

# 02

Hyperkubisches Glas





**Hyperkubisches Glas**  
Schriftenreihe Tragkonstruktion | Lehre 02

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnd.dnd.de> abrufbar.

## Impressum

Herausgeber:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thorsten Weimar  
Lehrstuhl für Tragkonstruktion  
Universität Siegen  
57068 Siegen

Autoren  
M.Sc. Sebastián Andrés López  
Dr.-Ing. Martino Peña Fernandez Serrano  
M.Sc. Henrik Reißaus  
Dipl.-Ing. Katja Wirfler, Architektin

Druck und Bindung  
UniPrint, Universität Siegen

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier.

Siegen 2023:  
universi - Universitätsverlag Siegen  
[www.uni-siegen.de/universi](http://www.uni-siegen.de/universi)

**ISBN 978-3-96182-137-2**

Diese Publikation erscheint unter der  
Creative Common Lizenz CC-BY-SA



## Inhalt

Vorwort	7
<b>1. Hyperkubisches Glas</b>	<b>9</b>
1.1. Historischer Hintergrund	9
1.1.1. Vierte Dimension in Kunst und Architektur	9
1.1.2. Emilio Pérez Piñero: Architekt und Konstrukteur	12
1.1.3. Salvador Dalí's »Vidriera Hipercúbica«	12
1.1.4. Gebaute Prototypen	13
<b>2. Sommersemester 2020</b>	<b>18</b>
2.1. Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke«	18
2.1.1. Ausgangslage	18
2.1.2. Arbeitsprozess	21
2.2. Lehrstuhlinterne Nacharbeit	34
2.2.1. Analyse Arbeitsmodell 01	35
2.2.2. Material, Modellierung und Belastung	39
2.2.3. Meilenstein 01. Vertikale oder horizontale Lagerung	44
2.2.4. Meilenstein 02. Optimierung: Material, Querschnitt, Lagerung	47
2.2.5. Meilenstein 03. Entwicklung der Knotenpunkte	50
2.2.6. Meilenstein 04. Pantografisches System	54
2.2.7. Meilenstein 05. Abstandhalter und Glastafeln	56
2.2.8. Zusammenfassung	57
<b>3. Sommersemester 2021</b>	<b>59</b>
3.1. Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke«	59
3.1.1. Ausgangslage	59
3.1.2. Arbeitsprozess	64
3.2. Lehrstuhlinterne Nacharbeit	70
3.2.1. Analyse Arbeitsmodell 02	70
3.2.2. Meilenstein 06. Beteiligung der Metallwerkstatt	73

<b>4.</b>	<b>Wintersemester 2021</b>	<b>74</b>
4.1.	Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke«	74
4.1.1.	Ausgangslage	74
4.1.2.	Arbeitsprozess	74
4.2.	Lehrstuhlinterne Nacharbeit	84
<b>5.</b>	<b>»Hyperkubisches Glas« auf der Glasstec 2022</b>	<b>96</b>
<b>6.</b>	<b>Literatur</b>	<b>100</b>
6.1.	Bücher und Aufsätze	100
6.2.	Normen und Richtlinien	100
6.3.	Datenblätter und Patente	101
6.4.	Internet	102

Architektur realisiert sich in der Umwelt durch die bauliche Umsetzung von Bauwerken, die üblicherweise ein unbewegtes Objekt als Immobilie darstellen. Die ingenieurmäßige Betrachtung dieser Bauwerke im Rahmen einer Bemessung für die einzelnen Bauteile bezieht sich daher hauptsächlich auf die Statik als ein Teilgebiet der Mechanik. An dem unbewegten Objekt befinden sich alle Kräfte im Gleichgewicht. Das statische Gesamtsystem der einzelnen Bauteile wird im Bauwesen als Tragwerk bezeichnet und gewährleistet maßgeblich die Standsicherheit des Bauwerks. Diese Tragwerke können in Linientragwerke, auch als Stabtragwerke bezeichnet, und in Flächentragwerke eingeteilt werden.

Linientragwerke bestehen aus einzelnen oder mehreren Bauteilen als normalkraftbeanspruchte Stäbe, biegebeanspruchte Träger oder einer Addition daraus. Neben den klassischen Anwendungen von diesen Linientragwerken als ebene Konstruktionen, wie beispielsweise Fachwerke oder Rahmen, entwickeln sich im 20. Jahrhundert zunehmend auch räumliche Konstruktionen, wie beispielsweise Gitterschalen oder Seilnetze. Räumliche Konstruktionen eignen sich grundsätzlich auch als bewegte Objekte, die über die Kinetik, als ein weiteres Teilgebiet der Mechanik, beschrieben werden können. Dabei erfährt das Bauwerk eine Änderung der Bewegung und wird um eine vierte Dimension ergänzt.

Der spanische Architekt Emilio Pérez Piñero entwickelt in den 1960er Jahren erfolgreich verschiedene unbewegte aber auch bewegte Objekte dieser räumlichen Konstruktionen als Linientragwerke, die in der internationalen Fachwelt eine hohe Anerkennung erfahren. 1971 erhält er daher von dem Künstler Salvador Dalí den Auftrag zum Entwurf eines faltbaren Systems aus Glastafeln, das als beweglicher Raumabschluss im Theater-Museum Dalí von Figueras vorgesehen ist. Ein Antrieb soll die räumliche Konstruktion zusammen- beziehungsweise entfalten. Die Konstruktion besteht aus einem retikulären System als Unterkonstruktion und einem pantografischen System für die Bewegung der Glastafeln.

Die Umsetzung der als »Vidriera Hipercúbica« beziehungsweise »Hyperkubisches Glas« bezeichneten räumlichen Konstruktion erfolgt wegen eines tödlichen Unfalls von Emilio Pérez Piñero im Jahr 1972 bis heute nicht. Lediglich ein Modell wird im Theater-Museum Dalí ausgestellt. Das Prinzip dieses faltbaren Systems ist in zwei Patenten allgemein beschrieben, allerdings nicht spezifisch für das »Hyperkubische Glas«. Es können deshalb bisher keine eindeutigen Aussagen über die tatsächliche Funktion des faltbaren Systems erfolgen. Dazu sind

weitere theoretische sowie umfangreiche experimentelle Untersuchungen an der räumlichen Konstruktion erforderlich.

Aus dieser Motivation entsteht im Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke« des Masterstudiengangs Architektur an der Universität Siegen eine Reinterpretation des »Hyperkubischen Glases«. Die Studierenden erfahren dabei den Zusammenhang von Kunst, Architektur, Konstruktion sowie Technik und erleben die gemeinsame Arbeit von Architekten und Ingenieuren. Das Wahlmodul wird geleitet von Dr.-Ing. Martino Peña Fernandez Serrano von der Universidad Politécnica de Cartagena als Lehrbeauftragter mit maßgeblicher Unterstützung von Dipl.-Ing. Katja Wirfler, M.Sc. Sebastián Andrés López und M.Sc. Henrik Reißaus als wissenschaftliche Mitarbeiter.

Die Inhalte sind im zweiten Band Lehre 02 – Hyperkubisches Glas der Schriftenreihe Tragkonstruktion dokumentiert und erläutert. In Kapitel 1 zu »Hyperkubisches Glas« wird die Entstehung der räumlichen Konstruktion durch den Architekten Emilio Pérez Piñero beschrieben. Die Kapitel 2 bis 4 mit »Sommersemester 2020«, »Sommersemester 2021« sowie »Wintersemester 2021« erläutern und fassen die verschiedenen Schritte in der Entwicklung des faltbaren Systems an der Universität Siegen, insbesondere die technologische Transformation, zusammen. Kapitel 5 enthält die Präsentation des finalen Prototyps vom »Hyperkubischen Glas« auf der Glasstec 2022 in Düsseldorf.

Die erfolgreiche Umsetzung des »Hyperkubisches Glases« gelingt nur mit der engagierten Unterstützung von vielen weiteren Personen. Daher möchte ich mich bei den beteiligten Studierenden aus dem Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke« und Stephanie Riemer als studentische Hilfskraft, sowie bei Stefan Zamponi, Malte Mühlnickel und Tobias Schönemann aus den Werkstätten am Campus Hölderlinstraße herzlich bedanken. KRD Coatings GmbH aus Bardowick danke ich für die zur Verfügung gestellten Glas-Kunststoff-Verbundtafeln. Ein ganz besonderer Dank geht an das Department Architektur der Universität Siegen für die finanzielle Unterstützung des auf der Glasstec 2022 präsentierten Prototyps.

Thorsten Weimar  
Siegen im April 2023

# 1. Hyperkubisches Glas

## 1.1. Historischer Hintergrund

### 1.1.1. Vierte Dimension in Kunst und Architektur

Anfang des 20. Jahrhunderts stellt Albert Einstein mit seiner »Speziellen Relativitätstheorie« die wissenschaftliche Welt auf den Kopf.<sup>1</sup> Demnach gibt es keine absolute Zeit und keinen absoluten Raum. Beides ist vom Bewegungszustand des Betrachters abhängig. Die Zeit wird zu einer weiteren räumlichen Dimension. Seither versteht man in der Physik unter der vierten Dimension für gewöhnlich die Zeit.

Aber Albert Einstein ist nicht der Einzige, der sich mit einer vierten Dimension beschäftigt. Schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts wird in populärwissenschaftlichen Schriften über die eventuelle Existenz einer vierten räumlichen Dimension spekuliert. Künstler, Schriftsteller und Musiker lassen sich von dem Gedanken inspirieren. In Frankreich entsteht zu Beginn des 20. Jahrhunderts der Kubismus. Ihre Protagonisten, die sogenannte Pariser Schule, darunter Pablo Picasso, Jean Metzinger, Max Jacob, Marcel Duchamp, aber auch der Mathematiker Maurice Princet, beziehen sich auf das Konzept der »Vierten Dimension« von Henri Poincaré, auf dessen Arbeiten auch Albert Einstein in seiner ersten Veröffentlichung zur speziellen Relativitätstheorie aufbaut.<sup>2</sup>

Der Glaube an die Existenz einer höheren Realität jenseits der drei unmittelbar sensorisch wahrnehmbaren Dimensionen beflügelt die Kunst und Architektur des 20. Jahrhunderts. Theo van Doesburg, Mitbegründer der holländischen Künstlervereinigung »De Stijl«, versucht das Konzept der Raum-Zeit in die Architektur zu übertragen. Sein Gemälde »Konstruktion der Raum-Zeit II« von 1929 zeigt eindrücklich, in welcher Intensität sich der Künstler und Architekt im frühen 20. Jahrhundert mit dem Raum-Zeit Kontinuum auseinandersetzt.<sup>3</sup> In Tschechien und insbesondere in Prag führt die intensive Auseinandersetzung mit der Theorie des Kubismus zu einer eigenen Stilrichtung, der kubistischen Architektur. Zu den wichtigsten Vertretern gehören die Architekten Pavel Janák, Josef Gočár, Vladislav Hofman, Jirí Kroha, Josef Chochol und Emil Králíček.

1 Einstein 1905.

2 o.V. 2023 a.

3 Henderson 2013.

In der Malerei experimentieren Kubisten, Dadaisten und Surrealisten mit der Darstellung einer 4. Dimension. Von besonderem Interesse an dieser Stelle ist das Gemälde »Corpus Hypercubus« von Salvador Dalí aus dem Jahr 1954.

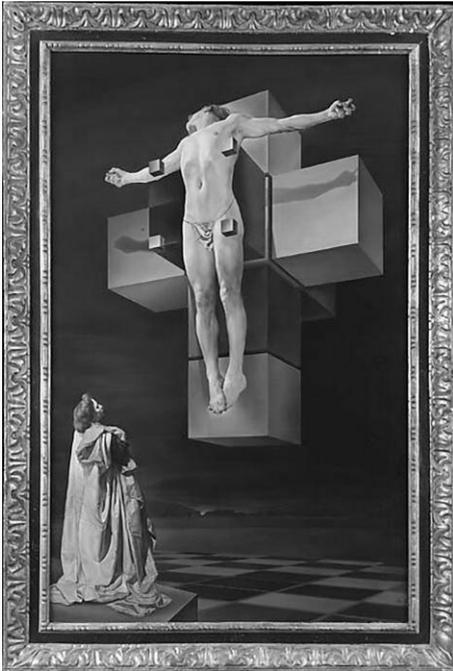


Bild 1  
»Corpus Hypercubus« Salvador Dalí, 1954.  
Bildquelle: Metmuseum.org. © 2023 Artists  
Rights Society (ARS), New York.

Das auf dem Gemälde dargestellte Kruzifix besteht aus der dreidimensionalen Auffaltung eines Hyperkubus in vier Dimensionen. Salvador Dalí ersetzt dabei die zweidimensionalen Flächen eines Würfelnetzes durch dreidimensionale Kuben. Dem christlichen Motiv entsprechend nutzt er ein Würfelnetz als Grundlage, dessen Umriss ein Kreuz beschreibt, wie in Bild 2 dargestellt. Im Jahr 1971 beauftragt er den Architekten Emilio Pérez Piñero mit dem Entwurf eines faltbaren Raumabschlusses zwischen ehemaligem Bühnen- und Zuschauerraum für das Theater-Museum in Figueras. Die von Emilio Pérez Piñero entwickelte Konstruktion faltbarer Glastafeln nennt er »Vidriera Hipercúbica«. Das Haupttragwerk entspricht einem Kreuz, analog zu seinem Gemälde »Corpus Hypercubus«.

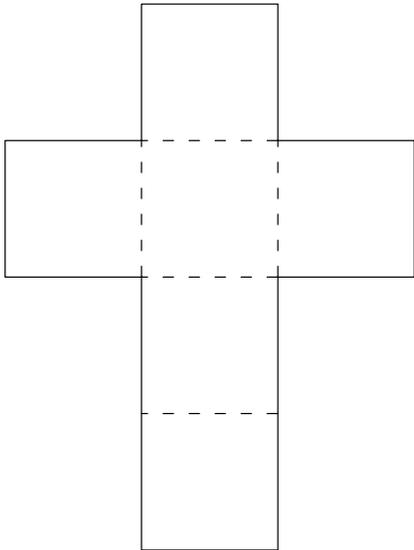


Bild 2  
Zeichnung eines von 11 Netzen des Würfels.

Noch direkter setzt sich die kinetische Kunst mit der vierten Dimension auseinander, indem sie die Bewegung als ästhetischen Bestandteil in das Kunstobjekt integriert. Zu ihren Protagonisten gehören unter anderem Marcel Duchamp, Man Ray, Alexander Calder, Victor Vasarely und Jean Tinguely. Die Ausstellung »Le Movement« in Paris 1955 gilt als wichtiger Moment für die kinetische Kunst und schon der Name macht die Relevanz der Bewegung in der Kunst deutlich. Victor Vasarely stellt hier seine ersten abstrakten Schwarz-Weiß-Stücke aus. Neben Werken von Marcel Duchamp und Alexander Calder werden auch Werke junger Künstler wie Jean Tinguely ausgestellt. Vier Jahre später wird die mobile, von einer Benzinpumpe angetriebene Zeichenmaschine Méta-Matic No. 17 von Jean Tinguely zur Sensation der »Biennale de Paris«.<sup>4</sup>

In der Architektur wird die Bewegung zu einem zentralen Thema der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Im Anschluss an den 10. und vorletzten Kongress der CIAM-Gruppe (Congrès Internationaux d'Architecture Moderne), das 1956 in Dubrovnik stattfindet, gründet sich die europäische Architektengruppe GEAM (Groupe d' Études d'Architecture Mobile) und formuliert den Wechsel und die Mobilität als grundlegende menschliche Bedürfnisse. Mit der Begründung, dass

wir uns zunehmend hin zu einer mobilen Gesellschaft entwickeln, halten sie traditionelle Wohnkonzepte für überholt und proklamieren stattdessen ein mobiles und anpassungsfähiges Bauen. Sie entwickeln in Entwürfen neue Wohnkonzepte, die von kleinen temporären Pavillons bis hin zu Megastrukturen reichen. Die Gruppe löst sich 1963 auf. Ihre Theorien und Entwürfe beeinflussen Architektengruppen wie die Groupe International d'Architecture Prospective (GIAP), Archigram oder Superstudio. Auch der spanische Architekt Emilio Pérez Piñero beschäftigt sich als einer der ersten Architekten mit der Bewegung in der Architektur. Sein Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung beweglicher Konstruktionen.

### 1.1.2. Emilio Pérez Piñero: Architekt und Konstrukteur

Emilio Pérez Piñero beginnt seine Karriere mit internationaler Bekanntheit schon als Student, als er 1961 in London den von der Union Internationale des Architectes (UIA) ausgeschriebenen Wettbewerb zu einem mobilen Theater gewinnt. Félix Candela und Richard Buckminster Fuller sind Teil der Jury. Ein Jahr später schließt Pérez Piñero sein Studium der Architektur ab. Einen Großteil seiner experimentellen Konstruktionen entwickelt er in der Kleinstadt Calasparra im Südosten von Spanien, weit abgelegen von den internationalen Forschungszentren.

Mit dem nach Mexiko ausgewanderten spanischen Architekten Félix Candela verbindet ihn eine enge Freundschaft und professionelle Zusammenarbeit. Durch ihn gelingt Pérez Piñero 1962 die Veröffentlichung seines ersten Projekts »Expandable Space Framing« in der amerikanischen Zeitschrift »Progressive Architecture«. Gemeinsam entwerfen beide Architekten mehrere Projekte, wie das Gewächshaus für die NASA, das auf dem Mond angesiedelt werden soll oder die als Antarctic I und II bekannten Projekte, die von der amerikanischen Marine in Auftrag gegeben werden, um die Antarktis mit transportablen Prototypen besiedeln zu können. Ein Autounfall auf der Rückfahrt von Figueras beendet 1972 abrupt die kreative Schaffensphase des außergewöhnlichen Konstrukteurs und Architekten. Im selben Jahr wird er von der UIA mit dem Aguste Perret-Preis post mortem ausgezeichnet.<sup>5</sup>

### 1.1.3. Salvador Dalí's »Vidriera Hipercúbica«

Im Jahr 1969 beauftragt Salvador Dalí den Architekten Emilio Pérez Piñero zunächst mit einem Entwurf einer gläsernen Kuppel für die ehemalige Bühne des

5 Peña 2022.

alten Stadttheaters von Figueras. Auf Initiative Salvador Dalís und unterstützt vom Bürgermeister der Stadt beschließt das spanische Kabinett den Wiederaufbau und den Umbau der Ruine hin zum Theater-Museum Dalí mit dem Ziel, die Werke Salvador Dalís dauerhaft und repräsentativ in dessen Geburtsstadt auszustellen. Emilio Pérez Piñero entwickelt eine geodätische Kuppel, die bis heute zur Zeichenhaftigkeit des Theater-Museums Dalí beiträgt.

Im Oktober 1971 folgt ein weiterer Auftrag für den Entwurf eines faltbaren Systems aus Glastafeln, das als beweglicher Raumabschluss zwischen der ehemaligen Bühne und dem geplanten Innenhof des Museums fungieren soll, den ehemaligen Zuschauertribünen. Die einzelnen Glastafeln will Dalí bemalen, so dass im komplett entfalteten Zustand das Motiv der »Santísima Trinidad« zu erkennen ist. Durch einen mechanischen Antrieb soll sich die Konstruktion kompakt zusammenfallen beziehungsweise zu einer gläsernen Bildfläche entfalten und durch den sich ändernden Zustand die ursprüngliche Kommunikation zwischen ehemaligen Bühnen- und Zuschauerbereich neu interpretieren.

Emilio Pérez Piñero entwickelt eine faltbare Glaskonstruktion, bestehend aus einer retikulären dreidimensionalen Metallstruktur als Unterkonstruktion und einem pantografischen System zur Artikulation der Faltbewegung der Glastafeln. Das Projekt wird jedoch nicht realisiert. Grund dafür ist neben zu hohen Kosten vor allem der frühe Tod des Architekten, der 1972 mit nur 36 Jahren durch einen Autounfall stirbt. Die ehemalige Bühnenöffnung mit einer lichten Breite von 10,35 m und einer Höhe von 14,80 m, für die die bewegte Rauminstallation gedacht.<sup>6</sup>

#### 1.1.4. Gebaute Prototypen

Emilio Pérez Piñero baut im Rahmen seines Auftrags von Salvador Dalí seinerzeit ein Modell der geplanten Konstruktion im Maßstab 1:3, um das Konstruktionsprinzip zu überprüfen und seinem Auftraggeber zu demonstrieren. Ein Foto von ihm zusammen mit Salvador Dalí und dem entfalteten Modell vor dem Eiffelturm schmückt 1972 die Titelseite der Zeitschrift »Arquitectura«.



Bild 3

Dalí (links) und Pérez Piñero (rechts) vor dem Prototyp des »Vidriera Hipercúbica« im Maßstab 1:3 vor dem Eiffelturm in Paris (© Ausschnitt aus dem Titelbild der Zeitschrift »Arquitectura«, 1972).

Für das »Vidriera Hipercúbica« entwickelt Emilio Pérez Piñero ein System aus faltbaren Glastafeln, das in entfaltetem Zustand eine ebene Glasfläche darstellt. Mehrere Glastafeln nahezu gleicher Größe sind über Scharniere miteinander verbunden, welche die Faltung in eine Richtung ermöglichen. Die Tafeln werden getragen von einem pantografischen System, das einerseits die Faltung der Glastafeln in eine zweite Richtung ermöglicht und gleichzeitig die Verbindung herstellt zur tragenden Basis, einer dreidimensionalen retikulären Struktur, die sich orthogonal in drei Richtungen bewegt, und die die Grundlage vieler beweglicher Konstruktionen des Architekten darstellt. Die Struktur setzt sich aus Grundmodulen zusammen, bestehend aus jeweils vier Stäben, die über einen zentralen Knoten in den Stabmitten miteinander verbunden sind. Durch die Verbindung mehrerer Grundmodule an den oberen und unteren Stabenden, entsteht ein faltbares dreidimensionales Gitter aus Stäben. Emilio Pérez Piñero lässt sich das System der dreidimensionalen faltbaren Struktur schon 1965 patentieren.<sup>7</sup> Das

7 Pérez Piñero 1965.

System der faltbaren Glastafeln, das er für das Vidriera Hipercúbica entwickelt, wird vier Jahre nach dem Tod des Architekten von dessen Witwe Belda Aroca patentiert.<sup>8</sup> Die Kombination der beiden Systeme ermöglicht eine gleichzeitige Faltung von Glastafeln und tragender Struktur im Sinne von Haut und Skelett, Fassade und Tragwerk. Die Patente stellen aus diesem Grund einen Höhe- und auch Endpunkt der Entwicklungen des außergewöhnlichen Architekten dar. Für das Modell, das sich heute im Dalí-Theater-Museum in Figueras befindet, setzt Emilio Pérez Piñero ein System aus 36 faltbaren Glastafeln auf die dreidimensionale retikuläre Struktur auf und befestigt die Konstruktion über fünf Lagerpunkte an ein stehendes Kreuz. Vier Stützknoten sind mit vier Kugellagern verschraubt, in denen sich eine motorgetriebene Schnecke dreht. Nur die Schraube im unteren Fuß des Kreuzes wird vom Motor angetrieben. Die Bewegung wird über ein im Kreuzkopf des Kreuzes befindliches Getriebe auf die anderen drei Lager übertragen. Wenn sich die Schrauben drehen, bewegen sich die vier Lager entlang der Arme zwischen zwei Endanschlägen.<sup>9</sup>

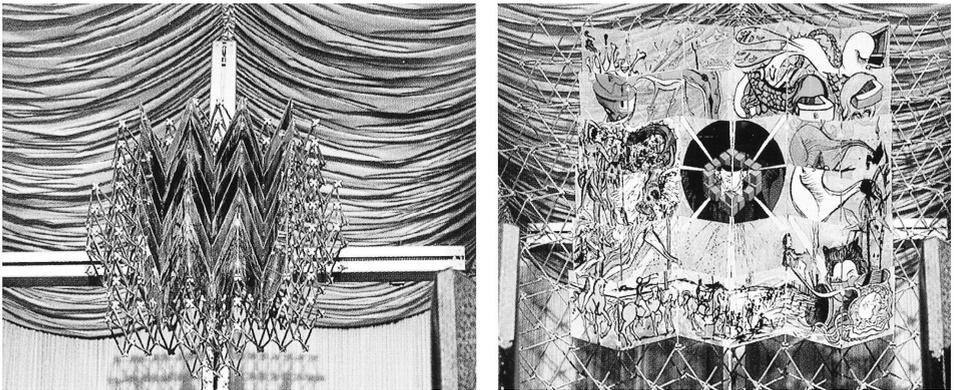


Bild 4

Prototyp des Hyperkubischen Glases im Dalí-Theater-Museum. Foto von 1971. © Jordi Puig.

8 Pérez Piñero 1976.

9 Peña 2022.

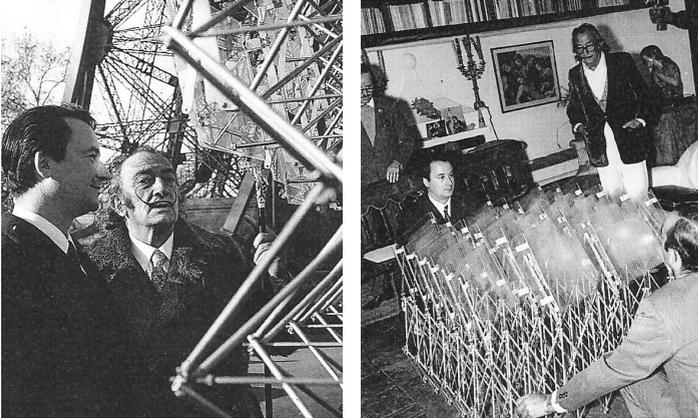


Bild 5

Emilio Pérez Piñero und Salvador Dalí mit dem ersten Prototyp des Hyperkubischen Glases.  
© Fundación Gala-Salvador Dalí.

