

This course is one of the few academic in-depth investigations into the planning of membrane structures, drawing on an interdisciplinary collaboration between architects and specialist planners. Before drawing the first sketch this translates into nothing less than form-finding. Model experiments as well as wide-ranging research on new rendering and calculation programmes preceded the concept. Upon completion of this course students will be able to:

- Explain the building history of membrane structures by using relevant examples.
- Broaden their knowledge of form-finding, use of materials, construction details and building components.
- Define planning parameters and quality standards for tensile structures.
- Work in an interdisciplinary fashion with those parties involved in the construction and planning.
- Pursue the classical route of inventing, designing and developing technical objects.

Released as Volume 20 in the series *Interior Architecture*



# Research-Based Design Membrane Structures

Natascha Meuser, Robert Off,  
Sarah Stipek



**Hochschule Anhalt**  
Anhalt University of Applied Sciences

# Research-Based Design

## Membrane Structures

# Content

## INTRODUCTION

- 9 **Syllabus**
- 11 **The Membrane Next to Bauhaus**

## BASICS

- 15 **Membrane Structures**  
First Steps Towards Form Finding  
[Romualdo Rivera Torres](#)
- 35 **The Lightness of Borders**  
Ten Tensile Zoo Structures  
[Natascha Meuser](#)
- 47 **Flächentragwerke**  
Landschaften mit Konstruktion formen  
[Gerd Schmid](#)
- 57 **Netzkonstruktionen**  
Am Beispiel einer Schimpansenanlage  
[Marlene Thimet](#), [Wolfgang Betzler](#),  
[Bianca Bühler](#)

## PROJECTS

- 67 **Parametric Design**  
Between Architectural Intension  
and Form-finding  
[Barakat Khaysam](#)
- 75 **The Dynamics of Membranes**  
Deformation and Oscillation  
[Mohamed Gouda Shehata/](#)  
[Chin Ai Ong](#)
- 81 **The Spider-like Structure**  
What Eight Feet can Carry  
[Anotidaishie Mavazhe/](#)  
[Jameel Trowers](#)
- 87 **Membrane Structures**  
It All Starts With a Dot  
[Seshiena Lotsu](#)
- 91 **Ring Compression with  
Central Support**  
How Table Legs Support the Structure  
[Ebru Aykan/Mehmet Caferoglu](#)
- 97 **Arch Supported Tensile Roof**  
Anticlastic versus Synclastic  
[Nurin Abdullah/Yan Thum](#)

## APPENDIX

- 102 Making-of
- 107 Bibliography
- 107 Authors and Participants

»My hope is that light, flexible  
architecture might bring about  
a new and open society.«

Frei Otto

**Introduction**

**Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896**

Из альбома «Виды работ, произведенных Строительной канторой инженера А. В. Бари на Всероссийской выставке в Нижнем Новгороде»

**All-Russia Industrial and Art Exhibition, Nizhny Novgorod, 1896**

From the Album "Types of Works Accomplished by the Construction Office of Alexander Bari at the All-Russia Industrial and Art Exhibition in Nizhny Novgorod"

Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде / All-Russia Industrial and Art Exhibition, Nizhny Novgorod



24. Овальный павильон фабрично-заводского отдела в процессе покрытия сетки кровлей  
15 декабря 1895

25. Павильон-ротонда строительного и инженерного отделов с висячим мембранным покрытием в центре и сетчатым висячим покрытием  
15 августа 1895

26. Павильон управления казенных железных дорог в процессе строительства  
20 февраля 1896

24. Oval Pavilion of the Factory Department During Construction of the Roof over the Gridshell  
December 15, 1895

25. Pavilion-Rotunda of the Construction and Engineering Departments with Diagrid Roof and Tensile Gridshell  
August 15, 1895

26. Pavilion of the State Railways under Construction  
February 20, 1896

146 / 147

# Syllabus

Hyperboloid Structures:  
The Tensile Steel Diagrid Shell of an Oval Pavilion (1895)  
Architecture: Vladimir Grigorevich Shukhov (1853–1939)  
Source: Shchusev State Museum of Architecture, Moscow

The Bauhaus campus establishes an important link between the city and the University of Applied Sciences. A new meeting place is to be created on the so-called Seminarplatz. Against this backdrop, students were asked to work on the design of a tented roof of striking dimensions which would simultaneously serve as a work of art, an icon and a symbol. The pavilion to be designed by the students was not to be of conventional architecture but was rather to align itself with the ephemeral character of the Bauhaus concept by the creation of a tented roof of light-weight structure, partially covering an existing park. Students conducted various experiments consistently implementing the concept of this tent structure. Countless model experiments as well as wide-ranging research on new rendering and calculation programmes preceded the concept of the pavilion.

### Design Project Framework

The central aim of this course is to enable students to learn how to independently gain a deep understanding of a problem area, how to formulate this problem on the basis of thorough research and how to develop an individual, interdisciplinary, and methodical design solution. Upon completion of this course students will be able to:

- Use scientific research to design light-weight tensile structures.
- Explain the building history of membrane structures by using relevant examples.
- Determine fundamental architectural principles and forms to understand tensile structures.
- Define planning parameters and quality standards for tensile structures.
- Work in an interdisciplinary fashion with those parties involved in the construction and planning.
- Broaden their knowledge of form-finding, use of materials, construction details and building components.
- Pursue the classical route of inventing, designing and developing technical objects.

### Project Design Brief

By experimenting with the principles of form-finding students begin to build an understanding of the requirements of this project. Structural principles were taught in cooperation with the Membrane Structures degree programme. Students explored and refined their design as part of Textile, or Tensile Constructions or Lightweight Membranes, engaging with the subject matter systematically through exercises and computer programmes.



## The Membrane Next to Bauhaus



**Dessau Campus** of the *Anhalt University of Applied Sciences* is located west of the station on a site that was predominantly undeveloped up until 100 years ago. Upon completion of the Bauhaus in 1926 by Walter Gropius, students were able to extend their gaze across sprawling fields as far as the nearby Junkers Flugzeugwerke A.G. It was only in the 1930s that the district of Georgenbreite acquired its hither to characteristic appearance comprising terraced buildings, steep roofs and suburban green spaces. The most visible changes to the site have taken place recently. The demolition of individual buildings between the Bauhaus and the main train station paved the way for the new buildings. An academic belt thus emerged between one of the oldest intercity railway lines in Germany and a world-renowned architectural icon which is not solely a source of creative inspiration for students at Dessau. Seminarplatz functions as a green link in the centre heart of the campus and is the scene of the following projects.



Aerial images: DOM publishers, 2016  
Plan: Stadtgrundkarte Dessau, 2012

»Most architects think in drawings, or did think in drawings; today, they think on the computer monitor. I always tried to think three dimensionally. The interior eye of the brain should be not flat but three dimensional so that everything is an object in space. We are not living in a two-dimensional world.«

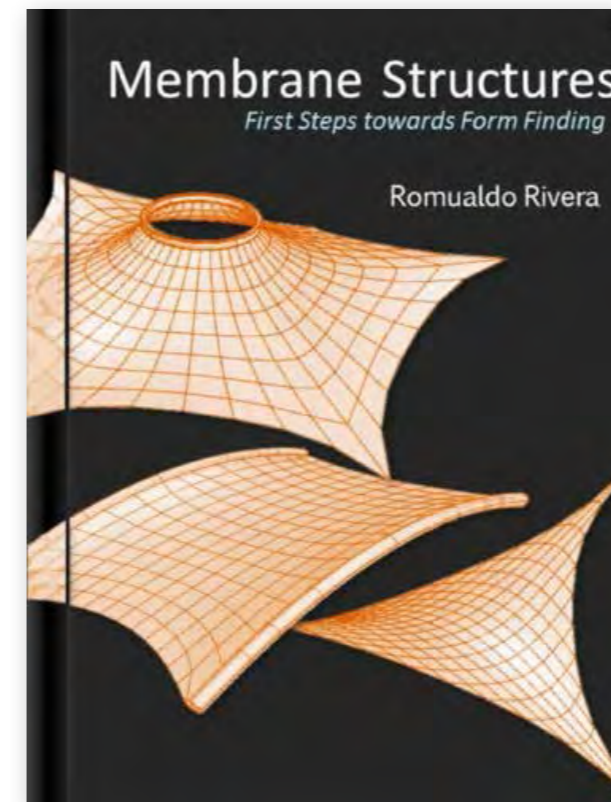


Spider web between stems of grasses.  
Source: Ruud Morijn, Stock-Fotografie

## Membrane Structures First Steps Towards Form Finding

Romualdo Rivera Torres

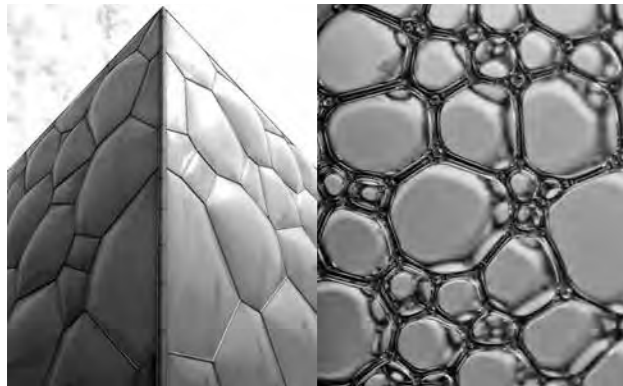
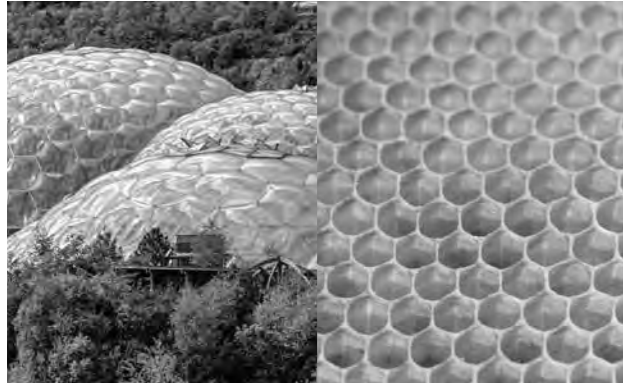
*Extract from the publication:  
Romualdo Rivera: Membrane Structures. First Steps towards Form Finding,  
Dessau 2014 (with friendly permission by the author and IMS Bauhaus®)*



The goal of this book is to take the readers through the introduction and basic understanding of the fascinating world of membrane structures. This book is a valuable guide for students who are just beginning to learn about tensile structures. They will learn how to design tensile surface structures and will be introduced to the subjects of: surface materials, elements of support, patterning, fabrication, and installation. The reader will find a lot of drawings and illustrations included in each chapter.

Romualdo Rivera: Membrane Structures.  
First Steps towards Form Finding, Dessau 2014  
*This book was written in collaboration with Raham Zarfam,  
Carlos Talavera, Thomas Van Dessel and Caglar Ozturk*





## 1. BASICS OF TENSILE STRUCTURES

### 1.1 Forms in Nature

For decades, humans have been copying, imitating, and learning from nature. In Greece, architects and engineers used nature to imitate their proportions, so that designs were in harmony with humans and nature. Today, designers are still using a constant named Phi, ( $\Phi = 1.618$ ), which was named by the architect and sculptor, Phidias. Architects, designers, and engineers, were concerned about making a connection between construction and nature. Bionics and biomimicry, are two of the movements involved with the idea of connecting nature with human inventions.

Bionics is the application of biological methods and systems found in nature. The process of 'copying, imitating, and learning from biology' was conceived by Jack Steele as early as 1960. In order to survive, we will be forced in the future to concentrate a large part of our thinking and acting to come as close as possible to a natural equilibrium between intelligent consumption of nonrenewable resources and a total recycling<sup>1</sup>. Biomimicry advocates appreciating and understanding the way nature works; nature is seen as a model, measure, and mentor. Biomimicry is an innovative method that seeks sustainable solutions by emulating nature's time-tested patterns and strategies (e.g., a solar cell inspired by a leaf). The goal is to create products, processes, and policies, and also new ways of living that are well adapted to life on earth over the long haul<sup>2</sup>. Good examples of bionics in tensile surface structures are the greenhouse *Eden Project* at Cornwall, England, United Kingdom and the *Beijing National Aquatic Center* in Beijing, China. The greenhouse structure is created with hexagon forms, the same geometry that is found in honeycombs and in the eyes of some insects. The design of the aquarium is an example of minimal surfaces using bubble films in order to obtain structural efficiency. The inverted umbrellas project from Medina Mosque in Saudi Arabia seems to imitate the bat for their structural behavior.

<sup>1</sup> Bauer, B.: *Techniques of Nature in Architecture and Design*, Dessau 2013  
<sup>2</sup> Benyus, Janine: *What is Biomimicry? In : Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, Biomimicry Institute 1997

### 1.2 Minimal Surfaces

How does nature choose its shapes? Why is the bubble a sphere? If we create bubbles using water, soap and bubble wand we will notice that the forms created by the boundary of the bubble wand are spheres. Even if the boundary has the form of a triangle, rectangle or any other shape other than a circle, the result will always be a sphere. Nature is smart, and it uses the least amount of soap film possible to create its forms. In mathematics, Minimal Surface is defined as surfaces with zero mean curvature. The equilibrium of the minimal surfaces comes from tension, where the balance in one direction is equal to the balance of the other direction. Minimal surfaces are defined as an isotropic, homogeneous surfaces stress field of constant magnitude. Isotropic is defined as uniform tension in all directions.

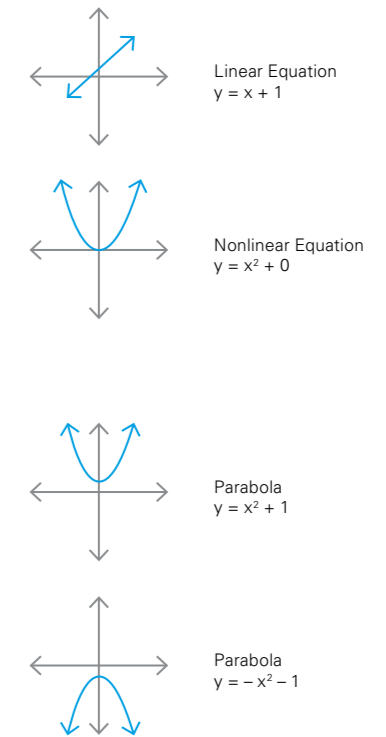


### 1.3 Basic 3D Shapes

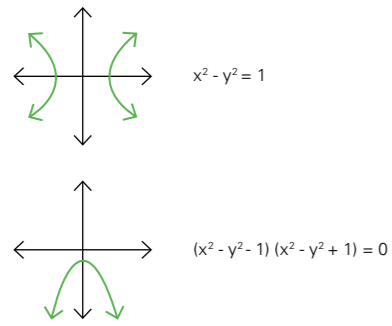
We can create different shapes by using basic mathematical equations that will draw forms on the axes of X, Y, and Z. A simple linear equation such as  $y = x + 1$  will draw a vector on the Cartesian plane. But when we want to express the forms that define the beginning of double curvature surface, then we will begin by using a non-linear equation such as  $y = x^2 + 0$  that as a result will draw a Parabola on the Cartesian plane.

#### 1.3.1 Parabola

In the next image we see how we can draw two parabolas in different directions with an equation such as  $y = x^2 + 1$  that, as a result, draws a parabola in the positive direction of the x-axis. Meanwhile, an equation such as  $y = -x^2 + 1$  draws the parabola in the opposite direction on the axis of negative X on the Cartesian plane.



1 – Eden Project at Cornwall, England, United Kingdom  
 Source: travelbild / Alamy Stock Foto  
 2 – Honeycomb  
 Source: Victor Fischer / Alamy Stock Foto  
 3 – Beijing National Aquatic Center in Beijing, China  
 Source: Christian Bauer / Alamy Stock Foto  
 2 – Bubbles  
 Source: Tracey Habden / Alamy Stock Foto  
 2 – Piazza of the Prophet's Holy Mosque, Madinah, Saudi Arabia  
 Source: Citizen 59 / Alamy Stock Foto  
 2 – Bat  
 Source: one eye / Alamy Stock Foto



### 1.3.2 Hyperbola

The following equations introduce a very important shape that will help us to define what the basic and first form of a double curvature surface will be. With the equation  $x^2 - y^2 = 1$  we can draw on the Cartesian plane the shape of a hyperbola. The equation  $(x^2 - y^2 - 1)(x^2 - y^2 + 1) = 0$  will draw two shapes of a hyperbola on the Cartesian plane. If we take a look at the second equation  $(x^2 - y^2 - 1)(x^2 - y^2 + 1) = 0$  from a top view, we can already begin to define that it looks like a four points hyper.

We can visualize how it will look in 3D on the axes of X, Y and Z. The image (1) shows a Hyperbolic Paraboloid (double curvature) with two parabolas (red) in opposite directions and one hyperbola (green). The image (2) shows an Elliptic Paraboloid (double curvature) with two parabolas (red) in opposite directions and a circumference (blue).

### 1.3.3 Quadratic Surfaces

#### Hyperbolic Paraboloid

The Hyperbolic Paraboloid is the most basic form in tensile surface structures. It's a quadratic surface with two curvatures in opposite directions and the equation can be expressed as  $(z/c) = (x^2/a^2) - (y^2/b^2)$ .

#### Elliptic Paraboloid

The Elliptic Paraboloid is the basic form of tensile surface structures normally used for pneumatic surfaces. It's a quadratic surface with no curvature in the same direction and the equation can be expressed as  $(z/c) = (x^2/a^2) + (y^2/b^2)$ .

### 1.3.4 Antilastic and Synclastic Surfaces

In these next images, we will get two types of shapes that will express what tensile surface structures are all about. Two Parabolas or curvatures in opposite directions defined as Anticlastic forms and two Parabolas or curvatures in the same directions defined as Synclastic forms. In the case of the Anticlastic forms, we can draw it as Hyperbolic Paraboloid (1) and in the case of the Synclastic form, we can draw it as Elliptic Paraboloid (2).

### 1.3.5 Gauss Curvature

In Gauss curvature, the result of the  $K = (k_1)(k_2)$  as a negative value will draw a hyperbolic shape and this negative result at each point of the surface will guarantee the equilibrium under any applied load. The  $K = (k_1)(k_2)$  as the positive value will draw a sphere shape (1) and  $K = (k_1)(k_2)$  as 0 value will draw non-double curvature shape (2), a cylinder, for example. The Gaussian curvature is named after Carl Friedrich Gauss, who published his theorem in 1827.

### 1.4 Basic Forms

The most basic shapes found in tensile structures are the Hypar, Conical, and Arches. These 3D forms are the surfaces generated by tension in equilibrium, and therefore can be considered as organic forms. Form follows forces and forces follow forces.

#### Hypar Form (1)

The Hypar is an anticlastic form that has the look of a saddle and is a double curvature shape defined by two curves in the positive direction and two curves in the negative direction. In this example we have a four-point hyper.

#### Conical Form (2)

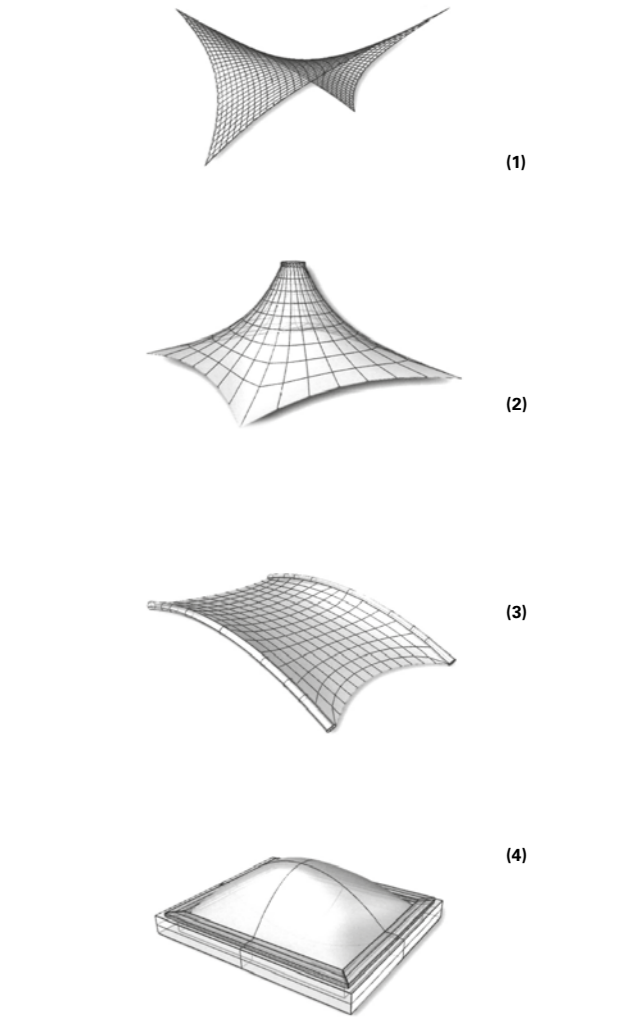
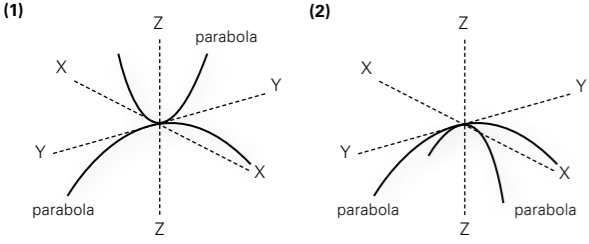
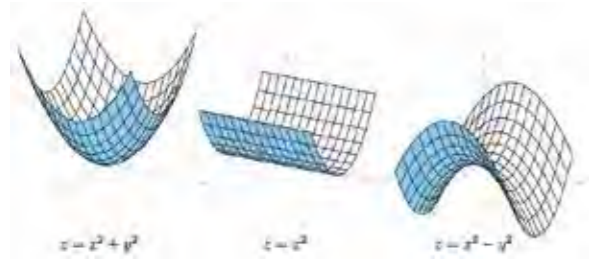
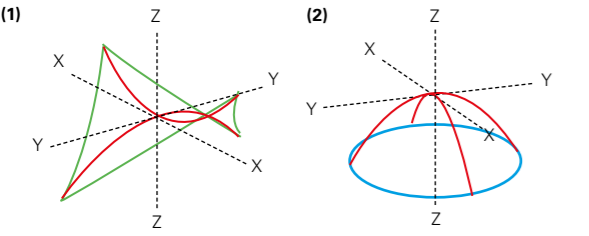
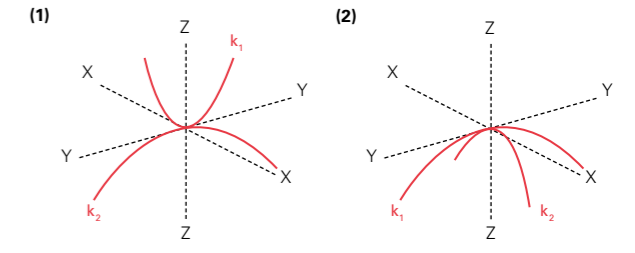
The Conical Form has a double curvature, with a circular high point and a rigid or flexible base. This either symmetric or asymmetric, with more than one high or low point. The high point can be supported by inner or outer compression elements.

#### Arch Form (3)

The Arch Form can be described as two or more steel arched structures holding tensioned surface material. The Arch Tensile Structure can be found with rigid or flexible edges. In this next image, we can see that the form of the tensile surface structure is created on two steel arches and the boundaries have flexible edges.

#### Pneumatics (4)

Pneumatics is a synclastic kind of lightweight structure. It can be any form depending on the steel frame. Its surface is created with film. The double curvatures of the form are in the same direction.





Eye of Caribbean Reef Shark (*Carcharhinus perezi*), showing nictating membrane closing to protect the eye. Source: Jeff Rotman / Alamy Stock Foto

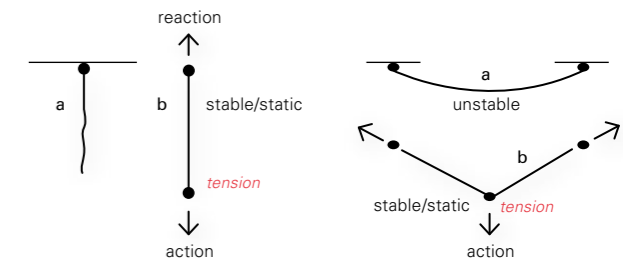
## 2. Structural Principles

A tensile surface structure is a combination of a surface material (membrane) and elements of support (steels). In this chapter, we will describe the most basic principles needed to obtain structural efficiency in the design of the tensile surface structure.

### 2.1 Applying of Tension

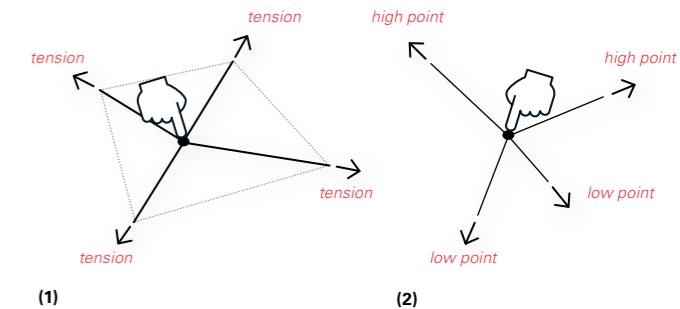
If a rope hangs freely under its dead weight it will take the shape of an unstable line. If we tension that same rope (left image) from its two endpoints, then we create tension and therefore stability. If a rope hangs horizontally from its two ends, then a catenary curve and an unstable form are created. If that same rope (right image) is tensioned horizontally from the two endpoints, and a third tension point is added, then we create a stable rope.

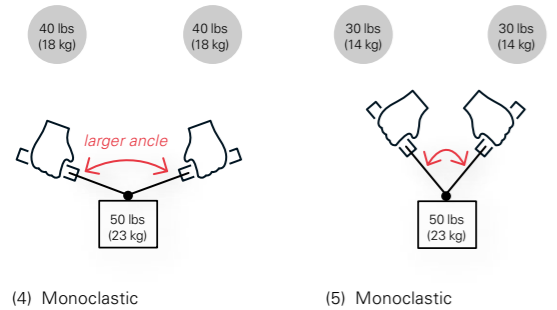
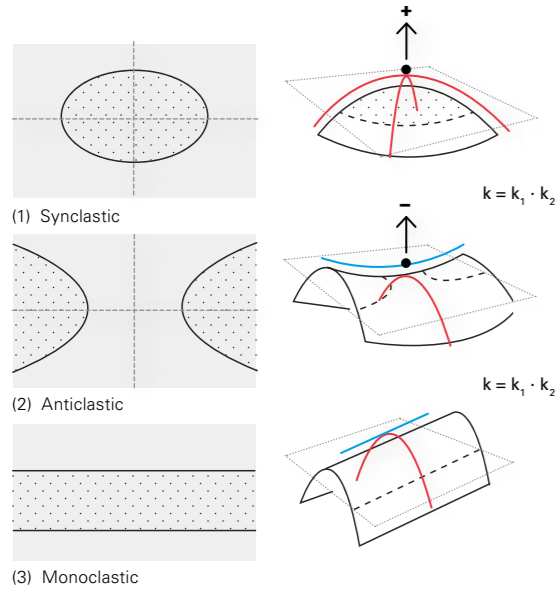
We can say that if the rope is in tension it is static, at rest without movement. In order to have a static structure, we need to have a state of equilibrium for the structure. When all the forces that act upon an object are balanced then the object is in the state of equilibrium without any movement.



### 2.2 Double Curvature

In order to create a form that could comply with structural principles of tensile surface structures, we need to have double curvature. In image (1), we can see that if we take the same example (2) and convert it into two higher points and two lower points, then we can create a shape with double curvatures that is stable and compliant with the tensile surface structures. Note that now, if we press the interstation of the two attached ropes, it gets a stable form.





### 2.3. Anticlastic versus Synclastic

The forms that we will be creating for tensile surface structures will have two type of shapes; Anticlastic or Synclastic. If we enter the equation  $(z / c) = (x^2 / a^2) - (y^2 - b^2)$  into a 3D mathematical software, we will notice that when changing the symbol from positive (+) or negative (-) the result of the surface will be a conversion from an Anticlastic (2) surface to a Synclastic (1) surface.

So as a structural principle for the tensile surface structures, we need to create 3D forms of Anticlastic shapes or Synclastic shapes. The anticlastic forms are normally used on membrane surface materials and the Synclastic forms will normally be used on film surface materials. We will see the difference between membrane and film materials in chapter 3.

### 2.4 Larger versus smaller Angle

If you ever took a rope and tried to lift an object (for example a chair), you will know what the next structural principle is all about. By lifting an object at a larger angle (4), the lifting will feel more difficult. Then if the same amount of weight is taken and is lifted at a smaller angle, it will feel easier and lighter to accomplish.

### 2.5 Higher versus lower Curvature

This next principle is a consequence of the previous open versus closed angle principle. The two curvatures of the surfaces are compared to the angle in the previous exercise. The examples show a similar behavior on the surface with higher or lower curvature. As already known, a tensile surface structure is created with a combination of surface and steel elements of support. As a result of this the higher and the lower curvature has a direct effect on the cost of the design, materials, and installation. Thus a surface with less curvature requires more force. For this reason, the steel elements will be larger and the surface will need to carry more force and less stiffness in the membrane surface.

A surface with a higher curvature can be created with less force in comparison to a surface with less curvature. In this example, the steel elements will be smaller and the surface will need to carry less force. So, the higher curvature will result in more stiffness in the membrane surface and a low curvature will result in less stiffness.

