

Diploma Thesis

# V-form: Manufacturing unreinforced vaulted ceilings with geometrically flexible pneumatic formworks

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Architecture and Planning

---

Diplomarbeit

# V-form: Herstellung unbewehrter Gewölbedecken mit geometrisch flexibler pneumatischer Schalung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Architektur und  
Raumplanung

von

**Rudolf Walther Erdem Neumerkel, BSc**

Matr.Nr.: 01426394

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. **Peter Bauer**

Institut für Architekturwissenschaften  
E 259.2 Forschungsbereich Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Mai 2022

---



# Kurzfassung

Geschoßdecken stellen einen signifikanten Teil der Masse und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks eines Gebäudes dar. Gewölbedecken versprechen hier Verbesserungen und sind so in den Fokus mehrerer Arbeiten gerückt.

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Form der Deckengeometrie (V-Form) entwickelt, die sickenartige Rippen verwendet und ohne Bewehrung auskommt. Die Entwicklung der V-Form Decke erfolgt durch einen iterativen Prozess, der von FE-Berechnungen und Parameterstudien geleitet wird, welche eine Material- und damit Energiereduktion von bis zu einem Faktor 4 verglichen mit gängigen Stahlbeton-Flachdecken nahelegen.

Für die V-Form Decken wird ein geometrisch flexibles und wiederverwendbares Schalungssystem vorgeschlagen. Die erforderlichen Sicken werden mithilfe einer von Zugbändern bespannten Membran pneumatisch gebildet. Der Fertigungsprozess für das Schalungssystem wird skizziert und Anwendungspotenziale der V-Form Decken werden aufgezeigt.



# Abstract

Floor slabs constitute a significant part of a building's mass and have a large impact on its carbon footprint. Vaulted ceilings promise improvements and have shifted into the focus of recent work.

This work develops a new kind of ceiling geometry (V-form) which utilizes corrugated ribs and is unreinforced. The V-Form ceiling is developed through an iterative process, led by FE-calculations and parameter studies, which suggest a reduction of material and energy use of up to a factor of 4 compared to conventional reinforced concrete slabs.

For the V-form ceiling, a geometrically flexible and reusable formwork system is proposed. The corrugated ribs are created by stretching tension bands over an inflated membrane. The production process is outlined and the potential applications of the V-form slab are shown.



# Danksagung

In erster Linie möchte ich meinen Betreuer Prof. Peter Bauer für die stets begeisternden Diskussionen über technische Details, das Teilen seines unglaublichen theoretischen sowie praktischen Wissens und aber auch für die ehrliche und kritische Betrachtung meiner Arbeit danken.

Ebenso möchte ich Prof. Werner Sobek danken. Für die Bereitschaft, Gedankengänge dieser Arbeit anzuhören und basierend auf einem breit- als auch tiefgreifenden Wissen lösungsorientiertes Feedback und kreative Vorschläge zu geben.

Auch Prof. Timo Schmidt möchte ich meinen Dank aussprechen. Für die Unterstützung beim Finden einer interessanten und relevanten Frage für die Diplomarbeit und für die Offenheit, spätabends noch zusammen nach kreativen Detaillösungen zu suchen.

Ich möchte auch meinen Eltern danken — meiner Mutter, für die liebevolle Unterstützung und ihre ermutigende Zuversicht und meinem Vater, für die Neugierde-erweckenden Gespräche, sowie das gemeinsame finale Schleifen an dieser Arbeit.

Ebenso möchte ich meinen Großeltern Dank aussenden, für stärkenden Worte und die geistige Unterstützung aus Frankreich. Auch meinen Schwestern Anna und Julia möchte ich danken. Dafür, dass sie jederzeit für mich da waren — mir bei meiner anfangs etwas chaotischen Zeitplanung geholfen, oder zu kompakteren Zeiten mit Liebe Essen vorbeigebracht haben.