Ein zweiter Prototyp wird auf der Weltausstellung in Sevilla 1992 ausgestellt. Das Motto der Ausstellung lautet »Entdeckungen« und bietet der Provinz Murcia die Gelegenheit, innovative Entwicklungen spanischer Forscher aus der Region zu zeigen, wie zum Beispiel das U-Boot von Isaac Peral, den Tragschrauber von Juan de la Cierva sowie ein Prototyp des »Vidriera Hipercúbica« von Emilio Pérez Piñero. Bei dem Prototyp von Sevilla, das maßgeblich vom Sohn des spanischen Architekten Emilio Pérez Belda entwickelt wird, handelt es sich um eine von der Decke hängende Konstruktion. Dazu wird die retikuläre dreidimensionale Struktur nicht an ein stehendes Kreuz befestigt, sondern an ein horizontal an der Decke hängendes. Durch die horizontale Hängung wird das »Vidriera Hipercúbica« zu einer faltbaren Decke aus Glas, einem faltbaren Glasdach.<sup>10</sup> Aus Gesprächen mit dem Architekten des murcianischen Pavillons, Vicente Martínez Gadea, geht hervor, dass das Modell für die Weltausstellung in Sevilla im Maßstab 1:1 realisiert wird. Die retikuläre dreidimensionale Struktur besteht aus Stahlrundstäben. Die Verbindung der Stäbe untereinander entspricht der von Emilio Pérez Piñero in seinem Patent von 1965 vorgeschlagenen Lösung. Abweichend zum Patent kommen anstelle von Glas Tafeln aus Polymethylmethacrylat (PMMA) mit einer Abmessung von 1m auf 1m zum Einsatz. Insgesamt werden 36 Tafeln so angeordnet, dass die Fläche in entfaltetem Zustand ein Quadrat beschreiben, analog zum ersten Prototyp von Emilio Pérez Piñero.

<sup>10</sup> Gadea 2012.

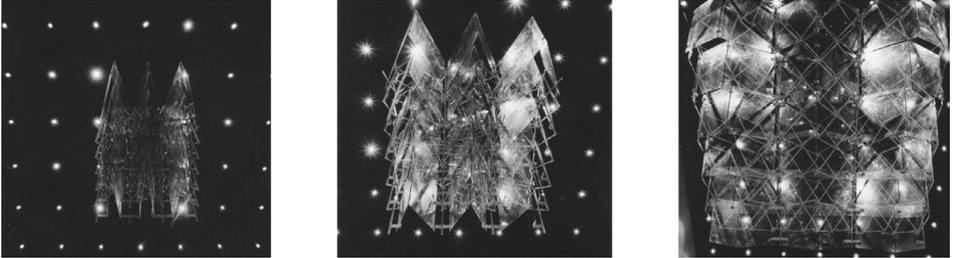


Bild 6

Prototyp »Deployable Hypercubic Glazing«. Weltausstellung Sevilla 1992. © Martinez Gadea.

Der entscheidende Unterschied zur ursprünglichen Idee besteht in der gedrehten Lagerung der Konstruktion. In Figueras hängt das »Vidriera Hipercúbica« in der Vertikalen und erfüllt die Aufgabe einer bewegten Fassade. In Sevilla hängt es horizontal und wird zu einem Dach. Die Konstruktion wiegt 6 t und wird nach der Weltausstellung demontiert. Wo sich der Prototyp aktuell befindet, ist nicht bekannt.



Bild 7

Prototyp »Deployable Hypercubic Glazing« auf der Weltausstellung in Sevilla 1992.

## 2. Sommersemester 2020

### 2.1. Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke«

#### 2.1.1. Ausgangslage

Mit der Idee, das Ergebnis des Seminars auf der Messe »Glasstec« in Düsseldorf auszustellen, startet das Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke« im Sommersemester 2020. In einem ersten theoretischen Teil geht es darum, die Geometrie zu durchdringen und die grundsätzlichen Funktionsarten und Konstruktionssysteme des Hyperkubischen Glases zu verstehen. Nach einer ersten Phase der Recherche nach weitergehenden Informationen zur Konstruktion, werden die zur Verfügung stehenden Daten analysiert und ausgewertet.

Die entscheidenden Informationen für die Planung der Konstruktion liefern zwei Patente des Architekten Emilio Pérez Piñero. Das Patent »Three Dimensional Reticular Structure« von 1965 beschreibt die tragende und bewegliche Grundstruktur des hyperkubischen Glases auf die ein weiteres System aufgesetzt wird, das die Faltung der Tafeln ermöglicht.<sup>11</sup> Das zweite System der faltbaren Tafeln beschreibt Emilio Pérez Piñero im Patent »System of articulated planes«.<sup>12</sup> Bei der tragenden Grundstruktur handelt es sich um ein dreidimensionales retikuläres Netz, das sich aus mehreren identischen Modulen zusammensetzt. Diese bestehen aus vier Stäben mit gleichen Abmessungen und kreisförmigem Querschnitt, die in der geometrischen Mitte durch ein Gelenk miteinander verbunden sind. Alle Stäbe können in einer Richtung um den Mittelpunkt drehen. An jedem Stabende befindet sich ein weiteres Gelenk zur Aufnahme eines weiteren Moduls. Auch diese Gelenke müssen die Drehbewegung der Stäbe gewährleisten. Durch diese Gelenke lässt sich die dreidimensionale retikuläre Struktur falten. Vertikale Teleskopstangen verbinden die oberen Gelenke mit den unteren. Sie stabilisieren und begrenzen den Faltprozess.

Das System aus faltbaren Tafeln wird auf die oberen Gelenke der retikulären Grundstruktur aufgesetzt. Es besteht aus einer Reihe von Tafelpaaren, die sich horizontal zusammenfallen lassen. Die horizontale Faltbewegung wird durch Scharniere ermöglicht. Die Tafelpaare sind wiederum an den äußeren Enden mit einem pantografischen System verbunden, das eine zusätzliche Faltung in der vertikalen Richtung ermöglicht, so dass sich die Tafeln zu einem Würfel zusammenfallen lassen. Das pantografische System bildet den Übergang von der

11 Pérez Piñero 1965.

12 Pérez Piñero 1976.

retikulären dreidimensionalen Struktur zum System der faltbaren Ebene, indem es die unterschiedlichen Faltbewegungen artikuliert und kompatibel macht.

May 25, 1965 E. P. PIÑERO 3,185,164  
 THREE DIMENSIONAL RETICULAR STRUCTURE  
 Filed Nov. 25, 1961 8 Sheets-Sheet 1

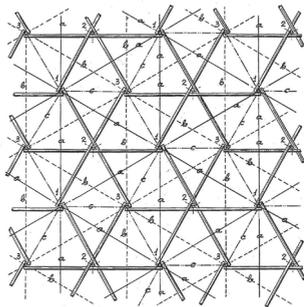


Fig. 1

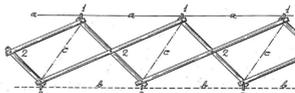


Fig. 2

INVENTOR  
 EMILIO PÉREZ PIÑERO  
 BY *James G. Smith*  
 ATTORNEYS

United States Patent (19)  
 Piñero, deceased

(11) 3,975,872  
 [45] Aug. 24, 1976

[54] SYSTEM OF ARTICULATED PLANES  
 [76] Inventor: Emilio Pérez Piñero, deceased, late of Calapeyres (Murcia), Spain, by Consuelo Belda Aroca, legal heir Feb. 3, 1959  
 [22] Filed: Feb. 3, 1959  
 [21] Appl. No.: 846,634  
 Related U.S. Application Data  
 [63] Continuation-in-part of Ser. No. 314,322, Dec. 13, 1952.  
 [30] Foreign Application Priority Data  
 Dec. 14, 1951 Spain ..... 387,563  
 U.S. Cl. .... 52/74; 52/109; 52/94; 52/95  
 Int. Cl. .... EDB 1/344  
 Field of Search ..... 52/109, 64, 446, 645, 52/70, 71, 135/1  
 [56] References Cited  
 UNITED STATES PATENTS  
 2,803,317 8/1957 Henderson ..... 52644  
 3,152,147 10/1964 Williams ..... 52709  
 3,185,164 5/1965 Piñero ..... 60218  
 3,375,624 4/1968 McAuliffe ..... 52709  
 3,652,900 1/1971 Schmidt ..... 52109  
 3,729,877 5/1973 Hall ..... 52109  
 3,751,254 11/1973 Vaughan ..... 52546  
 3,854,266 12/1974 Sabin ..... 52711  
 Primary Examiner—Ernest R. Pamer  
 Assistant Examiner—Henry Radazzo  
 [57] ABSTRACT  
 A system of articulated planes foldable from a planar configuration to a compact low-volume form. The structure is formed of a series of hinged planes, the planes having inwardly hinged joints at one edge and outwardly hinged joints at an opposite edge, such that the series of planes can be folded in the manner of the sides of an accordion bellows. A plurality of such articulated planes can be arranged in parallel fashion, such that the folds of the second series mesh with those of the first, the folds of the third series mesh with those of the second, etc. The hinges joining the planes are thus positioned in aligned rows transverse to the extent of the plane series and are dimensioned to accommodate the folding action. The hinges of each outside series have a broader span than the adjacent inner one. The inwardly hinged joint of a row are additionally hinged to alternate arms of a pantographic framework, the framework having a pair of cross arms for each series of planes, and a separate pantographic framework provided for each row of inwardly hinged joints.  
 6 Claims, 16 Drawing Figures

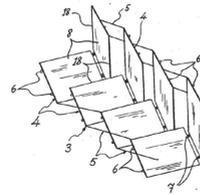


Bild 8

Ausschnitt aus den Patenten von Emilio Pérez Piñero von 1965 (links) und von 1976 (rechts).

Beide Patente können unabhängig voneinander interpretiert werden. Die retikuläre dreidimensionale Grundstruktur ist mit Zeichnungen und Beschreibungen präzise im ersten Patent beschrieben, das System der faltbaren Tafeln im zweiten. Eine Kombination aus beiden Patenten ist der Schlüssel zum Verständnis des Hyperkubischen Glases. Keines dieser Dokumente zeigt allerdings das Kreuz, an dem die kombinierte, faltbare Glaskonstruktion bei dem gebauten Prototypen von 1971 aufgehängt wird, und das über einen integrierten Motor die Bewegung steuert. Aufschluss über dieses Kreuz und den integrierten Mechanismus geben ausschließlich einige Skizzen des Architekten auf dem Schreibblock eines Pariser Hotels. Es ist anzunehmen, dass sich Emilio Pérez Piñero und Salvador Dalí 1971 in diesem Hotel aufgehalten haben. Das dort vor dem Eiffelturm entstandene Foto belegt zumindest die Präsenz beider Personen zu jenem Zeitpunkt

in Paris. Die Handzeichnungen befinden sich heute in der Stiftung Emilio Pérez Piñero. Lina Puertas del Río fügt sie 1989 dem Anhang ihrer Dissertation als Kopie hinzu. Aus dieser Vorlage stammen die folgenden Ausschnitte.<sup>13</sup> Die Skizzen bilden die Grundlage für die Realisierung des Exponats.

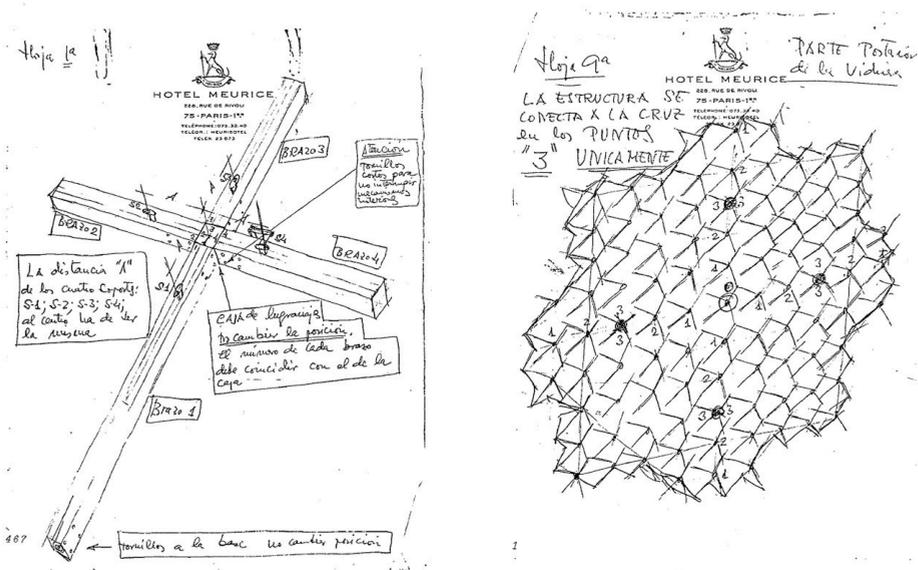


Bild 9  
Handskizzen des tragenden und motorisierten Kreuzes von Emilio Pérez Piñero (1971).

Das Wahlmodul mit den Studierenden im Masterstudiengang Architektur an der Universität Siegen beginnt mit der Vermittlung dieses theoretischen Wissens als Grundvoraussetzung zur Planung und Entwicklung eines eigenen Prototyps, an dem die Studierenden später im Umkehrschluss diese theoretischen Aspekte sowohl geometrisch als auch konstruktiv überprüfen und gegebenenfalls korrigieren können. Zum besseren Verständnis fertigt der Dozent Martino Peña ein kleines Arbeitsmodell an. Die retikuläre dreidimensionale Struktur dieses ersten Arbeitsmodells besteht aus hölzernen Rundstäben. Die Glasflächen werden durch Graupappe ersetzt. Alle Verbindungen sind maximal vereinfacht mit Klebebändern hergestellt. Diese Abstraktion erleichtert den Zusammenbau. Die Bewegungsabläufe werden gefilmt und den Studierenden in Form von Videos zur

13 Puertas del Río 1989.

Verfügung gestellt. Wegen der pandemischen Situation findet das Wahlfach im Frühjahr 2020 ausschließlich digital statt und fordert von Lehrenden und Studierenden neue Wege der Vermittlung. Die Aufgabe des Seminars besteht darin, sich zum einen die theoretischen Grundlagen anzueignen und sich in einem nächsten Schritt mit der Umsetzung eines Prototypen auseinanderzusetzen, das den realen Dimensionen und Anforderungen entspricht.



Bild 10  
Arbeitsmodell des Dozenten für das Erstellen von Videos.

### 2.1.2. Arbeitsprozess

Der Prototyp soll im Maßstab 1:2 mit insgesamt 36 Glastafeln gebaut werden. Die quadratischen Glastafeln zeigen eine Kantenlänge von 500 mm. In entfaltetem Zustand beschreiben die Scheiben ein Quadrat von 3.000 mm x 3.000 mm. Entsprechend diesen Abmessungen wird der Platz in der Messehalle zur Ausstellung auf der Glasstec reserviert. Es werden drei Arbeitsgruppen gebildet. Die erste Gruppe beschäftigt sich mit der retikulären Grundstruktur, die zweite Gruppe mit den Fügungsdetails generell und die dritte Gruppe mit dem pantografischen System.

Gruppe 1 hat die Aufgabe, das Grundmodul der retikulären dreidimensionalen Struktur so zu dimensionieren, dass es mit den Glastafeln der festgelegten Größe von 500 mm auf 500 mm kompatibel ist. Das Grundmodul der retikulären dreidimensionalen Struktur besteht aus 4 Rundstäben identischer Länge, die in ihrer geometrischen Mitte so zusammengefügt sind, dass sie sich jeweils um eine eigene Achse drehen können. Zur Aufgabe von Gruppe 1 gehört außerdem, die Verbindungspunkte mit dem stehenden und tragenden Kreuz zu entwerfen.

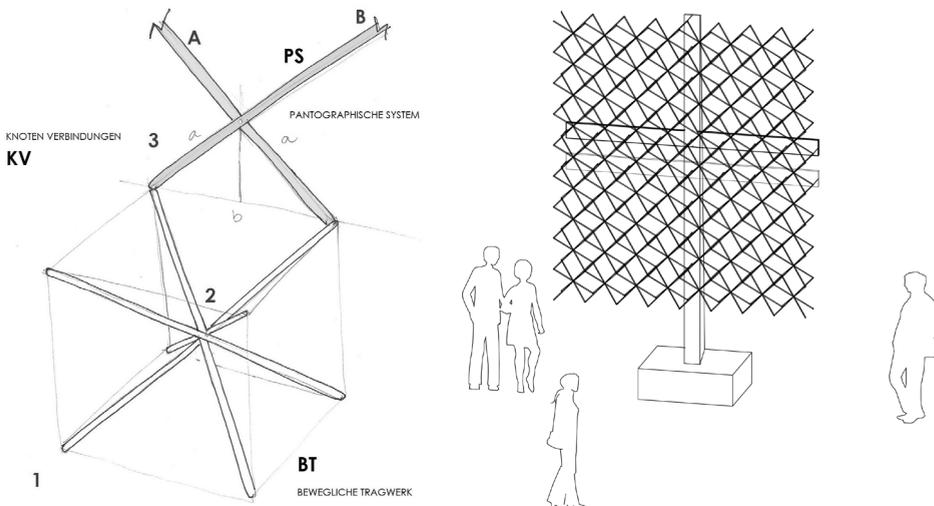


Bild 11

Links: Grundmodul der retikulären dreidimensionalen Struktur. Rechts: Schematische Darstellung der geplanten Anordnung für die Messe Glasstec 2020.

Für das Modell werden aus Gründen eines begrenzten Budgets sowie einer leichten Beschaffung, ebenfalls einfache alltägliche Gebrauchsmaterialien verwendet, die in jedem Baumarkt zu finden sind. Die Stäbe für das retikuläre dreidimensionale System bestehen aus Polyvinylchlorid (PVC)-Rohren mit einem Durchmesser von 20 mm.

Gruppe 2 hat die Aufgabe, die Fügungsdetails für den zentralen Knoten des Grundmoduls zu entwickeln sowie diejenigen zur Verbindung der einzelnen Module. In Bild 12 sind die drei unterschiedlichen Knoten gekennzeichnet. Dabei



tung zu vereinfachen. Als sich die pandemische Situation leicht verbessert und der Laserschneider der Modellbauwerkstatt wieder genutzt werden kann, werden Versuche mit Polymethylmethacrylat (PMMA)<sup>14</sup> und alternativ mit mitteldichten Holzfaserverplatten (MDF) durchgeführt. Wegen der transparenten Erscheinung favorisieren Teilnehmer\*innen das Material PMMA. Die Abstandhalter und weitere Kleinteile werden entworfen und dreidimensional in Kunststoff gedruckt. Der 3D-Druck bietet sich hier besonders an, weil es sich bei den Abstandhaltern um geometrische Formen handelt, die sich mit herkömmlichen Materialien schlecht herstellen lassen. Die Abstandhalter sind mit den Scharnieren fest verbunden, die wiederum zwei Glasscheiben miteinander verbinden. Bei den Scharnieren handelt es sich um handelsübliche Produkte aus dem Baumarkt.

Es werden insgesamt 18 Tafelpaare gefertigt, die mit Scharnieren verbunden sind und sich mit Hilfe der Abstandhalter so zusammenfalten lassen, dass diese ineinanderpassen und einen Mindestabstand zueinander einhalten. Die äußeren Enden der Tafelpaare werden ebenfalls über Abstandhalter mit dem pantografischen System verbunden. Die Arbeit am Modell dient auch dazu, die Anzahl der notwendigen kleineren Bauteile zu ergründen, die zur Realisierung des Prototyps notwendig sind. Im Ergebnis werden 72 Abstandhalter benötigt, um die Scheibenpaare an das pantografische System zu befestigen sowie 36 Abstandhalter zur Befestigung an den Scharnieren. Das Bild 14 zeigt einen Abgabeplan der Gruppe 3 mit den zuvor beschriebenen Bauteilen.

# DAS PANTOGRAPHISCHE SYSTEM

## Bestandteile des Systems

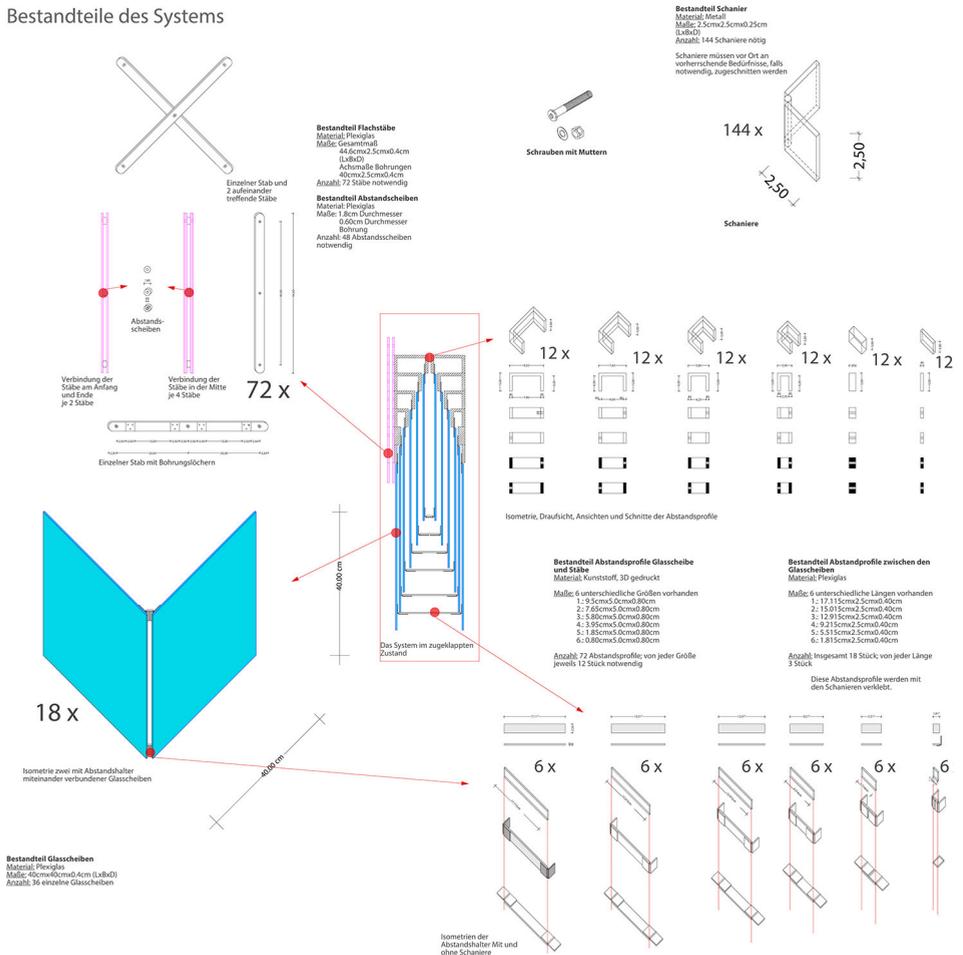


Bild 13

Darstellung des pantografischen Systems der Gruppe 3. Verfasser\*innen: Natali Ucar, Alexandra Glaesner, Elena Künz, Husna Parwani, Sarah Selin.

Im zweiten Teil des Wahlmoduls wird das Modell in Präsenz gebaut. Alle Informationen zu den einzelnen Bauteilen und Mechanismen liegen nun vor. Die Dimensionen der einzelnen Bauteile sind zuvor zeichnerisch ermittelt worden, ebenso die Mengen. Gemeinsam mit 5 Studierenden wird das Modell in nur fünf aufeinanderfolgenden Tagen zusammengebaut. Erschwert wird die Arbeit in Präsenz nach wie vor von vielen pandemiebedingten Einschränkungen.

### Vorbereitung und Präparation der Bauteile

Die Rohre aus Polyvinylchlorid (PVC) werden zugeschnitten und an den notwendigen Stellen gelocht. Die Systemprofile aus Aluminium werden in gleichlange Segmente geteilt. Bild 14 zeigt die zugeschnittenen Stäbe und Systemprofile sowie einen Fügungspunkt von Rohr und Aluminiumsegment mit Nutensteinen.

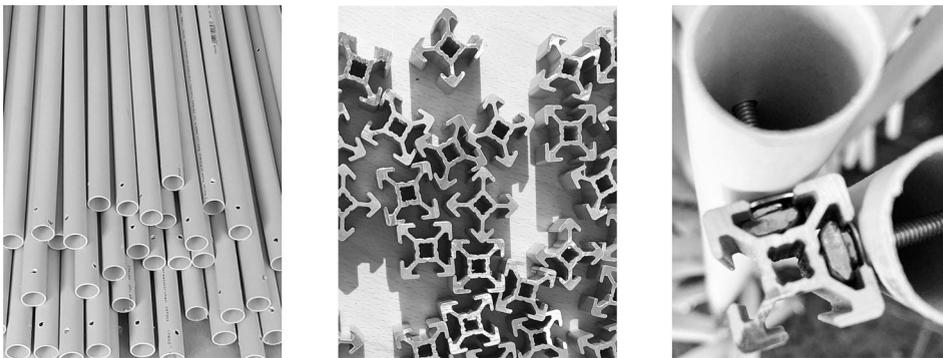


Bild 14

Die einzelnen Bauteile zur Konstruktion der retikulären faltbaren Grundstruktur.

### Aufbau der retikulären dreidimensionalen Struktur

Aus jeweils vier Rohren und einem zentralen Knoten werden die Grundmodule zusammengebaut und anschließend an den oberen und unteren Stabenden miteinander verbunden. Der Mechanismus des Faltens und Entfaltens wird überprüft, bevor das pantografische System aufgesetzt wird.



Bild 15  
Studierende bei der Präparation der Rohre.



Bild 16  
Studierende bei der Montage der retikulären faltbaren Struktur.

## Montage des pantografischen Systems

Um das pantografische System mit der retikulären Struktur zu verbinden, werden zunächst die gedruckten Einsätze in die oberen Knotenpunkte gesteckt. Diese ermöglichen die Befestigung der Scherenpaare des pantografischen Systems an die retikuläre Grundstruktur ohne die notwendigen Bewegungen der Scheren einzuschränken. Bild 17 zeigt die gedruckten Abstandhalter, ein Detail des oberen Fügungspunktes vor der Montage und das gleiche Detail nach der Montage. Die gedruckten Einsätze sind so entworfen und gedruckt, dass sie genau in die Systemschienen aus Aluminium passen und keine weiteren Verbindungsmittel nötig sind. Die Befestigung der Scherenpaare des pantografischen Systems erfolgt mittels Schraubverbindung an den oberen Flansch des Einsatzes. Es kommen sowohl Scheren aus PMMA als auch Scheren aus MDF zum Einsatz, um die Materialien auf ihre Eignung für die Konstruktion zu prüfen.