### 2.6 Boundary Curvature

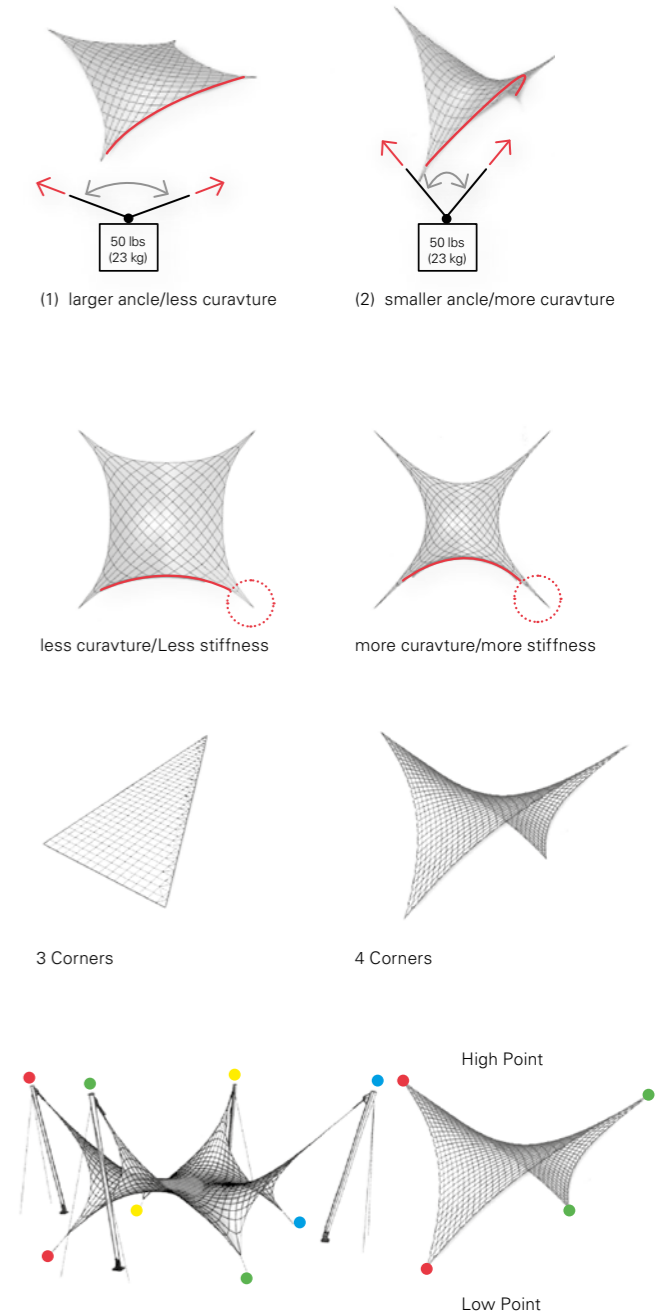
The two hyperbolas of the hyperbolic paraboloid surface are also compared to the angle in the previous principle. The examples show the different behaviors of a surface with a less curved boundary and a more curved boundary. The boundary with less curvature will result in less stiffness and the boundary with more curvature will result in more stiffness on the surface material.

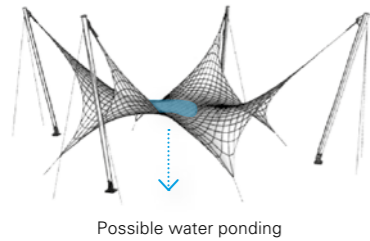
### 2.7 Flat versus Curvature

It's not impossible to create a double curvature with a three corner surface. In order to do so, we need, to begin, with four comers (also known as points, anchors, fixed points or fixed vertex). Therefore, creating flat surfaces is not a choice in tensile surface structures.

### 2.8 Pair of Numbers

One cannot say that this is a real structural principle, but it really helps while learning to create 3D forms for tensile surface structures. It's recommended to begin creating the new 3D forms using a pair of numbers for the corners instead of odd numbers. The reason is that it will be easier to create the higher curvature of the anticlastic forms with pair numbers than using odd numbers. Eventually, we will be able to create any type of anticlastic forms with any quantity of corner, but it will take some experience to achieve the higher curvature as a result.



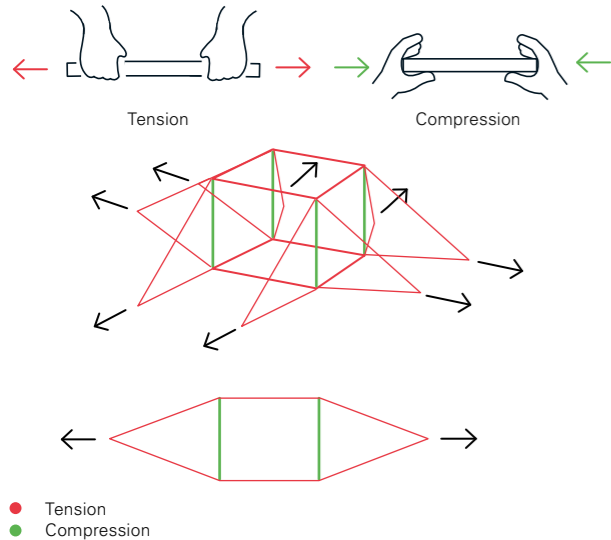


### 2.9 No Flat Surface

To avoid water ponding on the surface material, it's important that the design of the 3D form doesn't have any flat areas that could potentially accumulate water. This would cause a heavy load on the membrane surface material culminating in a collapse of the structure.

### 2.10 Water Drainage

While designing a tensile surface structure, it is always important to think about how to remove the water from the surface. As simple as it looks, it's at this stage of the design where we can make the most mistakes. A good way of visualizing this can be accomplished by making a small model and studying the behavior of water drainage.



### 2.11 Tension versus Compression

Tensegrity structures are shapes supported by the combination of members in tension and compression. The term Tensegrity (tension integrity) was created by Buckminster Fuller in the 1960 and is often used on tensile surface structures of any size and large span structures.

### 3. Form Finding

The first step in designing a membrane structure is to find the final form. We can accomplish this task by using Form Finding. The art of Form Finding is to find the optimal deflection and the final visual shape due to a given stress distribution acting on the deformed structure. The process of Form Finding has to involve physics, the study of matter and its motion through space, along with the force concept.

For example, we can draw beautiful 3D shapes with computer software, but that does not guarantee that the shapes will work in a real-life project. When working with membrane structures, it is always advised to build physical models of your structure before, or as you work with your model on the computer.

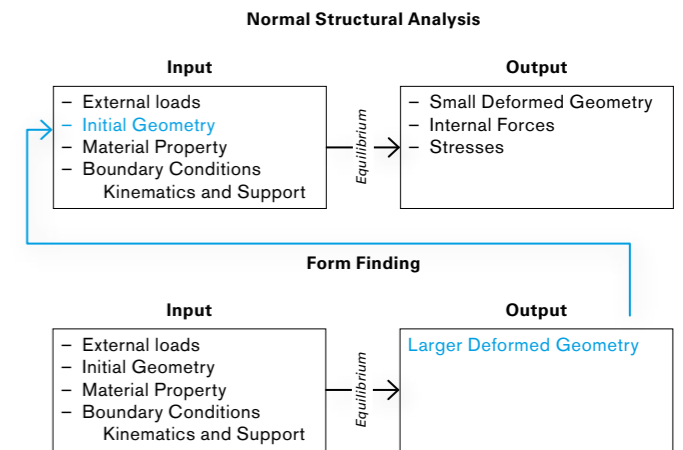
### 3.1. Form Finding Principles

The following shows structural principles that we need to perform at the Form Finding stage:

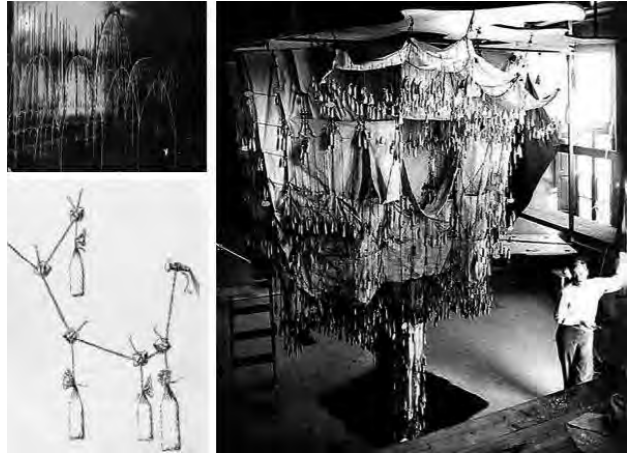
1. Applying of Tension
2. Double Curvature
3. Anticlastic vs Synclastic
4. Larger versus Smaller Angle
5. Higher versus Lower Curvature
6. Boundary Curvature
7. Flat versus Curvature
8. Points as Pair of Numbers
9. No Flat Surface
10. Water Drainage

### 3.2 Form Finding versus Structural Analysis

There is a big difference between the design process for a building versus the design process for tensile structures. Diagram (1) shows a normal structural analysis with the following input: External Loads (rain, wind, snow, etc.), Initial Geometry (we normally know if the house will have one or two levels, stairs, columns, etc.), Material Property (we normally know if the house is going to use bricks, wood, concrete, steel, etc.) and Boundary Conditions. Computer software uses this information to find the equilibrium and output, which in this case will be: small deformed geometry, internal forces, and stresses. In the case of tensile structures, we see in the image below the differences in the Form Finding process. For the Form Finding design process, the inputs used to find the final form are External Load, Internal Forces, Stresses and Boundary Conditions. Once the input is entered into the computer software to find the final equilibrium, we get the output of Deformed Geometry. The big differences are that in Normal Structural Analysis we have the Initial Geometry as the input of the process and Internal Forces, Stresses as the output. In Form Finding, we have the Larger Deformed Geometry as a result of the output process and the Internal Forces and stresses as the input in order to obtain the final form.



(1)



One of the methods of form-finding through gravitation is the use of upside-down hanging gravity models, introduced by the Spanish architect Antonio Gaudi. Souce: Antonio Gaudi Archive

### 3.3 Form Finding Approaches

There are two approaches to form finding, physical approaches, and numerical approaches. The most common methods of Form Finding in physical approaches are Textile Models, Soap Film, and Reversal of the load figure. The most common methods of form finding in Mathematics and Computer simulations are *Force Density Method*, *Dynamic Relaxation*, *Non-Linear FEA* methods and Updated *Reference Strategy*.

Frei Otto began producing membrane structures by experimenting with the physical approach of soap film in the 1950s. He developed the modern tensioned membrane structures based on the concept of minimal surfaces as described in Chapter 1.

The art of designing a membrane structure is the ability to control the perimeter, the conditions and the support geometry thereof so that it can generate and obtain the best form for a particular purpose.

#### 3.3.1 Physical Approaches

Physical Models was the method used many years ago when there were no computers. In the physical model method, we find: Textile Models, Bubble Soap, Ruled Surfaces and Reversal of the load figure. Today this method remains useful and practical. It is always a good idea to check the feasibility of Form Finding, to study and to show a model of the structure to your clients. Making physical models is practically a must in the world of tensile surface structures design.

*Textile Models:* can emulate the physics of a membrane structure by using elastic polyurethane fabric or Lycra. This model can assist in the details of the structure to verify the stability and to see the aesthetic effect and can also be part of the project documentation.

*Reversed Hanging Models:* Form finding through gravitation is also known as Reversal of the Load Figure, Suspended Model or Reversed Hanging.

*Soap Films Models:* Soap Film Model is an easy and economical method using soap, formed only within the perimeter of a system where the geometry allows for the balance of tensions between the molecules of the film and the structure system. The Soap Film method has to be used fast, cannot be touched, is short lived and in order to keep the design you must take pictures of the forms.



Experimenting with Soap Bubbles. Image: Institut für leichte Flächentragwerke (IL) der Universität Stuttgart

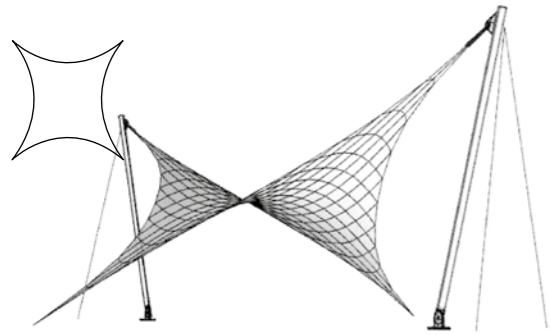
*DR-Dynamic Relaxation:* The dynamic relaxation method is overcoming the indeterminacy of the tangential positions of the nodes. It is based on the second Newtonian law of motion: The structure is modelled by nodes with concentrated masses on which not only static forces but also inertia and damping forces act. The nodes are linked by discrete finite elements representing membranes and cables. The equilibrium shape is seen as the rest position of a fictive damped oscillation of the system.

*FEM - Finite Element Method:* The principal idea of the finite element method is to reduce a continuous problem to a problem of a finite number of discrete parameters. The solution of the discrete problem gives an approximation of the continuous one. Here, we assume that the displacement field can be described by a number of discrete displacement values which are defined at the finite element nodes.

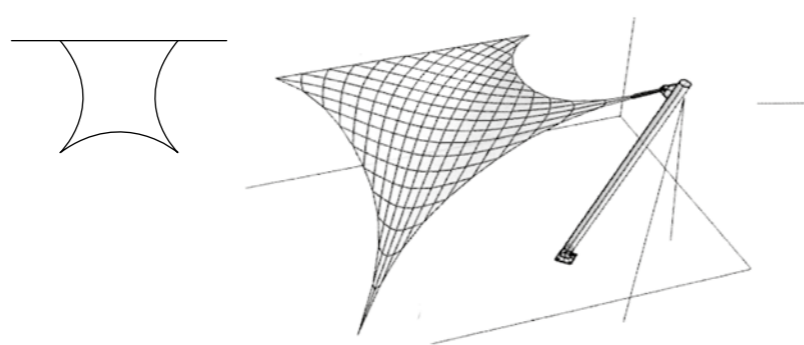
*URS - Update Reference Strategy:* The updated reference strategy (URS) uses general mathematical methods to stabilize the singular problem given in the previous section. The idea is to modify the original, singular problem with a related one which fades out as we approach the solution. Therefore the principle will be expanded by an additional term which describes an alternative formulation of the internal virtual work.

### 3.4 Form Finding Examples

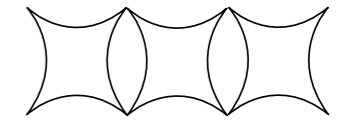
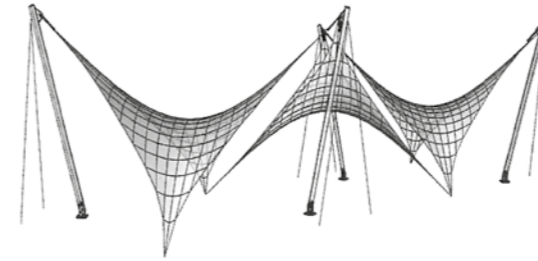
#### 3.4.1 Basic to Advance Hypar Form Finding



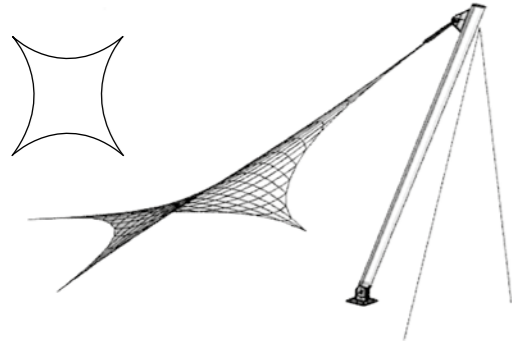
Hypar with masts at the two highest points and with the lower point grounded to floor level.



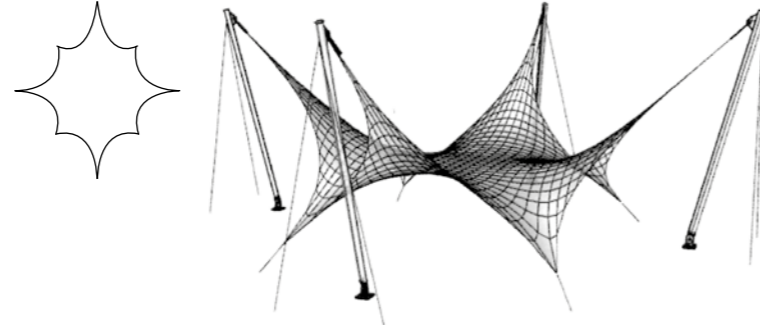
Hypar with one high point on the mast, one lower point attached to the ground and a rigid edge attached to the wall.



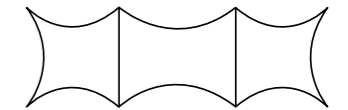
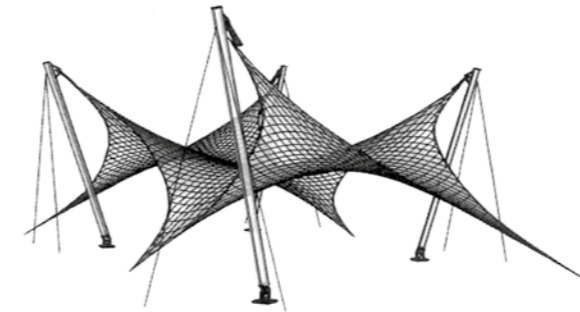
Three Hypar with four corners in combination with openings between the edges, four high points on masts and four lower points attached to the ground.



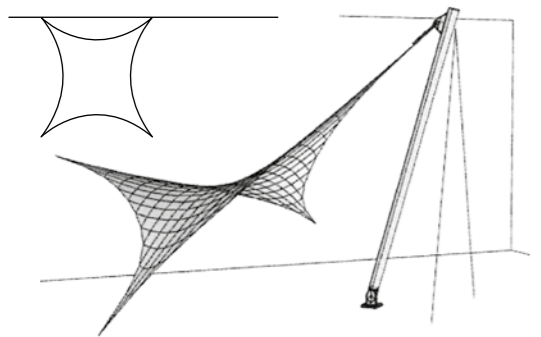
Hypar with one high point and three lower points attached to the ground.



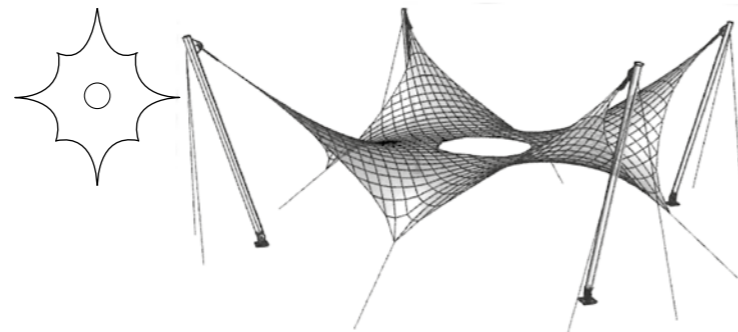
Hypar with eight corners, four high points on the mast and four lower points attached to the ground.



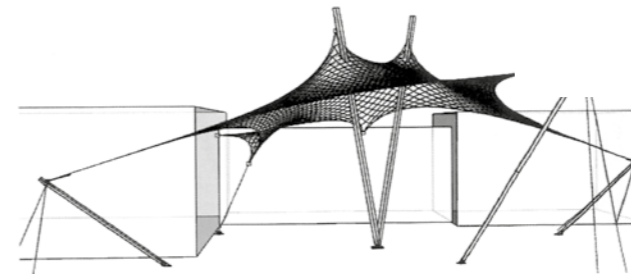
Three Hypar with four corners in combination with closed adjoining edges, four high points using four masts and four lower points attached to the ground.



Hypar with one high point on the mast, two points attached to the wall and one lower point attached to the ground.



Hypar with one high point on the mast, two points attached to the wall and one lower point attached to the ground.



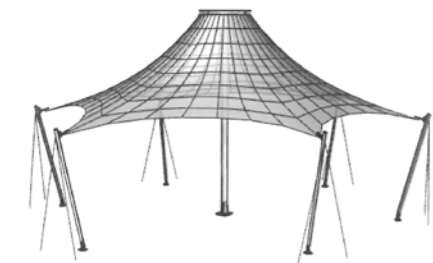
Hypar with eight corners, two high points on eye loops, three high points on masts, and three points on the walls.

### 3.4.2 Basic to Advance Conical Form Finding

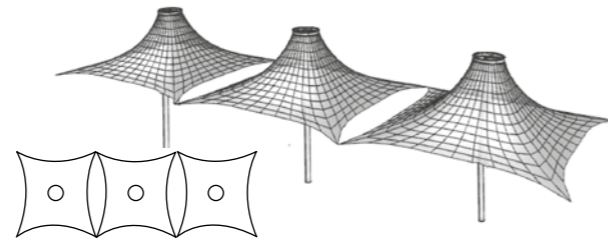
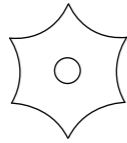


(1) Rigid clamped ring (2) Eye loop (3) Suspended high garland edge (4) Hump

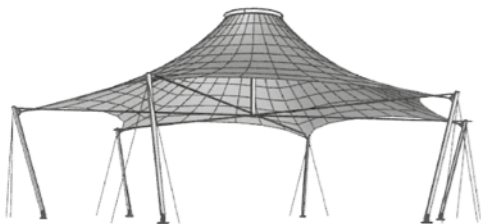
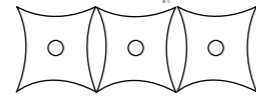
Conical surface high points



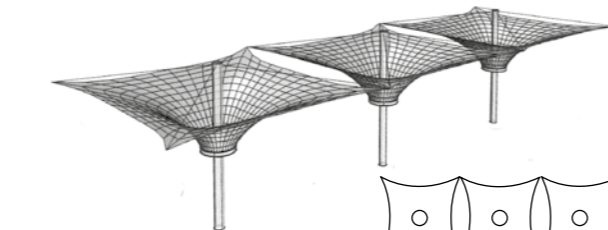
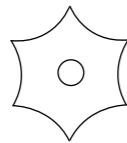
Conical with six high corners, one center mast and a ring at the high point.



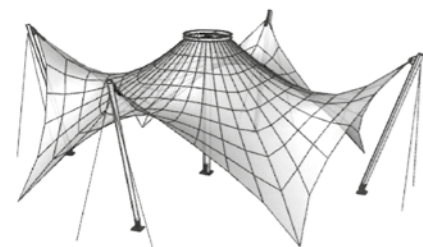
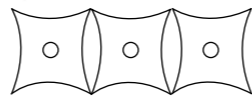
Three Conical with four corners in combination, openings between the edges and three masts at each high rigid clamped ring.



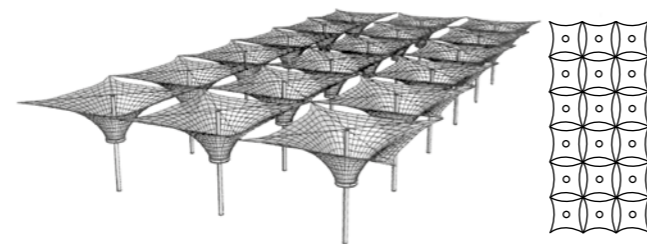
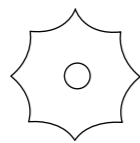
Conical with six high corners, ring at the high point and flying mast in order to avoid a mast located at the center of the floor space.



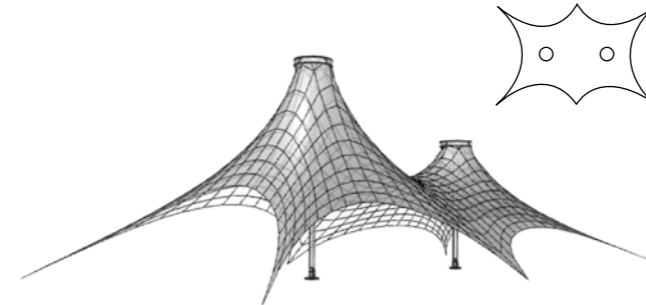
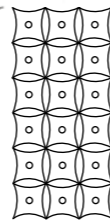
Three Inverted Conical with four corners in combination with openings between the edges, three masts, and three low rigid clamped rings.



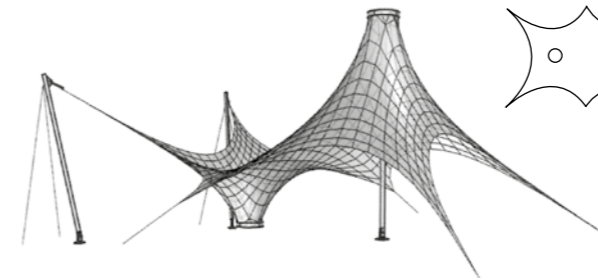
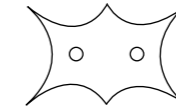
Conical with eight corners, four on high points and four on lower points attached to the ground.



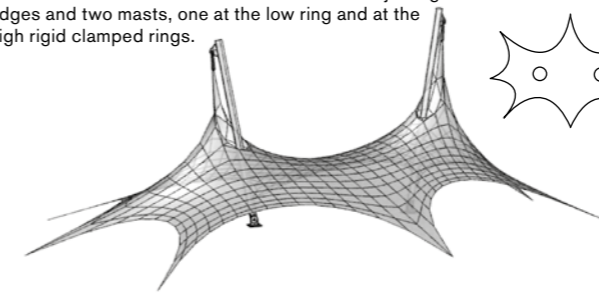
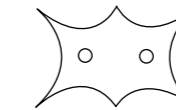
Eighteen Inverted Conical with four corners in combination, openings between the edges and a mast at each low rigid clamped ring.



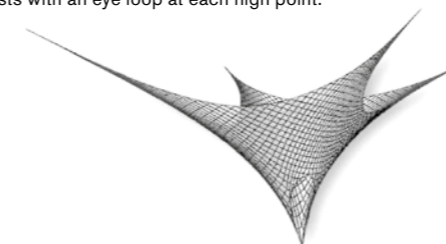
Two Conical with four corners in combination with closed adjoining edges and two masts at each high rigid clamped ring.



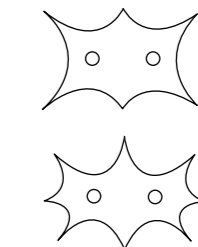
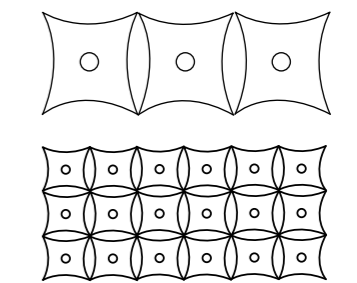
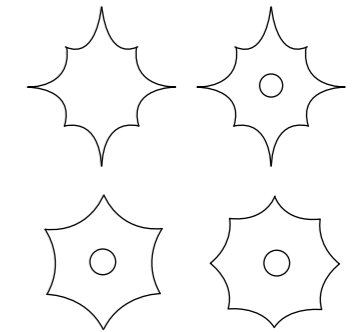
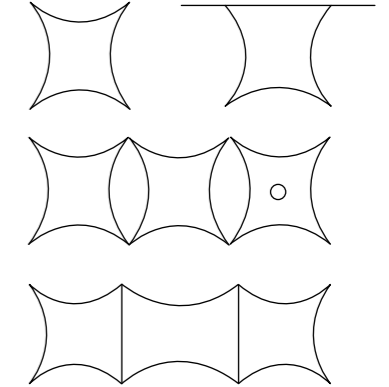
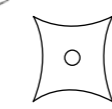
One Inverted Conical and One High Point Conical with four corners in combination with closed adjoining edges and two masts, one at the low ring and at the high rigid clamped rings.



Two Conical with five corners in combination with closed adjoining edges and two inclined masts with an eye loop at each high point.

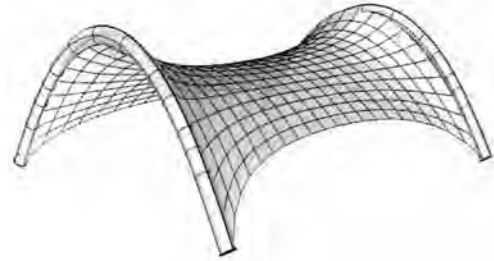


Inverted conical surface with four corners and an eye loop at the lower anchor points.

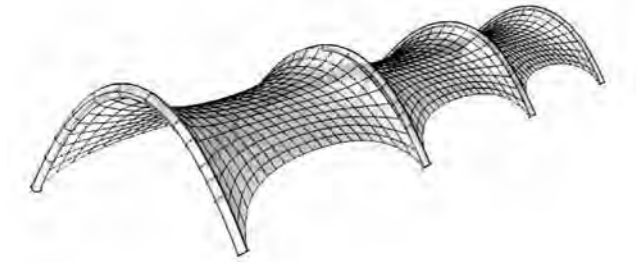




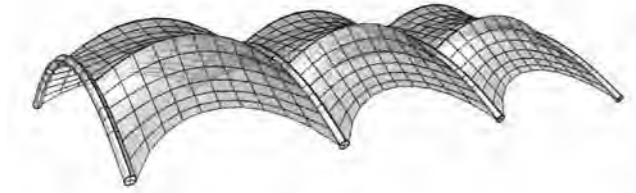
### 3.4.3 Basic to Advance Conical Form Finding



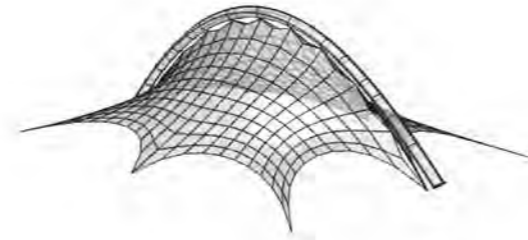
Two Conical with four corners in combination with closed adjoining edges and two masts at each high rigid clamped ring.



