fläche im Vergleich mit vierseitiger linearer Begrenzung erfordert auch eine neue Art der Segmentierung

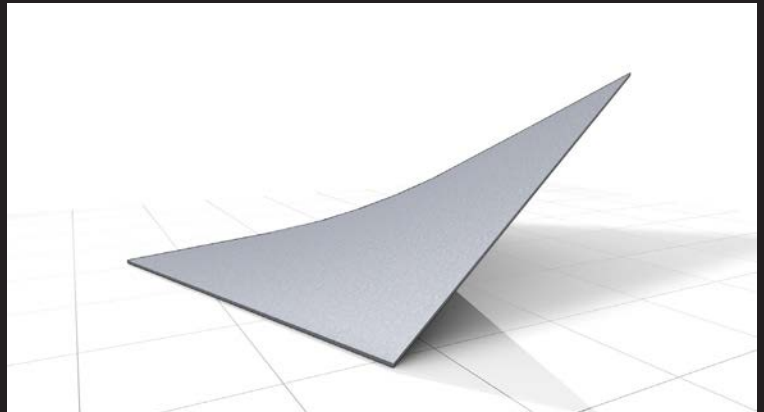


Abb. 156: Die erhöhte Spitze wird das verbindende Element, daran sind 8 Streifensegmente angebracht

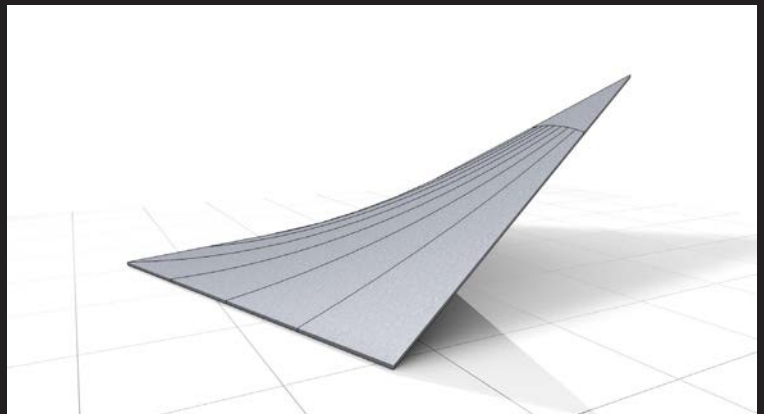


Abb. 157: Auf dem Weg in die Ebene zeigen sich in der Abbildung bereits die Stauchungsbereiche

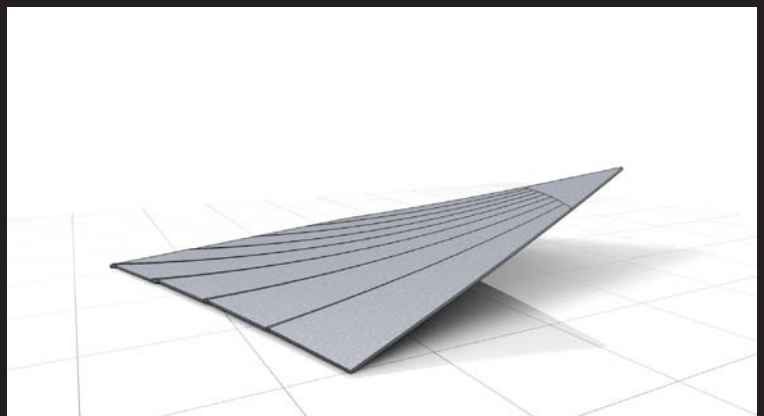
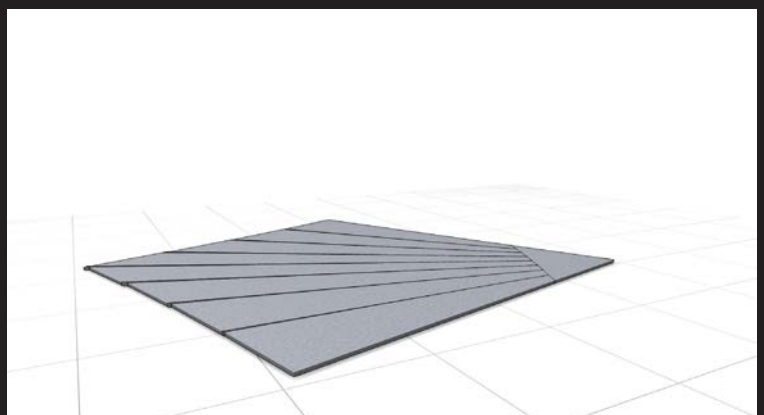


Abb. 158: Da hier eine HP-Fläche mit nicht all zu starker Krümmung gewählt wurde, fallen auch die gestauchten Bereiche in der Ebene vergleichsweise klein aus.



angehobene Spitze ausgewählt. Ein Anheben dieser Spitze aus der Ebene würde die an ihr befestigten Enden der Streifensegmente ebenfalls hochziehen und könnte so die Biegung ebendieser mitbewirken. Wie beim Hyperboloiden könnte auch hier theoretisch das Prinzip der “Pneumatic wedge method” umgedreht werden und die Stauchungsbereiche aus elastischem Material bzw. Keilpneus ausgeführt werden. Diese wären in ebenem Zustand der Struktur auf ein Minimum gestaucht und müssten im Zuge des Anhebeprozesses expandieren. Das Er-

Abb. 159: So könnte eine einsatzbereite Schale (in Form angenähert an den Hyperbolischen Paraboloid) aussehen.

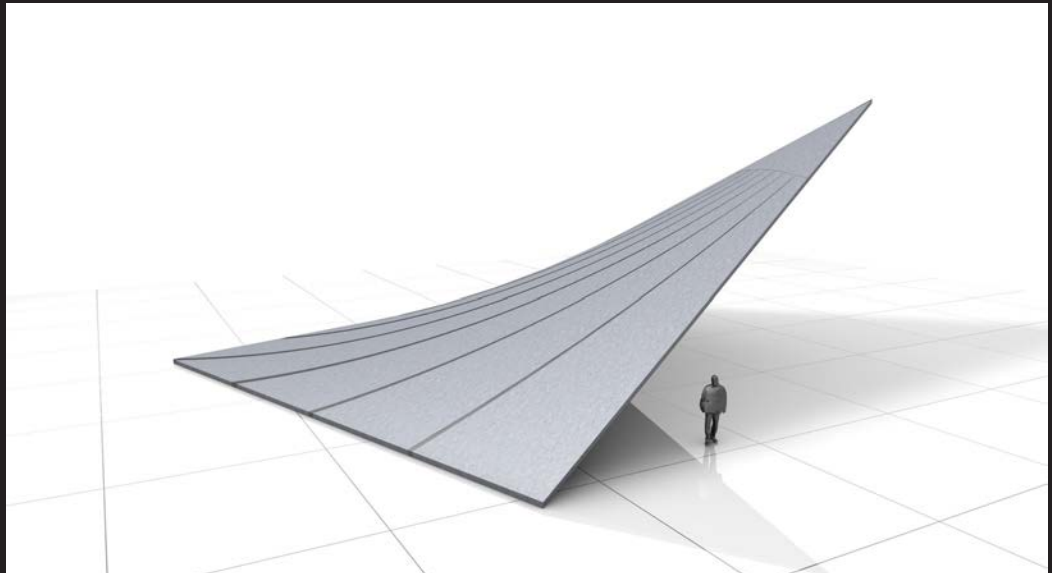
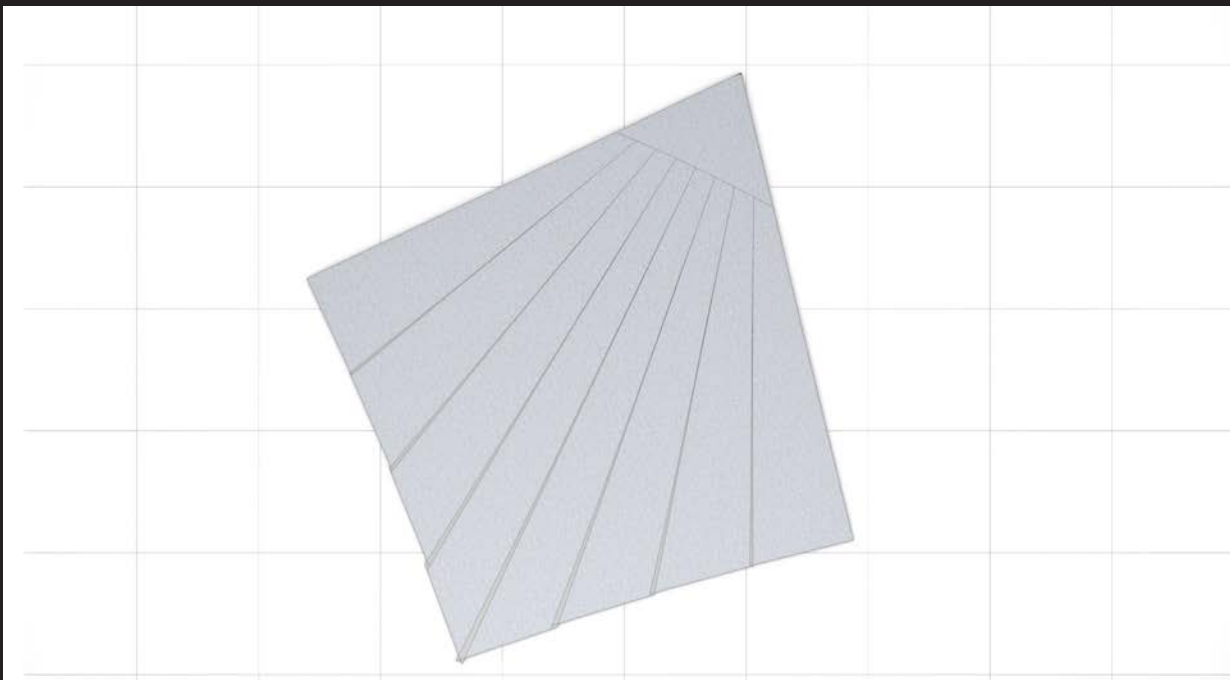


Abb. 160: Draufsicht Platte



gebnis wäre auch hier eine Art Rippenschale, deren Zwischenbereiche ausgefüllt werden könnten. Was den Einsatz von Spannlitzen zur Unterstützung des Biegeprozesses betrifft, müssten natürlich auch hier “strategisch” positionierte lineare Spannelemente zum Einsatz kommen.

Mögliche Varianten der getesteten Formen

Die Untersuchung der analytisch beschreibbaren Grundformen zeigt, in welche Richtung im Bezug auf Form und Krümmung mit der "Pneumatic wedge method" gegangen werden kann und offenbart aber auch die Eigenschaften einer Form, wie zum Beispiel eine negative Gaußsche Krümmung oder eine Gegenkrümmung, die den Einsatz dieses Verfahrens nach momentanem Stand nicht erlauben. Um aber weitere theoretisch mögliche Einsatzbereiche der "Pneumatic wedge method" zu erkunden, wird auch in Richtung freie Formen weiter getestet. Auf Basis der bisher untersuchten Geometrien können durch Variation oder Kombination der einzelnen Formen, genauso wie durch Einschnitte und Verzerrungen verschiedener Grundformen, wieder völlig neue Gesamtformen entstehen. Die Möglichkeiten der verschiedenen Variationen bzw. Kombinationen sind unendlich, insofern sollen die folgenden Beispiele dazu dienen, eine Übersicht zu schaffen, wohin es gehen könnte.

Anhand der folgenden Beispiele, in denen Abwandlungen von den drei Grundformen Kugelabschnitt, Zylinder und Ellipsoidabschnitt dargestellt werden, soll in mehreren Schritten verdeutlicht werden, welche Formenvielfalt prinzipiell möglich wäre. Es sind nur kleine Änderungen, wie zum Beispiel ein Verschieben des Scheitelpunkts bzw. der Scheitellinie aus dem Zentrum oder eine Variation des Basiskreises oder einer Erzeugenden Geraden, die schon große Wirkung zeigen können.

Beispiel Kugelabschnitt:

Abb. 161: Ausgangsform (segmentiert)



Abb. 162: Verschiebung Scheitelpunkt

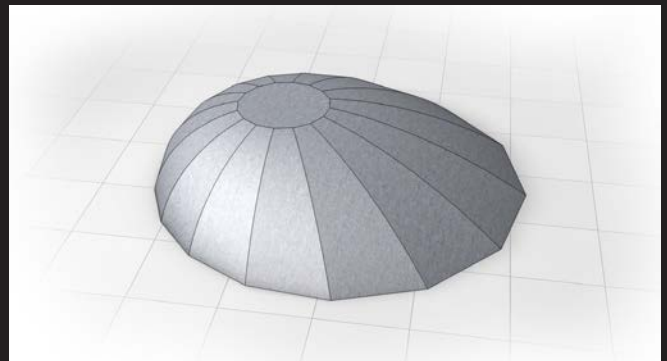


Abb. 163: Änderung Basiskreis



Abb. 164: Änderung Scheitelpunkt und Basiskreis

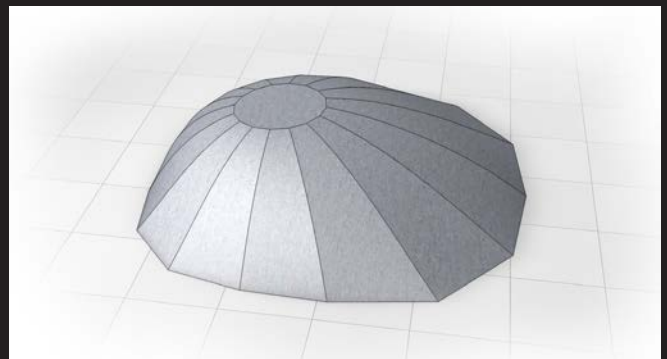
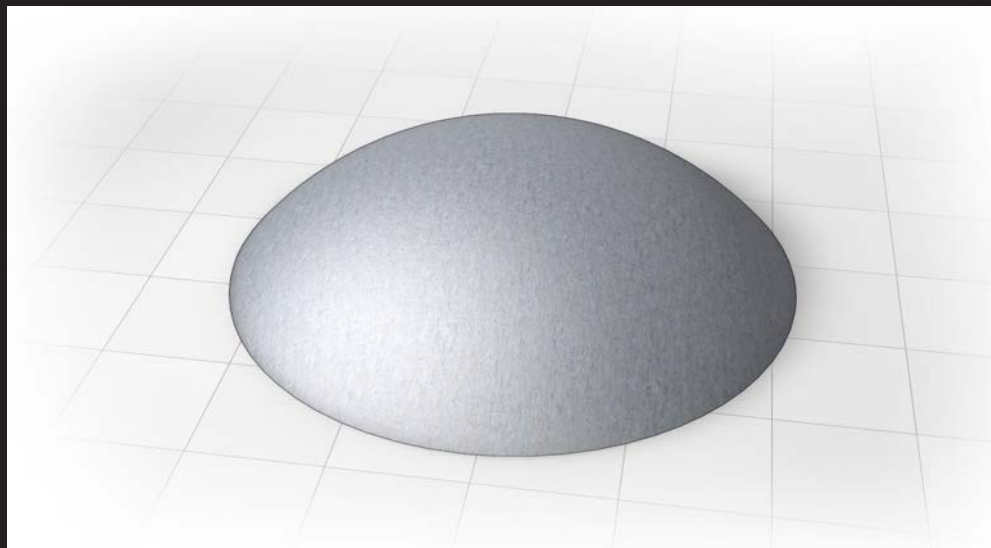


Abb. 165: Ausgangsform Kugelabschnitt, für die Vergleichbarkeit mit den einzelnen Varianten werden auch hier wiederum Segmentierung und Abwicklung dargestellt.