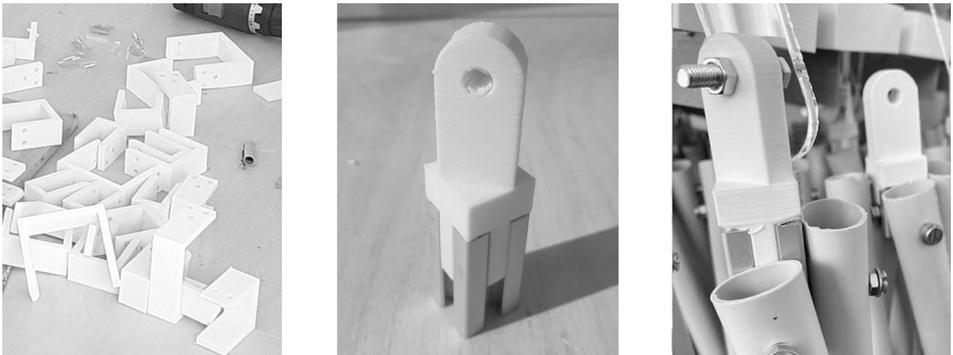


Bild 17

Links: Abstandhalter, Mitte: Knoten zur Aufnahme des pantografischen Systems, Rechts: montierter Knoten.

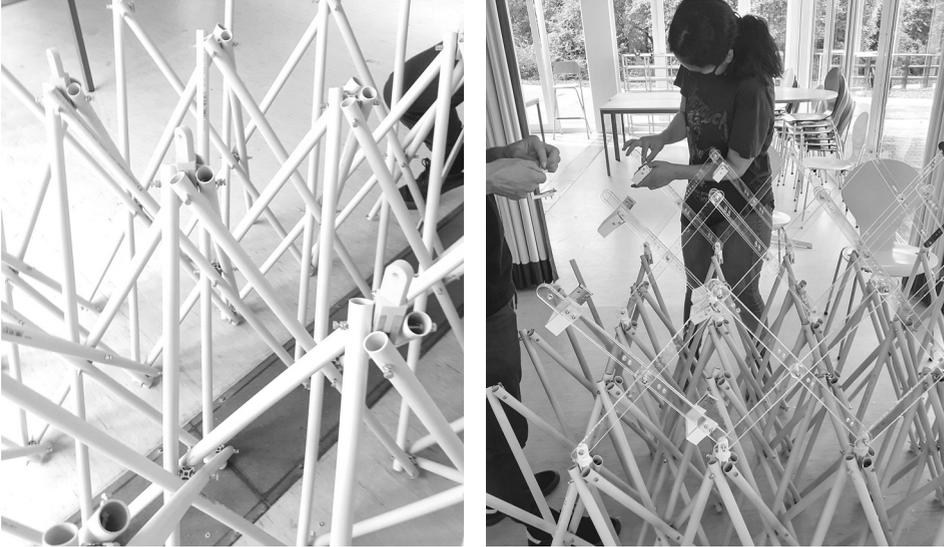


Bild 18  
Studierende bei der Montage der oberen Knoten und der Scheren des pantografischen Systems.

### Montage der Abstandhalter

Im nächsten Schritt werden die Abstandhalter montiert, die eine Faltung der Tafeln übereinander ermöglichen. Jede horizontale Reihe von Tafelpaaren benötigt eine eigene Größe des Abstandhalters. An jeden Abstandhalter wird ein Scharnier montiert, analog zu den Ausführungen des Architekten Emilio Pérez Piñero in seinem Patent.

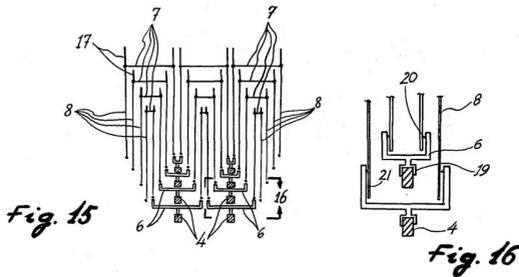


Bild 19  
Ausschnitt aus dem Patent »System of Articulated Planes« von 1976.



Bild 20  
Studierende bei der Montage der Abstandhalter.

Der letzte Montageschritt besteht in der Befestigung der Tafeln, die in diesem Fall nicht aus Glas, sondern aus Holzwerkstoffplatten bestehen. Die Entscheidung ausschließlich Materialien zu benutzen, die kostengünstig und leicht zu beschaffen sowie einfach zu bearbeiten sind, erweist sich auch in dieser Endphase der Modellbaus als Vorteil. Die Abmessungen einzelner Bauteile wird korrigiert sowie einzelne Bauteile ausgetauscht.

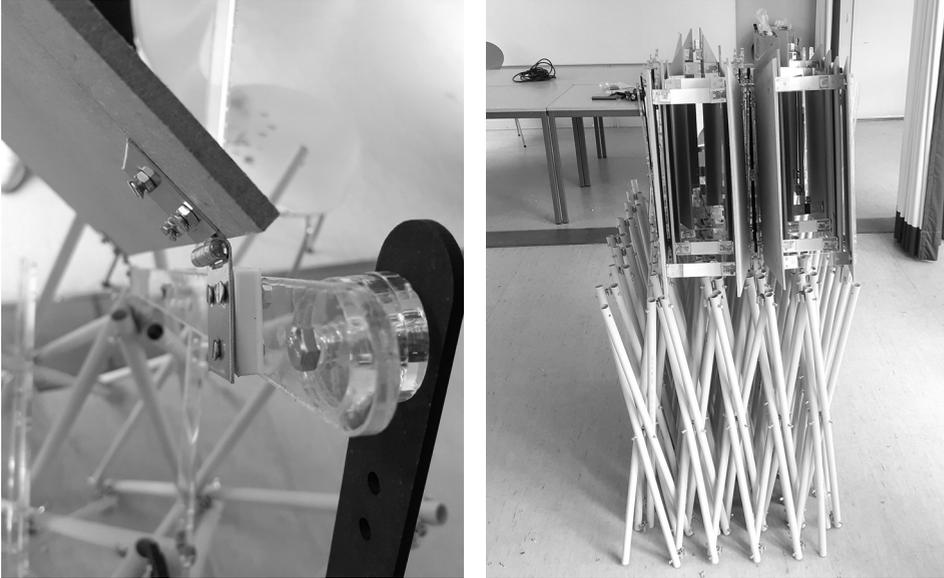


Bild 21

Links: Montierte Abstandhalter am pantografischen System. Rechts: Fertiges Arbeitsmodell in eingeklapptem Zustand.

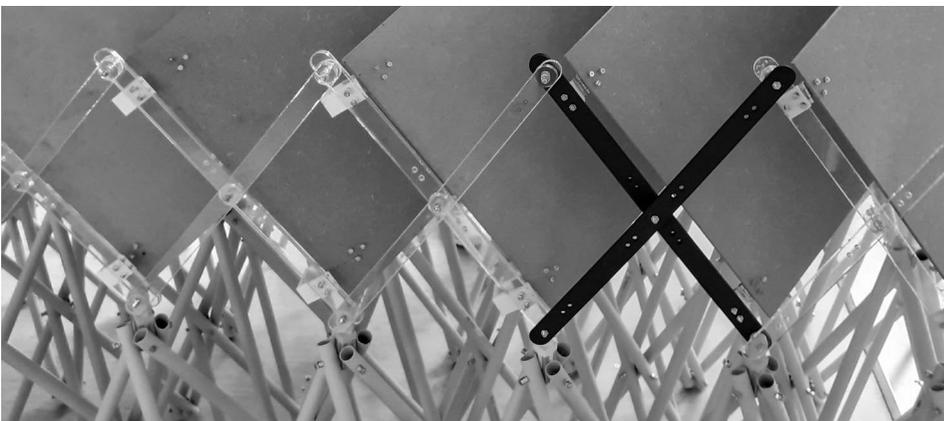


Bild 22

Geometrisch vereinfachte Scheren des pantografischen Systems während des Falzens.

Abschließend wird der Mechanismus durch Falten und Entfalten des Artefakts geprüft. Grundsätzlich funktionieren die faltmechanismen. Während das Zusammenfallen sehr einfach und geschmeidig funktioniert, ist das Entfallen schwieriger und Widerstände sind zu spüren. Der Grund dafür wird in der Verteilung der Lasten vermutet, die in entfaltetem Zustand bei einsetzender Bewegung nicht gleich verteilt sind. Dadurch könnten einzelne Bauteile zeitweise zu hoch belastet sein und Zwänge entstehen. Für diese These spricht auch die Tatsache, dass einige Scheren des pantografischen Systems während des Zusammenfallens gebrochen sind. Für das Falten sind daher alle Teilnehmer notwendig, um das Artefakt möglichst gleichmäßig zusammenzuschieben.



Bild 23

Links: Prototyp im Prozess des Entfallens, rechts: Prototyp entfaltet.

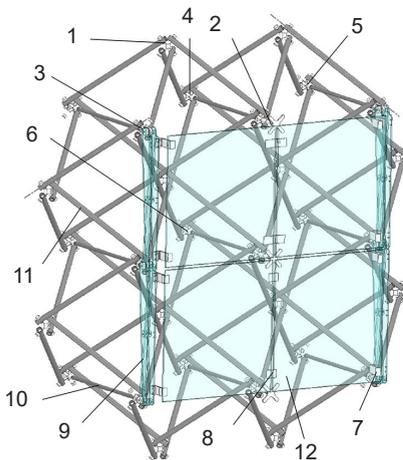
Der Prototyp belegt die Funktionsfähigkeit des hyperkubischen Glases bezogen auf Geometrie und faltmechanismen. Andererseits zeigen die vereinzelt Brüche der Scheren sowie Widerstände im Prozess des Fallens ein erhebliches Optimierungspotential der Konstruktion auf. Bis zur Ausstellung auf der Messe Glasstec ergibt sich daraus weiterer Handlungsbedarf. Analytische Verfahren sollen die Ursache klären und die Bauteile mittels statischer Berechnungen optimieren. Eine Änderung der Materialien bis hin zum Design ist in dem nun folgenden Prozess nicht ausgeschlossen.

## 2.2. Lehrstuhlinterne Nacharbeit

Im Nachgang zum studentischen Seminar wird die Realisierung des Hyperkubischen Glases als Exponat auf der »Glasstec« im Jahr 2021 angestrebt. Die erste Planung sieht eine Reinterpretation der ursprünglichen, vertikalen Ausführung von Emilio Pérez Piñeros Patenten sowie Anpassung und Adaption an aktuelle Herstellverfahren vor. Das Arbeitsmodell 01 des Hyperkubischen Glases aus dem Wahlmodul überprüft den Bewegungsablauf und zeigt den Faltmechanismus an einem Ausschnitt der Konstruktion. Aufbauend auf diesem Modell erfolgt am Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen eine Nachbetrachtung durch wissenschaftliche Mitarbeiter\*innen. Mit Berücksichtigung der Patente Emilio Pérez Piñeros<sup>15</sup> zeigen sich Abweichungen zwischen der Patentidee und der Ausführung. Aufbauend auf einer Analyse des Arbeitsmodells 01 werden Annahmen zur ingenieurmäßigen Betrachtung getroffen, Varianten untersucht und Vorgaben für ein zweites Arbeitsmodell bestimmt.

Zu Beginn der Nacharbeit ist der Positionsplan mit Definition der einzelnen Elemente notwendig, um das Hyperkubische Glas eindeutig zu beschreiben. Bild 24 zeigt den Positionsplan des Hyperkubischen Glases im Arbeitsmodell 02 an einem Ausschnitt von vier Glastafeln als Ergebnis der Nacharbeit des Lehrstuhls für Tragkonstruktion, Arbeitsstand Sommersemester 2021. Eine Erweiterung mit mehreren Glastafeln ist möglich. Die Bezeichnungen bleiben erhalten.

15 Pérez Piñero 1965 und Pérez Piñero 1976



Position	Beschreibung
01	Knoten 01 - Mitte
02	Knoten 02 - Abstand
03	Knoten 03 - Pantografisches System
04	Knoten 04 - unten
05	Knoten 05 - Gleiter
06	Knoten 05 - Getriebe
07	Abstandshalter 01 - Glas - Pantografisches System
08	Abstandshalter 02 - Glas - Glas
09	Pantografisches System
10	Teleskopstab
11	Diagonalstab
12	Glastafelebene

Bild 24

Positionsplan des Hyperkubischen Glases im Arbeitsmodell 02.

### 2.2.1. Analyse Arbeitsmodell 01

Während der Analyse des Arbeitsmodells 01 zeigen sich insbesondere Abweichungen der Geometrie in der Umsetzung des Patentes in das Arbeitsmodell, ungünstige Materialeigenschaften sowie Ungenauigkeiten im Aufbau. Der Bewegungsablauf ist realisierbar, allerdings überlagern sich Montageungenauigkeiten im Aufbau, die nur über die weichen Materialien und unplanmäßige Verformungen ausgeglichen werden können. Für eine Realisierung des Hyperkubischen Glases als Exponat auf der »Glasstec« ist eine Überarbeitung des Hyperkubischen Glases unter ingenieurmäßiger Betrachtung notwendig. Nachfolgend sind die wichtigsten Auffälligkeiten im Arbeitsmodell 01 beschrieben. Die Analyse dient der Grundlage für nachfolgende Betrachtungen und setzt Grundlagen für ein zweites Arbeitsmodell.

Die Umsetzung des Hyperkubischen Glases in Arbeitsmodell 01 erfolgt mit handelsüblichen Materialien aus dem Baumarkt. Das Stabwerk der Unterkonstruktion ist mit RO 20 x 1 mm aus Polyvinylchlorid (PVC) hergestellt, die Knotenpunkte bestehen aus Aluminium Systemprofilen mit den Abmessungen 40 mm

auf 40 mm, die teilweise um dreidimensionel gedruckte Kunststoffelemente aus Polylactid (PLA)<sup>16</sup> oder Schrauben mit Nutensteinen als Anschlussmöglichkeiten ergänzt sind. Das pantografische System wird aus Polymethylmethacrylat (PMMA) der Nenndicke 3 mm sowie die faltbaren Elemente aus Holz der Nenndicke 3 mm ausgeführt. Alle Verbindungen sind kraft- oder formschlüssig über Klemmungen und Verschraubungen hergestellt. Der Nachweis der Realisierbarkeit des Faltmechanismus des Vidriera Hypercúbica von Pérez Piñeros kann in einem einfachen Modell nachgewiesen werden. Für die Ausführung als Exponat auf der Messe »Glasstec« ist die Materialauswahl unzureichend.

Das Material Polymethylmethacrylat (PMMA) bietet Vorteile bezüglich Beschaffung und Verarbeitung vor Ort. Nachteilig sind ausgerissene Schnitt- und Bohrkanten der vor Ort bearbeiteten Elemente. Die Änderung der Geometrie des pantografischen Systems in Bild 25 führt zu einem biegeweicheren pantografischen System als im Patent vorgesehen. Bei Überbeanspruchung treten große Verformungen auf und führen letztlich zum Bruch einzelner Kunststoffelemente. Eine Kopplung mit Druckkraftübertragung im entfalteten Zustand ist mit der Ausführung nach Bild 25 nicht möglich.

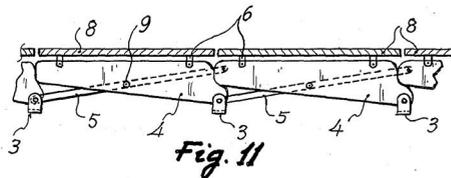


Bild 25

Links: Ausführung des pantografischen Systems im Arbeitsmodell 01 als Stäbe. Rechts: Ausführung in Dreiecksform im Patent von Emilio Perez Pinero.

Der Knoten 03 setzt sich in Bild 26 aus zwei Elementen zusammen. Ein gedrucktes Kopfteil aus Polylactid (PLA) und einem Aluminiumprofil. Die weiteren Knotenpunkte bestehen aus einem Aluminiumprofil. An diesem Aluminiumprofil werden über Nutensteine und Schrauben die Rohre aus Polyvinylchlorid (PVC) angeschlossen.

16 Prusa 2018.

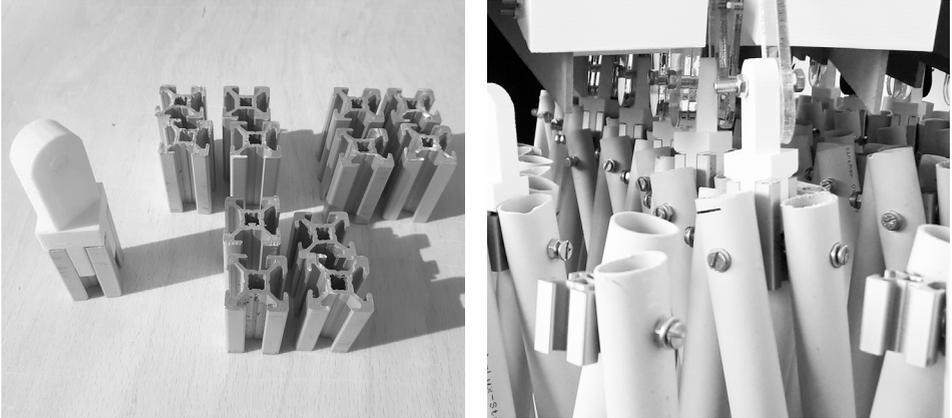


Bild 26

Links: Knoten 03 des Arbeitsmodells 01 und Aluminiumprofilsegmente. Rechts: Knoten 03 mit Anschluss an das Stabwerk mit zu starkem Anzug der Schrauben.

Zur Fixierung des Nutensteins im Aluminiumprofil wird eine Anzugkraft benötigt. Das Rohr aus Polyvinylchlorid (PVC) verformt sich in Abhängigkeit der aufgebrachtten Kraft stark im Anschlusspunkt.

Über formschlüssige Schraubverbindungen sind die Elemente in Arbeitsmodell 01 in Bild 27 miteinander verbunden. Allerdings variieren die Schraubenarten, Schraubengrößen und Schraubenlängen. Zum Ausgleich sind mehrere Unterscheiben und Schraubenmuttern verwendet. Dadurch entstehen ungewollte Exzentrizitäten in der Konstruktion, die Lasten nicht mehr planmäßig weiterleiten können. Die Feinjustierung der Verbindungen ist zusätzlich erschwert. Zu lange Schrauben verhindern teilweise den Faltmechanismus und können bei Kontakt mit anderen Bauteilen zu ungewollten Kontaktspannungen führen. Die Verwendung von Gewindeschrauben erzeugt im Bereich der Bohrungen im Rohr der Unterkonstruktion eine Schädigung des Bohrlochs und behindert zusätzlich mit dem Einschneiden des Bohrlochrandes die benötigte Beweglichkeit im System.



Bild 27

Ungleichmäßige, formschlüssige Schraubverbindungen des Stabwerk mit den Knotenpunkten.

Montageungenauigkeiten bei einem beweglichen Tragwerk überlagern sich und tragen zusätzlich mit zu viel Bewegungsspielraum im Gesamtsystem zu einem ungenauen Bewegungsablauf bei, wie die Schiefstellung des pantografischen Systems im gefalteten Zustand. An den Kreuzungspunkten der Stäbe des pantografischen Systems fehlen Unterlegscheiben und die Verbindung ist zu fest angezogen. Bei der Faltung und Entfaltung führt dies zu einer Versteifung des Gelenk. Die Lasten können nicht planmäßig weitergeleitet und abgeleitet werden. Es entstehen hohe Spannungen im Querschnitt, die zum Bruch führen können.



Bild 28

Links: Montageungenauigkeiten, beispielsweise schiefes pantografisches System im Modell. Mitte: ungleiche Schraubverbindungen. Rechts: Bruch eines pantografischen Systems.

Die Lage der Abstandhalter mit Anschluss an das pantografische System ist im Vergleich zum Patent Emilio Pérez Piñeros geändert. Die Abstandhalter werden, wie in Bild 31 dargestellt, an die Stäbe des pantografischen Systems angeschlossen und liegen nicht mehr oben auf, wie es im Patent beschrieben ist. Diese Änderung ist bewusst umgesetzt, um den Aufbau auf dem Pantografischen System nicht zu groß werden zu lassen.

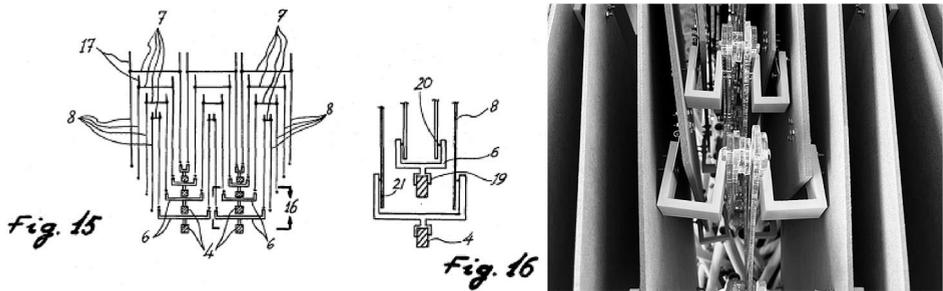


Bild 29

Links: Ausschnitt aus dem Patent von Emilio Pérez Piñero (1976). Rechts: Arbeitsmodell 01.

Aufbauend auf dieser Analyse erfolgen die Festlegungen der Materialität, Bemessung der Bauteile und Detailplanung. Die Ergebnisse zielen auf ein Arbeitsmodell 02 ab, das im Sommersemester 2021 gebaut werden soll.

## 2.2.2. Material, Modellierung und Belastung

Als Ergebnis der Analyse des Arbeitsmodells 01 wird die Materialität der Positionen 01 bis 12 des Positionsplans des Arbeitsmodells 02 für eine Überarbeitung des Modells bestimmt. Die Planung sieht vor, dass die Knoten und Abstandhalter (Position 01 bis Position 08) aus einem gedruckten Kunststoff, das Stabwerk mit Teleskopstab (Position 10) und Diagonalstab (11) aus Aluminium oder Stahl, das Pantografische System (Position 09) aus Polymethylmethacrylat (PMMA) und die Glastafelebene (Position 12) aus einem Dünnglas-Kunststoff-Verbund hergestellt werden. Die Berücksichtigung additiver Fertigungsmöglichkeiten von Position 01 bis Position 08 im 3D-Druck ermöglicht den lastabtragenden Einsatz von Kunststoff im Bauwesen.

Auf Grundlage ingenieurmäßiger Betrachtungen erfolgt eine Berechnung des Stabwerks als Unterkonstruktion im entfalteten Zustand. Die Belastung des hyperkubischen Glases unterteilt sich grundsätzlich in eine ständige, eine veränderliche und durch den Faltmechanismus in eine dynamische Last. Zur Bemessung und Festlegung der Querschnitte werden Lastannahmen notwendig. Nachfolgend sind die einzelnen Ansätze beschrieben und zur Berechnung des hyperkubischen Glases für eine Grundfläche der Glastafelebene von 3.000 mm auf 3.000 mm definiert.

### Ständige Lasten

Ständige Lasten bestehen aus einer unveränderlichen Beanspruchung über die gesamte Lebensdauer, insbesondere aus der Summe der Eigenlast der einzelnen Elemente. Der Ansatz der Eigenlast der Glastafel, des pantografischen Systems und der Knotenpunkte sowie Verbindungsmittel erfolgt im numerischen Modell über Einzellasten an Position 03. Die Belastung wird auf der sicheren Seite liegend ermittelt.

### Veränderliche Lasten

Veränderliche Lasten variieren zeitlich und lassen sich in Wind-, Schnee-, Temperatur- oder Ausbaulasten einteilen. Das hyperkubische Glas ist als vertikales Exponat in einer Messehalle der Messe Düsseldorf geplant und entsprechend der Vorgaben der Veranstalter belastet.<sup>17</sup> Die veränderlichen Lasten für vertikale Bauteile innerhalb einer Messehalle entsprechen einer horizontalen Ersatzflächenlast für Standwände mit einer Höhe von über 4 m von +0,125 kN/m<sup>2</sup>, ab 4 m Höhe von +0,063 kN/m<sup>2</sup>. Die endgültige Höhe des hyperkubischen Glases ist noch nicht festgelegt, dadurch erfolgt ein Ansatz von 0,125 kN/m<sup>2</sup> als horizontale Ersatzflächenlast auf die Gesamtkonstruktion als Soglast  $q_s$  und Drucklast  $q_D$ . Auf eine Einwirkung parallel zur Glastafelebene wird aufgrund des offenen Stabwerks verzichtet.

### Dynamische Lasten

Das hyperkubische Glas lebt von der Bewegung der Entfaltung und Faltung. Bedingt durch die Bewegung entsteht ein Wechsel der Belastungsrichtung und Veränderung des Kraftfluss im Stabwerk. Unter der Voraussetzung, dass die Faltung

17 Messe Düsseldorf 2021.

mit einer geringen Geschwindigkeit fährt, können dynamische Lasten vernachlässigt und als statische Ersatzlasten für Zwischenzustände angesetzt werden.

### Lastfälle und Lastkombinationen

Aus den Einwirkungen entstehen drei Lastfälle. Die veränderlichen Lasten aus Soglast und Drucklast wirken nicht gleichzeitig. Es ergeben sich zwei Lastfallkombinationen.