Mein besonderer Dank gilt auch Miruna, für die sorgsame Unterstützung mit den Grafiken und Renderings und Geduld beim Besprechen kleinster Details. Sowie Consti, für sein offenes und brüderliches Zuhören und ehrliche Meinungen. Ich möchte auch Angel danken, für seine loyale Hilfe und Belieferung mit gutem Espresso. Ebenso möchte ich Lukas danken, für die anregenden Diskussionen zu technischen Themen bis ins letzte Atom, sowie die soliden Fragen und Gedanken zur vorliegenden Arbeit.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>10</b>
1.1	Motivation . . . . .	10
1.2	Bestehende Ansätze . . . . .	11
1.2.1	Limitierende Faktoren . . . . .	12
1.2.2	Definition eines Lösungsansatzes . . . . .	12
1.3	Vorgehensweise . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>14</b>
2.1	Schalentragwerke und Deckengewölbesysteme . . . . .	14
2.2	Schalungssysteme . . . . .	17
2.2.1	Geometrisch vordefinierte textile Schalungen . . . . .	17
2.2.2	Geometrisch flexible Schalungssysteme . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Entwicklung des Deckensystems</b>	<b>22</b>
3.1	Grundlagen zu Bögen, Gewölben und Schalen . . . . .	22
3.2	Ansatz zur geometrischen Steifigkeit . . . . .	24
3.2.1	Problematik der asymmetrischen Lastfälle . . . . .	24
3.3	Entwurf des Gewölbedeckensystems . . . . .	27
3.3.1	Erzeugung von Sicken in penumatischen Formen . . . . .	27
3.3.2	Schalengeometrie der V-Form . . . . .	28
3.4	FE-Berechnungen . . . . .	29
3.4.1	Erstellung des FE-Modells . . . . .	29
3.4.2	Interpretation der Ergebnisse . . . . .	31
3.4.3	Einfluss der Geometrie auf die Masse . . . . .	35
3.4.4	Paramterstudien der V-Form . . . . .	36
3.5	Deckensystem . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Entwicklung des Schalungssystems</b>	<b>39</b>
4.1	Bedingung der geometrischen Flexibilität . . . . .	39
4.2	Beschreibung der Subsysteme . . . . .	40
4.2.1	Formbildender Seilnetz-Pneu . . . . .	40
4.2.2	Kederrahmen . . . . .	42
4.2.3	Kederelement . . . . .	43
4.2.4	Globaler Rahmen . . . . .	44
4.3	Aktuation . . . . .	44
4.3.1	Aktive Komponenten . . . . .	45
4.3.2	Reaktive Komponenten . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Anwendung des V-Form Systems</b>	<b>48</b>
5.1	Schalungsprozess . . . . .	48
5.1.1	Einstellung der Zielgeometrie . . . . .	48
5.1.2	Betonieren des Deckenelements . . . . .	50
5.1.3	Aushärten und Entschalen . . . . .	50

---

5.2	Herstellungsmethoden . . . . .	50
5.2.1	Herstellung in situ . . . . .	50
5.2.2	Vorfertigung im Werk . . . . .	50
5.2.3	Herstellung neben situ . . . . .	51
5.3	Resultierende Architektur . . . . .	51

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Der Bausektor steht für rund 40% der weltweiten energiebezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen.[1] Diese lassen sich in die Kategorie der *grauen Emissionen* und Emissionen aus der Nutzungsphase aufteilen. Die grauen Emissionen oder *embodied emissions* sind jene, die bei der Gewinnung, Herstellung, Transport und Abbruch der Materialien anfallen. Die Emissionen aus der Nutzungsphase jene, welche durch den Heiz- und Kühlbedarf, sowie Stromverbrauch entstehen. Während die Emissionen aus der Nutzungsphase in den letzten Jahrzehnten weitgehend reduziert wurden, wurde den grauen Emissionen wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Dieser Anteil stellt mittlerweile den Großteil der dem Bausektor zugeschriebenen Emissionen dar.[2–4] Somit wird diesen Verbesserungen, die bereits jetzt den größten Einfluss auf die Gesamtemissionen haben, eine noch größere Relevanz zukommen.