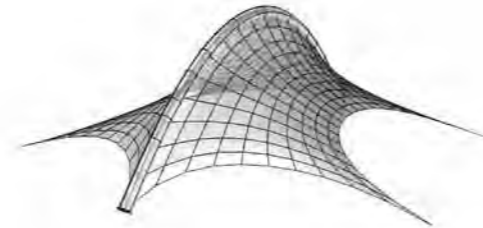
One Inverted Conical and One High Point Conical with four corners in combination with closed adjoining edges and two masts, one at the low ring and at the high rigid clamped rings.



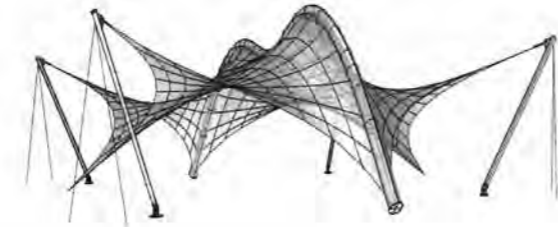
Three-Arched surfaces in between ten arched structures with rigid edges attached to keder rails and six flexible edge cables.



Arch surface supported outside by an arched beam and cable edges, six corners with flexible edges attached to the ground.



Arch surface with one main arch structure, with membrane attached to a rigid keder rail at the arch, and six corners with flexible edges attached to the ground.



Arch surface supported outside by an arched beam, the membrane is attached to a rigid keder rail at the arch and the six corners with flexible edges attached to the ground.

#### List of Free Share and License Software

- Formfinder [www.formfinder.at](http://www.formfinder.at)
- Ferrari Sketch [www.sergeferrari.com](http://www.sergeferrari.com)
- Kangaroo [www.grasshopper3d.com](http://www.grasshopper3d.com)
- Membranes [www.membranes24.com](http://www.membranes24.com)
- Rhino Membrane [www.food4rhino.com/app/rhinomembrane-v20](http://www.food4rhino.com/app/rhinomembrane-v20)
- ixForten [www.ixray-ltd.com](http://www.ixray-ltd.com)
- ixCube [www.ixray-ltd.com](http://www.ixray-ltd.com)
- Easy [www.technet-gmbh.com](http://www.technet-gmbh.com)
- Membrane NDN [www.ndnsoftware.com](http://www.ndnsoftware.com)
- Mpanel [www.meliar.com](http://www.meliar.com)



A sail is a tensile structure made from fabric or other membrane materials—that uses wind power to propel sailing craft.  
Source: Martin Almqvist/Alamy Stock Foto

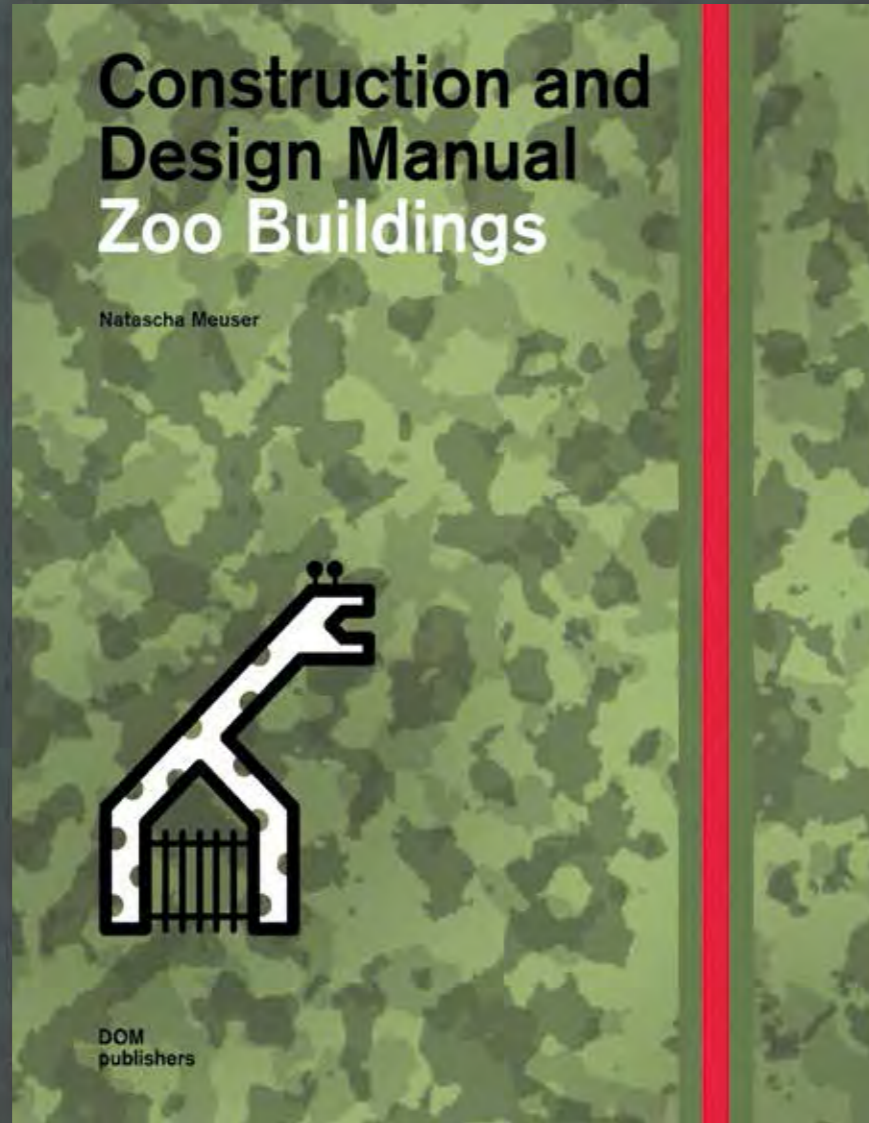
This is the first ever manual to systematically delve into the zoo as an architectural typology. German architect Natascha Meuser examines five generations of zoological structures in order to show that zoo architecture has always incorporated social values, fostering the coexistence of humans and animals, ever since the opening of the first scientifically run zoo.

This manual presents the documentation of thirty historical, pioneering zoo buildings that set new standards regarding both function and aesthetics. Moreover, it offers an in-depth analysis of fifty international zoos that have been built over the last twenty years. It includes to-scale floor plans, elevations, and sections, as well as large photos that offer previously unseen insights. The author also presents ten design parameters that can serve as guidelines while planning a zoological structure.

Die folgenden Texte sind Auszüge aus der o.a. Publikation:

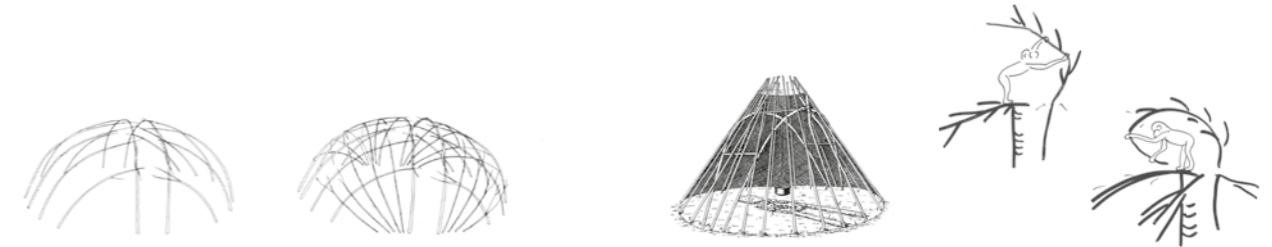
Gerd Schmid  
*Flächentragwerke Landschaften mit Konstruktion formen*

Marlene Thimet, Wolfgang Betzler und Bianca Bühler  
*Flächentragwerke. Am Beispiel der Überetzung einer Schimpansenanlage*



## The Lightness of Borders Ten Tensile Zoo Structures

Natascha Meuser



The construction of a *Zeltkote* (Rolf Kjellström 2003) or dome-shaped hut (Enrico Guidoni 1939) is based on the same design principles as chimpanzees use for nest building (Jane Goodall 1962)

By dispensing with gratings, or more to the point, by dissolving physical boundaries, zoo architecture theory has begun. In the meantime, light, almost invisible network structures are replacing physical borders. The goal is the optical harmony between animal and nature, in which the architectural design takes a back seat to nature. In 1807, Georg Wilhelm Friedrich Hegel had demanded that architects should build by following the example of nature. In his *Phenomenology of Spirit* he writes:

*He [the master craftsman] uses the life of the plant, which is no longer sacred like the earlier unconscious pantheism, but is taken by him, who sees himself as the self-existent being, as something useful and is set back to the outside and the ornament. It is not used as it is, but the worker of the self-conscious form at the same time destroys the transitoriness that the immediate existence of this life has on him, and brings his organic forms closer to the stricter and more general of the thought. On the other hand, the organic form, which free-ways in particularity and is subjugated by the form of thought, raises these straightforward and even forms to a more animated roundness – a mixture that becomes the root of free architecture.*

In this sense, the architect elevates nature in order to achieve an ideal form. But the term of nature has the drawback of being constantly subject to change. For instance, during the Enlightenment, nature stood for the work of a God who had constructed his Creation according to a principle of order, while during the Romantic period the idea of this image became one in which it was precisely the disordered – apparently coincidental – that was the focus of attention. And if one continues in this vein today, the question inevitably arises: what do architects want to express by employing, in abstract form, the shape of an animal's body as inspiration for a building, as Santiago Calatrava has done with his skeleton-like constructions or as Zaha Hadid did with her stadiums in the form of a stream-lined insect carapace. The same is true for building for animals, as zoo architecture, in a way, demonstrates in its subjection to continuous change. Where animals at first were locked behind bars or prevented from escaping by trenches, beginning in the twentieth century they are presented on stages, only to disappear again today in practical amorphous structures, which, according to Georg Wilhelm Friedrich Hegel, would mutate as the »organic form into the root of free architecture«.

# Building for Small Monkeys Rapperswil, Switzerland

Natascha Meuser



The small monkey facility in Rapperswil is marked by the landscaping of the architecture and the outright enclosure of nature. Fine meshed chrome steel nets create transparent spatial boundaries. The wish to unite nature and architecture is evident here. A visit becomes an adventure with a walk through the enclosure becoming an experience where one can view the animals close up. The building itself simply fulfils the functional aspects of a protective structure and indoor quarters, and can be accessed by the animals via the fine meshed tube system.

**Client**  
Gebrüder Knie, Schweizer National-Circus AG

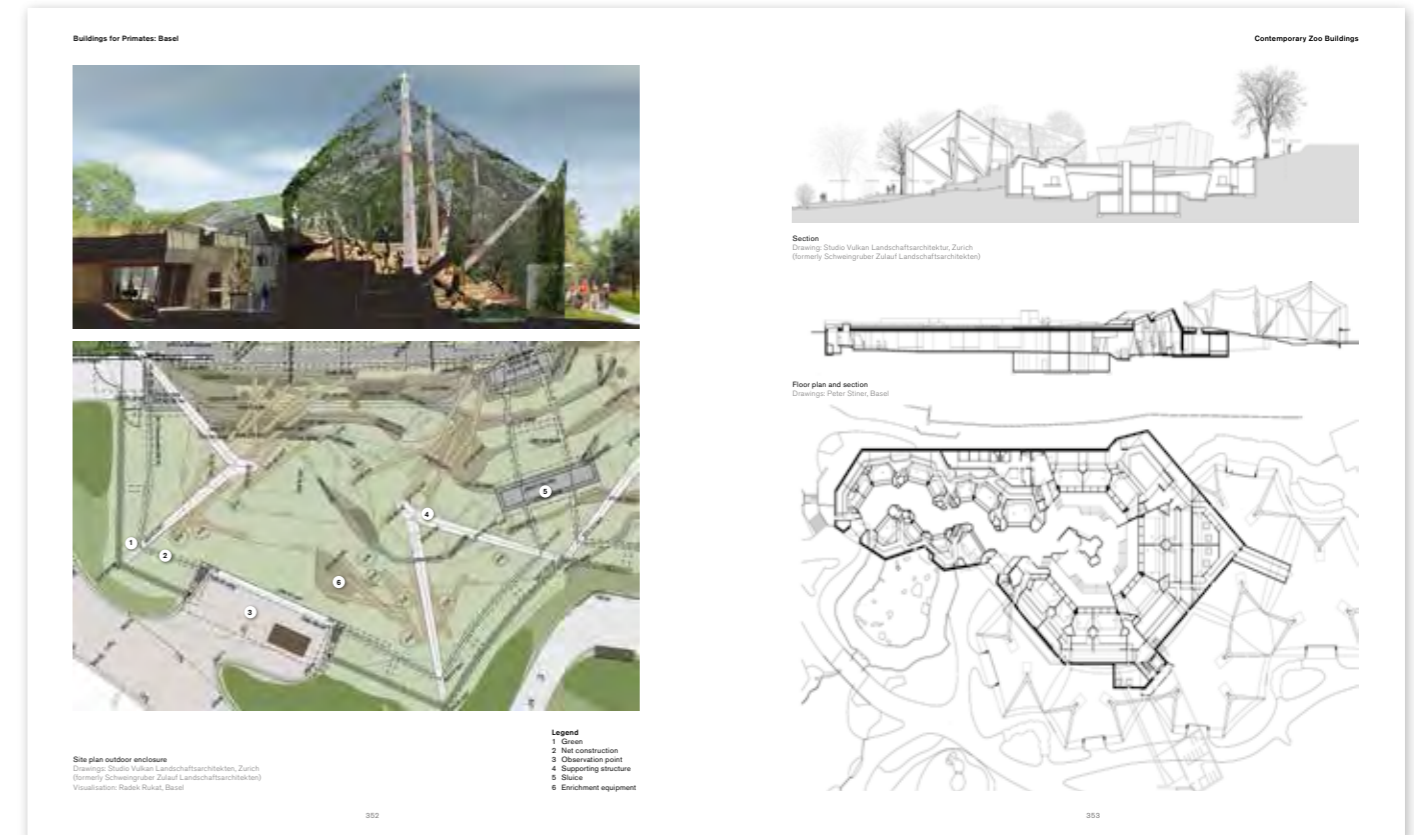
**Architecture**  
Müller & Truniger Architects ETH SIA, Zurich

**Landscape Architecture**  
Müller & Truniger Architects ETH SIA, Zurich

**Technical Engineering**  
IF Ingenieurgesellschaft Flächenstruktural Ingenieure, Reichenau employed by Wesako AG, Kreuzlingen (structural engineering)  
Enero, Paul Erzinger, Thalwil (building physics)  
Axima AG, Winterthur (technical building equipment)  
Jakob Rope Systems, Trubschachen (Netting)  
Kurt Müller, Zurich (zoo biology)

**Completion:** 2004

# Ape Enclosure Hamburg, Germany



**Client**  
Zoologischer Garten Basel AG  
Stokar + Partner AG, Basel (Bauherrenvertretung)

**Architecture**  
Peter Stiner, Basel

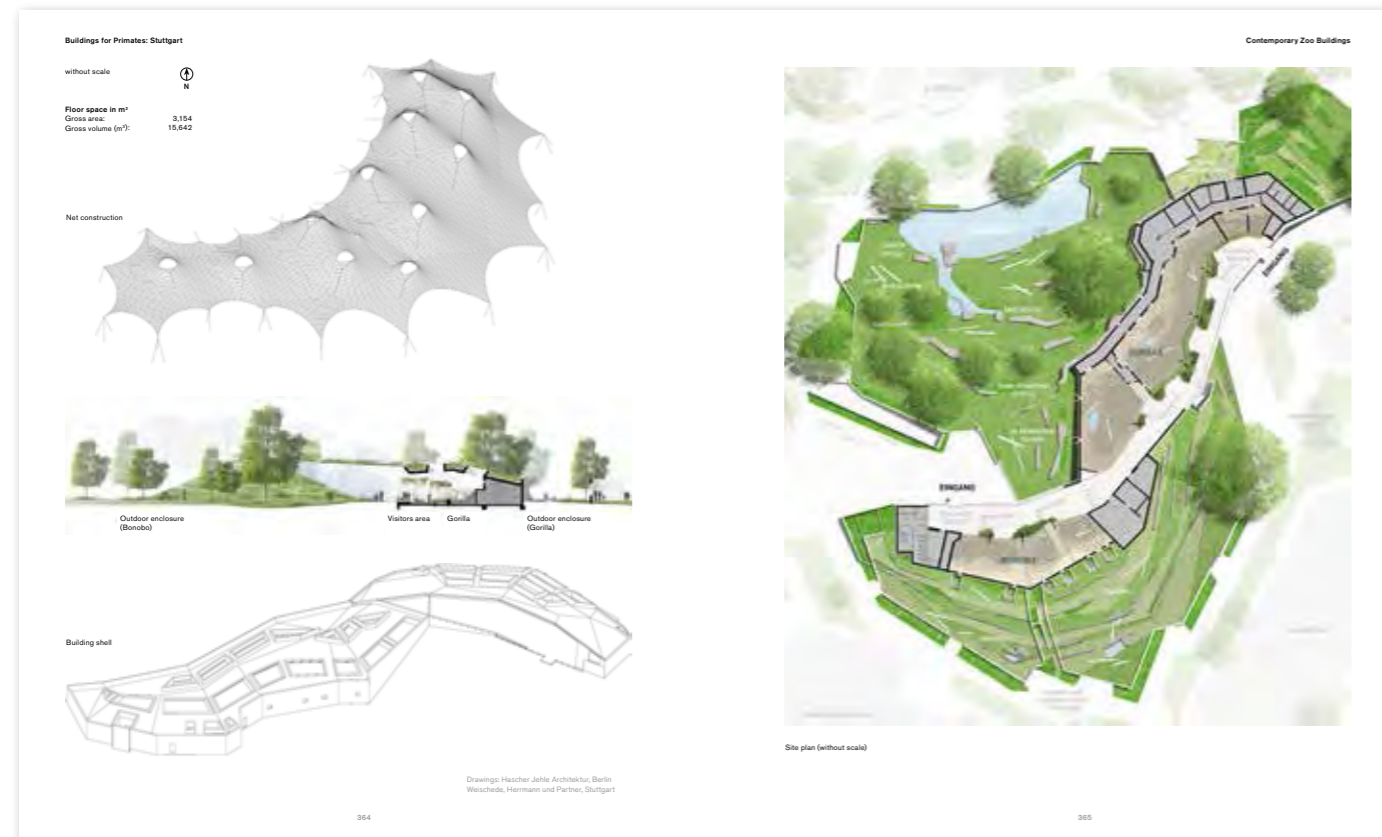
**Landscape Architecture**  
Studio Vulkan Landschaftsarchitektur, Zurich (formerly Schweingruber Zulauf Landschaftsarchitekten)

**Technical Engineering**  
Vischer AG, Architects + Planer, Basel (construction management)  
Conzett Bronzini Gartmann AG, Chur (structural engineering)  
Schnetzer Puskas Ingenieure AG, Basel (structural engineering)  
Pfeifer Ingenieure GmbH, Konstanz (structural engineering)  
Jakob Rope Systems, Trubschachen (net building)

**Completion:** 2004

The architecture of the great ape enclosure holds a strong presence inside and outside, due to how it is partially underground. The animals' shelter and recreation rooms are in the underground part of the building, to a certain extent hidden behind a veil of nature where they stay 'invisible'. The dominantly visible part of the architecture is the outside enclosure and its net structure. When inside this sober semi-underground concrete construction, the attention of the visitors is drawn inwards, to the central daylight-flooded enclosure behind glass.

## African Apes Enclosure Stuttgart, Germany



The Stuttgart Ape Enclosure is located at the topographical zenith of the Wilhelma. It is one of the fourth generation zoo buildings, designed to combine landscape and architecture. The outer shell of the building is semi-underground, camouflaged by the hill under which it lies, ensuring adequate interior thermal regulation and a gradual transition to the steel mesh-covered enclosure. The topography of the historical park is also visible inside, in the form of ramps leading past the glazed, naturally lit, indoor animal enclosures in a gentle curve.

**Client**  
Baden-Württemberg Region represented by: LB Vermögen and Bau BW

**Architecture**  
Hascher Jehle Architektur, Berlin

**Landscape Architecture**  
Möhrle + Partner, Stuttgart

**Technical Engineering**  
Weischede, Herrmann und Partner GmbH, Stuttgart (structural engineering);  
Officium, Design Engineering GmbH, Stuttgart (structural engineering net);  
Rentschler and Riedesser Ingenieurgesellschaft mbH, Filderstadt (TGA);  
GN building physics Ingenieurgesellschaft mbH, Stuttgart (building physics);  
IFT Institut für Tageslichttechnik, Stuttgart (lighting); Klett Ingenieur GmbH,  
Fellbach (electric technic); Ranger Design, Stuttgart (info/control systems)

**Completion:** 2013

## Big Cats and Palm House Munich, Germany



**Client**  
Münchner Tierpark Hellabrunn AG

**Architecture**  
Kochta + Lechner, Munich

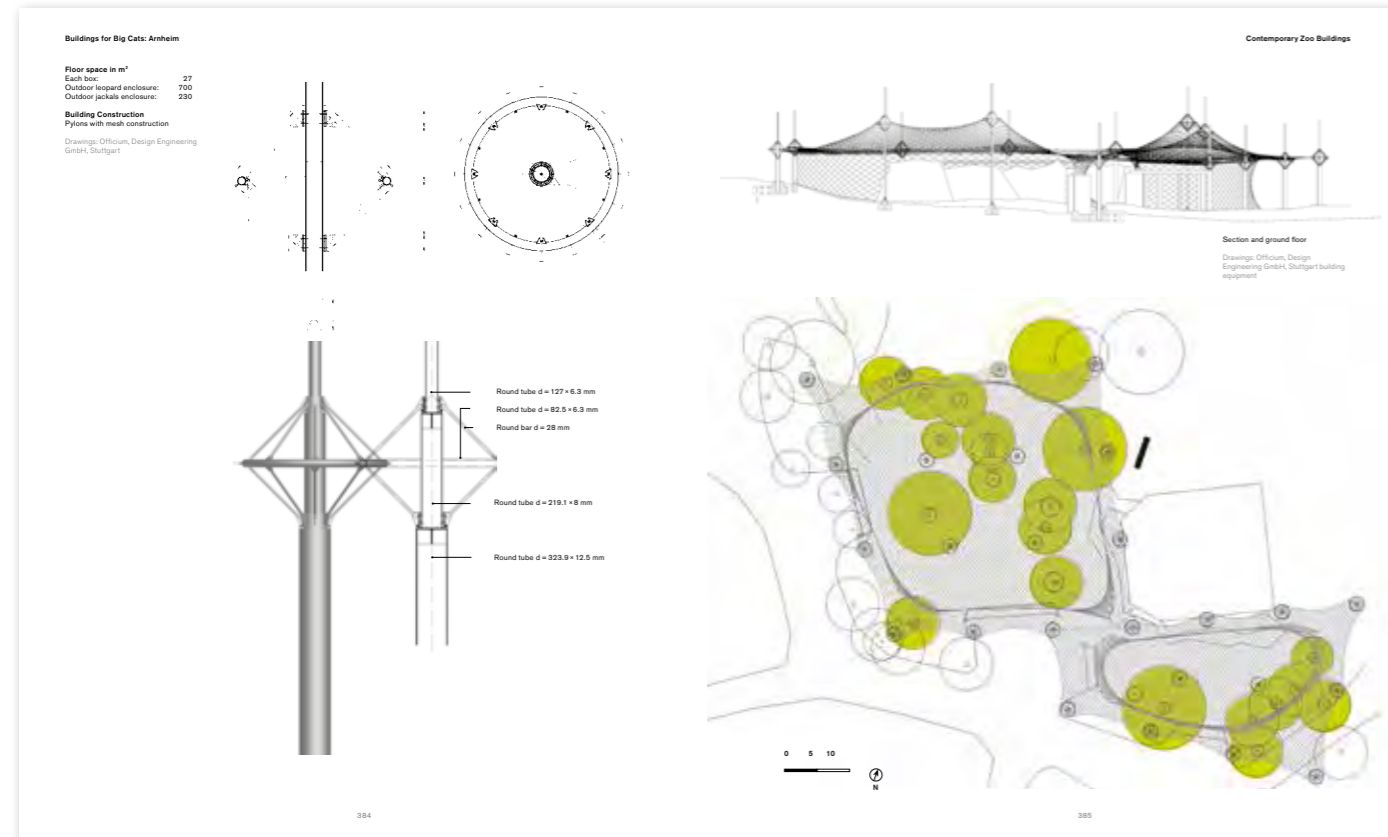
**Landscape Architecture**  
Gerhart Teutsch

**Technical Engineering**  
Schlaich Bergermann und Partner, Stu Technical building equipment  
(consulting engineers)  
IPL Ingenieurplanung für Tragwerk and Leichtbau GmbH, Radolfzell (structural  
engineering cable network and foil cushions)  
Bergbauer Ingenieure, Germering (technical building equipment)

**Completion:** 1995

The building combines two uses: a subtropical greenhouse with a steel and glass architecture, and the glazed display cases for exhibiting the animals. The construction is pulled together and spanned by a tent that seems to float, in the distance. The roof acts like a translucent structure, protecting the plants, animals, and the visitors from environmental influences. By building a tent, the 'circus' analogy playfully becomes the symbol for the animals' accommodation, all the while the subtropical vegetation suggests an expedition through a distant land.

# Leopard and Jackal Enclosure Arnhem, Netherlands



With this design, two mesh constructions are joined together and span two separate enclosures of different sizes for the leopards and jackals, as well as the animals' winter and sleeping quarters. Thanks to the unobtrusiveness of the gossamer mesh, the architecture in the midst of the dense vegetation recedes into the background, benefitting an authentic nature experience for the visitors. The mesh is attached with guy ropes tied to the high and low-level circular platforms that are welded to the steel masts that are planted on the periphery of the enclosure.

**Client**  
 Burgers' Zoo Arnhem

**Architecture**  
 Officium, Design Engineering GmbH, Stuttgart

**Technical Engineering**  
 ABT BV, Arnhem (structural engineering)  
 IPL Ingenieurplanung für Tragwerk and Leichtbau GmbH, Radolfzell (net and steel construction)

**Completion:** 2002

# Building for Lions Vienna, Austria



**Client**  
 Austrian Republic/ Castle & Fortress Authority Vienna  
 Bundesministerium für Arbeit and Wirtschaft

**Architecture**  
 Wehdorn Architects, Vienna

**Technical Engineering**  
 Ingenieurbüro Stella & Stengel and Partner, Vienna  
 IPL Ingenieurplanung für Tragwerk and Leichtbau GmbH, Radolfzell (structural engineering - net and steel construction)  
 Officium, Design Engineering GmbH, Stuttgart (structural net engineering)  
 P.H.I. Technisches Planungsbüro and Handelsgesellschaft m.b.H. Vienna (technical building equipment)  
 Ökoplan Energiedienstleistungen GmbH, Hartberg (energy)

**Completion:** 2002

A mesh net was stretched over several of the architectural elements and spatial boundaries in the design for the Schönbrunn zoological garden's lion enclosure. In the northern section of this installation, the net's border reaches a visitor accessible rock cave, while it covers the animal accommodations to the south. The ceiling is an independent spatial element, whose architectural significance is to provide protection from the animals. As such, it is an efficient, transparent material that keeps its shape under the special static requirements.

## Tiger and Jaguar Enclosure Krefeld, Germany



The Big Cat enclosure in the Krefeld Zoo is built according to the principle of the peep box or proscenium stage. With the clearly defined and accentuated concrete frame and suspended cable net construction, it maintains a strict separation between the stage and spectator room. In addition to the climbing aids and hideaways, the ascending cliff landscape in the rear of the facility imports a perspective depth in the space, as a kind of backdrop of the stage and enclosure boundary. The indoor enclosures are located in a separately built nearby annex.

**Client**  
Zoo Krefeld gGmbH

**Landscape Architecture**  
Zoo Krefeld

**Technical Engineering**  
Officium, Design Engineering GmbH, Stuttgart (net engineering)  
IPL Ingenieurplanung für Tragwerk und Leichtbau GmbH, Radolfzell (structural engineering)  
Hochbauamt Stadt Krefeld (technical building equipment)  
Carl Stahl, Süßen (metal/net)

**Completion:** 2004

## Building for Leopards Bern, Switzerland



**Client**  
Stadtbauten Bern

**Architecture**  
Graber Pulver Architects AG, Zurich / Bern

**Landscape Architecture**  
Weber + Brönnimann AG, Bern

**Technical Engineering**  
Weber + Brönnimann AG, Bern (structural engineering)  
Officium, Design Engineering GmbH, Stuttgart (structural net engineering)

**Completion:** 2006

This enclosure, with a net as a basic construction plan and nature encapsulator, is a good representative of the fourth generation of zoo buildings. The architecture is imperceptibly integrated into the hillside. Like a stage set, the landscape gains altitude in the background, creating depth and offering a wide view of the animals' 'upstage' range of action. The general effect is that of a varied and natural space. A concrete, angular band, which serves as footing, surrounds the enclosure, offering ground-level front views and anchoring the membranous net.

## Building for Primates Leipzig, Germany



The quadratic floor plan of *Pongoland*, with its centrally located tropical hall, comparable to theatre construction procedures, works like a double skin. The outer layer presents the stage sets while the inner structure in the form of colonnades ensures the smooth supply of the functional areas. The building is almost completely surrounded by green-covered artificial cliffs, fitting in with the 'just-as-naturally-designed' outdoor areas quite adequately, shaped almost like protected open-air stages equipped for year around operations and scientific observation.