LF 1	Eigenlast	LK 1	Eigenlast + Soglast
LF 2	Soglast	LK 2	Eigenlast + Drucklast
LF 3	Drucklast		

Der Nachweis wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) über einen Spannungsnachweis auf Querschnittsversagen und über einen Stabilitätsnachweis geführt. Als maßgebende Bemessungssituation im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) stellt sich die Grundkombination ein.<sup>18</sup>

$$E_d = E [Y_G \cdot G_k + Y_Q \cdot Q_k] \leq R_d$$

mit

$E_d$  Bemessungswert der Auswirkung

$Y_G, Y_Q$  Teilsicherheitsbeiwert der ständigen Einwirkung und veränderlichen Einwirkung

$G_k, Q_k$  charakteristische Werte der ständigen und veränderlichen Einwirkung

$R_d$  Bemessungswert des Tragwiderstands

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wird als Begrenzung der Verformung geführt. Als maßgebende Bemessungssituation im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) stellt sich die charakteristische Bemessungssituation ein.

$$E_{d,char} = E[G_k + Q_k] \leq C_d$$

$E_d$  Bemessungswert der Auswirkung

$G_k, Q_k$  charakteristische Werte der ständigen und veränderlichen Einwirkung

$C_d$  Bemessungswert des Gebrauchstauglichkeitskriteriums

<sup>18</sup> DIN EN 1990 und DIN EN 1990/NA.

Die Unterkonstruktion wird als Stabwerk im entfalteten Zustand mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet. Dazu steht das Programm RFEM 5.25 von Dlubal Software GmbH<sup>19</sup> am Lehrstuhl für Tragkonstruktion zur Verfügung. Grundlage für die Geometrie bilden das Patent von Pérez Piñero und der Maßstab aus dem Modul »Bewegliche Tragwerke« des Sommersemesters 2020 mit einem Achsmaß von 500 mm.

Die Konstruktion besteht aus insgesamt 36 Glastafeln und diese bilden eine faltbare Fläche von etwa 3.000 mm auf 3.000 mm. Das Stabwerk unter der Glastafel bilden die Raumdiagonalen eines Würfels mit 500 mm Kantenlänge. Bild 32 zeigt die Isometrie und die Ansicht des hyperkubischen Glases als Grundlage für numerische Berechnungen.

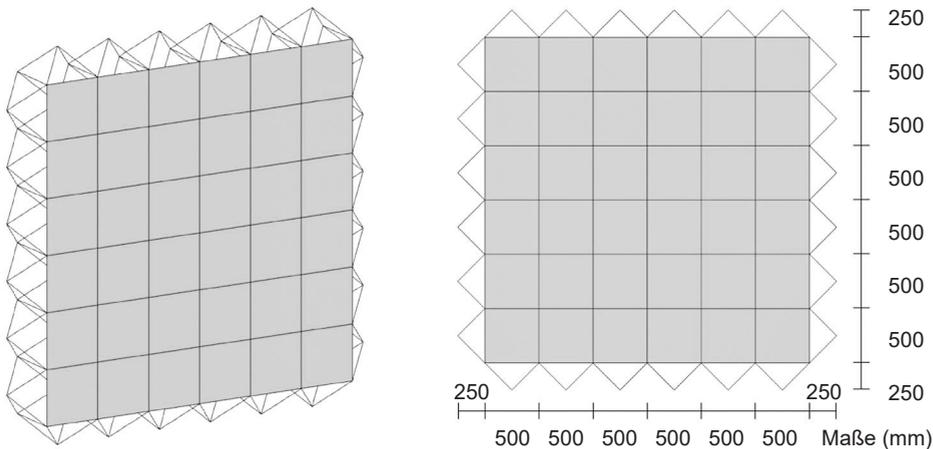


Bild 30  
Isometrie (links) und Ansicht (rechts) des Hyperkubischen Glases. Planungsstand Dezember 2020.

Die Diagonalstäbe sind als Balkenstab mit Momentenansfangsgelenk und Momentenendgelenk modelliert. Die Verbindungspunkte können über Beschränkung der Freiheitsgrade individuell eingestellt werden. Entsprechend der Realität schneiden sich die Stäbe in Knoten 01 nicht, sondern sind aneinander vorbeigeführt. Eine Kraftübertragung in einen anderen Stab ist hier nicht vorgesehen. Im numerischen Modell ist der durchgehende Stab mit einem Scherengelenk modelliert. Für das regelmäßige Element der Unterkonstruktion aus vier Raumdiagona-

19 Dlubal 2019.

len ergibt sich die in Bild 31 gezeigte Modellierung. Die Druckstäbe an den Würfelkanten vertikal zur Glastafelebene stoppen den Faltmechanismus und tragen zum Lastabtrag der horizontalen veränderlichen Drucklast bei. Dem Druckstab entspricht in der Ausführung ein Teleskopstab, um dem Faltmechanismus eine eindeutige Richtung vorzugeben. Die Modellierung bildet den Teleskopstab aus Stab und Führungshülse mit dem inneren Vollquerschnitt als Druckstab ab. Der Stab erhält planmäßig nur Druckkräfte, bei einer Zugbeanspruchung fällt der Stab aus und leitet die Kräfte nicht weiter.

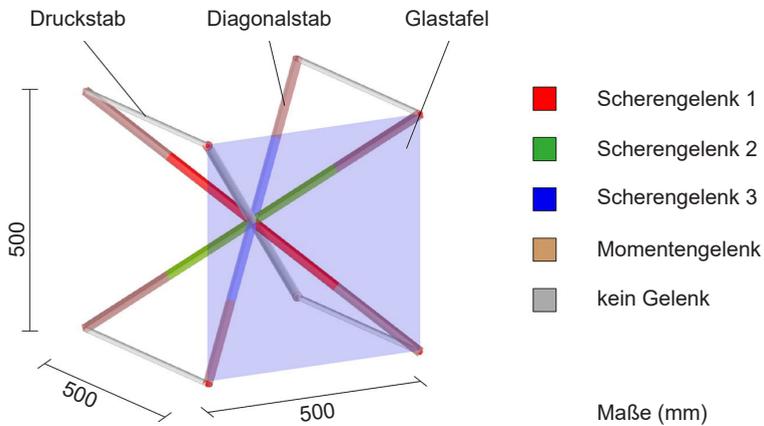
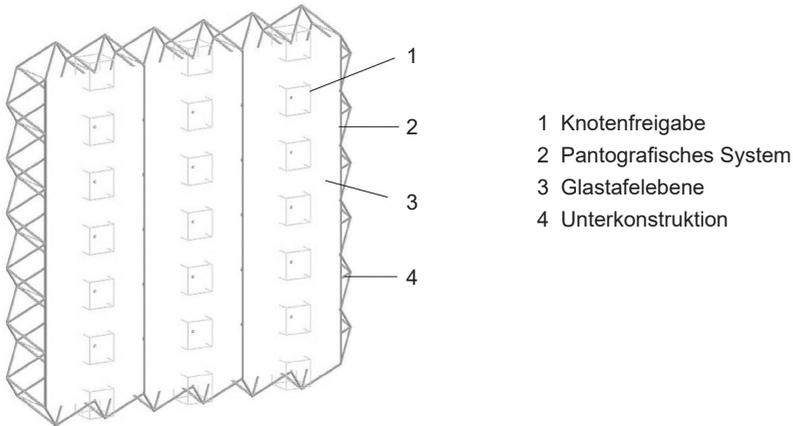


Bild 31

Gelenkausbildung im Stabwerk, beispielhaft gezeigt an einem Würfel unter einer Glastafel.

Das Stabwerk ist an drei Hauptachsen alle 1.000 mm in vertikaler Richtung in einem pantografischen System in Bild 33 miteinander verbunden. Das pantografische System wird zwischen jedem Knoten als Balkenstab modelliert. Knotenfreigaben ermöglichen im Bereich zwischen zwei Hauptachsen eine Druckkraftübertragung zwischen Glastafelebene und Unterkonstruktion.



- 1 Knotenfreigabe
- 2 Pantografisches System
- 3 Glastafelebene
- 4 Unterkonstruktion

Bild 32  
Numerisches Modell. Perspektivische Darstellung.

### 2.2.3. Meilenstein 01. Vertikale oder horizontale Lagerung

Meilenstein 01 zielt auf die Ausführung des hyperkubischen Glases als vertikale oder horizontale Konstruktion ab und zeigt Überlegungen hinsichtlich der Anordnung der Lagerung über die Mittellinien oder über die Diagonale der faltbaren Fläche. Insgesamt werden 36 Glastafeln zur Herstellung der 3.000 mm auf 3.000 mm großen Glastafelebene verwendet. Im entfalteten Zustand ergibt sich über die Randstäbe eine äußere Abmessungen des hyperkubischen Glases von insgesamt 3.500 mm auf 3.500 mm. Die nachfolgenden Untersuchungen am numerischen Modell prüfen, welche Auswirkung die Drehung der Konstruktion von der Vertikalen in die Horizontale auf das Stabwerk und die Lagerknoten sowie die Drehung der Belastung nach Bild 33 aufweist.

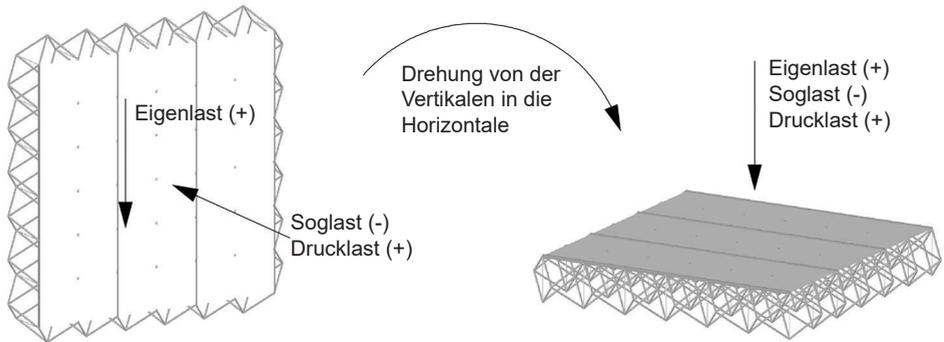


Bild 33

Drehung von der Vertikalen in die Horizontale mit Angabe der Wirkungsrichtung der Belastung.

### Vertikale Variante mit fünf Lagerpunkten, Mittellinien und Diagonale

Das Hyperkubische Glas lagert in der vertikalen Variante auf fünf Auflagern. Das mittige Lager ist unverschieblich, vier weitere Lager lassen eine Verschiebung in einer Richtung zu und können über eine Gewindespindel mit Linearführung verschoben werden, um den Faltmechanismus der Konstruktion zu aktivieren. Bild 34 zeigt die unterschiedlichen Ausführungen der Auflager mit der Verschiebungsrichtung im entfalteten Zustand.

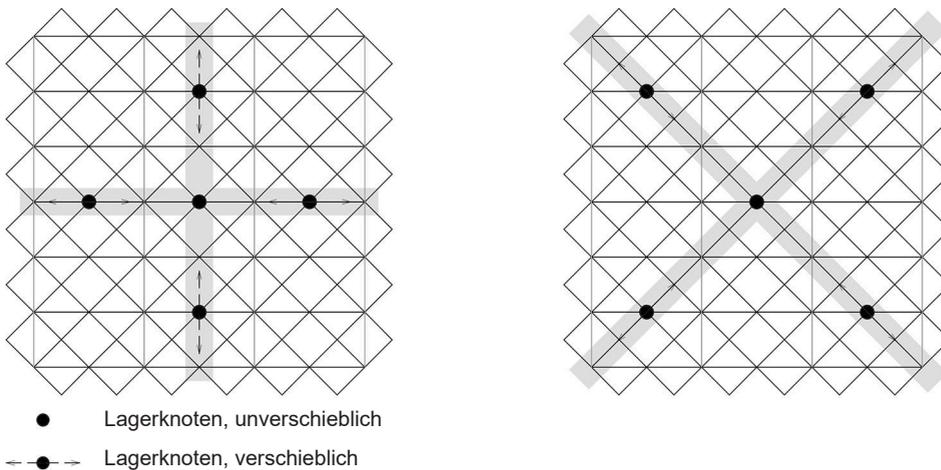


Bild 34

Lagerbedingungen für die vertikale Variante mit einer Lagerung über die Mittellinien (links) und die Diagonalen (rechts).

Die Auswertung der Stabschnittkräfte führt im entfalteten Zustand der vertikalen Variante mit Lagerung über die Mittellinien für Baustahl S235<sup>20</sup> zu den Stabquerschnitten der Diagonalen zu RO 20 x 2 und des Druckstabs zu RD 12. Bei der Bemessung der Lagerknoten ist der gefaltete Zustand maßgebend, da durch die Auskrägung eine größere Beanspruchung der Lagerpunkte aus entsteht. Die Auswertung der Stabquerschnitte führen im entfalteten Zustand der vertikalen Ausführung mit Lagerung über die Diagonalen zu geringerer Auslastung als bei einer Lagerung über die Mittellinien.

#### Horizontale Variante mit fünf Lagerpunkten, Mittellinien und Diagonale

Das hyperkubische Glas lagert in der horizontalen Variante auf fünf Auflagern. Das mittige Lager ist unverschieblich, vier weitere Lager lassen eine Verschiebung in einer Richtung zu und können über eine Gewindespindel mit Linearführung verschoben werden, um den Faltmechanismus der Konstruktion zu aktivieren. Die Lage und Anordnung der Auflager entspricht dem der vertikalen Variante.

<sup>20</sup> DIN EN 10025-2.

Die Berechnung des hyperkubischen Glases in der horizontalen Ausführung ermöglicht eine weitere Reduktion der Stabkräfte und Auflagerkräfte für den Querschnitt der vertikalen Variante. Die Querschnitte sind gering ausgelastet, eine Querschnittsoptimierung bietet sich an. Im Gegensatz zur vertikalen Variante müssen die Auflager keine Zugkräfte ableiten.

### Zusammenfassung Meilenstein 01

Der Wechsel von der vertikalen auf die horizontale Variante verändert den Kraftfluss in der Unterkonstruktion. Die Eigenlast sowie die Sog- und Drucklast wirken in dieselbe Richtung, orthogonal auf Glastafelebene. Dadurch hängt das hyperkubische Glas nicht mehr an den Auflagerpunkten. Eine Einleitung von Zugkräften in die Lagerkonstruktion ist nicht mehr notwendig, das Stabwerk wird gleichmäßiger beansprucht. Gleichzeitig stellen sich geringere Verformung bei Lagerung in der Horizontalen im Vergleich zur Vertikalen ein.

Bei der Analyse der horizontalen Variante zeigt das über die Diagonale gelagerte System geringere Normalkräfte in der Unterkonstruktion auf, allerdings höhere Verformungen als bei der horizontalen Lagerung über die Mittellinien. Insgesamt sind die resultierenden Schnittgrößen in dem horizontal gelagerten System deutlich geringer als bei der vertikalen Variante. Gleiches lässt sich bei der Gesamtverformung feststellen, die bei der vertikalen Diagonallagerung den niedrigsten Wert aufweist.

Mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen wird entschieden, die vertikale Variante des hyperkubischen Glases nicht weiter zu verfolgen, sondern stattdessen die horizontale Konstruktion auszuführen. Das Konzept des »Vidriera Hypercúbica« von Emilio Pérez Piñero wird angepasst und auf eine horizontale Ausführung als hyperkubisches Glas adaptiert.

#### 2.2.4. Meilenstein 02. Optimierung: Material, Querschnitt, Lagerung

Für die horizontale Variante des hyperkubischen Glases ergeben sich gleichmäßig verteilte Stabkräfte. Eine Optimierung hinsichtlich Materialität, Querschnitt und Anzahl der Lagerungsknoten erfolgt mit Meilenstein 02. Das numerische Modell bleibt erhalten und die Optimierungsmöglichkeiten werden angesetzt.

Der Materialwechsel von Baustahl S235<sup>21</sup> auf Aluminium EN-AW 6060 T6<sup>22</sup> wird untersucht. Die geringe Auslastung mit Baustahl führt zu Aluminium als alternativem Material. Die Eigenlast von Aluminium ist um etwa den Faktor 3 geringer. Somit müssen geringere Lasten abgetragen werden. Materialbedingt führt das weichere Material zu größeren Verformungen. Allerdings sind die zu erwartenden Verformungen in den vorgegebenen Grenzen.

Eine Querschnittsoptimierung erfolgt für beide Materialien. Dabei wird der Minimalquerschnitt bestimmt, der notwendig ist, um die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) einzuhalten. Über eine Betrachtung der Stabschnittgrößen wird die Knotenbeanspruchung bestimmt und ein Querschnitt festgelegt.

Auf der Achse der beweglichen Lagerungen können weitere verschiebliche Auflager ergänzt werden. Die Untersuchungen setzen dabei auf einen weiteren Lagerungspunkt zwischen dem festen und verschieblichen Lager aus Meilenstein 01 an. Die ergänzten Lagerknoten dürfen nicht fest mit der Gewindespindel verbunden werden, da sich während der Faltung die Knotenabstände verringern. Bild 37 zeigt die Lage der zusätzlichen Lager.

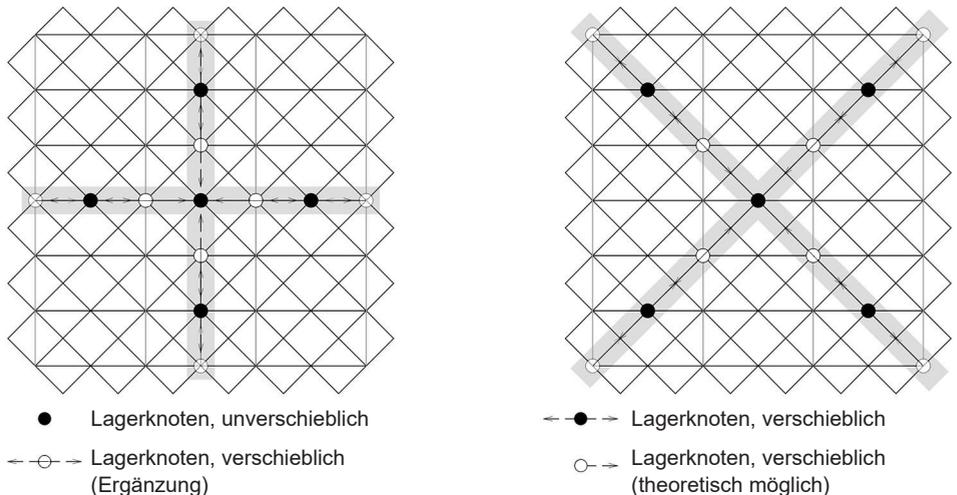


Bild 35  
 Ergänzung um 4 verschiebliche Lagerknoten und theoretisch mögliche Lage weiterer Auflager.

21 DIN EN 10025-2.  
 22 DIN EN 1999-1-1.

Aluminium EN-AW 6060 T6 bei gleichbleibendem und optimiertem Querschnitt, Lagerung über Mittellinien, fünf Auflager oder neun Auflager

Die Verwendung von Aluminium EN-AW 6060 T6 als Material für das Stabwerk der Unterkonstruktion führt bei gleichbleibendem Querschnitt der Diagonalstäbe RO 20 x 2 und des Druckstabes RD 12 zu einer mittleren Auslastung der Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Als Mindestquerschnitt für das Material ist für die Diagonalstäbe ein RO 13,5 x 1,6 notwendig und für den Druckstab ein RD 10. Die Ergänzung um weitere Auflager ist theoretisch möglich, zeigt aber für den Lastabtrag keinen günstigen Einfluss. Der Bewegungsablauf wird gestört, da die zusätzlichen Auflager auf der Haltekonstruktion über Gleitlager mitlaufen, allerdings nicht über die Gewindespindel mit angetrieben werden. Es kann zu einer verzögerten Bewegung infolge Reibung und somit zu einer ungewollten Beanspruchung des Stabwerks kommen.

Aluminium EN-AW 6060 T6 bei gleichbleibendem und optimiertem Querschnitt, Lagerung über Diagonale, 5 Auflager oder 9 Auflager

Die Verwendung von Aluminium EN-AW 6060 T6 als Material für das Stabwerk der Unterkonstruktion führt bei gleichbleibendem Querschnitt der Diagonalstäbe RO 20 x 2 und des Druckstabes RD 12 zu einer mittleren Auslastung der Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Als Mindestquerschnitt für die Diagonalstäbe in diesem Material ist ein RO 12,7 x 1,4 notwendig und ein RD 10 für den Druckstab. Ergänzung um weitere Auflager ist theoretisch möglich, zeigt aber für den Lastabtrag keinen günstigeren Einfluss. Der Bewegungsablauf wird gestört, da die zusätzlichen Auflager auf der Haltekonstruktion über Gleitlager mitlaufen, allerdings nicht über die Gewindespindel mit angetrieben werden. Es kann zu einer verzögerten Bewegung infolge Reibung und somit zu einer ungewollten Beanspruchung des Stabwerks kommen.

## Zusammenfassung Meilenstein 02

Die Untersuchungen bei der Horizontallagerung zeigen, dass das Stabwerk der Unterkonstruktion des hyperkubischen Glases bei einer Lagerung über die Diagonalen mit Aluminium EN-AW 6060 T6 in der Form ausgeführt werden kann, dass

die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) erfüllt werden können. Eine Querschnittsoptimierung mit reduzierten Stabquerschnitten bis zu RO 12,7 x 1,4 und RD 10 ist möglich. Eine Ergänzung der Anzahl der Lagerpunkte bringt keinen nennenswerten Vorteil, sondern birgt die Gefahr eines unsaubereren Bewegungsablaufs.

Zeitgleich zur Berechnung des Stabwerks ist es notwendig, die Knotenpunkte zu betrachten. Die Knoten sind digital entworfen sowie anschließend additiv aus Kunststoff gedruckt und müssen einen planmäßigen Lastabtrag sicherstellen. Allerdings weist Kunststoff ein temperatur-, zeit- und belastungsabhängiges Materialverhalten auf. Die Materialkennwerte sind geringer als die von Aluminium EN-AW 6060 T6. Somit bedingt sich die Entwicklung der Knotenpunkte in Meilenstein 03 und die Dimensionierung des Stabwerks gegenseitig in einem iterativen Optimierungsprozess. Als Konsequenz aus der Betrachtung der Ausführung und der Knotenpunkte ergeben sich Stabquerschnitte für die Diagonalen der Unterkonstruktion von RO 20 x 2 und für den Druckstab im inneren des Teleskopstabes von RD 10. Als Führungshülse ist ein Rohrquerschnitt RO 14 x 1 eingeplant.

#### 2.2.5. Meilenstein 03. Entwicklung der Knotenpunkte

Die Knotenpunkte stellen die zentralen Elemente der Konstruktion und müssen die Lasten planmäßig weiterleiten. Der Anschluss der Unterkonstruktion ist gelenkig auszuführen, um den Faltmechanismus und die Bewegungsabläufe sicherzustellen. Meilenstein 03 beschreibt den digitalen Entwurfsprozess der Knotenpunkte. Bisherige Erkenntnisse zeigen Lösungen für Knotenpunkte des »Vídriera Hypercúbica« aus dem Stahlbau. Allerdings wirken die Details im heutigen Verständnis von Ästhetik und Funktionalität überdimensioniert und nicht materialgerecht ausgeführt. Die Digitalisierung in der Bauindustrie und den Produktionsverfahren in den letzten Jahren ermöglicht einen industriellen 3D-Druck mit form- und kraftoptimierten Geometrien. Die Topologie des 3D-Drucks kann in nahezu beliebiger Form ausgeführt werden.

Die Knotenpunkte des hyperkubischen Glases bedienen sich dem Herstellverfahren des 3D-Drucks. Grundsätzlich bieten sich Kunststoffe als kostengünstiges Druckmaterial an. Jedoch lassen sich auch Metalle wie Stahl oder Aluminium drucken. Eine Entscheidung für ein Material kann über die Verfügbarkeit, die Kosten und die Materialkennwerte erfolgen. Beim hyperkubischen Glas wird auf

Kunststoff als Konstruktionsmaterial gesetzt. Insgesamt stehen die zwei Verfahren Fused Deposition Modeling (FDM) und selektives Lasersintern (SLS) für den 3D-Druck der Knotenpunkte zur Verfügung.<sup>23</sup>

### Fused Deposition Modeling (FDM)

Das Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren, auch Schmelzschichtungsverfahren, basiert auf dem Schmelzen und schichtenweisen Auftrag eines Kunststoffes. Der Kunststoff wird dem Extruder als Filament zugeführt, geschmolzen und entsprechend der Geometrievorgabe auf ein Druckbett aufgetragen. Zur Vermeidung von Zwangsspannungen ist das Druckbett vorgeheizt sowie die Düsen und/oder das Druckbett beweglich. Mit dem Verfahren baut sich die Konstruktion schichtweise auf. Stützkonstruktion sind in Abhängigkeit der Struktur zur Standicherheit während des Druckvorgangs notwendig. Übliche Materialien sind beispielsweise Polylactid (PLA) oder Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS).

### Selektives Lasersintern (SLS)

Beim selektiven Lasersintern (SLS) schmilzt ein Laser punktuell ein Kunststoffmaterial in Pulverform. Dadurch entsteht Schicht für Schicht die digital entworfene Geometrie. Das Verfahren ist eine der effektivsten 3D-Druck Verfahren zur additiven Fertigung von Kunststoffen. Über die Steuerung des Laser kann das Kunststoffpulver auf einer Plattform exakt an vorbestimmten Punkten mit sehr hoher Genauigkeit geschmolzen werden. Nach dem Schmelzvorgang senkt sich die Plattform und es wird eine neue Pulverschicht hinzugefügt. Der Prozess wiederholt sich bis zur Fertigstellung des Bauteils. Vorteilhaft ist dabei die hohe Reproduzierbarkeit, der Verzicht auf Stützstrukturen und geringe Toleranzen. Ein übliches Material zur Herstellung der Bauteile im selektiven Lasersintern (SLS) ist Nylon PA 12 (PA2200).

23 Es werden für das hyperkubische Glas lediglich das selektive Lasersintern (SLS) und das Fused Deposition Modeling (FDM) verwendet. Weitere Möglichkeiten der additiven Fertigung sind in Gebhardt 2016 zu finden.