Bei genauerer Betrachtung der grauen Emissionen ist weiters festzustellen, dass je nach Gebäudetyp rund mehr als die Hälfte der Emissionen dem Tragwerk eines Gebäudes, insbesondere den Geschossdecken — aufgrund der resultierenden hohen Biegespannungen — zuzuschreiben sind.[2, 5, 6] Bei Annahme eines vergleichbaren Aufwands zu Optimierung und Verbesserung unterschiedlicher Gebäudeelemente, stellen die Geschossdecken den größten Hebel für die Reduktion der Emissionen dar. Zieht man die Systemgrenze auf die Entwicklung eines Deckenelements, so kann an das Problem über verschiedene Parameter herangegangen werden — unter anderem:

- dem Material-, Struktur-, bzw. Systemleichtbau
- der Wahl von Materialien mit geringeren CO<sub>2</sub>/kg-Werten
- der materialgerechten Beanspruchung
- der einfachen Trennbarkeit bzw. dem Recycling
- der Minimierung des Herstellungsaufwands

Diese Arbeit beschränkt sich bei der Materialwahl auf Beton. Die Herstellung von Zement ist zwar für rund 5% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich, wird aber auch in größeren Mengen als alle anderen Materialien zusammen verbraucht.[4, 7]

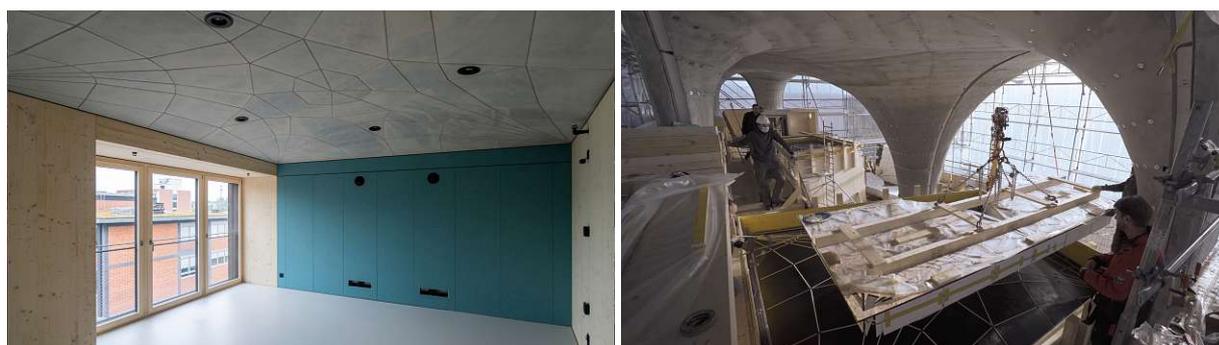
Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck unbewehrten Betons ist eigentlich relativ gering. Er kommt aufgrund seiner geringen Zugfestigkeit und dem spröden Materialverhalten jedoch selten zum Einsatz. Die Bewehrung mithilfe von Stahl macht Betontragwerke wesentlich leistungsfähiger, erhöht aber auch die grauen Emissionen signifikant — die spezifischen Emissionen von Stahl sind um den Faktor 5-20 größer als jene von Beton (siehe Tab. 1.1). Die Wiederaufnahme von CO<sub>2</sub> bei der Karbonatisierung des Betons stellt zudem eine bisher vernachlässigten Faktor dar.[7] Der erfolgreiche Einsatz unbewehrten Betons verspricht somit signifikante Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

**Tab. 1.1:** Spezifische Energie und CO<sub>2</sub>-Werte typischer Baumaterialien (Ashby [4])

Material	kg/m <sup>3</sup>	MJ/kg	MJ/m <sup>3</sup>	kgCO <sub>2</sub> /kg	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Zuschlag	1500	0,10	150	0,006	9
Ziegel	2100	2,8	5880	0,22	462
Beton (mit Flugasche)	2010	1,14	2290	0,068	137
Beton 30 MPa	2450	1,3	3180	0,095	233
Beton (8% Bewehrungsanteil)	2910	2,49	7250	0,21	611
Beton (Standard)	2390	1,14	2700	0,1	239
Stampflehm	1950	0,42	819	0,03	55
Stahl (100% rezykliert)	7850	7,3	57 300	0,57	4470
Stahl	7850	27	212 000	1,8	14 100
Bauholz	550	7,3	1380	0,42	230