**Client**  
Max Planck Society for the Promotion of Sciences as a joint project with the Leipzig Zoo

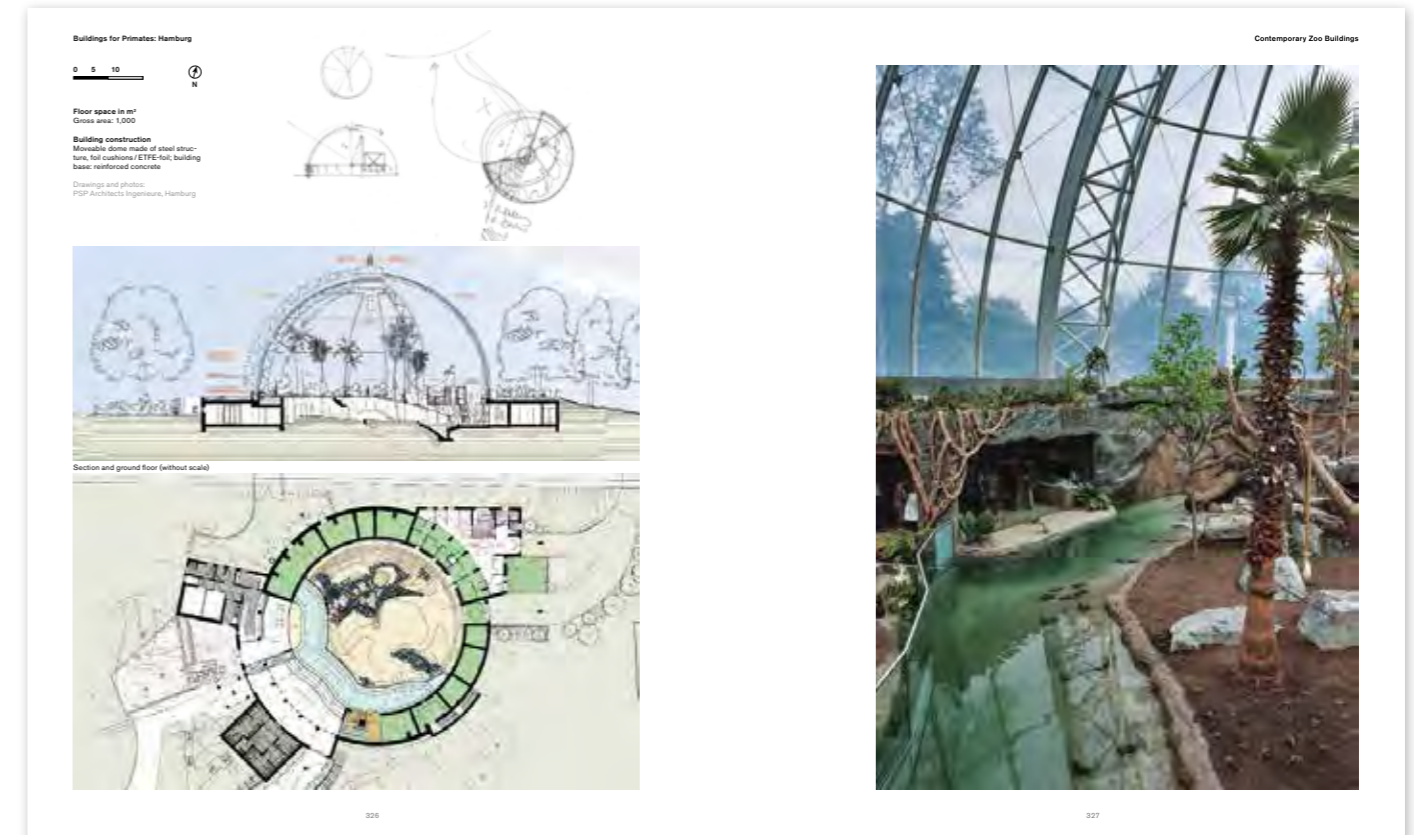
**Architecture**  
Herbert Kochta, Munich  
Rasbach@Architekten, Duisburg/Oberhausen

**Landscape Architecture**  
Rasbach@Architekten, Duisburg/Oberhausen

**Technical Engineering**  
Dieter Herrschmann, Munich (structural engineering)  
Bergbauer Ingenieure, Germering (technical building equipment)  
Hildebrand and Hau, Munich/Dresden (electric engineering)

**Completion:** 2001

## Building for Orangutans Hamburg, Germany



**Client**  
Tierpark Hagenbeck Gemeinnützige Gesellschaft mbH

**Architecture**  
PSP Architekten Ingenieure, Hamburg

**Landscape Architecture**  
Peter Plomin, Ahrensburg

**Technical Engineering**  
Wetzel & von Seht, Ingenieurbüro für Bauwesen, Hamburg, Bremen (structural engineering)  
HL-Technik AG, Hamburg (technical building equipment)

**Completion:** 2004

The living space of the orangutans is surmounted and contained by a dome, which consists of a retractable, half spherical network of steel fins without right angles. There are no internal supports. The roof sits on a massive outer ring, in which the inside rooms are located. Although spectators and animals are in fact separated from each other, they form together a scenic space with a raised stage for the animals. The space itself becomes a significant element of an effect that combines the art of performance and the place where it is watched.



Shangri-La, Glastonbury, Pilton, Großbritannien  
Architektur: Andrew T Cross (2013)  
Bild: Jim Stephenson/Alamy Stock Foto

## Flächentragwerke Landschaften mit Konstruktion formen

Gerd Schmid

Im Zentrum der heutigen Zoo- und Botanikarchitektur stehen das Erlebnis des Zoobesuchers und das Wohl der Tiere. Das künstliche, geschlossene Biotop entführt als verdichtete Kopie von Fauna und Flora den Zoobesucher expeditionsartig in ihm unbekannte Lebensräume.

»Künstliche« Biotope bieten gleichermaßen die Chance, Natur dicht und intensiv zu erleben, ohne sie zu belasten oder zu beschädigen. Gesucht ist eine Symbiose aus Architektur und Tragwerk, die vier Dinge in Einklang bringt: das Besuchererlebnis, die Besucherführung sowie Rückzugsräume für die Tiere und Raum für die Bewegung der Tiere. Dies ist ein Grund, warum moderne Zoos heute integrativ entwickelt werden. Nach Jahrzehnten trennender Architektur wird heute besonderer Wert auf eine von Begrenzungen freie Beziehung gelegt. Der Besucher ist zu Gast im Lebensraum der Tiere, er sucht die Tiere, er findet sie, er entdeckt. Landschaften und Gebäude verschmelzen, sind Teil der Wegführung und wirken durch den sensiblen Umgang mit Landschaft, Fauna und Flora wertebildend beim Besucher. Diese

gebauten Landschaften erlauben eine Steigerung der Besuchermengen, ohne dass dies zulasten der Tiere oder der Erlebnisqualität geht. Gleichmaßen sind diese im Einklang mit den ökonomischen Aspekten der Wirtschaftsbetriebe Zoo und »Biosphäre«. In den vergangenen Jahren hat unser Team an einer Vielzahl naturnaher Erlebnisräume gearbeitet, Gebäudehüllen und Geometrien entwickelt, die mit ihrer Topologie zu gebauter Landschaft werden. Ihnen gelingt es, sich zu integrieren, sich zurückzunehmen. Sie sind dennoch Ausdruck aktueller Architektursprache, weniger im Sinne von Selbstdarstellung, sondern vielmehr als Interaktion zwischen Material und Form und tier- und besuchergerechter Erlebniswelt.

### Geometrien

Unter natürlichen Konstruktionen verstehen wir in erster Linie frei geformte Flächen und Räume. Dabei ergeben sich im Idealfall natürliche Konstruktionen wie selbstverständlich aus dem Gleichklang mit der Natur und ihren Gesetzmäßigkeiten. Ziel der Architektur ist es, stets mit minimalem Materialaufwand








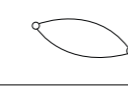








Oberfläche offen oder geschlossen	Netz		Membran	
Wind- und Schneelasten	ebene Oberfläche		teilweise gekrümmte Oberfläche	
Oberfläche Form	gegenseitig gekrümmte Schalen oder Faltwerke (Sattel)		gleichsinnige Krümmung (Kissen)	
Methode der Vorspannung	freie Zugspannung/ Vorspannung		Luftdruck	
Grenze	festgesetzte Abgrenzung		freie Grenzen (z. B. Kabel)	
zusätzliche Unterstützung	Punkt Hochpunkt Tiefpunkt		Linie Träger lineares Profil Bogen	
Schnittmuster	radiales Raster		paralleles Raster	

Tabelle 1: Design parameters for lightweight structures  
Grafik: Gerd Schmid

Räume zu bilden, die einen Bezug zur natürlichen Umgebung herstellen und in Zoologischen Gärten gleichermaßen einen Schutz für Mensch und Tier bieten. Geometrien, die sich aufgrund ihrer natürlichen Topologie leicht in naturnahe Lebensräume einbinden lassen, sind alle Arten minimaler Freiformflächen: etwa zweiachsig gleichsinnig gekrümmte Flächen wie Seifenblasen (*Eden Garden*, *Tropical Islands*) oder zweiachsig gegenseitig gekrümmte Flächen wie Vielpunkt-Segel. Also solche, die sich idealtypisch mit elastischen, plastischen und unter Belastung formveränderlichen Werkstoffen herstellen lassen. Dazu zählen Folien, Membranen, Seile, Seilnetze, Drahtgitter und bei genügender Dünne auch Stahl und Plattenwerkstoffe wie Glas. Diese erhalten ihre Stabilität in der Regel durch mechanische oder pneumatische Vorspannung in Kombination mit einer dreidimensionalen Form. Seile, Drähte und Zugstäbe tragen in »Stab«richtung; Membranen, Drahtgitter, Netze und Folien tragen in der Fläche. Beide eignen sich deshalb, gerade gespannt, lediglich zum Abtragen von Zugkräften – das aber können sie bestens. Der Schlüssel für eine gute Tragfähigkeit liegt in der Flächenkrümmung, die sich leicht mit Krümmungsradien in zwei Richtungen beschreiben lässt. Mit deutlicher Flächenkrümmung können Freiformflächen gebaut werden, die Schnee-, Wind-, Wasser- oder Sandlasten beliebiger Größe standhalten. Die Faustformel:

$$\text{Membranspannung} = \text{Flächenlast} \times \text{Radius}$$

zeigt, dass kleine Formradien kleine Membrankräfte und damit auch kleine Verankerungskräfte erzeugen. Umgekehrt haben sehr flache Membranen große Radien und erzeugen große Verankerungskräfte. Immer häufiger setzen sich in der Anwendung pneumatisch gestützte Membranen und Folien, die zweiachsig gleichsinnig gekrümmt sind, durch. Hier liegen die Mittelpunkte der Hauptkrümmungsradien auf derselben Seite der Fläche. Typische Beispiele sind luftgestützte Hallen sowie

luftgefüllte Kissen, etwa in Rautenform wie bei der *Allianz Arena* (München) oder die Großkissen von *Tropical Islands* (Dahme-Spreewald). Geschickt konstruiert wiegen diese raumabschließenden Tragwerke weniger als 3 kg/m<sup>2</sup>, spannen dabei mühelos über 25 Meter und tragen 75 kg/m<sup>2</sup> Schnee. Der Verzicht auf Biege- und Druckelemente führt zu besonders wirtschaftlichen und formschönen Konstruktionen. Stützenfrei können heute komplette Zooareale überdacht werden. Es kann Innen und Außen umgekehrt werden, die Tiere können sich frei bewegen und die Besucher sind in Schlauchnetzen, die einer transparenten und vor allem räumlichen Schutzzone entsprechen, vor Übergriffen seitens der Tiere geschützt.

#### Mechanisch gespannte Hüllwerkstoffe

Besonders gut geeignet für die Ausbildung dreidimensional geformter und mechanisch spannbarer Hüllen sind gewebeverstärkte Membranen und engmaschige Seilnetze. Im Zoobereich haben sich die verpressten Edelstahl-Seilnetze durchgesetzt. Im Biosphärenbereich und in Tierhäusern haben sich klarsichtige ETFE-Kissenhüllen bewährt, bei denen der Durchtritt der ultravioletten B-Strahlung und deren keimreduzierende Wirkung erwünscht sind und die zugleich wärmedämmend wirken. Bedingt durch die fehlende Armierung der Extruderfolien ist die Spannweite der reinen Folie auf wenige Meter begrenzt; sie kann aber durchaus mittels stützender Seilscharen, wie *Tropical Islands* in Brand bei Berlin zeigt, 5.000 Quadratmeter große Fassaden bilden. Das Copolymer Ethylen-Tetrafluorethylen ist dauerhaft außenwetterungsbeständig. Aufgrund der niedrigen Oberflächenspannung der Folie wird der Schmutz vom Regen abgewaschen; selbst 15 Jahre alte Folien wirken immer noch sauber und klar wie neue Folie. Besonders hervorzuheben ist die Lebensdauer (mind. 25 Jahre) und die Möglichkeit des Recyclings – eine ökologische Qualität, die wir bisher nur von Stahl kennen.

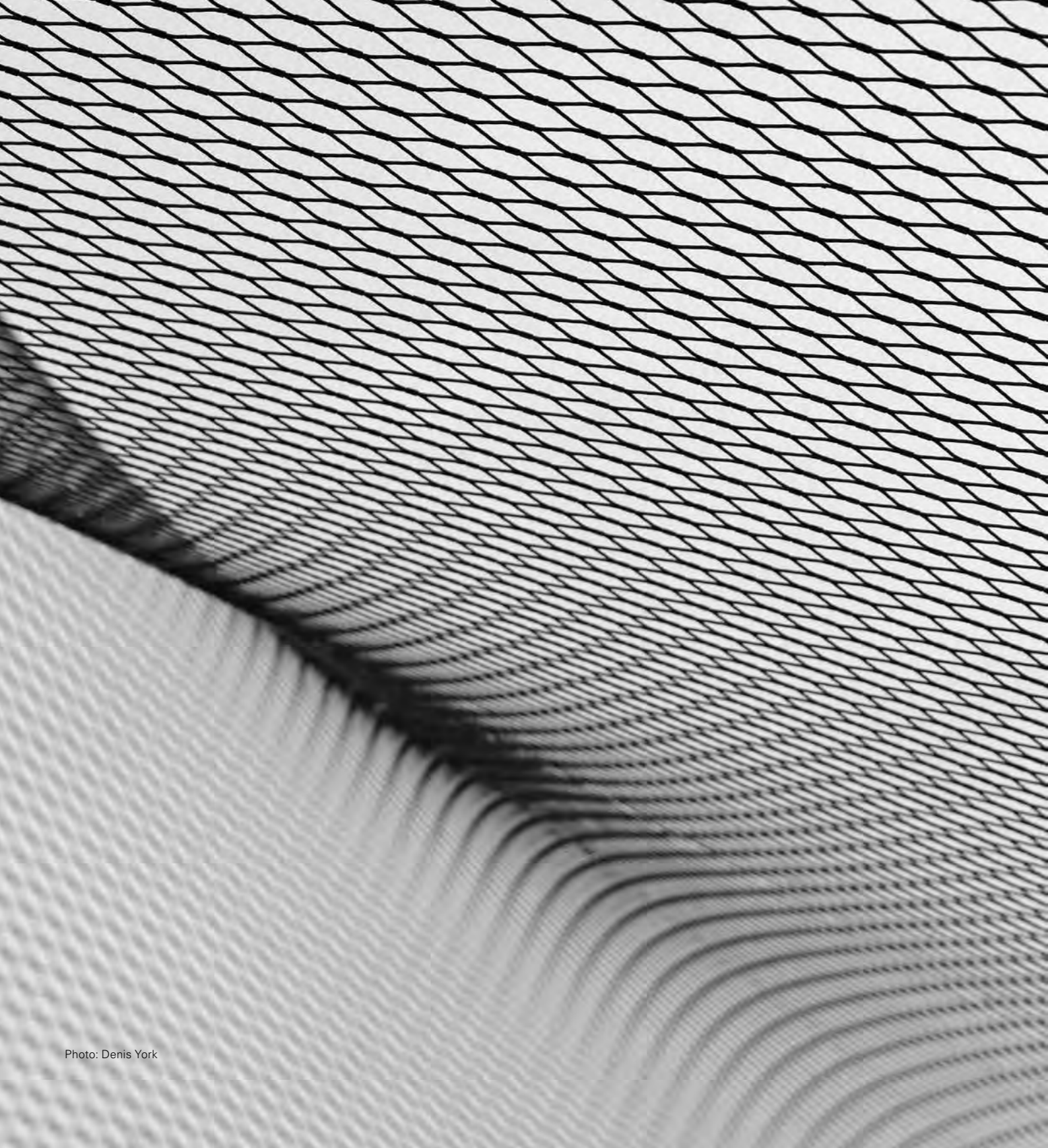


Photo: Denis York

### **Seilnetze**

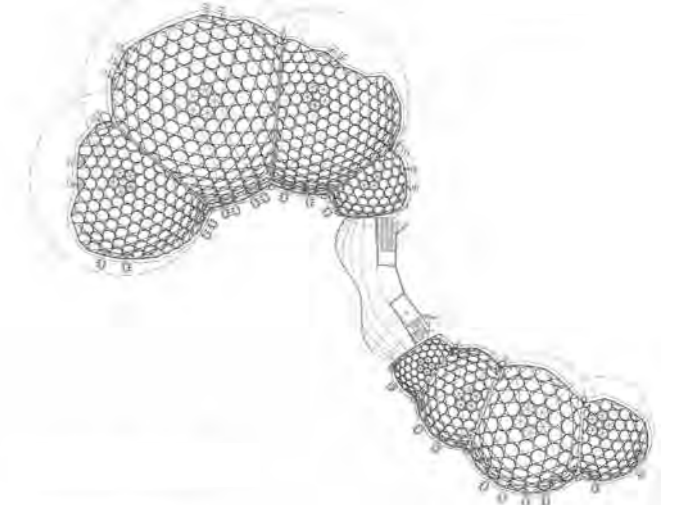
Seilnetze werden in erster Linie für freie Überdachungen von großen Flächen eingesetzt und zeichnen sich durch ein geringes Eigengewicht aus. Sie bestehen aus Edelstahlspiralseilen oder Edelstahl-Litzenseilen und aus Metallhülsen (aus Edelstahl oder vernickeltem Kupfer), die im Werk mithilfe von Matrizen und teilmechanisiert zu schmalen Netzstreifen von beliebiger Länge verpresst werden. Eine spezielle Spleißtechnik ermöglicht es, daraus endlos große Netze ohne visuell wahrnehmbare Stoßausbildung mit statisch homogenen Eigenschaften zu fügen. Die Standardseile sind ein bis drei Millimeter dick. Die Maschenweite der Seilnetze wird durch die freie Seillänge zwischen den Klemmpunkten definiert. Eine 80er Masche weist somit 80 Millimeter freie Seillänge zwischen den Systemklemmpunkten auf. Damit sind jedoch lediglich die Kantenlängen der Maschen festgelegt, nicht aber die Maschenwinkel der Netzmaschen. Die Maschenweite ist abhängig vom Einsatzzweck des Netzes. Für Tiergehege wird die Masche so klein gewählt, dass das Tier entweder nicht durchschlüpfen oder nicht durchgreifen kann oder dass andere Tiere von außen nicht eindringen können. Ein weiterer Parameter für die Weite der Maschen und vor allem für den Querschnitt des verwendeten Seils sind die statischen Beanspruchungen, die auf das Netz wirken: die Belastung durch das Tier, das sich am Netz festhält und daran hochklettert, und die äußeren Lasten auf die Netzflächen, die wie bei konventionellen Gebäudehüllen durch Wind, Schnee und Eis anfallen, aber nicht 1:1 angesetzt werden.

### **Zuschnitt und Formgebung bei Membranen und Netzen**

Wird eine Freiformfläche aus Membranen oder aus Seilnetz hergestellt, so unterscheidet sich der Zuschnitt deutlich – es gibt bei Seilnetzen sogar eine Rückkopplung auf die Form –, denn nicht jede Membranfläche kann auch als Seilnetz hergestellt werden. Bei Membranen werden die Gewebestreifen mithilfe geodätischer Linien zu taillierten oder bauchigen Streifen zugeschnitten und verebnet sowie zu einem »Maßanzug« vernäht oder verschweißt. Ein Seilnetz dagegen kann nicht »beliebig« zugeschnitten werden, denn sonst müssten die abgeschnittenen Maschen mühsam gefasst und manuell mit Hülsen verpresst werden. Am Ende des werkseitigen Herstellprozesses ist deshalb eine Netzfläche vorhanden, die lediglich an den äußeren Rändern verzerrt und manipuliert werden kann sowie nur wenige, meist krümmungsarme Formen erlaubt. Die Möglichkeiten, Freiformen zu erzeugen, sind mit denen eines Küchensiebs vergleichbar. Die planmäßige Seilnetzmasche hat  $60^\circ / 120^\circ$  und kann jede Geometrie vom Quadrat bis zur (auch visuell) dichten Packung mit parallelen Seilen annehmen. Bewährt haben sich Maschenwinkel von  $60/120^\circ$  und  $-30^\circ$ , was die Menge der erzeugbaren Geometrien weiter einschränkt. Besonders geeignet sind deshalb Sattelflächen, wie sie bei Segelflächen mit einem alternierenden Auf und Ab der Randpunkte oder bei helixförmiger und bei bogenförmiger Rand- oder Flächenstützung entstehen. Aufgrund der sichtbaren Materialverdichtung sind Hochpunkte ungünstig. Grat- und kehlseilgestützte Formen sind gut geeignet, da sich diese mit Teilnetzen belegen lassen.



Foto: Sealand Aerial Photography Ltd.



### Folienkissen

Die bekannteste botanische Erlebniswelt befindet sich seit Mai 2001 in Cornwall. Das 55 Hektar große *Eden Project* wurde auf einer aufgelassenen Kaolingrube errichtet. Die seifenblasenförmigen »Biosphären« aus kleinteiligem geodätischem Stahlgerippe bestehen aus jeweils vier miteinander verschnittenen Schalen. Stützenfrei überdecken die fachwerkgestützten Membrankonstruktionen aus sechseckigen ETFE-Folienkissen mehr als 23.000 Quadratmeter Grundfläche in einer Höhe von bis zu 50 Metern und mit einem Durchmesser von bis zu 124 Metern. In den imposanten Gewächshäusern werden bei Raumtemperaturen zwischen 15°C und 35°C getrennte Ökosysteme (Biome) mit drei verschiedenen Vegetationszonen simuliert.

Eden Project, St. Austell, Cornwall (Großbritannien)  
 Architektur: Nicholas Grimshaw, Tim Smit, Arup Engineering  
 Tragwerksplanung: Anthony Hunt and Associates (seit 2004 SKM Anthony Hunt)  
 Tragwerk: zweilagiges Knoten-Stabtragwerk von Mero; obere Lage aus querkraftbeanspruchten Hexagonen, die die Kissen tragen, sowie eine untere Lage aus Dreiecken und Hexagonen, ähnlich dem Kristallgitter von Silikat  
 Folienkonfektionär: Vector Foiltec  
 Stützluftdruck: 300 Pa  
 Fertigstellung: 2001  
 Foto links: Sealand Aerial Photography Ltd.  
 Fotos oben: Gerd Schmid, Radolfzell  
 Zeichnung: Arup Engineering



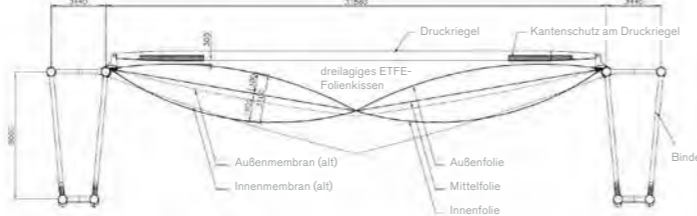
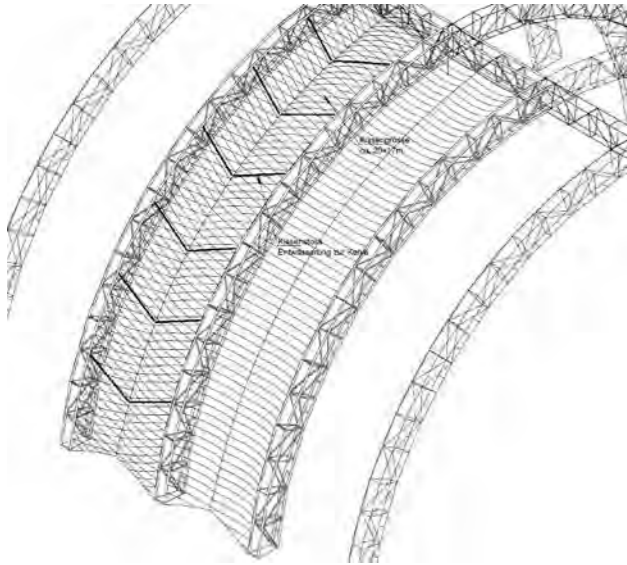
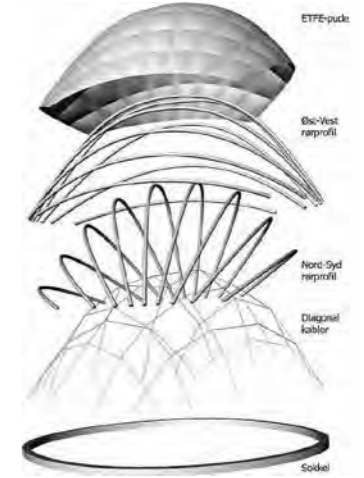
Halle mit vier Binderfeldern,  
*Tropical Islands*, Krausnick  
Foto: Cenotec



Innenaufnahme,  
*Tropical Islands*, Krausnick  
Foto: Cenotec



Gewächshaus im Botanischen Garten, Aarhus  
Kissenoberfläche: 1.800 m<sup>2</sup>  
Grundfläche: 1.145 m<sup>2</sup>  
Bogenhöhen bis zu 17,5 m  
Bogenspannweiten bis zu 41 m  
ETFE-Folie in 200–150–250 µm  
Anzahl Kissen: 88 fest stehende zweilagige Kissen, zwei öffnere Firstkissen,  
34 dreilagige Kissen mit pneumatischer Verschattung



Die weltgrößte freitragende Halle *Tropical Islands* steht in Krausnick (Brandenburg). Sie enthält subtropischen Baumbewuchs und ist als freizeitorientierte Erlebniswelt mit Wasserflächen, Sandstränden und einem Gastronomieangebot für 7.000 Gäste ausgelegt. Die zuvor als Luftschiffwerft genutzte Bogenhalle (360 × 240 × 107 Meter) erhielt geländebildende Einbauten sowie eine sonnenlichtdurchlässige und zugleich wärmegeämmte Südfassade. Aufgrund der Größe der vier Binderfelder von je 5.000 Quadratmetern wurden seilumspannte Folienkissen (U-Wert=1,6 W/m<sup>2</sup>K) entwickelt, deren innere und äußere Form durch Seilscharen bestimmt ist, die wie die »umhüllende der maximalen Verformung« der bisherigen Membranbespannung geformt sind. So wurde sichergestellt, dass die ETFE-Fassade keine größeren Kräfte in das vorhandene Stahltragwerk einleitete, als dieses auch abtragen konnte.

### Folienfassade

In bionischer Formensprache zeigt sich das Gewächshaus im Botanischen Garten von Aarhus. 2013 wurde das bestehende Glashaus aus dem Jahr 1969 um ein Haus für tropische Pflanzen erweitert. Das neue Gewächshaus besteht aus einer Gitterschale auf einem ovalen Grundriss und einer Eindeckung aus ETFE-Folienkissen, die teilweise mit einer pneumatischen Verschattung ausgestattet sind. Ziel der Planung war eine lichtdurchflutete Sphäre, die den Pflanzen durch natürliches, UV-haltiges Licht realistische Lebensbedingungen und zugleich den Besuchern eine angenehme Atmosphäre gewährleistet. Für eine natürliche Belüftung sorgen zwei öffnere Firstfenster. Zur Steuerung der sommerlichen Strahlungsmenge gibt es auf der Südseite 34 dreilagige Folienkissen, deren äußere und mittlere Folie bedruckt ist und deren Mittellage pneumatisch bewegt werden kann. Das Prinzip der pneumatischen Verschattung ist noch wenig bekannt, hat aber besondere Eigenschaften: Wird der Stützluftdruck in der äußeren Luftkammer verringert, bewegt sich die mittlere Folie in Richtung der äußeren Folie und

der Widerstand für das Sonnenlicht vergrößert sich. Bei Verringerung des Luftdrucks in der raumseitigen Luftkammer bewegt sich die mittlere Folie in Richtung der raumseitigen Folie und mehr Sonnenlicht passiert das Luftkissen. Wird invers bedruckt, ist die Anforderung an die Genauigkeit der Positionierung hoch und die Verschattungsleistung größer. Die Vorteile der integrierten pneumatischen Verschattung sind eine nahezu vollständige Wartungsfreiheit, Langlebigkeit und geringe Mehrkosten. Das Tragwerk besteht aus jeweils zehn Stahlbögen aus Rundrohren, die sich um eine Längs- und eine Querachse auffächern und so ein Netz aus unterschiedlich großen Vierecksfeldern spannen. Aufgrund der komplexen Geometrie des Gebäudes mussten die aufgeständerten Randprofile zweiachsig gebogen und tordiert werden, damit an den Kreuzungspunkten der Profile eine kontinuierliche Dichtebene entstand. Für die Stützluftversorgung wurden zwei getrennte Rohrleitungssysteme verwendet. Über diese werden die Kissen redundant versorgt und die Verschattung gesteuert. Fällt Schnee, wird der Stützluftdruck erhöht.