Ziel der Modellierung ist die Erstellung möglichst lastorientierter Knoten. Dementsprechend liegt in stark beanspruchten Bereichen mehr Material vor, in Bereichen geringer Beanspruchung hingegen wird Material eingespart. Ausgehend vom ersten Entwurf erfolgt in einem iterativen Optimierungsprozess zwischen Untersuchung des Stabwerks der Unterkonstruktion und nachfolgender Analyse des Knotenpunktes eine Anpassung der Topologie und Geometrie. In Abhängigkeit der Funktion und Anforderung entstehen individuelle Knotenpunkte. Das Knotenvolumen wird digital entsprechend des Kraftflusses in den jeweiligen Faltungszuständen modelliert, anschließend überlagert und mit konstruktiven Randbedingungen erstellt. Diese Vorgehensweise bei der Modellierung hebt die Vorteile des 3D-Drucks als Fertigungstechnologie hervor. Organische Strukturen, die in herkömmlicher, zerspanender Herstellungsweise nur schwer umsetzbar sind, lassen sich digital modellieren und optimal fertigen.

Im hyperkubischen Glas liegen unterschiedliche Verbindungsstellen mit verschiedenen Aufgaben und geometrischen Randbedingungen vor. Es lassen sich insgesamt 6 Knotenpunkte und 2 Abstandhalter identifizieren. Die Herstellung der Knoten erfolgt aus einem Volumenmodell im selektiven Lasersintern (SLS) mit Nylon PA 12 (PA2200).<sup>24</sup> Die Modellierung, Berechnung und Optimierung wird in Ansys Workbench 2020 R2 durchgeführt.<sup>25</sup> Die Knotenentwicklung ist in Bild 36 beispielhaft an Knoten 03 gezeigt. Der Knoten des Arbeitsmodells 01 besteht aus zwei Komponenten, die ineinandergesteckt werden. Die Stäbe schließen über Nutensteine und eine Schraubverbindung an. Hieraus ergeben sich Nachteile hinsichtlich der Konstruktion und Ausführung. Die manuelle Fügung erhöht den Aufwand der Fertigung. Darauf aufbauend lassen sich erste Prototypen mit teilweise filigranen Elementen entwickeln. An kleinen Arbeitsmodellen mit leichten Materialien bieten sich diese Strukturen an. Allerdings folgt aus der numerischen Simulation ein form- und kraftschlüssig optimierter Knoten in Bild 38, der neben statischen Einwirkungen auch geometrische Randbedingungen berücksichtigt und somit zur Stabilität des Gesamtsystems beiträgt. An den seitlich auskragenden Bolzen schließen die Diagonalstäbe der Unterkonstruktion an. Der nach unten gerichtete Bolzen stellt die Verbindung mit dem Teleskopstab sicher. Der obere Aufbau des Knotens dient der drehbaren Lagerung der Stäbe im Pantografischen System und setzt über die Dicke die geometrischen Randbedingungen für den Knoten fest.

24 Prototec 2020

25 Ansys 2020.



Bild 36

Knotenentwicklung Knoten 03 mit Anschluss an das pantografische System.

Die weiteren Knoten sind in Anlehnung an die Vorgehensweise zu Knoten 03 entwickelt. Die Lagerknoten Knoten 05 stellen in Arbeitsmodell 02 keine Verbindung zur Haltekonstruktion sicher. Daher sind diese Knoten vereinfacht gedruckt. Eine Entwicklung findet zeitgleich mit dem Bau des Antriebs statt. Bild 39 zeigt die modellierten Knotenpunkte des Arbeitsmodell 02 für die Knoten 01 bis Knoten 05 in Position 01 bis Position 06.

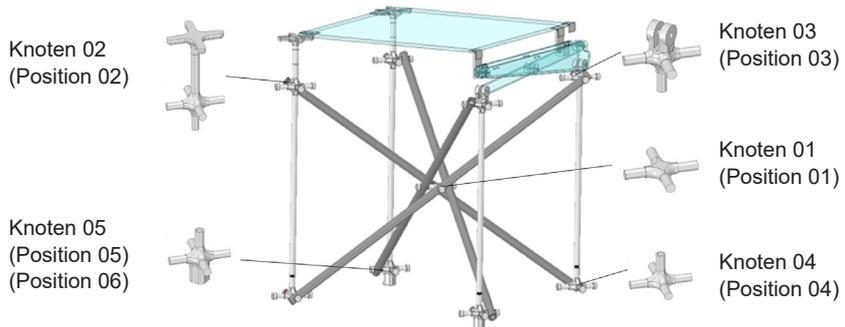


Bild 37

Knoten als digitales Modell. Arbeitsmodell 02.

An den seitlichen Bolzen sind die Diagonalstäbe des Stabwerkes angebracht. Die Verbindung muss um die Bolzenachse drehbar sein. Zeitgleich dürfen die Stäbe nicht abrutschen. Dazu werden drei unterschiedliche Sicherungsmöglichkeiten entworfen. Alle Varianten werden im Arbeitsmodell 02 erprobt. Bild 38 zeigt die möglichen Varianten. Variante 1 sichert eine Kappe mit einem Splint. Die Kappe wird im 3D-Druck mit entsprechenden Öffnungen im Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren gedruckt. Das Loch im Bolzen des Knotens muss

nachträglich eingebracht werden, kann aber auch beim Drucken berücksichtigt werden. Variante 2 beschreibt eine angeschraubte Kappe. Auch hier ist das Loch in der Kappe bereits im 3D-Druck hergestellt. Mit einer Senkkopfschraube wird die Kappe in den Knotenbolzen gebohrt. In Variante 3 wird am Bolzenende ein Außengewinde gedruckt, um die Kappe mit Innengewinde aufzuschneiden.



Bild 38  
Varianten zur Verhinderung des Abrutschens des Stabes.

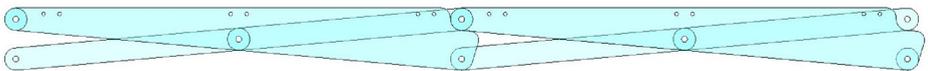
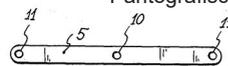
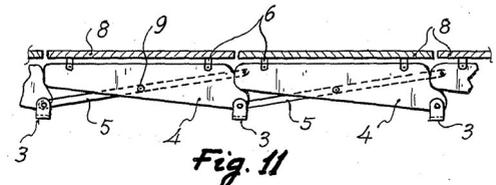
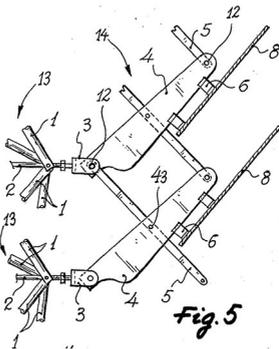
Die seitlichen Bolzen der Knotenpunkte werden durch entgratete Bohrlöcher im Aluminiumrohr gesteckt. Eine Hülse, um den Kontakt zwischen Kunststoff und Metall sowie ein Einschneiden zu verhindern, ist in Arbeitsmodell 02 nicht eingeplant. Allerdings wird während des Baus von Arbeitsmodells 02 darauf geachtet, inwiefern es zu einer Einschneidung mit Schwächung des Bolzenquerschnitts kommt.

#### 2.2.6. Meilenstein 04. Pantografisches System

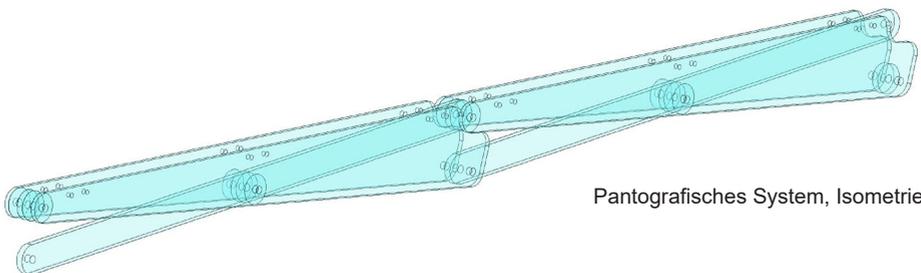
Bild 41 zeigt das pantografische System aus dem Patent Emilio Pérez Piñeros, an dem einerseits die Glastafeln, andererseits die Knoten der Unterkonstruktion angeschlossen sind. Im Arbeitsmodell 01 ist das pantografische System in Anlehnung an den Stab in Bild 41 aus Polymethylmethacrylat (PMMA) ausgeführt. Dies führt zu den bekannten Schwachstellen der Konstruktion. Die Stabkräfte können nicht effektiv weitergegeben werden. Der Materialwechsel von Polymethylmethacrylat (PMMA) zu Polycarbonat (PC) bei gleichzeitiger Änderung der Geometrie führt zu dem in der Ansicht und Isometrie gezeigten System. Polycarbonat ist aufgrund der höheren Bruchdehnung von über 50 % beständiger gegen unplanmäßige Einwirkungen und Verformungen als Polymethylmethacrylat (PMMA) mit einer Bruchdehnung von etwa 3,5 %.<sup>26</sup> Das Polycarbonat wird mit einer zerspannenden

26 KHP 2021 und Exolon GP 2021.

Methode bearbeitet und über eine Fräse auf Grundlage der Geometriedaten hergestellt. Saubere Schnittkanten und Bohrlöcher entstehen, die Bearbeitung ist qualitativ hochwertig ausgeführt.



Pantografisches System, Ansicht



Pantografisches System, Isometrie

Bild 39

Oben: Pantografisches System als Zeichnung aus dem Patent von Emilio Pérez Piñero. Unten: Pantografisches System als räumliche Darstellung zum Arbeitsmodell 02.

### 2.2.7. Meilenstein 05. Abstandhalter und Glastafeln

Zur Überprüfung des Faltmechanismus werden in Arbeitsmodell 01 noch Holztafeln aus MDF in der Glastafelebene eingebaut. Im nächsten Schritt sind die Verbindungspunkte zur Glastafelebene zu entwerfen, daher sollte die nächste Eindeckung mit Glas erfolgen. Die Verbindung zwischen pantografischem System und Glastafeln beziehungsweise zwischen Glastafel und Glastafel erfolgt über Scharniere in Position 07 und Position 08. Als Glastafel soll eine Glas-Kunststoff-Verbundtafel verwendet werden. Dieser Verbund besteht aus zwei äußeren Dünnglastafeln und einem innenliegenden Polymer. Die Befestigung über ein Scharnier ist ebenfalls in 3D-Druck geplant. Die Verbindungsmöglichkeiten in Bild 40 unterscheiden sich dabei hinsichtlich kraftschlüssiger Verbindung über eine Klemmung, formschlüssiger Verbindung mittels Verschraubung in die Kunststofftafel der Verbundtafel und stoffschlüssiger Fügung über eine Verklebung. Bei der Ausführung sind jedoch Gedanken zur Lage der Glastafel in Bezug zum Scharnier notwendig. Der Abstandhalter ist in der Breite zu variieren, um damit die Faltung sicherzustellen. Somit bietet sich die stoffschlüssige Verbindung über eine Verklebung als Möglichkeit der Glaslagerung an.

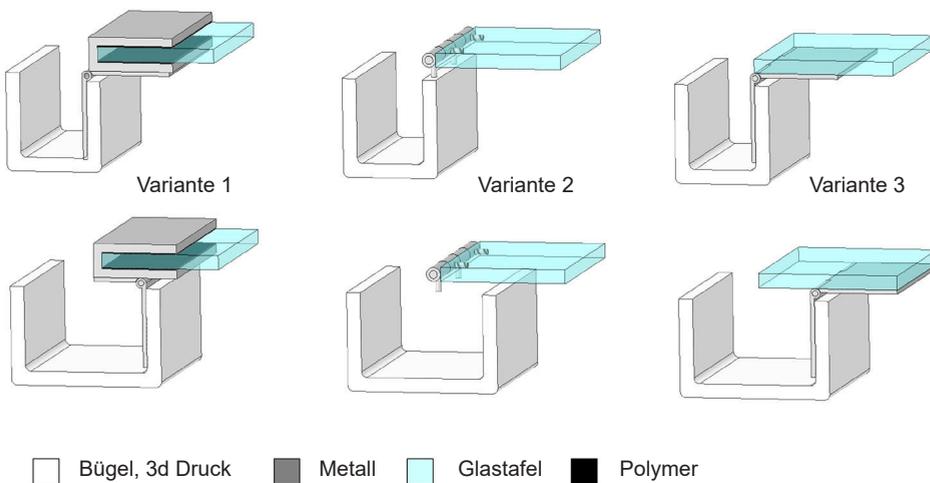


Bild 40

Darstellung des Anschlusses der Glastafel an das Scharnier des Abstandhalters in Position 07.

Bild 41 zeigt die Abstandhalter Glas-Glas aus Polymethylmethacrylat (PMMA) mit angeschraubten Metallscharnieren. Es stellen sich ähnliche Überlegungen zum Anschluss der Glastafel an dem Scharnier wie in Position 07 ein. Eine Klebeverbindung wird bevorzugt. Ein Entwurf des Abstandhalters zwischen den Glastafeln wird zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt, die Geometrie aus Arbeitsmodell 01 bleibt zum jetzigen Zeitpunkt bestehen.

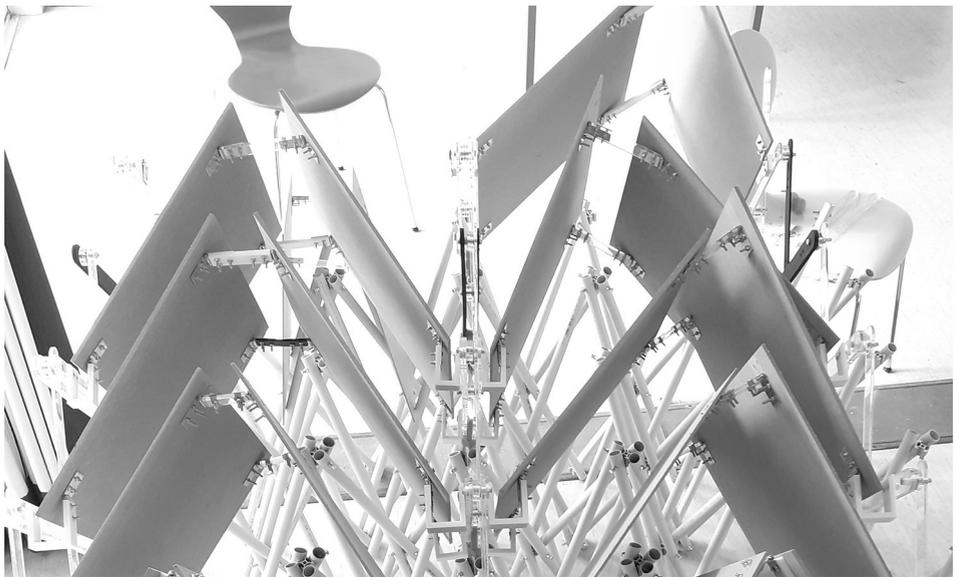


Bild 41

Abstandhalter Glas-Glas im Arbeitsmodell 01 aus Polymethylmethacrylat (PMMA) und Metallscharnieren in Position 08.

### 2.2.8. Zusammenfassung

Die Analyse, Berechnungen und Nacharbeitungen zum Arbeitsmodell 01 durch wissenschaftliche Mitarbeiter\*innen des Lehrstuhls für Tragkonstruktion bieten sich für eine Umsetzung in einem Arbeitsmodell 02 mit 04 Glastafeln an. Es wird gezeigt, dass auf Grundlage der Überlegungen von Emilio Pérez Piñero ein erstes Arbeitsmodell tatsächlich zu einer faltbaren Glasfläche führt. Die Überleitung in aktuelle Berechnungs- und Herstellungsmethoden ermöglichen einen vertief-

ten Einblick in die Funktionsweise, Konstruktion und Herstellung. Mithilfe numerischer Berechnungsverfahren auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) kann das Stabwerk als Unterkonstruktion in verschiedenen Ausführungen einfach berechnet werden. Daraus ergibt sich, dass das hyperkubische Glas in den Abmessungen von 3.500 mm auf 3.500 mm von der Vertikalen in die Horizontale transformiert wird, um Stabschnittkräfte und Lagerkräfte zu reduzieren. Aus einer Lagerung über die Diagonale resultiert eine geringere Auslastung der Stabquerschnitte im Vergleich zur Lagerung über die Mittellinien.<sup>27</sup> In einem iterativen Optimierungsprozess zwischen globalem Tragsystem und Detailplanung der Knotenpunkte ist es möglich, dass eine am Kraftfluss optimierte Geometrie des Knotenpunktes entwickelt und aus Kunststoff im selektiven Lasersintern (SLS) im 3D-Druck hergestellt werden kann. Innovativ tragen die Knotenpunkte aus Nylon PA12 (PA2200) maßgeblich zum Lastabtrag bei. Das pantografische System ist auf Geometrievorschlag des Patentes aus Polycarbonat ausgeführt. Weitere Verbindungselemente wie die Abstandhalter in Position 07 und Position 08 sollen auch aus einem 3D gedruckten Kunststoff im Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren hergestellt werden.

Die Erkenntnisse fließen in ein Arbeitsmodell 02 mit vier Glastafeln und den Randabmessungen von 1.500 mm auf 1.500 mm ein, das im Rahmen des Wahlmoduls »Bewegliche Tragwerke« an der Universität Siegen erstellt wird.

27 Peña 2022.

### 3. Sommersemester 2021

#### 3.1. Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke«

##### 3.1.1. Ausgangslage

Wegen der pandemisch noch immer angespannten Situation wird die Messe Glasstec auf 2021 verschoben. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Nacharbeit zum Seminar durch Analyse des Arbeitsmodells und daran anschließender statischer Berechnung zur Bemessung und Optimierung der einzelnen Bauteile, wird das Design des hyperkubischen Glases überarbeitet. Die Materialien werden gegen höherwertige ausgetauscht und die Bauteile für zunächst vier Module des Hyperkubischen Glases in den Werkstätten der Universität Siegen gefertigt. Gemeinsam mit Masterstudierenden der Architektur werden im Sommersemester 2021 die vier Module des Prototyps zusammengebaut, um die Eignung der Konstruktion zu erproben und eventuelle Korrekturen und Optimierungen für das finale Ausstellungsstück einbringen zu können.

#### Retikuläre dreidimensionale Grundstruktur

Anstelle der Rohre aus Polyvinylchlorid (PVC) werden Rundstäbe aus Aluminium (RO 20 x 2) mit einem Durchmesser von 20 mm, einer Materialstärke von 2 mm und einer Länge von 916 mm gewählt. Zur Stabilisierung der Struktur werden zusätzliche Teleskopstäbe zwischen den oberen und unteren Knotenpunkten eingebracht. Sie setzen sich zusammen aus einem Aluminium-Hohlprofil (RO 13x1) mit dem Durchmesser von 13 mm, einer Materialstärke von 1 mm und einer Länge von 430 mm als Führungsrohr sowie einem massiven Aluminiumprofil (RD 10) mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 435 mm als innenliegender Stab. Im entfalteten Zustand wird der massive Rundstab auf Druck belastet. Das System der Teleskopstäbe ist auch auf dem ersten Prototyp von Emilio Pérez Piñero zu erkennen. Zur horizontalen Verstärkung werden an den Außenrändern des Prototyps zusätzlich halbe Module vorgesehen. Die Rundrohre dieser halben Module sind mit einer Länge von 483 mm etwas kürzer als die Standardrohre.

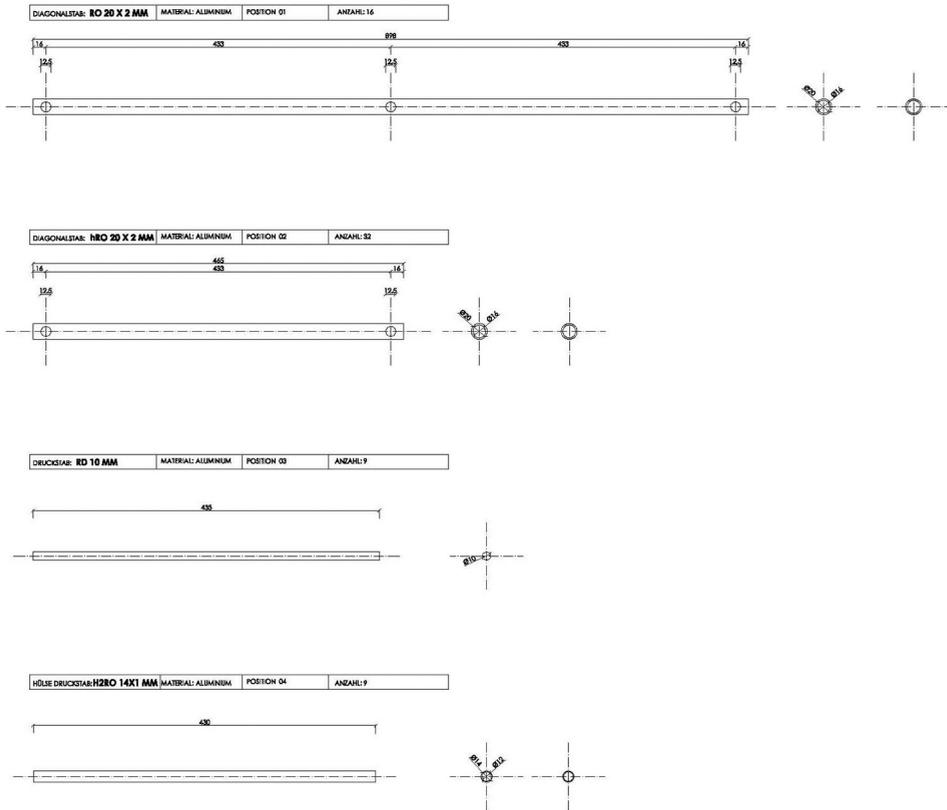


Bild 42

Werkplanung für den Zuschnitt und die Bohrung der Aluminium-Rundrohre für die Grundstruktur.

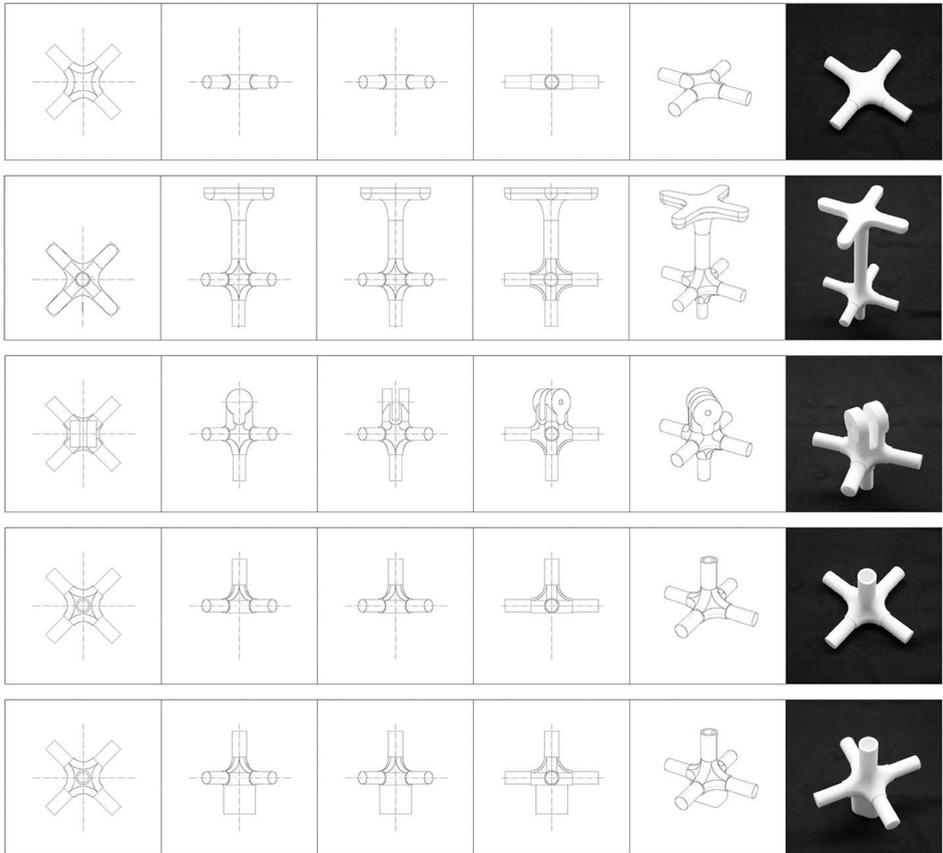


Bild 43  
Knotenvarianten der faltbaren retikulären Grundstruktur.

### Verbindungsknoten

Für die faltbare Grundstruktur werden insgesamt fünf Knoten notwendig, um den unterschiedlichen Anforderungen an die Geometrie und die erforderliche Bewegungsfreiheit zu gewährleisten. Ein Ergebnis der Nacharbeit zum Arbeitsmodell aus dem Sommersemester 2020 ist eine optimierte Knotengeometrie, die es ermöglicht, die Knoten vollständig im 3D-Druckverfahren herzustellen. Auf diese

Weise kann jeder der fünf Knotenvarianten als massives Bauteil gedruckt werden. Dabei stellt der zentrale Verbindungsknoten der vier Stäbe eines Moduls der retikulären dreidimensionalen Struktur die Grundgeometrie dar aus der sich alle anderen Knoten entsprechend der speziellen Anforderung an den Fügungspunkt entwickeln. Da die Belastung insbesondere der Führungsknotenpunkte sehr hoch ist, werden die Knoten im SLS-Verfahren aus Nylon PA 12 gedruckt. Im Folgenden werden die einzelnen Knotenpunkte in ihrer Charakteristik beschrieben.

#### Knoten 01:

Der Knoten verbindet die vier Rundrohre eines Moduls der retikulären dreidimensionalen Struktur. Aus dieser Geometrie entwickeln sich die anderen vier Knoten. Er besteht aus einem zentralen Grundkörper mit vier Bolzen zur Aufnahme der vier Stäbe.

#### Knoten 02:

Der Knoten befindet sich an den oberen Stabenden der retikulären Grundstruktur, an denen kein pantografisches System befestigt werden muss. Er hat die Aufgabe, als Auflage und Bremse für die herabsinkenden Glasscheiben zu dienen und den oberen Teil des Teleskopstabs aufzunehmen.