## 1.2 Bestehende Ansätze

Einen Lösungsansatz zur eingangs genannten Problematik liefert die Block Research Group der ETH Zürich mit dem Rippmann-Deckensystem.[8, 9]



(a) Prototyp einer Gewölbedecke der BRG in der HiLo Unit bei Zürich      (b) Schalung einer Rippengewölbedecke in der HiLo Einheit des Nest-Gebäudes in Zürich

**Abb. 1.1:** Gewölbedeckensystem der Block Research Group

Bei diesem mit Rippen versehenen Deckensystem werden Kräfte primär über Gewölbe- bzw. Schalentragswirkung und somit über Normalspannungen abgetragen. Das Abtragen der Kräfte über Normal- bzw. Membranspannungen bringt eine wesentlich effektivere Materialbeanspruchung im Gegensatz zu einer reinen Biegebeanspruchung mit sich. Im Zuge dessen werden Spannungen derart reduziert, sodass:

- 50 - 75% der Masse eingespart wird,
- auf die Bewehrung großteils, oder vollständig verzichtet wird,
- und Materialien mit geringerer Festigkeit und damit geringeren grauen Emissionen[10] eingesetzt werden können.

Um diese Vorteile zu erzielen, muss das Deckensystem jedoch exakt auf die Randbedingungen am Einsatzort abgestimmt und in seiner Geometrie optimiert werden. Für die daraus resultierende Form muss eine maßgefertigte Schalung hergestellt werden. Daraus ergibt sich ein höherer

Herstellungsaufwand und geringere Wiederverwendbarkeit, was die zuvor eingesparte Masse relativiert.

### 1.2.1 Limitierende Faktoren

**Wiederverwendbarkeit der Schalung** Die maßgefertigte Schalung wird mit einem hohen Material- und Planungsaufwand hergestellt, jedoch nach einmaliger Verwendung entsorgt. Daher gilt es diesen Aufwand zu minimieren, oder aber die Schalung wiederzuverwenden.

**Aufwand und Kosten der maßgefertigten Schalung** Während die aufgezeigten Nachteile für eine geringe Anzahl an Sonderprojekten mit entsprechendem Budget keine Hindernisse sind, limitieren die resultierenden Kosten den Einsatz des Deckensystems in größerem Maßstab. Um die Emissionen des Bausektors signifikant zu reduzieren, erfordert es Lösungen, die nicht nur umwelttechnisch sinnvoll, sondern auch in Anbetracht des Herstellungsaufwands umsetzbar sind.

**Inhärente Einschränkung der optimierten Geometrie** Eine wiederverwendbare Schalung für dieses Deckensystem liegt auf der Hand, würde jedoch genau die Einschränkung mit sich bringen, dass die geschalteten Deckenelemente ausschließlich für eine definierte Menge von Randbedingungen (Grundriss, Auflager, Belastungen, Materialgüte, etc.) eingesetzt werden können. Diese Option würde sich prinzipiell mit der Herstellung weniger fixierter Standardmaße in großen Stückzahlen argumentieren lassen, stößt aber auf das grundsätzlichere Problem, dass im Bauwesen zumeist angepasste, speziell geplante Gebäudeelemente erforderlich sind — oft bedingt durch die unregelmäßigen Gegebenheiten der Parzellen.

**Suboptimale Integration der TGA-Systeme** Zur effizienten Bebauung eines bestehenden Volumens ist es von Vorteil, Gebäudefunktionen wie beispielsweise die technische Gebäudeausrüstung (TGA) in die tragende Struktur zu integrieren. Dies kann bereits beim Schalen der Deckenelemente miteinbezogen werden, führt aber zu einem größeren Herstellungsaufwand sowie zu einer geringeren Flexibilität im Falle einer Wartung oder Umnutzung der eingebauten Komponenten bzw. zu einer erschwerten Trennbarkeit der einzelnen Materialien beim Recycling.

