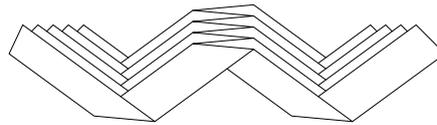




folding  
canopy



Robert Schmid, BSc



folding  
canopy

---

teil 2

Am Seil geführte, wandelbare Faltdächer

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters

Institut für Tragwerksentwurf



#### Eidesstattliche Erklärung

---

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

#### Affidavit

---

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis dissertation.

Graz, 20.10.2015

---

# Inhalt

Kurzfassung & abstract

8. Folding Canopy	12	12. Prototyp Dokumentation	58
<hr/>		<hr/>	
8.1 Einleitung	14	12.1 Einleitung	60
8.2 Projektstruktur	16	12.2 Fotodokumentation	61
8.3 Workshop Acconci 1	17		
9. Endliche Dicke	20	13. Prototyp Auswertung	78
<hr/>		<hr/>	
9.1 Einleitung	22	13.1 Einleitung	80
9.2 Zentrisch	24	13.2 Allgemeiner Versuchsaufbau	81
9.3 Exzentrisch	26	13.3 Faltstruktur	85
9.4 Exzentrisch Alternierend	28	13.4 Dichtlatz	88
9.5 Vergleich der Methoden	29		
9.6 Entwickelte Methode	32		
10. Modellstudie 2	34	14. Ausblick	92
<hr/>		<hr/>	
10.1 Einleitung	36	14.1 Einleitung	94
10.2 Gegenüberstellung	38	14.2 Präsentationsmodell	95
		14.3 Workshop Acconci 2	103
		14.4 Visualisierungen	105
11. Prototyp Planung	42	Anhang	116
<hr/>		<hr/>	
11.1 Einleitung	44	Quellenangaben	118
11.2 Allgemeiner Versuchsaufbau	45	Danksagung	122
11.3 Anforderung an Bauteile	48		
11.4 Vordimensionierung	50		
11.5 Werkplanung	51		

Kurzfassung

Die Murinsel war ursprünglich als temporäres Projekt geplant, insofern wurde kein Witterungsschutz des offenen Teils, welchen Vito Acconci Amphitheater genannt hat, mitbedacht. Nun ist die Murinsel aber seit mehr als 10 Jahren in Betrieb und wird der Stadt Graz auch weiterhin erhalten bleiben. Um die Beispielbarkeit dieser Veranstaltungsfläche zu verbessern ist ein dem Kontext entsprechender Witterungsschutz unumgänglich.

Ziel des Projektes *folding canopy* ist die Entwicklung und Realisierung eines am Seil geführten, wandelbaren Faltdachs für das Amphitheater der Murinsel in Graz. Die Idee einer solchen Überdachung entstand im März 2013, als sich Vito Acconci *AcconciStudio* und Clemens Luser *HoG Architektur ZT GmbH* dem Auftrag der Stadt Graz annahmten und in Entwurfs-skizzen erste Parameter des Projektes definierten. Das von ihnen vorgesehene System bestand aus mehreren Faltsegeln welche auf V-förmig gespannten Rand-seilen verfahren. Ein in der Symmetrie-achse liegendes Zugseil sollte zudem eine stufenlose Verfahrbarkeit und damit ein

Reagieren auf unterschiedliche Sonnen- und Witterungszustände ermöglichen. Das kühne Vorhaben der Entwicklung einer neuartigen, wandelbaren Dachkonstruktion führte zunächst zu der Fragestellung, ob sich ein solches aus der Papierfaltkunst entnommenes Faltprinzip überhaupt in einen baulichen Maßstab übertragen lässt.

Die notwendige Grundlagenforschung erfolgte auf dem *Institut für Tragwerksentwurf* der *TUGraz* unter Betreuung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters. So konnten sich neben einer von der *österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG* unterstützten *Feasibility Studie* auch zwei Diplomarbeiten mit der Analyse und Entwicklung wandelbarer Faltdächer befassen.

Die Diplomarbeit *folding canopy Teil 1* von Dipl.-Ing. Georg Hansemann extrahierte und klassifizierte die der Papierfaltkunst innewohnenden Faltprinzipien und konnte weiterfolgend die Funktionalität der entwickelten Faltstruktur anhand analoger und digitaler Modellstudien bestätigen. Erfolgten die von Dipl.-Ing. Georg Hansemann

durchgeführten Analysen noch unter Vernachlässigung der Materialdicke, galt es nun, die entwickelten Faltprinzipien in einen baulichen Maßstab zu übertragen.

Die vorliegende Masterarbeit *folding canopy Teil 2* fokussiert neben der Dokumentation der Planungsfortschritte des realen Bauvorhabens die Entwicklung und Umsetzung eines der Analyse dienlichen Großversuches. Dabei konnte in Kooperation mit den Firmen *SFL Technologies GmbH* und *Sattler AG* ein aussagekräftiger Prototyp im nahezu baupraktischen Maßstab 1:2 errichtet werden. Das automatisiert verfahrbare Versuchsmodell ermöglichte eine realitätsnahe Simulation und Auswertung des Faltverhaltens und konnte die Realisierbarkeit des geplanten Bauvorhabens der Murinselüberdachung bestätigen. Weiterführend gilt es nun die gewonnenen Erkenntnisse der Planung des konkreten Faltdaches zuzuführen und die finale Materialität und Gestaltung zu entwickeln.

abstract

The *Murinsel* was originally planned as a temporary structure. This meant that nothing, canopy or roofing, was designed to cover the Acconci Amphitheatre. In the meantime, 10 years have passed and the *Murinsel* is still being used and it not going to be removed by the town council in the near future. This means that a canopy or roof needs to be designed to protect the audience and performers from the elements.

The aim of the *folding canopy* project is to design and produce a retractable folding roof, which is guided by steel cables, for the Amphitheatre. This idea was born in March 2013 when Vito Acconci *Acconci-studios* and Clemens Luser *HoG Architektur ZT GmbH* accepted the contract from the City of Graz and started to sketch the first drafts and define parameters. The system that they envisioned comprised of numerous V-shaped foldable sails which only move along pretension cables on the outer edges. A tow cable makes it possible to adapt the canopy continuously for different weather conditions. This daring project, to develop a modern, retractable

canopy, raised the question as to whether the principals which apply to paper folding could be transferred onto a larger scale. All of the necessary preliminary research was carried out at the *Institute for Structural Design* at the *Technical University of Graz* under the supervision of Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters. This meant that two master theses along with a *feasibility study* that was supported by the *Austrian Research Promotion Agency FFG* could concentrate on the topic of retractable folding canopies.

The first master thesis *folding canopy Teil 1* from Dipl.-Ing. Georg Hansemann extracted and classified the folding principles used in the art of paper folding and confirmed the functionality using analogue and digital modelling. As the analyses carried out by Dipl.-Ing. Georg Hansemann did not take the factor material thickness into account it meant that it was now necessary to try and transfer these principles onto a larger scale.

This master thesis *folding canopy Teil 2* focuses on both the production design

process for the as well as the development and implementation of the analyse onto a large scale test object. In cooperation with *SFL Technologies GmbH* and *Sattler AG* it was possible to produce an impressive 1:2 ratio test object from which conclusions could be drawn and used in construction applications. From this automatically driven test object it was possible to simulate and draw conclusions about the folding behaviour of the planned canopy. It also confirmed the feasibility of the project. In addition it is necessary to apply the obtained results to the design process of the real folding canopy and develop the final material and form.

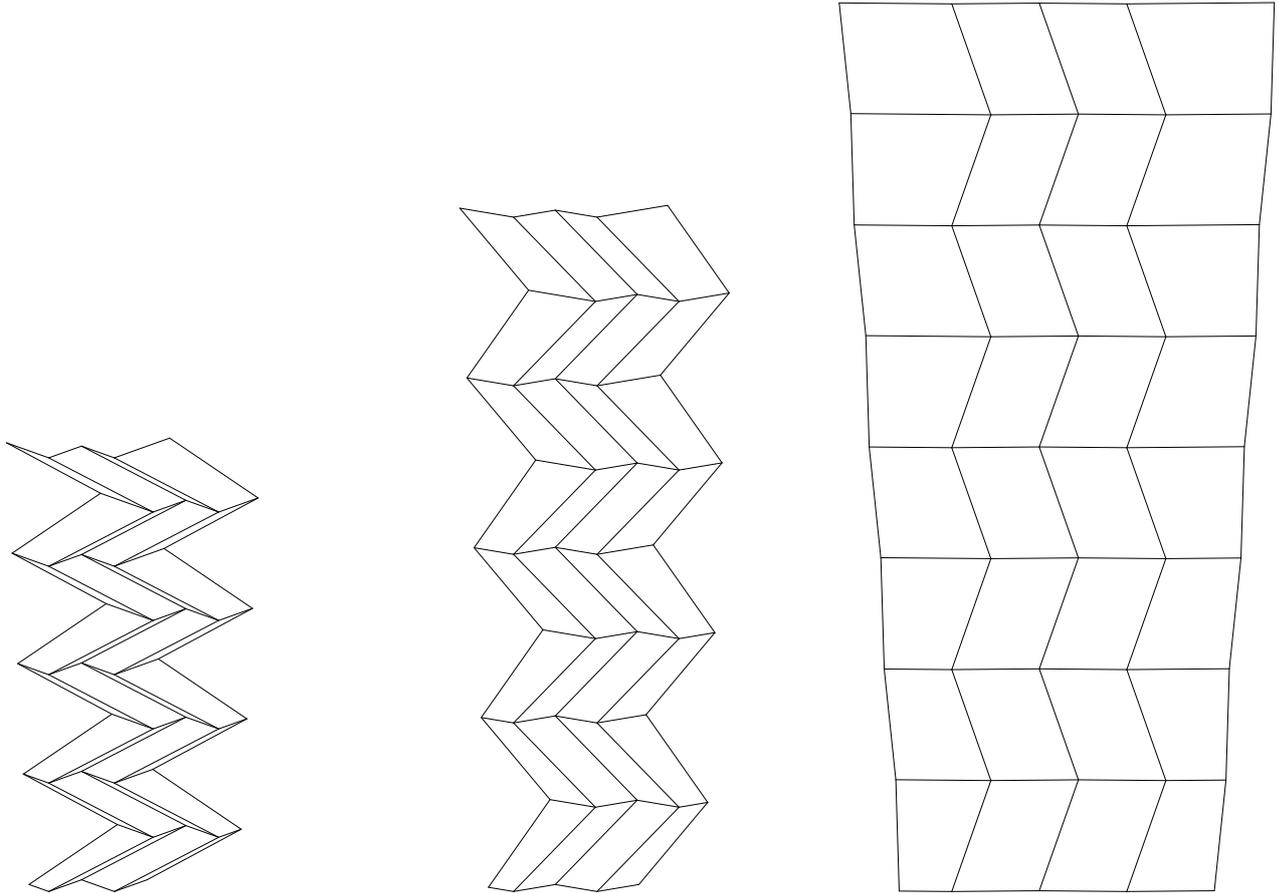


8

folding canopy

Abb 1  
Entwickelte Faltstruktur aus *folding canopy Teil 1*  
Basierend auf dem Miura-Ori Faltmuster

1 Hansemann 2014, 140.

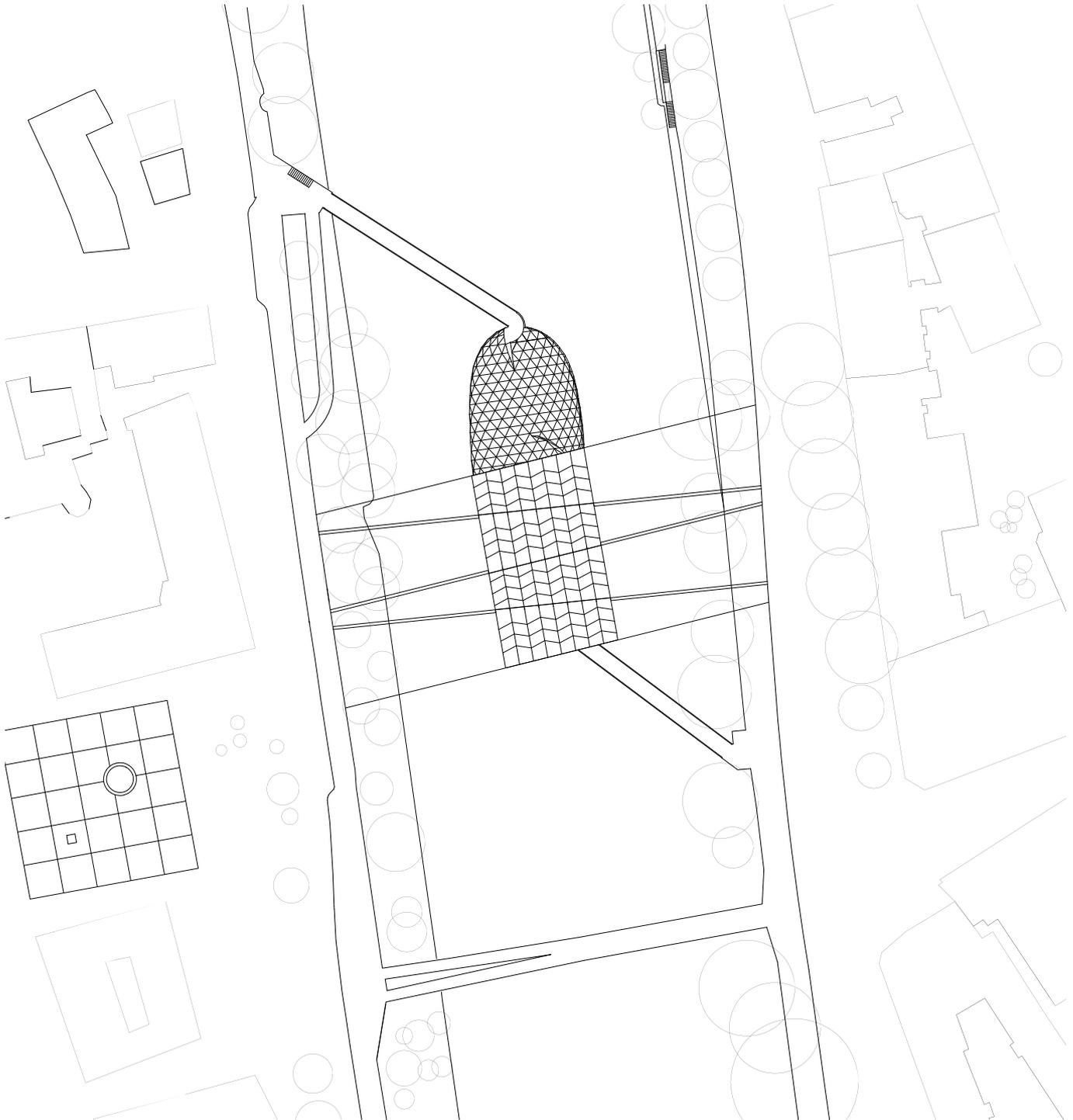
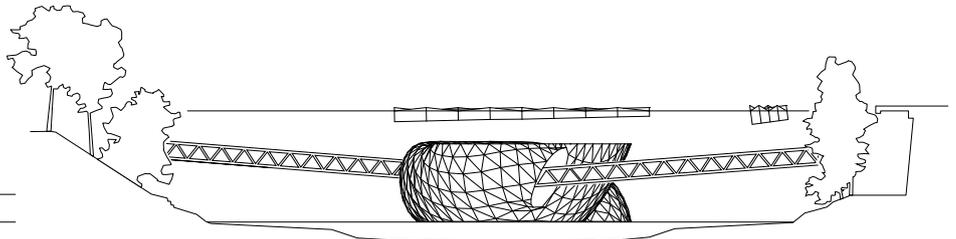


### 8.1 Einleitung

„Die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass sich das entwickelte Konzept am Seil führen lässt. Es bedarf einer geometrischen Optimierung, die auf alle Anforderungen abgestimmt ist. Eine besondere Hürde stellt die Übertragung bezüglich der Materialdicke dar. Wurde der Entwurf im ersten Teil noch mittels Papier- und Kartonmodellen geprüft, gilt es nun einen Schritt weiter zu gehen und Detaillösungen mit konkreten Materialien umzusetzen.“<sup>1</sup>

Die Diplomarbeit *folding canopy Teil 1* von Dipl.-Ing. Georg Hansemann extrahierte und klassifizierte die der Papierfaltkunst innewohnenden Faltprinzipien und konnte weiterfolgend die Funktionalität der entwickelten Faltstruktur anhand analoger und digitaler Modellstudien bestätigen. Abbildung 1 zeigt die Kompaktierung dieser Faltstruktur in drei Faltzuständen. Erfolgt die von Dipl.-Ing. Georg Hansemann durchgeführten Analysen noch unter Vernachlässigung der Materialdicke, galt es nun, die entwickelten Faltprinzipien in einen baulichen Maßstab zu übertragen. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit bedarf es zu Beginn einer Dokumentation

des Entwicklungs- bzw. Planungsstandes des Projektes *folding canopy*, um einen klaren Ausgangspunkt der vorliegenden Masterarbeit zu definieren. Im Lageplan ist die Positionierung der vier Faltsegel über dem Amphitheater der Murinsel ersichtlich. [Abb 3] Um die Funktion eines kompletten Witterungsschutzes zu gewährleisten werden die Segel dabei überlappend und höhenversetzt angeordnet. Die Höhenlage, Start- und Endposition der Segel werden anhand eines System-schnittes dargestellt. [Abb 2]



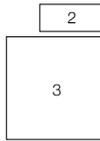
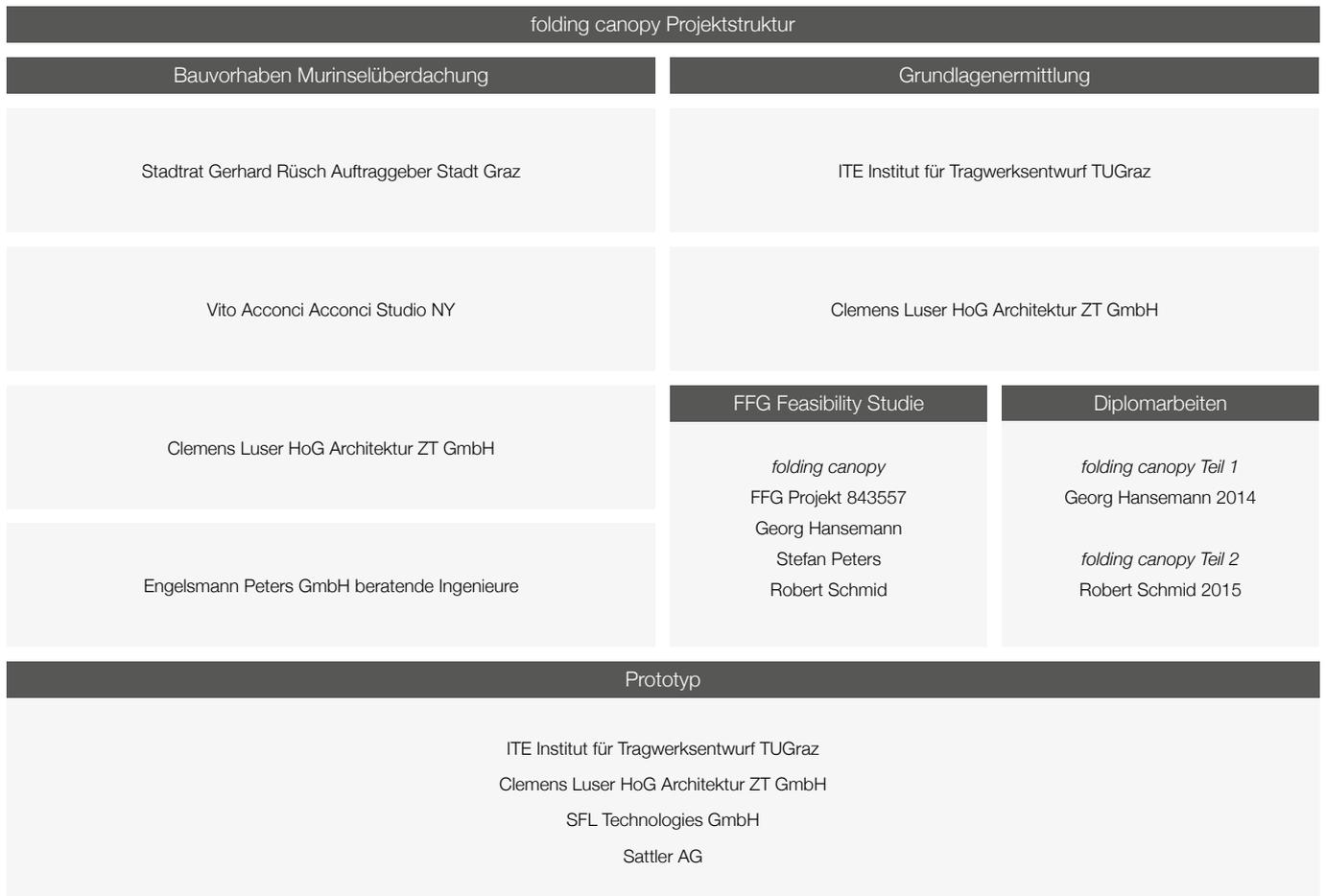


Abb 2  
Systemschnitt aus *folding canopy Teil 1*

Abb 3  
Lageplan aus *folding canopy Teil 1*



## 8.2 Projektstruktur

Ausgangspunkt des Projektes *folding canopy* war der Auftrag der Stadt Graz, welche sich an *HoG Architektur ZT GmbH* gewandt hat, um in Zusammenarbeit mit *Vito Acconci* eine Dachkonstruktion für den offenen Teil der Murinsel zu entwickeln.

Das Konzept für ein wandelbares, am Seil geführtes Faltdach entstand im März 2013 im Zuge eines in New York abgehaltenen Workshops. Das vorgesehene System bestand aus mehreren Faltselgen welche auf V-förmig gespannten Randseilen verfahren. Ein in der Symmetrieachse liegen-

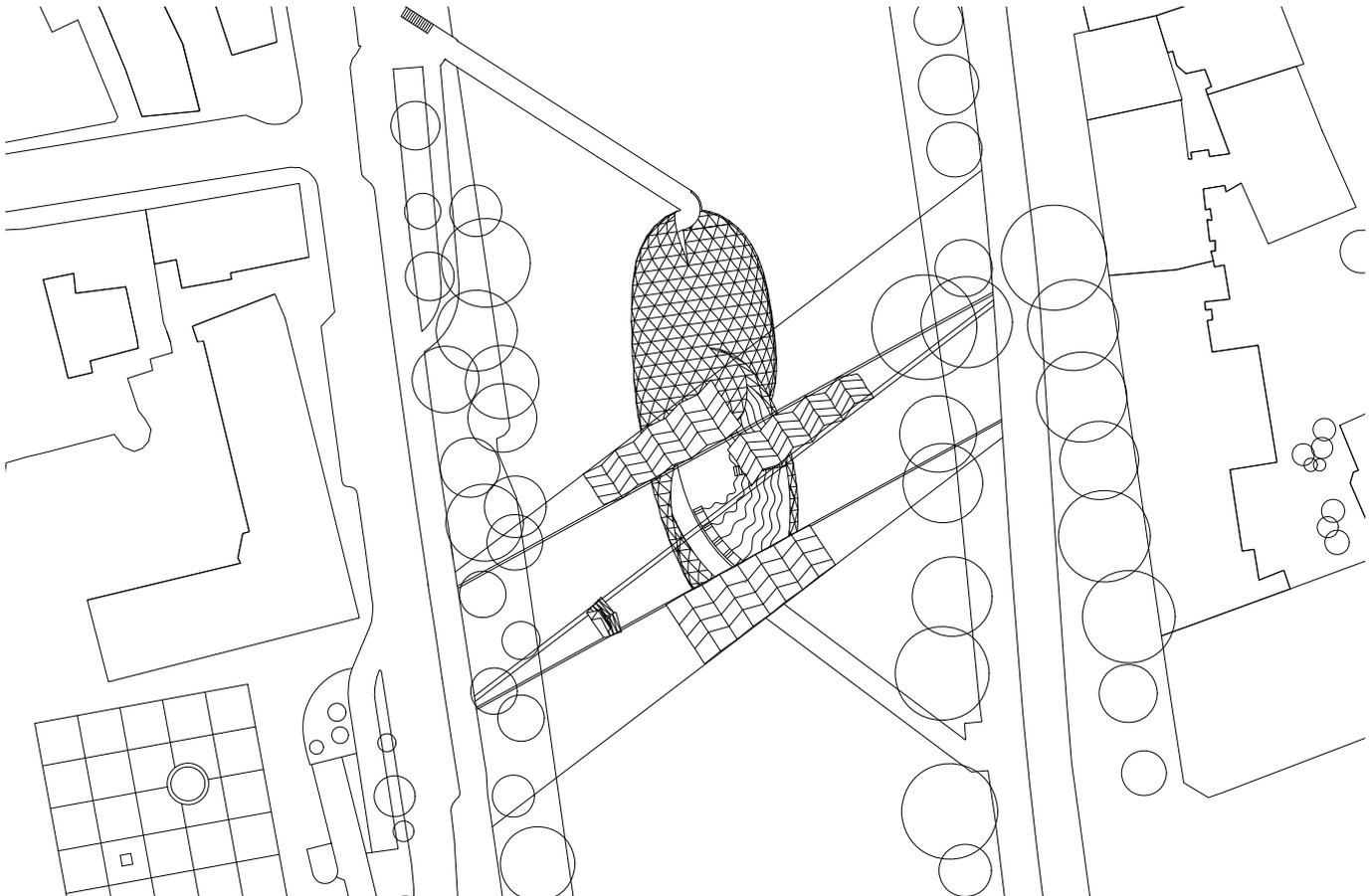
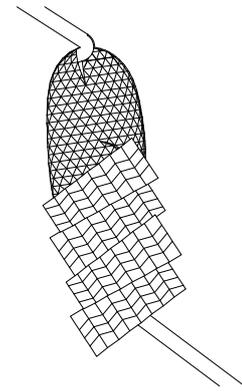
des Zugseil sollte zudem eine stufenlose Verfahrbarkeit und damit ein Reagieren auf unterschiedliche Sonnen- und Witterungszustände ermöglichen.