## Netzkonstruktionen Am Beispiel einer Schimpansenanlage

Marlene Thimet, Wolfgang Betzler  
und Bianca Bühler

Schimpansenanlage, Erlebnis-Zoo Hannover  
Foto: Carl Stahl Architektur

Die Unterbringung von Tieren stellt nicht nur bestimmte Mindestanforderungen an Fläche und Raummaß. Bei der Dimensionierung und Strukturierung sind vielmehr auch die jeweils arttypischen bevorzugten Bewegungsformen, ihre räumliche Orientierung und kognitive Leistungsfähigkeit zu berücksichtigen. Besondere Bedeutung kommt in der Zooarchitektur dem Kontakt mit natürlichen Umweltreizen zu. Das Erleben von jahres- und tageszeitbedingt veränderlichen Temperaturen, Luftfeuchten, Luftbewegungen, Niederschlägen, natürlichem Sonnenlicht sowie wechselnden Geräuschen und Gerüchen gehört zweifelsohne zu den zentralen Anforderungen an die Tierhaltung im zeitgenössischen Verständnis.

Edelstahlseilnetzkonstruktionen sind für die Freigehegearchitektur in besonderer Weise geeignet. Sie verbinden Sicherheit und Ästhetik, sind widerstandsfähig und langlebig sowie bieten durch ihre transparente Struktur nahezu barrierefreie Ein- und Ausblicke. Das filigrane Flächentragwerk erlaubt große Spannweiten und ermöglicht die Schaffung großzügiger Bewegungs- und Freiräume für die

Tiere. Formal minimiert, bilden die Leichtbauten eine eigene Formensprache, die sich stets an den Anforderungen von Tierart, Topografie, Nutzbarkeit und Besucherattraktivität orientiert. In Zusammenarbeit mit Zoos und Zooarchitekten weltweit hat die Carl Stahl ARC GmbH ein Kompendium tierhalterischer Ansprüche entwickelt. Seine bauliche Umsetzung findet es in einzigartigen und stets individuell gestalteten Gehegen in Tierparks auf der ganzen Welt. Sie sind das Ergebnis einer sorgfältigen technischen Planung, präziser statischer Berechnungen und einer professionellen On-Site-Montage, basierend auf der langjährigen Erfahrung in der Leichtbauarchitektur.

Die Grundlage bilden die besonderen Eigenschaften der eingesetzten Produkte: Das Edelstahlseilnetz X-TEND erweitert die statischen Vorteile des Seils in die räumliche Dimension. Die intelligente Verbindung von Edelstahlseilen und -klemmen erlaubt vielfältige Formen vorgespannter Seilnetzkonstruktionen. Die gegensinnige Krümmung der Seile erzeugt räumliche Strukturen, die selbst starken Belastungen standhalten. So können architektonische

Gestaltungsabsicht und Sicherheitsaspekte in Einklang gebracht werden. Alle baulichen Strukturen mit dem Seilnetz zeichnen sich durch große Tragfähigkeit und Spannweite bei geringem Eigengewicht und minimalem Materialeinsatz aus. Hochwertiger Edelstahl gewährleistet die Langlebigkeit. Je nach Art der Konstruktion halten I-SYS-Edelstahlseile das Netz auf Spannung.

### 1. Projektanalyse

Voraussetzung für das Entstehen eines art- und verhaltensgerechten Geheges ist die Analyse der Bedürfnisse der Tierart sowie der bestehenden baulichen Gegebenheiten unter Berücksichtigung der Wünsche und Vorstellungen von Bauherren, Pflegern und Zoobesuchern gleichermaßen. Im Fall der Außenanlage für Schimpansen im Erlebnis-Zoo Hannover (realisiert 2013) entsprach das bestehende Gehege nicht mehr den Maßgaben für eine artgerechte Haltung wie sie im Säugetiergutachten des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft festgelegt sind. Ein Trockengraben trennte Besucher und Tiere, ein Zaun mit dahinterliegendem Grünstreifen verhinderte, dass die Zuschauer den Menschenaffen zu nahe kamen. Der natürliche Bewegungsdrang der Tiere war eingeschränkt, da aufgrund der Gehegestruktur nur wenige Klettermöglichkeiten geboten werden konnten.

### Bedürfnisse der Tiere

Zu einer tiergerechten Haltung gehört es, die Anpassungsfähigkeit (Valenz) des Tiers nicht zu überfordern, um Verhaltensstörungen zu vermeiden. Generell kann zwischen adaptiven und nicht-adaptiven Tierarten unterschieden werden. Letztere sind nur wenig anpassungsfähig. In Menschenobhut gehaltene Tiere benötigen Gehege, die so gestaltet und ausgestattet sind, dass sie darin ihre Grundbedürfnisse befriedigen können, und die ihrem Verhalten angemessen Rechnung tragen. Die Haltung orientiert sich an den natürlichen Lebensbedingungen, aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und

tiergartenbiologischen Erfahrungen. Schimpansen leben in freier Wildbahn in kleinen umherstreifenden fission-and-fusion-Gruppen, die aus mehreren erwachsenen Weibchen und/oder Männchen bestehen, wobei mehrere untereinander verwandte Männchen den Kern dieses Sozialgefüges bilden. Sie schließen Allianzen und Koalitionen. Weibliche adulte Schimpansen leben in Sozialgruppen mit ihren nicht erwachsenen Nachkommen in den Kernzonen dieser Streifgebiete. Schimpansen nutzen sowohl die Baumregionen der Primär- und Sekundärwälder als auch die offenen Baumsavannen und Graslandschaften. Sie leben damit gleichermaßen am Boden wie in den Bäumen, klettern und bevorzugen erhöhte Positionen als Orte der Orientierung. Deshalb muss den Schimpansen entsprechend ihrem artspezifischen Verhalten die Nutzung des Raums in allen drei Dimensionen ermöglicht werden. Dazu gehören zahlreiche zum Klettern geeignete Strukturen, die mit hoch gelegenen Sitzplätzen verbunden sind. Außerdem muss – um den hohen kognitiven Fähigkeiten der Tiere gerecht zu werden – für eine ausreichende Lebensraumbereicherung gesorgt werden, zum Beispiel durch ein vielfältiges Angebot an manipulierbaren Objekten und Materialien oder wechselnde Darreichungsformen des Futters.

### Anforderungen der Bauherren

Generell findet ein möglichst naturnahes Habitat, das zudem besuchergerecht gestaltet ist, bei den Zuschauern eine größere Akzeptanz. Ist ein Gehege besuchergerecht gestaltet, wird es auch als tiergerecht beurteilt, da die Menschen von sich auf die Tiere schließen. Auch dieser Aspekt muss bei der Planung berücksichtigt werden. Im Fall des Schimpansengeheges für den Erlebnis-Zoo Hannover sollte die Konstruktion optisch so reduziert wie möglich sein; auf Bauten, die an einen künstlichen Lebensraum erinnern, sollte verzichtet werden. Besucher sollten die Tiere vor einer möglichst natürlichen Kulisse wahrnehmen können, die das bestehende Urwaldhaus verdeckt. Gemäß der aktuellen

Tierhaltungsstandards und der arttypischen Gewohnheiten müssen die Tiere frei zwischen Innen- und Außengehege wechseln können, wobei die Strukturierung des Geheges die Bildung flexibler Gruppierungen ermöglichen soll. Eine transparente Übernetzung sollte dafür sorgen, dass die Zuschauer kaum eine Barriere zwischen sich und den Tieren wahrnehmen.

### Landschaftsarchitektonische Planungsgrundlagen

Im Zuge der Sanierung des Schimpansengeheges im Erlebnis-Zoo Hannover wurden die bislang getrennten Gehegeteile zu einer Anlage mit einer Gesamtfläche von 710 Quadratmetern zusammengefügt. Um den Tieren die vertikale Nutzung zu ermöglichen, sollte eine Übernetzung mit einer Mindesthöhe von zehn Metern entstehen. Die Transparenz der Netzfläche wird durch eine Schwarzfärbung der Seile und Klemmen noch erhöht. Eingefasst wird die Anlage von bis zu 4,50 Meter hohen Betonfertigteilen, die mit Kunstfels verkleidet sind. Mehrere Einsichtsbereiche durchbrechen diese Abtrennung und erlauben Besuchern den ungehinderten Einblick. Das Urwaldhaus wurde ebenfalls mit Kunstfels verkleidet und fügt sich so nahtlos in die natürliche Kulisse ein, die mit zahlreichen Klettermöglichkeiten – Felsen, Bäumen, Hängebrücken und Seilen – sowie einem Bachlauf ergänzt wird.

### Strukturelle Anforderungen der zugbeanspruchten Seilnetzkonstruktion

Für alle gespannten Flächentragwerke sind die Form der Netzfläche und ihre Stützung entscheidend. Dabei muss die Netzfläche eine ausreichende Krümmung aufweisen, das heißt sie muss so ausgebildet sein, dass sie die äußeren Lasten (Schnee- und Windlasten) abtragen kann, ohne dass es dabei zu größeren Verformungen der Fläche kommt. Die Stützen, die die Netzfläche tragen, und die NetZRänder sind so auszubilden, dass keine Spannungsspitzen in der Netzfläche auftreten. Um aus dem dünnen Edelstahlseil ein steifes Tragwerk zu erzeugen, muss die Netzfläche vorgespannt sein. Die

formbildenden Elemente der Konstruktion müssen die Kräfte aus der Netzfläche aufnehmen und an die angrenzenden Bauteile weiterleiten können. Das Edelstahlseilnetz X-TEND (V4A) besteht aus rhombusförmigen Einzelmaschen. Durch Änderung der Maschenöffnung innerhalb der Netzfläche kann sich das Netz faltenfrei jeder Krümmung anpassen. An den Seilkreuzungspunkten sind die Einzelseile durch Pressklemmen (V4A) kraftschlüssig verbunden. Alle Seile des Netzes haben den gleichen Querschnitt. Einzelne Netzbahnen können zu einer homogenen Oberfläche verbunden werden, ohne dass Verbindungsnahte in der Fläche erkennbar sind.

### 2. Entwurfsplanung und Modellbau

Für den Erlebnis-Zoo Hannover entwickelte die Carl Stahl ARC GmbH drei Konstruktionsentwürfe mit jeweils unterschiedlichen Varianten der Netzflächenunterstützung. Anhand von Modellen im Maßstab 1:200 wurden die jeweiligen Konstruktionsprinzipien sowie die gestalterischen Charakteristika verbildlicht.

#### Variante 1: Flächige Unterstüztung der Netzfläche

Formbildende Elemente sind sieben unterschiedlich hohe, druckbeanspruchte Pendelstützen mit Lastverteilungsringen, über denen sich die gekrümmte, zugbeanspruchte Netztragfläche aufspannt. Eingefasst wird die Netztragfläche von Edelstahlrohren, die auf der angrenzenden Bebauung (Fertigbetonteile) verankert sind. Diese Rohre sind so auf dem Kunstfelsen positioniert, dass sie vom Besucher nicht wahrgenommen werden können. Es entsteht eine flächige, bewegte Übernetzung, die den Tieren eine gute Ausnutzung der gesamten Anlage ermöglicht. Die Stützen könnten durch eine sinnvolle Ergänzung mit Kletterhilfen, Seilen und Schlafnestern zu doppelt genutzten Elementen werden. Damit sind weitere Einbauten wie Kletterfelsen oder Kunstbäume im Gehege nur in geringem Umfang notwendig.

### *Variante 2: Verzweigte Unterstüztung der Netzfläche (»Baumstützen«)*

Formbildende Elemente sind drei unterschiedlich hohe, biegesteife »Baumstützen«, über denen sich die gekrümmte, zugbeanspruchte Netztragfläche aufspannt. Wie bei Variante 1 wird die Netztragfläche von Edelstahlrohren eingefasst, die auf der angrenzenden Bebauung für Besucher unsichtbar verankert sind. Die sichtbare Konstruktion ist auf drei Punkte konzentriert, wobei der Besucher lediglich die »Stämme« der Strukturen als Bauteile wahrnimmt. Ergänzt um Kletterhilfen, können die Baumstützen von den Tieren optimal genutzt werden. Die Verzweigungspunkte können als erhöhte Aussichtspunkte dienen.

### *Variante 3: Flächige Unterstüztung der Netzfläche durch Tragseile*

Formbildendes Element ist eine zentral positionierte, druckbeanspruchte Pendelstütze mit abgehängten, radial angeordneten Tragseilen, über denen sich die zugbeanspruchte Netztragfläche aufspannt. Die Tragseile sind über Hängerseile (pro Tragseil drei Stück) mit dem Stützenkopf verbunden. Sie werden über einen Stahlrohring umgelenkt und enden auf dem Betonfundament der zentralen Stütze. Um die Kräfte aus diesen Tragseilen beziehungsweise aus der Netzfläche auf die angrenzende Bebauung einleiten zu können, sind dort im Beton verankerte Anschlussschwerer befestigt. Wie bei Variante 1 und 2 ist die Netztragfläche mit für die Besucher nicht sichtbaren Edelstahlrohren auf der angrenzenden Bebauung (Fertigbetonteile) verankert. Die zentrale Stütze steht erhöht auf einem (Kunst-)Felsen. Damit bleibt die Stahlkonstruktion den Blicken der Besucher verborgen. Das so entstehende Gehege ist völlig frei von formbildenden Elementen, die Tiere können sich ungehindert bewegen. Durch den Einsatz von Kunstfelsen, Kunstbäumen und Kletterstrukturen, wie zum Beispiel einer Hängebrücke, entsteht ein Lebensraum, den die Tiere vielfältig nutzen können.

Der Erlebnis-Zoo Hannover entschied sich für die letzte Entwurfsvariante. Anhand eines Modells im Maßstab 1:100 entwickelte die Carl Stahl ARC GmbH gemeinsam mit dem Bauherrn sowie Kuratoren und Pflegern diese weiter. Das Modell erlaubte es, Ideen und Anforderungen zu überprüfen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Die Seilnetzkonstruktion durchlief im Planungsprozess verschiedene Stadien der Optimierung. Die Randgeometrie der Netzfläche wurde mehrmals verändert, da diese der angrenzenden Bebauung folgt und an die Anforderungen des Bauherrn angepasst werden musste. Das bestehende Urwaldhaus sollte vom Gehege aus nicht wahrnehmbar sein. Daher wurden die Umfassungswände an dieser Stelle nach oben gezogen. Dieser Veränderung folgten die Anpassung der Gehege-Geometrie und damit auch eine Änderung und Optimierung der Konstruktion, denn Form und Konstruktion bilden bei dieser Art von Konstruktionen eine untrennbare Gestalt. Erst mit der endgültigen Festlegung der Gehegebegrenzung und der Höhenlage aller Fixpunkte (Stützenlänge, Position des Stützenfußpunkts, Position der Tragseilanschlüsse) konnte auch die Grundform für die Formfindung festgelegt werden.

### **3. Computergestützte Formfindung und statische Berechnung**

Im Gegensatz zur Gestaltung von herkömmlichen, rein geometrischen Strukturen wie Massivbauten oder Holzbaukonstruktionen wird bei membran- und netzartigen Flächentragwerken ein gestaltungsunterstützender Formfindungsprozess benötigt. Grund dafür ist die direkte Beziehung zwischen Form und Kraftverteilung. Die computergestützte Formfindung ist hierfür ein elementares Werkzeug zur Ermittlung der Geometrie dieser Flächentragwerke. Sie basiert auf der Eingabe von vorab definierten Kraft- und Spannungsverlaufswerten und berechnet die vorgespannte Form der Seilnetzkonstruktion so, dass ein stabiles Kräftegleichgewicht innerhalb des Tragwerks entsteht.

Um die einzelnen Elemente der Konstruktion dimensionieren zu können, werden der statischen Berechnung zum einen die einwirkenden standortabhängigen Lastgrößen wie Wind, Eis und Schnee zugrunde gelegt. Zum anderen sind auch die nutzungsabhängigen Lastgrößen zu berücksichtigen, beispielsweise die Tierlast bei bekletterbaren Konstruktionen oder Impuls- und Anpralllasten bei Konstruktionen, die gegebenenfalls von Tieren besprungen werden können.

### *Beispielhafte Lastkombinationen einer Seilnetzkonstruktion für Tiergehege:*

Lastfall 1: Eigengewicht + Vorspannung (E + V)

Lastfall 2: E + V + Schnee (Eislast)

Lastfall 3: E + V + S + Wind(+x)

Lastfall 4: E + V + S + Wind(-x)

Lastfall 5: E + V + S + Wind(+y)

Lastfall 6: E + V + S + Wind(-y)

Lastfall 7: E + V + Tierlasten

### **4. Entwicklung von Konstruktionsdetails und Ausführungsplanung**

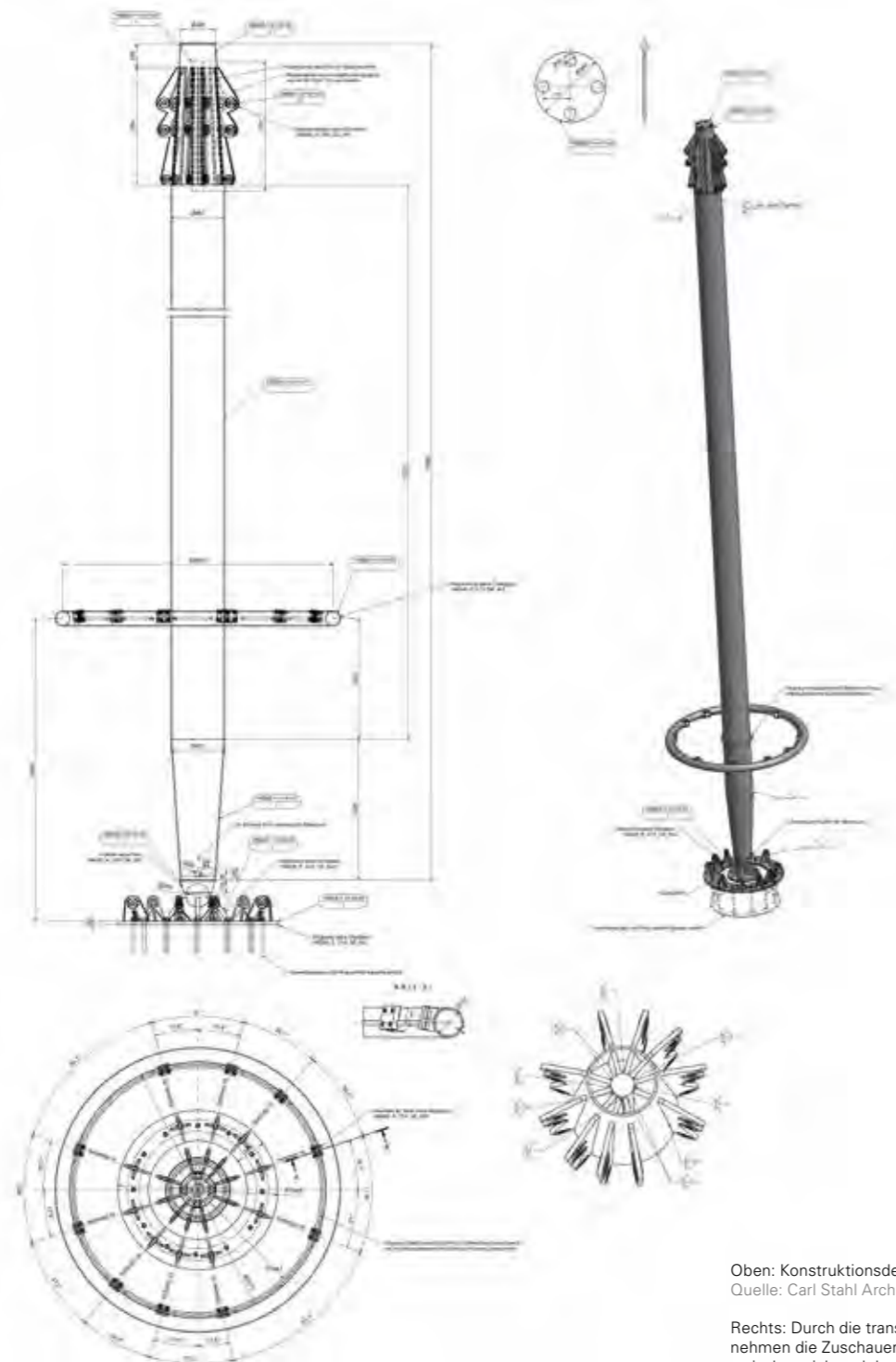
Netzartige Flächentragwerke aus Edelstahlseilen sind leichte Konstruktionen, die sich in erster Linie durch Massearmut auszeichnen sollen. Unter dieser Maßgabe ist das Ziel der nachfolgenden konstruktiven Bearbeitung, die statisch errechneten Schnittgrößen in projektbezogene, individuell zu gestaltende Bauteile zu übersetzen und diese mit standardisierten Bauelementen zu einem Gesamtsystem zu ergänzen. Individuell gestaltet sind dabei in der Regel die tragenden, die Netzstruktur unterstützenden Bauteile, druckbelastete Innenstützen, druck- und zugbelastete Randstützen sowie durch Nutzervorgaben bestimmte formgebende Elemente wie Zuschauereinsichtsbereiche, Besucherschleusen (zum Beispiel bei begehbaren Volieren), notwendige Öffnungen für Revisionszwecke oder Anschlüsse an massive Gebäudeteile. Ebenfalls individuell geplant sind Verbindungselemente, an denen drei oder mehr Kraftlinien zusammengeführt werden.

Standardisierte Elemente kommen zumeist für zugbelastete Bauteile zum Einsatz. Hierzu zählen lineare Zugelemente wie Seile zum Abspannen von Randstützen und Knotenblechen oder Seile als Abhängungen von Stützenringen. Auch zu Bögen geformte zugbeanspruchte Elemente werden durch standardisierte Seilkonstruktionen hergestellt.

Konfektionierte Seilkonstruktionen können entweder mehrfach verstellbar mit Spannschlössern an jeweils beiden Seilenden oder einfach verstellbar mit einem Spannschloss an einem Seilende und aufgerolltem Terminal (Gabel oder Öse) am anderen oder aber mit aufgerollten Terminals (Gabel oder Öse) an beiden Enden hergestellt sein. Bei Bedarf kann ein weiteres Spannschloss integriert werden, beispielsweise in der Seilmitte. Die Konfektionierung der Netzflächen basiert auf der computergestützten Formfindung. Dadurch wird für die in der Regel mehrfach gekrümmten und den Raum definierenden Flächen die Voraussetzung für die Konfektionierung der Netzfelder geschaffen. Edelstahlseilnetze werden aus parallel ausgelegten und mittels Presshülsen verbundenen Seilscharen hergestellt. Die Nenngröße der Netze definiert sich durch:

Maschenweite (MW): Abstand zwischen zwei Presshülsen  
Maschenhöhe (MH): Vertikaler Abstand zwischen zwei PH  
Maschenbreite (MB): Horizontaler Abstand zwischen zwei PH  
Öffnungswinkel ( $\alpha$ ): Variabler Öffnungswinkel der Seilschar

Dabei ist die Maschenweite MW stets gleichbleibend, die Standardöffnung der Maschen beträgt 60 Grad. In Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\alpha$  verändern sich sowohl die Maschenhöhe MH als auch die Maschenbreite MB. Durch die Variabilität des Maschenöffnungswinkels lassen sich die Edelstahlseilnetze auch stark ausgeprägten dreidimensionalen Formen anpassen, ohne dass das stabile Kräftegleichgewicht innerhalb der Konstruktion beeinträchtigt wird. Netzbahnen können jedoch entweder in der Produktionsstätte oder am Einbauort nahtlos miteinander verbunden werden, so dass der Netzgröße keine Grenzen gesetzt sind. Das Ergebnis ist ein individuell konfektioniertes Produkt.



Oben: Konstruktionsdetails Pendelstütze  
Quelle: Carl Stahl Architektur

Rechts: Durch die transparente Übernetzung  
nehmen die Zuschauer die Barriere  
zwischen sich und den Tieren kaum wahr.  
Foto: Carl Stahl Architektur



## 5. Montageplanung

Eine exakte und durchdachte Planung ist die Grundlage einer präzisen Montage der vorgespannten Netzkonstruktion vor Ort. Die Carl Stahl ARC GmbH bemisst und plant sowohl den Stahlbau als auch die Seil- und Netzmontage sowie Montagestatik, Gerüstbau und Montagehilfsmittel.

Die Abläufe der Stahlbaumontage müssen dabei sowohl auf die Netzmontage als auch auf die Stahlbetonarbeiten abgestimmt werden. Während der Montage werden die Stahlbaustützen, die später das Netz tragen, über provisorische Spann- und Zurrgurte gehalten, da die Netze und Seile der endgültigen Konstruktion die Träger stabilisieren und in Lage halten. In enger Zusammenarbeit mit dem Stahlbauer werden in dieser frühen Bauphase bereits die Haupt- und Abspannseile montiert. Da im Einbauzustand andere Kräfte auf die Stützen wirken als im Endzustand, bedarf es einer entsprechenden

gesonderten statischen Planung und Bemessung. Auch die provisorischen Abspannungen der Stützen sind statisch zu überprüfen. Bei der Planung der Seilmontage ist entscheidend, welche Seile fertig konfektioniert angeliefert und welche Seile vor Ort abgelängt und mit Endbeschlägen versehen werden. Bei der Montage werden die einzelnen Netzbahnen auf einer Hilfskonstruktion, bestehend aus Seilen, miteinander kraftschlüssig und nahtlos verbunden. Sind alle Netze aufgelegt, werden sie auf Spannung gebracht und an die Randkonstruktion angeschlossen. Bei der Organisation von Montagehilfsmitteln (beispielsweise Autokran oder Hubsteiger) sind die jeweiligen Gegebenheiten vor Ort, etwa der Untergrund oder die verfügbare Stellfläche, zu berücksichtigen. Das Raumgerüst zur Montage der Übernetzung wird exakt für die Geometrie der fertigen Anlage ausgelegt, um den reibungslosen Ablauf der Installation zu gewährleisten.



»There are no straight lines or sharp corners in nature. Therefore, buildings must have no straight lines or sharp corners.«

Antoni Gaudí



## Parametric Design Between Architectural Intension and Form-finding

Barakat Khaysam

### Structural Concept

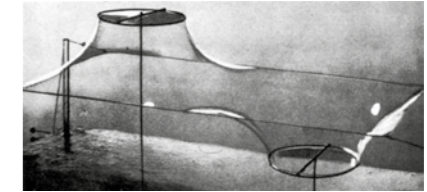
One Inverted Conical and One High Point Conical with four corners in combination with closed adjoining edges and three masts, one at the low ring and two at the high rigid clamped rings.

### Architectural Concept

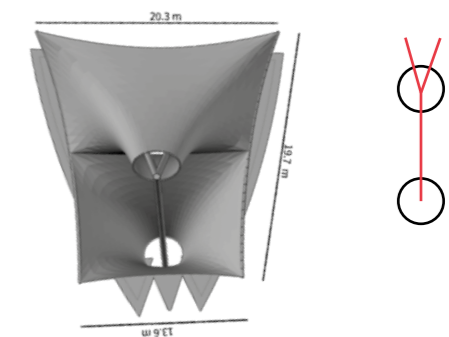
Modern daily life style can be associated with stress and tension. Students always look for spaces to expand their creativity and relax. *2 CHILL* is a proposal to upgrade the status of the existing Seminarplatz in Hochschule Anhalt-Dessau.

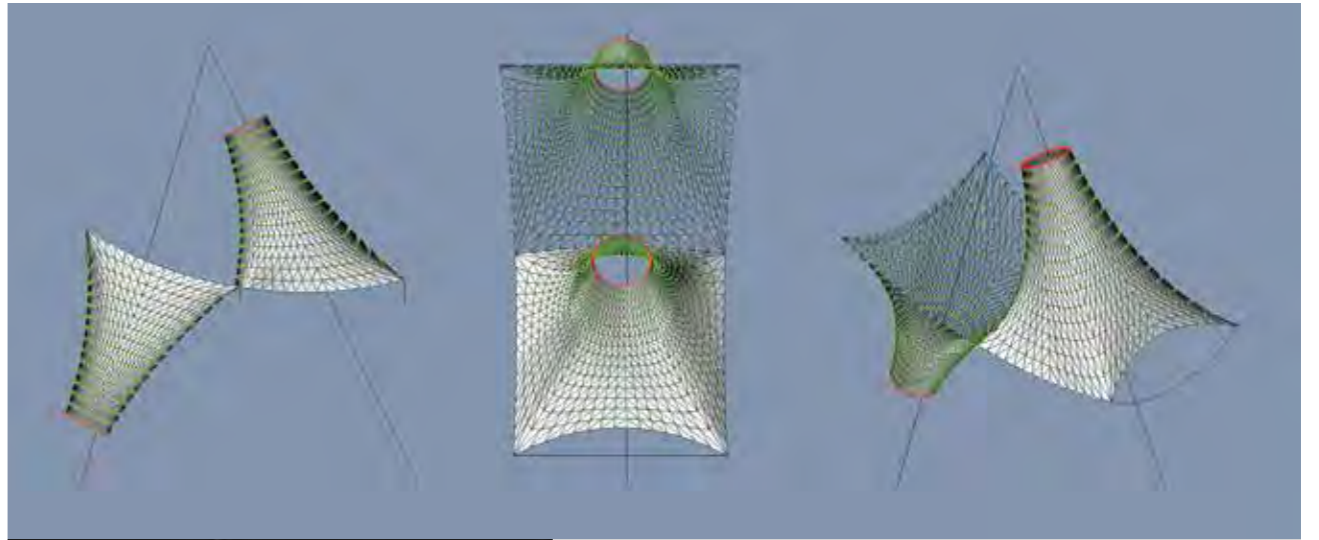
Currently, the site is not protected from exterior climate such as rain and sun. Students get a chance to utilize this space only for few months a year. Here comes the necessity to redevelop the site in a more efficient way, by introducing a »cool« roofing structure that could become a campus landmark, a place for students and teachers to hangout, socialize, be more active, and most importantly to increase productivity and positivity throughout the campus.