#### Knoten 03:

Der Knoten befindet sich an den oberen Stabenden der retikulären Grundstruktur. An dieser Stelle muss das pantografische System befestigt werden, sowie die Führungsschiene der Teleskopstange. Er besteht aus dem Grundkörper von Knoten 01 mit zwei Laschen zur Aufnahme der Scheren des pantografischen Systems und einem zusätzlichen Bolzen auf der Unterseite zur Befestigung des unteren Teils des Teleskopstabs.

#### Knoten 04:

Der Knoten befindet sich an den unteren Stabenden der retikulären Grundstruktur. Er verfügt über einen hohlen Annex auf der Oberseite zur Aufnahme des unteren Teils der Teleskopstange.

#### Knoten 05:

Der Knoten befindet sich an den unteren Stabenden der retikulären Grundstruktur und hat die Aufgabe, die Verbindung zu den Führungsschienen herzustellen.

## Pantografisches System

Das pantografische System besteht aus drei Stäben, die sich wie Scheren in-  
einander falten lassen. Die Konstruktion ermöglicht einerseits das Falten der  
Tafelpaare und stellen andererseits die Verbindung der faltbaren Tafeln mit der  
retikulären Grundstruktur sicher. Zum pantografischen System gehören zahlrei-  
che weitere Verbindungs- und Fügungselemente, die nötig sind, damit sich die  
Tafeln in einer optimalen Geometrie ineinander falten. Die Scheren werden aus  
PMMA gefertigt und die Abstandhalter sowie weitere Kleinteile im FDM-Verfahren  
gedruckt. Die Geometrie wird an die Vorgaben des Patentes von Emilio Pérez  
Piñero angeglichen. Die konische Form mit Aussparung an der Knotenseite opti-  
miert den Bewegungsablauf des Falten, indem die Richtung vorgegeben wird.

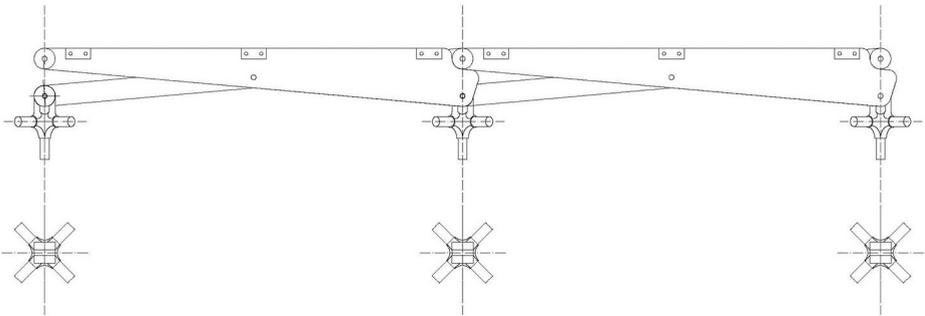


Bild 44

Überarbeitete Geometrie der Scheren und die Verbindung mit dem Knoten 03.

Zur Optimierung der Fugen zwischen den Glastafeln in entfaltetem Zustand sowie der Maximierung einer flächigen Wirkung wird die Geometrie der Abstandhalter, die mit den Scharnieren befestigt sind, verändert. Die Höhe der einzelnen Arme wird angepasst sowie die Ecken abgerundet. Die Planung sieht vor, die Scharniere an die Glasscheiben zu kleben.

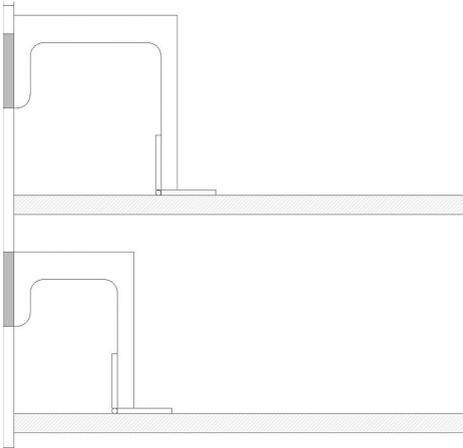


Bild 45  
Zeichnung zweier Abstandhalter mit Scharnier

## Tafeln

Als Material für die Tafeln wird ein Dünnglas-Kunststoff-Verbund gewählt, das wie ein Sandwich aufgebaut ist. Der Kunststoff befindet sich zwischen zwei Glasstafeln. Dadurch verbinden die Glas-Kunststoff-Verbundtafel eine beidseitige hochwertige Glasoberfläche mit reduzierter Eigenlast.

### 3.1.2. Arbeitsprozess

Nachdem alle Bauteile für das Arbeitsmodell 02 gefertigt und geliefert sind, beginnt die Montage der vier Module. Ziel ist es, zu überprüfen, ob die Ergebnisse der theoretischen Arbeit in der Realität funktionieren und um weitere Optimierungspotenziale zu erkennen. Der Aufbau erfolgt in folgenden Schritten.

#### Montage der faltbaren retikulären Grundstruktur

Zuerst werden jeweils vier Aluminiumrohre (RO 20x2) mit dem Knoten 01 zu einem Grundmodul verbunden und in einem zweiten Schritt an den oberen Stabenden mit den dafür entwickelten Knoten 02 oder Knoten 03 sowie an den unteren Stabenden mit dem Knoten 04 verbunden. Um ein Abrutschen der Aluminiumrohre von den Achsen der Knoten zu verhindern, werden Kappen zum Aufstecken

auf die Knoten entworfen und dreidimensional gedruckt. Das Ergebnis in Bild 46 zu erkennen.

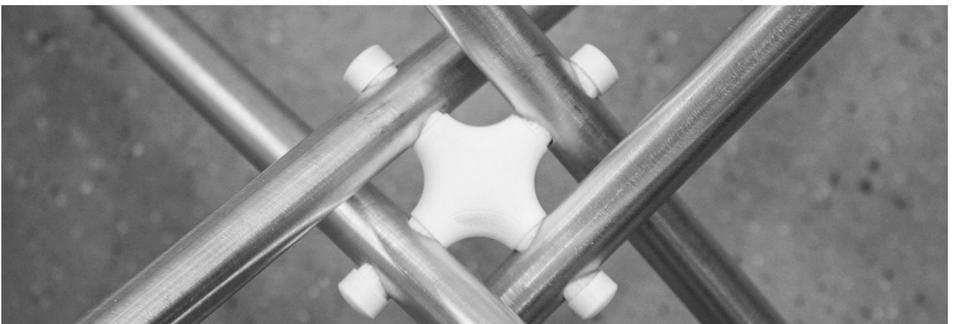
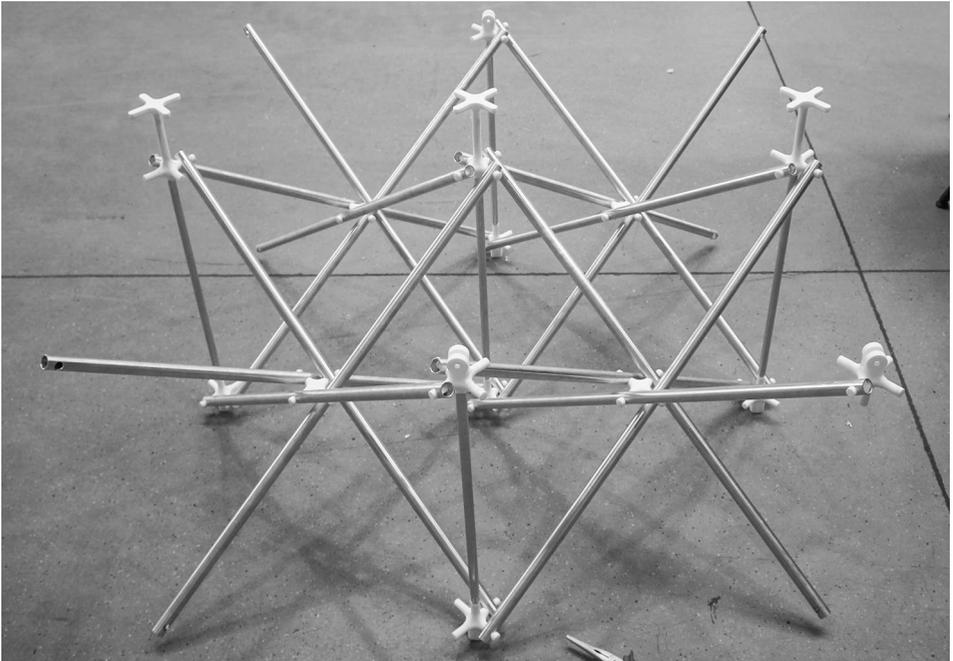


Bild 46

Retikuläre Grundstruktur in entfaltetem Zustand und Knoten 01 mit Verschlusskappen.

## Montage des pantografischen Systems.

An die Scheren des pantografischen Systems werden die gedruckten Abstandhalter befestigt. Mit den fertig montierten Abstandhaltern werden die Scheren dann an die dafür vorgesehenen Laschen von Knoten 03 mittels Schraubverbindungen befestigt. Während des gesamten Prozesses der Montage ist eine ständige Überprüfung der Geometrie im Zusammenspiel mit dem Faltsmechanismus notwendig.

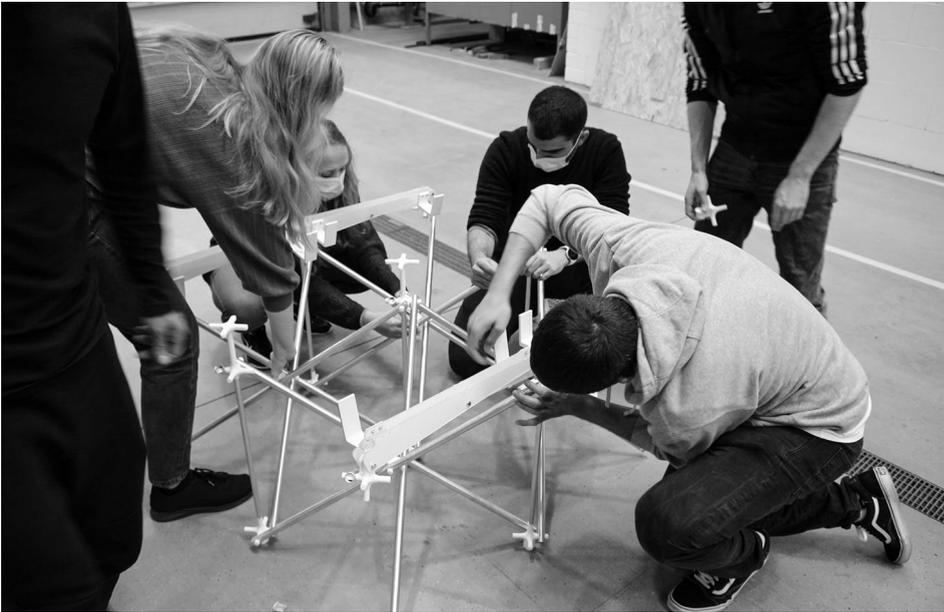


Bild 47

Masterstudierende bei der Montage des Arbeitsmodells 02.

## Montage der zusätzlichen Randelemente an die Grundstruktur

Nach der Montage des pantografischen Systems werden »halbe« Module, bestehend aus jeweils 4 Aluminiumrohren (RO 20x2) halber Länge an die oberen und unteren Knoten montiert, analog zum ersten Prototyp aus dem Jahr 1971. Zur Verbindung der 4 halben Stäbe eignet sich der Knoten 01.

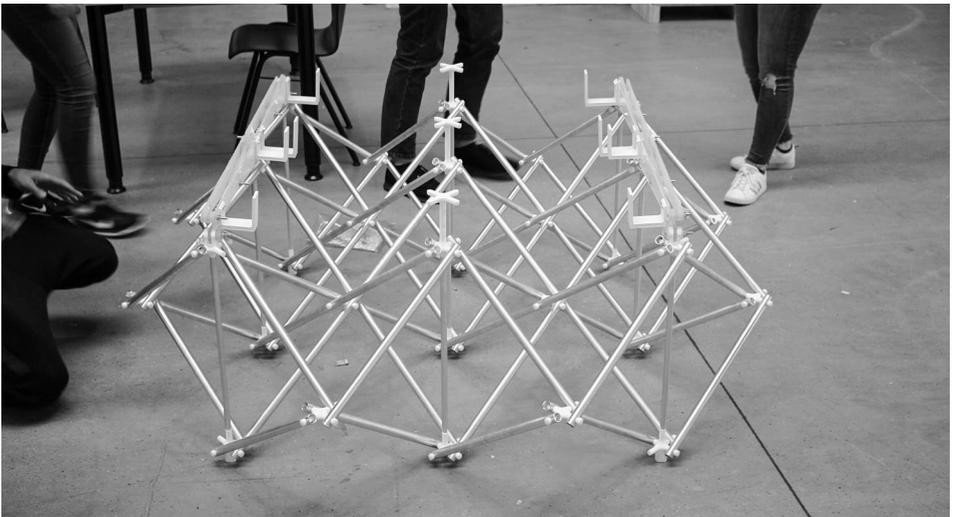


Bild 48  
Masterstudierende bei der Montage der »halben Module« (oben), Montierte Grundstruktur (unten).

## Montage der Glas-Kunststoff-Verbundtafeln

Um die Glas-Kunststoff-Verbundtafeln mit dem pantografischen System zu verbinden, müssen zuvor die Scharniere kraftschlüssig mit den Platten verbunden werden. Statt mit Schraubverbindungen werden die Scharniere an die Glasoberflächen geklebt. Verwendung findet ein dafür geeignetes Klebeband. Die Scharniere werden daraufhin an die Scheren des pantografischen Systems geschraubt.

Nach wenigen finalen Montagearbeiten ist das Arbeitsmodell 02 fertiggestellt und die Bewegungsabläufe können durch Falten und Entfalten überprüft werden. Abschließend wird die Mechanik ausprobiert, indem die Studierenden das Ausschnittmodell der überarbeiteten Variante des Prototyps falten und entfalten. Das Ergebnis ist insgesamt positiv. Der Mechanismus funktioniert und die Geometrie passt.

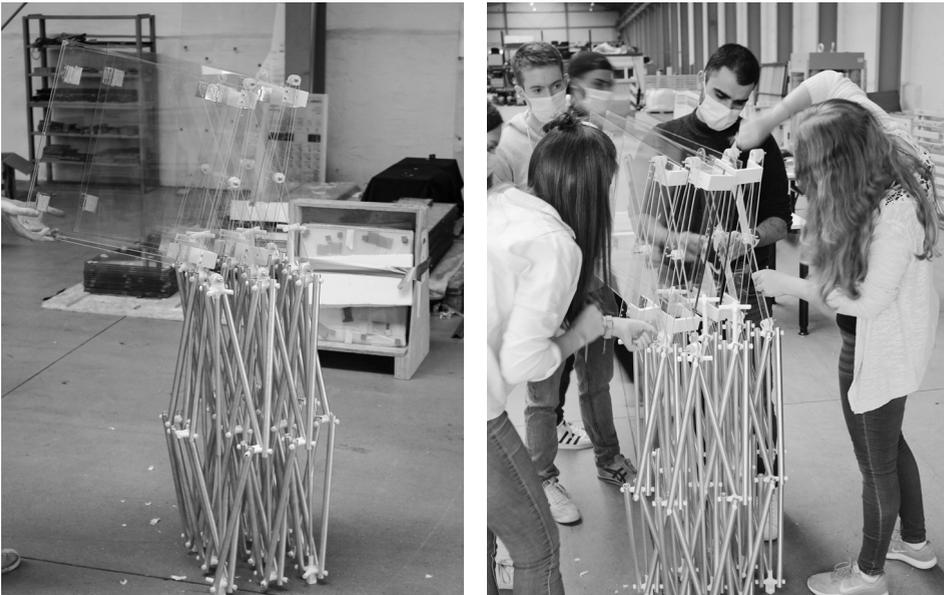


Bild 49  
Letzte Korrekturen am gefalteten Arbeitsmodell 02.

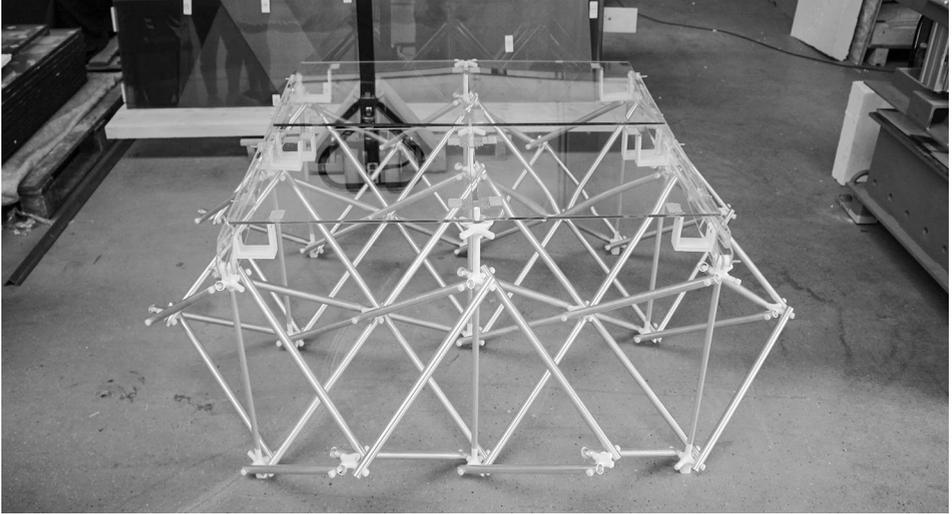


Bild 50

Arbeitsmodell 02. Teilnehmer\*innen: Sara Schweinsberg, Lisa Efler, Alexander Pilar, Laura Stausberg, Ali Arslan, Enver Güngör, Pauline Grobbel, Cosimo Damiano Pellegrino, Katrin Hombeuel.

Aus den Erfahrungen mit dem Arbeitsmodell ergeben sich weitere Optimierungspotenziale.

Die Scheren des pantografischen Systems aus Polycarbonat (PC) sind in einer Richtung zu wenig formstabil und führen zu Ungenauigkeiten während des Faltprozesses. Ein Materialwechsel zu Aluminium wird diskutiert, analog zu den Aluminiumrohren der retikulären Grundstruktur.

Die 3D gedruckten Kappen zur Verhinderung des Abrutschens der Aluminiumrohre von den Knoten sitzen nicht fest genug auf den Knoten und fallen selbstständig ab.

Der Knoten 02, der als Auflager für die herabsinkenden Glastafeln dienen soll, muss angepasst werden. Sowohl die Geometrie als auch die Höhe des Knotens verhindern, dass der Knoten die ursprüngliche Aufgabe übernehmen kann.

Darüber hinaus kristallisiert sich heraus, dass die Abstandhalter, die jeweils zwei Glastafeln miteinander verbinden und gleichzeitig mit dem pantografischen System verbunden sind, geometrisch und bezüglich der Materialität überarbeitet werden müssen. Ziel ist, das Standardscharnier aus Metall zu ersetzen und stattdessen ebenfalls dreidimensional zu drucken.

### 3.2. Lehrstuhlinterne Nacharbeit

Arbeitsmodell 02 resultiert aus dem Wahlmodul im Sommersemesters 2021 und wird auf Basis der Nacharbeit zum Arbeitsmodell 01 grundlegend neu aufgebaut. Das hyperkubische Glas in den Abmessungen von 1.500 mm auf 1.500 mm mit vier Glastafeln entspricht den Empfehlungen der Berechnungen in Bezug auf den Querschnitt, die Materialität und die Geometrie der Gesamtkonstruktion. Eine Motorisierung zum automatisierten Faltmechanismus ist noch nicht eingeplant.

Die Nacharbeit durch Mitarbeiter\*innen des Lehrstuhls für Tragkonstruktion zielt auf die Herstellung eines Exponates für die Sonderschau »glass technology live« der Messe Glasstec ab. Die Messe ist pandemiebedingt nun auf das Jahr 2022 verlegt

#### 3.2.1. Analyse Arbeitsmodell 02

Als Resultat aus der Analyse des Arbeitsmodells 01 wird das Exponat zur Glasstec in der horizontalen Variante mit den Außenabmessungen 3.500 mm auf 3.500 mm geplant. Die faltbare Glastafelebene besteht aus insgesamt 36 Elementen. Arbeitsmodell 02 bildet einen Prototypen für den Faltmechanismus ab. In der Nacharbeit zu Arbeitsmodell 02 zeigt sich, dass ein Exponat mit den Außenabmessungen von 2.500 mm auf 2.500 mm ebenfalls realisierbar ist, um das Faltprinzip zu zeigen. Zeitgleich ist die technische und finanzielle Umsetzung vereinfacht gegeben. Das Exponat auf der Glasstec 2022 wird aus diesen Gründen auf 16 Glastafeln und den Außenabmessungen von 2.500 mm auf 2.500 mm reduziert. Zeitgleich verringern sich die Gesamtkosten. Allerdings wird im Zuge der Reduzierung der Abmessungen auf eine Neuberechnung verzichtet. Die Querschnitte und Knoten verbleiben mit den Lastannahmen der großen Variante. Dadurch kann das Exponat bei Bedarf und mit geringem Aufwand erweitert werden.

## Position 07 und Position 08: Abstandhalter

Die Verbindungselemente des pantografischen Systems an die Glastafeln in Arbeitsmodell 02 sind in Bild 53 gezeigt. Der Abstandhalter wird mit dem Kunststoff Poly lactid (PLA) im Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren additiv hergestellt. Anschließend sind herkömmliche Metallscharniere angeschraubt und über ein doppelseitiges Klebeband mit der Glastafel fixiert. Die Verbindung zwischen den Glastafeln besteht aus einer Kombination aus Metallscharnieren und Polycarbonat. Beide Positionen zeigen einige Schwachstellen. Die Scharniere öffnen sich mehr als gewünscht und Verschiebungen infolge der flexiblen Klebeverbindungen treten auf. Das gedruckte Verbindungselement aus Poly lactid (PLA) zeigt herstellungsbedingt richtungsabhängige Materialeigenschaften. Die Verformungen im eingebauten Abstandhalter sind zu groß.

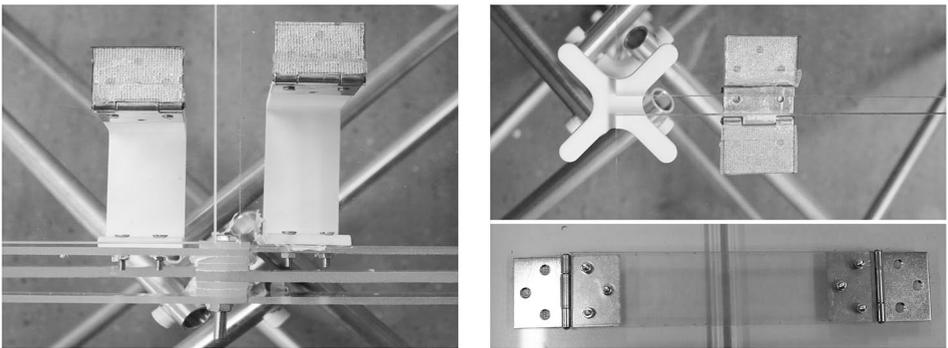


Bild 51

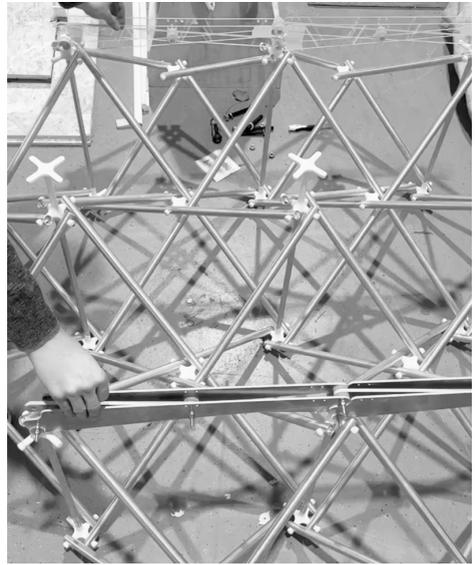
Abstandhalter pantografisches System-Glas (links), Abstandhalter Glas-Glas (rechts).

Die Abstandhalter bestehen aus einem Metallscharnier und 3D gedrucktem Poly lactid (PLA), die über eine Schraubverbindung formschlüssig miteinander verbunden werden. Es entstehen weitere Verbindungsstellen. Das Bauteil wird im 3D-Druck gefertigt und beweglich gedruckt. Die Modelle werden im Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren probeweise gedruckt. Allerdings stellt sich heraus, dass dieses Druckverfahren nicht geeignet ist. Anstatt doppelseitigem Klebeband als stoffschlüssige Verbindung wird ein zweikomponentiger Klebstoff verwendet, der auf einen Scharnierflügel aufgebracht und auf das Glas mittels Schablone passgenau geklebt wird. Die Erfahrung mit dem Arbeitsmodell zeigt,

dass das komplette Bauteil zukünftig dreidimensional gedruckt werden soll. Die Geometrie der Abstandhalter und Scharniere sind im Gegensatz zu den Knoten noch nicht abschließend am Krafffluss orientiert. Im Wintersemester 2021 sollen Entwürfe von Studierenden entwickelt und gedruckt werden.

Das pantografische System verbindet die Unterkonstruktion mit der faltbaren Glasfläche. Gleichzeitig geben die Stäbe des pantografischen Systems die Bewegung vor. Im entfalteten Zustand müssen die Stäbe stabil sein sowie die Last sicher und ohne große Verformung oder Versagen ableiten. Zu Beginn der Bewegung verändern sich die Abstände der Unterkonstruktion, die Bewegung muss über das pantografische System an die Glastafeln weitergegeben werden. In der aktuellen Ausführung des pantografischen Systems sind drei Bewegungsrichtungen möglich: nach unten gerichtet, nach oben gerichtet und eine unbewegliche Verformung mit einhergehendem Versagen der Konstruktion. Die Bewegungsrichtung des pantografischen Systems in der horizontalen Ausführung muss eindeutig definiert sein, ohne dass die Glastafelebene gekrümmt ist. Polycarbonat (PC) als Material, wie im Arbeitsmodell 02, ist zu weich, es stellen sich ungewollte Verformungen ein. Im Anschluss an das Wahlmodul im Sommersemester 2021 wird das pantografische System durch Aluminiumstäbe ersetzt. Dadurch ergibt sich eine steifere Konstruktion.