Das kühne Vorhaben eine neuartige, wandelbare Dachkonstruktion zu entwickeln führte zunächst zur Fragestellung, ob sich ein solches, aus der Papierfaltkunst entnommenes Faltprinzip überhaupt in einen baulichen Maßstab übertragen lässt.

Die notwendige Grundlagenforschung erfolgte auf dem *Institut für Tragwerksentwurf ITE* der *TUGraz* unter Betreuung von *Stefan Peters*. So konnten sich neben einer von der *österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG* unterstützten

*Feasibility Studie* auch zwei Diplomarbeiten mit der Analyse und Entwicklung wandelbarer Faltdächer befassen.

In Kooperation mit den Firmen *SFL Technologies GmbH* und *Sattler AG* konnte ein aussagekräftiger Prototyp im nahezu baupraktischen Maßstab 1:2 errichtet werden. Das automatisiert verfahrbare Versuchsmodell ermöglichte eine realitätsnahe Simulation und Auswertung des Falterhaltens und konnte die Umsetzbarkeit des geplanten Bauvorhabens der Murinselüberdachung bestätigen.



### 8.3 Workshop Acconci 1

Im Juli 2014 folgte Vito Acconci einer Einladung der Stadt Graz. Sein Aufenthalt in Graz ermöglichte die Abhaltung eines mehrtägigen Workshops, welcher im *Architekturbüro HoG* stattfand. Durch intensive Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten konnten wichtige planungsbezogene Parameter festgelegt werden und in die Entwicklung des Prototyps einfließen.

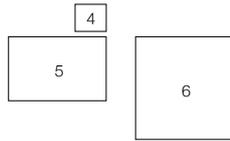
Im Zuge des Workshops überarbeitete Vito Acconci unter anderem die Positionierung der Segel. Die Rotation der Segel sollte die Dynamik der geschwungenen

Murinsel-Stahlhülle aufnehmen und durch die Verfahrbarkeit der Segel zusätzlich verstärken. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen den überarbeiteten Lageplan der Murinselüberdachung in verschiedenen Fallstadien.

Die Gesamtanzahl der Fallsegel, welche direkten Einfluss auf die erforderliche Mindestabmessung der einzelnen Segel nimmt, wurde zu diesem Zeitpunkt noch nicht festgelegt, jedoch auf vier bis fünf Segel eingeschränkt. Für die Dimensionierung des Prototyps wurden demnach die zu erwartende Maximalabmessung der Variante mit vier Segel herangezogen. Vito Acconci beschäftigte sich auch mit

den verschiedenen Höhenlagen der einzelnen Segel. Die von ihm erstellten Skizzen glichen einer musikalischen Notation und betonten die Wichtigkeit der Entwicklung einer rhythmischen Sequenz.

Des Weiteren konnte eine Entscheidung bezüglich der Materialisierung der Fallwerksflächen getroffen werden. Die wandelbare Dachkonstruktion sollte sich demnach aus Fallwerksrahmen mit einer textilen Bespannung zusammensetzen. Abschließend wurden die Workshop-Ergebnisse der Stadt Graz präsentiert.



**Abb 4**  
Positionierung nach dem ersten Workshop mit Vito Acconci  
Alle vier Segel vollständig entfaltet

**Abb 5**  
Lageplan nach dem ersten Workshop mit Vito Acconci  
Unterschiedliche Fallstadien

**Abb 6**  
Vito Acconci während des ersten Workshops in Graz  
Architekturbüro HoG - Juli 2014





9

Endliche Dicke

## Abb 7

Klassifizierung nach Lage der Gelenke in *Zentrisch*, *Exzentrisch* und *Exzentrisch Alternierend*

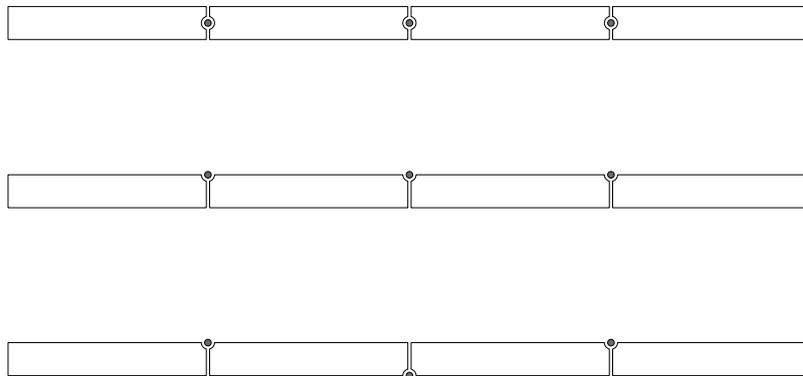
2 Künstler/Trautz 2011, 86.

3 Vgl. Tachi 2011, 253-254.

4 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 11.

9. Endliche Dicke

9.1 Einleitung



## 9.1 Einleitung

„Wandelbare Faltungen mit biegesteifen Faltelementen sind trotz ihrer offensichtlichen Vorzüge in Bezug auf die Nutzung mechanischer und statischer Vorzüge im Bauwesen unbekannt. Ein wichtiger Grund für diese fehlenden Umsetzungen liegt in ihrer augenscheinlichen geometrischen und topologischen Komplexität, gerade wenn die Faltelemente von endlicher Dicke und verhältnismäßig großer Steifigkeit sind und Zwängungen während des Faltprozesses vermieden werden sollen.“<sup>2</sup>

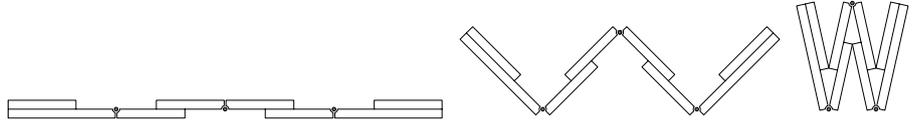
*Rigid foldable Origami* basiert auf einem linearen Faltpattern, welches sich entlang seiner Faltungen kontinuierlich transformiert, ohne einzelne Flächen dabei zu verformen. [siehe Kapitel 6] Infolgedessen können diese durch steife Platten

mit endlicher Dicke, welche mittels Gelenken verbunden sind, ersetzt werden. Es entsteht ein Faltmechanismus mit definiertem Volumen, der nun eine statische Wirksamkeit besitzt und im architektonischen Maßstab eingesetzt werden kann. Obwohl sich dieses Teilgebiet des Origami hervorragend für die Entwicklung kinematischer Mechanismen eignet, muss eine passende Lösung für die aus der Materialstärke resultierende Zwängungsproblematik gefunden werden. Die Türe ist das einfachste Beispiel für eine *thick rigid origami* Struktur und beschreibt eine einzelne Längsfaltung mit endlicher Dicke. Um ein Öffnen und Schließen zu ermöglichen, muss das Türscharnier bzw. die Rotationsachse an die konkave Seite der Faltung verschoben werden. Somit erreicht man einen Öffnungswinkel von 0 bis 180 Grad.<sup>3</sup> Neben dem Ansatz der

Achsenverschiebung gibt es noch weitere Möglichkeiten, mit den geometrischen Zwängen in einem Faltmechanismus umzugehen. Beispielsweise kann man die Bewegungsfreiheit der Gelenke erhöhen oder die Faltelemente in ihrer Geometrie soweit verändern, sodass keinerlei Durchdringungen auftreten.

Bezogen auf die Umsetzung eines am Seil geführten Faltdaches wurden die existierenden Methoden anhand eines Grundmechanismus, bestehend aus vier Faltelementen, auf ihre Funktionalität hin überprüft, und später in Modellen im Maßstab 1:20 angewendet.

Die Klassifizierung der nachfolgenden Lösungsansätze erfolgt über die Lage der Gelenke, welche entweder zentrisch, exzentrisch oder exzentrisch alternierend angeordnet sind.<sup>4</sup> [Abb 7]



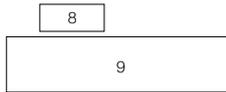
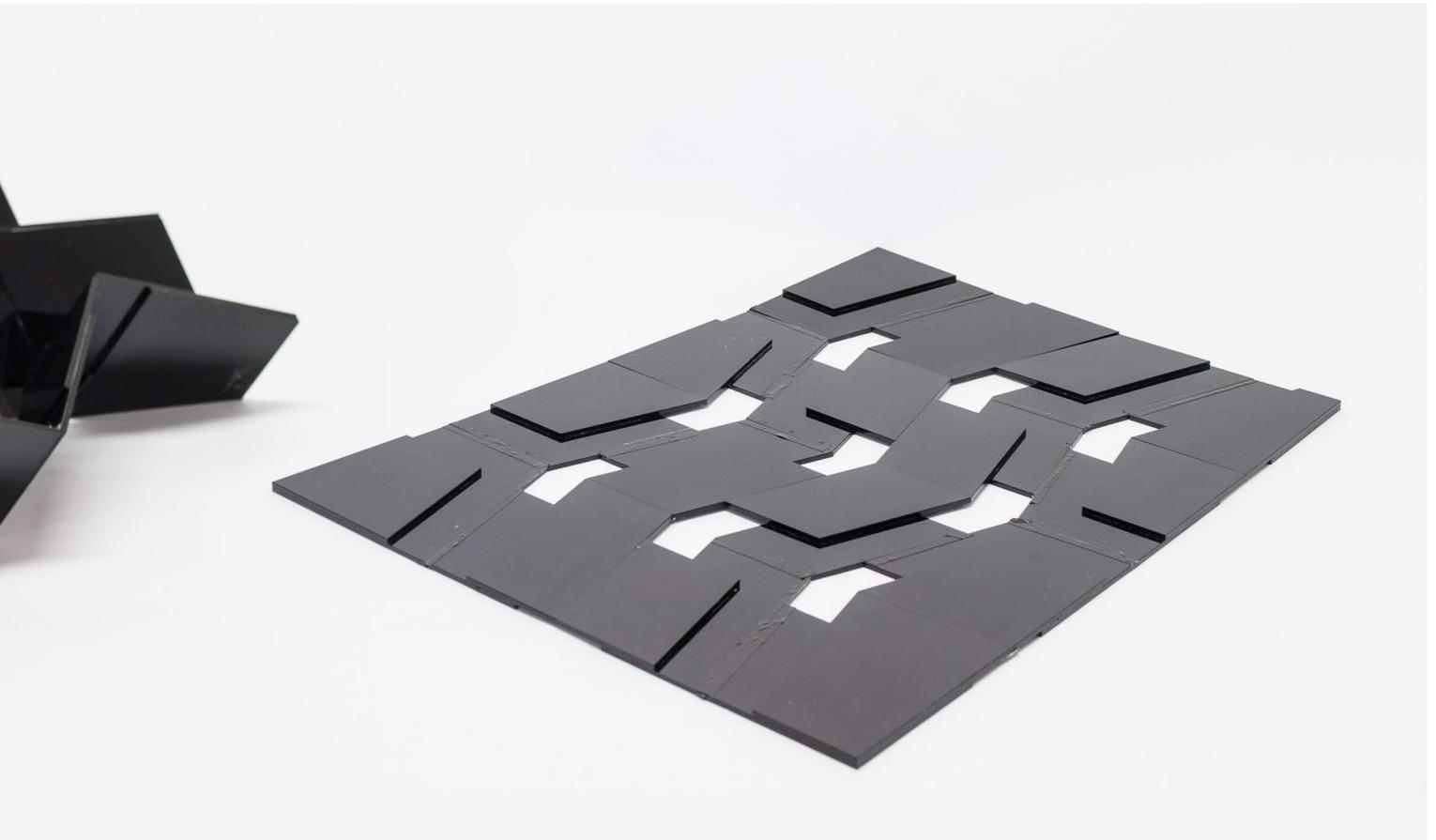


Abb 8  
Prinzip der zentrischen Gelenkanordnung

Abb 9  
Modellstudie M 1:20 zentrische Gelenkanordnung

5 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 11-12.

9. Endliche Dicke  
9.2 Zentrisch



## 9.2 Zentrisch

Der Ansatz der zentrischen Gelenkanordnung wird von Tomohiro Tachi beschrieben. Ihm ist es wichtig, dass sich die Faltstruktur mit endlicher Dicke nicht nur an die Faltbewegung eines idealen Origami ohne Materialstärke annähert, sondern sie exakt imitiert. Hierfür ist es wichtig, dass sich alle Gelenke auf der ideellen Faltebene eines Papiermodelles befinden und im vollständig ausgefalteten Zustand dieselbe Höhenlage besitzen.

Ausgehend von dieser Ebene werden die Faltflächen zu beiden Seiten hin konstant extrudiert. Das somit gewonnene Volumen

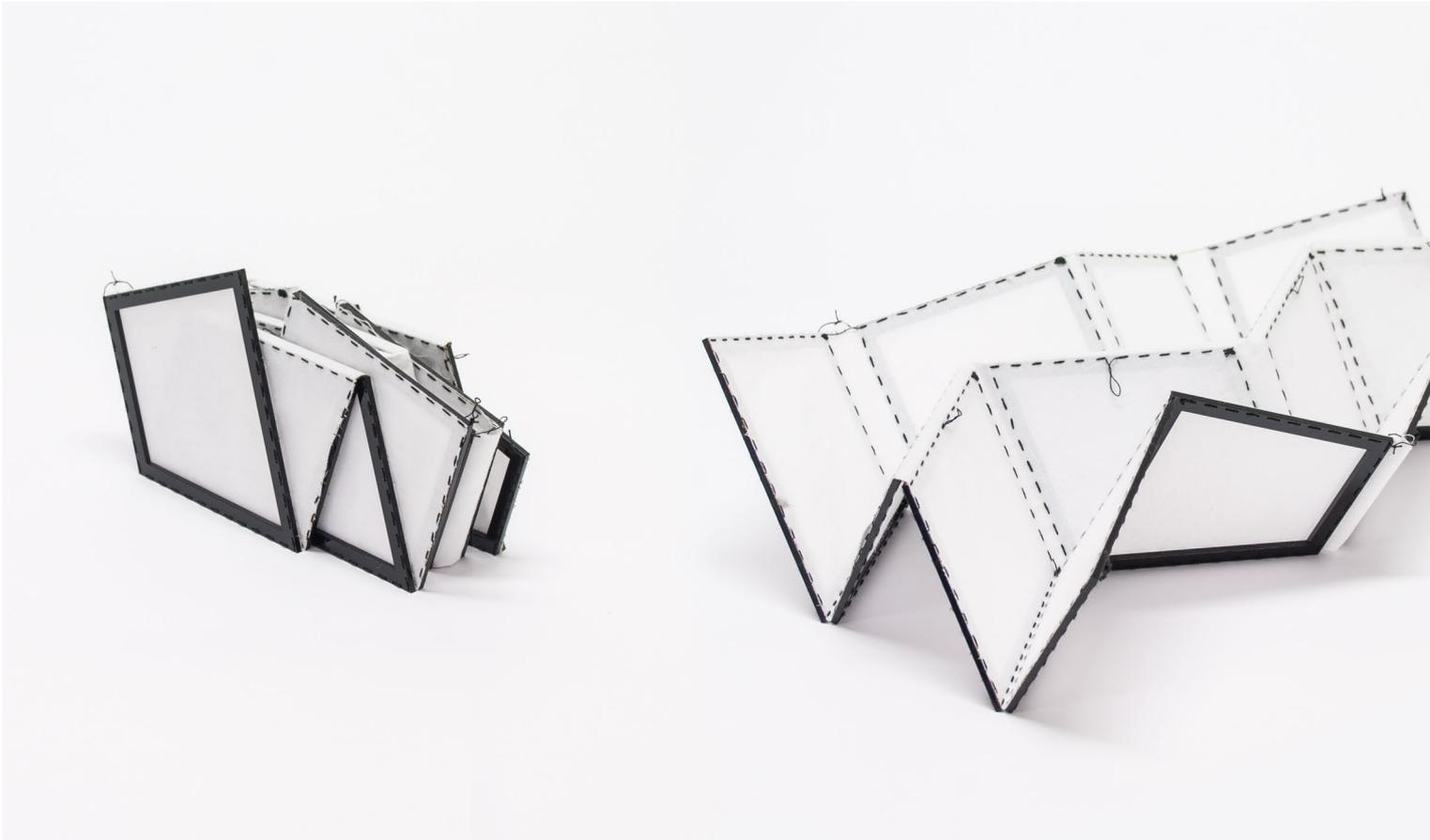
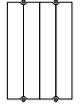
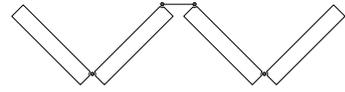
verhindert jedoch den Faltprozess und sperrt die Gelenke in ihrer Bewegung. Die erforderliche Gelenkfreiheit wird im nächsten Schritt durch ein Trimmen der einzelnen Faltflächen, jeweils an der konkaven Seite der Faltkante, erlangt. Interne Kollisionen können dadurch verhindert und das Problem somit behoben werden.

Der Grad der Trimmung reguliert den Öffnungswinkel und beeinflusst somit die Kompaktierung der Struktur.

Durch die zentrische Gelenkanordnung entstehen zwei Materialebenen, welche jeweils die statischen Anforderungen erfüllen müssen. Dieser Umstand führt, verglichen mit anderen Methoden, zu der Notwendig-

keit einer größeren Materialdicke.

Sowohl für dieses als auch die folgenden Systeme ist es nicht relevant, ob die einzelnen Faltelemente als Platten oder Rahmen ausgeführt werden, da weder die Kompaktierung gesteigert, noch der Mechanismus verändert wird.<sup>5</sup>



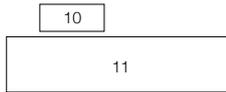
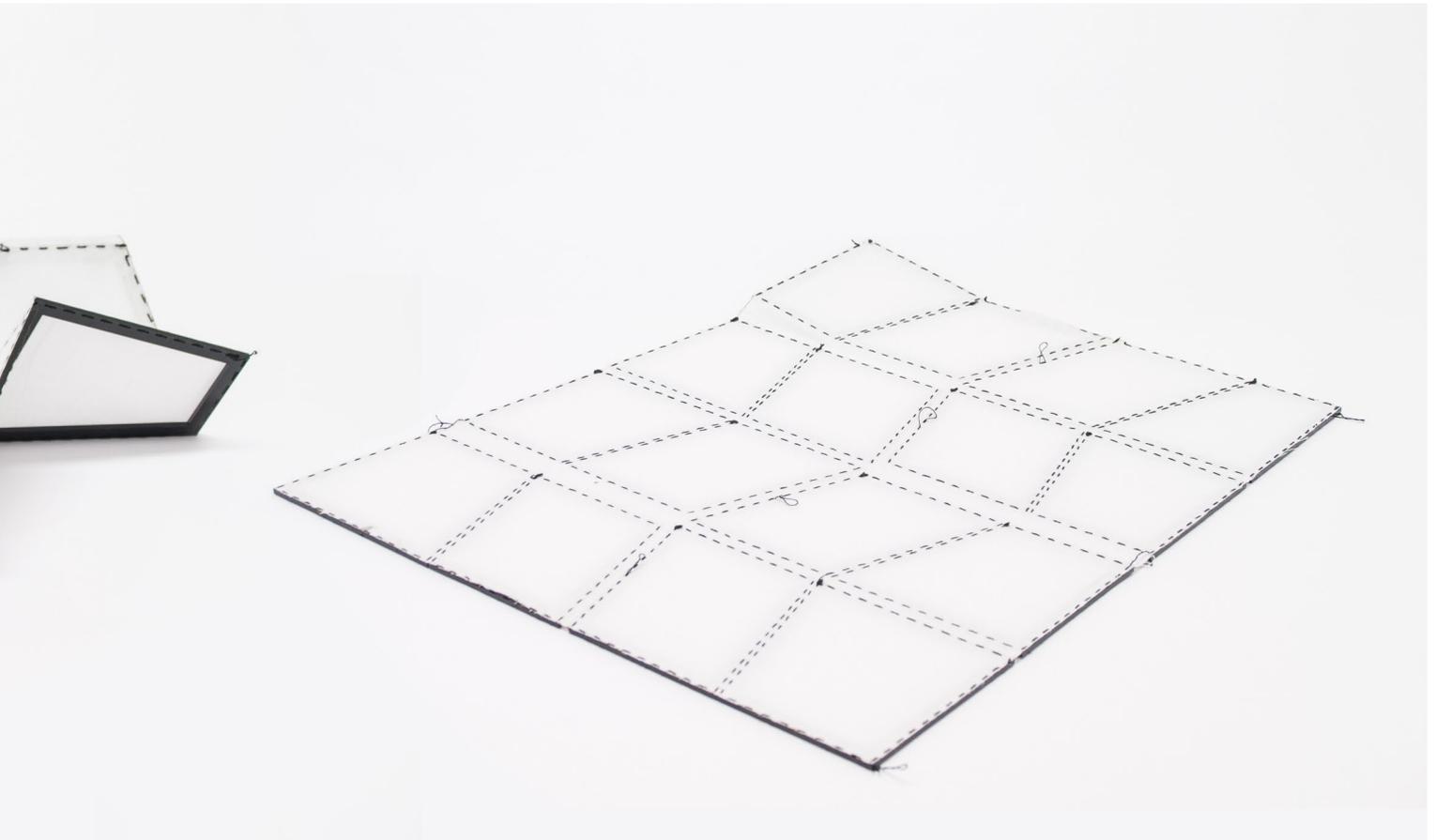


Abb 10  
Prinzip der exzentrischen Gelenkanordnung

Abb 11  
Modellstudie M 1:20 exzentrische Gelenkanordnung

6 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 12-13.

9. Endliche Dicke  
9.3 Exzentrisch

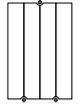
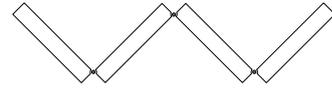


### 9.3 Exzentrisch

Nach der Elementierung eines geeigneten Faltmusters werden die einzelnen Flächen extrudiert. Um diese miteinander zu verbinden, werden die Gelenke exzentrisch zu einer Seite hin verschoben, sodass sich die Faltachsen entweder ober- oder unterhalb der Faltstruktur befinden. Im Versuchsmodell liegt die Gelenkebene auf der Oberseite [Abb 10], was ohne weitere Maßnahmen zu einem teilweise eingeschränkten Mechanismus führt. Während sich Talfalten problemlos ausbilden lassen, verhindern die senkrechten Schnittflächen der nebeneinander

gereihten Segmente die Funktionstüchtigkeit der Bergfalten. Um ein vollständig faltbares System zu erhalten, muss infolgedessen ein Abstand von der doppelten Materialstärke eingehalten werden. Der Grundmechanismus, bestehend aus vier Segmenten mit einem gemeinsamen Knotenpunkt, schreibt das Einhalten zusätzlicher Abstände vor. Die erforderlichen Abstandsbreiten müssen, je nach Lage innerhalb der Faltstruktur, alle vorangehenden Faltelemente umschließen. Der mögliche Kompaktierungsgrad in einem System mit exzentrischer Gelenkanordnung wird von den Abständen zwischen den Paneelen bestimmt und

setzt voraus, dass für eine vollständige Faltbarkeit auf sämtliche Materialdicken eingegangen wird.<sup>6</sup>



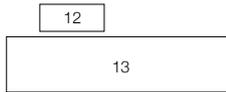


Abb 12  
Prinzip der exzentrisch alternierenden Gelenkanordnung

Abb 13  
Modellstudie M 1:20 exzentrisch alternierende Gelenkanordnung

7 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 13-14.

8 Vgl. Tachi 2011, 255-256.

9. Endliche Dicke

9.4 Exzentrisch Alternierend



#### 9.4 Exzentrisch alternierend

Diese von Chuck Hobermann entwickelte Methode lässt sich am besten anhand aneinander gereihter Linienfaltungen mit endlicher Dicke erklären. Vergleichbar mit der Funktionsweise einer Tür müssen auch hier die Gelenke, beziehungsweise die Rotationsachsen, an die konkave Seite der Faltkante versetzt werden, um Zwänge vorzubeugen. Dabei kommt es zu einer sogenannten exzentrisch alternierenden Gelenkanordnung, die einen Öffnungswinkel von 0 bis 180 Grad zwischen den einzelnen Faltpaneeelen erlaubt, sodass sich diese vollständig zusammen-

fallen lassen. [Abb 12] Durch die Aneinanderreihung mehrerer Grundmechanismen kommt es zu einer Einschränkung der Faltbewegung. Damit in den Knotenpunkten der Struktur keine geometrischen Kollisionen entstehen, muss ein Ineinanderschieben und Umfassen der Paneele während des Faltvorgangs gewährleistet werden. Dies wird mittels einer Höhenverschiebung der einzelnen Gelenke erzielt. Der Versatzabstand ist abhängig von der Dicke der zu umschließenden Elemente und ändert sich je nach Lage innerhalb der Faltstruktur.