Draufsicht

Seitenansicht

Vorderansicht

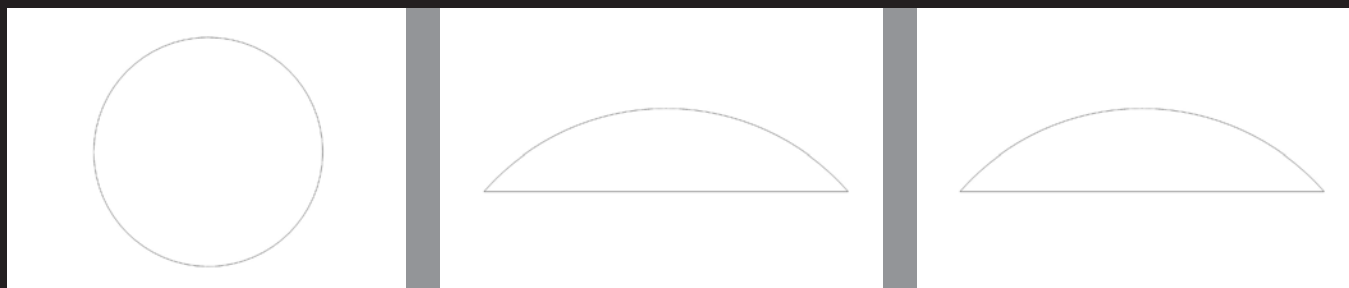
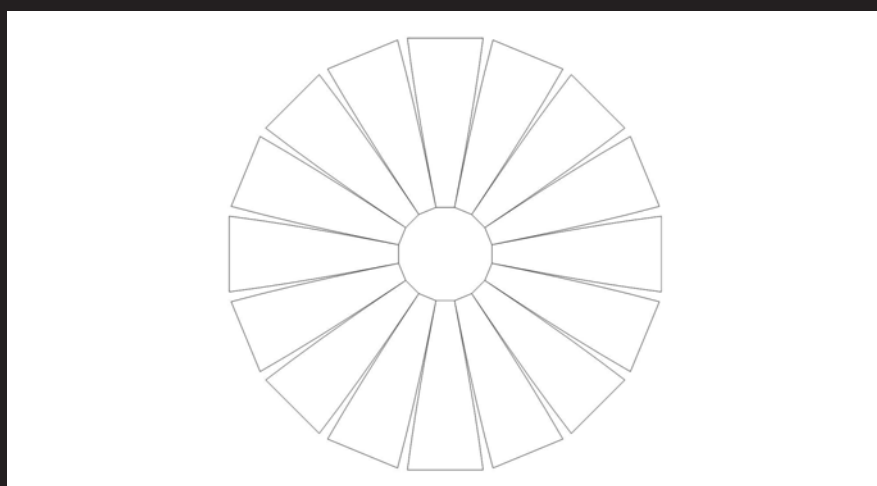
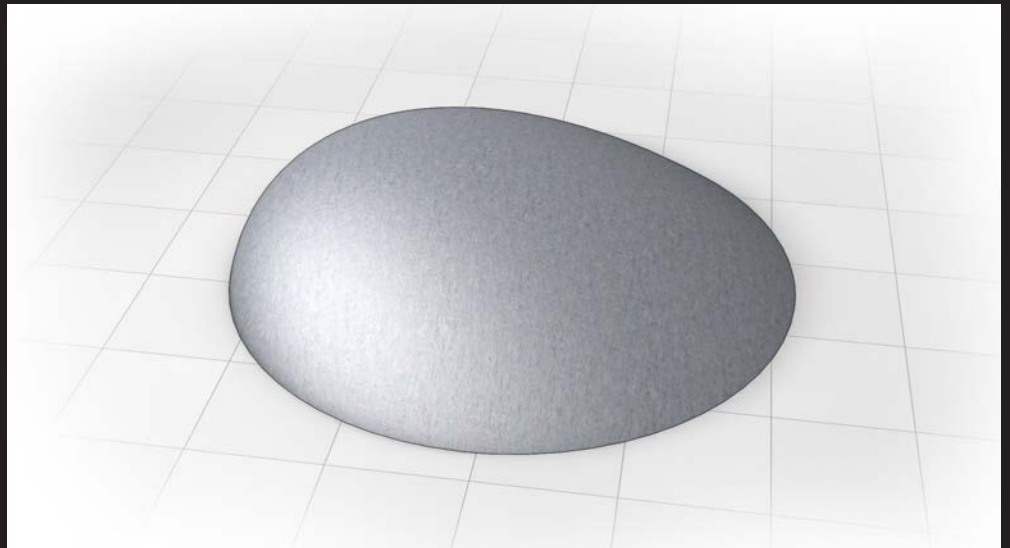


Abb. 166,167 und 168: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Abb. 169: Neue Form durch Manipulation des Kugelabschnitts; die Variante zeigt wie sich der Kugelabschnitt verhält, wenn man den Scheitelpunkt aus dem Zentrum zieht. Auch der neue Körper hat eine durchgängig positive Gaußsche Krümmung, die allerdings nicht mehr an gleichbleibend ist, sondern sich an jedem Punkt ändert.



Draufsicht

Seitenansicht

Vorderansicht

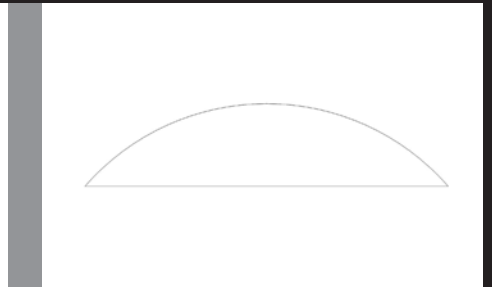
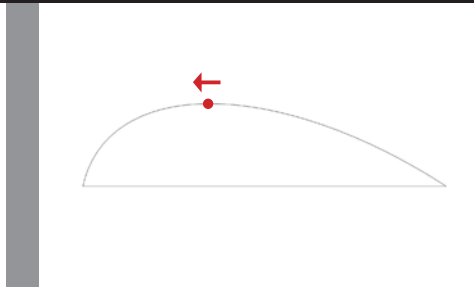
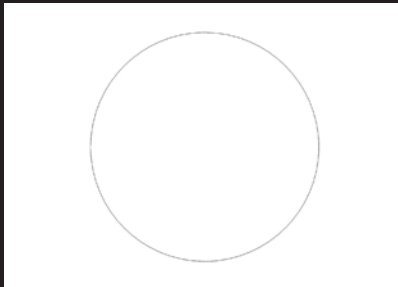
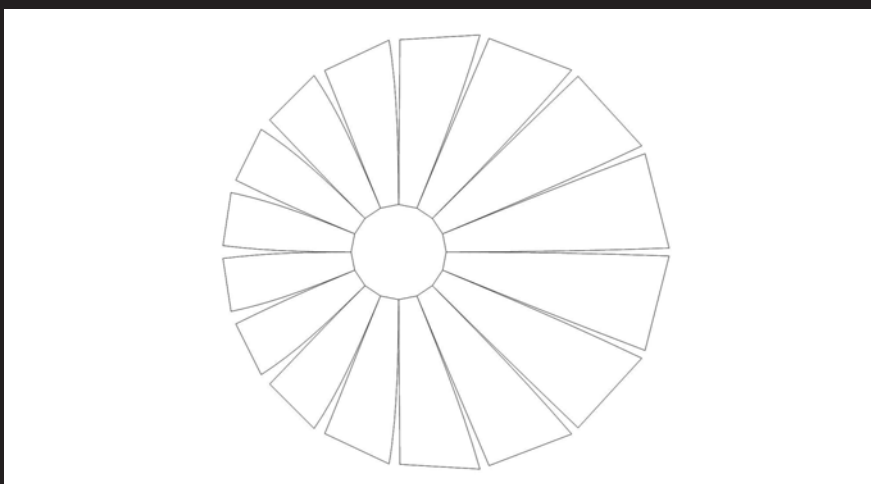
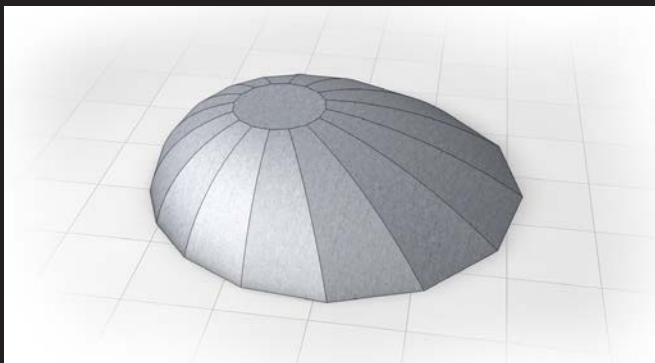
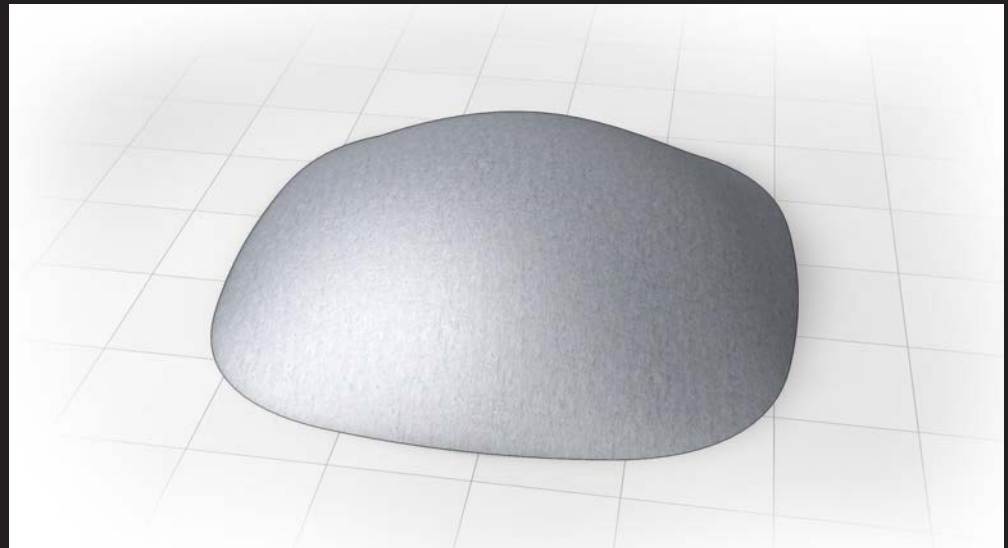


Abb. 170,171 und 172: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Abb. 173: Änderung des Basiskreises, im Beispiel angenähert an ein Quadrat. Der Basiskreis kann in unzählige Richtungen verzerrt werden - Dreieck, Rechteck, Freiform etc. - entsprechend groß die mögliche Formenvielfalt



Draufsicht

Seitenansicht

Vorderansicht

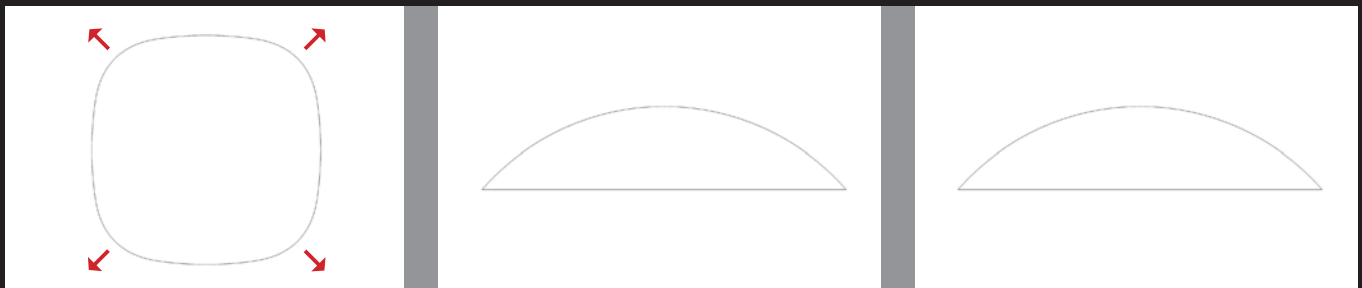
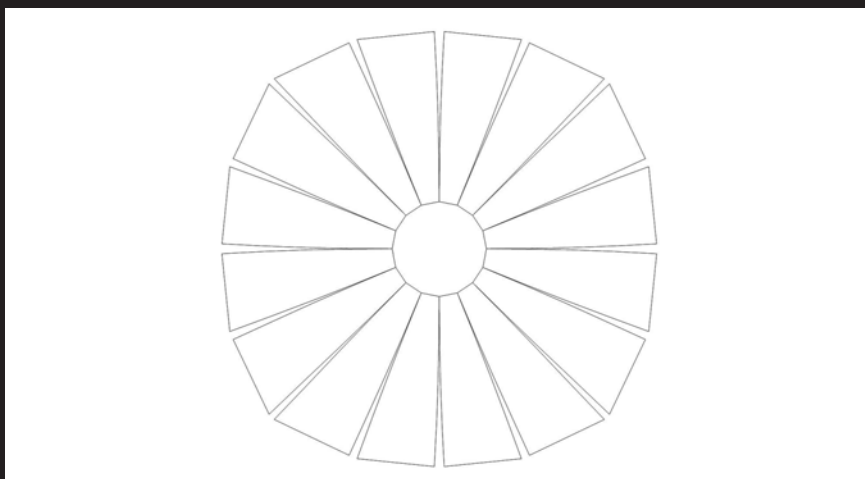
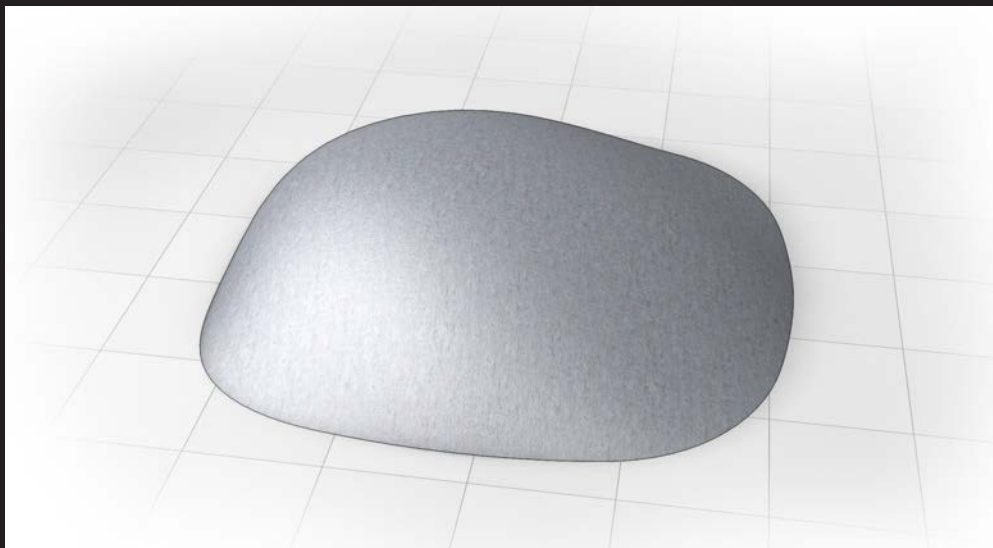


Abb. 174, 175 und 176: Segmentierung und Abwicklung

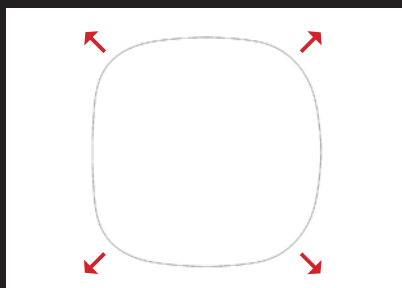


Draufsicht Abwicklung

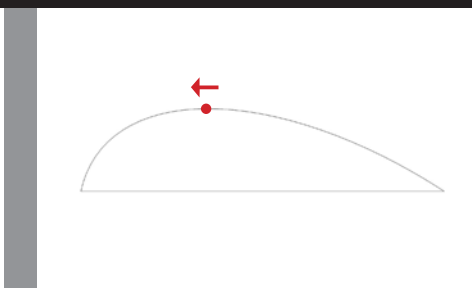
Abb. 177: Kombination zweier Manipulationen: Änderung des Basiskreises sowie Verschieben des Scheitelpunktes



Draufsicht



Seitenansicht



Vorderansicht

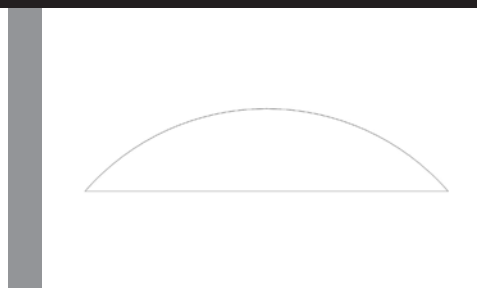
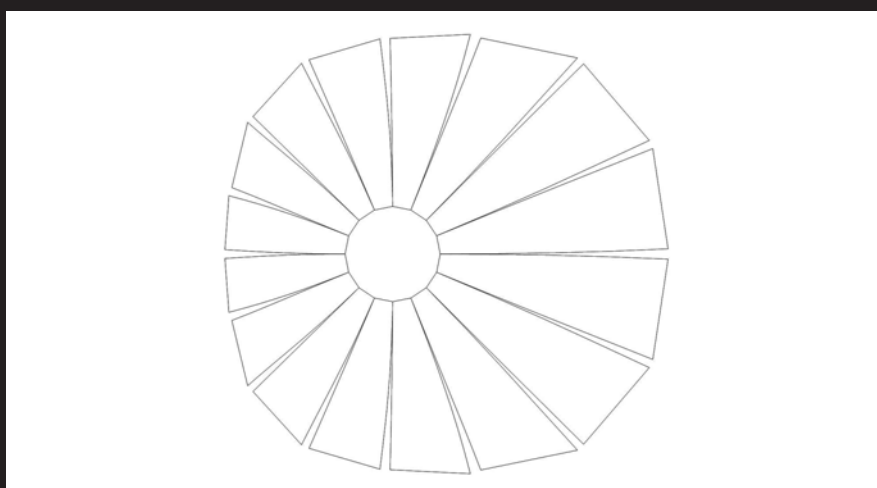


Abb. 178, 179 und 180: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Beispiel Zylinder:

Bei der Analyse des Zylinders stellte sich heraus, dass bei der Konstruktion einer Schale in Form eines Zylinders der Einsatz der “Pneumatic wedge method” nicht erforderlich bzw. zielführend wäre. Aufgrund der durchgängig eindimensionalen Krümmung entstehen bei der Transformation keine Verzerrungen. Entsprechend wären auch in der ebenen Ausgangsplatte keine keilförmigen Aussparungen notwendig, die den Einsatz der “Pneumatic wedges” erforderlich machen würden. Allerdings wird mit folgenden Beispielen gezeigt, dass durch Manipulieren des Zylinders freie Formen entstehen, für deren Konstruktion ein Einsatz der “Pneumatic wedge method” durchaus Sinn machen könnte. Betrachtet man den Zylinderabschnitt als Fläche, die durch eine Kurve (Halbkreis oder Bogen) sowie zwei Geraden erzeugt wird, so entstehen auch hier vielfältige Möglichkeiten, die Erzeugenden zu verändern und somit die gesamte Form zu beeinflussen.