In addition to the covering structure to the Seminarplatz, small kiosks will be installed to provide snacks and drinks all day long. Outdoor benches for maximum utilization of space, and a small outdoor cinema screen will be installed so students and staff would gather during various events.



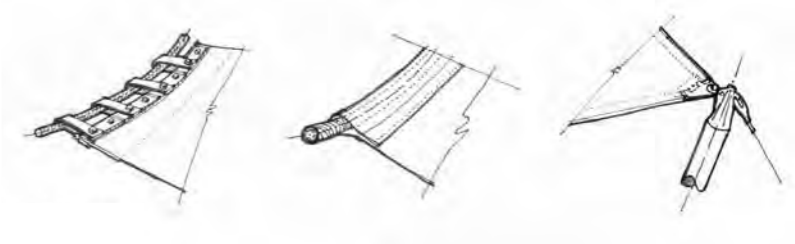
**Frei Otto: experimenting with soap bubbles**  
Otto was specialized in lightweight tensile and membrane structures, the forms were derived from a series of soap bubble experiments which used the surface tension of the liquid to find the minimum surface to cover a closed shape  
Source: Institut für leichte Flächentragwerke (IL) der Universität Stuttgart

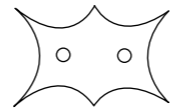
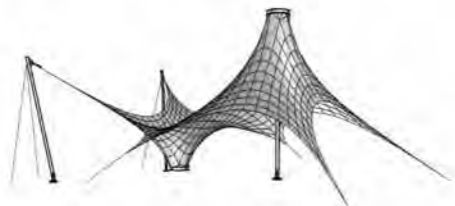
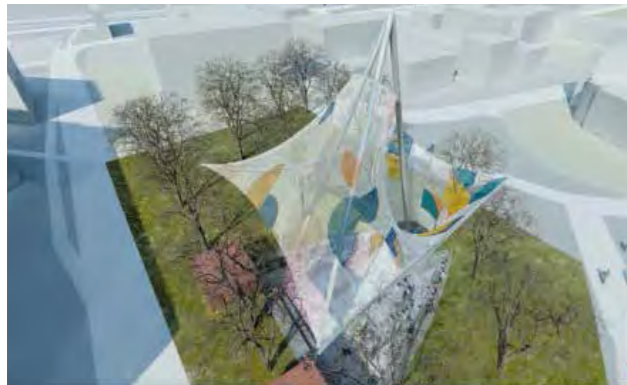




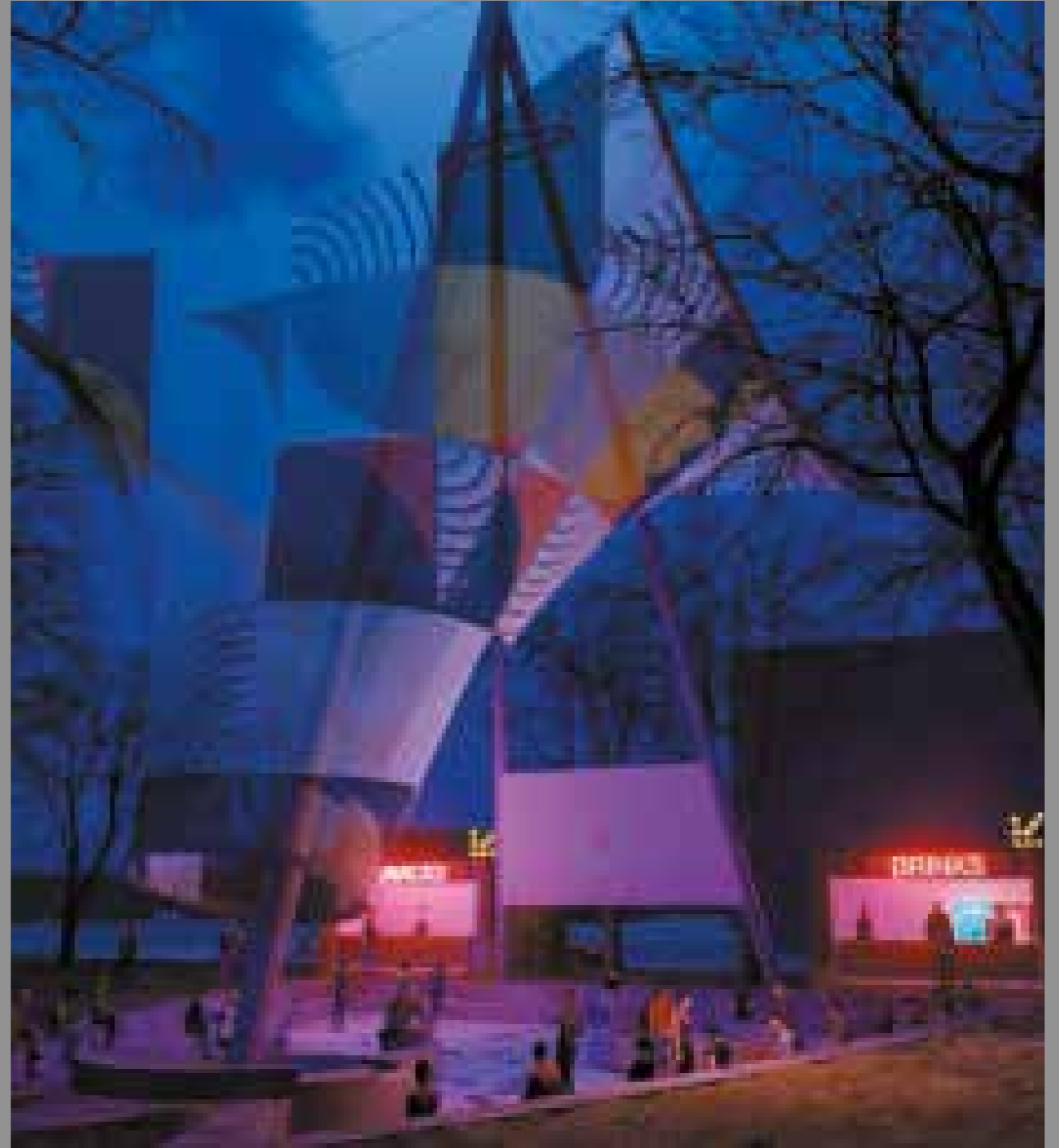
Above: Model with Formfinder Software Tensile Fabric Patterning (IxCube)  
 Rosa Parks Transit Center, Detroit (USA)  
 Architecture: FTL Design Engineering Studio

Experimental working model and details





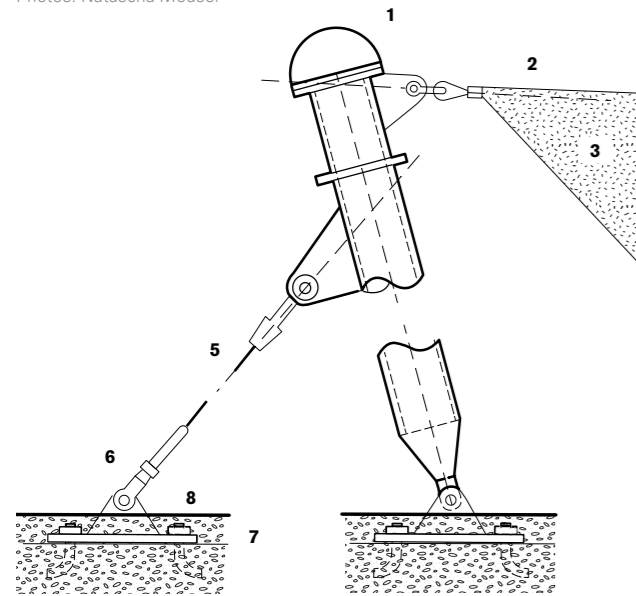
Above: Sceneries from presentation movie  
 Left: Bauhaus pattern and conic form



Movie stills

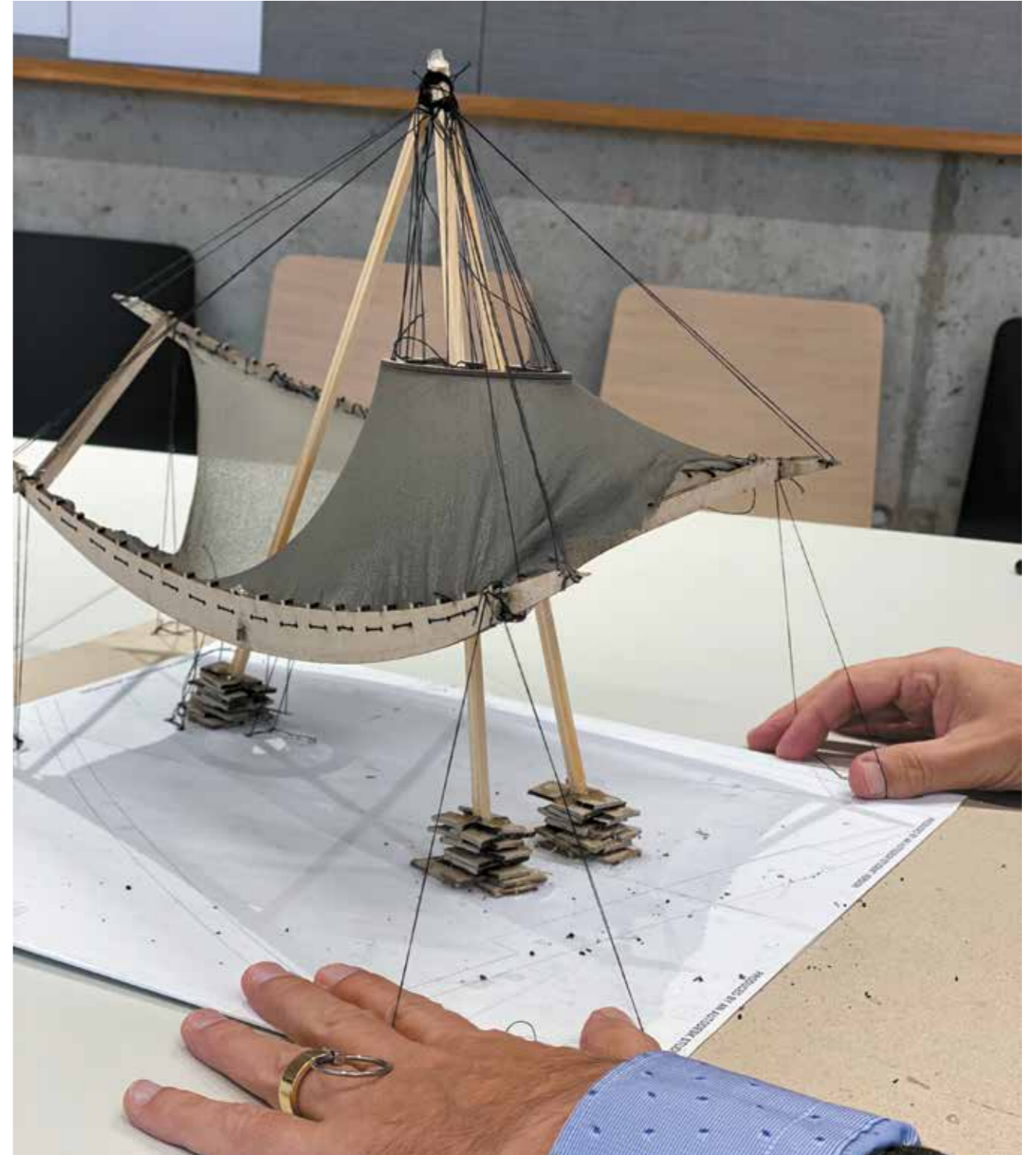
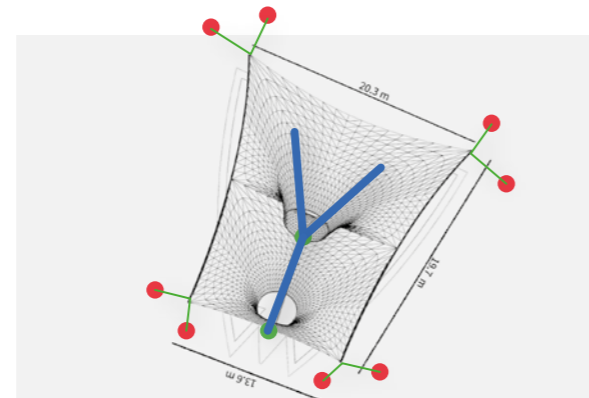
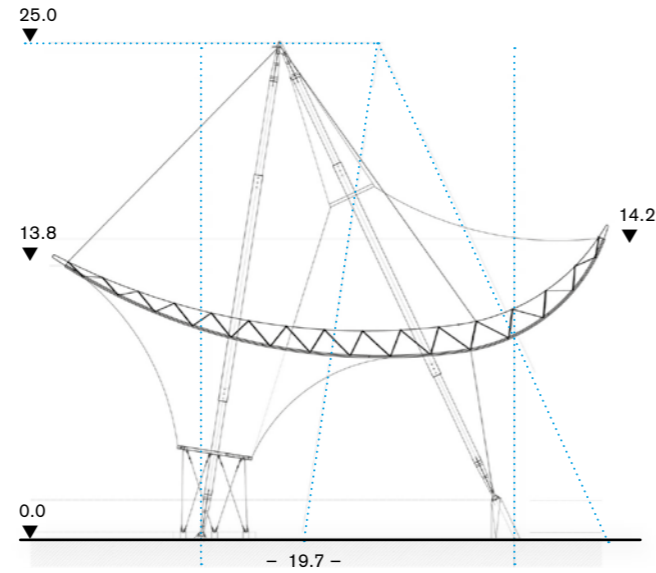


Formfinding with models  
Photos: Natascha Meuser



**Detail Main Mast**

- 1 End cap
- 2 Catenary cable
- 3 Fabric membrane
- 4 Mast
- 5 Back cable
- 6 Open sewage socket and tunbuckle
- 7 Anchor bolts
- 8 Pin and anchor base plate





## The Dynamics of Membranes Sling Swing Sports with the Possibility of Deformation and Oscillation

Mohamed Gouda Shehata / Chin Ai Ong

### Structural Concept

To fulfill its function our membrane structure is shaped in relation to the proportions of the pavilion. The membrane is going more high on middle and is hanged with a steel pipe frame. The steel pipe frame is also meant to hang the aerial swings loads on the both sides the membrane pulled with a wires from a ground stands. The membrane form is generated and shaped using program *iX cube*.

### Components

(1) *Steel Pipe Frame*: The pipe frame is the main structural component in our membrane. The vertical pipes are slightly angled to resist to the force in a better way. They are welded together with the horizontal beam pipe. It has a diameter of 200 mm. The frame height starts from 4 meters at the edges and reaches 6 meters in the middle.

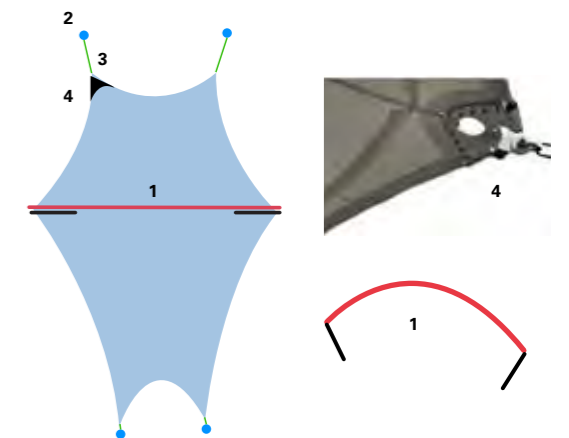
(2) *Ground Stands*: The ground stands pull and support the membrane from a particular height. They have a 200 mm diameter. On the one side of the pavilion it only has 0.5 m height. To give a height clearance on the entrance it has a height of 1.5 meters on the other side.

(3) *Cables*: The cables used along the membrane edge in pocket to give strength to the edges. They are also used to pull the membrane from the corner plates to the supporting ground stands.

(4) *Plate*: The corner metal plate is used to connect the supporting structure and the membrane.

### Architectural Concept

The aim of the design is to freshen up the square with a lightweight tensile structure and by adding new attractions for the students and visitors. So far the square has acted as a hinge between faculty buildings and is rarely used. This is mainly due to the fact that the place offers no quality of stay and appears unkempt. Sports equipment, in the form of membrane sails, are intended to encourage students and visitors to exercise pleine air. The new Sports flooring takes up the colour theory of the famous Bauhaus teachings with colourful block stripes. A linear over 70 meters long bench offers space to lie and sit.





Sectional drawing of Sling-Swing.

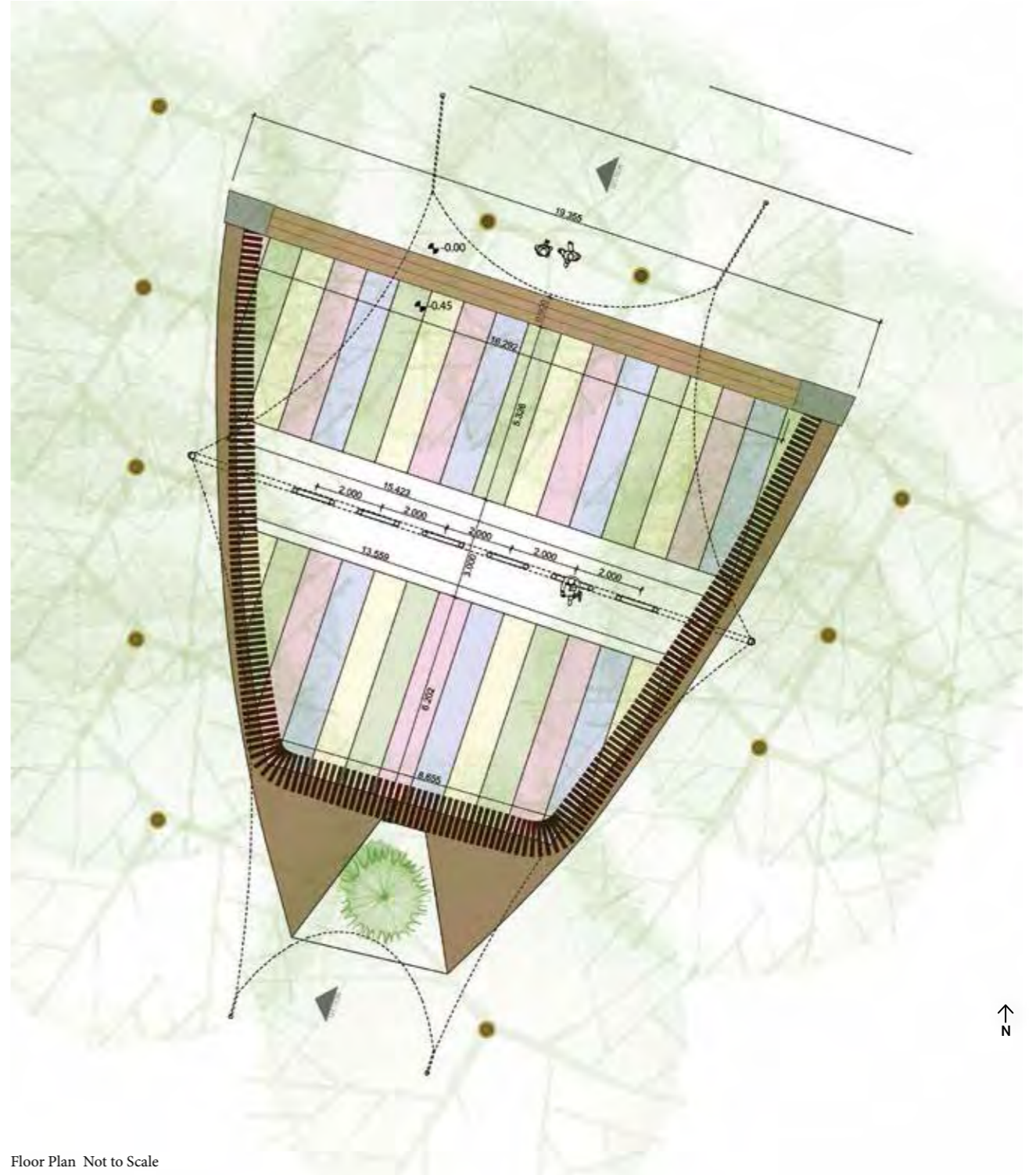


Elevation view from Dessau Hauptbahnhof.

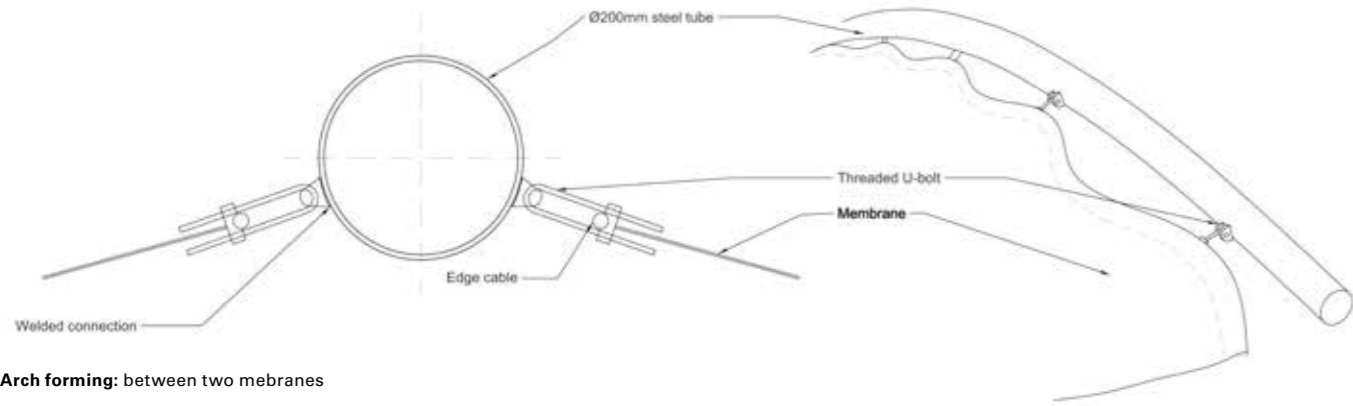
**Aerial Hammock**  
Hammocks also take up the idea of the textile pavilion in their use. Everything should swing, be light and airy.

**Parametric Benches**  
The existing bench is reshaped with a new parametrically designed bench.

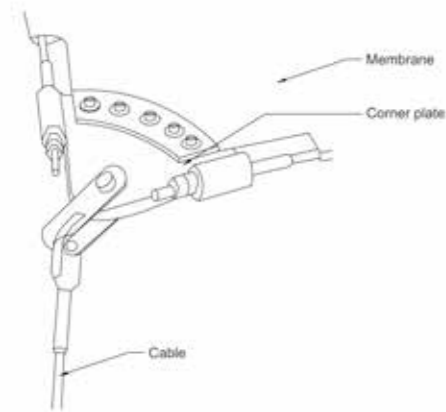
**The floor as a work of art**  
The design of the floor will set a colourful sign even from far away. Here communication takes place.



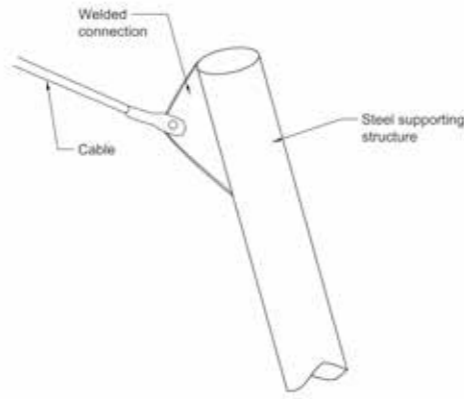
Floor Plan Not to Scale



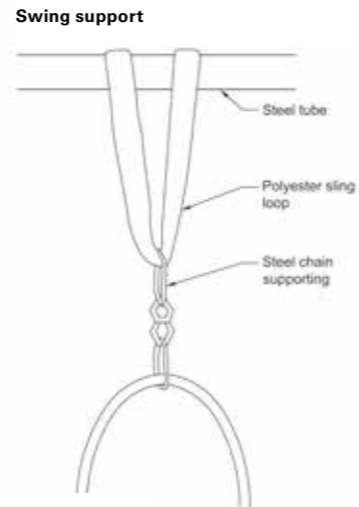
Arch forming: between two membranes



Corner plate: clamped to fabric; cables adjustable



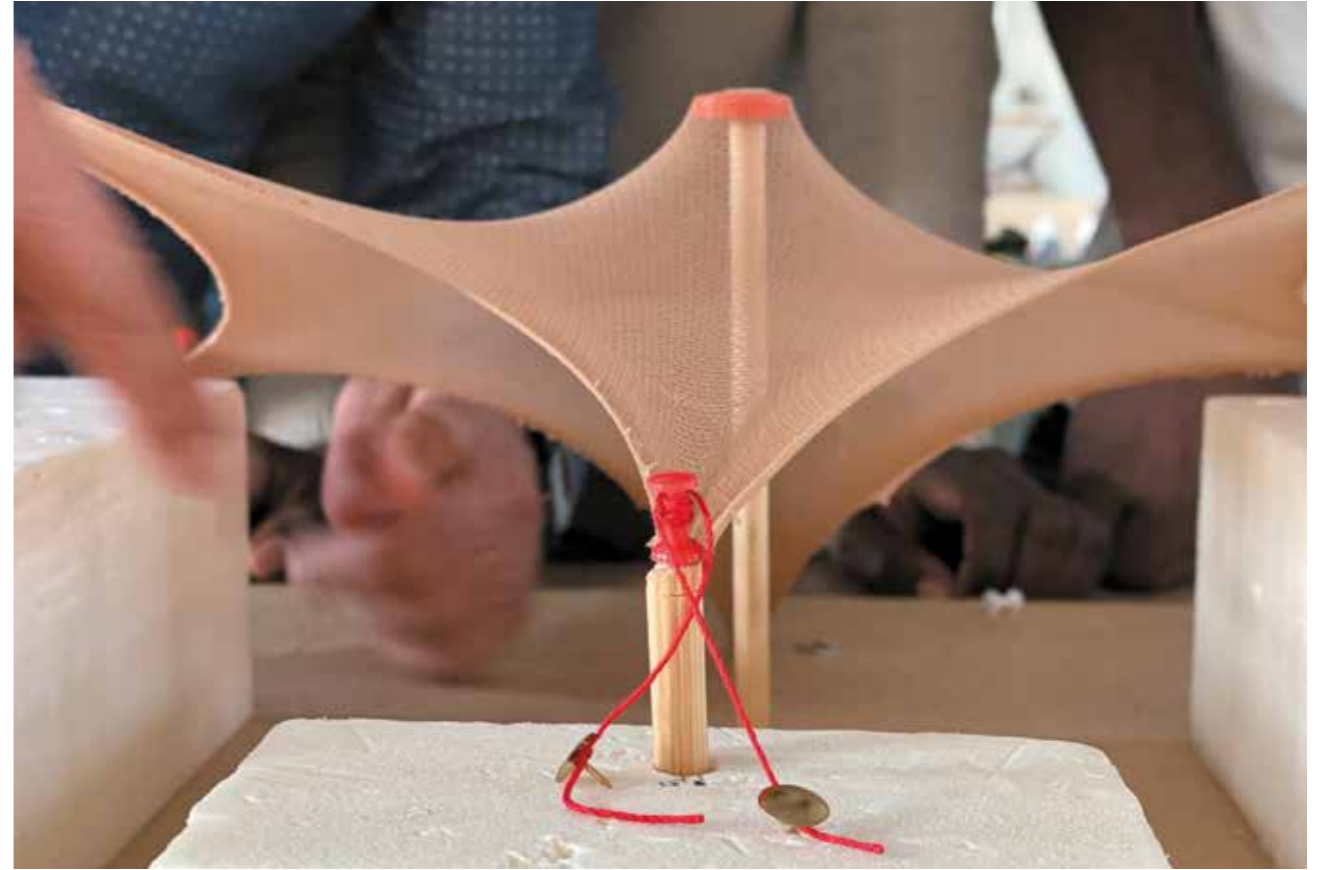
Supporting structure: clonnection of cables



### Design Concept

The aim of the design is to freshen up the square with a lightweight tensile structure and by adding new attractions for the students and visitors. So far the square has acted as a hinge between faculty buildings and is rarely used. This is mainly due to the fact that the place has no quality of stay and appears

unkempt. Sports equipment, in the form of membrane sails, is intended to encourage students and visitors to exercise *pleine air*. The new Sports flooring takes up the colour play of the famous Bauhaus teachers with colourful block stripes. A linera over 70 meters long bench offers space to lie and sit.