Der mögliche Kompaktierungsgrad in einem System mit exzentrisch alternie-

render Gelenkanordnung ist von der Höhenlage der Gelenke abhängig und lässt sich auf die Summe aller Materialdicken vollständig einfalten.<sup>7</sup> [Abb 13]

Eine wesentliche Einschränkung der vorliegenden Methode ist jedoch, dass diese nur an symmetrischen und flach faltbaren Faltstrukturen wie dem *Miura Ori* angewandt werden kann.<sup>8</sup>

## 9.5 Vergleich der Methoden

Die recherchierten Methoden wurden mittels analoger und digitaler Modelle auf ihre Eignung hin überprüft. Die wesentlichsten Parameter waren hierbei Kinematik, Eigengewicht, Kompaktierung, Gelenkausbildung, Abdichtung, Entwässerung sowie Ästhetik. Die positiven und negativen Eigenschaften der Ansätze wurden analysiert und für eine Entscheidungsfindung gegenübergestellt.

Die Vorteile einer zentrischen Gelenkanordnung liegen in ihrem Mechanismus. Die kinematische Struktur folgt präzise der Bewegung eines Papiermodells mit vernachlässigbarer Materialdicke. Es ergibt sich dadurch eine einfache Gelenkausbildung mit herkömmlichen Scharnieren und eine verhältnismäßig einfach zu bewerkstellende Abdichtung, bei der

keinerlei Wassersäcke in der Membran aufkommen, da sich die Abdichtung auf der Faltebene befindet. Aufgrund der zwei Materialebenen, und deren für eine kraftschlüssige Verbindung erforderliche Überlappung, erhöht sich das Eigengewicht. Daraus ergeben sich Nachteile für die benötigte Vorspannung der Seile und für den Kompaktierungsgrad, der sich nur auf Kosten der Stabilität erhöhen lässt. Zusätzlich entspricht die komplexe Struktur nicht dem gewünschten klaren Erscheinungsbild.

Das geringe Eigengewicht der Gesamtkonstruktion und die Lage der wasserführenden Schicht oberhalb der Faltstruktur zählen zu den Qualitäten der exzentrischen Gelenkanordnung. Dagegen sprechen jedoch Parameter, welche die Kinematik betreffen. So verursachen die notwendigen Abstände undefinierte

Gelenke, vor allem wenn sie wie im Modell als Membran ausgeführt werden. Die Zunahme der Freiheitsgrade in den Gelenken führt zu einer Verringerung der kinematischen Zwangskopplung zwischen den einzelnen Faltpaneelen.

Die exzentrisch alternierende Gelenkanordnung führt hingegen eine sehr präzise Faltbewegung aus und überzeugt ebenfalls durch ihre relativ leichte Gesamtkonstruktion. Eine weitere positive Eigenschaft ist die Fähigkeit der vollständigen Komprimierbarkeit. Demgegenüber steht die komplexe Abdichtung bedingt durch die Lage der Gelenke, welche unterschiedliche Höhen beschreiben.<sup>9</sup>



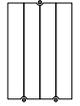
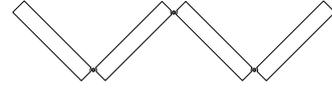
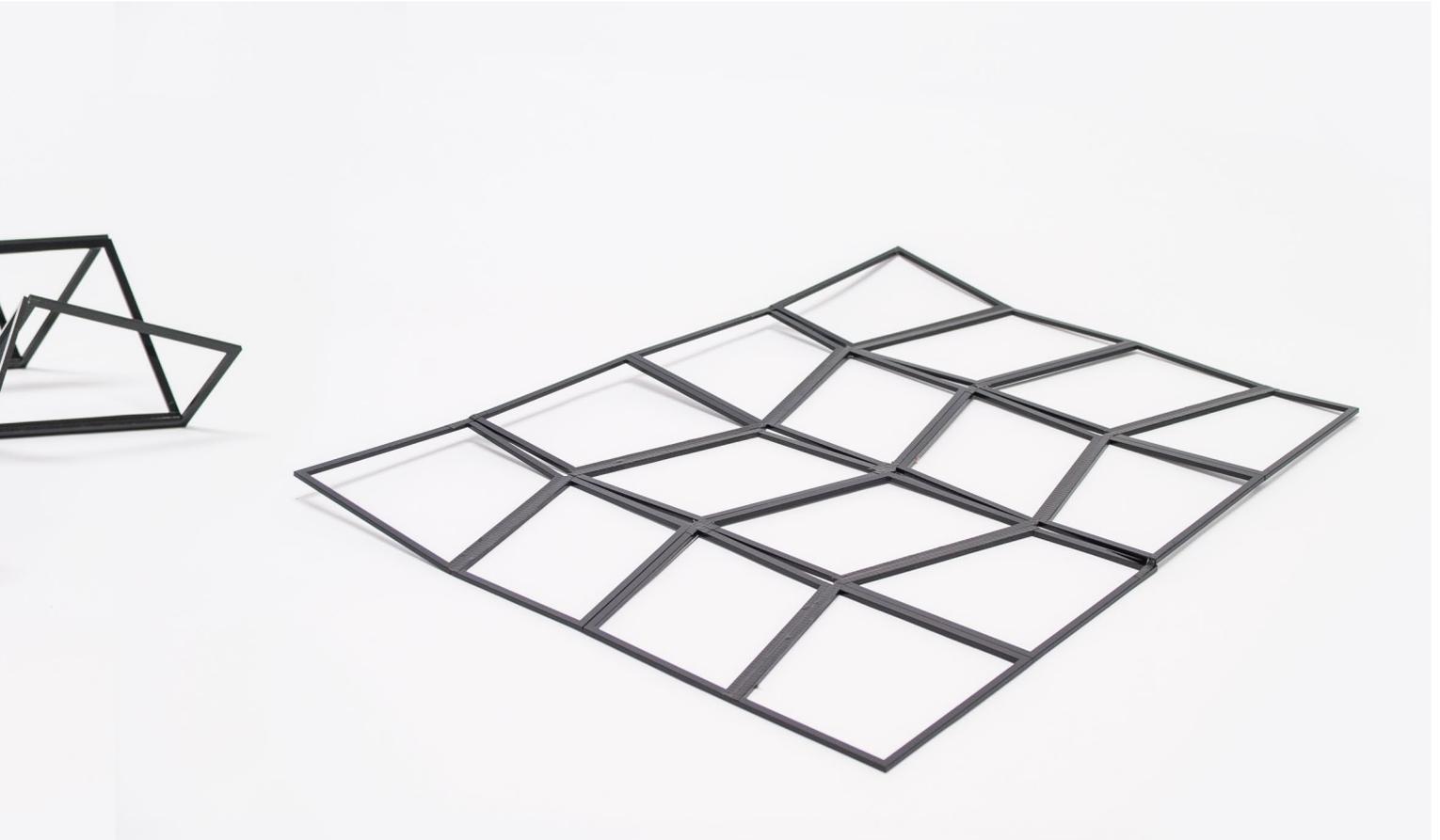


Abb 15  
Prinzip der exzentrisch alternierenden Gelenkanordnung

Abb 16  
Modellstudie M 1:20 entwickelte Methode

10 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 16.



## 9.6 Entwickelte Methode

Die in der Gegenüberstellung analysierten, bestehenden methodischen Ansätze konnten den spezifischen Anforderungen des Bauprojektes nicht zur Gänze gerecht werden. Wichtige konstruktive oder ästhetische Parameter wurden nicht ausreichend erfüllt und so galt es, aus den gesammelten Erfahrungen eine eigenständige, funktionierende Methode zu erarbeiten.

Der neu entwickelte Lösungsansatz basiert zunächst auf der exzentrisch alternierenden Gelenkanordnung. [Abb 15] Zur Gewährleistung der vollständigen Falt-

barkeit wurden in einem weiteren Schritt bestimmte Gelenkachsen durch Kugelgelenke ersetzt. Die Lage dieser Kugelgelenke ist in der Werkplanung des Kapitels 11 *Prototyp Planung* ersichtlich. Der Austausch entlang dieser Gelenkachsen führt zu einer Erhöhung der kinematischen Freiheitsgrade und unterbindet weiterführend ein Entstehen von geometrischen Kollisionen innerhalb der Faltstruktur.

Verglichen mit den bereits vorgestellten Lösungsansätzen konnte die neu entwickelte Methode bezüglich aller projektrelevanter Anforderungen als geeignet hervorgehen. Ähnlich der zentrischen Gelenkanordnung verfügt die neu entwickelte Methode über

eine kinematische Kette mit nur einem Freiheitsgrad, wodurch eine präzise und kontrollierte Faltbewegung möglich wird. Des Weiteren bringt das Konstruktionsprinzip eine Reduktion des Eigengewichts mit sich. Dieser Umstand wirkt sich besonders positiv auf die Dimensionierung aller erforderlichen Bauteile zur Einleitung der auftretenden Seilkräfte aus. Der hohe Anteil an transluzenten Flächen kann zudem Vito Acconcis ästhetischen Anforderungen gerecht werden. Einzig die Abdichtung entlang der veränderten Gelenkachsen könnte eine Herausforderung darstellen. Eine Lösung wird während der Umsetzung des geplanten Großversuchs entwickelt.<sup>10</sup>



10

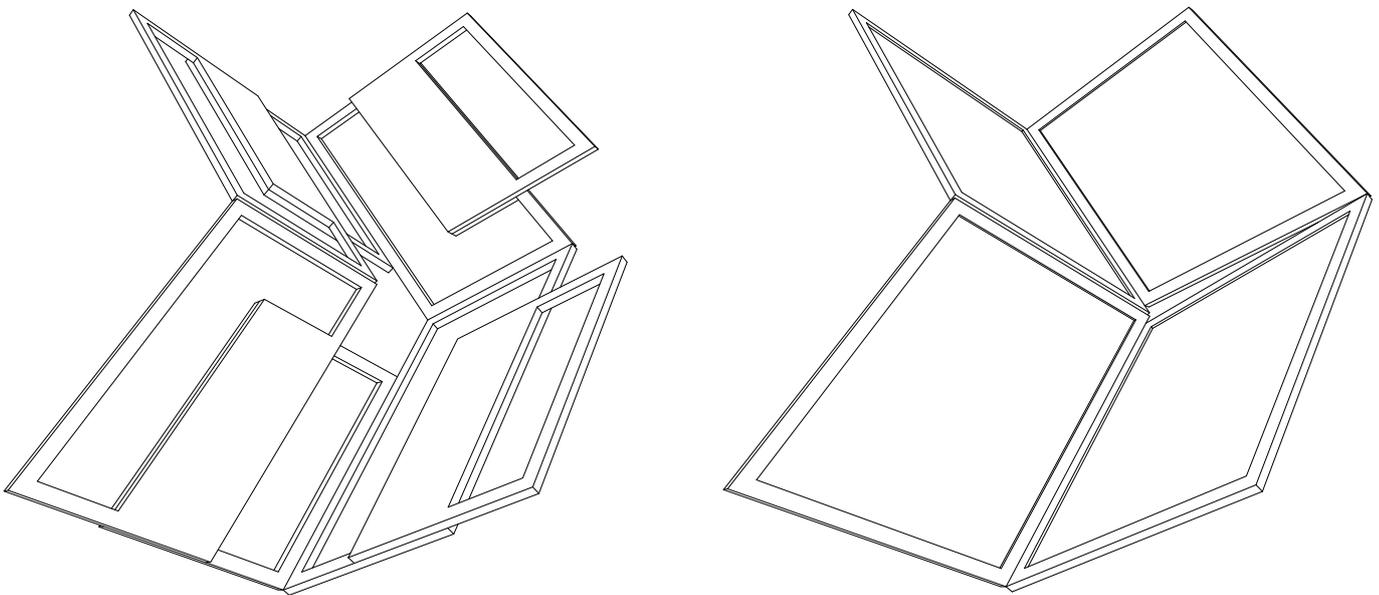
# Modellstudie 2

Abb 17  
Gegenüberstellung zweier möglicher Grundmechanismen  
Links: Modell A zentrische Gelenkanordnung  
Rechts: Modell B exzentrisch alternierende Gelenkanordnung

11 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 17.

10. Modellstudie 2  
10.1 Einleitung

36

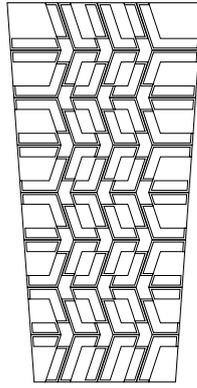


## 10.1 Einleitung

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse folgte eine weitere Gegenüberstellung zweier als geeignet erscheinender Methoden. Dieser Vergleich sollte mittels analoger Versuchsmodelle im Maßstab 1:10 erfolgen und den Dimensionen der geplanten Mürinselüberdachung entsprechen. Die Auswahl umfasste dabei zum einen die von Tomohiro Tachi empfohlene Methode der zentrischen Gelenkanordnung *Modell A* und zum anderen die neu entwickelte Methode basierend auf einer exzentrisch alternierenden Gelenkanordnung *Modell B*. Beide Modelle wurden aus Pappel-

sperrholz mit sechs Millimeter Materialdicke umgesetzt. Die Anfertigung erfolgte mittels Lasercutter bzw. Fräsröbter des *ITE*. Die Gelenkfunktion, in beiden Modellen mittels Leinentextil ausgeführt, wurde mit den Rahmenflächen kraftschlüssig verbunden. Für die Aufhängung am Seil kamen herkömmliche Ösenschrauben und Kettenglieder zur Anwendung, welche einen reibungslosen Bewegungsablauf gewährleisteten. In der Gegenüberstellung unterschieden sich die beiden Modelle vor allem bezüglich des Eigengewichts und der Komprimierbarkeit. Beide Modelle konnten am Seil geführt werden und vollzogen eine gleichmäßige, der digitalen

Simulation entsprechende Faltbewegung. Da aus Kostengründen nur eine Methode im Großversuch realisiert werden sollte, folgte eine Auswahl nach projektrelevanten Kriterien. Hierbei erwies sich *Modell B* als geeigneter. Das konstruktionsbedingt geringere Eigengewicht reduzierte die notwendige Vorspannkraft der Tragseile und minimierte die während der Faltbewegung auftretenden Reibungswiderstände. Des Weiteren verfügte *Modell B* über einen wesentlich höheren Kompaktierungsgrad und ermöglichte eine insgesamt größere Anzahl an transluzenten Membranflächen. Die weiterführende Entwicklung des Großversuchs wurde demnach mit *Modell B* fortgesetzt.<sup>11</sup>



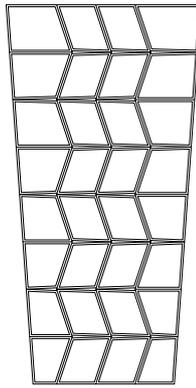
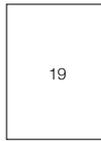
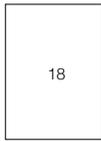
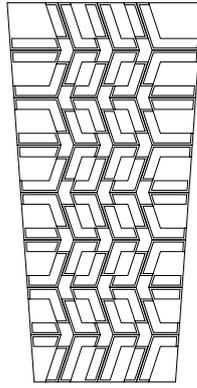


Abb 18  
Modell A M 1:10 zentrische Gelenkanordnung  
Minimaler Öffnungswinkel

Abb 19  
Modell B M 1:10 exzentrisch alternierende Gelenkanordnung  
Minimaler Öffnungswinkel





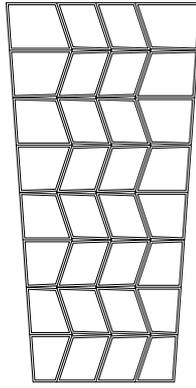
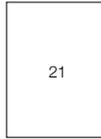
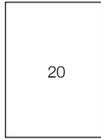


Abb 20  
Modell A M 1:10 zentrische Gelenkanordnung M 1:10  
Maximaler Öffnungswinkel

Abb 21  
Modell B M 1:10 exzentrisch alternierende Gelenkanordnung  
Maximaler Öffnungswinkel





11

# Prototyp - Planung

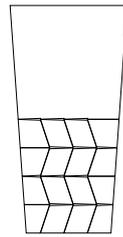
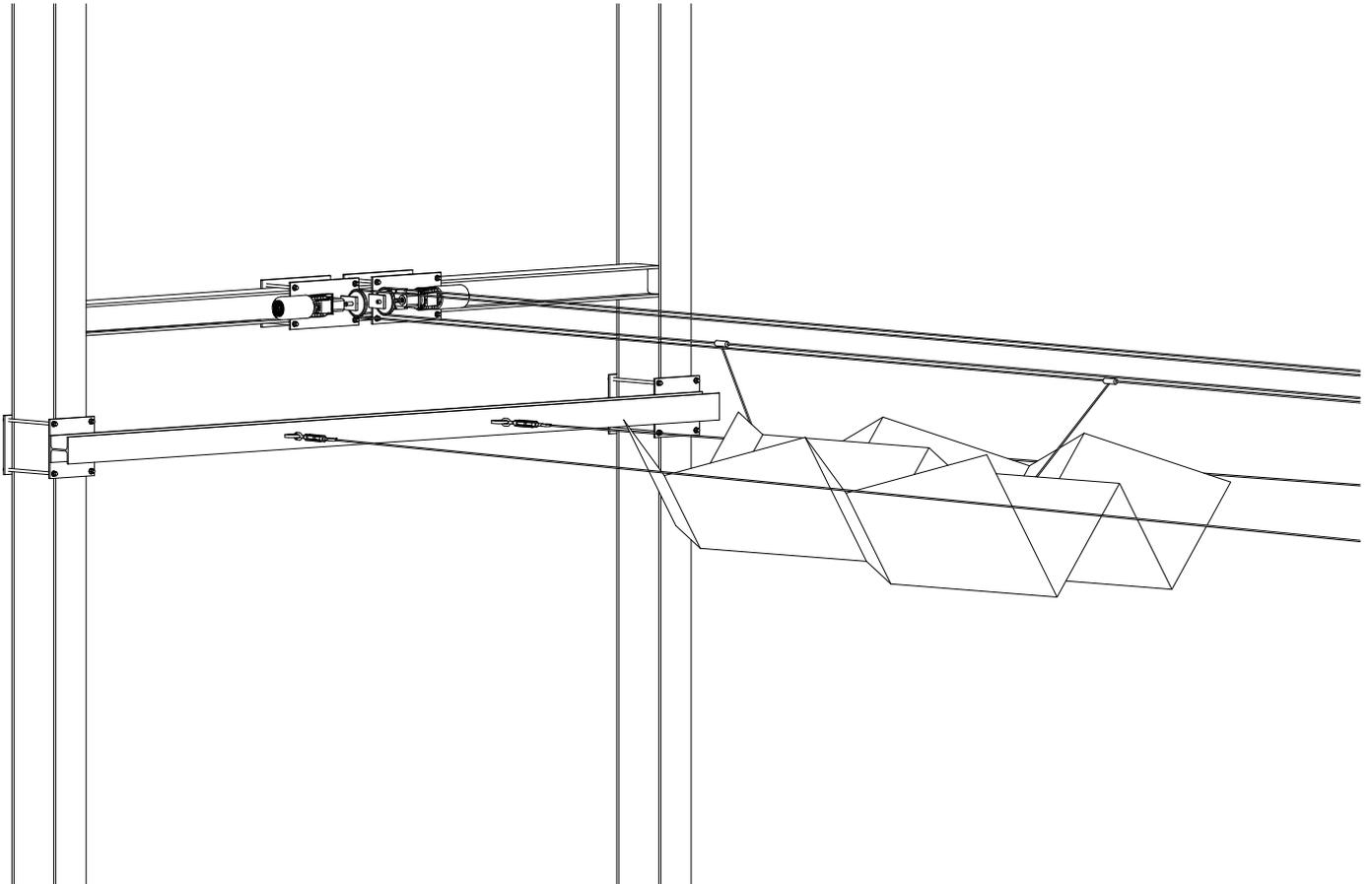


Abb 22  
Ausschnitt des Versuchmodells bezogen auf ein Segel der  
Murinselüberdachung

Abb 23  
Versuchsaufbau am Firmengelände der SFL in Stallhofen



## 11.1 Einleitung

Mit dem Bau eines Prototyps sollten die aus den analogen und digitalen Modellstudien gewonnenen Erkenntnisse einem deutlich größeren Maßstab zugeführt werden. Alle Rahmenbedingungen und eingesetzten Bauteile sollten dabei den Anforderungen des späteren Bauvorhabens nachkommen, um aussagekräftige Erfahrungen über Funktionalität sowie Materialverhalten während des Faltprozesses zu ermöglichen.

Die Entwicklung und Realisierung des Großversuches erfolgte in Kooperation mit den Firmen *SFL Technologies GmbH*

und *Sattler AG*. Als breit gefächertes Unternehmen verfügt die Firma *SFL Technologies GmbH* unter anderem über eine eigene Forschungsabteilung *FIBAG* und konnte ihre Expertisen in die Antriebs- und Steuerungstechnik sowie in die Fertigung des Prototyps einbringen. Im Bezug auf die Herstellung und Verarbeitung textiler Membranen konnte auf die Kernkompetenz der Firma *Sattler AG* zurückgegriffen werden.

In intensiver Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten konnte somit ein Prototyp im nahezu baupraktischen Maßstab 1:2 errichtet werden, welcher ein halbes Segel (bezogen auf die Längsachse) der

später vorgesehenen Murinselüberdachung abbildet. [Abb 22]

Die automatisierte Antriebs- und Steuerungstechnik ermöglichte nicht nur eine realitätsnahe Simulation und Auswertung des Faltverhaltens, sondern gab darüber hinaus auch Aufschluss über das Verhalten der Faltstruktur im Dauerbetrieb.