Abb. 181: Ausgangsform Zylinderabschnitt (segmentiert)

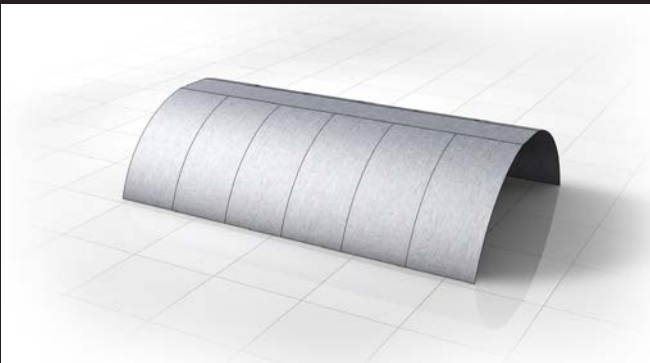


Abb. 182: Änderung Erzeugende Kurve

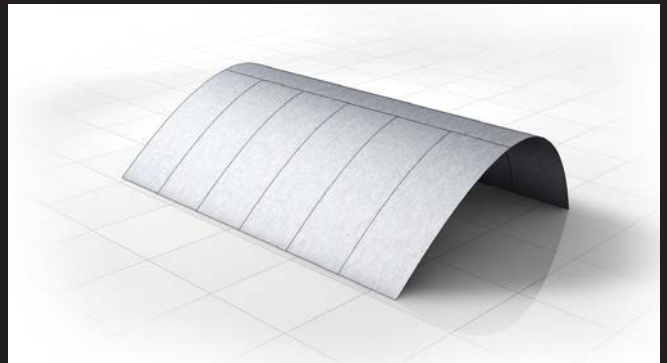


Abb. 183: Rotation erzeugende Gerade



Abb. 184: Ändern beider Erzeugenden

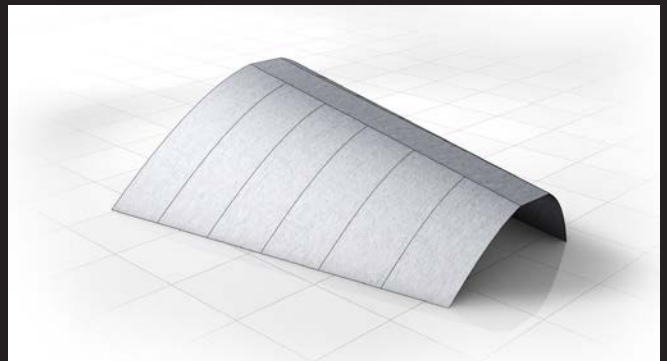
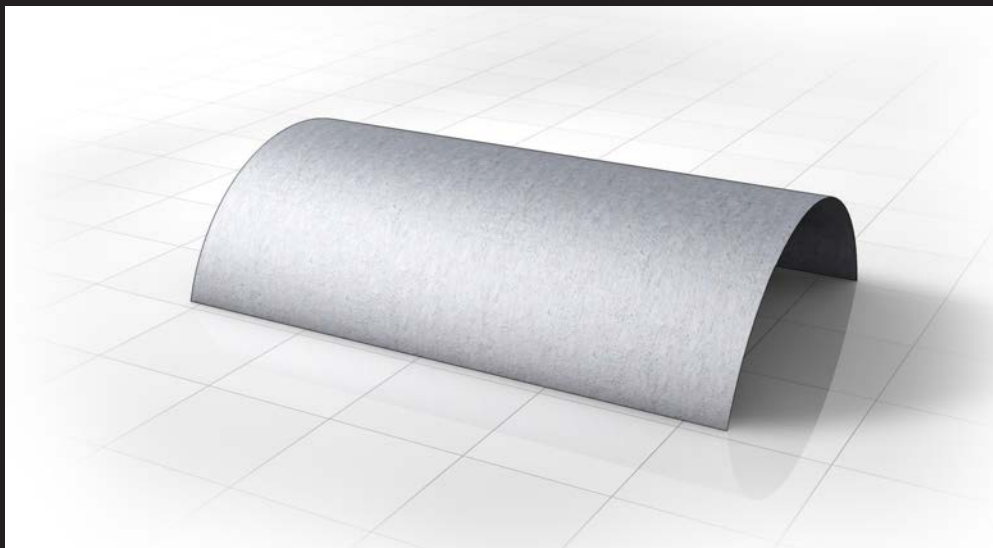


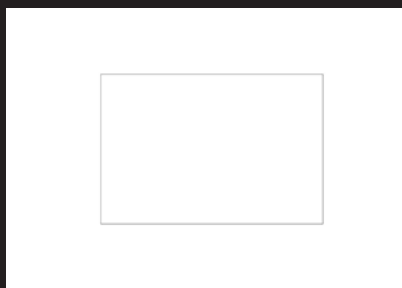
Abb. 185: Eine erzeugende Gerade wird zur Kurve



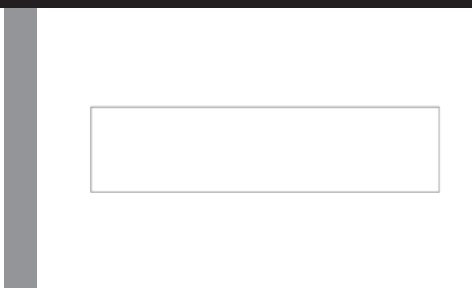
Abb. 186: Darstellung der Ausgangsform, einfacher Zylinderabschnitt



Draufsicht



Seitenansicht



Vorderansicht

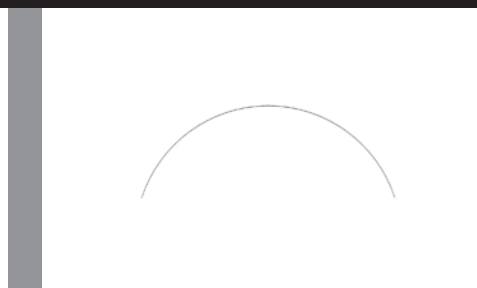
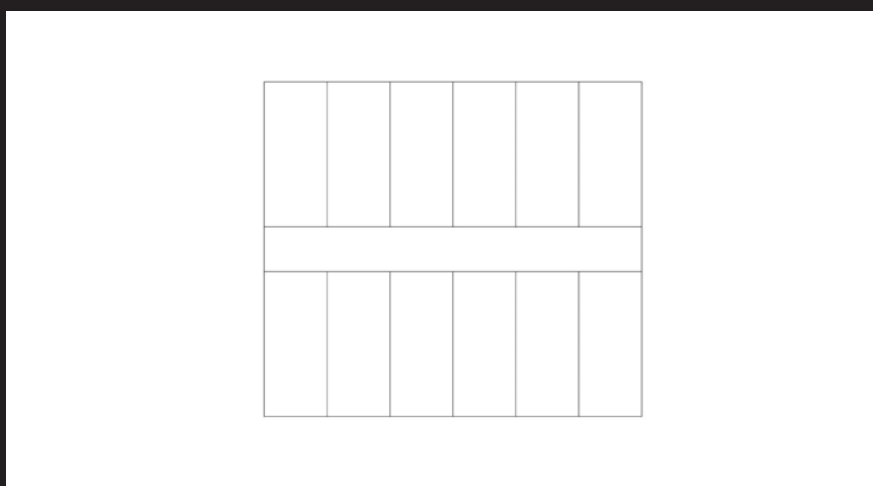
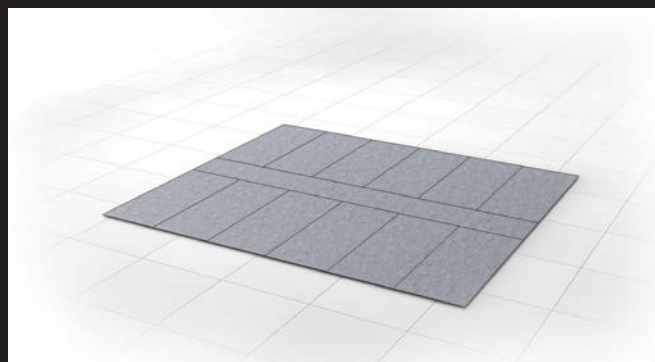
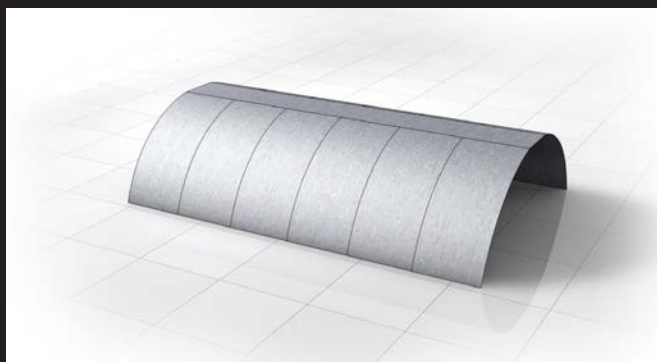
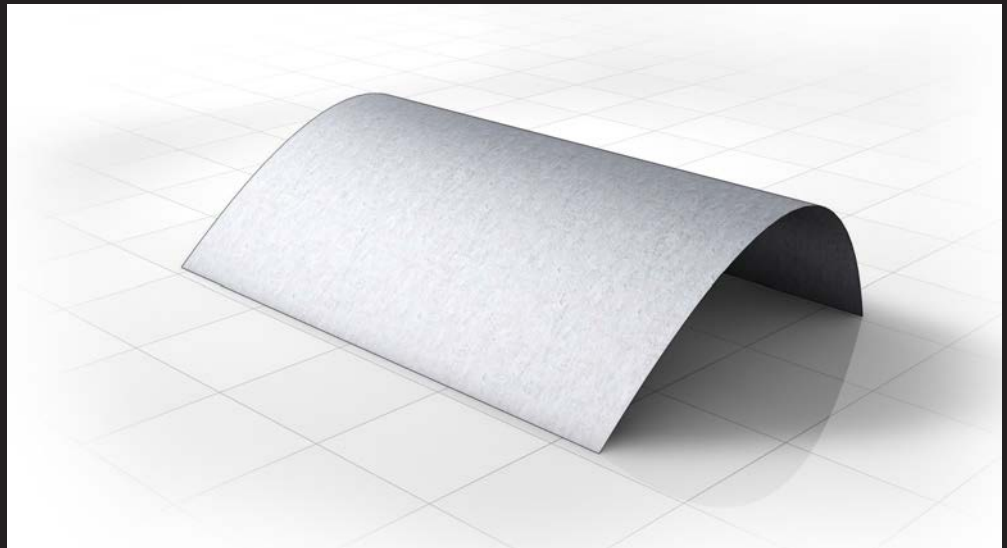


Abb. 187, 188 und 189: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Abb. 190: Durch Verschieben des Scheitels entsteht ein verzerrtes Tonnengewölbe. Die Krümmung ist nach wie vor eindimensional, daher auch hier keine Verzerrungen in der Abwicklung.



Draufsicht

Seitenansicht

Vorderansicht

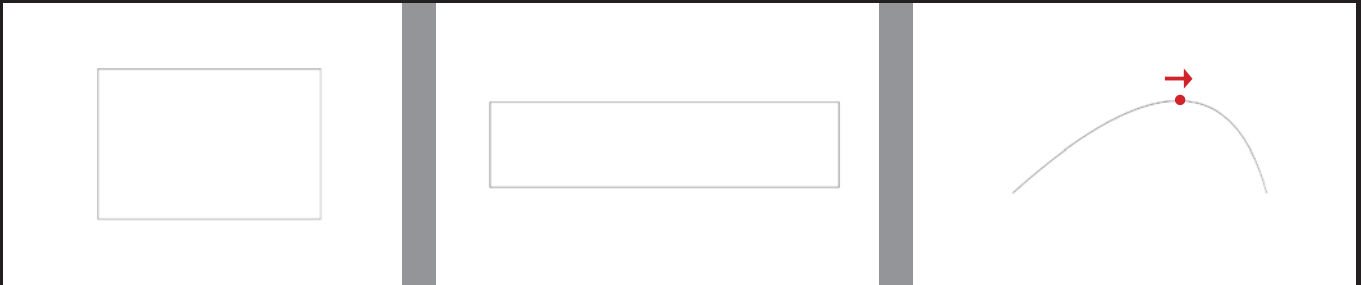
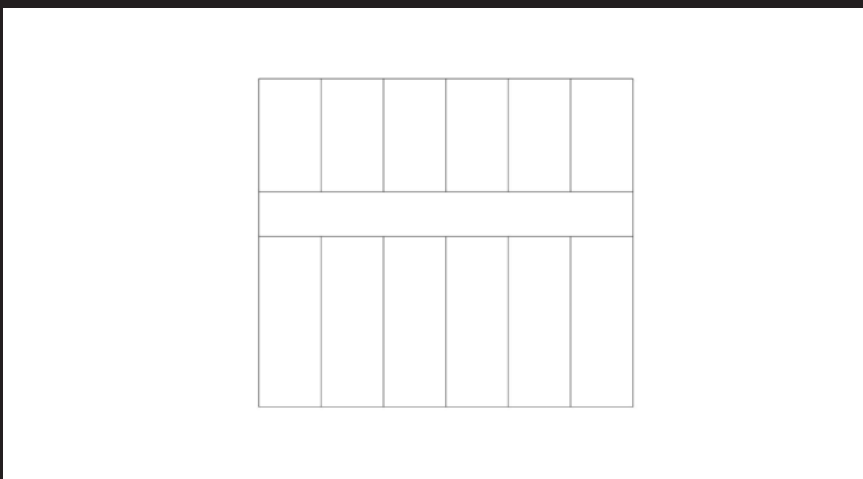
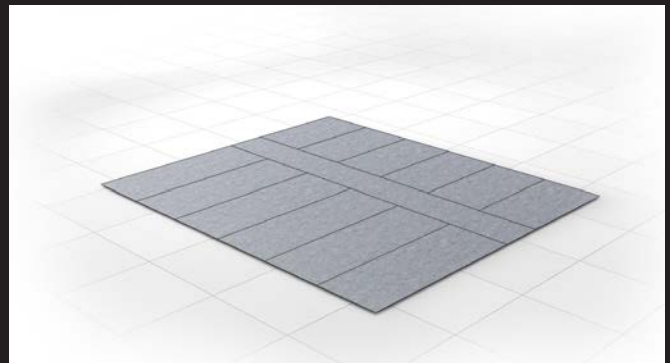
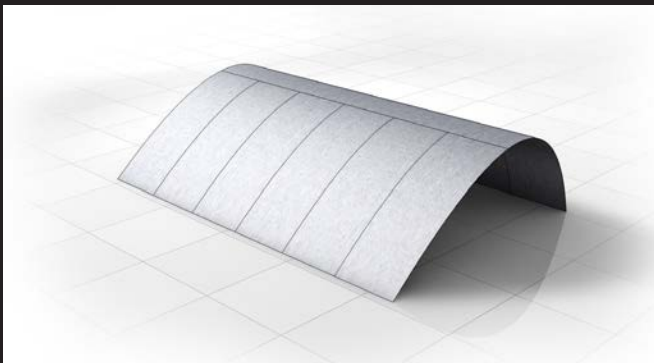
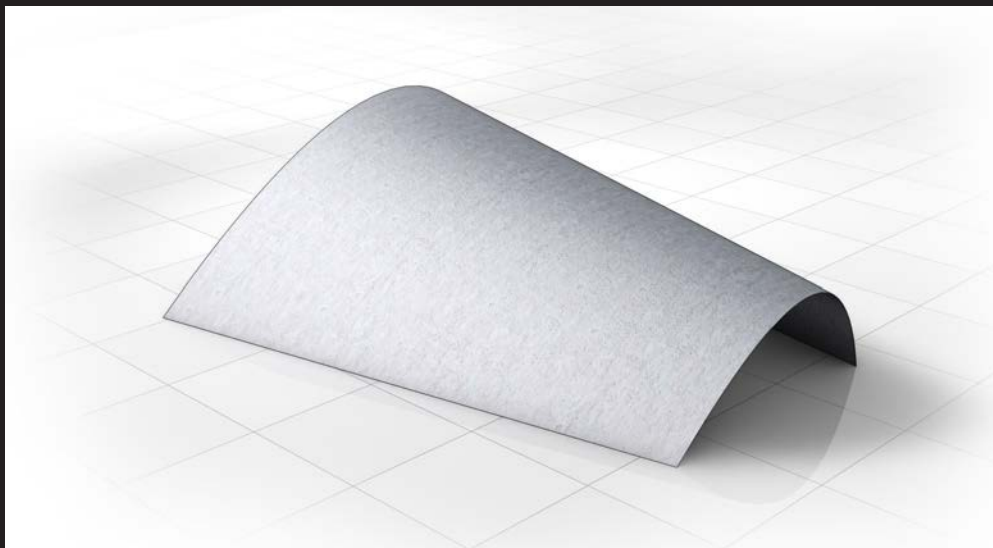


Abb. 191, 192 und 193: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Abb. 194: Durch Rotieren der erzeugenden Geraden und Verschieben des Scheitels entsteht ein verzerrter Kegelabschnitt, ebenfalls eindimensionale Krümmung



Draufsicht

Seitenansicht

Vorderansicht

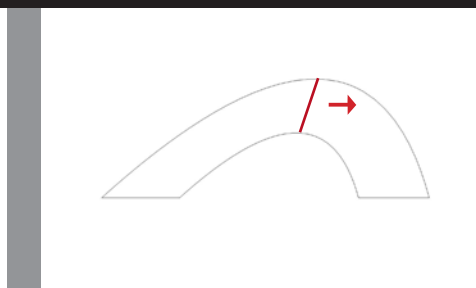
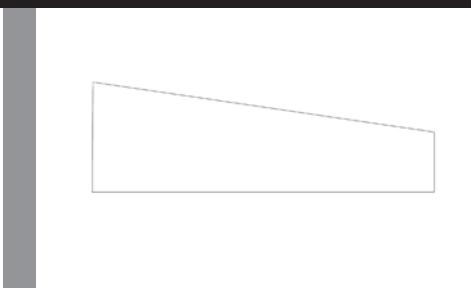
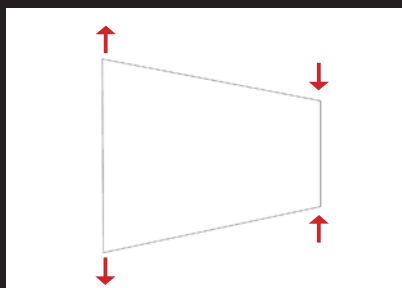
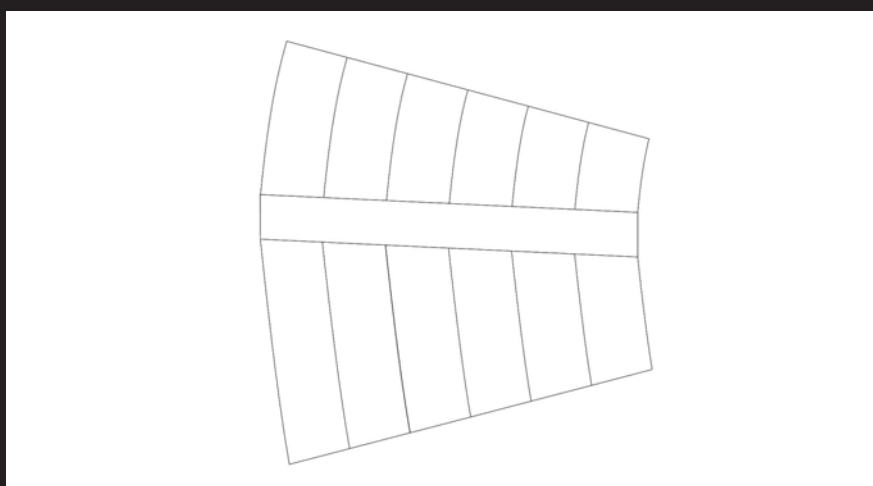
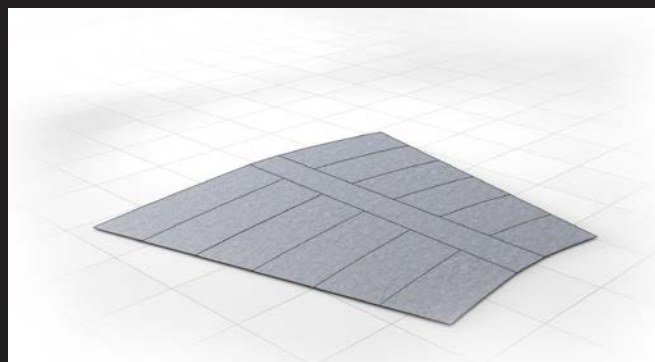
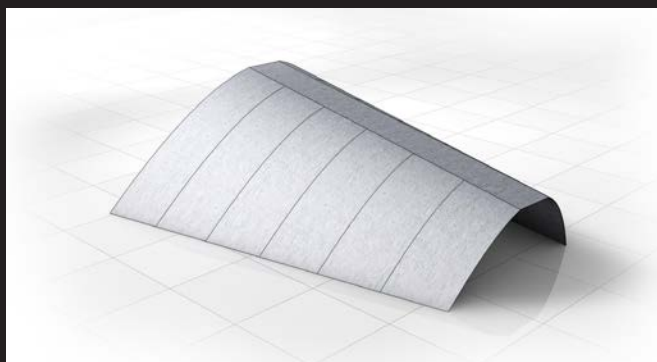


Abb. 195, 196 und 197: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Abb. 198: Bei diesem Beispiel wird zusätzlich eine der erzeugenden Geraden in eine Kurve transformiert, wodurch sich eine freie Form mit dreidimensionaler Krümmung bildet, hier könnte es Sinn machen die "Pneumatic wedge method" einzusetzen, da bei der Abwicklung in die Ebene wieder keilförmige Aussparungen notwendig sind.