## The Spider-like Structure What Eight Feet can Carry

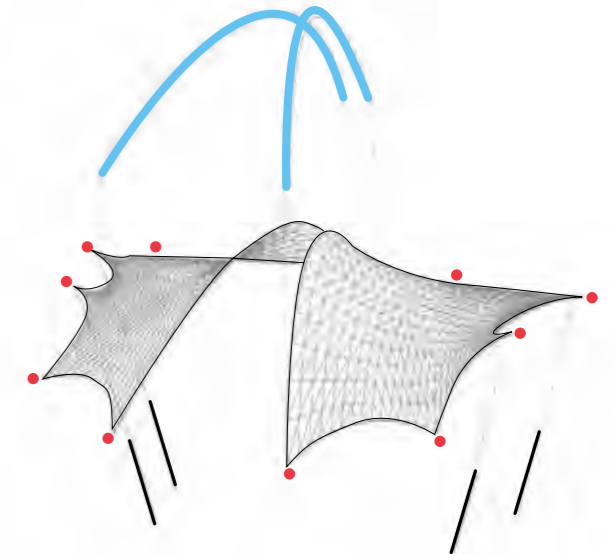
Anotidaishe Mavazhe / Jameel Trowers

### Structural Concept

The spider-like structure has eight legs and is symmetrically separated in the middle. The lightweight tensile structure is structural supported with two curved stirrups that are inclined towards each other and stiffen the structure in the longitudinal direction, just like a spinal column partially covered with glass. The textile elements are attached to the spinal column and are each tensioned at five points and anchored to the ground at a total of ten points. This structure covers a space of almost 380 sqm and provides shelter from rain, snow and sun.

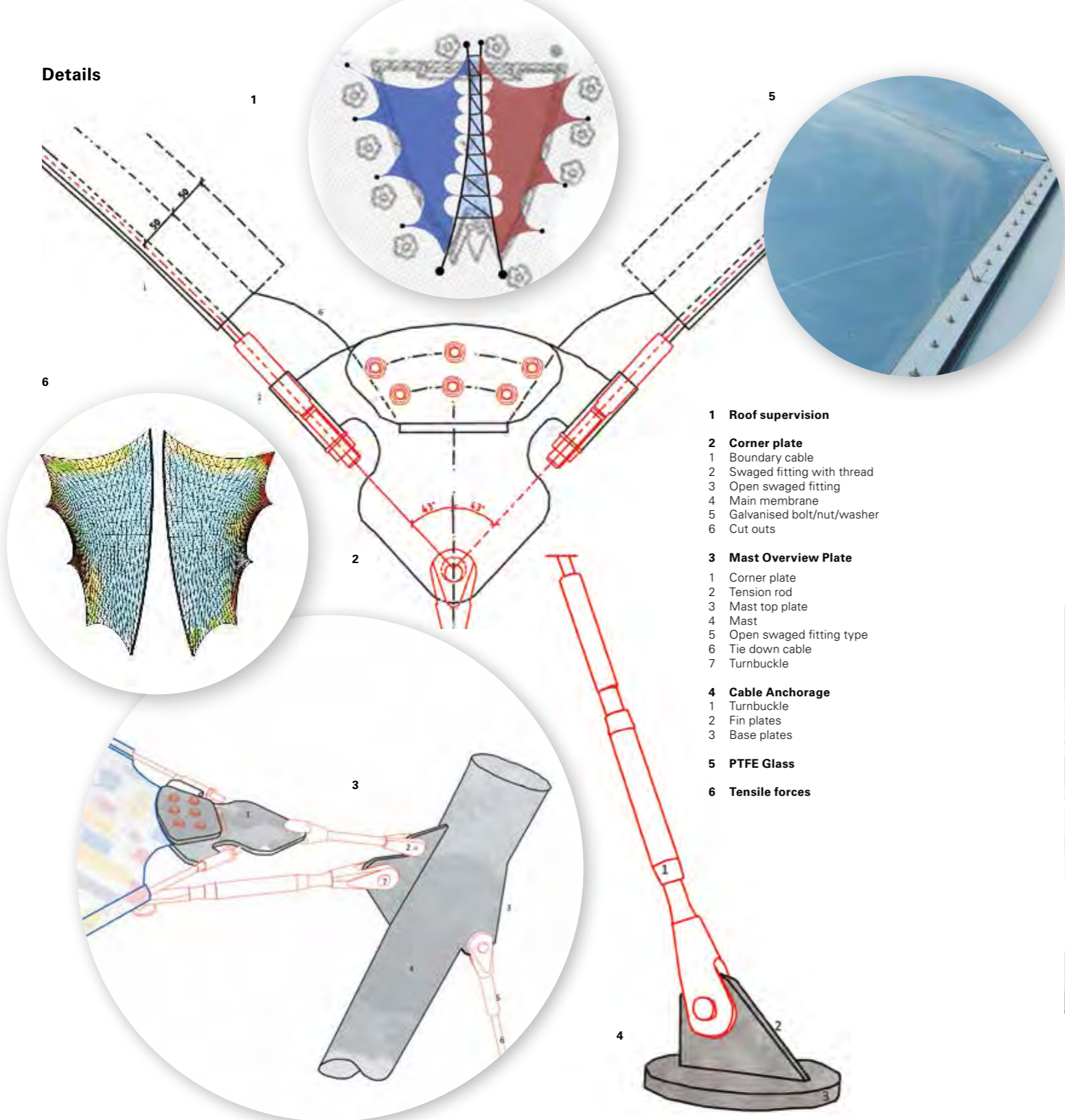
### Architectural Concept

*Social Stitch* is an amphitheatre on *Bauhaus Campus*. The goal is to create a lively and multi-functional meeting space, to celebrate disco parties, social gatherings, university exhibitions and other social oriented programmes. In addition students can also sit in the amphitheatre during lunch and socialise. In order to make the membrane more iconic and vibrant, Bauhaus inspired patterns are projected on the membrane to make it more appealing away from the typical white. This aesthetic feature makes the membrane more inviting and gravitates to its intended use as a social hub for university students.



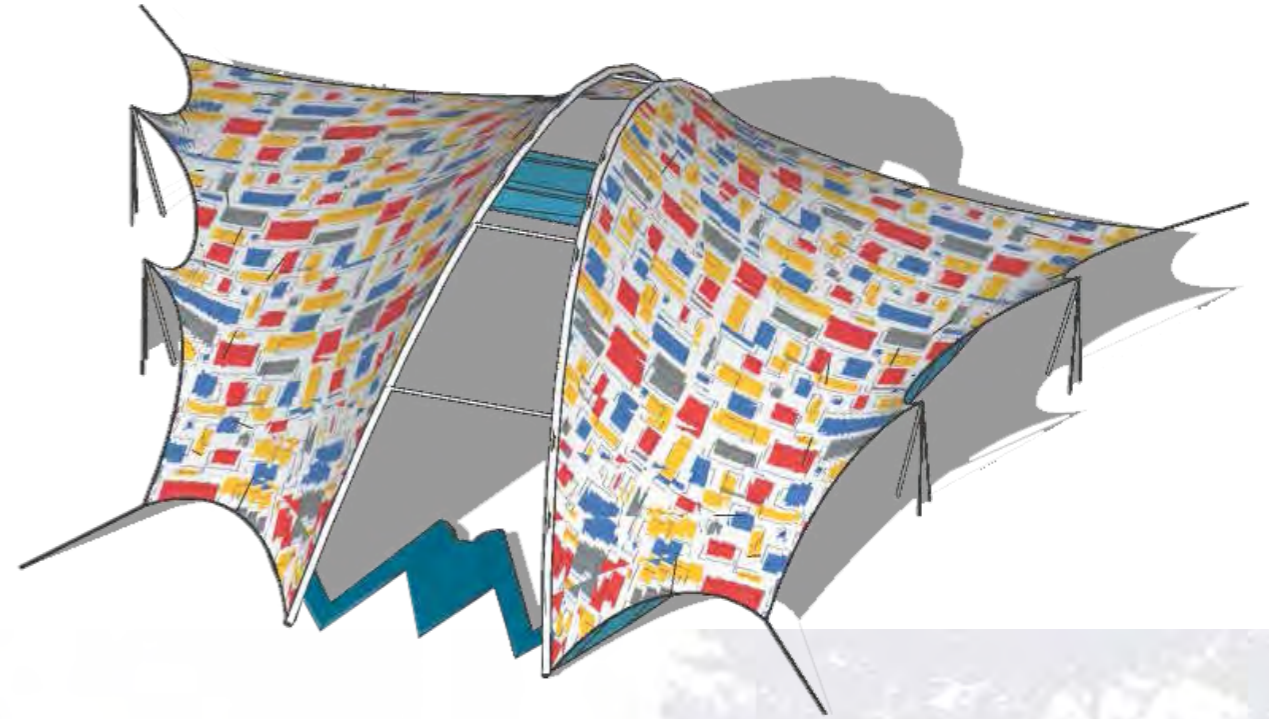
Arch surface supported by two arched beams and cable edges, 8 corners with flexible edges attached to the ground

Details



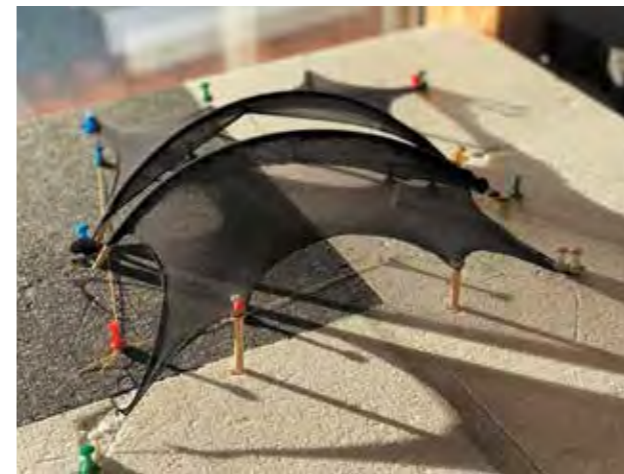
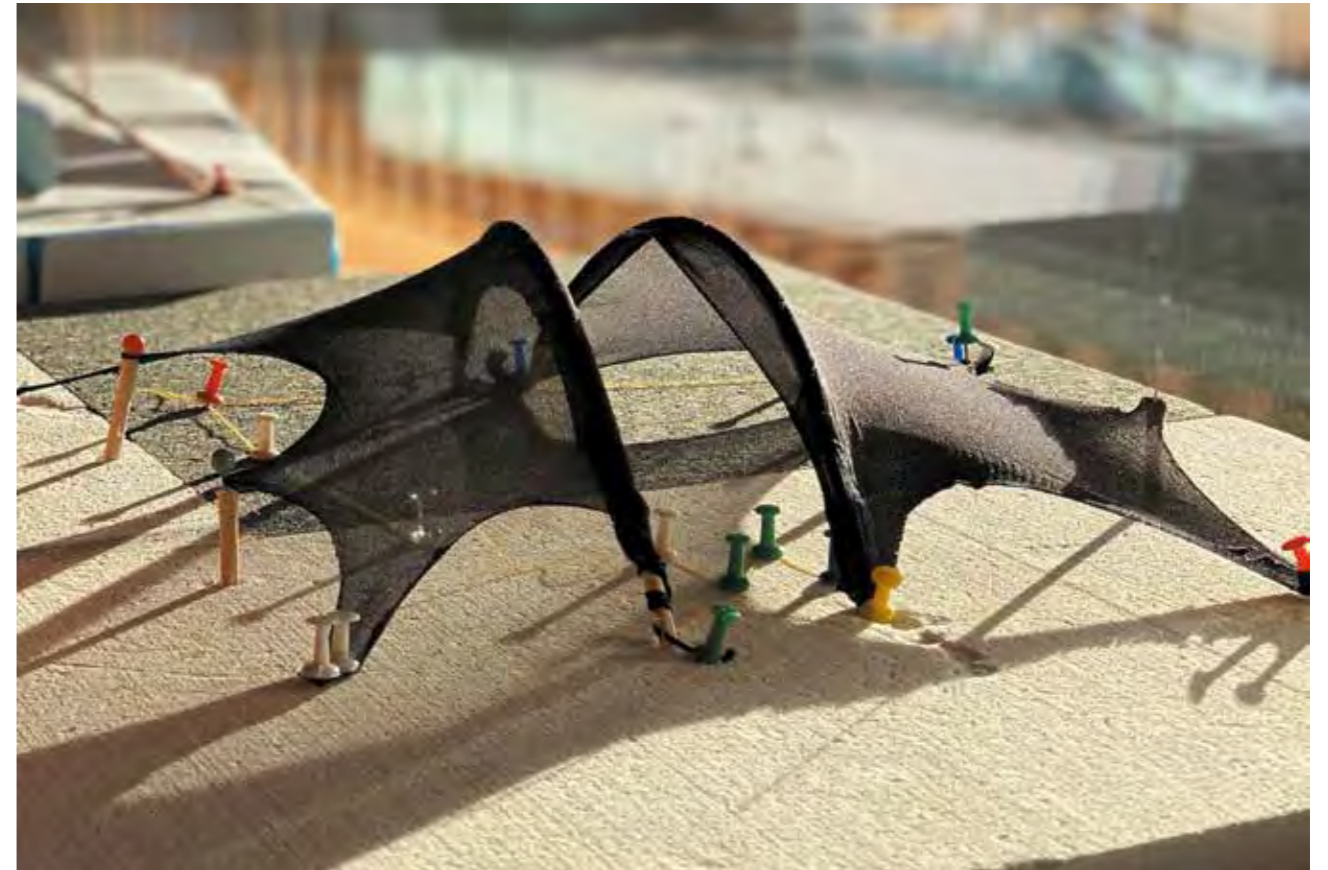
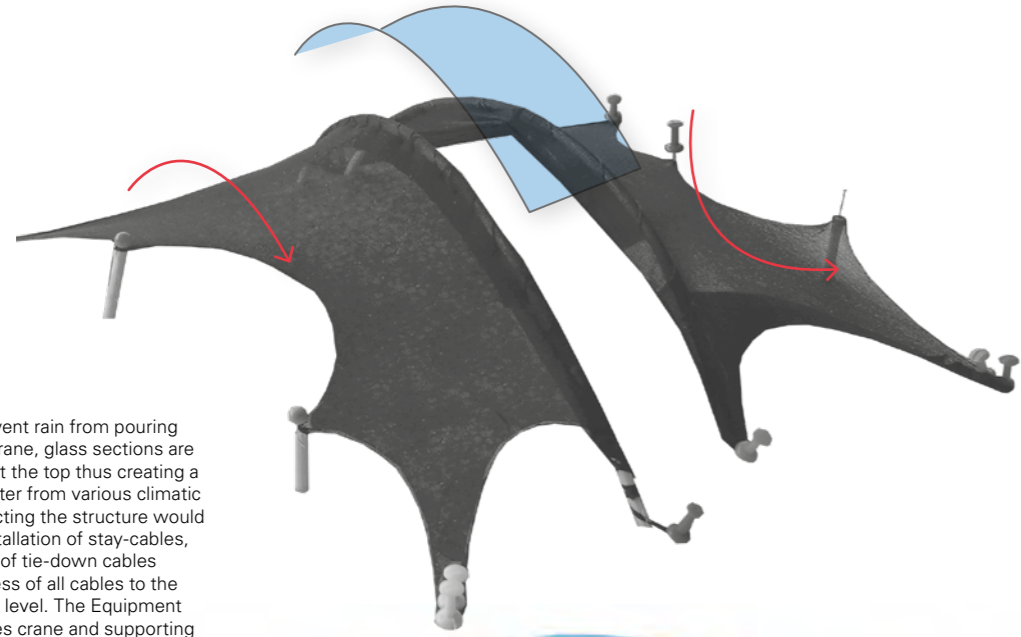
- 1 Roof supervision**
- 2 Corner plate**
  - 1 Boundary cable
  - 2 Swaged fitting with thread
  - 3 Open swaged fitting
  - 4 Main membrane
  - 5 Galvanised bolt/nut/washer
  - 6 Cut outs
- 3 Mast Overview Plate**
  - 1 Corner plate
  - 2 Tension rod
  - 3 Mast top plate
  - 4 Mast
  - 5 Open swaged fitting type
  - 6 Tie down cable
  - 7 Turnbuckle
- 4 Cable Anchorage**
  - 1 Turnbuckle
  - 2 Fin plates
  - 3 Base plates
- 5 PTFE Glass**
- 6 Tensile forces**

Concept



Front elevation

In order to prevent rain from pouring into the membrane, glass sections are implemented at the top thus creating a protecting shelter from various climatic situations. Erecting the structure would include the installation of stay-cables, the pretension of tie-down cables and the prestress of all cables to the required stress level. The Equipment needed includes crane and supporting cables. The membrane would be carefully fixed with corner plates, tension rods and edge/boundary cables.



Models



## Membrane Structures It All Starts With a Dot

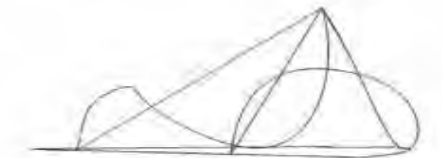
Seshiena Lotsu

The structure is designed to be a monumental piece that is easily distinguished from the traditionally built structures on the Dessau campus. Structurally, fabric is tensioned across the two hyper loops and is connected only at the structure's high point. The composition consists of two looped beams set in hyper antilastic forms, where each loop comprises a curved edge following the curve of the seating area with high and low points and a more straight edge connecting the structure's highest point to its lowest corner. From setting up a working model it is found that the membrane structure exists in a state of tension without the need for additional cables or masts. Luff track edges along the loops hold the fabric in place.

### Architectural Concept

The dot is the point of departure for every line. In seeking to give a genius loci identifiable with students of the Design campus of Hochschule Anhalt, the aim was to capture this essence. The wish to realise creative ideas, and also to provide an otherwise contrasting build to the site's architecture gave rise to the proposed form.

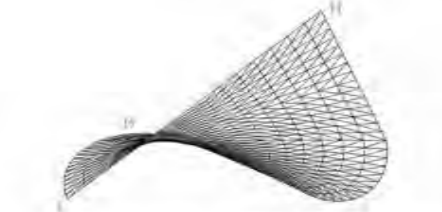
In capturing the travel of The Dot from its initial to its apex, which may be described as the realisation of the designer's intention, along the twists and turns of design development and project realisation, the form of this structure seeks to give a physical emblem to the concept of how design starts off, is realised and then becomes, as it were, the starting point of a new design's journey.



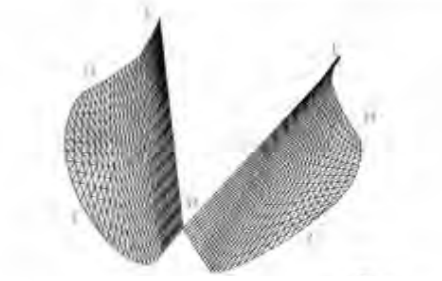
Curved beam structure



Curved beam structure with mesh fab



Section showing Hyper with curved beam edge



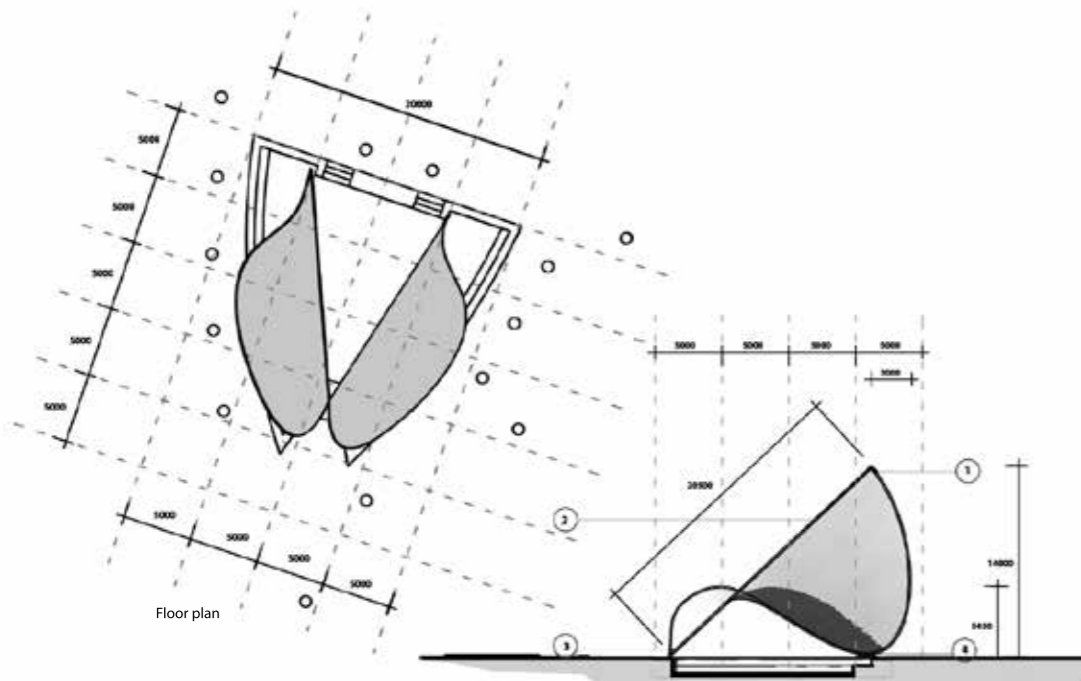
Plan



Site section along axis of Building 4

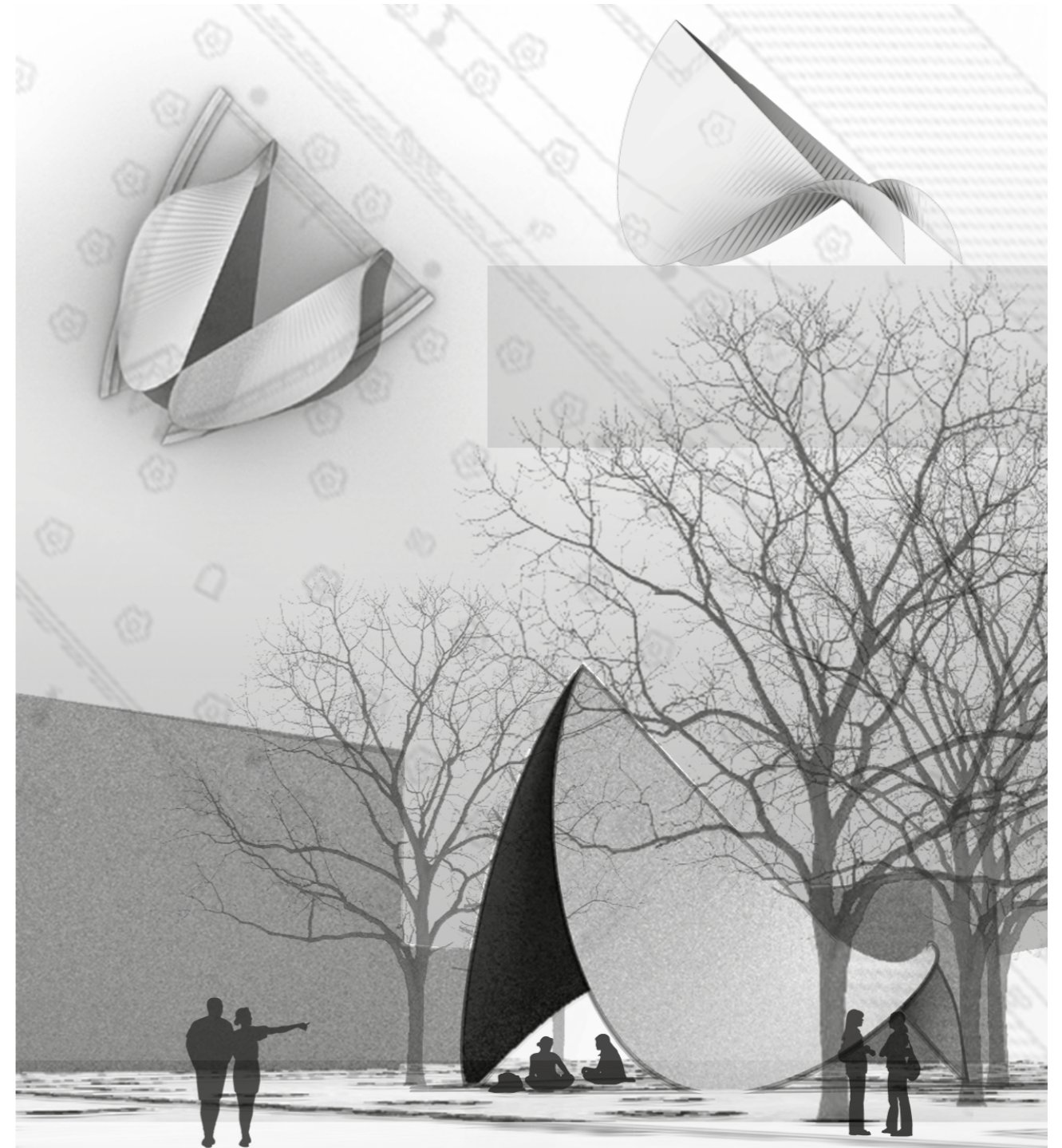


Site section along axis of Building 1



- ① Stiff corner with right angle
- ② Hans sleeves with rope as edge element
- ③ Stiff web corner attached to foundation
- ④ Foundation connection to stiff curved edge

Section



Visualization



## Ring Compression with Central Support

### How Table Legs Support the Structure

Ebru Aykan / Mehmet Caferoglu

The project aims to use the membrane as an arranger of the design. The textile organizes the space with its planning. It has an opening on the top to have the place lighted. This opening creates a useful stage and audience area under itself. Some pallets and fruit boxes are added for sitting and other interactive uses. With these new flexible seatings, the stage area and membrane, the area can become a living part on the campus. And as a shelter, it can be used in student meetings, barbecue parties and university events including in rainy weather.

A very common method of controlling the level of stress in a membrane is to use a ring-shaped element. The diameter of the ring depends on the strength of the fabric and the total load to be transferred to the support. The designer may choose to add a reinforcing layer locally to the membrane to reduce the diameter of the ring. The membrane is attached to the steel ring (see system sketch) and is open at the top.