## Anforderungen an den allgemeinen Versuchsaufbau

Standort	Tragseile	Führungsseil	Antrieb
Bestehende Tragkonstruktion zur Einleitung der Seilkräfte	Auflagerpunkte variabel um eine Feinabstimmung zu ermöglichen	Lage oberhalb der Symmetrieachse der faltstruktur	Motorisiert zur Überprüfung der Funktionalität im Dauerbetrieb
Witterungssimulationen sollen möglich sein	Vorspannung variabel um eine Feinabstimmung zu ermöglichen	Vorspannung variabel um eine Feinabstimmung zu ermöglichen	Programmierbare, externe Steuerungseinheit
	Aufhängung des Prototyps mittels Seilrollen, um Reibungswiderstände zu minimieren	Umlaufende Seile mit beidseitiger Lagerung auf Umlenkrollen	Verfahrgeschwindigkeit stufenlos regulierbar
	Die errechnete Seilkraft beträgt 14,5 kN	Die errechnete Seilkraft beträgt 10,2 kN	Positions- und Windsensoren um einen Dauertest zu ermöglichen
			Die erforderliche Zugkraft beträgt 2,4 kN
gewählt	gewählt	gewählt	gewählt
Firmengelände <i>SFL Technologies GmbH</i> in Stallhofen	Rundlitzenseil Kreuzschlag 6x19 Durchmesser 10 mm verzinkte Stahldrähte	Rundlitzenseil Kreuzschlag 6x19 Durchmesser 10 mm verzinkte Stahldrähte	Getriebemotor <i>Lenz GmbH</i> Externe Steuerungseinheit mit Positions- und Windsensoren

## 11.2 Allgemeiner Versuchsaufbau

Der geplante Großversuch umfasste sowohl einen allgemeinen Versuchsaufbau als auch die faltstruktur selbst und konnte in Stallhofen auf dem Firmengelände der *SFL Technologies GmbH* umgesetzt werden. Die auftretenden Seilkräfte zufolge Eigengewicht und Vorspannung konnten in eine bestehende Dachkonstruktion eingeleitet werden. Dafür wurden zwischen vier der bestehenden *HEB 450* Stützen zwei Querträger *HEA 140* montiert. Die für die Tragseile notwendigen Auflager wurden entlang dieser Querträger angebracht. Die erforderliche Vorspannung der Trag-

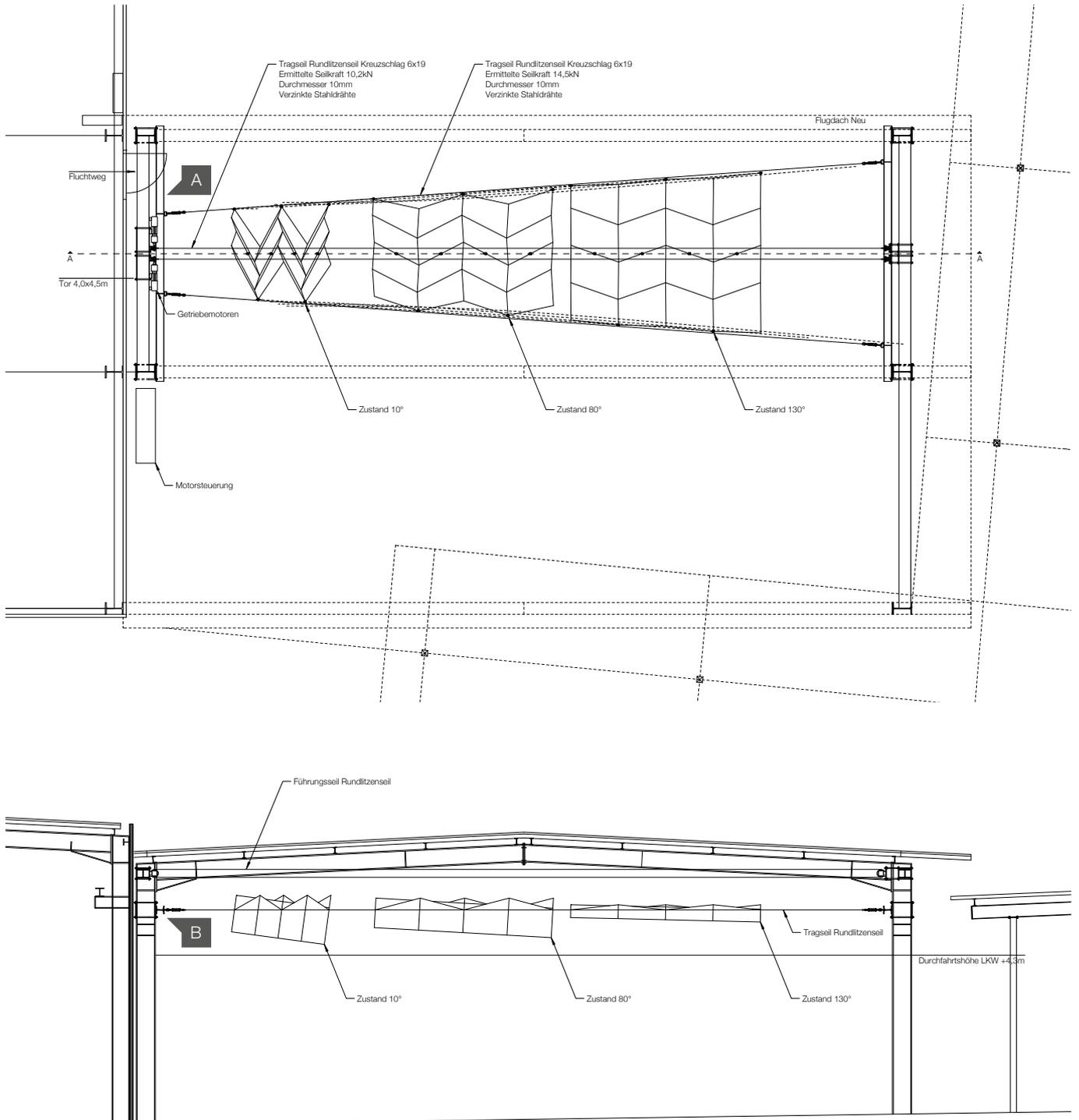
seile ergab sich aus dem Eigengewicht und der Belastung während des faltvorganges und wurde mittels konventioneller Spannschlösser erzielt. Wichtig war es dabei, den zu erwartenden Seildurchhang der Murinselüberdachung auf den Großversuch maßstäblich zu übertragen. Die errechnete Seilkraft ergab bei einem Seildurchhang von 32 cm 14,5 kN. Die nötigen Umlenkrollen der Führungsseile wurden an bestehende Querträger der Dachkonstruktion mittels Klemmverbindungen angebracht. Die vorgesehenen Klemmverbindungen ermöglichten auch die Vorspannung der Führungsseile. Die errechnete Seilkraft der Führungs-

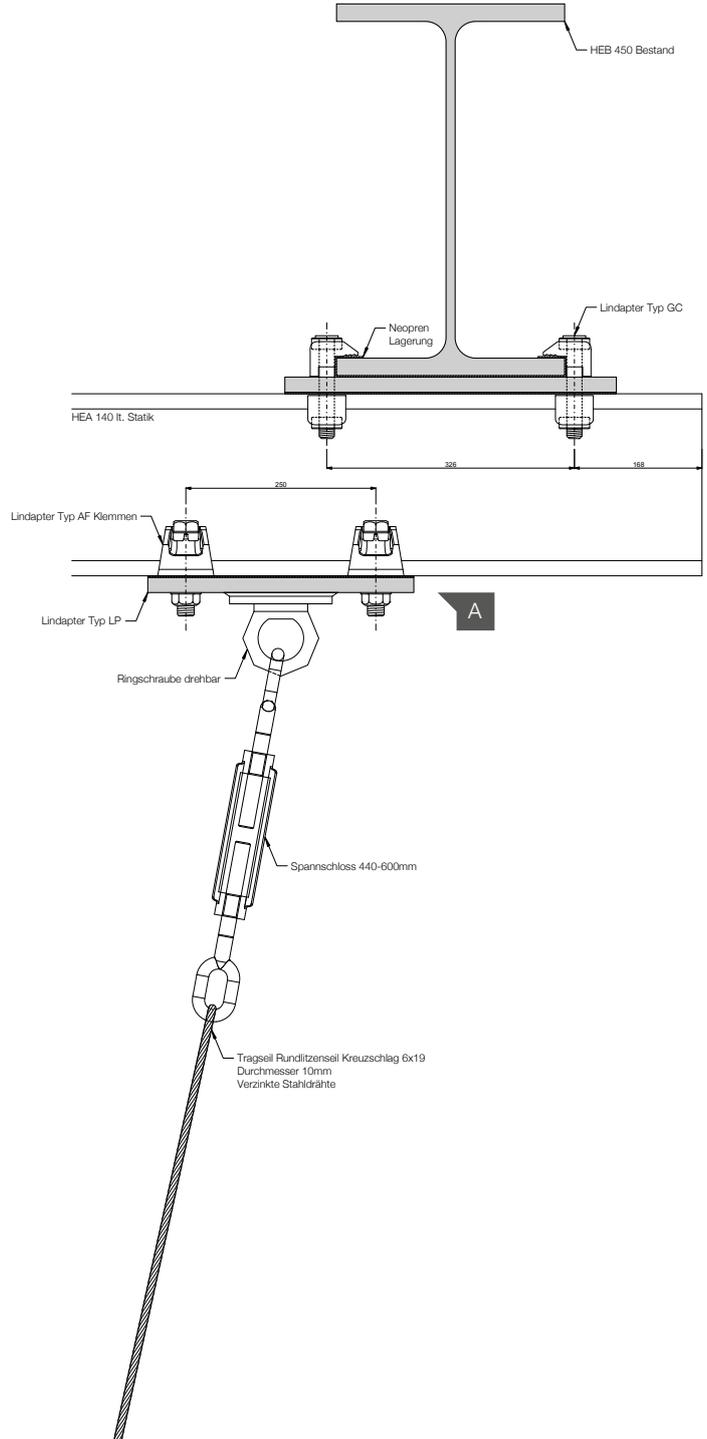
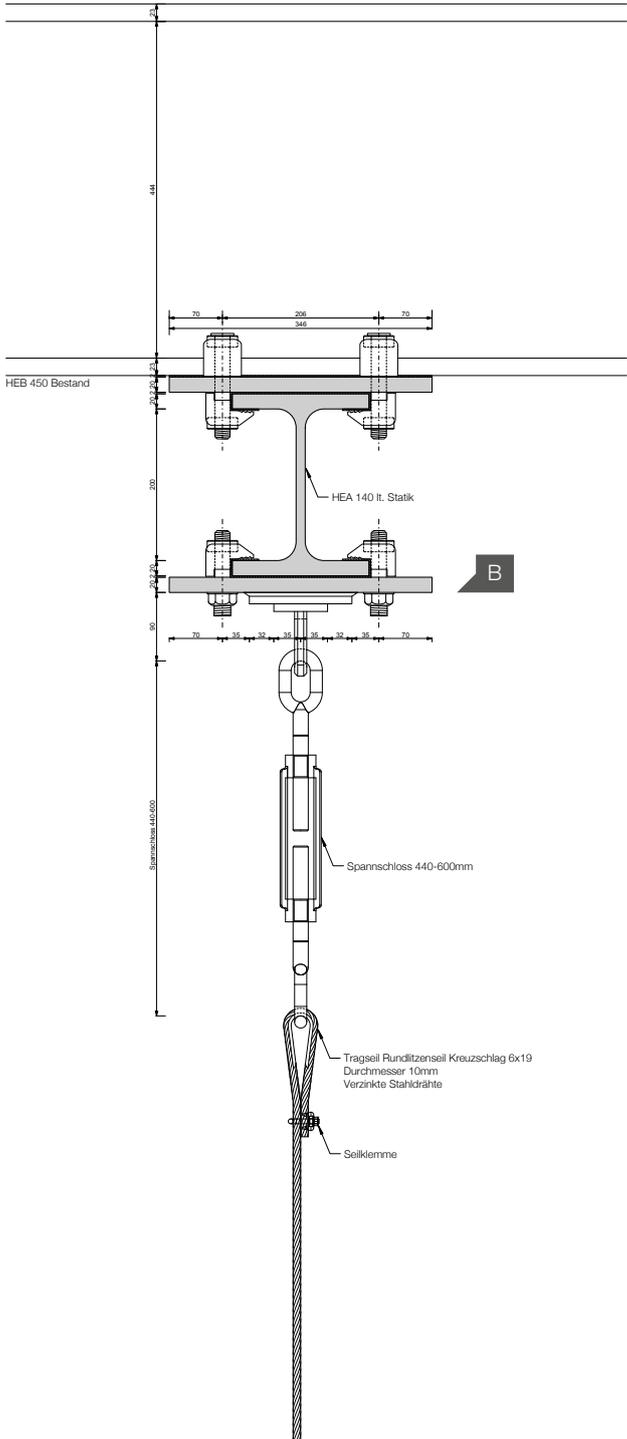
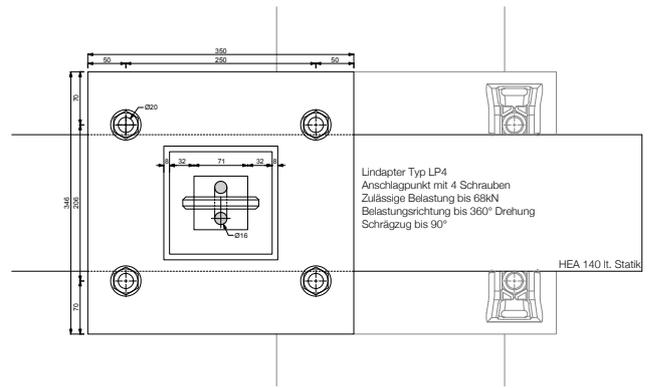
seile ergab 10,2 kN.

Der automatisierte Antrieb und die dazu benötigte Steuerungstechnik wurde von der Firma *SFL Technologies GmbH* in Kooperation mit der Firma *Lenze GmbH* realisiert. Bei der Auswahl der Motoren war die errechnete Zugkraft von 2,4 kN maßgebend. Zur Simulation eines Dauerbetriebes wurde der Großversuch zudem mit einer Motorsteuerung, Positions- und Windsensoren ausgestattet.<sup>12</sup>

Abb 24  
Grundriss und Schnitt allgemeiner Versuchsaufbau M 1:150

12 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 28.





Anforderungen an die Bauteile			
Rahmen	Scharniere	Membran Rahmen	Membran Dichtlatz
Möglichst geringes Eigengewicht	Ausreichende Stabilität um den Faltprozess zu ermöglichen	Transluzenz	Knickbeständig
Möglichst schlanker Profilquerschnitt	Gewährleistung einer kraftschlüssigen Verbindung mit den Rahmen	Muss allen zu erwartenden Witterungskräften standhalten	Geometrie der Abdichtung darf den Faltvorgang nicht einschränken
Gewährleistung einer kraftschlüssigen Verbindung mit Scharnieren und Klemmleisten		Wasserdichte Entwässerungsebene	UV-beständig
Aufnahme aller Lasten infolge Membran-Vorspannung, Aufhängung am Seil und Faltvorgang		UV-beständig	Geometrie der Abdichtung darf die Entwässerung nicht einschränken
		Vorspannung der Faltflächen ermöglichen	Austausch einzelner Elemente soll möglich sein
gewählt	gewählt	gewählt	gewählt
Aluminium Formrohr 50/30/3 mm	Edelstahlscharnier 80/60/3 mm	Polypan Architecture Type 1 10-12% Transparenz	Polypan Architecture Type 5 3-5% Transparenz

### 11.3 Anforderung an Bauteile

Um nicht nur einen reibungslosen Faltvorgang, sondern auch die Funktion eines kompletten Witterungsschutzes sicherzustellen, ergaben sich spezifische Anforderungen für die Bauteile. Diese wurden darüber hinaus mit kontextbezogenen Parametern des Bauplatzes über der Mürinsel erweitert.

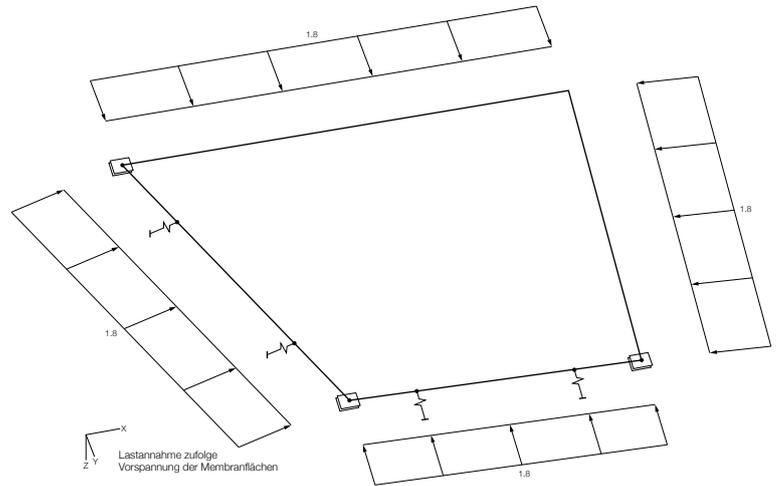
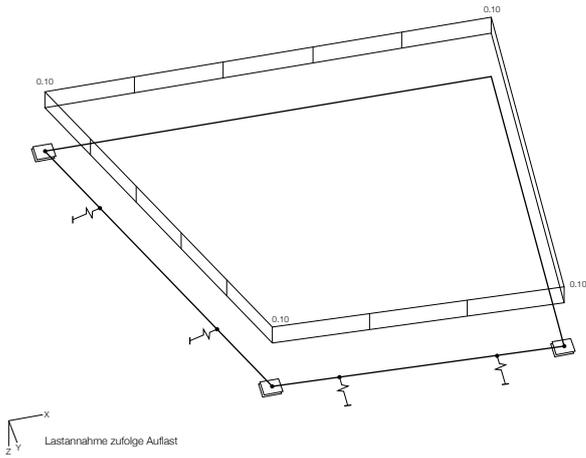
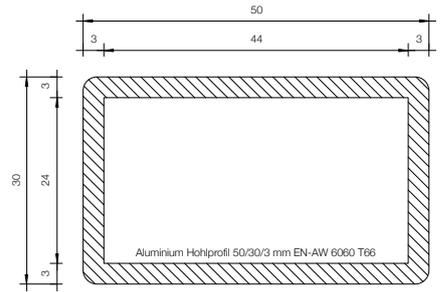
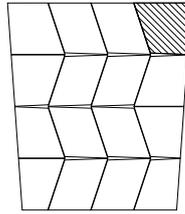
Die oben abgebildete Tabelle zeigt die wesentlichsten Kriterien und die gewählte Materialität der Bauteile.

Anfänglich als kostengünstige Holzkonstruktion geplant, konnte der Prototyp in Zusammenarbeit mit der Firma *SFL*

*Technologies GmbH* aus geschweißten Aluminiumrahmen mit einer Membranbeanspruchung umgesetzt werden. Entsprechend ihrer Funktion wurden die Membranflächen in *MembranRahmen* und *MembranDichtlatz* unterteilt.

Durch die erwartungsgemäß höhere Beanspruchung der *MembranDichtlatz* entlang der Faltachsen war von einer schnelleren Materialermüdung auszugehen. Sowohl dieser Umstand als auch die Anforderung, verschiedene Abdichtungslösungen und deren Funktionalität zu evaluieren, begründeten diese Entscheidung. Das gewählte Konstruktionsprinzip der Faltstruktur erforderte den Einsatz zwei-

er verschiedener Gelenklösungen. Zum einen konnten konventionelle, gerollte Edelscharniere mit wechselbarem Stift für die Gelenkausbildung der Faltachsen verwendet werden. Zum anderen mussten an einigen Verschneidungspunkten eigens angefertigte Spezialscharniere eingesetzt werden, um die Faltbewegung nicht einzuschränken.<sup>13</sup> [siehe Kapitel 11.5]

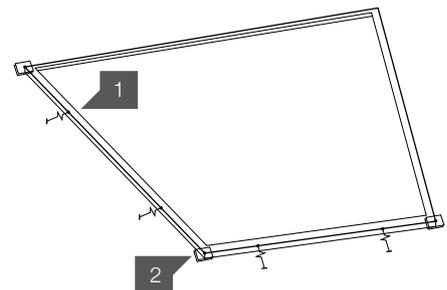


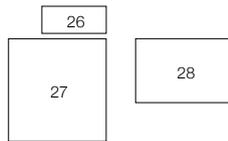
Lagerbedingungen 1

Lager	Federkonstante
<input type="checkbox"/> $u_x$	$Cu_{,x}$ 0.001 [kN m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$Cu_{,y}$ 0.000 [kN m]
<input type="checkbox"/> $u_z$	$Cu_{,z}$ 0.000 [kN m]
Einspannung	
<input type="checkbox"/> $\phi_x$	$C\phi_{,x}$ 0.000 [kNm rad]
<input type="checkbox"/> $\phi_y$	$C\phi_{,y}$ 0.000 [kNm rad]
<input type="checkbox"/> $\phi_z$	$C\phi_{,z}$ 0.000 [kNm rad]

Lagerbedingungen 2

Lager	Federkonstante
<input type="checkbox"/> $u_x$	$Cu_{,x}$ 0.001 [kN m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$Cu_{,y}$ 0.000 [kN m]
<input type="checkbox"/> $u_z$	$Cu_{,z}$ [kN m]
Einspannung	
<input type="checkbox"/> $\phi_x$	$C\phi_{,x}$ 0.000 [kNm rad]
<input type="checkbox"/> $\phi_y$	$C\phi_{,y}$ 0.000 [kNm rad]
<input type="checkbox"/> $\phi_z$	$C\phi_{,z}$ [kNm rad]





**Abb 26**  
Maßgebende Faltfläche und ausgewählter Profilquerschnitt

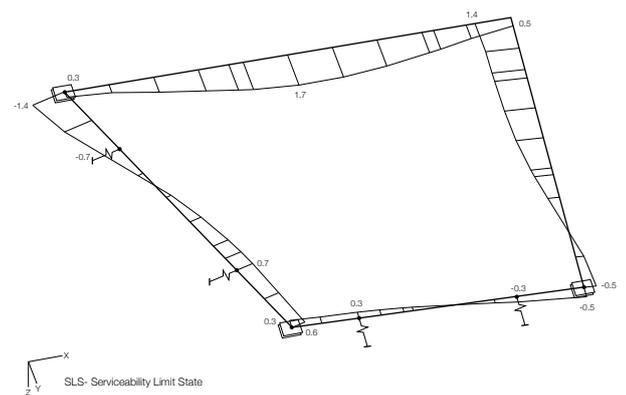
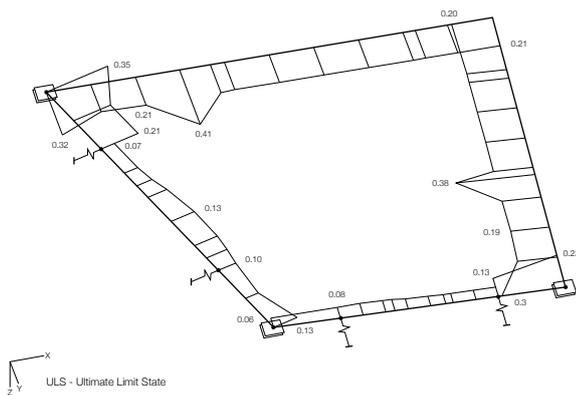
**Abb 27**  
Statisches Modell mit Lagerbedingungen, Lastannahme zufolge Auflast und Membran-Vorspannung

**Abb 28**  
Tragfähigkeitsbemessung u. Gebrauchstauglichkeitsnachweis

14 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 20-22.

11. Prototyp - Planung  
11.4 Vordimensionierung

50



## 11.4 Vordimensionierung

Der Maßstabssprung machte eine Vorbemessung aller für den Bau des Prototyps erforderlichen Bauteile unumgänglich. Die Bemessung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro *Engelsmann Peters Beratende Ingenieure GmbH*.

Neben den Bauteilen des allgemeinen Versuchsaufbaus [siehe Kapitel 11.2] galt es vor allem für die Faltwerksrahmen, ein optimales Verhältnis zwischen Eigengewicht und Tragfähigkeit zu finden, um eine reibungslose Funktionalität während des Faltvorgangs zu gewährleisten.

Die Auswahl von Materialität und Quer-

schnitt der Aluminiumprofile sowie die für die Vordimensionierung maßgebende Faltfläche sind in Abbildung 26 ersichtlich. Für eine möglichst realitätsnahe Modellbildung wurde bei den Auflagern zwischen zwei Lagerbedingungen unterschieden. [Abb 27]

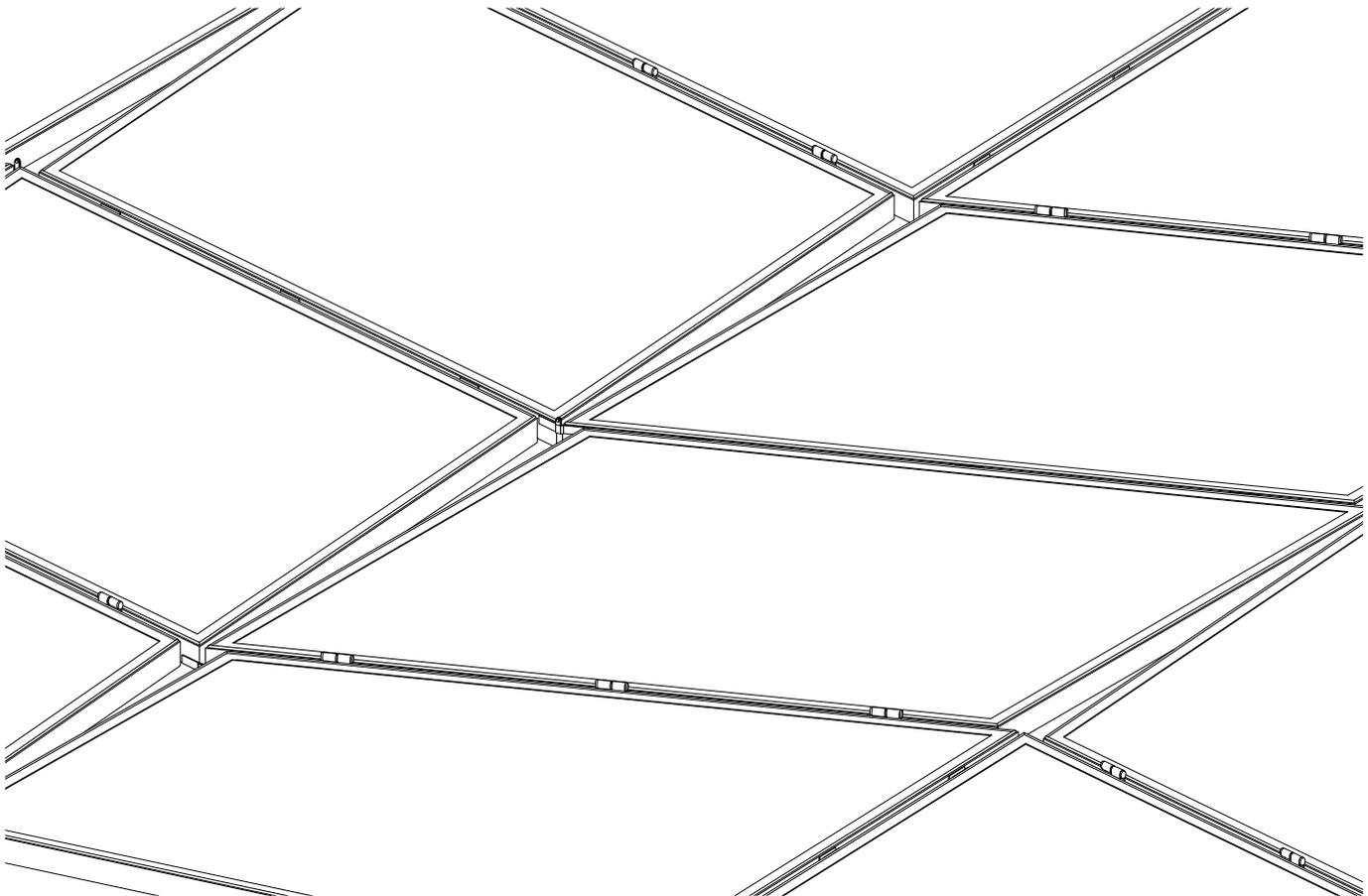
Die Lastannahme zufolge Eigengewicht ergab sich aus den Bauteilen Rahmen, Membran und den für die Verbindung der einzelnen Bauteile notwendigen Einbauteilen. Als *Eigengewicht<sub>Gesamt</sub>* errechneten sich 112,0 kg, woraus sich bezogen auf die einzelne Faltwerksfläche ein *Eigengewicht<sub>Panel</sub>* von 7,0 kg ergab.

Als Lastannahme zufolge Auflast wurde

eine Flächenlast von 0,08 kN/m<sup>2</sup> angenommen. Die erforderliche Vorspannkraft der Membranflächen wurde seitens der Firma *Sattler AG* mit 1,2 kN/m angegeben. [Abb 27]

Die Tragfähigkeitsbemessung *ULS* ergab eine maximale Ausnutzung des Profils von 41,0 Prozent.