Draufsicht

Seitenansicht

Vorderansicht

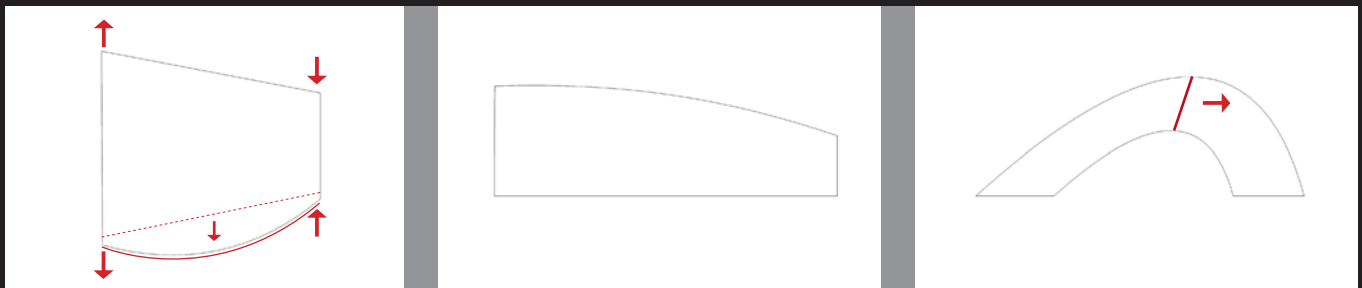
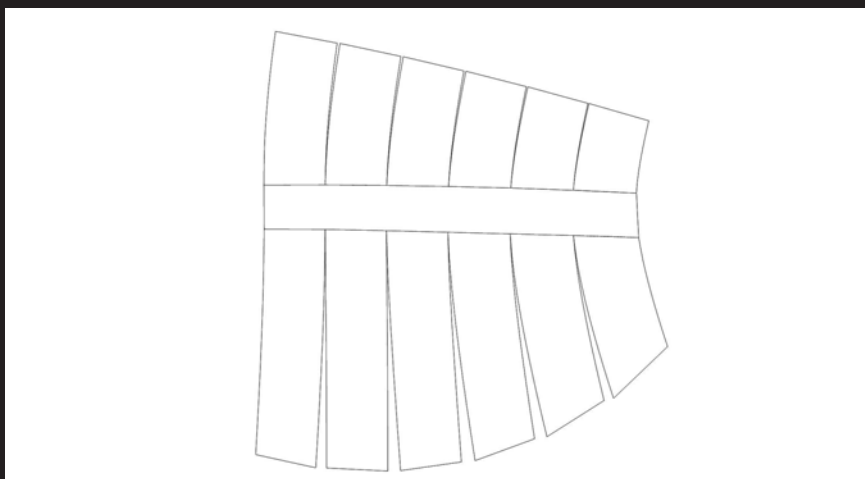


Abb. 199, 200 und 201: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Beispiel Ellipsoidabschnitt:

Für das Ellipsoid gelten die gleichen Prinzipien, wie für den Kugelabschnitt. Auch hier entstehen freie Formen, sobald man den Scheitelpunkt bewegt und wenn die Basisellipse verzerrt wird. Die folgende Darstellung simpler Variationen des Ellipsoidabschnitts zeigen weitere mögliche Schalenformen, deren Herstellung theoretisch mittels “Pneumatic wedge method” möglich wären. Wie bei den vorangegangenen Ergebnissen gilt, dass die Gaußsche Krümmung an keinem Punkt negativ werden darf.

Weiters lässt sich wie bei den manipulierten Kugel- und Zylinderabschnitten erkennen: je höher der Verzerrungsgrad der Ausgangsform, desto mehr findet ein fließender Übergang in Richtung völlig freie Form statt. Die so entstandenen Formen haben mitunter nicht mehr viel mit ihrer Ausgangsform gemein. Es geht hier vielmehr darum, in einzelnen Schritten eine Evolution von möglichen Schalengeometrien, die mittels Variation von Grundformen entsteht, darzustellen.

Des weiteren muss festgehalten werden, dass ein Einsetzen der “Pneumatic wedge method” als Konstruktionsmethode nach momentanem Stand der Entwicklung nur für Schalenformen in Frage kommt, die nicht zu weit von einer symmetrischen und gleichmäßig gekrümmten Form entfernt sind. Die hier dargestellten Formen sind zwar alle abwickelbar und somit auch theoretisch mittels “Pneumatic wedge method” konstruierbar, jedoch kann derzeit bei starker Verzerrung der Basisgeometrie nicht vorhergesagt werden, wie sich die Struktur im Moment der Transformation aus der Platte verhalten würde. Zu ungleich könnten Kräfte und Widerstände auftreten, um einen homogenen Anhebeprozess zu gewährleisten.

Abb. 202: Ausgangsform (segmentiert)

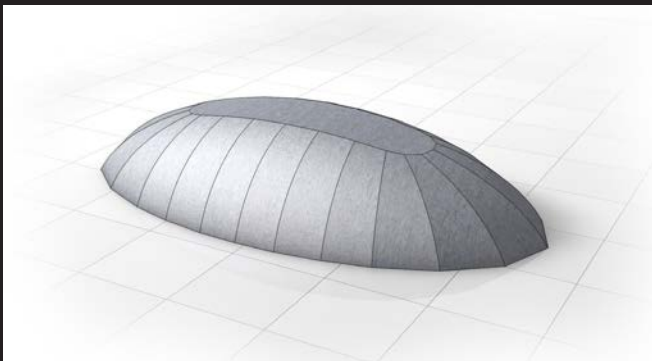


Abb. 203: Verschieben des Scheitels

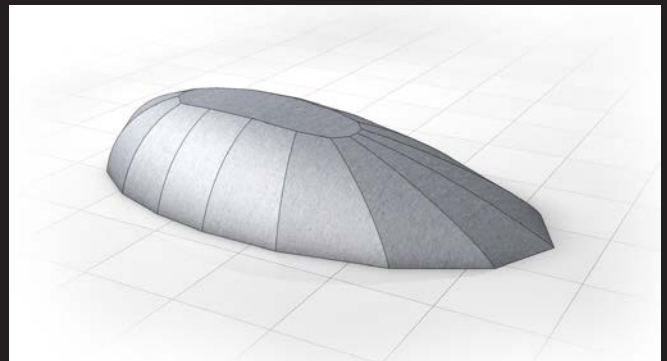


Abb. 204: Änderung Basisellipse

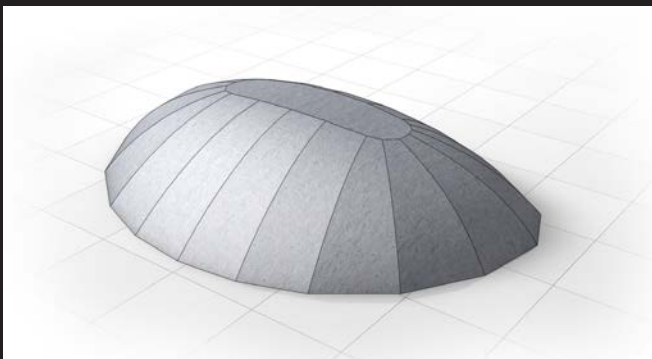


Abb. 205: Änderung Scheitel und Basisellipse

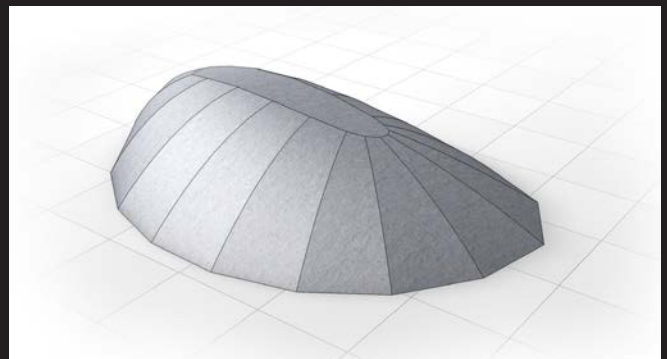
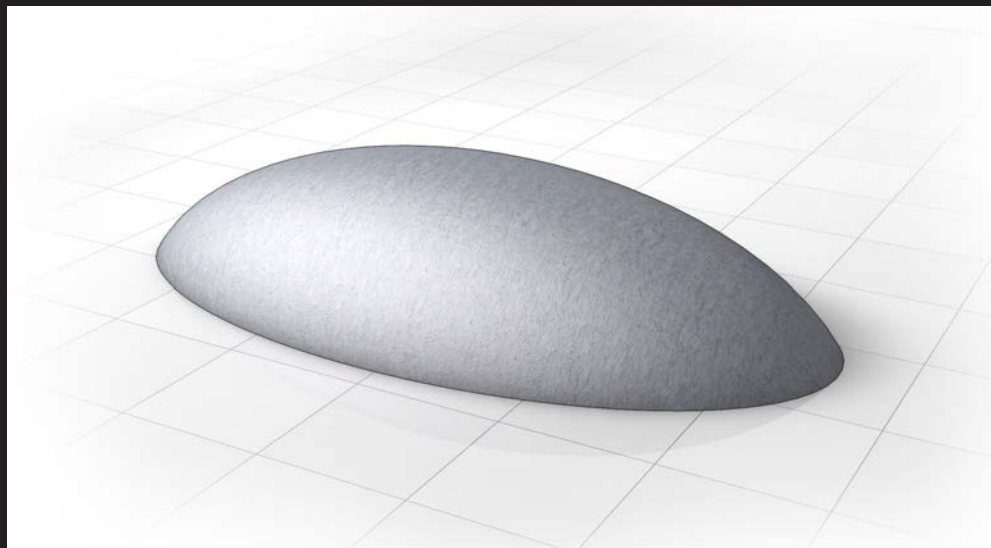
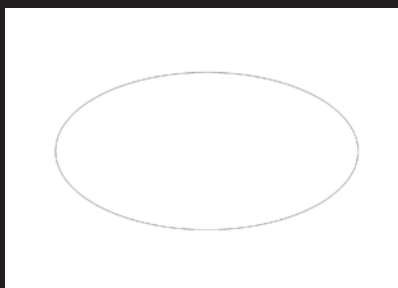


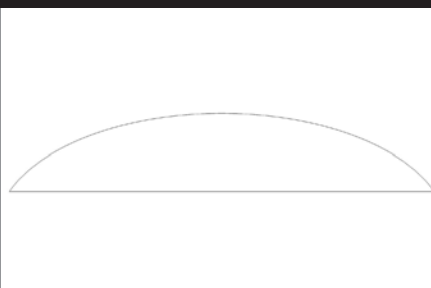
Abb. 206: Ausgangsform
Ellipsoidabschnitt, Scheitel-
punkt zentral



Draufsicht



Seitenansicht



Vorderansicht

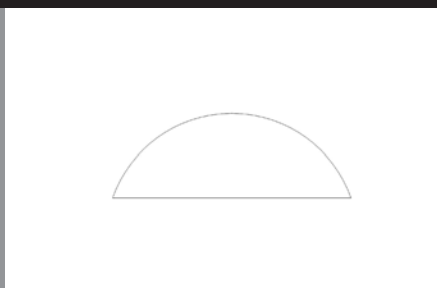
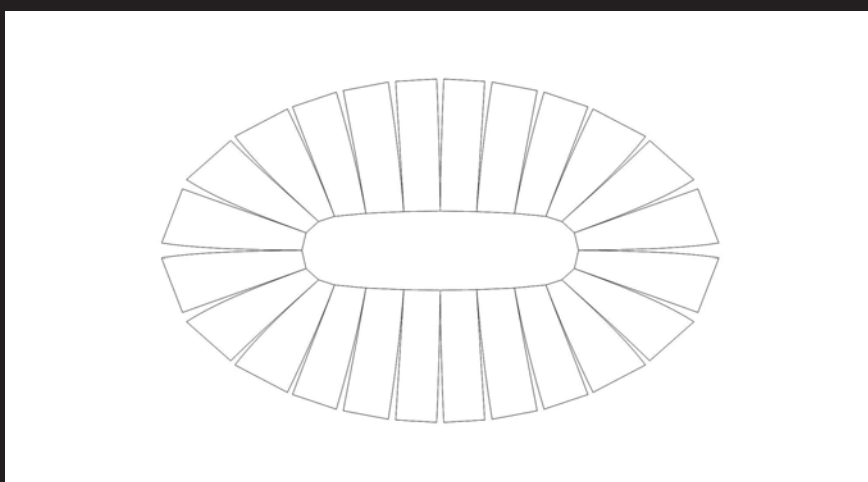
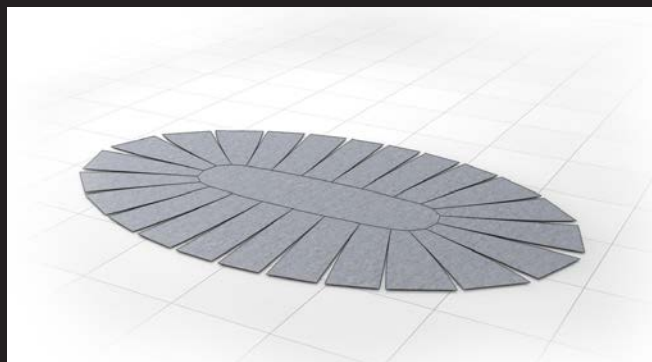
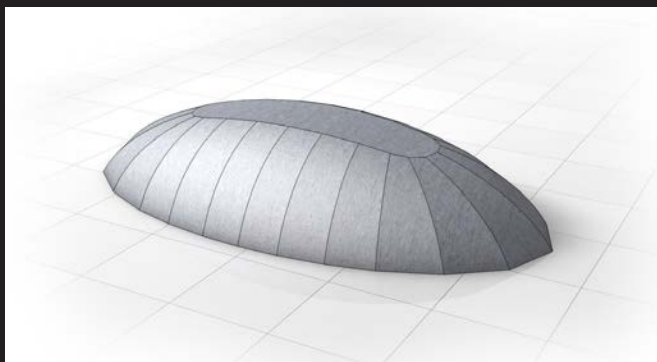
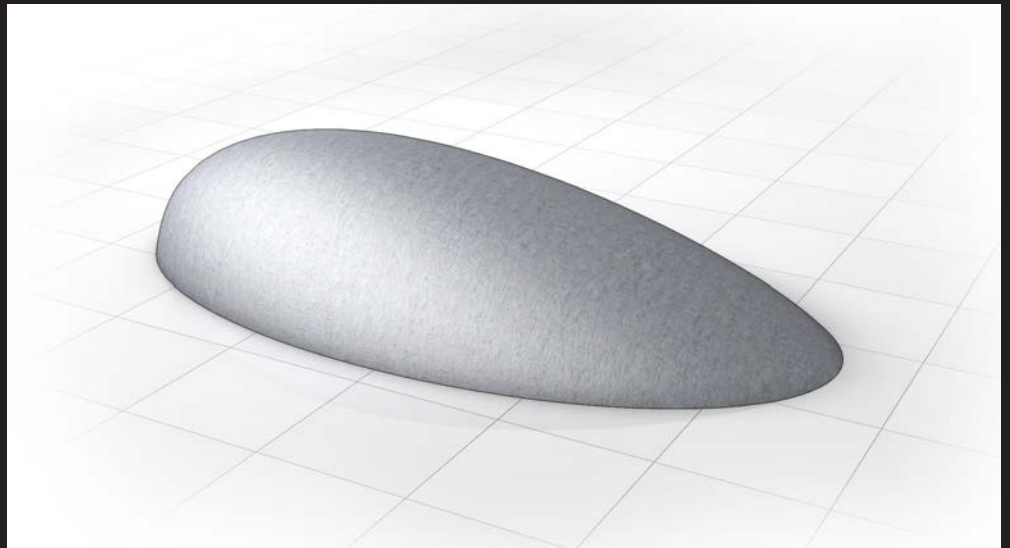