### 1.2.2 Definition eines Lösungsansatzes

Die Hypothese lautet: Der große Schalungsaufwand und die Problematik der individuell optimierten Rippengewölbe-Geometrie könnte durch ein wiederverwendbares und geometrisch flexibles Schalungssystem gelöst werden. Die beiden Ziele der vorliegenden Arbeit lauten daher:

1. Entwicklung eines unbewehrten Gewölbe-Deckensystems
2. Entwicklung eines wiederverwendbaren und geometrisch flexiblen Schalungssystems hiezu

Dabei sollen die beiden Systeme aufeinander abgestimmt werden. Der Lösungsansatz, eine Schale mit Rippen zu versehen, soll ebenso wenig als gegeben betrachtet werden, wie die Festlegung auf eine Schalungsmethode.

## 1.3 Vorgehensweise

Mit Kapitel 2 wird der Stand der Technik zu Beton-Schalentragwerken, aktuellen Gewölbedeckenlösungen, sowie zu textilen, pneumatischen und geometrisch flexiblen Schalungssystemen beschrieben.

In Kapitel 3 wird ein Deckentragwerk ausformuliert mit den Zielen der Materialminimierung über die Aufnahme der Lasten vornehmlich per Druckkräfte, Aufnahmefähigkeit der asymmetrischen Lastfälle und einer günstigen Herstellbarkeit. Dies wird mittels FE-Berechnungen analysiert, optimiert und die resultierenden Masseneinsparungspotentiale werden mittels Parameterstudien aufgefunden. In Kapitel 4 wird auf Basis dieses Deckenelements ein Schalungssystem von Grund auf entwickelt. Bei Formulierung der Details wird dabei stets auf die Bedingung der Wiederverwendbarkeit, sowie der geometrischen Flexibilität geachtet. In Kapitel 5 wird der Schalungsprozess und der Einbau der V-Form Decken beschrieben. Abschließend wird in Kapitel 6 die Arbeit zusammengefasst.