Die Bemessung auf Gebrauchstauglichkeitsniveau *SLS* ergab eine maximale Verformung in Richtung der Membranebene von 1,7 Millimeter.<sup>14</sup> [Abb 28]



### 11.5 Werkplanung

Der zu planende Prototyp sollte allen Anforderungen eines Versuchsmodells gerecht werden. Ziel war daher die Entwicklung eines möglichst adaptierbaren Prototyps, um etwa mehrere Gelenkvarianten oder Verbindungsmethoden zwischen den Falterwerksrahmen und der Membranflächen zu ermöglichen. Dieser Anspruch konnte durch den Einsatz von Blindnietmuttern gewährleistet werden, welche eine schnelle Montage und Demontage der verschiedenen Einbauteile erlaubten.

Die Ausarbeitung der Werkplanung erfolgte in intensiver Zusammenarbeit mit

den Firmen *SFL Technologies GmbH* und *Sattler AG*. Zudem war eine stetige Rückkoppelung mit digitalen Simulationen erforderlich, um die Funktionalität der jeweiligen Detaillösungen einer Überprüfung zu unterziehen. Hierfür wurde die Software *Rhinoceros* mit dem Programmaufsatz *Grasshopper* eingesetzt.

Die dreiecksförmigen Aussparungen [Abb 30] wurden im Versuchsmodell für die Analyse verschiedener Knotendetails der wasserführenden Membranebene vorgesehen. Sie sind hinsichtlich der kinematischen Faltbewegung nicht notwendig und finden im finalen Bauprojekt der Murinselüberdachung keine Anwendung.

In der Planung des Großversuches wurde bewusst auf Fragestellungen der finalen Gestaltung verzichtet. Vielmehr fokussierten alle Projektbeteiligten die Herstellung eines der Analyse und Auswertung der kinematischen Zusammenhänge dienlichen Versuchsmodells.

Andere Varianten hinsichtlich Materialität sowie Form werden in einem späteren Projektschritt entwickelt.

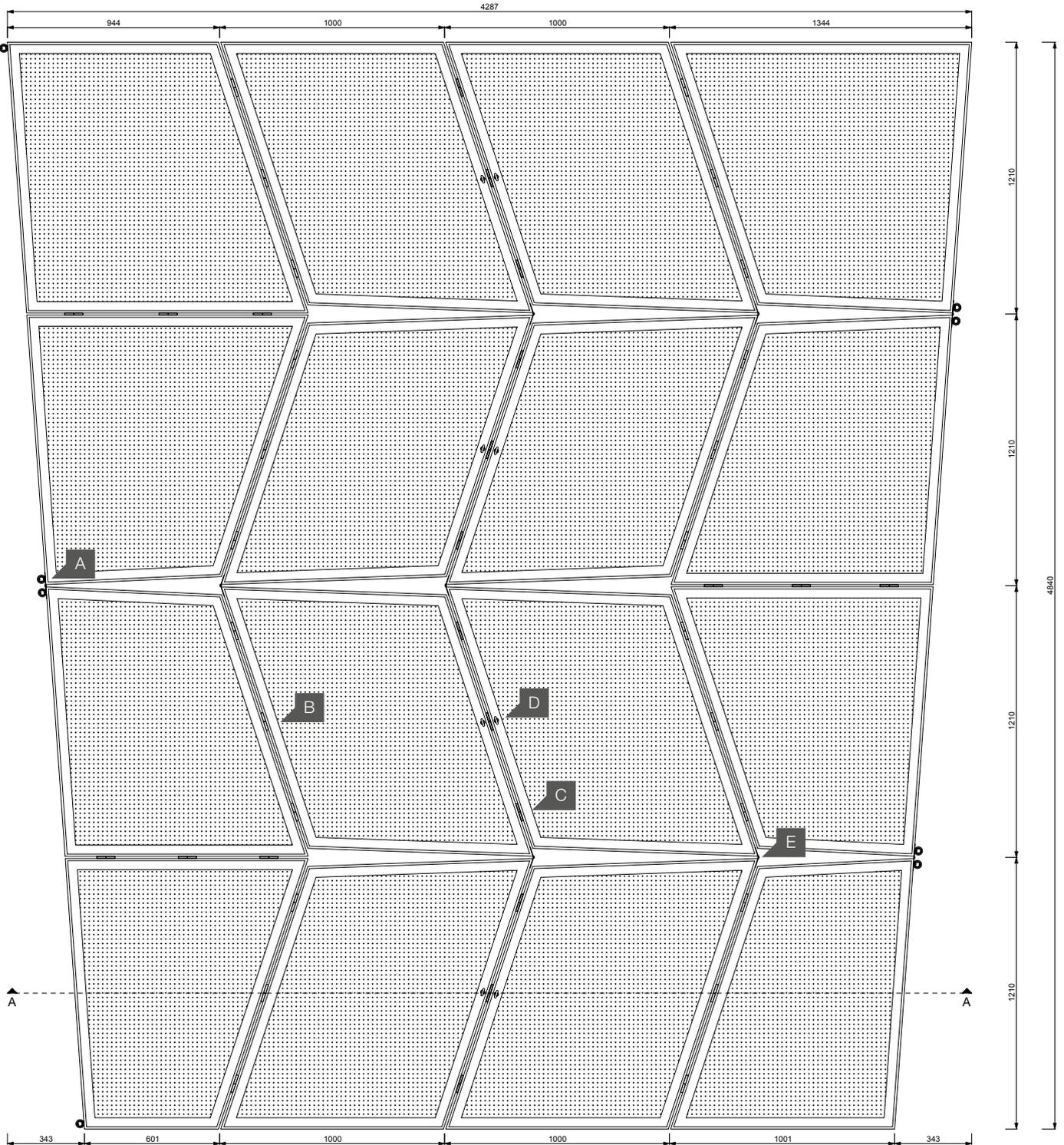
29

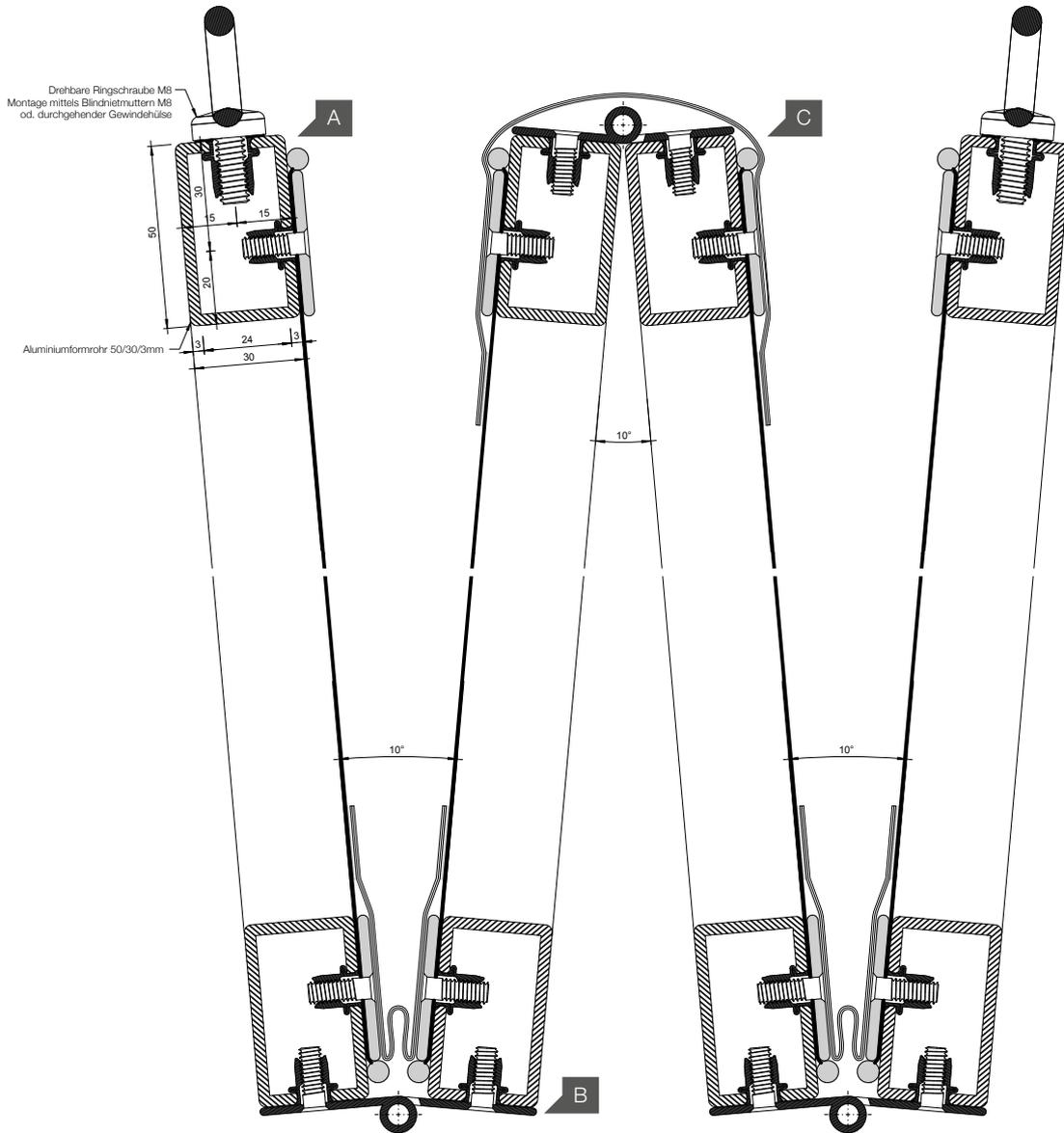
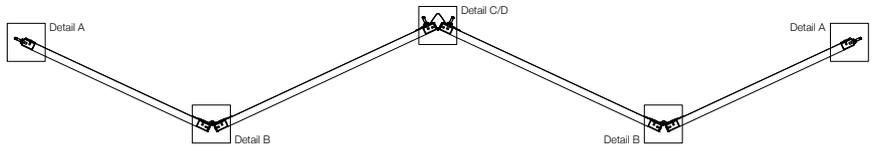
30

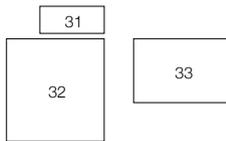
Abb 29  
Axonometrie Prototyp im entfalteten Zustand

Abb 30  
Draufsicht Prototyp im entfalteten Zustand M 1:25

11. Prototyp - Planung  
11.5 Werkplanung



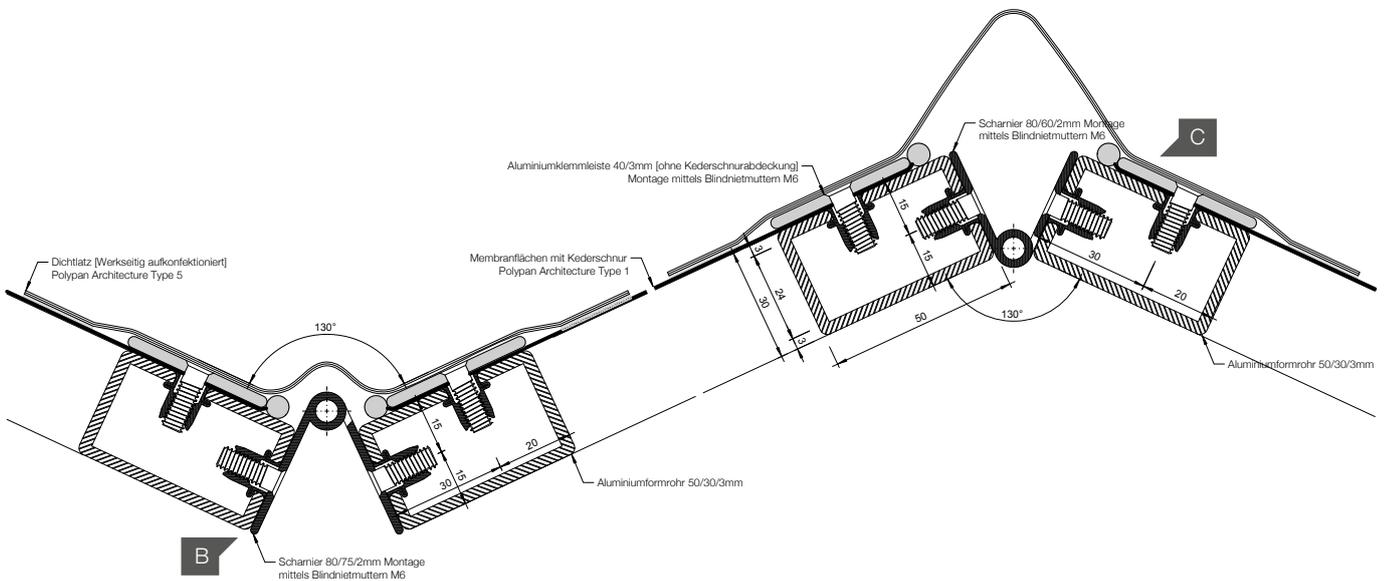




**Abb 31**  
Systemschnitt Übersicht der Detailpläne

**Abb 32**  
Detail A, Detail B, Detail C - minimaler Öffnungswinkel M 1:2

**Abb 33**  
Detail B, Detail C - maximaler Öffnungswinkel M 1:2



Detail A - Anschluss an Tragseil M 1:2

Der Anschluss an die Tragseile erfolgt mittels drehbarer Ringschrauben M8

Die Montage der Einbauteile erfolgt mittels Blindnietmuttern M6 bzw. M8

Die erforderliche Vorspannung der *MembranRahmen* erfolgt mittels vorgefertigtem Keder und Klemmleisten

Detail B - Talfalte M 1:2

Die Funktionalität des Faltvorgangs wird mittels gerollter Edelstahlscharniere gewährleistet

Pro Faltachse sind drei Scharniere vorgesehen

Die Montage sämtlicher Einbauteile erfolgt mittels Blindnietmuttern M6

Die erforderliche Vorspannung der *MembranRahmen* erfolgt mittels vorgefertigtem Keder und Klemmleisten

Die *MembranDichtlatz* wird nach der Montage aller Einbauteile werkseitig aufkonfektioniert

Detail C - Bergfalte M 1:2

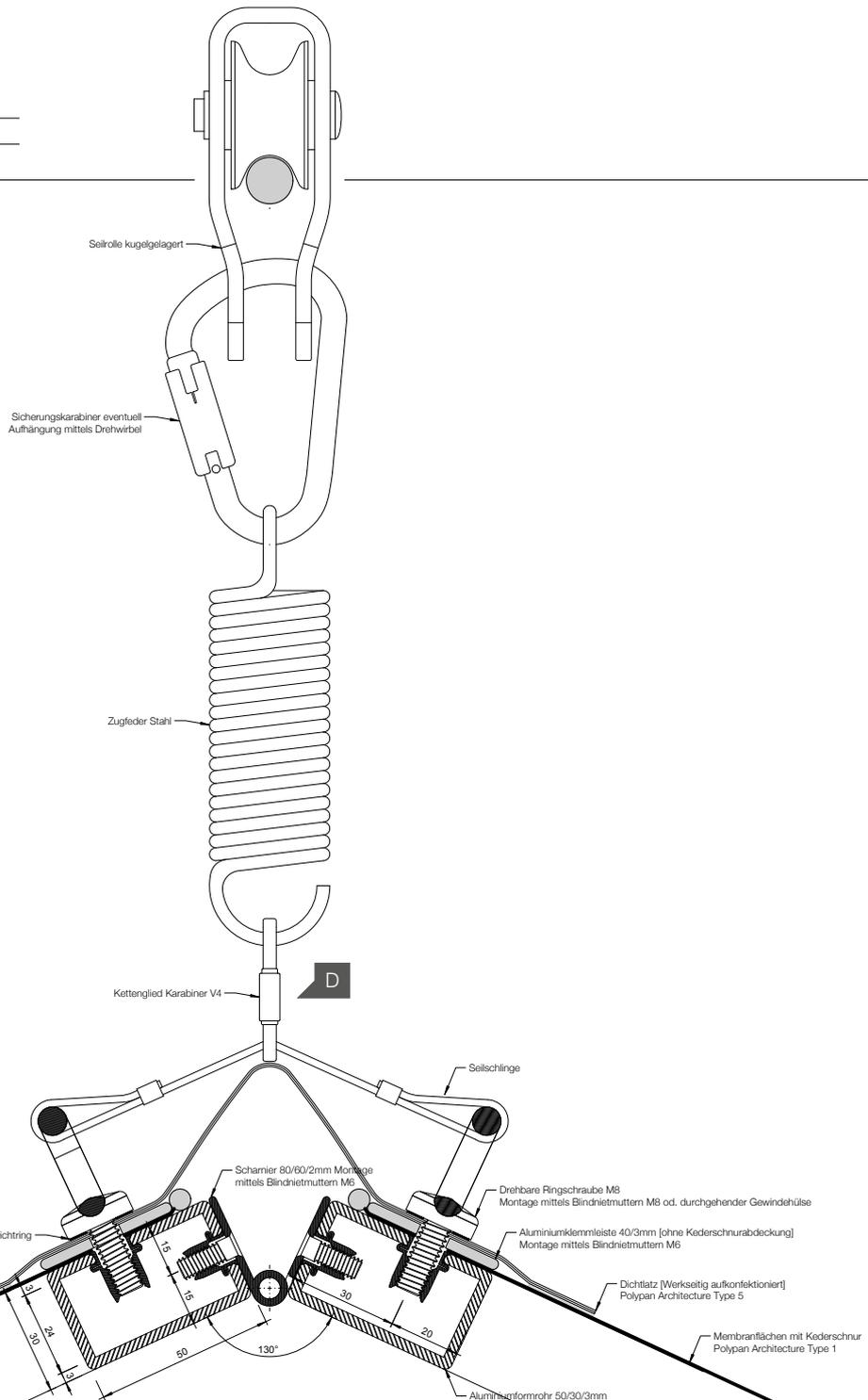
Die Funktionalität des Faltvorgangs wird mittels gerollter Edelstahlscharniere gewährleistet

Pro Faltachse sind drei Scharniere vorgesehen

Die Montage sämtlicher Einbauteile erfolgt mittels Blindnietmuttern M6

Die erforderliche Vorspannung der *MembranRahmen* erfolgt mittels vorgefertigtem Keder und Klemmleisten

Die *MembranDichtlatz* wird nach der Montage aller Einbauteile werkseitig aufkonfektioniert

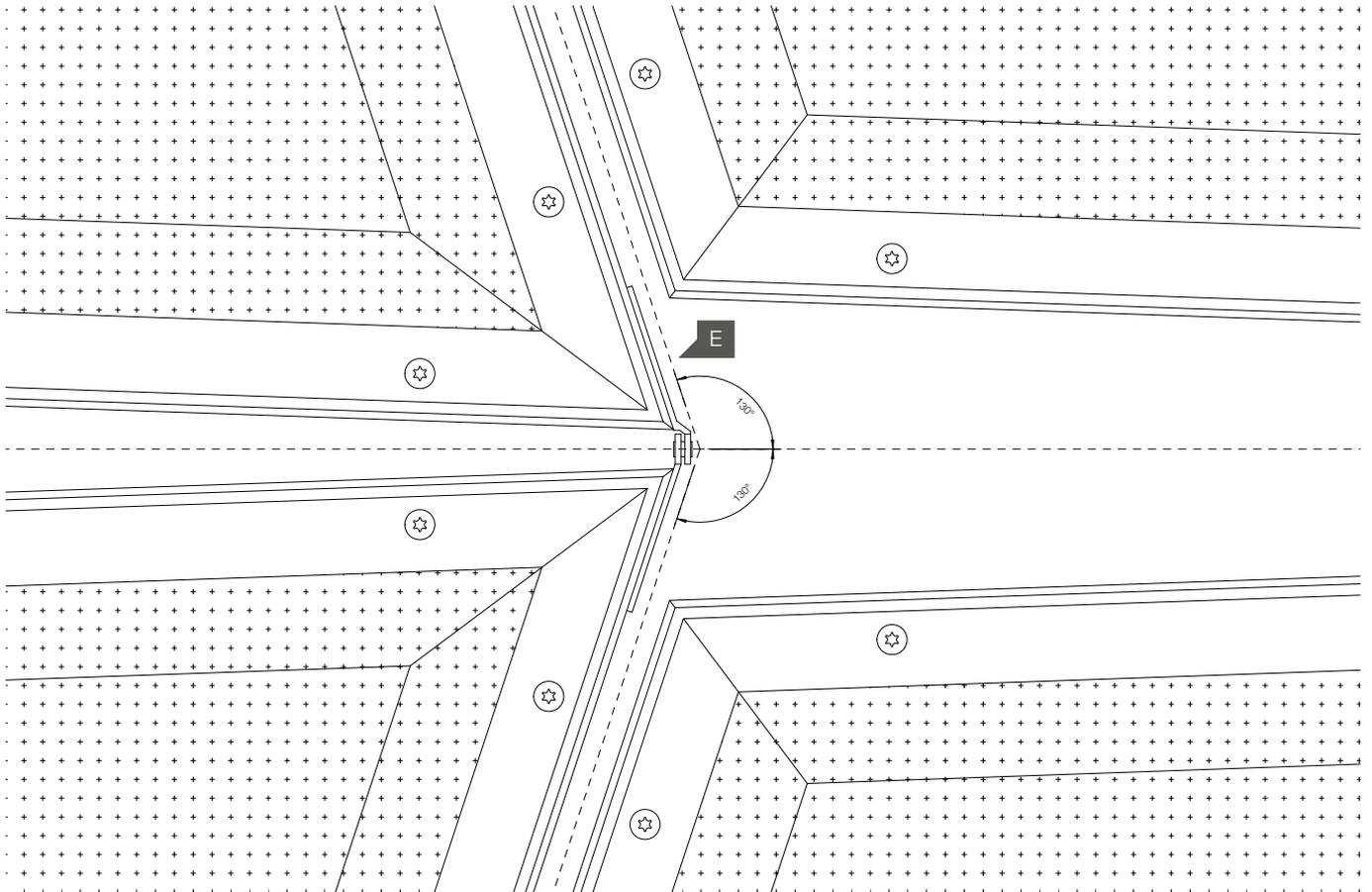


34

35

Abb 34  
Detail D - Anschluss an Führungsseil M 1:2

Abb 35  
Detail E - Spezialscharnier Draufsicht M 1:2



Detail D - Anschluss an Führungsseil M 1:2

Der Anschluss an die Führungsseile erfolgt mittels drehbarer Ringschrauben M8

Eine Seilschlinge ermöglicht das Führen entlang der Symmetrieachse

Vertikale Abweichungen zufolge der Faltbewegung werden mittels einer Zugfeder kompensiert

Die zu erwartenden Reibungswiderstände werden mittels kugelgelagerter Seilrollen minimiert

Detail E - Spezialscharnier M 1:2

Das Spezialscharnier muss sich der Funktionalität eines Kugelgelenkes annähern um den vollständigen Faltvorgang zu gewährleisten

Die Montage aller Scharniere erfolgt mittels Blindnietmuttern M6



12

# Prototyp - Dokumentation



## 12.1 Einleitung

Anfertigung sowie Montage des allgemeinen Versuchsaufbaus und Prototyps erfolgten in Stallhofen. Dabei wurden beinahe alle Arbeitsschritte von der Firma *SFL Technologies GmbH* durchgeführt. Mit der Zusammensetzung der ersten Falt-dachelemente wurde im Oktober 2014 begonnen. [Abb 36] Die Neuartigkeit des Bauvorhabens erforderte neben einer intensiven Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten auch eine stetige Rückkopplung mit digitalen Simulationen. Sämtliche Abweichungen von der Werkplanung mussten einer neuerlichen Evaluierung

hinsichtlich der Funktionalität während des Faltvorgangs unterzogen werden. Nach einer ersten Versuchsreihe, welche diese Funktionalität auch anhand des analogen Prototyps bestätigen konnte, wurde mit der Montage der Membranflächen begonnen. Die Membranflächen wurden von der Firma *Sattler AG* gemäß Detailplanung mit umlaufendem Keder vorgefertigt. Um die notwendige Vorspannung der Membranflächen zu erzielen wurden zudem Spannlatze aufgeschweisst. Diese ermöglichten folglich auch erste Versuche zur Abdichtung entlang der Faltachsen. Nach einer Überarbeitung und Neuprogrammierung der Motorsteuerung konnte

im Jänner 2015 die Montage des geplanten Großversuches abgeschlossen und erste Dauertests durchgeführt werden. Die folgende Bildreihe dokumentiert die wesentlichsten Schritte des Bauprozesses in chronologischer Reihenfolge.<sup>15</sup>



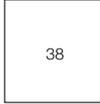
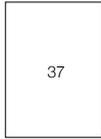
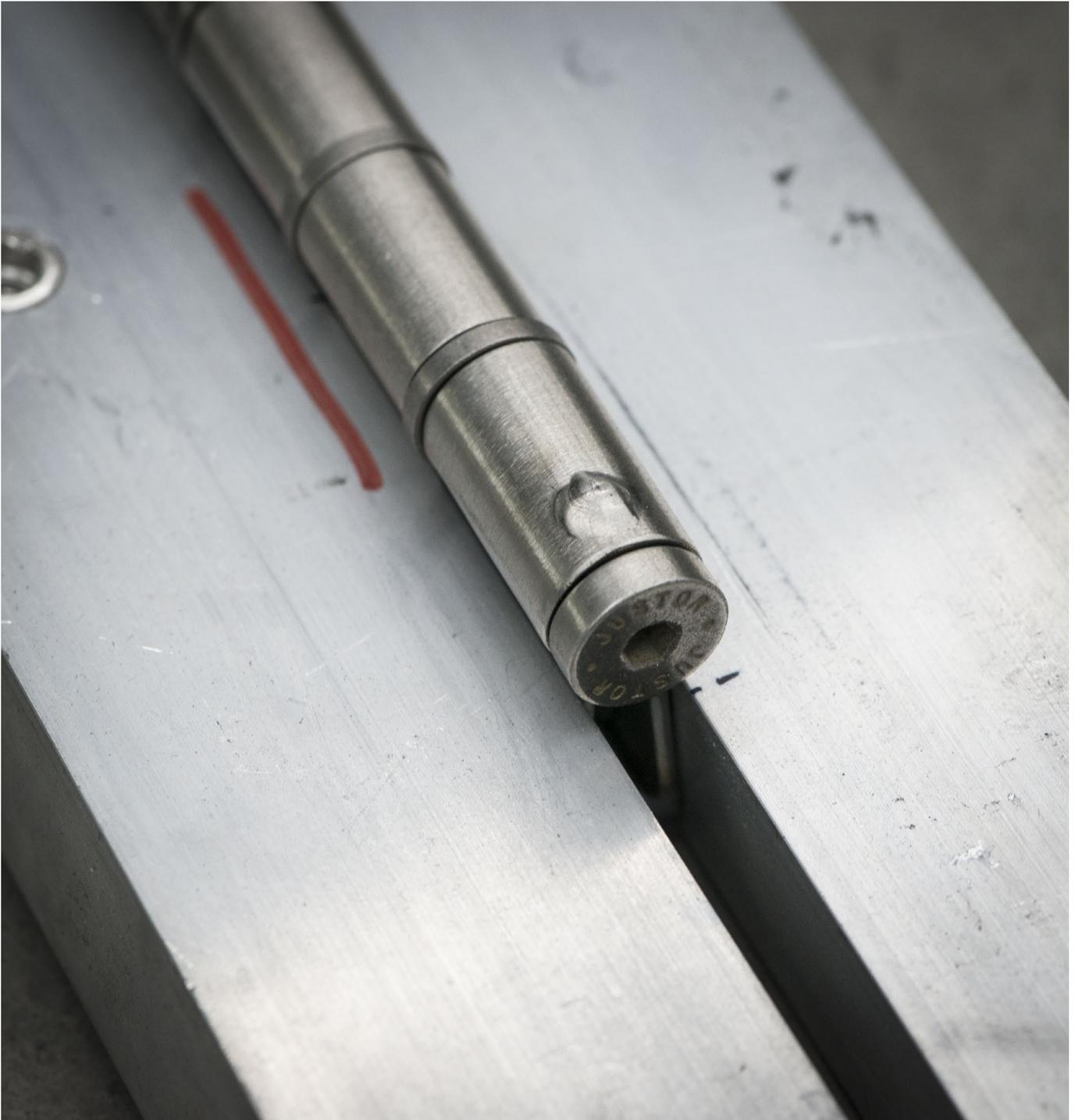


Abb 37  
Aufhängepunkt am Tragseil und Spezialscharnier

---

Abb 38  
Aufhängepunkt am Führungsseil entlang der Symmetrieachse





39

40

Abb 39  
Regelscharnier Edelstahl Bergfalte

Abb 40  
Erste Versuchsreihen ohne Membranbespannung

Nach der vollständigen Montage der Falterwerksrahmen wurde die Funktionalität des Falprozesses anhand erster Versuchsreihen durchgeführt.