Bild 52  
Pantografisches System aus Polycarbonat  
oben und Aluminium unten im Bild.



### 3.2.2. Meilenstein 06. Beteiligung der Metallwerkstatt

Im Arbeitsmodell 02 werden die Aspekte der Nacharbeit durch wissenschaftliche Mitarbeiter\*innen des Lehrstuhl für Tragkonstruktion durchgeführt und überprüft. Das hyperkubische Glas lässt sich mit den neuen Materialien in den gewünschten Abmessungen herstellen. Die Motorisierung wird in Zusammenarbeit mit der Metall- sowie Elektrowerkstatt am Campus Hölderlinstraße der Universität Siegen untersucht und zielt auf die Realisierung des Exponates zur Sonderschau »glass technology live« auf der Glasstec 2022 ab.

## 4. Wintersemester 2021

### 4.1. Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke«

#### 4.1.1. Ausgangslage

Im Wintersemester 2021 beschäftigen sich die Masterstudierenden mit der Optimierung des im Sommersemester 2021 gebauten Arbeitsmodells 02. Gemeinsam werden die problematischen Punkte dokumentiert und analysiert. Ziel dieses Wahlmoduls ist es, alternative Lösungen für die festgestellten Mängel des Modells zu suchen. Konkret werden drei Punkte zur Optimierung ausgegeben.

- A Optimierung der Geometrie des Knoten 02.
- B Geometrische Optimierung der Abstandhalter.
- C Alternative zur Verhinderung des Abrutschens der Aluminiumrohre von den Knotenachsen.

Tagsüber werden die alternativen Vorschläge entworfen sowie die notwendigen Druckdateien für den 3D-Drucker erstellt und an die Modellbauwerkstatt des Departments Architektur übermittelt. In der Nacht werden die neuen Entwürfe gedruckt und anschließend im Modell auf eine Eignung überprüft.

#### 4.1.2. Arbeitsprozess

Insgesamt bilden sich fünf Arbeitsgruppen, bestehend aus jeweils zwei Studierenden, diese arbeiten an den Optimierungen der Details. Die Ergebnisse sind entsprechend vielfältig und werden im Folgenden beschrieben.

##### Gruppe 1: Paul Loos und Jacqueline von der Burg

Das neue Design für Knoten 03 der Gruppe 1 zielt auf eine Vergrößerung der Kontaktfläche der Glastafeln mit dem Knoten ab. Funktional ist die Variante eine Verbesserung. Nachteilig ist die Größe des Details, die das Erscheinungsbild des hyperkubischen Glases verändert.

Die Abstandhalter werden dahingehend verändert, das Scharnier und Abstandhalter eine Einheit bilden und in einem Prozess in 3D gedruckt werden. Die ausgedruckten Muster zeigen, dass das gedruckte Scharnier einwandfrei funktioniert. Auf der Seite des gedruckten Scharniers, das mit den Glastafeln verbunden

werden muss, wird eine Vertiefung zur Aufnahme des flüssigen Klebstoffes eingeplant, um eine saubere Klebung zu ermöglichen, die nicht über die Ränder des Scharniers hinausgeht. Neben der Vertiefung verfügt die Auflagefläche über zwei Löcher. Durch eines der Löcher wird der flüssige Klebstoff eingeführt bis dieser aus dem andern Loch beginnt herauszuquellen.

Um das Abrutschen der Verschlusskappen von den Knoten zu verhindern, integriert Gruppe 1 Gewinde in die Knoten, so dass die Kappen nicht aufgesteckt, sondern aufgeschraubt werden.

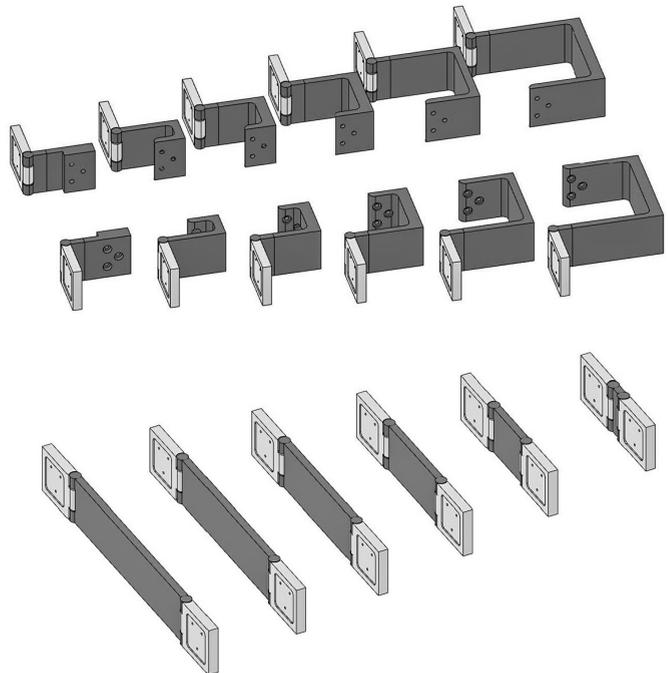


Bild 53  
Design der Abstandhalter, Gruppe 1.

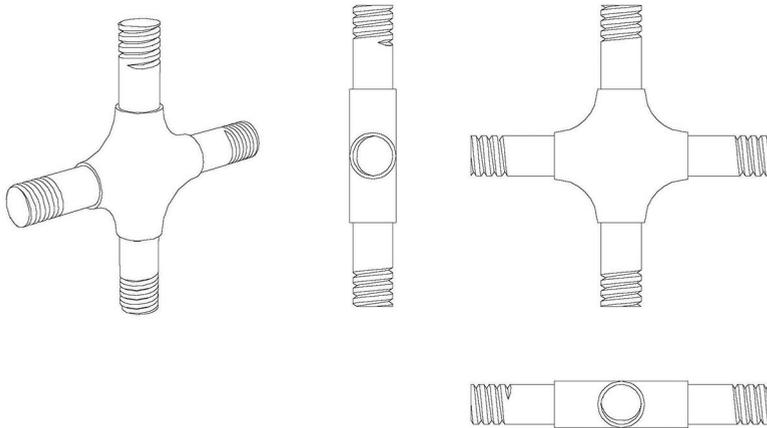


Bild 54  
Design der Gewinde am Beispiel des Knoten 01, Gruppe 1.

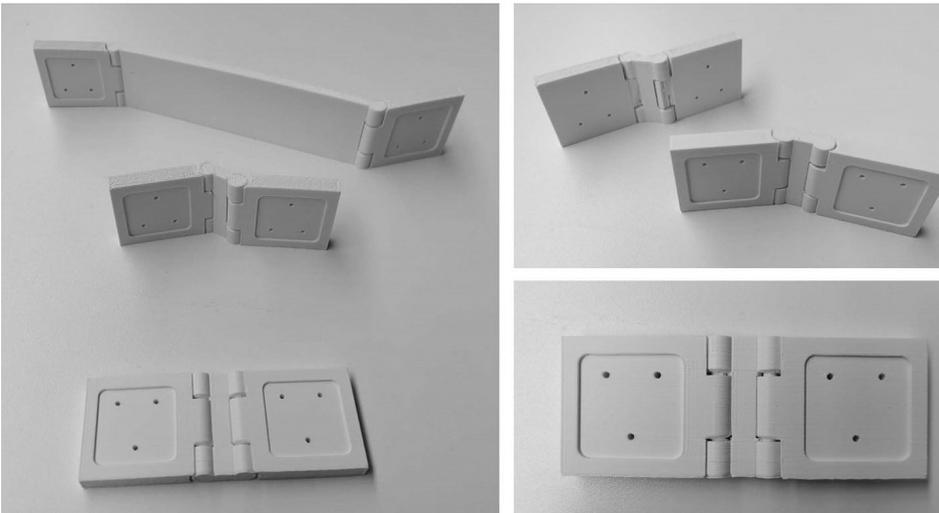


Bild 55  
Ausgedruckte Muster der Abstandhalter mit Scharnier, Gruppe 1.

## Gruppe 2: Dilara Irmak und Tayyeba Riaz

Gruppe 2 entwirft einen Knoten 02, der den Kontakt mit den Glasflächen maximal reduziert. Der aufgelöste Knoten hat eine elegante Anmutung. Leider gelingt es nicht, diesen Knotenpunkt zu drucken und kann nicht am Modell überprüft werden. Wie Gruppe 1 plant auch Gruppe 2 Gewinde in den Knoten zu integrieren, um ein Abrutschen der Kappen zu verhindern. Die Abstandhalter mit Scharnier werden als eine Einheit im 3D-Druckverfahren hergestellt. Die Flächen zur Klebung an die Scheiben erhalten eine Vertiefung und 3 Löcher zum Einführen des Klebstoffs sowie zum Ausweichen des überschüssigen Klebstoffs. Die gedruckten Muster zeigen eine einwandfreie Funktion der Scharniere.

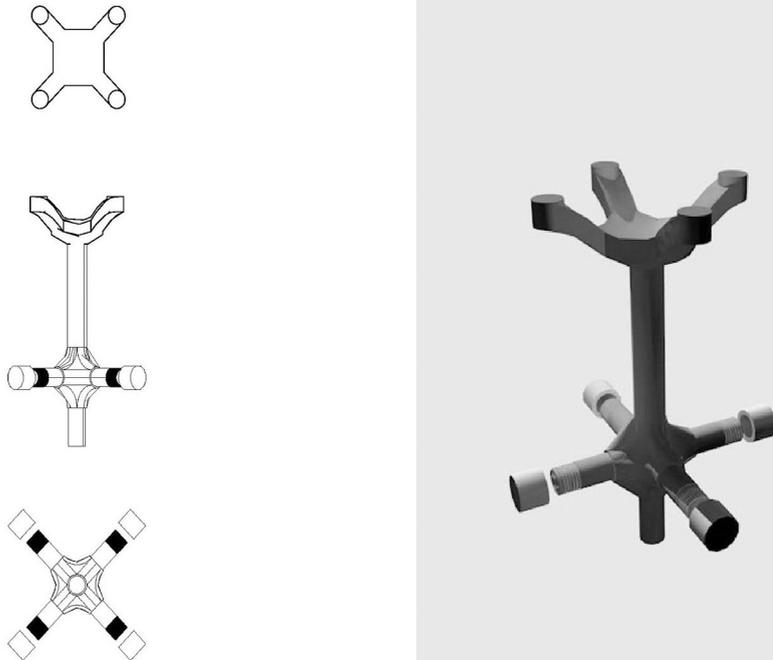


Bild 56  
Design von Knoten 02. Gruppe 2.

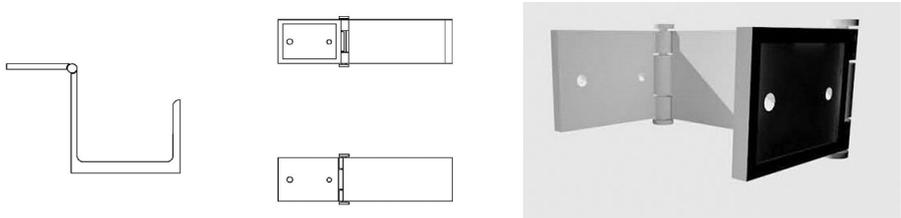


Bild 57  
 Design des Abstandhalters an der Position des pantografischen Systems. Gruppe 2.

Gruppe 3: Kimberley Jonasson und Christine Varkentin

Ähnlich wie der Knoten 02 der Gruppe 2, trägt der Entwurf von Gruppe 3 die Platten auf jeweils vier minimierten Punktflächen. Die Abstandhalter und Scharniere werden als Einheit geplant und im 3D Druckverfahren hergestellt. Die Muster zeigen ein perfektes Funktionieren der Scharniere. Zur Aufnahme des Klebstoffes wird eine Vertiefung in die Kontaktflächen geplant sowie zwei Löcher zum Einbringen des Klebstoffs und zum Entweichen.

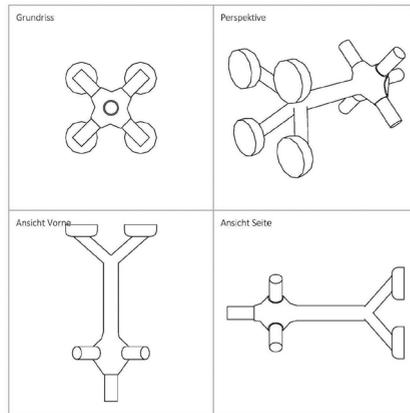


Bild 58  
 Design von Knoten 02. Gruppe 3.

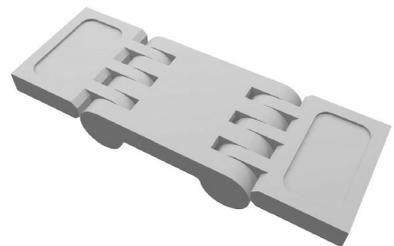
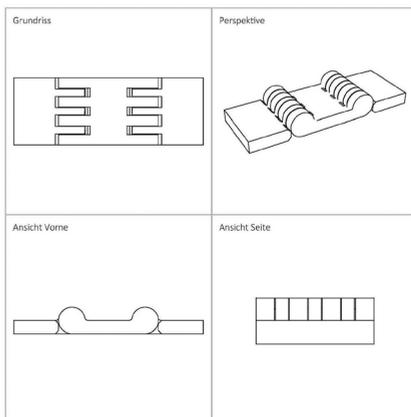
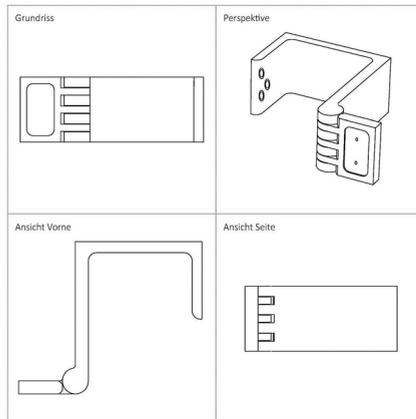


Bild 59  
Design der Abstandhalter, Gruppe 3.

#### Gruppe 4: Lilian Kraft, Isabel Pazmann

Gruppe 4 entwirft einen Knoten 02 mit einer zusätzlichen Funktion. Durch ein integriertes Gewinde kann die Höhe des Knotenpunktes im montierten Zustand nachjustiert werden. Außerdem vergrößert der Knoten die Kontaktfläche zum Glas ohne die Menge des Materials insgesamt zu vergrößern. Die Bolzen des

Knotens zur Aufnahme der Aluminiumstäbe werden mit Gewinden versehen, um die Befestigung der Kappen zur Vermeidung des Abrutschens zu optimieren. Der Entwurf besteht durch leichte Anmutung und der funktional sinnvollen Zusatzfunktion.

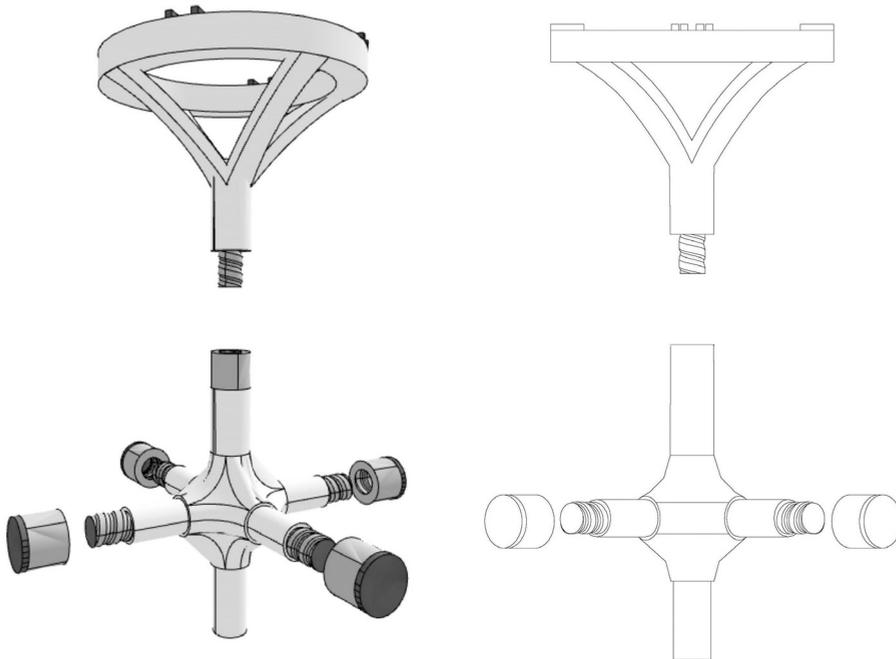


Bild 60  
Entwurf des Knoten 02, Gruppe 4.

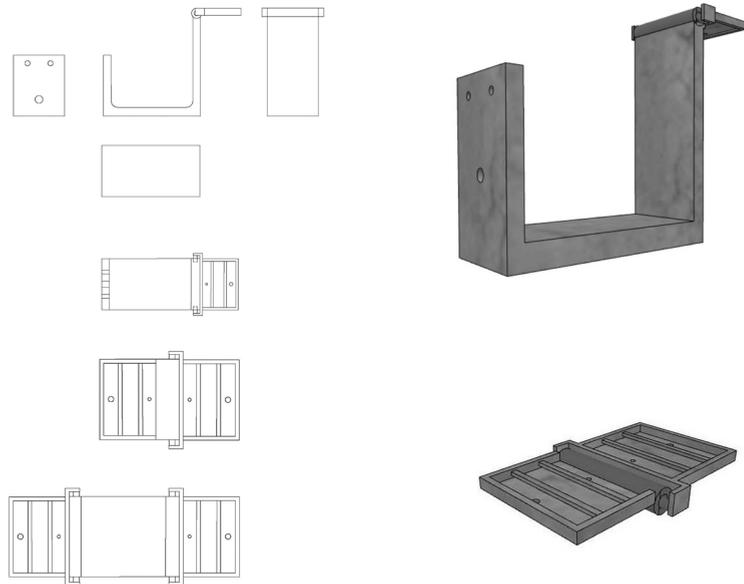


Bild 61

Design der Abstandhalter, Gruppe 4.

#### Gruppe 5: Silas Haase und Luisa Hamers

Der Entwurf von Knoten 02 der Gruppe 5 bleibt nah an dem existenten Modell. Die Flächen zur Aufnahme der Glastafeln werden leicht verändert, indem ein zusätzliches mittiges Kreuz die Lage der Tafeln genauer definiert. Nach dem Druck lässt sich allerdings feststellen, dass das Detail eine sehr geringe Toleranz erfordert, die nicht der Realität entspricht. Theoretisch passen die Tafeln exakt in die dafür vorgesehen Flächen. In der Praxis sind die Toleranzen deutlich größer, was zum Teil an den vielen Verbindungen liegt, die alle über eine gewisse Freiheit verfügen. Die Knoten werden mit Gewinden versehen. Bei dem Entwurf der Abstandhalter zeigt sich eine interessante Variante. Durch einen herausnehmbaren Stift lassen sich die einzelnen Teile getrennt voneinander drucken und nachträglich mit dem Stift zu einem Scharnier verbinden. Das ermöglicht eine alternative Montageabfolge.

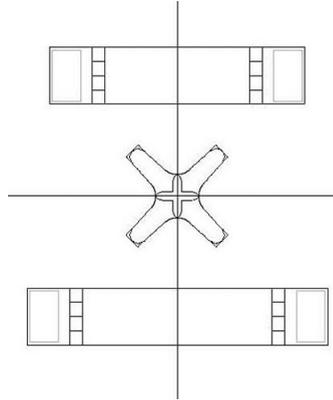
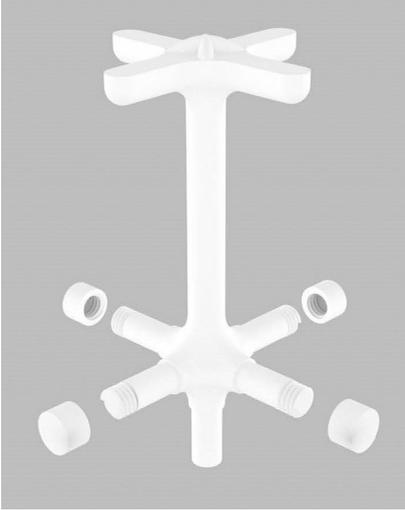


Bild 62  
Design der Abstandhalter und Knoten 02, Gruppe 5.

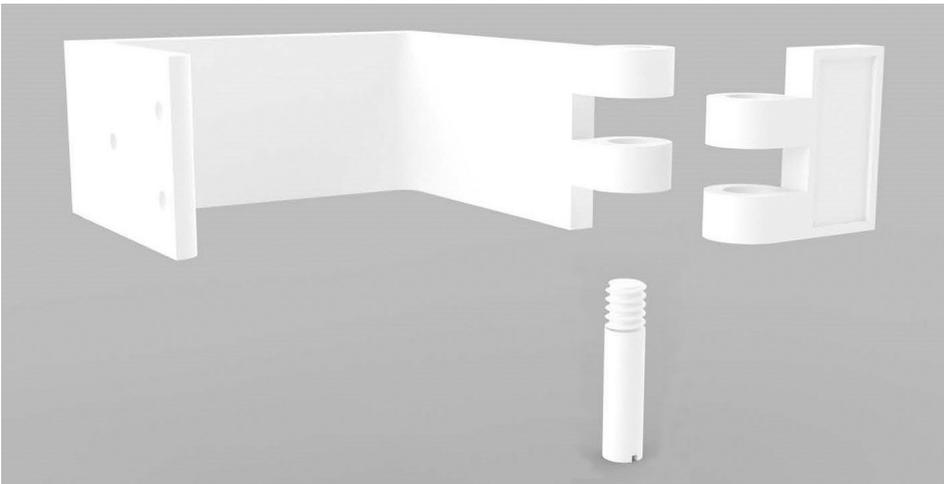


Bild 63  
Design der Abstandhalter am pantografischen System, Gruppe 5.

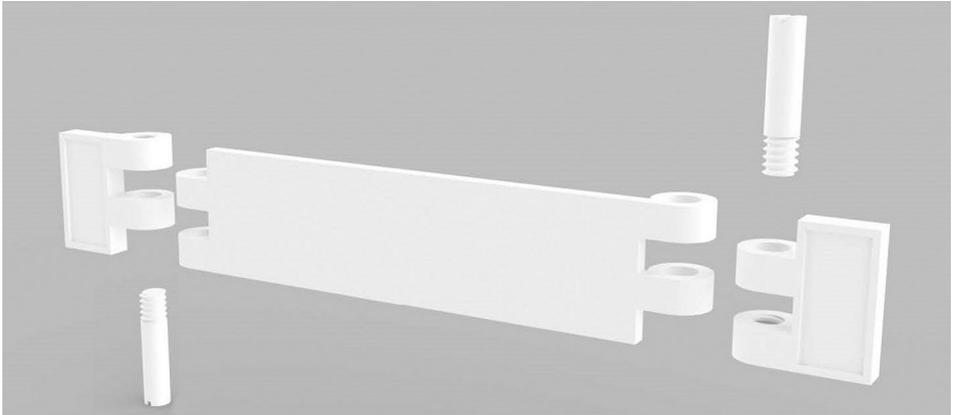


Bild 64  
Design der Abstandhalter zwischen zwei Tafeln, Gruppe 5.

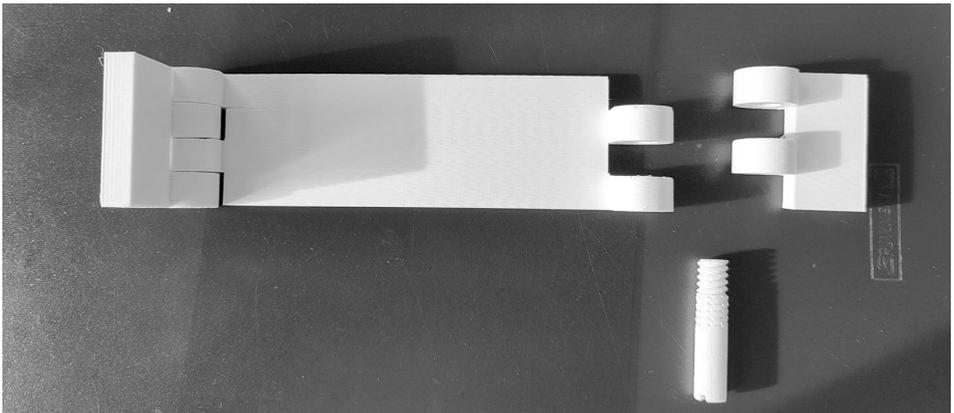


Bild 65  
Muster der Abstandhalter zwischen zwei Tafeln, Gruppe 5.

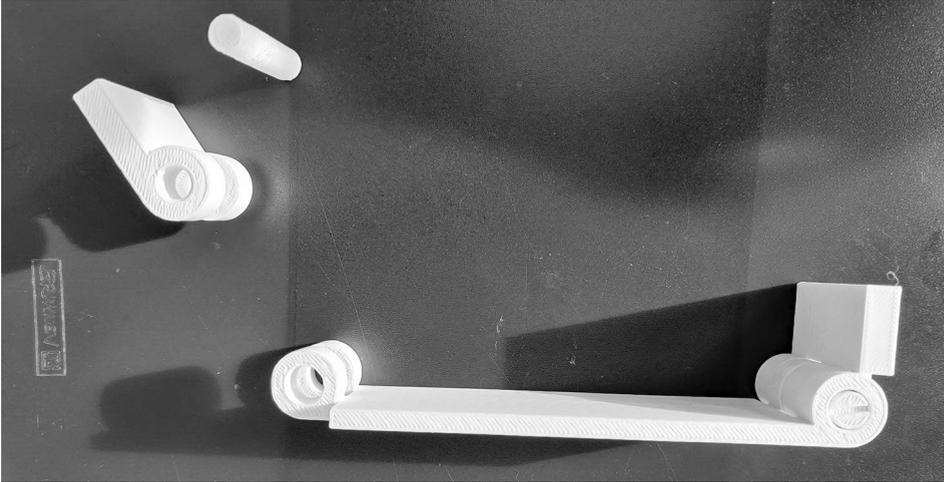


Bild 66  
Muster der Abstandhalter zwischen zwei Tafeln, Gruppe 5.