Abb. 207, 208 und 209: Segmentierung und Abwicklung

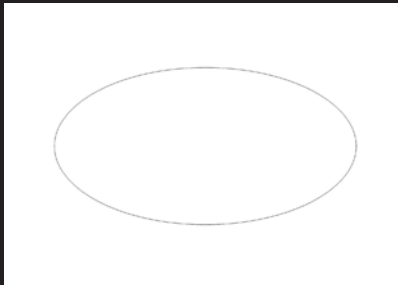


Draufsicht Abwicklung

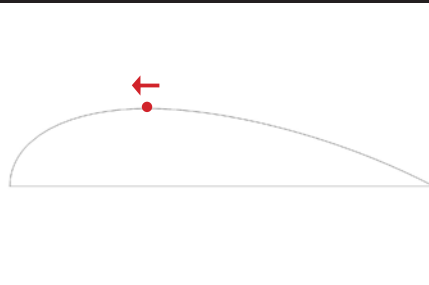
Abb. 210: Verschieben des Scheitelpunktes



Draufsicht



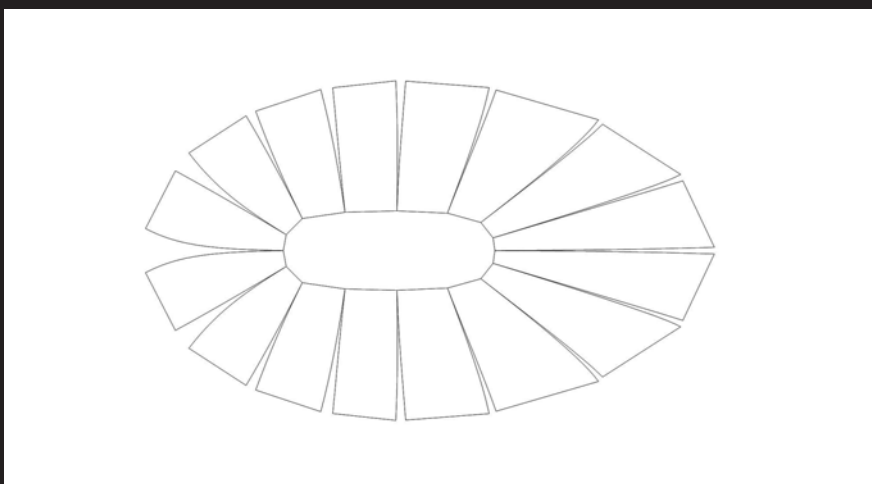
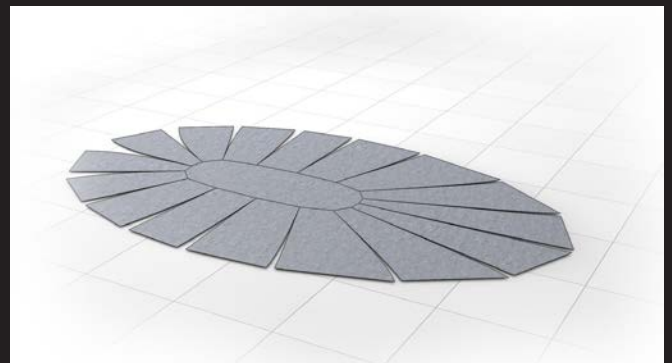
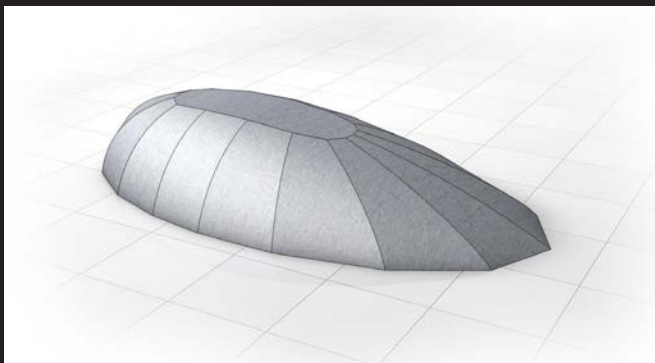
Seitenansicht



Vorderansicht



Abb. 211, 212 und 213: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Abb. 214: Verzerren der Basisellipse



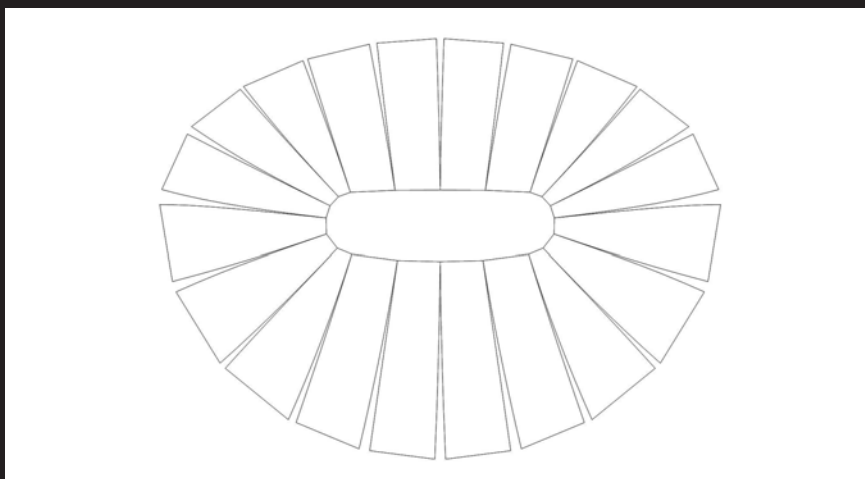
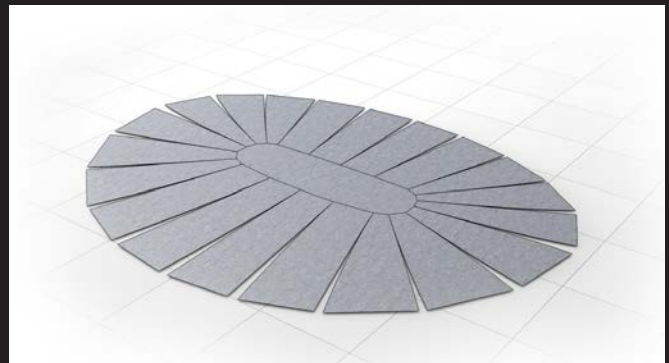
Draufsicht

Seitenansicht

Vorderansicht

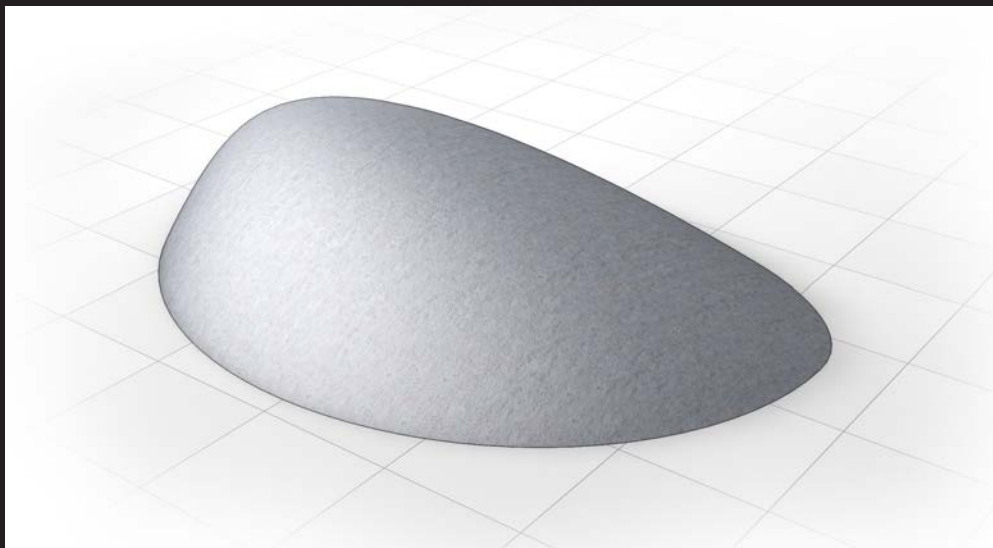


Abb. 215, 216 und 217: Segmentierung und Abwicklung

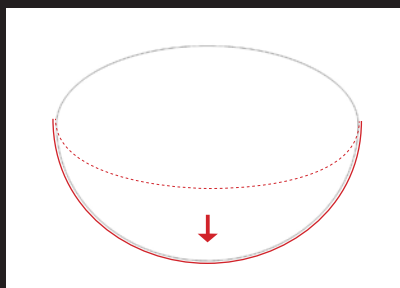


Draufsicht Abwicklung

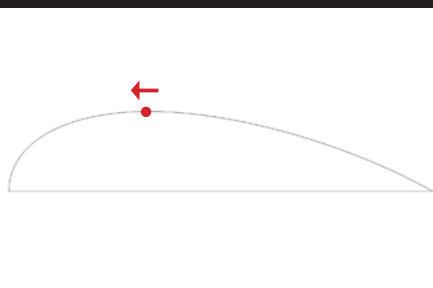
Abb. 218: Kombination beider
Variationen



Draufsicht



Seitenansicht



Vorderansicht

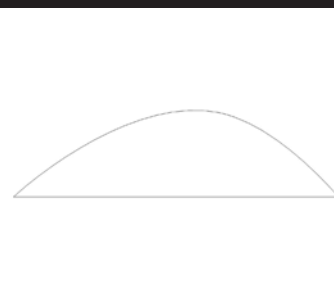
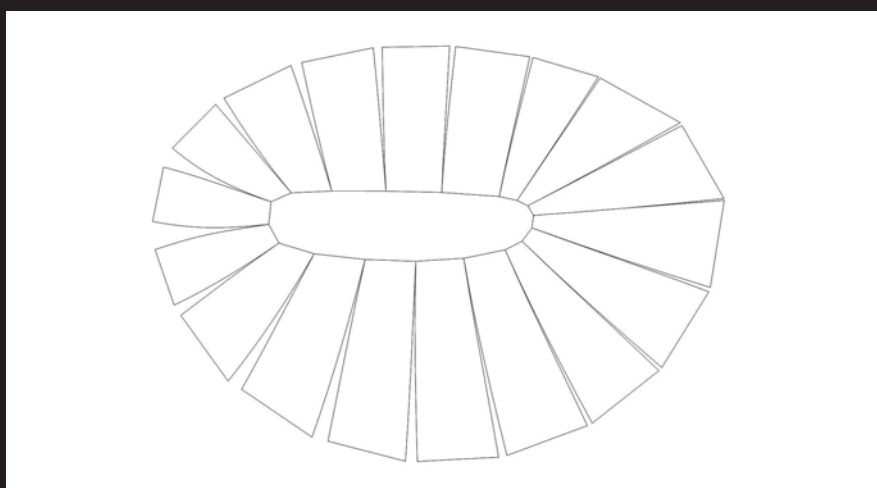
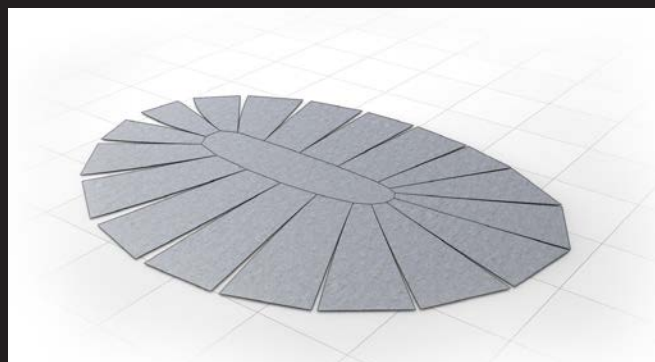
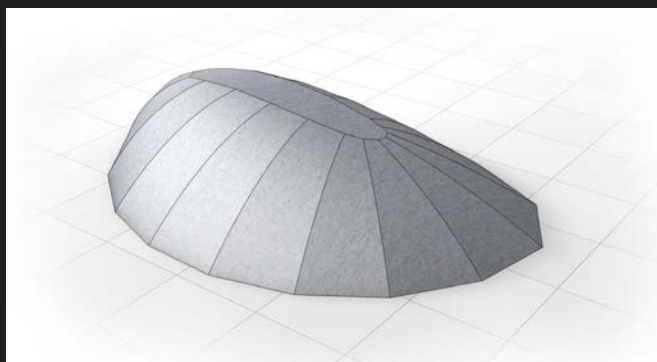


Abb. 219, 220 und 221: Segmentierung und Abwicklung



Draufsicht Abwicklung

Weitere mögliche Formvarianten

Zu den bereits erörterten Formen, kommen abschließend noch einige Beispiele, die zeigen sollen, dass der Fundus an mittels “Pneumatic wedge method” konstruierbaren Formen noch lange nicht erschöpft ist.

Es besteht die Möglichkeit die Grundformen miteinander zu kombinieren. Eine Kombination zweier Grundformen - Kugel und Zylinder - wurde bereits genauer untersucht. Die Kugel-Zylinder-Kombination ist, sofern gewisse Punkte wie etwa eventuell auftretende Spannungsspitzen am Übergang berücksichtigt werden, durchaus geeignet, um als Schale mittels “Pneumatic wedge method” konstruiert zu werden. Entsprechend bieten sich weitere Kombinationen wie zum Beispiel Kugel-Ellipsoid oder auch Ellipsoid-Zylinder an. Die Möglichkeit der Kombination beschränkt sich nicht nur auf die analytisch beschreibbare Grundform sondern funktioniert auch mit deren Variationen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass beide Körper in gleicher Weise “manipuliert” werden. Bei der Kombination Kugel-Ellipse müssten zum Beispiel beide Scheitelpunkte in gleichem Maße bewegt werden, um die beiden Formen auch dann noch aneinanderfügen zu können.

Abb. 222 : Kombination
Kugelabschnitt und Ellipsoid-
abschnitt

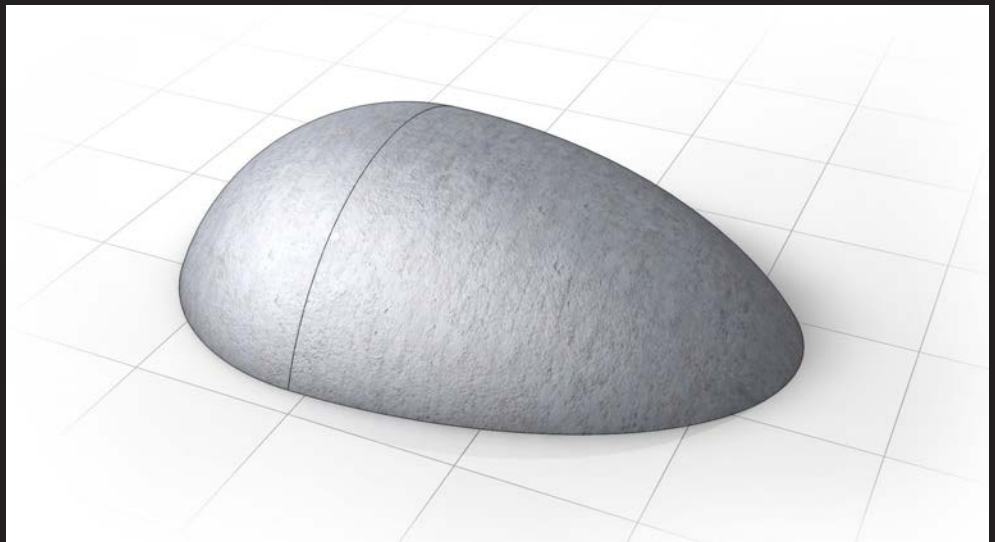


Abb. 223 : Kombination Kugelabschnitt und
Ellipsoidabschnitt; Scheitelpunkt verschoben

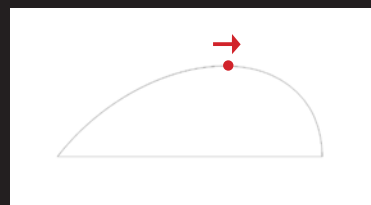


Abb. 224: Ellipsoid-Zylinder-Kombination

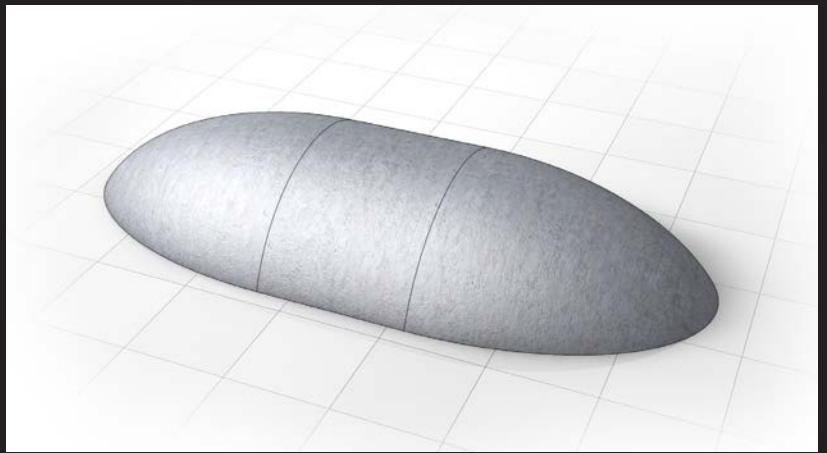


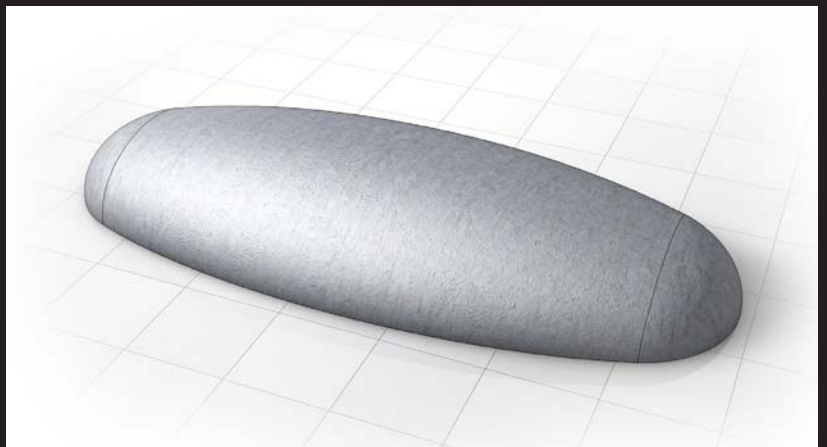
Abb. 225: Die bereits bekannte Kugel-Zylinder Kombination



Abb. 226: Zylinderabschnitt wird zum Kegelabschnitt



Abb. 227: Der Zylinderabschnitt wird "aufgeblasen", es entsteht ein durch einen Kreisbogen gebildeter Rotationsskörper, auch dieser kann mit Kugelabschnitten kombiniert werden.