**Abb 41**  
Knotenpunkt innerhalb der Faltstruktur

**Abb 42**  
Bespannen der Membranflächen

Nachdem die Funktionalität der Faltwerksrahmen bestätigt war, konnte die Montage der Membranflächen erfolgen. Die erforderliche Vorspannung wurde mittels Klemmbacken und Spanngurten erzielt.





43

44

Abb 43  
Faltstruktur mit Membranbespannung

Abb 44  
Montage der Klemmleisten

Die vorgespannten Membranflächen wurden mittels Klemmleisten an den Faltwerksrahmen montiert.





45

46

Abb 45  
Erste Abdichtversuche entlang der Faltachsen  
Abb 46  
Aufhängen der Faltstruktur in den allgemeinen Versuchsaufbau





47

48

Abb 47  
Seilrollen als Aufhängung an Tragseile

Abb 48  
Faltstruktur im eingefalteten Zustand





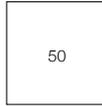
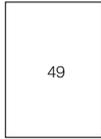


Abb 49  
Faltstruktur im entfalteten Zustand

Abb 50  
Faltstruktur im eingefalteten Zustand





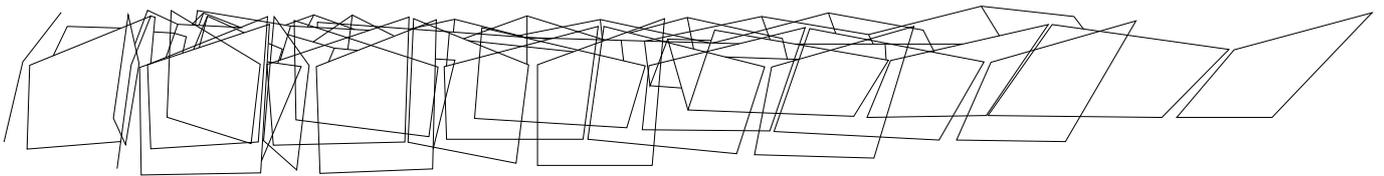
Abb 51  
Präsentation des Großversuchs in Stallhofen





13

# Prototyp - Auswertung



### 13.1 Einleitung

Der automatisiert verfahrenbare Prototyp ermöglichte zum einen die Durchführung unterschiedlicher Versuchsreihen und gab zum anderen auch Aufschluss über die Funktionalität der eingesetzten Bauteile. Daraus resultierend konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich dem allgemeinen Versuchsaufbau und der faltstruktur erlangt werden.

Erstmals war es möglich Erfahrungen über den motorisierten Antrieb, der dazu benötigten Steuerungstechnik und der anzuwendenden Geschwindigkeit mit der das Segel ein- und ausgefahren wird zu

sammeln. Hierbei überraschte die Komplexität der notwendigen Bauteile, um die Funktionalität eines Dauerbetriebs zu gewährleisten.

Mit dem Ziel, eine möglichst harmonische Faltbewegung zu erreichen, wurden die Ergebnisse mit jenen der digitalen Simulation überlagert und verglichen. Auch konnten genaue Untersuchungen bezüglich der Reibungswiderstände in den Gelenken oder an den Seilrollen durchgeführt werden. In Dauertestläufen wurden die Bauteile hinsichtlich einer zu erwartenden Materialermüdung analysiert.

Obwohl noch weitere Entwicklungen des Prototyps erforderlich sind, um das falt-

verhalten zu optimieren, konnte die grundlegende Funktionalität der entwickelten komprimierbaren Überdachung bestätigt werden. Weiterführend gilt es, die gewonnenen Erkenntnisse in die Überarbeitung beziehungsweise Weiterentwicklung des allgemeinen Versuchsaufbaus wie auch der faltstruktur einfließen zu lassen. In Zusammenarbeit mit Vito Acconci kann nun auch mit Gestaltung und Entwicklung der finalen Materialitäten sowie den damit verbundenen Detaillösungen begonnen werden.

## Allgemeiner Versuchsaufbau Auswertung

Antrieb	Tragseile	Führungsseile	Aufhängungen
<p>Abstimmung der Fahrstufen um eine optimale Faltbewegung zu erzielen.</p> <p>Ermittlung der optimalen Faltbewegung mittels digitaler Simulationen.</p>	<p>Die in der Werkplanung vorgegebene Geometrie der Tragseile wurde nicht exakt umgesetzt.</p> <p>Die Einhaltung der Geometrie ist notwendig um eine ausreichende Hängestabilität zu erzielen.</p> <p>Die geometrische Abweichung erhöht die erforderliche Länge der Aufhängungen.</p> <p>Je größer die geometrische Abweichung desto indirekter das Fahrverhalten.</p> <p>Der Seildurchhang beeinflusst das Faltverhalten. Ein Optimum kann mittels Versuchsreihen ermittelt werden.</p>	<p>Die in der Werkplanung vorgegebene Geometrie der Führungsseile wurde nicht exakt umgesetzt.</p> <p>Die Führungsseile verlaufen nicht entlang der Symmetrieachse der Faltstruktur.</p> <p>Die Führungsseile wurden waagrecht statt in der vorgegebenen Schräglage verbaut.</p> <p>Die geometrische Abweichung erhöht die erforderliche Länge der Aufhängungen.</p> <p>Je größer die geometrische Abweichung, desto indirekter das Fahrverhalten.</p>	<p>Der Widerstand der Seilrollen führt zu einer ruckartigen Faltbewegung.</p> <p>Die Gesamtlänge der Aufhängung an Trag- und Führungsseile muss optimiert werden. Die eingesetzten <i>langen</i> Aufhängungen können zwar auftretende Abweichungen kompensieren, führen jedoch zu einem indirekten Fahrverhalten.</p>

## 13.2 Allgemeiner Versuchsaufbau

Zu Beginn erfolgt die Auswertung des motorischen Antriebs. Entgegen aller zuvor durchgeführten Modellstudien wurde der Antrieb des Prototyps mit zwei Motoren umgesetzt. Dadurch wird der Faltprozess neben den V-förmig angeordneten Tragseilen auch mittels unterschiedlicher Motorgeschwindigkeit eingeleitet. Dabei kommt es zu einer Verminderung der an den Tragseilen auftretenden Belastungen in Querrichtung. Der Einsatz zweier Motoren erhöht zudem die Komplexität der erforderlichen Antriebssteuerung. Um eine harmonische Faltbewegung sicher-

zustellen, bedarf es einer gewissenhaften Abstimmung der Fahrstufen beziehungsweise der Motorgeschwindigkeit. Dabei muss eine Verformung der Faltstruktur oder Seilschlupf auf den Treibscheiben unterbunden werden.

Die Antriebssteuerung wurde in zahlreichen Testläufen justiert, es bleibt jedoch zu erwähnen, dass für eine optimale Faltbewegung die einzelnen Parameter, wie beispielsweise die unterschiedlichen Fahrstufen, aus einer entsprechenden digitalen Simulation des Prototypen auszulesen sind.

In einem weiteren Schritt wird die Stellung der Seile evaluiert. Der Öffnungswinkel

zwischen den Tragseilen steht in direktem Zusammenhang mit der Geometrie der Faltstruktur und muss zur Gewährleistung einer ausreichenden Hängestabilität eingehalten werden. Im Falle einer geometrischen Abweichung führen die erforderlichen Toleranzen zu einem indirekten Fahrverhalten. Da im Versuchsaufbau minimale Abweichungen zustande kamen, müssen diese an die Detailplanung angeglichen werden, um so das Faltverhalten zu verbessern.

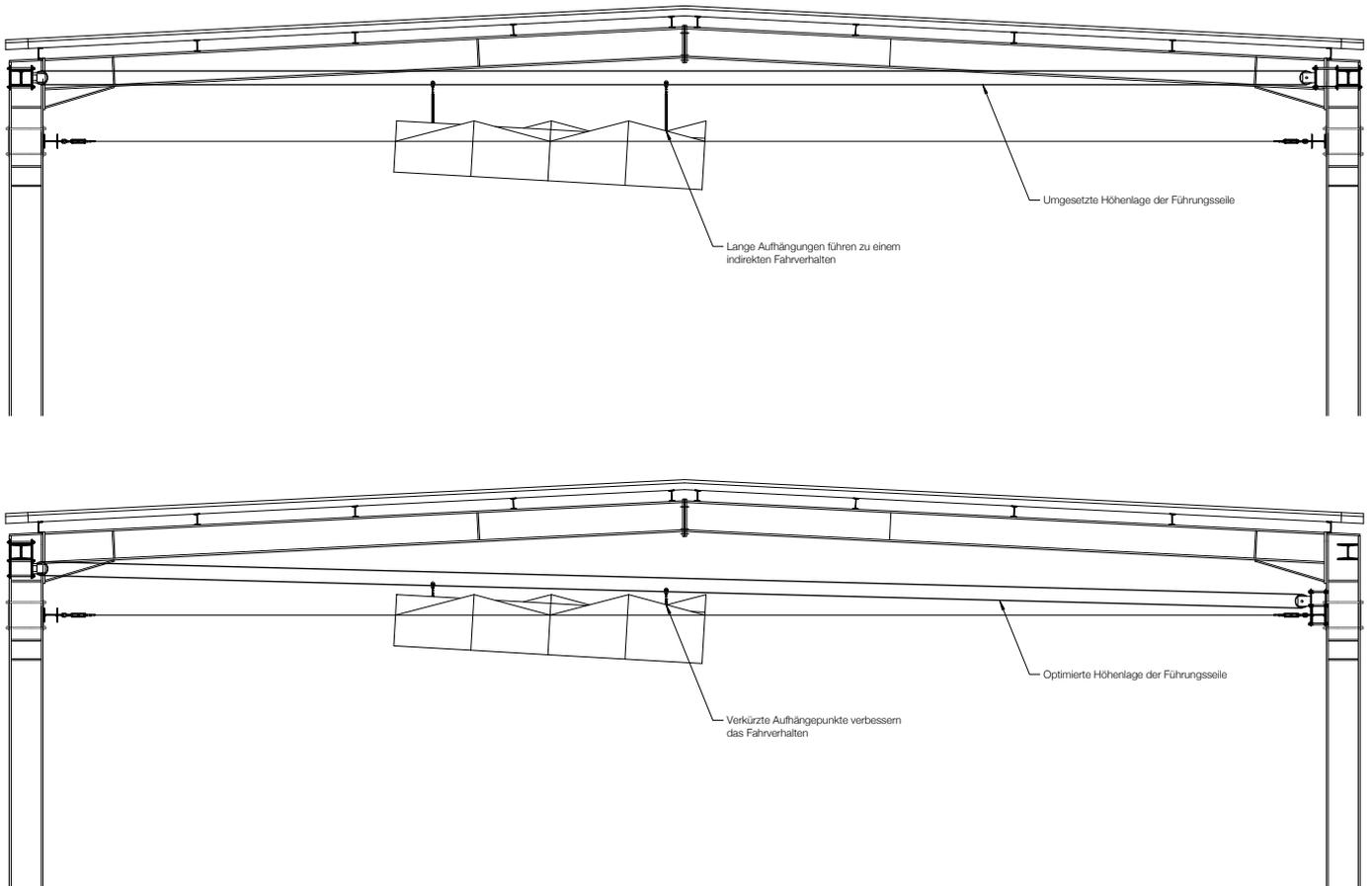
Neben dem Öffnungswinkel wird das Faltverhalten auch über den Seildurchhang der Tragseile beeinflusst. Eine Optimierung kann hierbei durch Versuchsreihen

Abb 53  
Vergleich Höhenlage der Führungsseile

16 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 30.

13. Prototyp - Auswertung  
13.2 Allgemeiner Versuchsaufbau

82



mit unterschiedlichen Vorspannkraften erfolgen.

Der Abstand zwischen faltstruktur und Antrieb wurde in der Detailplanung mittels Schräglage der Führungsseile optimiert. Bei nahezu gleichbleibenden Abständen zwischen Zugpunkten und Seilen kann eine möglichst direkte Ansteuerung erfolgen. Die im Großversuch umgesetzte Höhenlage [Abb 53] erwies sich als ungünstig, erforderte den Einbau längerer Verbindungsseile und führte zu einem indirekten faltverhalten. Die Lage der Führungsseile muss, der Detailplanung entsprechend, angeglichen werden. Die ermittelte, optimale Position der Füh-

rungsseile entlang der Symmetrieachse der faltstruktur lässt sich mit zwei Antriebsseilen nicht umsetzen. Die exzentrische Lage muss in allen folgenden digitalen Simulationen berücksichtigt werden. Die Gleitreibung der im Großversuch eingesetzten Seilrollen erwies sich als problematisch und führte zu einem ruckartigen Fahrverhalten. Der Austausch durch kugelgelagerte Seilrollen konnte dieses Problem beheben.

Eine Steigerung der Hängestabilität könnte mithilfe kugelgelagerter Tandemrollen erzielt werden, wobei dies in einem weiteren Schritt mittels Versuchsreihen evaluiert werden sollte.

Die verbauten Aufhängungen der Tragbeziehungsweise Führungsseile setzen sich aus Seilrollen, Karabinern sowie Verbindungsseilen zusammen. Das in den Versuchsreihen festgestellte, indirekte Fahrverhalten resultiert aus der großen Gesamtlänge der Aufhängungen und sollte für das Erzielen einer harmonischen faltbewegung daher reduziert werden. Dies sollte jedoch in Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile erfolgen, da die große Gesamtlänge auch viele der auftretenden Abweichungen kompensiert. Eine ideale Lösung wird in Versuchsreihen ermittelt.<sup>16</sup>



Abb 54  
Überlagerung mehrerer Faltzustände



## Faltstruktur Auswertung

Rahmen	Gelenke	Einbauteile	Membran
<p>Die einzelnen Faltwerksrahmen wurden laut Werkplanung hergestellt.</p> <p>Ein durchgeführter Dauertestlauf führte zu einer gebrochenen Schweissverbindung eines Rahmenelements.</p> <p>Möglicherweise führt die Faltbewegung zu noch nicht berücksichtigten Rahmenbeanspruchungen.</p>	<p>Die Regel-Scharniere wurden laut Werkplanung verbaut und wiesen nach der Testreihe keinerlei Verformungen auf.</p> <p>Die Spezial-Scharniere gewährleisteten eine uneingeschränkte Faltbewegung.</p> <p>Ein Beschränken der Winkel im entfalteten Zustand kann die Hängestabilität erhöhen.</p>	<p>Die zur Montage verwendeten Blindnietmutter ermöglichten eine rasche Montage und Demontage sämtlicher Einbauteile.</p> <p>Ösenschrauben und Ringmutter sollten, um ein Herausdrehen während der Faltbewegung zu verhindern, mit einem Drehwirbel ausgestattet werden.</p>	<p>Die vorgefertigten Membranflächen wurden von der Firma <i>Sattler AG</i> laut Werkplanung hergestellt.</p> <p>Mittels der aufgeschweissten Spannätze konnte die notwendige Vorspannung erzielt werden.</p> <p>Die zur Abdichtung der Faltkanten notwendigen Membranen werden in einem weiteren Schritt anhand digitaler Modelle entwickelt. [siehe Kapitel 13.4]</p>

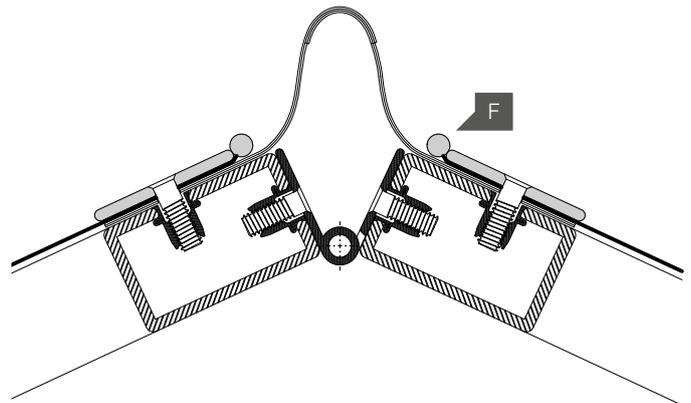
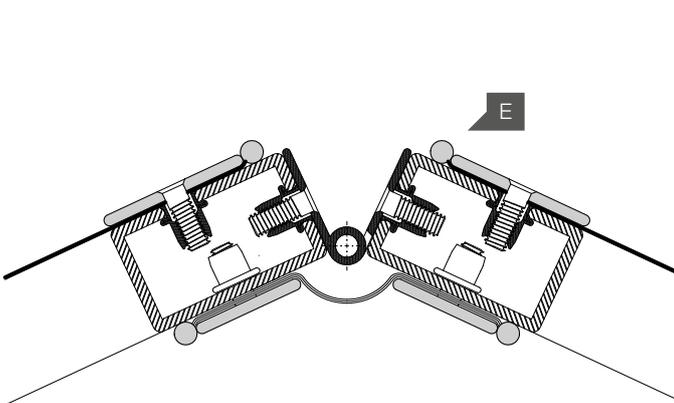
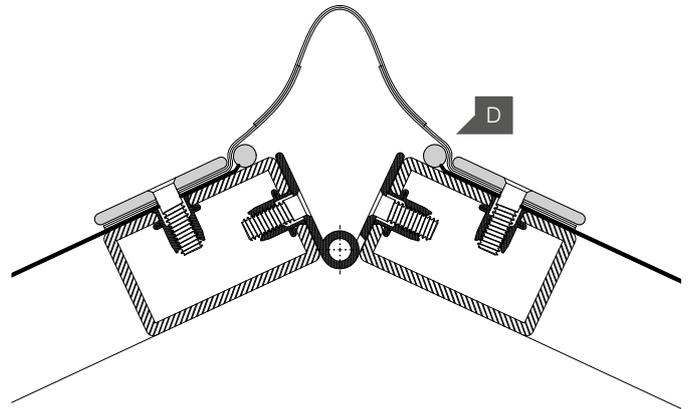
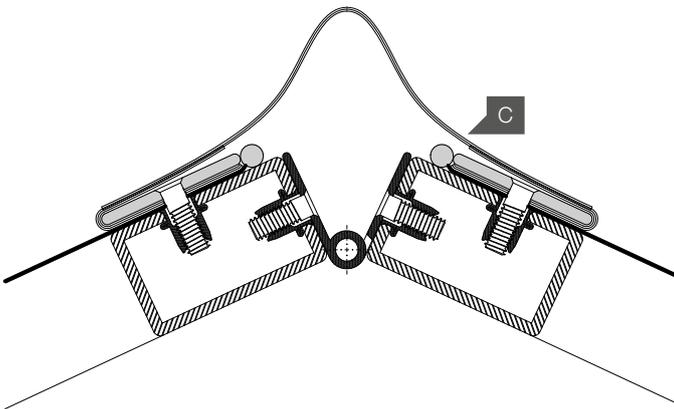
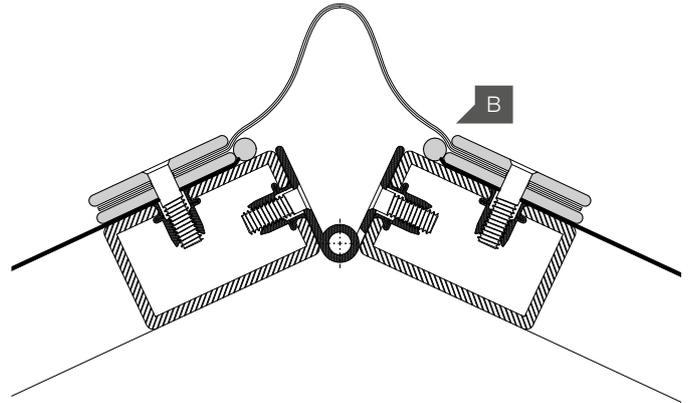
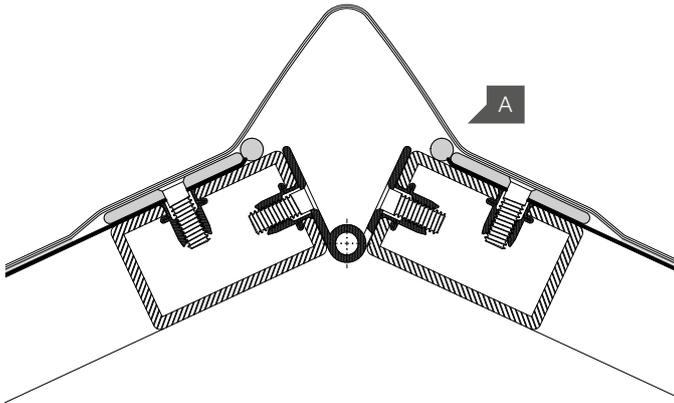
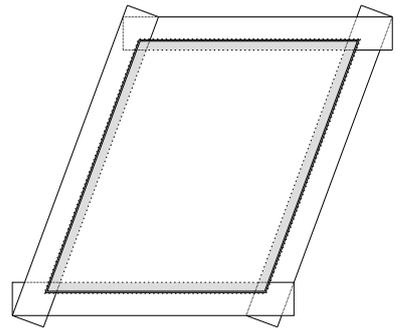
## 13.3 Faltstruktur

Für eine aussagekräftige Analyse der Faltstruktur wurde diese einem Dauertestlauf unterzogen. Dieser Test umfasste 300 aneinandergereihte Zyklen, bei welchen sich das Segel ein- und ausfaltete. Durch diese enorme Beanspruchung konnten die einzelnen Komponenten wie Rahmen, Scharniere und Membranen auf ihre Stabilität hin überprüft und mögliche Schwachstellen sichtbar gemacht werden. Im Zuge des Dauertestlaufs kam es zu einer gebrochenen Eckschweißverbindung. An dem beschädigten Rahmensegment war die Aufhängung für das Führungsseil

entgegen der Detailplanung nur einseitig befestigt worden, woraus eine zusätzliche Beanspruchung resultierte. Mögliche noch nicht erfasste Rahmenbeanspruchungen werden für das Versagen der Schweißverbindung jedoch nicht ausgeschlossen und daher weiterführend untersucht. Die eingesetzten Edelstahlscharniere erwiesen sich als geeignet und können nun hinsichtlich funktioneller und vor allem ästhetischer Aspekte weiterentwickelt werden. Das von der Firma *SFL* angefertigte Spezialscharnier konnte sich der Funktionalität eines Kugelgelenks annähern und die vollständige Faltbewegung gewährleisten.