#### 4.2. Lehrstuhlinterne Nacharbeit

Die Nacharbeit im Wintersemester 2021 durch die Mitarbeiter\*innen des Lehrstuhls für Tragkonstruktion erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Metallwerkstatt am Campus Hölderlinstraße der Universität Siegen. Das hyperkubische Glas aus Arbeitsmodell 02 wird in die Einzelteile zerlegt und anschließend neu aufgebaut. Dadurch ergeben sich vertiefte Erkenntnisse hinsichtlich Funktion und Faltmechanismus der Konstruktion. Die Materialien werden festgelegt und beschafft. Die Einzelelemente des hyperkubischen Glases beschreibt der Positionsplan des Exponates in Bild 67. Auf eine zeitliche Reihenfolge während der Planung unterschiedlicher Ansätze und Varianten ist an dieser Stelle verzichtet. Die einzelnen Positionen werden der Reihe nach beschrieben und im Einbauzustand am Exponat des hyperkubischen Glases gezeigt.

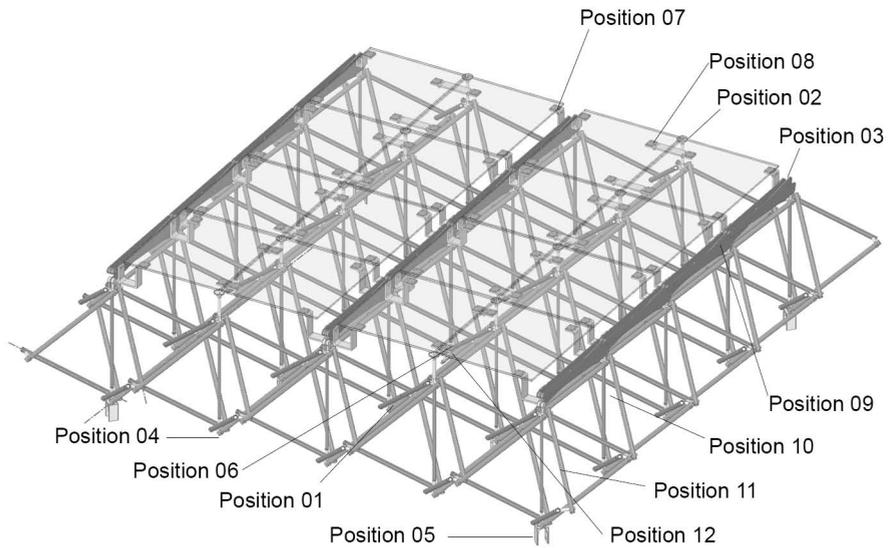


Bild 67  
Positionsplan

Der Knoten in der Mitte stellt die Verbindung der Aluminiumrohre sicher und wird in zwei Ausführungen hergestellt. Der Knoten wird im selektiven Lasersintern (SLS) Verfahren 3D aus Nylon PA12 (PA2200) gedruckt. Bild 70 zeigt die beiden Knotenvarianten. Um die seitlich auskragenden Bolzen ist eine Messinghülse angebracht, um einen direkten Kontakt zwischen Kunststoffknoten und Aluminiumrohr zu verhindern. Um ein Abrutschen des Rohres vom seitlichen Bolzen sicherzustellen, wird eine Kappe mittels Schraube in das im Bolzen liegende Innengewinde eingeschraubt.



Bild 68

Knoten Mitte, Position 01. Eckknoten (links) und Mittelknoten (rechts).

### Position 02: Knoten Abstand

Knoten 02 dient den Glastafeln als zusätzliches Auflager von maximal vier Glas- tafeln. Während der Faltung übernimmt der Knotenpunkt eine wichtige Aufgabe: über einen druckluftbetriebenen Stempel unterstützt der Knoten die Bewegungs- richtung bei der Faltung, verhindert zeitgleich beim Entfalten ein Durchschlagen und reduziert die Bruchgefahr der Glastafel. Der Knoten wird im selektiven Laser- sintern (SLS) Verfahren aus Nylon PA12 (PA2200) gedruckt.

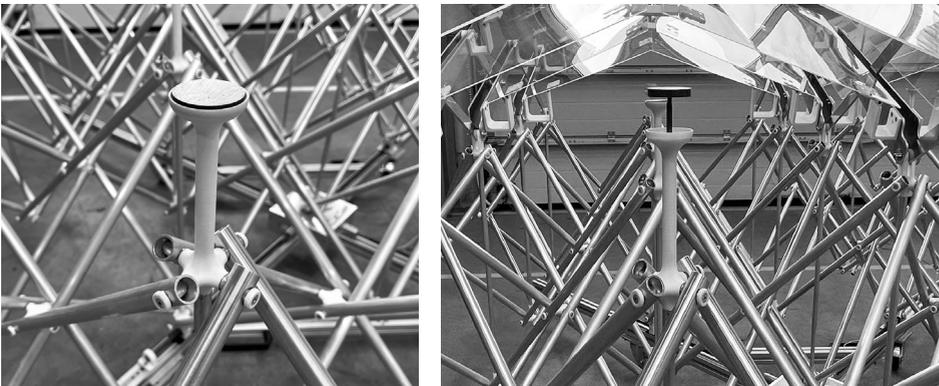


Bild 69

Knoten 02, Abstandsknoten.

### Position 03: Knoten Pantografisches System

Knoten 03 ist ein zentrales Element im hyperkubischen Glas. Der Knoten verbindet das Stabwerk der Unterkonstruktion mit der Oberkonstruktion aus pantografischem System und Glastafeln. Dazu sind dem Knoten zahlreiche Funktionen wie Lastabtrag und Beweglichkeiten zugeordnet. Der Knoten wird im selektiven Lasersintern (SLS) Verfahren aus Nylon PA12 (PA2200) gedruckt. Messinghülsen ergänzen nachträglich den Knotenpunkt. Der Anschluss an das pantografische System erfolgt über ein im Knotenkopf eingebrachtes Messingelement mit Innengewinde. Das Verbindungselement stellt eine Gewindeschraube dar und sichert die Beweglichkeit. Bild 70 zeigt den Knoten im Einsatz mit den Anschlüssen.



Bild 70  
Knoten 03 mit Anschluss an das pantografische System.

#### Position 04: Knoten unten, Luft

Knoten 04 verbindet die Aluminiumrohre des Stabwerks miteinander und hat einen Anschluss für den Teleskopstab. Der Knoten ist nicht gelagert und schwebt in der Luft. Der Knoten wird im selektiven Lasersintern (SLS) Verfahren aus Nylon PA12 (PA2200) gedruckt.



Bild 71  
Knoten 04.

#### Position 05: Knoten Gleiter

Es ergeben sich für Position 05 zwei unterschiedliche Ausführungen. Der Knoten befindet sich im Grundriss über der Lagerkonstruktion. Dabei werden insgesamt vier Knoten angetrieben. Der Knoten ist additiv hergestellt, eine Führungsmutter eingesetzt und auf eine Gewindespindel aufgezogen. Der nicht angetriebene Knoten gleitet entlang der Lagerkonstruktion. Ein Antrieb ist nicht möglich, da während des Faltmechanismus sich die Knotenabstände untereinander verändern. Zusätzlich wird keine Eigenlast in die Lagerkonstruktion über die gleitenden Knoten eingeleitet. Der Knoten wird im selektiven Lasersintern (SLS) Verfahren aus Nylon PA12 (PA2200) gedruckt. Bild 72 zeigt beide Ausführungen des angetriebenen und nichtangetriebenen Knotens.

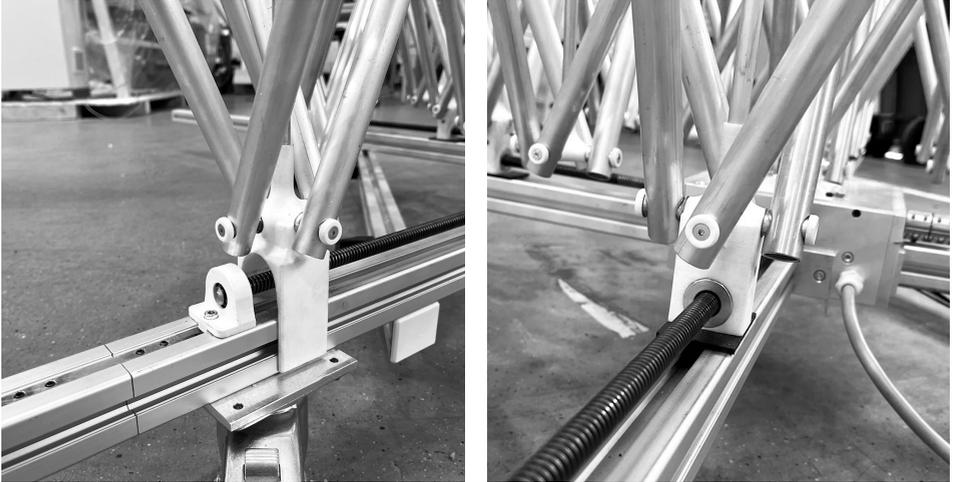


Bild 72

Knoten 05: nichtgetriebene Variante (links) und angetriebene Variante (rechts).

#### Position 06: Knoten Antrieb

Das feste Lager in der Mitte der Konstruktion ist unverschieblich mit dem Gehäuse der Kegelhäder verschraubt. Der Knoten wird im selektiven Lasersintern (SLS) Verfahren aus Nylon PA12 (PA2200) gedruckt.



Bild 73

Knoten 06 mit Befestigung auf dem Gehäuse des Antriebs.

Position 07: Abstandhalter Glas-Pantografisches System und Position 08: Abstandhalter Glas-Glas

Die Abstandhalter werden in einem 3D-Druckverfahren im selektiven Lasersintern (SLS) mit Nylon PA 12 (PA2200) gedruckt. Ein 3D-Druck eines Scharniers ist zwar möglich, zeigt aber zu große Bewegungen und gestaltet sich als zu flexibel für die Anwendung im hyperkubischen Glas. Die Bauteile Abstandhalter und Scharnierflügel werden getrennt voneinander gedruckt und anschließend über einen Metallstift miteinander verbunden. Vorteile ergeben sich in der Beweglichkeit und auch dem nachträglichen Austausch einer defekten Glastafel, da lediglich die Metallstifte aus dem Gelenk entfernt und die Glastafel einzeln abgenommen werden kann.

Bild 74  
Scharnier mit Metallstift.



#### Position 09: Pantografisches System

Das pantografische System aus Aluminium EN-AW 6060 T6 der Dicke 4 mm wird beibehalten. Die Analyse des Arbeitsmodells 02 zeigt, dass dem pantografischen System keine eindeutige Richtung der auszuführenden Bewegung vorgegeben ist. Diese Initialbewegung kann über eine Anpassung der Geometrie mit Überhöhung des Verbindungspunktes über Knoten 02 erfolgen. Dadurch ist beim Zusammenfahren eine eindeutige Richtung vorgegeben. Auf die Änderung der Geometrie der Scheren des pantografischen Systems wird aus ästhetischen Gründen verzichtet.



Bild 75  
Pantografisches System im Prozess des Faltens.

#### Position 10: Teleskopstab

Der Teleskopstab aus Aluminium EN-AW 6060 T6 mit einem Rundstab RD 10 und einer Führungshülse RO 14 x 1,6 dient im ausgefahrenen Zustand einem sicheren Lastabtrag. Es stellt sich heraus, dass der Stempel in Position 02 nicht mit ausreichender Kraft gedrückt werden kann. Daher sollte der Teleskopstab unterhalb von Position 02 mit einem Pneumatikzylinder ausgebildet werden, um im Bewegungsablauf eine Richtung vorzugeben.

#### Position 11: Diagonalstab

Die Diagonalstäbe der Unterkonstruktion aus Aluminium EN-AW 6060 T6 und dem Querschnitt RO 20 x 2 sind zwischen den Knoten angeordnet und leiten die Lasten des Hyperkubischen Glases in die Lagerkonstruktion ab.

Bild 76  
Diagonalstäbe des Stabwerks.



#### Position 12: Glastafel

Die faltbare Glasfläche ist ursprünglich aus Dünnglas-Polycarbonat-Verbundtafeln geplant.<sup>28</sup> Im Vergleich zu einem Verbundsicherheitsglas ergeben sich hinsichtlich Querschnittsdicke und Eigenlast Vorteile. Alternativ ist das hyperkubische Glas mit Floatglas der Nenndicke 2 mm in der Werkstatt hergestellt. Dabei sind Montagebleche aus Aluminium mit eingeschossenen Bolzen auf der Glastafel verklebt, um anschließend die Verbindung mit dem dreidimensional gedruckten Abstandhalter kraftschlüssig herzustellen. Während des Faltvorgangs stellen sich die Glastafeln über den Druckluftknoten nicht wie gewünscht auf. Für das Exponat wird Polysterol (PS)<sup>29</sup> der Dicke 2 mm verwendet und über eine Schraubverbindung mit Senkkopfschrauben an den Abstandhalter befestigt. Trotz der geringen Eigenlast der Polysterolplatten können diese nicht über den druckluftbetriebenen Stempel hochgedrückt werden. Um die Faltung als Exponat zu ermöglichen, wird das hyperkubische Glas nicht komplett ausgefahren.

28 Die Verbundtafel aus Dünnglas und Polycarbonat werden momentan in einem gemeinsamen Forschungsprojekt des Lehrstuhls für Tragkonstruktion und KRDCoatings GmbH entwickelt.

29 Kern 2019.

## Antrieb

Es erfolgt die Implementation des Antriebs über Kegelräder und Gewindespindel. Ein schaltbarer Elektromotor im Mittelpunkt des Exponates treibt die Kegelräder an, die in derselben Geschwindigkeit die Bewegung über Gewindespindel und Bewegungsmuttern auf die vier verschieblichen Lager der Stabwerkes übertragen. Die Steuerung des Faltmechanismus erfolgt extern über ein Steuerungselement.

## Transport

Während der Planung wird darauf geachtet, dass das hyperkubische Glas im gefalteten Zustand möglichst geringe Abmessungen aufweist und somit auf eine Palette zum Transport platziert werden kann. Die Lagerkonstruktion des Hyperkubischen Glases aus Aluminiumprofilen ist auf insgesamt vier Lenkrollen aufgesetzt. Dadurch lässt sich das gesamte Exponat von einer Person bewegen und mit den Bremsen fixieren. Zwei Personen können das Exponat tragen.

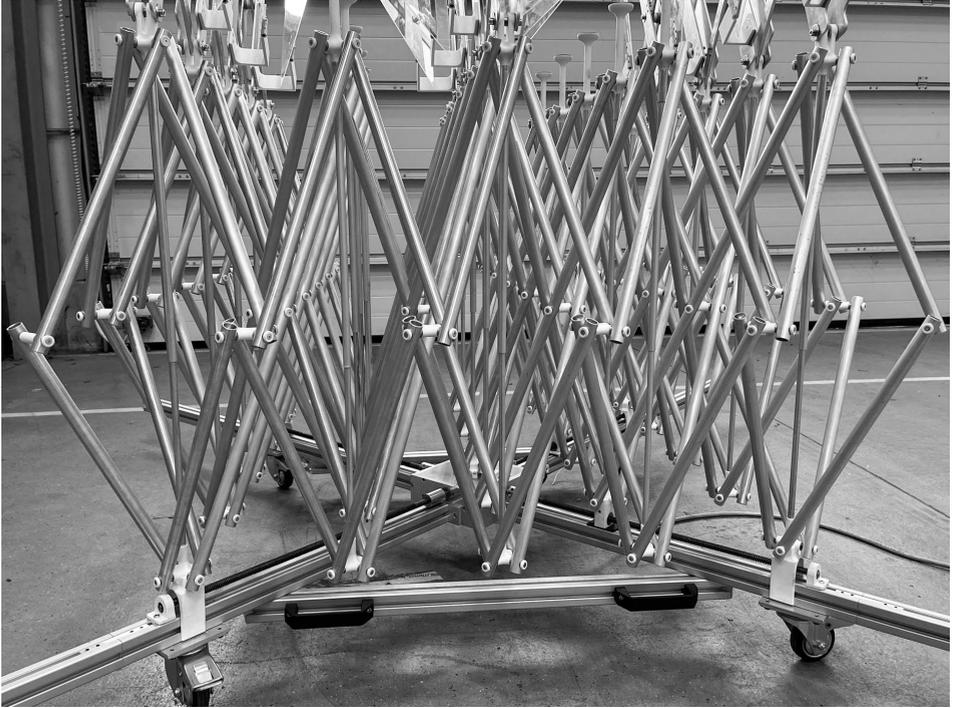


Bild 77

Lagerkonstruktion mit Lenkrollen und Handgriffen für den Transport.

## 5. »Hyperkubisches Glas« auf der Glasstec 2022

Die Zusammenarbeit des Architekten Emilio Pérez Piñero mit dem Künstler Salvador Dalí führt zu einer Idee des »Vidriera Hipercúbica« als beweglicher Raumabschluss im Theater-Museum Dalí in Figueras in Spanien. Die Ideen zum Faltmechanismus sind in Patenten von Emilio Pérez Piñero beschrieben. Der Lehrstuhl für Tragkonstruktion der Universität Siegen entwickelt im Wahlmodul »Bewegliche Tragwerke« des Masterstudiengangs Architektur eine Neuinterpretation des »Vidriera Hipercúbica« als Hyperkubisches Glas. Studierende erfahren im Wahlmodul den Zusammenhang zwischen Kunst, Architektur sowie Technik und erleben in enger Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Mitarbeiter\*innen der Architektur sowie des Bauingenieurwesens die Realisierung einer faltbaren Konstruktion mit digitalen und additiven Planungs- und Herstellungsmethoden anhand von zwei Arbeitsmodellen. Essenziell notwendig sind dazu die Überprüfung der Plausibilität und Machbarkeit, die Entwicklung von Detaillösungen anhand von digitalen Modellen, die Aneignung von Wissen und Erfahrung mit additiven Druckverfahren und modernsten Metallbearbeitungsverfahren sowie die Erstellung von Arbeitsmodellen. Beide Arbeitsmodelle münden in einen Prototypen des hyperkubischen Glases für die Messe »Glasstec«. Auf der weltweit größten Fachmesse für alle Bereiche um das Thema Glas als Exponat vom 20. bis 23.09.2022 ist das hyperkubische Glas auf der Sonderschau »glass technology live« ausgestellt. Die Sonderschau dient insbesondere Universitäten, Entwicklungs- und Forschungsinstitutionen zur Ausstellung innovativer Neuheiten im Glasbau. Das Exponat zeigt eine Adaption des Vidriera Hipercúbica von Pérez Piñeros als Zusammenarbeit zwischen Studierenden der Architektur, Mitarbeiter\*innen des Lehrstuhls für Tragkonstruktion und der Werkstatt der am Campus Hölderlinstraße der Universität Siegen, angepasst an heutige Produktionsmöglichkeiten. Es zeigt die Konstruktion, die über einen Antrieb automatisiert den Faltmechanismus steuert und sich entfalten und falten lässt. Mit der Realisierung des »Vidriera Hipercúbica« als hyperkubisches Glas sind die Patente Emilio Pérez Piñeros neu interpretiert und mithilfe digitaler, adaptiver und moderner Herstellungsmethoden an die heutige Zeit angepasst. Das Exponat zeigt eindrucksvoll eine Anwendung von beweglichen Tragwerken in der Architektur und im Bauwesen. Die horizontale Ausführung des hyperkubischen Glases bietet sich beispielsweise bei temporären Überdachungen an, die eine Verschattung mit gleichzeitigem Energiegewinn über in die Glastafeln integrierte Photovoltaikmodule wünschen. Der Technologiestand des Exponates zum hyperkubischen Glas liegt mit dem Nachweis der Funktionstüchtigkeit und der Realisierung des Prototyps in der Einsatzumgebung vor. Weitere Überlegungen und die Anwen-

derung des Prototyps im Einsatz erfordern gegebenenfalls Änderungen bei der Ausführung von Detaillösungen. Bild 78 zeigt das hyperkubische Glas auf der Sonderschau »glass technology live«.



Bild 78

Hyperkubisches Glas auf der Sonderschau »glass technology live« in Düsseldorf vom 20. bis 23.09.2022.



QR - Code zu einem Video  
zum hyperkubischem Glas in der Faltbewegung

Veröffentlichungen zum hyperkubischen Glas (Stand 03/2023)

Publikation

Peña, M.; Wirfler, K.; Andrés López, S.; Reißaus, H.; Weimar, T.: Reinterpretation of Dalí's »Vidriera Hipercúbica« designed by Pérez Piñero in 1971. In: Tagungsband; Engineered Transparency. Düsseldorf, 2021. Seite 439-450.

Peña Fernández-Serrano, M.; Wirfler, K.; Andrés López, S.; Reißaus, H.; Weimar, T.: Hyperkubisches Glas – Dalí's »Vidriera Hipercúbica« neu interpretiert. In: Glasbau 2022. Berlin: Ernst & Sohn, 2022. Seite 59-70.

Wirfler, K.; Andrés López, S.; Peña Fernández-Serrano, M.; Reißaus, H.; Weimar, T.: Digital Adaptation of the »Hypercubic Glass«: Translation of the Design Principles by Student Seminars. In: Architectural Graphics, EGA 2022. Springer Series in Design and Innovation, Volume 22. Springer, 2022.

Lehrstuhl für Tragkonstruktion: Hyperkubisches Glas. In: Next in Glass, Messe Düsseldorf. Düsseldorf, 2022. Seite 135.

#### Vortrag

Wirfler, K.: La Vidriera Hipercúbica: Imaginada por Dalí proyectada por Pérez Piñero. La fabricación digital de un modelo. XIX Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica. Cartagena, 03.06.2022.

#### Internet

<https://wirsiegen.de/2022/10/faltbare-glasflaeche-der-lehrstuhl-fuer-tragkonstruktion-der-universitaet-siegen-zeigte-bei-der-weltweit-groessten-fachmesse-fuer-glas-das-exponat-Hyperkubisches-glas/362252/>.  
Geprüft am 21.01.2023.

[https://www.architektur.uni-siegen.de/tragkonstruktion/forschung/forschungsprojekt\\_14.html](https://www.architektur.uni-siegen.de/tragkonstruktion/forschung/forschungsprojekt_14.html).  
Geprüft am 29.01.2023.

<https://www.uni-siegen.de/start/news/oeffentlichkeit/986470.html>.  
Geprüft am 21.01.2023.

#### Medien

Radiobeitrag Radio Siegen. 17.11.2022.

## 6. Literatur

### 6.1. Bücher und Aufsätze

- Ansys, 2020                      Ansys, Inc.: Ansys Multiphysics Campus, 2020 R2, 2020.
- Dlupal 2019                      Dlupal GmbH: RFEM 5. Benutzer-Handbuch., 2019.
- Einstein 1905                    Einstein, Albert: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: Annalen der Physik und Chemie (17), 1905. Seite 891-921.
- Gadea 2012                      Gadea Martínez, Vicente: Vicente Martínez Gadea. Arquitectura 1985/2011. Murcia: Colegio Oficial de Arquitectos de Murcia COAMU, 2012.
- Gebhardt 2016                   Gebhardt, Andreas: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. München: Hanser, 2016.
- Henderson 2013                Henderson, Linda: The Fourth Dimension and Non-Euclidean Geometry in Modern Art. Cambridge (Massachusetts): MIT Press, 2013
- Peña 2022                      Peña, Martino; Wirfler, Katja; Andrés López, Sebastián; Reißaus, Henrik; Weimar, Thorsten: Hyperkubisches Glas – Dalís »Vidriera Hipercúbica« neu interpretiert. In: Weller, Bernhard; Tasche, Silke (Hrsg.): Glasbau 2022. Berlin: Ernst & Sohn, 2022. Seite 30-41.
- Pérez Piñero 1962              Pérez Piñero, Emilio: Expandable Space Framing. In: Progressive Architecture (6), 1962, Seite 154-155.
- Puertas del Río 1989        Puertas del Río, Lina: Estructuras espaciales desmontables y desplegadas. Estudio de la obra del arquitecto Emilio Pérez Piñero. Dissertation. UPM, Madrid, 1989.

### 6.2. Normen und Richtlinien

- DIN EN 1990                    DIN EN 1990. Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2021.

DIN EN 1990/NA	DIN EN 1990/NA. Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2010.
DIN EN 1999-1-1	DIN EN 1999-1-1. Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2014.
DIN EN 10025-2	DIN EN 10025-2. Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2019.
Messe Düsseldorf 2021	Messe Düsseldorf: Technische Richtlinien, 01.01.2021.

### 6.3. Datenblätter und Patente

Exolon GP 2021	Exolon Group NV: Datenblatt Exolon GP, 2021.
Kern 2019	Kern GmbH: Datenblatt Polyesterol (PS). 2019.
KHP 2021	KHP Kunststofftechnik e. K.: Datenblatt Polymethylmethacrylat (PMMA), 2021.
Pérez Piñero 1965	Pérez Piñero, Emilio: Three dimensional Structure.  Patent angemeldet durch Perez Piñero, Emilio am 25.05.1965. Patentnummer 3.185.162, USA.
Pérez Piñero 1976	Pérez Piñero, Emilio: System of articulated planes.  Patent angemeldet durch Aroca, Belda am 24.08.1976. Patentnummer 3.975.872, USA.
Prototec 2020	PROTOTEC GmbH: Datenblatt PA 2200 (PA12). 2020.
Prusa 2018	PRUSA POLYMERS: Datenblatt PLA. 2018.

## 6.4. Internet

- o.V. 2023a                      Vierte Dimension in der Kunst – HiSoUR Kunst Kultur Ausstellung, 2023. Online verfügbar unter <https://www.hisour.com/de/fourth-dimension-art-17945/>, zuletzt aktualisiert am 07.02.2023, zuletzt geprüft am 07.02.2023
- o.V. 2023b                      Biografie Jean Tinguely | Museum Tinguely Basel, 2023. Online verfügbar unter <https://www.tinguely.ch/de/tinguely-sammlung-restaurierung/tinguely-biographie.html>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2023, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