#### Structural Elements

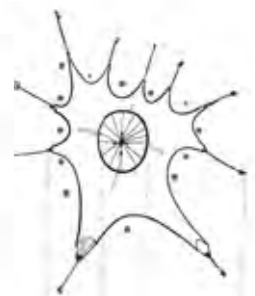
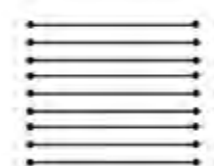
1 Ring



4 Poles



9 Cables

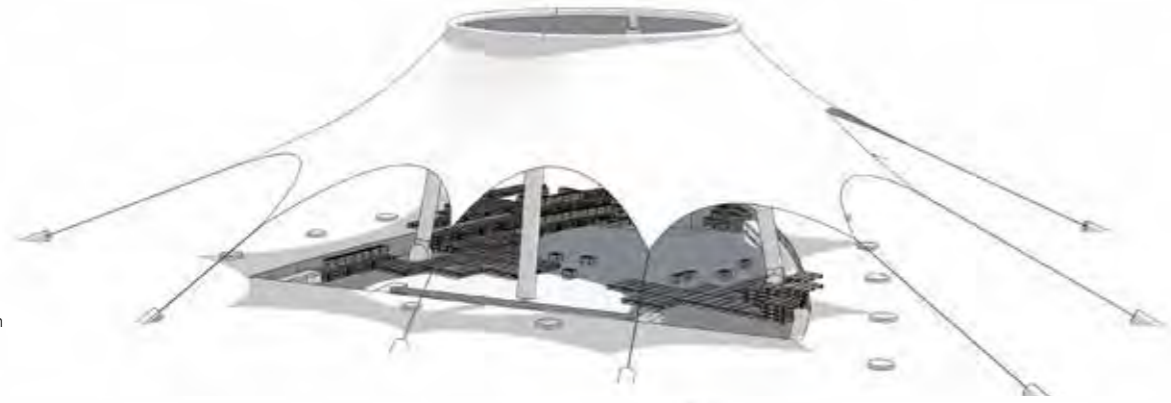


Plan

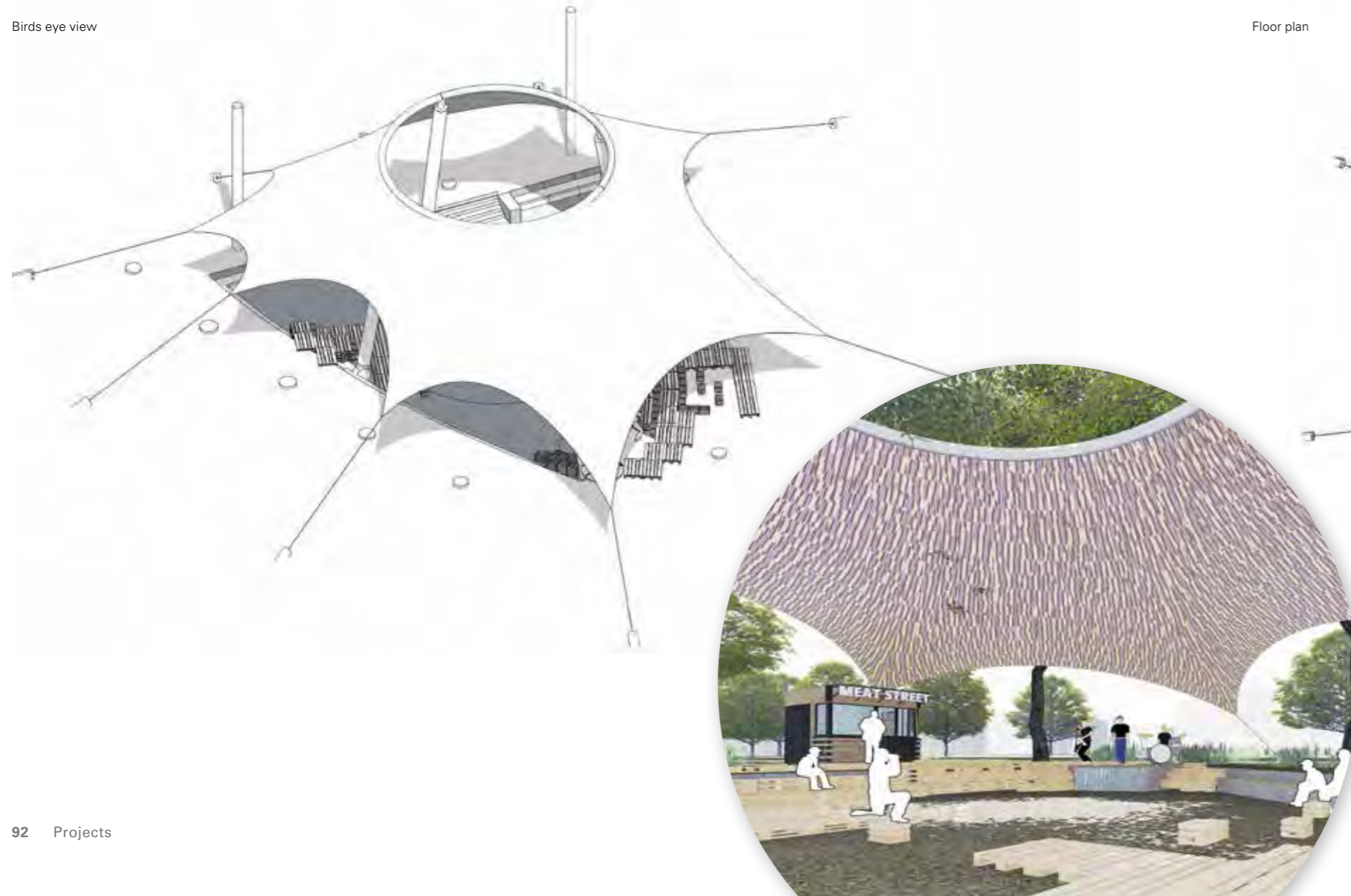
Rigid clamped ring



Elevation



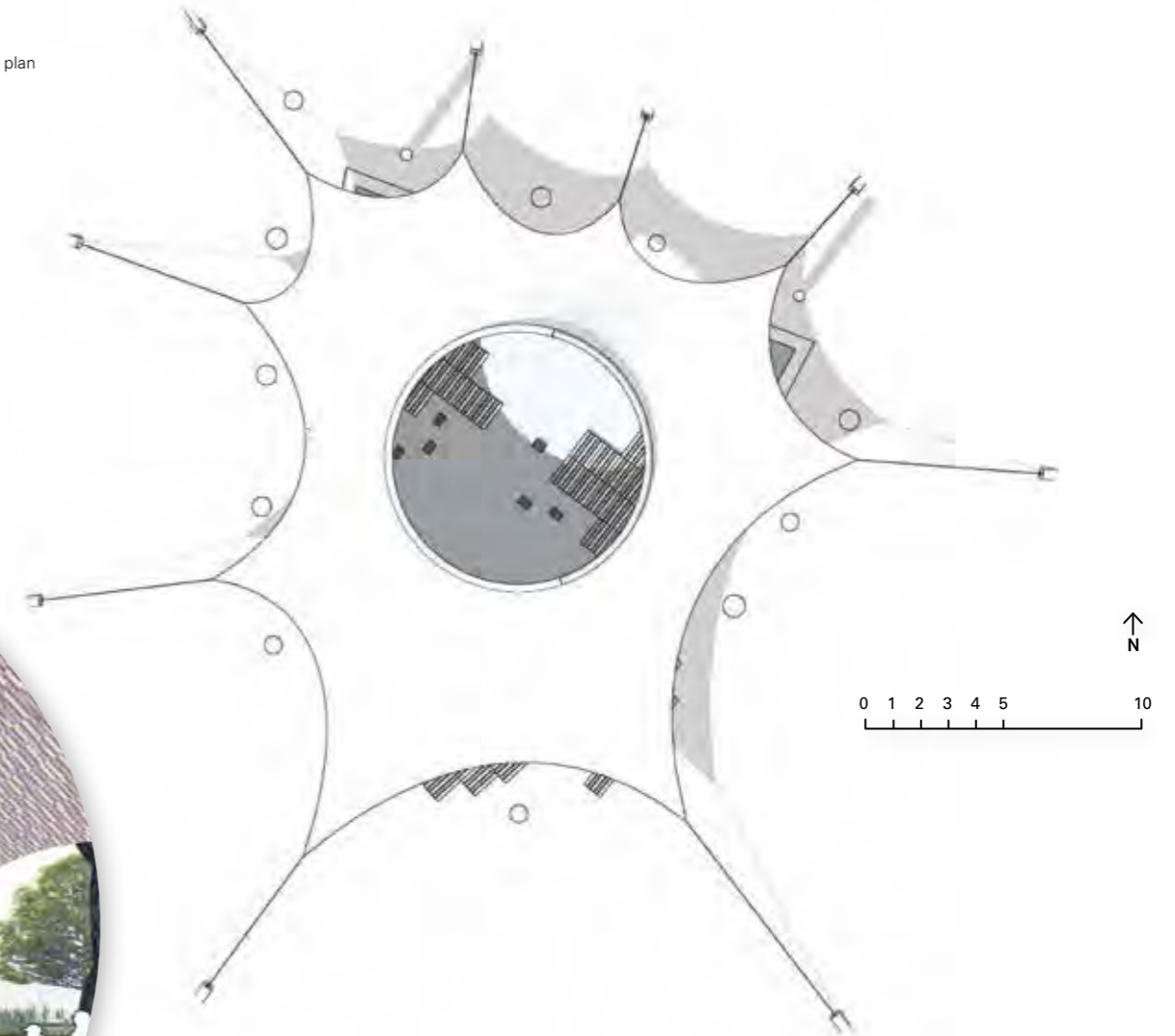
Birds eye view



Elevation



Floor plan

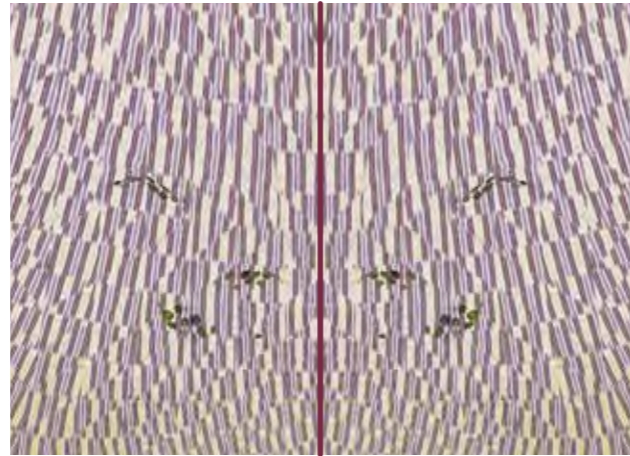




Form-finding with models

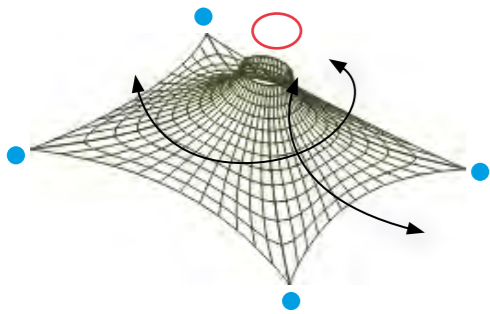


Ring beam as supporting structural element  
Source: Big Span Structures



Solid fabric giving shape and form  
Artist: Big Span Structures

Membranes are produced as a solid fabric providing protection from the environment, or in a mesh for shading purposes and commonly used in tensile façade projects where natural ventilation is key for such applications. Tensile membrane structures utilize supporting structural elements such as steel masts, arches and perimeter beams which have significant compressive, flexural and shear strengths ultimately giving the structure its shape and form. After final engineering is completed, shop drawings are produced.

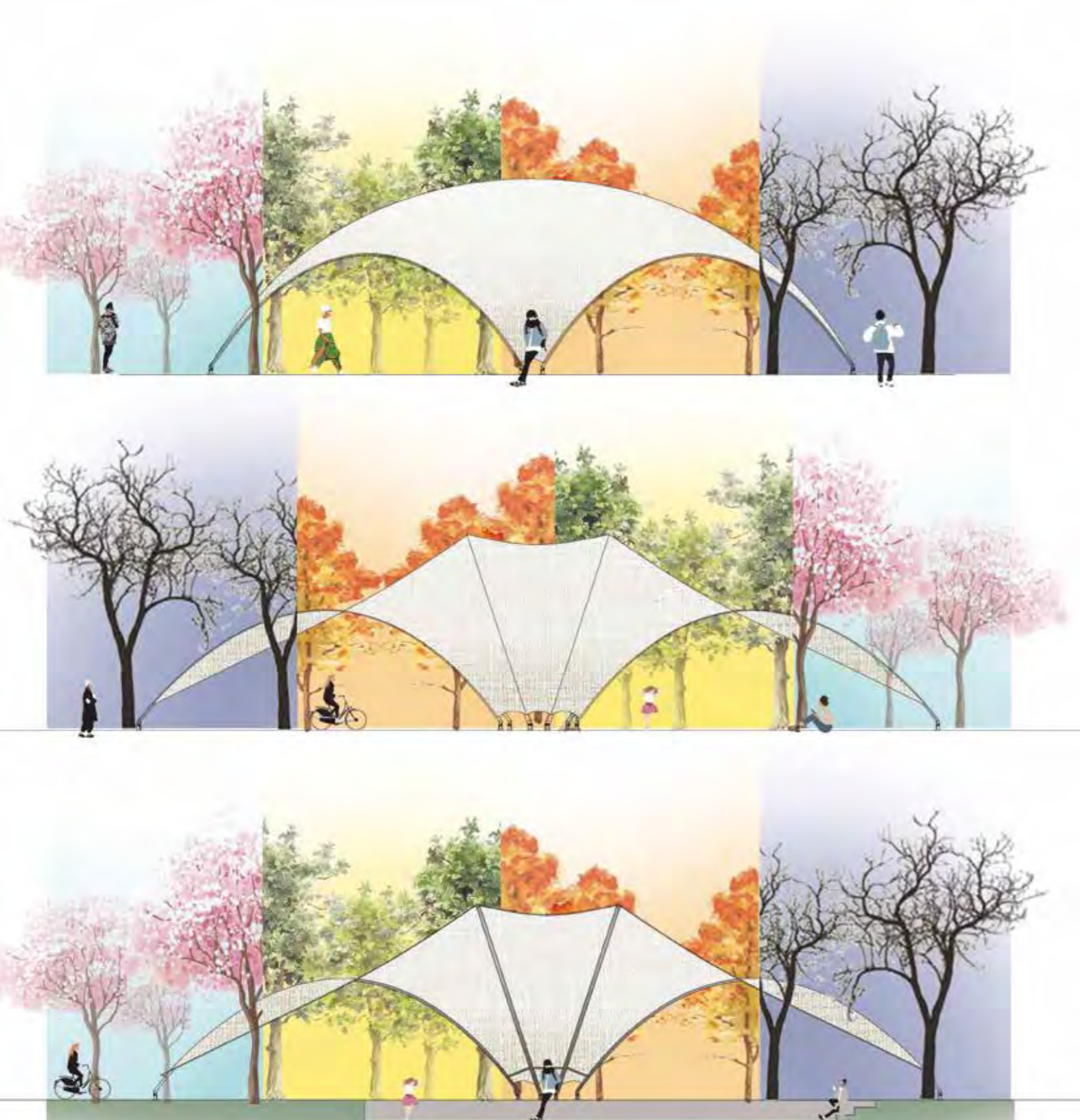


Form-finding with models  
Photos: Natascha Meuser

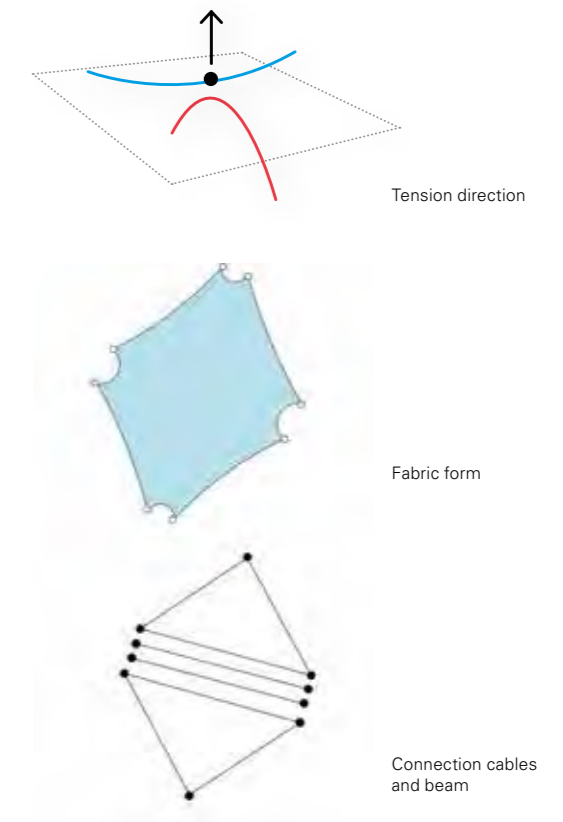


# Arch Supported Tensile Roof Anticlastic versus Synclastic

Nurin Abdullah / Yan Thum

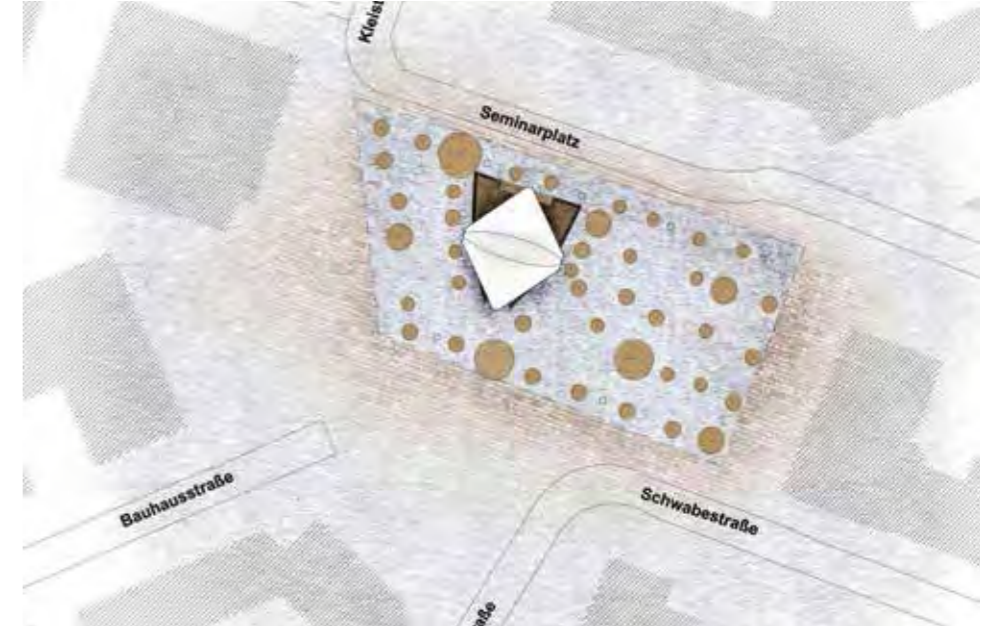


With their sail-like membranes and steel constructions, tensioned structures blend naturally into the landscape and effortlessly radiate a lightness of touch. The task was to design a pavilion that serves as a place of protection and residence at the same time and is an identification mark for students and visitors alike. The shelter serves as a protective structure that can withstand strong winds and rain. A primarily curved membrane that reaches down to the ground is intended as the main structural element of the overall design. Two secondary elements are opening and barrier at the same time. So as a structural principle for the tensile surface structures, we need to create 3D forms Anticlastic shapes or Synclastic shapes. The anticlastic forms are normally used on membrane surface materials and the Synclastic forms will normally be used on film surface materials.

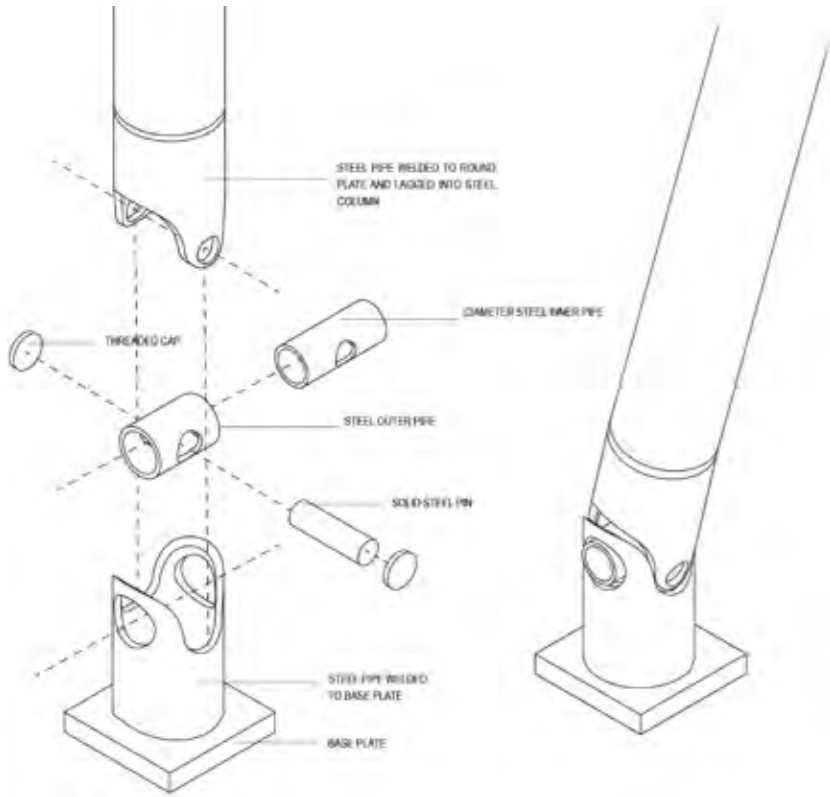




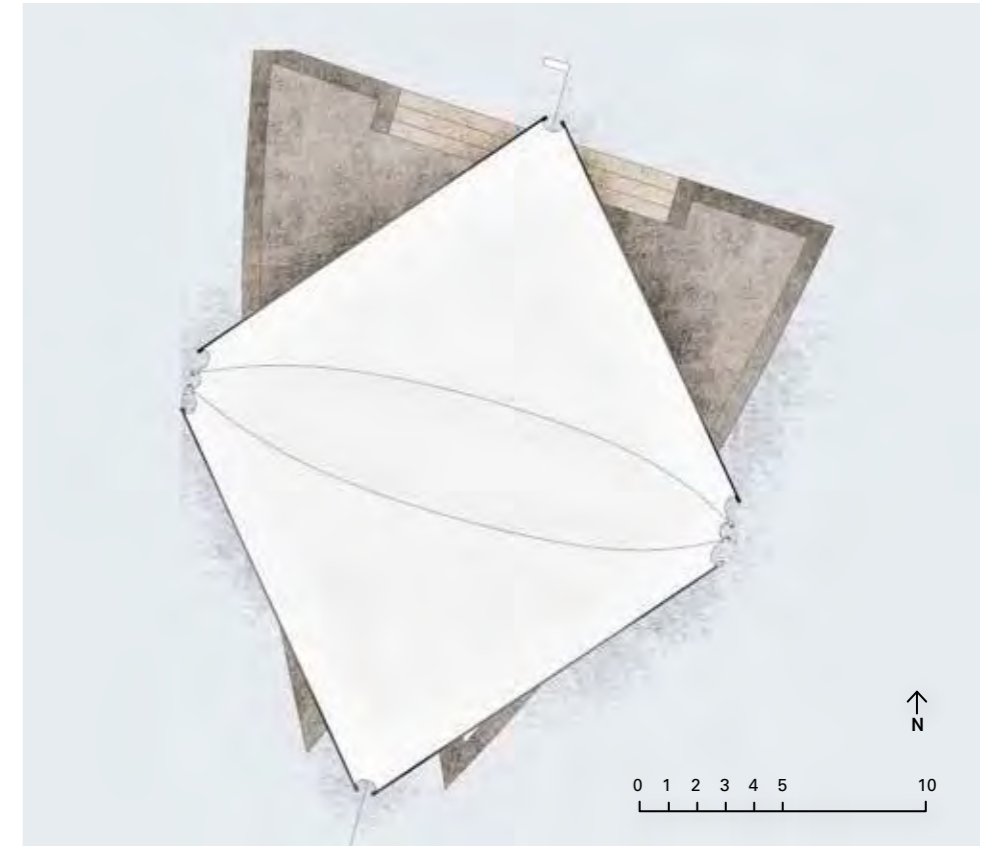
Perspective



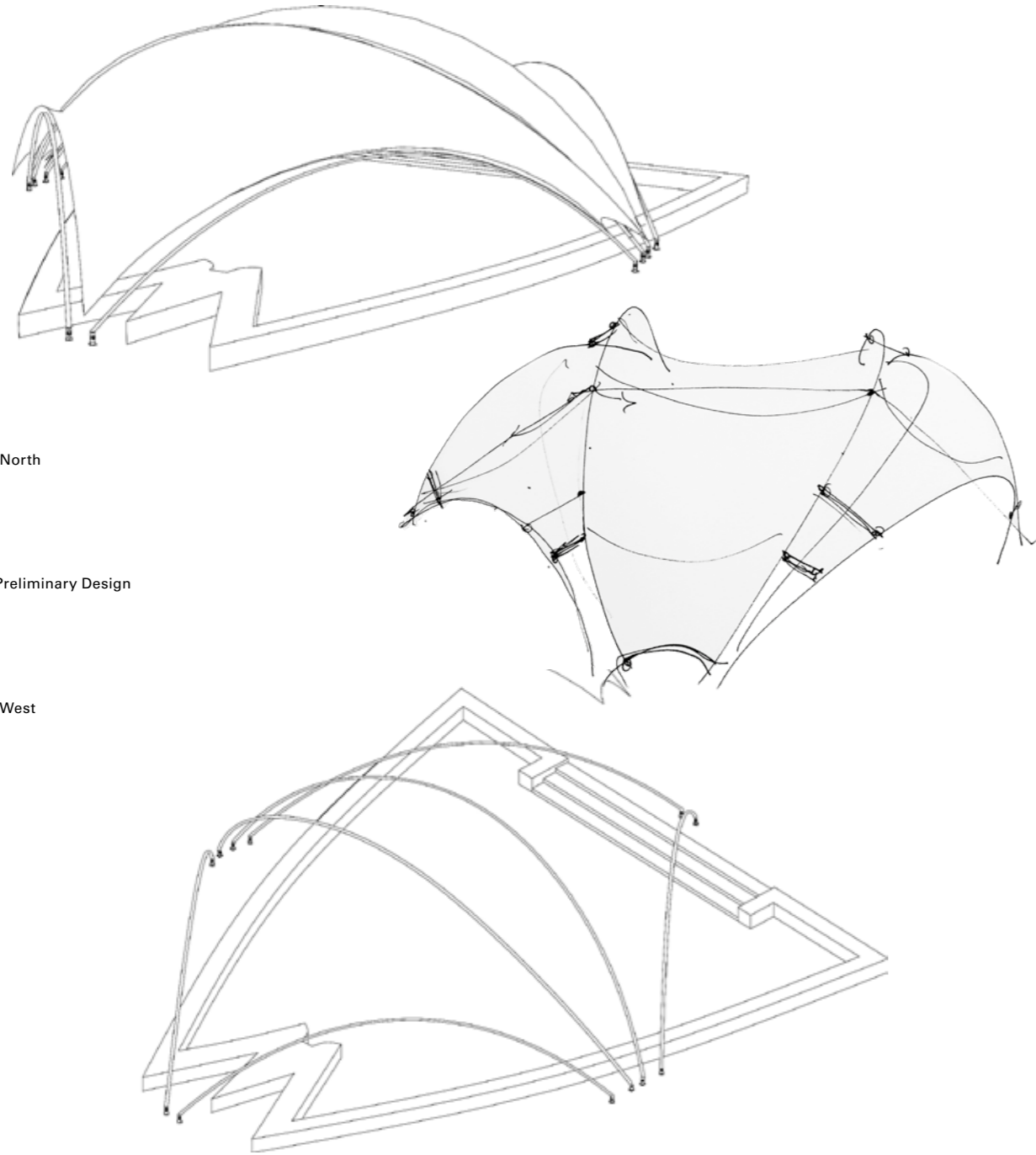
Site plan



Detail mast



Floor plan

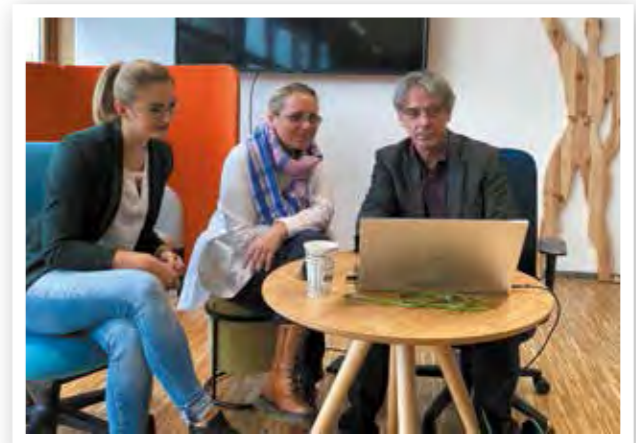


View to North

Sketch Preliminary Design

View to West









## Bibliography

Bauer, B.: Techniques of Nature in Architecture and Design, Dessau 2013

Benyus, Janine M.: What is Biomimicry? In: Biomimicry. Innovation Inspired by Nature, New York 1997

Meuser, Natascha: Zoo Buildings. Construction and Design Manual, Berlin 2019

Otto, Frei: Tensile Structures (vol. 1 & 2), Boston 1972

Rivera, Romualdo: Membrane Structures. First Steps towards Form Finding, Dessau 2014

Vrachliotis, Georg/Kleinmanns, Joachim/Kunz, Martin/Kurz, Philipp (Hgg.): Frei Otto. Denken in Modellen, Stuttgart 2017



## Authors and Participants

**Prof. Dr. Natascha Meuser**, architect, born 1967 in Erlangen, Germany. Architect and publisher in Berlin. Studied in Rosenheim (Interior architecture) and in Chicago at the Illinois Institute of Technology (Master of architecture). Doctorate at the Technical University of Berlin. Professor at Anhalt University of Applied Sciences in Dessau since 2016. She has published numerous works on design methodology, as well as architectural and historical research on buildings for education and science.

**Prof. Dr. Robert Off**, architect, born 1957. Studied Architecture at the Augsburg University of Applied Sciences and at the Technical University Berlin. Doctorate at the TU Berlin. Professor at the Anhalt University of Applied Sciences, founder and director of the IMS Bauhaus@Archineer@Institutes e. V. (1999). He is responsible for the worldwide first international Master Program in Membrane Structures (since 2006). Since 2002 Professor for Real Estate Development at the Faculty of Economy at the Anhalt University of Applied Sciences. In 2014, appointed by the government to the Professor for Membrane Structures. In the same year he founded the American Institute of Membranes and Shell Technologies, Network and Communications, Corp., A-IMS Mass., USA with Pedro Munoz. 2019 founding member of the IMS Bauhaus@ Latin America. Since 2019 developing the Bauhaus 21st Century Shenzhen/China.

**M.Eng. Sarah Stipek**, structural engineer, born 1989 in Gotha, Germany, scientific researcher in Dessau. Studied in Erfurt (Bachelor and Master of Civil Engineering) and Dessau (Archineer Membrane Structures). Doctoral Candidate at the Technical University of Dresden. Scientific Assistant at Anhalt University of Applied Sciences in Dessau since 2018. She gained knowledge in the field of structural calculation and parametric design while working for several well-known internationally operating engineering offices.

### Textauszüge

**Romualdo Rivera: Membrane Structures (S. 15)**  
Aus: Romualdo Rivera: Membrane Structures. First Steps towards Form Finding, Dessau 2014

**Gerd Schmid: Flächentragwerke. Landschaften mit Konstruktion formen (S. 47)**  
Aus: Meuser, Natascha: Zoobauten. Handbuch und Planungshilfe, Berlin 2018

**Marlene Thimet, Wolfgang Betzler, Bianca Bühler: Netzkonstruktionen (S. 57)**  
Aus: Meuser, Natascha: Zoobauten. Handbuch und Planungshilfe, Berlin 2018

### Students

Nurin Abdullah  
Ebru Aykan  
Mehmet Caferoglu  
Barakat Khaysam  
Anotidaishe Mavazhe  
Yan Thum  
Jameel Trowers  
Chin Ai Ong  
Mohamed Gouda Shehata  
Seshiena Lotsu

© 2020 Anhalt University of Applied Sciences  
Fachbereich Architektur, Facility Management  
und Geoinformation  
Postal address: Postfach 2215,  
06818 Dessau-Roßlau  
Address: Bauhausstr. 5,  
06846 Dessau-Roßlau

ISBN (Print): 978-3-96057-116-2  
ISBN (Online): 978-3-96057-117-9

This work has been produced as part of a course at the Anhalt University of Applied Sciences and is subject to copyright. Reproduction and use of the content for non-commercial projects is only permitted by citing the source. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in other ways, and storage or processing in data bases. Sources and owners of rights are given to the best of our knowledge; please inform us of any we may have omitted.

**Project Management**

Prof. Dr. Natascha Meuser

**Editorial Assistant**

James Wong Zhen Fai

**Final Proofreading**

Amy Jones

**Design**

Atelier Kraut

**Printing**

Zeitdruck, Berlin



**Hochschule Anhalt**

Anhalt University of Applied Sciences