Die Rahmenbespannung bestätigte sich während des Testlaufs als resistent gegenüber sämtlichen Kräfteinflüssen und es wurde kein Spannungsverlust, etwa durch Faltenwurf, an der Membran festgestellt. Während des Bauprozesses erwies sich auch die in Kapitel 11.3 angedachte, konstruktive Trennung der Bauteile *MembranRahmen* und *MembranDichtlatz* als ziel führend.<sup>17</sup>





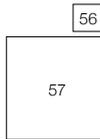


Abb 56  
Umlaufender Spannlatz der Membranflächen

Abb 57  
Montagevarianten Dichtlatz anhand Bergfalte

18 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 32.

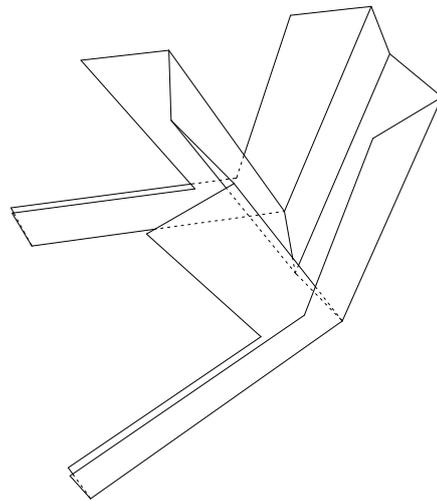
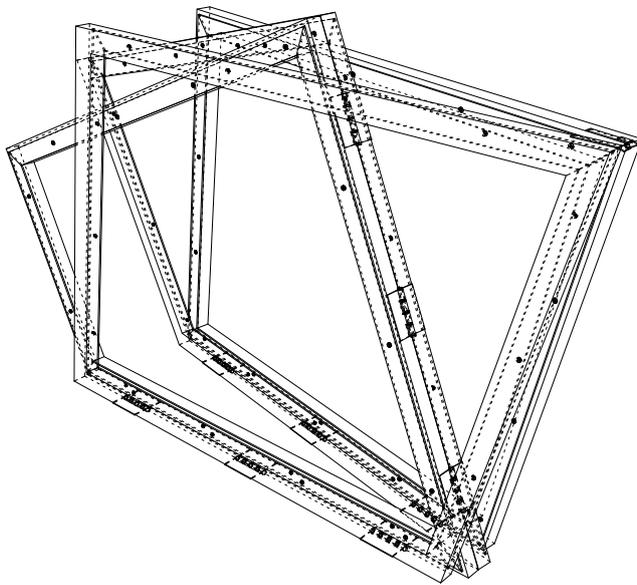
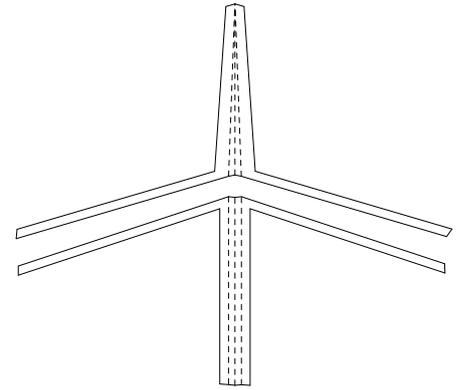
Montagevarianten Dichtlatz		
<p><b>Variante A</b></p> <p>Der Dichtlatz wird mit den Membranflächen verschweisst.</p> <p>Die Verschweissung erschwert den Austausch separater Membranflächen.</p> <p>Die für die Verschweissung notwendige Überlappung tritt innerhalb der Rahmenflächen in Erscheinung.</p>	<p><b>Variante B</b></p> <p>Der Dichtlatz wird mittels einer zweiten Klemmleiste angebracht.</p> <p>Separate Membranflächen können problemlos ausgetauscht werden.</p> <p>Die Montagevariante erfordert einen weiteren Bauteil.</p>	<p><b>Variante C</b></p> <p>Der Dichtlatz wird mit einem vorgefertigten Schweisslatz verklebt.</p> <p>Die Verschweissung erschwert den Austausch separater Membranflächen.</p> <p>Die Klemmleisten der Membranflächen treten nicht mehr in Erscheinung.</p>
<p><b>Variante D</b></p> <p>Der Dichtlatz wird mit einem vorgefertigten Schweisslatz verklebt.</p> <p>Die Verschweissung erschwert den Austausch separater Membranflächen.</p>	<p><b>Variante E</b></p> <p>Verschiebung der Dichtlatz-Ebene auf die Unterseite des Faltdachs.</p> <p>Separate Membranflächen können problemlos ausgetauscht werden.</p> <p>Verändert das bisherige Erscheinungsbild.</p> <p>Die Montagevariante erfordert einen weiteren Bauteil.</p>	<p><b>Variante F</b></p> <p>Der erforderliche Spannlatz wird nach Montage der Membranflächen zum Abdichten verwendet.</p> <p>Die Verschweissung erschwert den Austausch separater Membranflächen.</p>

### 13.4 Dichtlatz

Nach Bestätigung der kinematischen Funktionalität galt es in einem weiteren Schritt, mittels Abdichtung entlang der Faltachsen den angedachten, vollständigen Witterungsschutz zu gewährleisten. Hierfür wurden verschiedene Lösungsansätze in enger Zusammenarbeit mit der Firma *Sattler AG* ausgearbeitet, welche führend in der Herstellung von Spezialtextilien im Außenbereich sowie in der Planung und Realisierung von Membrankonstruktionen ist. Ursprünglich war vorgesehen, die für die Bespannung der Rahmen notwendigen

Spannlätze [Abb 56] miteinander zu verschweißen und dadurch eine homogene Abdichtung zu erzeugen. Zwar funktioniert diese Herangehensweise entlang der Faltachsen, jedoch kommt es an den Knotenpunkten zu einem Materialüberschuss. Es treffen acht Membranen aufeinander, welche es miteinander zu verschweißen gilt. [Variante F] Trotz einer professionellen Ausführung seitens der Firma *Sattler AG* wurde kein ästhetisch zufriedenstellendes Ergebnis erzielt. Zudem hat die Überlagerung der vielen Schichten im Knotenpunkt eine erhebliche Minderung der erforderlichen Flexibilität zur Folge. Infolgedessen wurden die

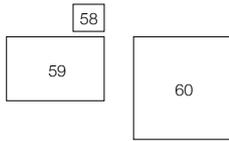
Spannlätze entfernt und die Abdichtung laut Variante B gesondert ausgeführt. Alle mit der Firma *Sattler AG* erarbeiteten Detaillösungen werden in der oben abgebildeten Tabelle näher beschrieben. Da man davon ausgehen kann, dass durch das ständige Knicken der Membran während des Faltprozesses das Material schneller ermüdet, ist es vorteilhaft, die Abdichtung im Bereich der Faltpfalten konstruktiv zu trennen. Mithilfe einer zweiten Klemmleiste wird der Dichtlatz an die bereits bespannten Rahmen montiert. Somit ist eine unkomplizierte Wartung gewährleistet und schadhafte Bauteile können einfach ersetzt werden.<sup>18</sup>



Aus der konstruktiven Trennung der Abdichtung erfolgte ein selbstständiger Bauteil, dessen Geometrie es mittels digitaler Methoden zu entwickeln galt. [Abb 59] Hierfür war es notwendig, ein dem Prototypen identes, digitales Modell zu erstellen. [Abb 60] Anhand des digitalen Gegenstücks war es möglich, eine Vielzahl unterschiedlicher Dichtlatz-Geometrien zu evaluieren, welche folglich, von der Firma *Sattler AG* angefertigt, am Großversuch überprüft werden. Die minimalen Dehnungseigenschaften der verwendeten Membran machten eine exakte Formfindung der Dichtlatzgeometrie unumgänglich. Etwaige Abweichungen

im Sinne eines Materialdefizites könnten beispielsweise zu einer mechanischen Beschädigung führen. Bei einem Materialüberschuss hingegen entstehen unnötige Falten, welche Wasseranstaungen und eine dementsprechende Gewichtszunahme verursachen. Ein möglicher Lösungsansatz wäre hier, die Membranen mit Überdruckventilen zu versehen, um diese im Notfall entwässern zu können. Neben der Passgenauigkeit spielt auch das Verhalten während des Faltvorganges eine große Rolle. Obwohl das ausgewählte Textil 100.000 mal beschädigungsfrei geknickt werden kann, ist die Ausbildung einer kontrollierten Faltung im Sinne des

Bewegungsablaufes und der Materialermüdung förderlich. Gezielte Nähte oder eine zweite, partiell aufgetragene Membranschicht können die Lage der Faltkante bestimmen. Diesen Überlegungen zufolge ergab sich ein Zuschnittplan zur Erzeugung des Dichtlatzes. [Abb 58] Das entwickelte Schnittmuster wird an dem Prototyp in enger Zusammenarbeit mit der Firma *Sattler AG* auf seine Nutzbarkeit hin überprüft.<sup>19</sup>



**Abb 58**  
Abwicklung der zu überprüfenden Dichtlatz Geometrie

**Abb 59**  
Axonometrie des digitalen Modells

**Abb 60**  
Visualisierung des digitalen Modells

19 Vgl. Hansemann/Peters/Schmid 2015, 32.

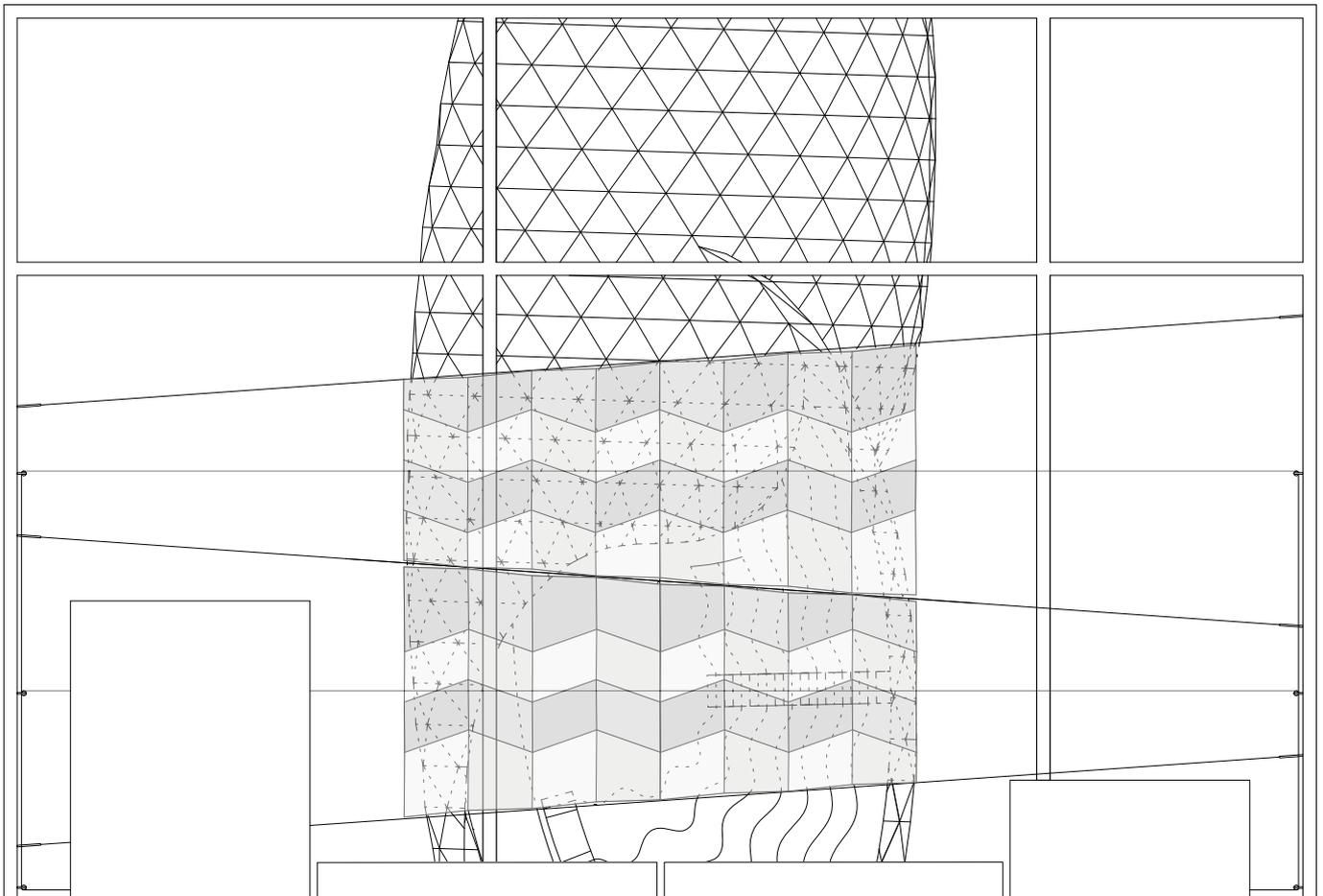
13. Prototyp - Auswertung  
13.4 Dichtlatz





14

Ausblick



#### 14.1 Einleitung

Nach der positiven Auswertung des Prototyps galt es nun, die gewonnenen Erkenntnisse der Planung des konkreten Faltdachtes zuzuführen und die finale Materialität und Gestaltung zu entwickeln. Als wesentlichste Parameter galten sowohl die Eingliederung in den städtebaulichen Kontext als auch die ästhetische Ausformulierung, welche nun in Zusammenarbeit mit Vito Acconci konzipiert werden sollten.

Durch einen weiteren Workshop mit Vito Acconci im Juni 2015 konnte evaluiert werden, inwiefern sich das nun *baubare*

*folding canopy* mit den anfänglichen Entwurfsskizzen deckt. Im Zuge dieses Workshops konnte Vito Acconci die reale Faltbewegung und die atmosphärische Wirkung anhand des Versuchsmodells erstmals begutachten.

Im Auftrag der Stadt Graz konnte in Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Georg Hansemann ein Imagefilm sowie ein motorisiertes Präsentationsmodell im Maßstab 1:10 realisiert werden. Das Modell umfasst neben zwei am Seil geführten und verfahrbaren Faltselgeln eine automatisierte Motorsteuerung, welche mittels Schrittmotoren und der Physical Computing Plattform *Arduino* umgesetzt werden

konnte. Beide Faltselgel setzen sich aus Plexiglas-Rahmen zusammen, welche per Lasercutter zugeschnitten und mit Polycarbonatfolien bespannt werden. Im ausgefalteten Zustand besitzen sie jeweils die Abmessungen von etwa zwei Quadratmetern. Die Aufhängung der Segel wurde für eine Präsentation im *Designforum Graz* geplant, wobei diese vertikal entlang der Fensterfronten verläuft. [Abb 61]

Der Imagefilm dokumentiert den Projektverlauf und beantwortet etwa Fragen bezüglich des Konzeptes, der Qualität des Systems sowie einer möglichen Realisierbarkeit.

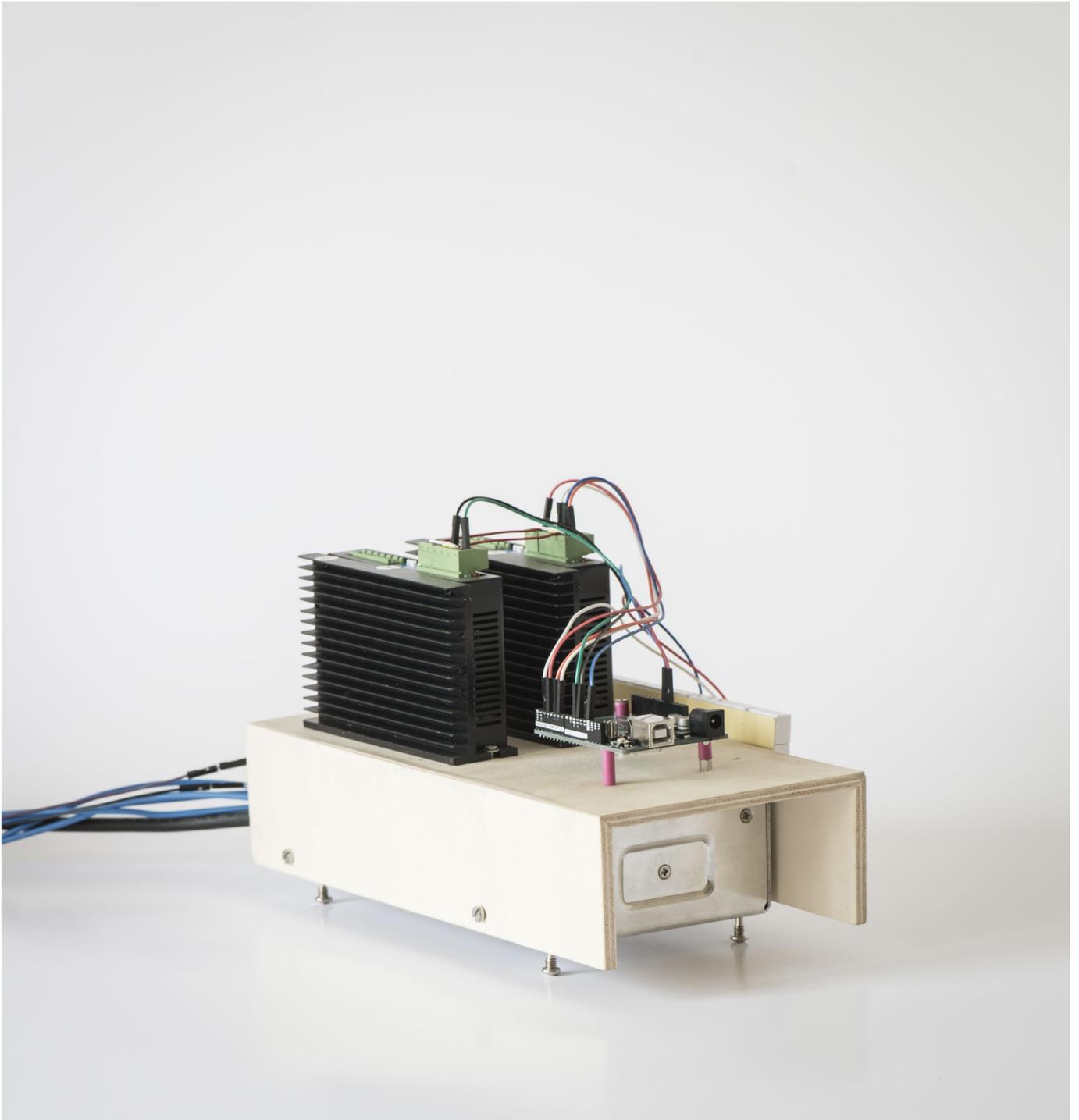


62

63

Abb 62  
Automatisierter Antrieb mittels Schrittmotoren

Abb 63  
Motorsteuerung mittels Motortreiber und *Arduino Uno*





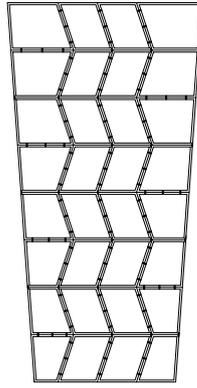
64

65

Abb 64  
Detailfoto Aufhängung am Tragseil

Abb 65  
Detailfoto Knotenpunkt innerhalb der Falstruktur





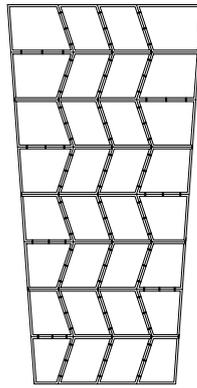
66

67

Abb 66  
Präsentationsmodell im kompaktierten Zustand

Abb 67  
Präsentationsmodell im kompaktierten Zustand



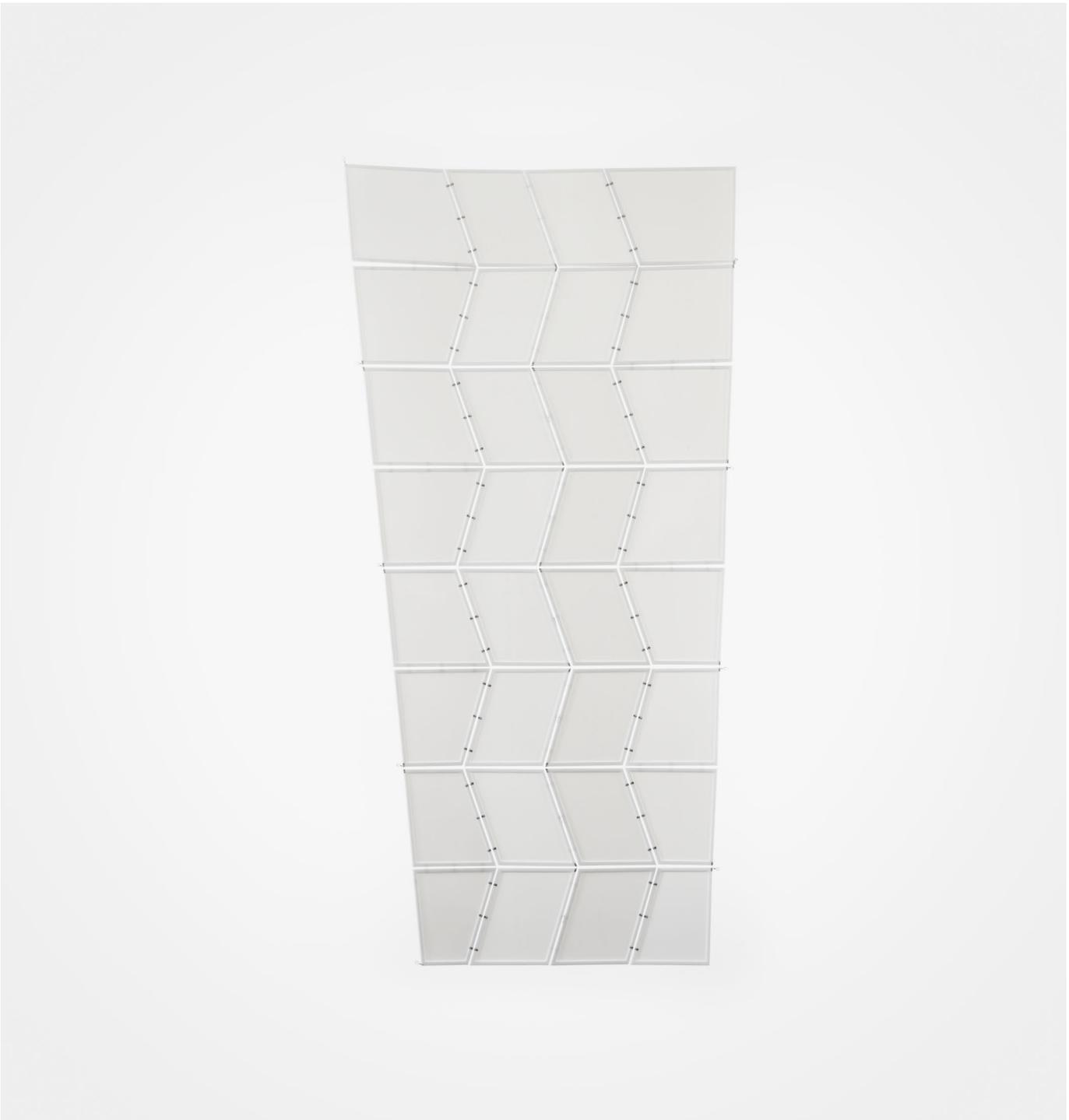


68

69

Abb 68  
Präsentationsmodell im entfalteten Zustand

Abb 69  
Präsentationsmodell im entfalteten Zustand





### 14.3 Workshop Acconci 2

Der Fokus des zweiten Workshops lag in der gestalterischen Ausformulierung des entwickelten Mechanismus. Das in Abbildung 69 ersichtliche Modell zeigt die gestalterische Vielfalt in Form eines Beitrages vom *Institut für Architektur und Medien* der TUGraz, welches auf der in Kapitel 9.2 beschriebenen zentrischen Gelenkanordnung basiert.

Nach intensiven Überlegungen fiel die Entscheidung, das in der Umsetzung des Prototyps angewandte System beizubehalten und gemäß ästhetischer Anforderungen weiterzuentwickeln.

In einem nächsten Schritt wurde die geradlinige, trapezförmige Randgeometrie überarbeitet und das dem Faltsystem *Miura-Ori* innewohnende Prinzip des *Zick-Zack* forciert. Vito Acconci wollte durch diese neue Kontur nicht nur die Thematik der Welle, sondern auch die damit verbundene räumliche Ausbreitung der Schwingung aufgreifen, und diese in weiterer Folge an der neuen Überdachung erkennbar machen.

Weiterführend erforderte die neu entwickelte Randgeometrie Modifikationen hinsichtlich der Funktionalität als Witterungsschutz. Ein möglicher Lösungsansatz ist hierbei das Versetzen der Segel

zueinander und einer damit verbundenen Erhöhung der Überlappungsfläche.