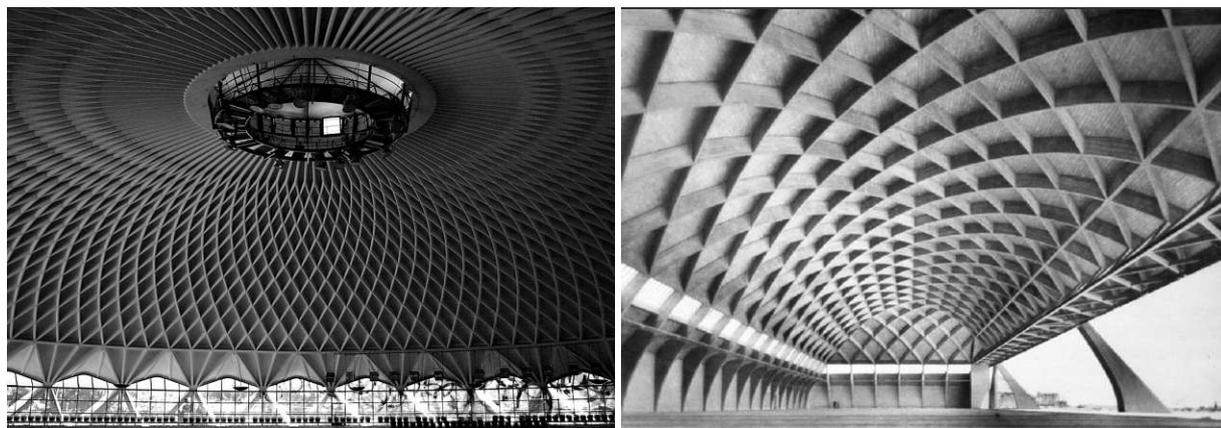
# Kapitel 2

## Stand der Technik

### 2.1 Schalenträgerwerke und Deckengewölbesysteme

Schalenträgerwerke haben den Vorteil, Material effektiver zu beanspruchen, indem Lasten primär über Membrankräfte abgetragen werden. Zudem erzeugen sie durch ihre globale und lokale Krümmung eine hohe geometrische Steifigkeit. Meisterwerke von Pionieren wie Heinz Isler, Luigi Nervi und Eduardo Torroja zeigen das mögliche Potenzial der Betonschalenträgerwerke auf: Große Spannweiten bei geringem Eigengewicht, minimale Querschnitte und eine somit geringe flächenbezogene Masse.

Die Beispiele von Abb. 2.1 demonstrieren, welche Spannweiten mit dieser Bauweise möglich sind, etwa 60m beim Palazetto dello Sport. Über sich radial bzw. linear wiederholende Rippen wird der strukturell wirksame Querschnitt erhöht. Die Wiederholung der Rippengeometrie erhöht dabei die Wirtschaftlichkeit des Schalungsprozesses.



**Abb. 2.1:** Rippenschalenträgerwerke von Nervi, links: Palazetto dello Sport, 1956 ©Eduardo Pompeo, rechts: Hangar in Orvieto, Quelle: <https://structurae.net/en/structures/orvieto-hangars>

Während die bereits durch die Krümmung der Schalen gegebene Steifigkeit der Bauten von Nervi aus Abb. 2.1 über Rippen erhöht wurde, wird dies beim Wyss Garden Center von Heinz Isler und beim Hipódromo de la Zarzuela von Torroja (Abb. 2.2) in einem größeren Maßstab über sickenartige Vertiefungen erreicht. Die Erhöhung der lokalen Krümmungen der beiden Beispiele hat auch den Vorteil, die Problematik des Knickens zu lösen. Bei der Schale des Wyss Garden Centers wird das lokale Knickverhalten an den Rändern des zentralen Schalensegments verbessert, bei der Überdachung von Torroja jenes der offenen Ränder.

Aktuell wird daran geforscht, die erläuterten vorteilhaften Eigenschaften von vereinzelt Sonderbauten auf den häufigeren Fall der mehrgeschossigen Gebäude, auf Geschossdecken zu übertragen. [8, 11] Da dieser Gebäudetyp den Großteil aller Bauten darstellt, wird klar, welche immense Vorteile erreicht werden können. Folgend ein Überblick zu aktuellen Forschungsarbeiten.

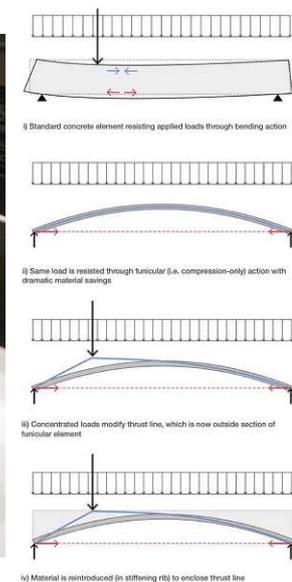


(a) Wyss Garden Center, Solothurn, 1961 Quelle: <https://structurae.net/en/structures/wyss-garden-center>