Weiters wurde schon bei den Variationen der Grundformen angedeutet, dass eine Änderung der erzeugenden Basiskurve die Form entsprechend beeinflusst. Mit den unterschiedlichsten Basiskurven können auch die unterschiedlichsten Freiformen entstehen.

Abb. 228 : Beispiel Rautenförmiger Grundriss

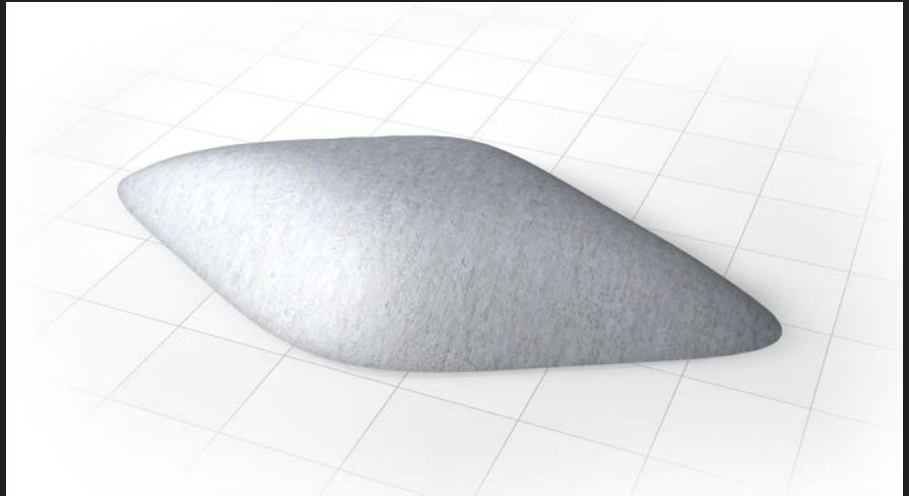


Abb. 229 : Beispiel Grundriss gleichschenkliges Dreieck



Eine weitere Möglichkeit die Form einer Schale “anzupassen” besteht darin, sie zu schneiden. Einerseits könnten Einschnitte von vornherein notwendig sein, um eine Schale nutzbar zu machen, andererseits können sie die ästhetische Erscheinung der Schale maßgeblich beeinflussen.

Abb. 230 : Ein an den Seiten bogenförmig eingeschnittenes Kissen



Abb. 231: eingeschnittene
Freiform



Abb. 232: abgeschnittener
Ellipsoid

Eine solche geschnittene Schale könnte - vorausgesetzt man produziert sie mittels “Pneumatic wedge method” - auf zwei verschiedene Weisen hergestellt werden. Entweder man fertigt die geschlossene quasi vollständige Schale und schneidet erst dann die überflüssigen Teile heraus oder man bereitet die Segment-Platte in ebenem Zustand in ihrer Schalung und Form schon so vor, dass die fertige bereits “geschnittene” Form durch den Transformationsprozess entsteht. Bei Variante II müsste zusätzlich noch eine Lösung dafür gefunden werden, wie mit den in der Form offenen Stellen während des Hebe Prozesses umgegangen wird. Damit der Anhebeprozess mittels Hebepneu funktioniert, muss auch bei den offenen bzw. “geschnittenen” Bereichen ein Widerstand gegen den Pneu vorhanden sein. Hier könnte man eventuell andenken, temporäre Sekundärkonstruktionen zu verwenden.

Auf jeden Fall müssen Schnitt bzw. Einschnitt so gewählt sein, dass die Tragstruktur nicht zu stark beeinflusst wird und die Schale als Tragwerk weiterhin funktioniert.

Momentane Versuche

Für die Konstruktion einer Schale in Form eines Kugelabschnittes wurde die “Pneumatic wedge method” bereits erfolgreich im 1:1-Versuch getestet. Ziel der bisherigen Verfahrens- und Formanalysen war es zum einen, das Potential des Verfahrens zu ermitteln und zum anderen mit den gewonnenen Erkenntnissen eine neue Testreihe durchzuführen. Somit soll nicht nur das Verfahren an sich optimiert sondern auch das Spektrum der gebauten Formen erweitert werden. Die Form, die für die neue Versuchsreihe ausgewählt wurde, ist dem Ellipsoidabschnitt ähnlich. Die Basiskurve ist allerdings keine Ellipse sondern eine in ein Rechteck eingeschriebene Bézierkurve dritten Grades mit den Kontrollpunkten an den End- und Mittelpunkten der vier Seiten. Die Schnittkurven längs und quer sind ebenfalls Bézierkurven die einem gleichschenkligen Trapez dessen seitliche Schenkel jeweils im 65° Winkel zur Grundseite stehen. Die Basiskurve ist somit im Vergleich zur Ellipse zu den Enden hin runder und weist bei annähernd gleicher Proportion eine geringere Krümmungsspitze an den Enden auf.

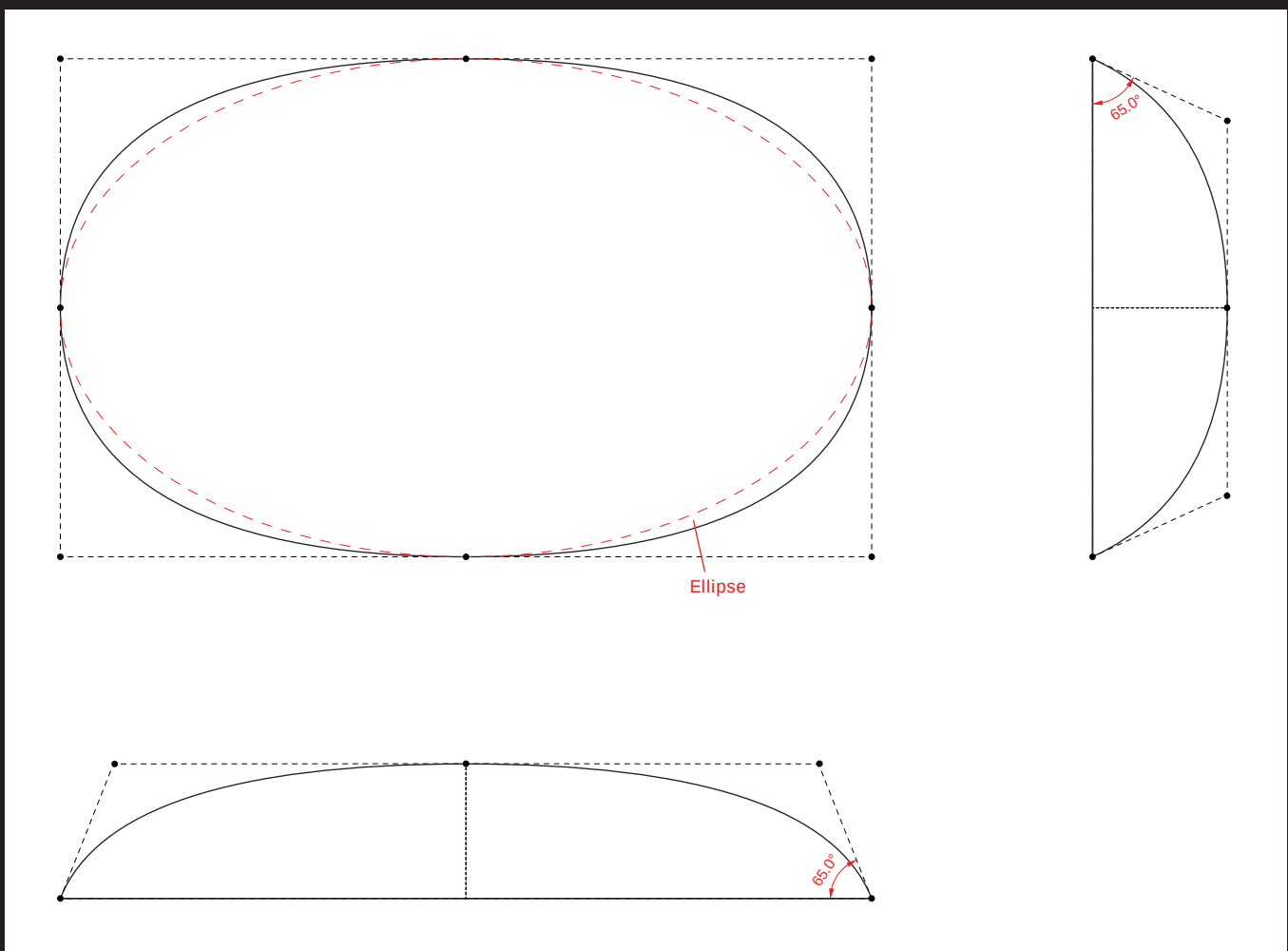


Abb. 233 : Grundriss und Ansichten der neuen Testform

Der 65° Grad-Winkel wurde deswegen gewählt, da er steil genug ist, um zu gewährleisten dass der entstehende Raum auch bis in die Randzonen nutzbar ist. Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse aus den Formanalysen wurde der Winkel allerdings auch nicht zu

steil gewählt, da dies die Formverzerrungen im Randbereich verstärkt und somit die keilförmigen Aussparungen in der ebenen Platte nach außen hin stark vergrößert.

Abb. 234: Grundriss und Konturkurven 3D

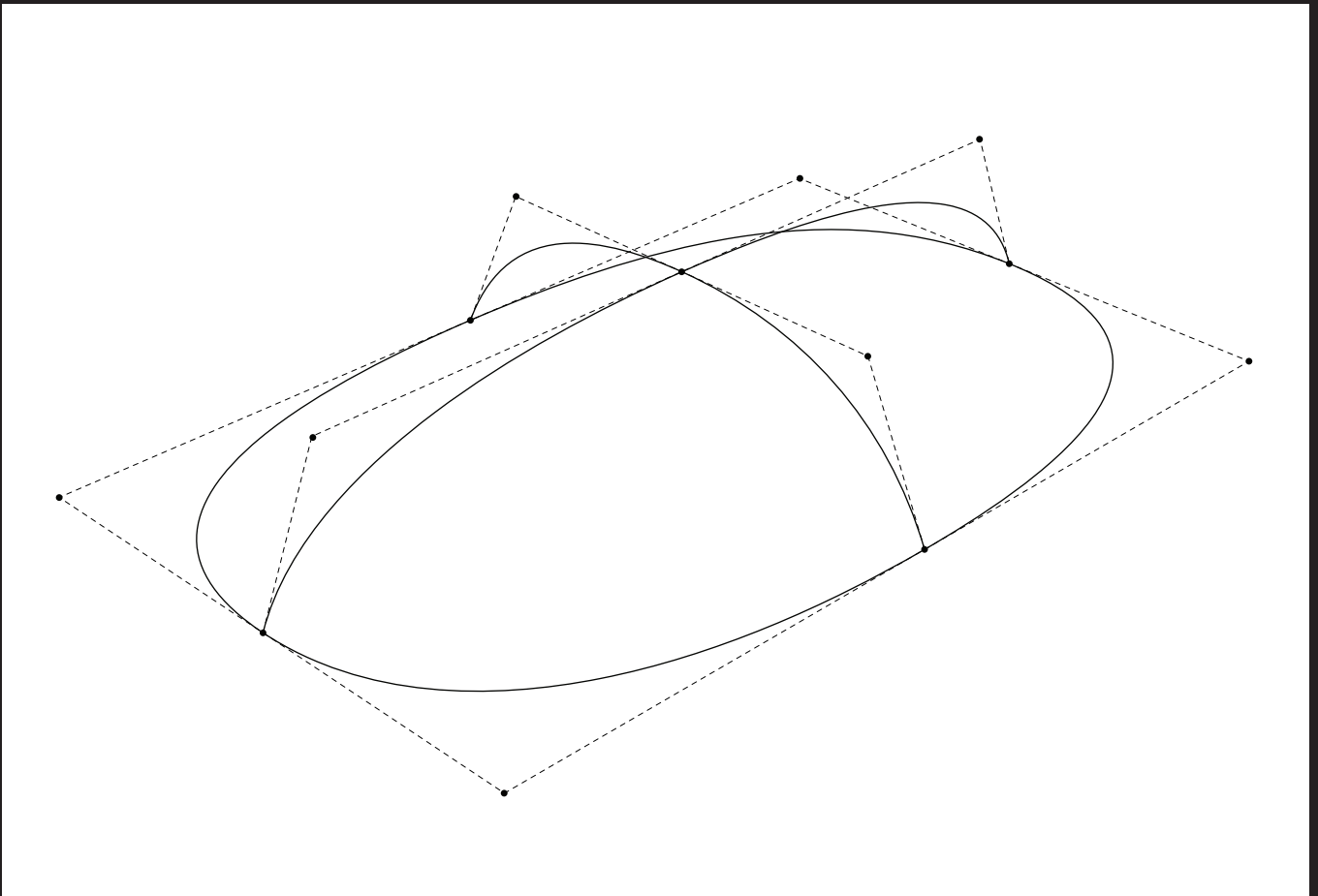


Abb. 235: Schale in dreidimensionaler Darstellung



Der bereits untersuchte Ellipsoid kann für die Segmentierung der Schalenform herangezogen werden. Es wird im Zentrum der Form eine der Gesamtform angenäherte Platte als verbindendes Element genommen, und daran reihen sich in diesem Fall 24 Segmente.



Abb. 236 : Segmentierte Schale

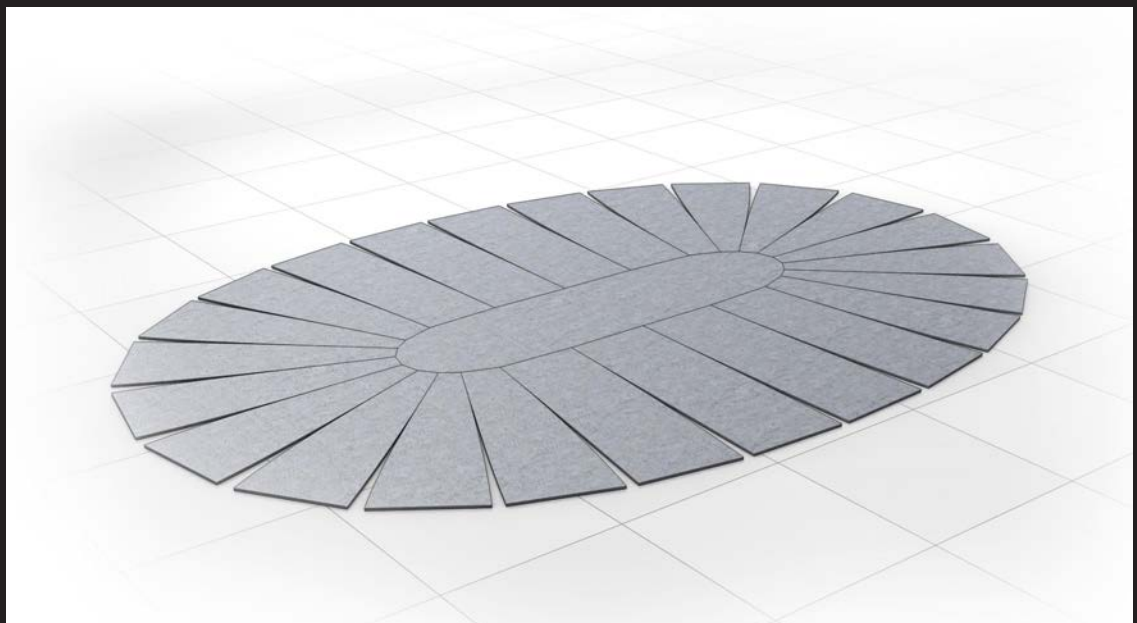
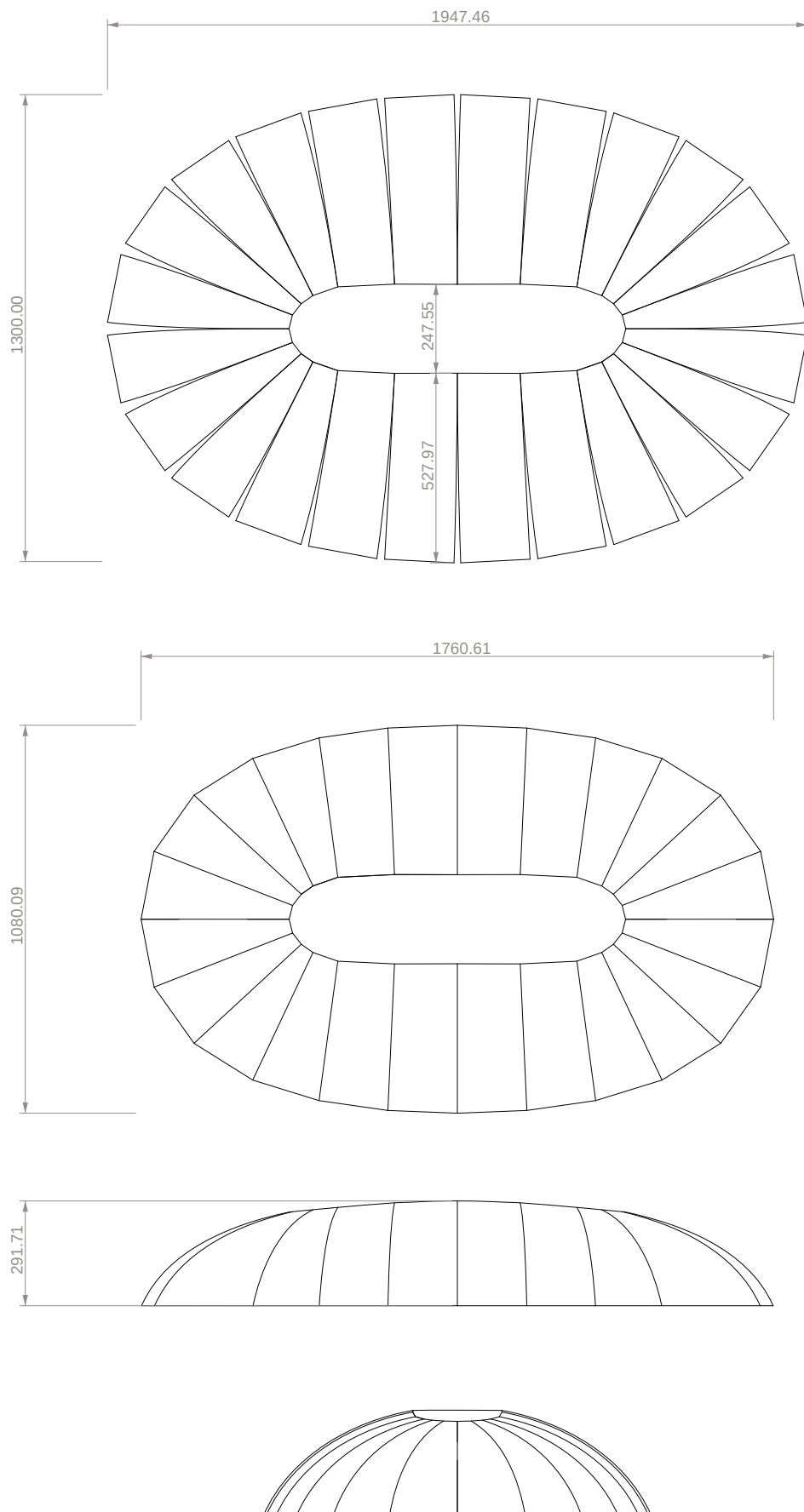


Abb. 237 : Schale "abgewickelt"

Die Dimensionierung der fertigen Schale wurde an die zuletzt gebaute Kuppel angelehnt, ihr Durchmesser von gut 10 Metern in finalem Zustand wird nun die Breite der neuen Schale, und bei einer Höhe von gut 2,90 Metern wird die Länge ca. 17,60 Meter betragen. Im "flachen" Zustand der Schale sind die Abmessungen der Segmentplatte ca. 13 x 19,5 Meter.