In Zusammenarbeit mit Stefan Peters kam es auch zu einer Überarbeitung der an beiden Ufern vorgesehenen, zur Einleitung der Seilkräfte notwendigen, Bauteile. Die Ergebnisse aus dem Workshop und den Diskussionen mit Vito Acconci, Clemens Luser und Stefan Peters werden in das Projekt eingearbeitet. Der nächste Workshop soll in New York stattfinden.

Abb 70  
Vito Acconci, Clemens Luser, Stefan Peters während des  
zweiten Workshops in Graz

Abb 71  
Zweiter Workshop im Architekturbüro HoG





Abb 72  
Visualisierung Blick vom Erich Edegger Steg



#### 14.4 Visualisierungen

Die der Papierfaltkunst innewohnenden Faltprinzipien konnten in einen architektonischen Maßstab übertragen werden. Dies erwies sich als Herausforderung und bestätigte die Wichtigkeit analoger sowie digitaler Modelle.

Im Laufe des Projektes *folding canopy* konnte das interdisziplinäre Planungsteam rund um Vito Acconci stetig erweitert werden und ermöglichte als Höhepunkt die Realisierung eines der Analyse dienlichen Großversuches im Maßstab 1:2. Die Funktionalität der entwickelten Faltstruktur konnte bestätigt werden. Mit dem Start der Einarbeitung aller gesammelten Erfahrungen blicken wir nun der Möglichkeit eines realen Bauvorhabens erwartungsvoll entgegen.

Den Abschluss der vorliegenden Masterarbeit bilden Projektvisualisierungen. Die Murinselüberdachung wird dabei in verschiedenen Faltstadien dargestellt.



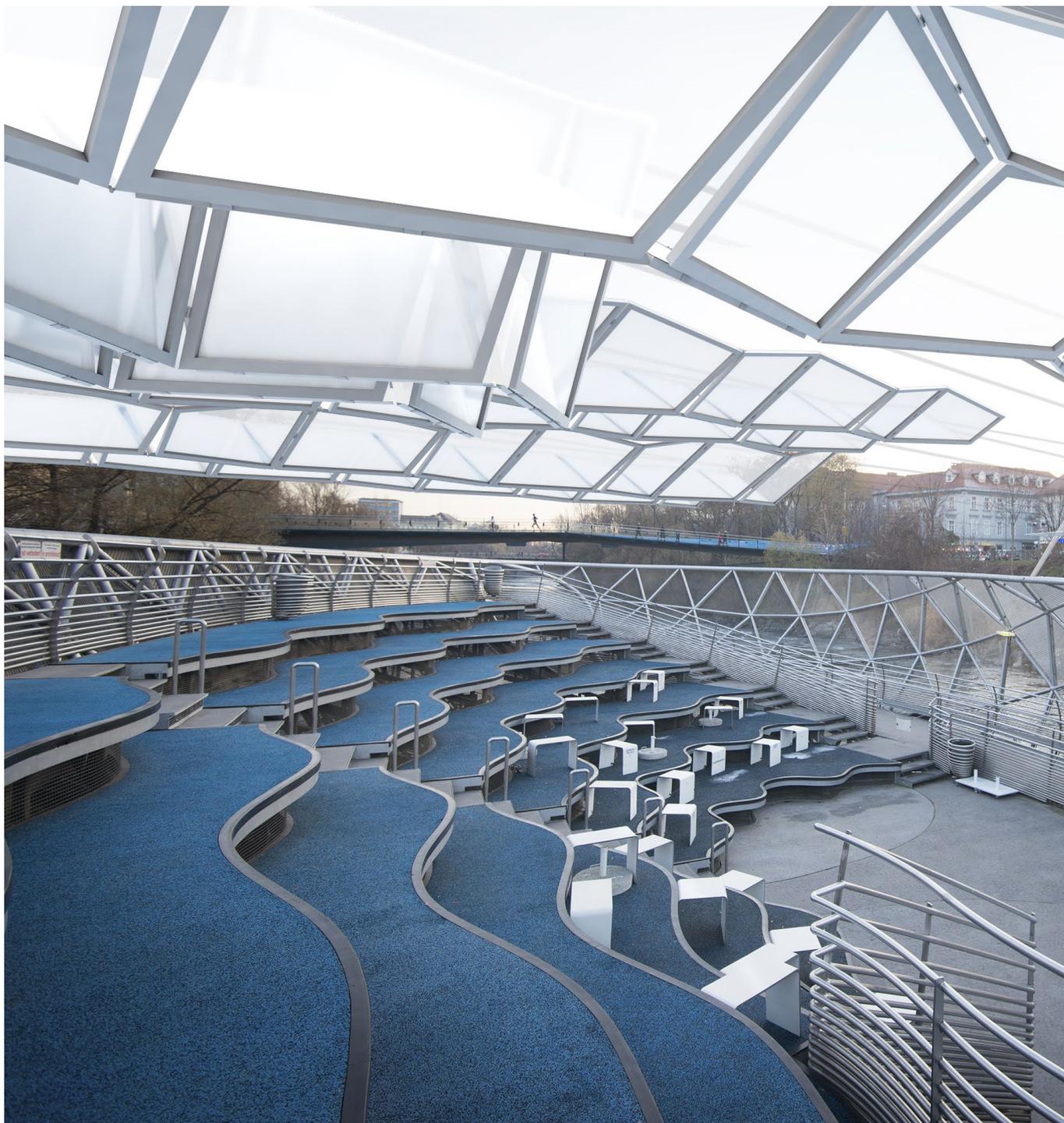
73

74

Abb 73  
Visualisierung Blick vom Erich Edegger Steg

Abb 74  
Visualisierung Blick vom Erich Edegger Steg





75

76

Abb 75  
Visualisierung Blick vom Amphitheater

Abb 76  
Visualisierung Blick vom Amphitheater

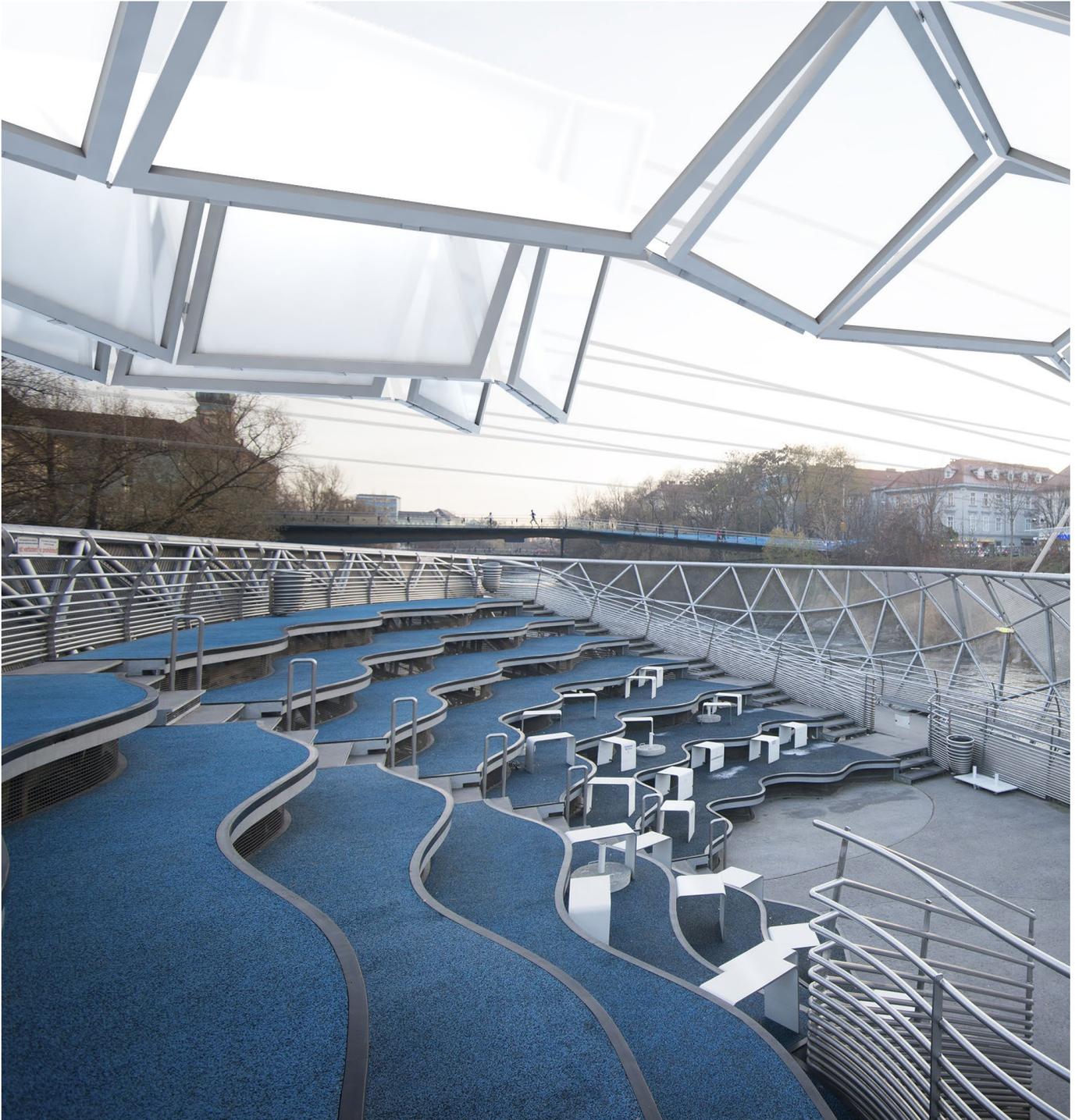
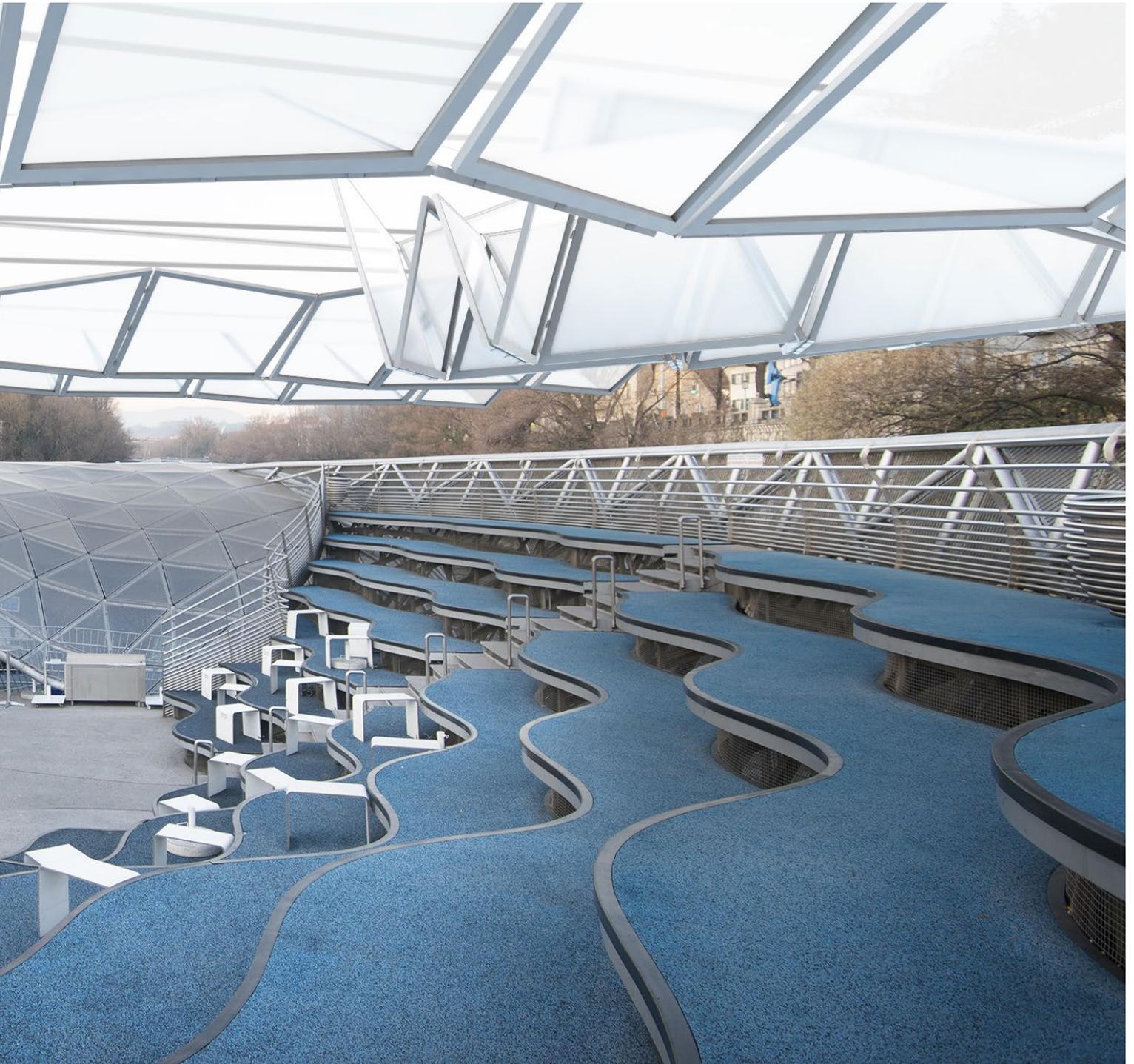




Abb 77  
Visualisierung Blick vom Amphitheater

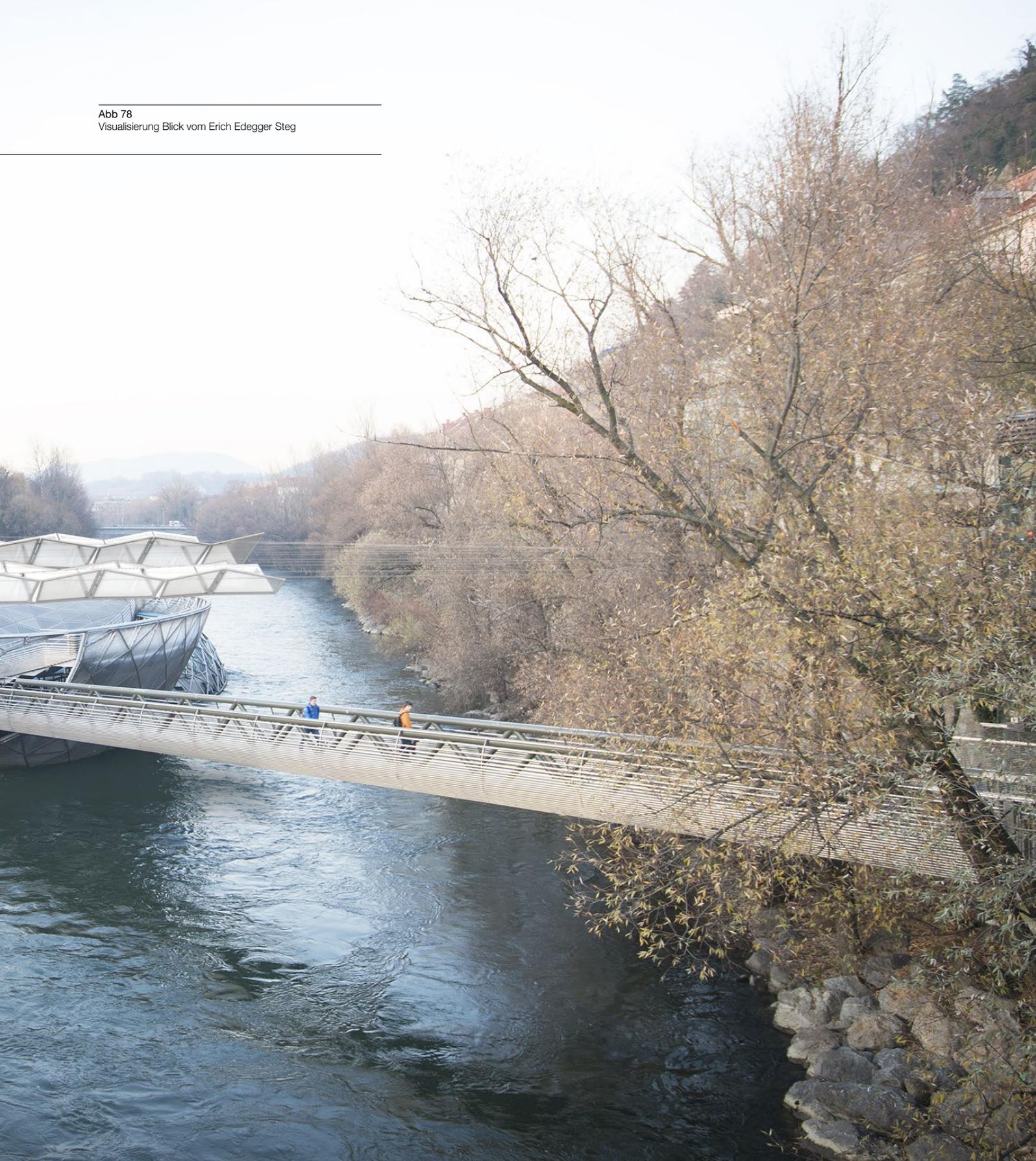




---

Abb 78  
Visualisierung Blick vom Erich Edegger Steg

---





X

Anhang

Literaturverzeichnis

- Hansemann, Georg/Peters, Stefan/Schmid, Robert: Folding Canopy, FFG Abschlussbericht, 2015
- Hansemann, Georg: Folding Canopy Teil 1. Am Seil geführte, wandelbare Faltdächer, Diplomarbeit, 2014
- Künstler, Arne/Trautz, Martin: Wandelbare Faltungen aus biegesteifen Faltelementen, in: Bautechnik 88 (2011), H. 2, 86-93
- Tachi, Tomohiro: Rigid-Foldable Thick Origami, in: Wang-Iverson/ Lang/ Yim: Origami5. Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics and Education, Boca Raton 2011, 253-263

Abbildungsverzeichnis

- Abb 1**  
„Entwickelte Fallstruktur aus *folding canopy Teil 1* Basierend auf dem Miura-Ori Faltmuster“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 2**  
„Systemschnitt aus *folding canopy Teil 1*“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 3**  
„Lageplan aus *folding canopy Teil 1*“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 4**  
„Positionierung nach dem ersten Workshop mit Vito Acconci Alle vier Segel vollständig entfaltet“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 5**  
„Lageplan nach dem ersten Workshop mit Vito Acconci Unterschiedliche Fallstadien“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 6**  
„Vito Acconci während des ersten Workshops in Graz Architekturbüro HoG - Juli 2014“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 7**  
„Klassifizierung nach Lage der Gelenke in Zentrisch, Exzentrisch und Exzentrisch Alternierend“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 8**  
„Prinzip der zentrischen Gelenkanordnung“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 9**  
„Modellstudie M 1:20 zentrische Gelenkanordnung“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 10**  
„Prinzip der exzentrischen Gelenkanordnung“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 11**  
„Modellstudie M 1:20 exzentrische Gelenkanordnung“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 12**  
„Prinzip der exzentrisch alternierenden Gelenkanordnung“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 13**  
„Modellstudie M 1:20 exzentrisch alternierende Gelenkanordnung“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 14**  
„Modellstudie M 1:20 Vergleich der Methoden“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 15**  
„Prinzip der exzentrisch alternierenden Gelenkanordnung“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 16**  
„Modellstudie M 1:20 entwickelte Methode“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 17**  
„Gegenüberstellung zweier möglicher Grundmechanismen“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 18**  
„Modell A M 1:10 zentrische Gelenkanordnung Minimaler Öffnungswinkel“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 19**  
„Modell B M 1:10 exzentrisch alternierende Gelenkanordnung Minimaler Öffnungswinkel“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 20**  
„Modell A M 1:10 zentrische Gelenkanordnung Maximaler Öffnungswinkel“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 21**  
„Modell B M 1:10 exzentrisch alternierende Gelenkanordnung Maximaler Öffnungswinkel“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 22**  
„Ausschnitt des Versuchmodells bezogen auf ein Segel der Murinselüberdachung“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 23**  
„Versuchsaufbau am Firmengelände der SFL in Stallhofen“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 24**  
„Grundriss und Schnitt allgemeiner Versuchsaufbau M 1:150“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 25**  
„Anschlussdetails an die bestehende Dachkonstruktion M 1:10“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 26**  
„Maßgebende Fallfläche und ausgewählter Profilquerschnitt“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 27**  
„Statisches Modell mit Lagerbedingungen“, Hansemann/Schmid 2014
- Abb 28**  
„Tragfähigkeitsbemessung u. Gebrauchstauglichkeitsnachweis“, Hansemann/Schmid 2014



Abbildungsverzeichnis

<p><b>Abb 29</b> „Axonometrie Prototyp im entfalteten Zustand“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 30</b> „Draufsicht Prototyp im entfalteten Zustand M 1:25“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 31</b> „Systemschnitt Übersicht der Detailpläne“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 32</b> „Detail A, Detail B, Detail C - minimaler Öffnungswinkel M 1:2“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 33</b> „Detail B, Detail C - maximaler Öffnungswinkel M 1:2“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 34</b> „Detail D - Anschluss an Führungsseil M 1:2“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 35</b> „Detail E - Spezialscharnier Draufsicht M 1:2“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 36</b> „Montage der ersten Fallwerksrahmen“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 37</b> „Aufhängepunkt am Tragseil und Spezialscharnier“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 38</b> „Aufhängepunkt am Führungsseil entlang der Symmetrieachse“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 39</b> Regelscharnier Edelstahl Bergfalte“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 40</b> „Erste Versuchsreihen ohne Membranbespannung“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 41</b> „Knotenpunkt innerhalb der Fallstruktur“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 42</b> „Bespannen der Membranflächen“, Hansemann/Schmid 2014</p>	<p><b>Abb 43</b> „Fallstruktur mit Membranbespannung“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 44</b> „Montage der Aluminium-Klemmleisten“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 45</b> „Erste Abdichtversuche entlang der Fallachsen“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 46</b> „Aufhängen der Fallstruktur in den allgemeinen Versuchsaufbau“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 47</b> „Seilrollen als Aufhängung an Tragseile“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 48; 50</b> „Fallstruktur im eingefalteten Zustand“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 49</b> „Fallstruktur im entfalteten Zustand“, Hansemann/Schmid 2014</p> <hr/> <p><b>Abb 51</b> „Präsentation des Großversuchs in Stallhofen“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 52</b> „Auswertung der Fallbewegung des Prototyps“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 53</b> „Vergleiche Höhenlage der Führungsseile“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 54</b> „Überlagerung mehrerer Falzzustände“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 55</b> „Gebrochene Eckschweißverbindung nach Dauertestlauf“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 56</b> „Umlaufender Spannlatz der Membranflächen“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 57</b> „Montagevarianten Dichtlatz anhand Bergfalte“, Hansemann/Schmid 2015</p>	<p><b>Abb 58</b> „Abwicklung der zu überprüfenden Dichtlatz Geometrie“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 59</b> „Axonometrie des digitalen Modells“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 60</b> „Visualisierung des digitalen Modells“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 61</b> „Geplanter Aufbau des Präsentationsmodells im Designforum Graz“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 62</b> „Automatisierter Antrieb mittels Schrittmotoren“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 63</b> „Motorsteuerung mittels Motortreiber und Arduino Uno“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 64</b> „Detailfoto Aufhängung am Tragseil“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 65</b> „Detailfoto Knotenpunkt innerhalb der Fallstruktur“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 66-67</b> „Präsentationsmodell im kompaktierten Zustand“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 68-69</b> „Präsentationsmodell im entfalteten Zustand“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 70</b> „Vito Acconci, Clemens Luser, Stefan Peters während des zweiten Workshops in Graz“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 71</b> „Zweiter Workshop im Architekturbüro HoG“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 72-74; 78</b> „Visualisierung Blick vom Erich Edegger Steg“, Hansemann/Schmid 2015</p> <hr/> <p><b>Abb 75-77</b> „Visualisierung Blick vom Amphitheater“, Hansemann/Schmid 2015</p>
--	--	--



Danke

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während der Verfassung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters, dessen intensive Betreuung und konstruktive Kritik einen wertvollen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Danke an das Architekturbüro *HoG*, im Speziellen Dipl.-Ing. Clemens Luser, für die unterstützende Begleitung während der gesamten Masterarbeit.

Danke an das *Institut für Tragwerksentwurf ITE* der *TUGraz*, dessen Räumlichkeiten und Ausstattung mir jederzeit zur Verfügung standen.

Danke an die Firmen *SFL Technologies GmbH* und *Sattler AG*, ohne deren Unterstützung eine Umsetzung des Großversuchs nicht möglich gewesen wäre.

Danke an das *Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik* der *TUGraz*. Ihre Unterstützung ermöglichte die Umsetzung der Antriebs- und Steuerungstechnik des Präsentationsmodells.

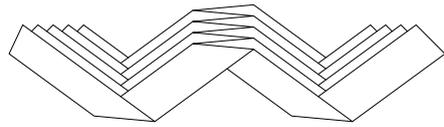
Ein liebevolles Danke an Eva für ihr Verständnis, ihre Mithilfe und im Besonderen für ihre Geduld.

Ein herzliches Danke an meine gesamte Familie, im Besonderen an meine Eltern Rosemarie und Raimund, die mich während der Studienzeit stets bestärkten.

Danke an Georg Hansemann für die konstruktive Zusammenarbeit und intensive Freundschaft.

Danke an Gernot, Sara, Joshua und Felix, sowie dem Architekturzeichensaal *AZnull*.





folding  
canopy

**ACCONCI**STUDIO

HoG  
architektur



**SFLA**  
technologies

**SATTLER** #  
Building together

**TU**  
Graz