(b) Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, 1935 ©Ximo Michavila

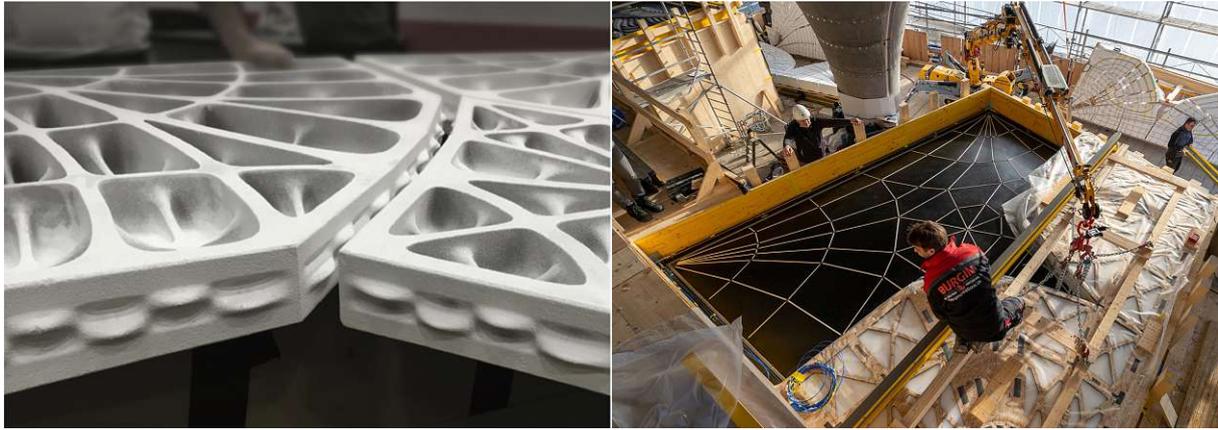
**Abb. 2.2:** Schalenträgerwerke von Heinz Isler und Eduardo Torroja

**BRG** Die 2009 gegründete Block Research Group (BRG) der ETH Zürich forscht unter anderem genau an dieser Frage. Ihr Deckensystem Rippmann Floor System (RFS) hat das Potenzial bis zu 50-70% des Materials einzusparen und kommt theoretisch — bis auf die kurzschließenden Zugseile — ohne Bewehrung aus. Der Einsatz von Stahl kann um ca. 90% reduziert werden. Wirft man einen Blick auf die in Tab. 1.1 dargestellten Relationen der spezifischen Emissionen von Stahl und Beton — jene von Stahl sind um einen Faktor 5-20 höher — so kommt dieser Reduktion des Stahls eine sehr große Bedeutung zu. 2021 wurden zwei dieser Deckensysteme zum ersten Mal in dem Experimentalgebäude Nest der EMPA Zürich eingebaut.

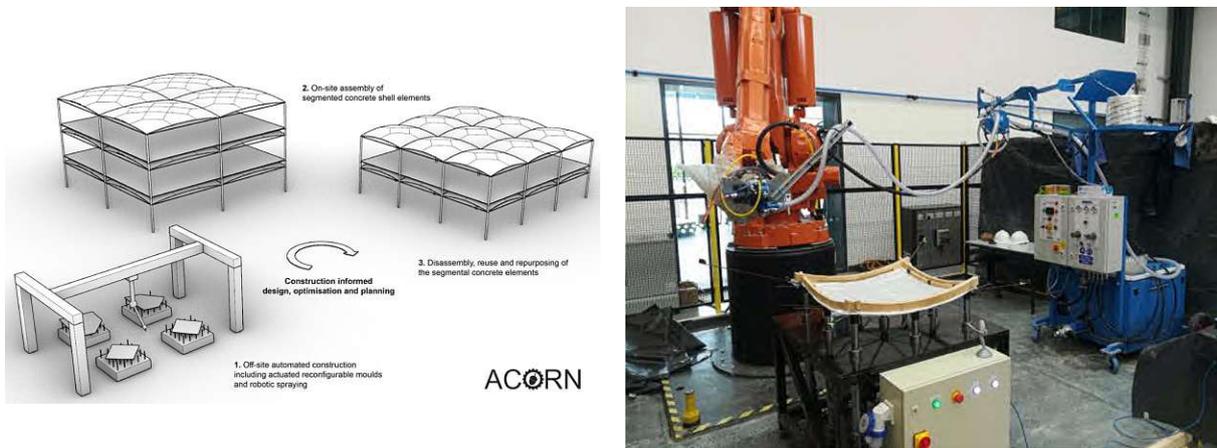


**Abb. 2.3:** links: Rippen-Gewölbedeckensystem der BRG, rechts: grundlegendes Konzept [5]

Die wirtschaftliche Herstellung dieses Deckensystems ist aktuell eine große Forschungsfrage. Es wurden bereits Dissertationen zur Herstellung von Betonschalenträgerwerken durchgeführt. Weitere zur Herstellung des Deckensystems finden aktuell statt. Bereits getestete Ansätze beinhalten: Heißdrahtschneiden von EPS-Blöcken zur Erzeugung der Negativform der Rippengeometrie,