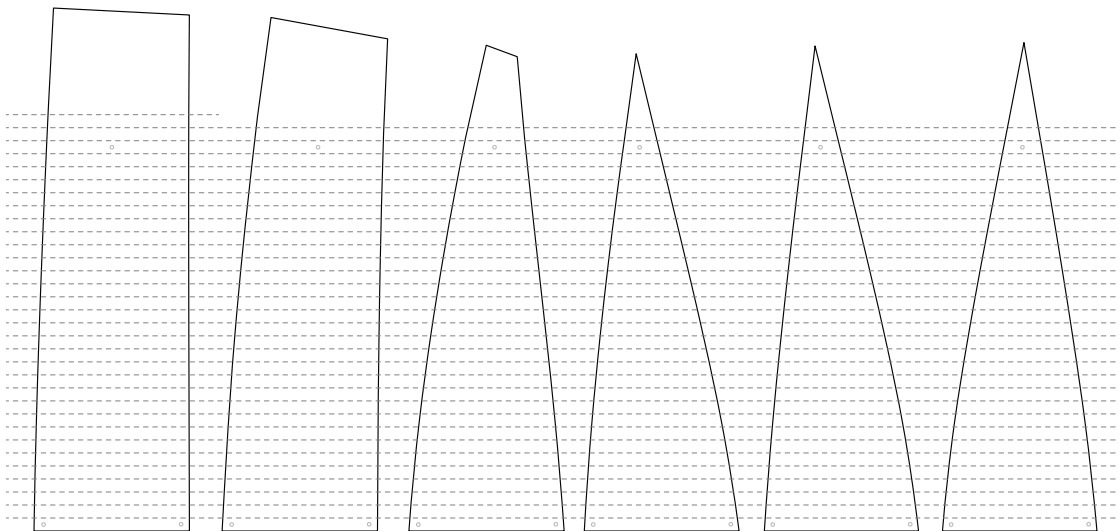
Um die Machbarkeit dieser Form im Vorfeld zu testen, wurden bereits Versuche im Maßstab 1:5 durchgeführt. Bei diesem Maßstab wäre eine Durchführung der Versuchsanordnung aus Beton nicht mehr zielführend gewesen, da die Platten nur noch eine Stärke von einem Zentimeter gehabt hätten. So wurde entschieden, als Werkstoff eine 12 mm starke

Abb. 238: Plandarstellung mit Dimensionierung der neuen Versuchsschale



Mehrschichtplatte aus Holz zu verwenden. Die Einzelteile wurden mittels CNC-Fräse aus der Platte geschnitten. Die Mehrschichtplatte war jedoch zu steif für die Simulation der Betonsegmente. Damit die Platten die erforderliche geringere Biegesteifigkeit aufweisen würden, mussten in die einzelnen Holzsegmente zusätzlich 9 mm tiefe Nuten in die Platte gefräst werden. Sie wurden normal auf die Biegelinie im Parallelabstand von 3 cm eingefräst.

Abb. 239 : Fräsplan der Einzelteile mit Nutenlinien (entsprechend der Doppelsymmetrie 6 der 24 Teile)



Es wurde Holz statt Beton verwendet, aber ansonsten wurde die Versuchsanordnung im kleinen Maßstab so wirklichkeitsgetreu wie möglich gehalten. Für den Anhebe- bzw. Transformationsprozess sollten ebenso Hebeplanen sowie Spannritzen verwendet werden. Zusätzlich wurden, um auch die bereits angesprochene Problematik mit der möglicherweise auftretenden Verschiebung der Segmente zueinander zu beheben, Sicherungsschienen auf die Segmente montiert (auf den folgenden Abbildungen: die dunklen Holzelemente auf den Segmenten).

Abb. 240 :
Aufbau der
Versuchs-
anordnung



Abb. 241 - 244: Anhebeprozess Versuchsanordnung 1:5



Die erfolgreiche Durchführung des Versuches im kleinen Maßstab stimmt zuversichtlich für den kommenden 1:1 Großversuch, dessen Vorbereitung und Planung bereits stattfinden. Der Transformationsprozess der Holzschale lief ohne Probleme ab und es zeigte sich, dass die Schienen, die gegen die Verschiebung der Segmente montiert wurden, ihre Funktion erfüllen. Einzig das fehlende zusätzliche Gewicht an den Randbereichen führte dazu, dass das Heben die gesamte vergleichsweise leichte Schale zum Teil vom Boden abhob. Dies ist allerdings für den 1:1-Versuch nicht relevant, da bei diesem die Randbereiche deutlich schwerer ausgeführt werden.

Abb. 245 und 246:

Bild rechts: mit
Spannvorrichtung,
Luftschlauch für He-
bepneu; Bild unten:
fertige Holzschale



Mögliche Nutzungsszenarien für die “Pneumatic wedge method”-Schalen

Abschließend werden auf den folgenden Abbildungen verschiedene beispielhafte Nutzungsszenarien für “Pneumatic wedge method - Schalen” dargestellt. Das mögliche Einsatzspektrum ist sehr groß und könnte von einer simplen Grünbrücke (z.B. Wildquerung) bis hin zum spektakulären Raum für Ausstellungen reichen. Die Machbarkeit vor Ort müsste von Fall zu Fall eruiert werden, aber viel mehr als ein ebener stabiler Untergrund wäre meist nicht notwendig. Die folgenden Beispiele zeigen gleichzeitig diverse Möglichkeiten, wie zum Beispiel Fensteröffnungen oder Eingänge eingeschnitten werden könnten.

Bedingt durch die Tatsache, dass sich eine doppelt gekrümmte Betonschale mittels “Pneumatic wedge method” mit vergleichsweise moderatem Aufwand herstellen lässt, ergeben sich viele Verwendungsmöglichkeiten für eine so konstruierte Schale. Bei Abmessungen der Schale in ähnlichen Größenordnungen wie bei den Großversuchen (15 - 25 Meter Länge oder Durchmesser, 3 bis 4 Meter Höhe) können schon sehr viele Funktionsszenarien für die Schalen in Frage kommen. Überall, wo gehobene ästhetische Ansprüche an ein Gebäude gestellt werden und sich die entsprechende Funktion auch in eine doppelt gekrümmte Schale integrieren lässt, kann ein Einsatz einer so gefertigten Schale überlegt werden.

Im ersten Szenario wird die Schale als Infopoint in einem Ortskern verwendet. Es besteht die Möglichkeit die Schale entsprechend auszustatten, um Auskunftsstelle, Infotafeln, Ticketschalter etc. zu integrieren. In weiterer Folge könnte sie nicht nur Infopoint und/oder Ticketschalter sein, sondern auch gleichzeitig als Eingang oder Tor in einen geschlossenen Bereich (Veranstaltung, Konzert, Zoo, Markt uvm.) fungieren, da auch eine optische Signal-

Abb. 247: Szenario - Nutzung als Infopoint



wirkung garantiert ist.

Ebenso denkbar wäre, wie in Abbildung 248 dargestellt, ein Veranstaltungsraum, der einerseits spektakuläres räumliches Ambiente bietet und andererseits als großer offener Raum sich größte Flexibilität bewahrt. Im dargestellten Beispiel sind in jedes Segment ellip-tische Fenster eingeschnitten. Bei dem Großversuch mit der Kuppel hat sich jedoch gezeigt, dass die rohe Betonkuppel innen sehr stark hallt. Hier müsste der Raum vermutlich noch mit Akustikmaterialien (Putz, Teppich) veranstaltungstauglich gemacht werden.

Abb. 248: Szenario - Vortrag, Veranstaltung



Abb. 249: Szenario - Pavillon, Konzert



Abb. 250: Szenario - Ausstellung, Galerie



Abb. 251: Szenario - Grünbrücke, Wildquerung



Eine anderes denbares Szenario könnte eine Funktion als Bühnenüberdachung bzw. Musikpavillon wie in Abbildung 249 sein. Diese Schale ist im Prinzip ein Abschnitt der letzten ellipsoidähnlichen Versuchsform. Hier ist sehr gut zu sehen, wie die Schnittlinie die Gesamtform beeinflusst. Entsprechend wären unzählige Formvariationen alleine durch eine jeweils andere Schnittführung möglich.

Als geschlossener Raum mit einer gewissen Schlichtheit und Stille, der aber doch mit imposanter Wirkung aufwarten kann, wäre eine so konstruierte Schale auch hervorragend für

Ausstellungen (Abbildung 250), Vernissagen oder ähnliches geeignet. Keine Öffnungen, keine Einschnitte bis auf einen Eingang, einfach schlicht und wirkungsvoll.

Eine weitere relativ simple aber auch oft benötigte Einsatzmöglichkeit für die Schale könnte die Funktion als Grünbrücke bzw. Wildbrücke (Abb. 251) sein. Sehr viele Strassen- und Schienenabschnitte stellen oft eine große Gefahr für das in solchen Gegenden lebende Wild dar. Die "Pneumatic wedge method" würde es ermöglichen, eine derartige Brücke ohne großen Aufwand und mit relativ günstigen Mitteln zu errichten und könnte so in der Praxis zum Einsatz kommen.

Wenn man den Maßstab der bisherigen Versuchsreihen außer Acht lässt und einen Schritt weiter geht, so sind natürlich auch Gebäude in ganz anderen Dimensionen denkbar. Sollte es eines Tages möglich sein, die "Pneumatic wedge method" auch für Schalen mit Abmessungen von beispielsweise über 100 Meter Länge einzusetzen, könnten ganze Konzert-, Messe- oder Sporthallen auf diese Art und Weise errichtet werden (Abbildung 252 und 253).

Abb. 252: Szenario - Konzert, Messe, Veranstaltung



Abb. 253: Szenario - Sporthalle, Stadion



Fazit

Doppelt gekrümmte Schalentragswerke sind, unter anderem aufgrund ihrer ästhetischen Erscheinung und auch ihrer Effizienz, schon seit langem aus der Architektur nicht mehr wegzudenken. Auch nicht zuletzt deswegen, weil sich die Methoden und Techniken zur Herstellung der Schalen stetig weiterentwickeln, können in vielen Fällen heute schon frei geformte Schalen hergestellt werden, wo sie vor nicht allzu langer Zeit aufgrund zu hoher Kosten oder zu aufwendiger Konstruktionsverfahren noch undenkbar schienen. Durch die Forschung am Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau der technischen Universität Wien kann ein weiterer Schritt in diese Richtung gemacht werden.

Die "Pneumatic wedge method" hat auf jeden Fall das Potential ein Schalenkonstruktionsverfahren zu werden, das sich in vielen Fällen als wirtschaftlich günstige Alternative zu herkömmlichen Verfahren anbietet. Nach momentanem Stand können Schalen in Form einer Kuppel mit dieser Technik schon hergestellt werden. Auch die Fertigung freier Formen mittels "Pneumatic wedge method" hat in ersten Testreihen bereits funktioniert und soll nun auch durch weitere 1:1 Großversuche weiterentwickelt und perfektioniert werden.

Die eingehende Untersuchung analytisch beschreibbarer Geometrien hat gezeigt, welche Krümmungen und Formen theoretisch denkbar wären, bei welcher Form die Methode nur eingeschränkt oder unter gewissen Voraussetzungen Anwendung finden könnte und auch bei welchen Formen ein Einsatz der "Pneumatic wedge method" nicht möglich ist. Wie sich herausgestellt hat, ist das Spektrum an möglichen Formen sehr groß. Durch die Kombinationsmöglichkeiten und vor allem auch durch die Variationsmöglichkeiten sämtlicher Grundformen, erweitert sich die Bandbreite möglicher Schalengeometrien enorm. Von diesem Aspekt her könnte die Methode theoretisch vielerorts zum Einsatz kommen. Vor allem der momentane Großversuch, bei dem erstmals eine Form getestet wird, die von der Kuppel abweicht, kann einen bedeutenden Schritt für die "Pneumatic wedge method" in Richtung Anwendbarkeit für freie Formen bedeuten. Die Weiterentwicklung mancher technischer Detaillösungen wird hier auch eine wichtige Rolle spielen. Je freier die Schalenform, desto wichtiger ist zum Beispiel auch, dass sich die einzelnen Segmente während der Transformation gleichmäßig und ihrer Position entsprechend biegen, um eine homogene Gesamtform zu ergeben. Die sich ändernde Krümmung bei Freiformen stellt zudem eine Herausforderung für die Vorspanntechnik dar. Bei der Kuppel und ihrem kreisrunden Grundriss sind die Umlenkkräfte des Spannrings an jeder Stelle gleich, bei einer davon abweichenden Form ist dies nicht der Fall. Sollten für diese beiden Problemstellungen geeignete technische Lösungen gefunden werden, steht einem Einsatz der "Pneumatic wedge method" auch für freie Schalenformen nichts im Wege.

Für mich persönlich war es definitiv eine sehr spannende Erfahrung, an der Forschung und den Versuchsreihen für die "Pneumatic wedge method" teilzunehmen. Die Möglichkeit, die Theorie auch in die Praxis umzusetzen, vor allem auch in dieser Größenordnung, bekommt man nicht sehr oft. Das war experimenteller Hochbau in interessantester Form.

Literaturverzeichnis:

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Beton#Geschichte>; (2014-03-22)
- [2] <http://www.beton.org/bauherreninformationen/was-ist-beton/geschichte-des-betons.html>; (2014-03-22)
- [3] Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 1907-2007; Beuth; 1.Aufl. 2007; ISBN 978-3-410-65044-7; S 30 - 31
- [4] <http://de.wikipedia.org/wiki/Romanzement>; (2014-03-22)
- [5] Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 1907-2007; Beuth; 1.Aufl. 2007; ISBN 978-3-410-65044-7; S 32 - 33
- [6] [http://de.wikipedia.org/wiki/Schale_\(Technische_Mechanik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Schale_(Technische_Mechanik)); (2014-03-22)
- [7] Beton und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 1; Hartwig Schmidt; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin; S79 - 82
- [8] Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 1907-2007; Beuth; 1.Aufl. 2007; ISBN 978-3-410-65044-7; S 92 - 94
- [9] Die Jahrhunderthalle und das Ausstellungsgelände in Breslau - das Werk Max Bergs; Jerzy Ilkosz; ISBN 978-3-486-57986-4; S 29
- [10] http://de.wikipedia.org/wiki/Max_Berg; (2014-03-22)
- [11] Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 1907-2007; Beuth; 1.Aufl. 2007; ISBN 978-3-410-65044-7; S 72 - 73
- [12] [http://de.wikipedia.org/wiki/Jahrhunderthalle_\(Breslau\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Jahrhunderthalle_(Breslau)); (2014-03-22)
- [13] http://de.wikipedia.org/wiki/Walther_Bauersfeld; (2014-03-22)
- [14] Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 1907-2007; Beuth; 1.Aufl. 2007; ISBN 978-3-410-65044-7; S 92 - 94
- [15] Boesiger, Willy; LeCorbusier 1910 - 65; 1967; Verlag für Architektur (Artemis), Zürich, 1967; S 16 - 17
- [16] http://de.wikipedia.org/wiki/Notre-Dame-du-Haut_de_Ronchamp; (2014-03-23)
- [17] Boesiger, Willy; LeCorbusier 1910 - 65; 1967; Verlag für Architektur (Artemis), Zürich, 1967; S 258
- [18] <http://www.kirchengucker.de/2008/09/22/architekturikone-die-wallfahrtskapelle-notre-dame-du-haut-de-ronchamp/>; (2014-03-23)
- [19] http://de.wikipedia.org/wiki/Eladio_Dieste; (2014-03-23)
- [20] <http://deu.archinform.net/arch/7169.htm>; (2014-03-23)
- [21] http://www.schwartz.arch.ethz.ch/Vorlesungen/Archiv/Dokumente/FS2010/Vorlesungen/Vorlesung_20100416.pdf; (2014-03-23)
- [22] http://de.wikipedia.org/wiki/Eero_Saarinens; (2014-03-23)
- [23] http://www.goruma.de/Wissen/KunstundKultur/Architekturdes20und21Jahrhunderts/Nordamerika/TWA_Empfangsgebaeude.html; (2014-03-23)
- [24] http://de.wikipedia.org/wiki/Jørn_Utson; (2014-03-23)
- [25] http://de.wikipedia.org/wiki/Sydney_Opera_House; (2014-03-23)
- [26] Jørn Utzon; Verlag Anton Pustet; 1999; ISBN: 3-7025-0408-7; S 63
- [27] <http://home.arcor.de/bineshome/SydneyOperaHouse/konstruktion.htm>; (2014-03-23)
- [28] <http://www.binisystems.com/slides.html>; (2014-03-23)
- [29] <http://www.binisystems.com/binishells.html>; (2014-03-23)
- [30] <http://www.faz.net/aktuell/feuilleton/kino/das-kuppelhaus-liebe-in-beton-an-der-costa-paradiso-11796760.html>; (2014-03-23)
- [31] Heinz Isler - Schalen; Katalog zur Ausstellung; Karl Krämer Verlag, Stuttgart; 1986; ISBN 3-7281-2792-2; S 9
- [32] Heinz Isler - Schalen; Katalog zur Ausstellung; Karl Krämer Verlag, Stuttgart; 1986; ISBN 3-7281-2792-2; S 70
- [33] http://de.wikipedia.org/wiki/Naturtheater_Grötzingen; (2014-03-23)
- [34] Candela; Enrique x. de Anda Alanis; TASCHEN GmbH; 2008; ISBN: 978-3-8228-3723-8; S 7 - 9;
- [35] <http://www.tu-cottbus.de/projekte/en/great-engineers/ingenieure/candela-outerino-felix-1910-1997/projekte.html>; (2014-03-24)
- [36] Candela; Enrique x. de Anda Alanis; TASCHEN GmbH; 2008; ISBN: 978-3-8228-3723-8; S 19
- [37] <http://www.oceanosgroup.com/blog/aquariums/1172/>; (2014-03-24)
- [38] http://de.wikipedia.org/wiki/Santiago_Calatrava; (2014-03-24); – Santiago Calatrava in der Folge über den Turning Torso der Dokumentationsreihe "Faszination Wolkenkratzer" ZDF(2009)
- [39] Santiago Calatrava; Philip Jodido; TASCHEN GmbH; 1998; ISBN: 3-8228-2354-6; S7 - 9

- [40] http://six4.bauverlag.de/arch/dbz/archiv/artikel.php?object_id=38&area_id=1085&id=119469; (2014-03-24)
- [41] http://de.wikipedia.org/wiki/Auditorio_de_Tenerife; (2014-03-24)
- [42] http://www.peri.com/ww/de/projekte.cfm/fuseaction/diashow/reference_ID/459/currentimage/1/referencecategory_ID/17.cfm; (2013-11-21)
- [43] [http://de.wikipedia.org/wiki/Schale_\(Technische_Mechanik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Schale_(Technische_Mechanik)); Definition - Schale; (2014-03-24)
- [44] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kuppel>; (2014-03-24)
- [45] J. Kollegger, B. Kromoser, S. Dallinger, The building of ice and concrete shells by employing pneumatic formwork, wissenschaftlicher Artikel, Technische Universität Wien, 2012

Abbildungsverzeichnis:

- 001: **Pantheon, Rom** [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panteón_de_Roma_alzado.jpg; (2014-03-22) source: James Ferguson, A History of Architecture in All Countries 3rd edition. Ed. R. Phené Spiers, F.S.A.. London, 1893. Vol. I, p. 320]
- 002: **Patent, Joseph Monier** [http://www.cephopu.cedex.es/hormigon/fichas/img_ficha.php?id_img=49; (2014-03-22)]
- 003: **Lichtdurchlässiger Beton** [<http://balkon-garten.blogspot.co.at/2007/06/betonpoesie.html>; (2014-03-22)]
- 004: **Schatzhaus des Atreus** [<http://de.academic.ru/dic.nsf/meyers/78098/Kuppelgräber>; (2014-03-22)]
- 005: **Hagia Sophia** [Beton und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 1; Hartwig Schmidt; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin; S 82]
- 006: **Petersdom, Rom** [<http://www.saintpetersbasilica.org/Plans/EtienneDuperac.jpg>; (2014-03-22)]
- 007: **Gartencenter Wyss, Zuchwil** [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gartencenter_Wyss_Zuchwil_01_09.jpg; (2014-03-22)]
- 008: **Hemispheric, Valencia** [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valencia_ES_L_Hemisferic_BIG.jpg; (2014-03-22)]
- 009: **Jahrhunderthalle Breslau** [[http://de.poland.gov.pl/Jahrhunderthalle,in,Breslau,\(2006\),9116.html](http://de.poland.gov.pl/Jahrhunderthalle,in,Breslau,(2006),9116.html); (2014-03-22)]
- 010: **Baustelle Jahrhunderthalle** [<http://dolny-slask.org.pl/625670,foto.html?idEntity=508851>; (2014-03-22)]
- 011: **Baustelle Jahrhunderthalle** [<http://dolny-slask.org.pl/3449507,foto.html?idEntity=508851>; (2014-03-22)]
- 012: **Zeiss Planetarium, Jena** [<http://simplydifferently.org/Present/Pics/bauersfeld-zeiss-jena.png>; (2014-03-22)]
- 013: **Baustelle Planetarium** [Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 1907-2007; Beuth; 1.Aufl. 2007; ISBN 978-3-410-65044-7; S 94]
- 014: **Baustelle Planetarium** [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Planetarium_CRW_5892.jpg]
- 015: **Notre Dame du Haut de Ronchamps** [[http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Notre_Dame_du_Haut\(ws\).jpg&filetimestamp=20080723174645&](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Notre_Dame_du_Haut(ws).jpg&filetimestamp=20080723174645&); (2014-03-23)]
- 016: **Notre Dame du Haut, innen** [<http://www.bsa-fas.ch/files/pdf/bsa/lehrmittel/architektur/31Ronchamp.pdf>; (2013-12-18)]
- 017: **Notre Dame du Haut, Baustelle** [<http://www.postalesinventadas.com/2013/06/vue-de-la-chapelle-de-notre-dame-du-haut.html>; (2014-03-23)]
- 018: **Notre Dame du Haut, Baustelle** [<http://www.bsa-fas.ch/files/pdf/bsa/lehrmittel/architektur/31Ronchamp.pdf>; (2013-12-18)]
- 019: **Cristo Obrero Kirche, Atlantida** [<http://www.plataformaarquitectura.cl/2011/07/19/clasicos-de-arquitectura-iglesia-del-cristo-obrero-eladio-dieste/raulsfotos2011/>; (2014-03-23)]
- 020: **Baustelle, Cristo Obrero Kirche** [http://www.schwartz.arch.ethz.ch/Vorlesungen/Archiv/Dokumente/FS2010/Vorlesungen/Vorlesung_20100416.pdf; S 27; (2014-03-23)]
- 021: **Baustelle, Cristo Obrero Kirche** [http://www.schwartz.arch.ethz.ch/Vorlesungen/Archiv/Dokumente/FS2010/Vorlesungen/Vorlesung_20100416.pdf; S 27; (2014-03-23)]
- 022: **TWA Flight Center, New York** [<http://www.flickr.com/photos/28898135@N00/3967741067/in/set-72157619491931227/>; (2014-03-23)]
- 023: **Innenaufnahme TWA Flight Center** [<http://blog.stuttgarter-zeitung.de/architektur/2013/01/07/eero-saarinen-twa-flight-center-new-york-idlewild-airport-1956-1962/>; (2014-03-23)]
- 024: **Baustelle, TWA Flight Center** [<http://media.archinform.net/m/00102575.jpg>; (2014-03-23)]
- 025: **Opernhaus, Sydney** [<http://famouswonders.com/sydney-opera-house/>; (2014-03-23)]
- 026: **Baustelle Opernhaus, Sydney** [Jörn Utzon; Verlag Anton Pustet; 1999; ISBN: 3-7025-0408-7; S 70]
- 027: **Baustelle Opernhaus, Sydney** [Jörn Utzon; Verlag Anton Pustet; 1999; ISBN: 3-7025-0408-7; S 71]
- 028: **La grande Cupola, Sardinien** [<http://www.faz.net/aktuell/feuilleton/kino/das-kuppelhaus-liebe-in-beton-an-der-costa-paradiso-11796760.html>; (2014-03-23)]
- 029: **Baustelle, Binishell** [<http://www.binisystems.com/binishells.html>; (2014-03-23)]
- 030: **Naturtheater, Grötzingen** [Heinz Isler - Schalen; Katalog zur Ausstellung; Karl Krämer Verlag, Stuttgart; 1986; ISBN 3-7281-2792-2; S 69]

031: **Modell, Naturtheater** [Heinz Isler - Schalen; Katalog zur Ausstellung; Karl Krämer Verlag, Stuttgart; 1986; ISBN 3-7281-2792-2; S 70]

031 und 032: **Baustelle, Naturtheater** [Heinz Isler - Schalen; Katalog zur Ausstellung; Karl Krämer Verlag, Stuttgart; 1986; ISBN 3-7281-2792-2; S 70]

034: **L'Oceanografic, Valencia** [<http://www.oceanosgroup.com/blog/aquariums/1172/>; (2014-03-23)]

035 u. 036: **Baustelle, L'Oceanografic** [http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Schalungen-und-Gerueste_Restaurante-Florante-Submarino-Valencia_E_72406.html; (2014-03-23)]

037: **Auditorio de Tenerife** [<http://airshp.com/wp-content/uploads/Screen-shot-2012-05-10-at-10.00.54-AM.png>; (2014-03-23)]

038 - 040: **Baustelle, Auditorio** [http://www.peri.com/ww/de/projekte.cfm/fuseaction/diashow/reference_ID/459/currentimage/1/referencecategory_ID/17.cfm; (2013-12-10)]

041: **Versuchsschale** [Gebaute Visionen - 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; 1907-2007; Beuth; 1.Aufl. 2007; ISBN 978-3-410-65044-7; S 94]

042: **Hoto Fudo-Restaurant, Mt. Fuji, Japan** [http://www.arup.com/Projects/Hoto_Fudo/HotoFudo_exterior.aspx; (2014-03-23)]

043: **Multihalle, Mannheim** [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Herzogenriedpark_077.jpg; (2014-03-23)]

044: **Funktionsprinzip, Bsp. Orange** [Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau, TU Wien]

045: **Funktionsprinzip, Skizze**

046: **Versuchsaufbau, "Polystyren wedge method (PoWM)"** [J. Kollegger, B. Kromoser, S. Dalinger, The building of ice and concrete shells by employing pneumatic formwork, wissenschaftlicher Artikel, Technische Universität Wien, 2012]

047: **Detail, Versuchsaufbau (PoWM)** [siehe Abb. 46]

048: **Spannvorrichtung** [Foto, Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau, TU Wien]

049: **Funktionsprinzip (PoWM)** [siehe Abb. 46]

050: **Skizze, Schnitt (PoWM)**

051: **Diagramm Höhenentwicklung (PoWM-Versuch)** [siehe Abb. 46]

052: **fertige Kuppel (PoWM)** [siehe Abb. 46]

053: **Eiskuppel in Obergurgl (PoWM)** [siehe Abb. 46]

054: **Eiskuppel in Obergurgl, innen (PoWM)** [siehe Abb. 46]

055: **Segmentierung "Pneumatic formwork method (PFM)"**

056: **Segmentierung "Pneumatic formwork method (PFM)"**

057: **Anordnung und Verbindung der Segmente (PFM)** [siehe Abb. 46]

058: **Testpneu (PFM)** [siehe Abb. 46]

059: **Eisversuch in Obergurgl I (PFM)** [siehe Abb. 46]

060: **Eisversuch in Obergurgl II (PFM)** [siehe Abb. 46]

061: **Prinzip der "Segment lift method (SLM)"**

062: **Skizze, Schnitt u. Draufsicht (SLM)**

063: **Eisversuch in Obergurgl I (SLM)** [siehe Abb. 46]

064: **Eisversuch in Obergurgl II (SLM)** [siehe Abb. 46]

065: **fertige Kuppel (PoWM)** [siehe Abb. 46]

066: **Eisversuch in Obergurgl (PFM)** [siehe Abb. 46]

067: **Eisversuch in Obergurgl (SLM)** [siehe Abb. 46]

068: **Vorbereitung Versuch "Pneumatic wedge method (PnWM)"** [Foto, Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau, TU Wien]

069: **Blick auf Versuchsanordnung (PnWM)** [siehe Abb. 48]

070: **Bewehrung der Versuchsanordnung (PnWM)** [siehe Abb. 48]

071: **Stahlring, Bewehrung (PnWM)** [siehe Abb. 48]

072: **Ansetzstelle Vorspannhydraulik (PnWM)** [siehe Abb. 48]

073: **Betonage, Sollbruchstellen (PnWM)** [siehe Abb. 48]

074: **Resultat nach Betonage (PnWM)** [siehe Abb. 48]

075: **Schlauchverbindung, Hauptpneu (PnWM)** [siehe Abb. 48]

076: **Anschlüsse, Keilpneu (PnWM)** [siehe Abb. 48]

077: **Steuereinheit, Kompressor, Seitenkanalverdichter (PnWM)** [siehe Abb. 48]

078: **Spannstelle (PnWM)** [siehe Abb. 48]

079: **Vorspannzylinder (PnWM)** [siehe Abb. 48]

080: **Hebeprozess, Anfang (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 081: **Hebeprozess, Halbzeit (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 082: **Hebeprozess, Resultat (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 083: **Überlappung (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 084: **Fertige Kuppel (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 085: **Kuppel verspachtelt (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 086: **Kuppel - close up (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 087: **Eingang Kuppel (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 088: **Kuppel, Innenraum (PnWM)** [siehe Abb. 48]
 089 - 096: **Formanalyse Halbkugel**
 097 - 104: **Formanalyse Kugelabschnitt**
 105 - 112: **Formanalyse Zylinder**
 113 - 120: **Formanalyse Kombination Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten**
 121 - 128: **Formanalyse Halbellipsoid**
 129 - 136: **Formanalyse Ellipsoidabschnitt**
 137 - 144: **Formanalyse Paraboloid**
 145 - 152: **Formanalyse Hyperboloid**
 153 - 160: **Formanalyse Hyperbolisches Paraboloid**
 161 - 180: **Variationen Kugelabschnitt**
 181 - 201: **Variationen Zylinder**
 202 - 221: **Variationen Ellipsoidabschnitt**
 222: **Kombination Kugelabschnitt und Ellipsoidabschnitt**
 223: **Kombination Kugelabschnitt und Ellipsoidabschnitt, Scheitelpunkt verschoben**
 224: **Kombination Ellipsoid-Zylinder**
 225: **Kombination Kugel-Zylinder**
 226: **Kombination Kugel-Kegel**
 227: **Kombination Rotationskörper-Kugel**
 228: **Formvariation Rautenförmiger Grundriss**
 229: **Formvariation, Grundriss gleichschenkliges Dreieck**
 230: **Formvariation eingeschnittenes Kissen**
 231: **Formvariation, eingeschnittene Freiform**
 232: **Formvariation, abgeschnittener Ellipsoid**
 233: **Neue Testform, Grundriss und Ansichten**
 234: **Neue Testform, Konturkurven 3D**
 235: **Neue Testform, 3D-Darstellung**
 236: **Neue Testform, segmentiert 3D**
 237: **Neue Testform, abgewickelt**
 238: **Neue Testform, Plandarstellung**
 239: **Fräsplan Einzelteile**
 240: **Aufbau Versuchsanordnung, neue Testform 1:5**
 241 - 244: **Anhebeprozess, Versuchsanordnung 1:5**
 245: **Spannvorrichtung, Versuchsanordnung**
 246: **Ergebnis 1:5 Versuch**
 247: **Szenario Nutzung Infopoint** [Hintergrundbild für Montage: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dorfplatz_an_der_Linde,_Villingen_Juli_2012.jpg; (2014-03-25)]
 248: **Nutzungsszenario Veranstaltung**
 249: **Szenario Pavillon, Konzert** [Hintergrundbild für Montage: http://cms2.b-es.de/Presseservice/ArtikelDetails/tabid/1139/mid/2068/dnnprintmode/true/ItemId/68/language/de-DE/Default.aspx?SkinSrc=%5BG%5DSkins/_default/No%20Skin&ContainerSrc=%5BG%5DContainers/_default/No%20Container; (2014-03-25)]
 250: **Szenario Ausstellung, Galerie**
 251: **Szenario Grünbrücke, Wildquerung**
 252: **Szenario Konzert, Messe, Veranstaltung** [Hintergrundbild für Montage: <http://www.koonis.com/2012/05/daawo-muuqaalka-cusub-ee-allianz-arena/>; (2014-03-25)]
 253: **Szenario Sporthalle, Stadion** [Vordergrund für Montage: http://isogermany.com/wp-content/uploads/2011/12/Rogers-Arena_Anika-M..jpg; (2014-03-25)]

Danksagung:

Ich möchte mich bei O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. Johann Kollegger für die fachliche Betreuung bedanken und dafür, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, am Institut für Tragkonstruktionen (Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau) mein Diplom zu machen.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Benjamin Kromoser, der mir bei der Durchführung der Diplomarbeit stets eine große Hilfe war und mich immer kompetent, engagiert und freundschaftlich unterstützt hat.

Zudem möchte ich mich bei meinen Freundinnen und Freunden bedanken, die mich in jeder Lebenslage begleiten und unterstützen.

Im Besonderen möchte ich mich bei meiner Freundin Elisabeth Metzler bedanken, die immer für mich da war und mir stets Motivation für diese Arbeit gegeben hat.

Großer Dank vor allem auch an meine Familie, an meine Brüder und im speziellen an meine Mama und meinen Papa ohne die dieses Studium nicht möglich gewesen wäre und dafür, dass sie mich immer in Allem mit größtmöglichem Einsatz unterstützt und motiviert haben – Danke!