**Abb. 2.4:** links: Mittels Heißdraht-Schneidverfahren hergestellte Schalung, rechts: Mittels Freistrahls-Bindemittelauftrag additiv gefertigtes Deckenelement. Die mit Sand als Ausgangsmaterial gedruckten Elemente besitzen eine relativ geringe Druckfestigkeit von 4-5,5MPa.



**Abb. 2.5:** ACORN-Deckensystem, links: Konzept für die Fertigung, Einbau und Abbau, rechts: Flexibles Schalungssystem für Segmente

additive Fertigung der Schalung, direkte additive Fertigung des Deckenelements mittels Sand-Binder-Verfahren (Binder Jetting) (siehe Abb. 2.4).

**ACORN** Das Forschungsprojekt ACORN liefert einen Ansatz, bei dem auch die Vorteile der Schalentragswirkung für ein Deckenelement genutzt werden. Die Aufnahme der asymmetrischen Lastfälle über reine Druckspannungen erfordert, dass die resultierenden Stützlinien bzw. Stützflächen sich innerhalb des mittleren Drittels des Querschnitts befinden.[12] Das hat zur Folge, dass entweder ein großer Querschnitt gewählt, oder zusätzliche Tragwerkselemente wie Rippen oder Sicken der Schale hinzugefügt werden müssen. Dies erhöht die Komplexität der Geometrie und damit einhergehend auch den Herstellungsaufwand. Das ACORN-Deckenelement verzichtet mit einer kontinuierlichen Schalengeometrie daher auf diese zusätzlichen Tragwerkselemente und nimmt gewisse Zugspannungen in Kauf. Dafür weist diese Decke einen leichten Bewehrungsanteil auf.[11]

ACORN umfasst auch die Fertigung der Decken. Mithilfe eines geometrisch flexiblen Schalungssystems ähnlich zum System von ADAPA, werden mittels Beton 3D-Druck über einen 6-Achs-Industrieroboter Schalensegmente hergestellt. Die einfachere gelenkige Teilbarkeit der

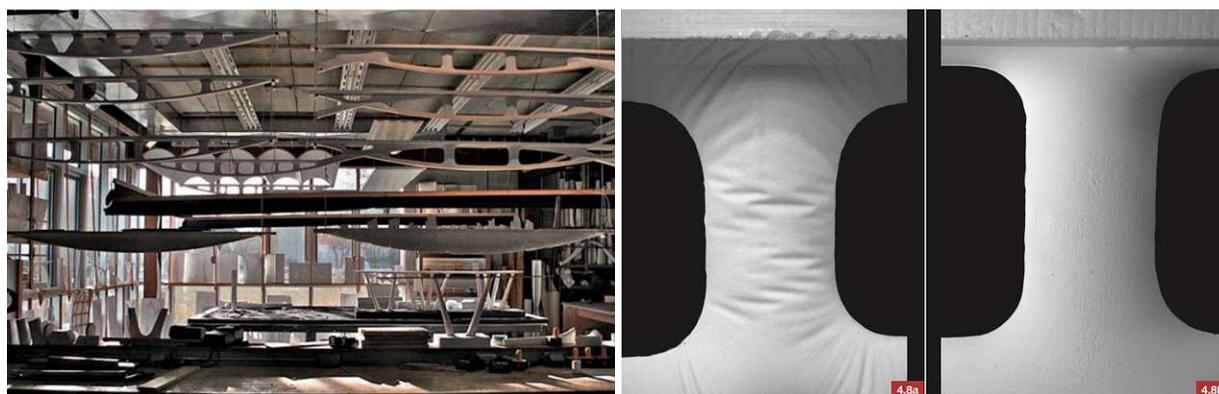
Schale gegenüber einem biegebeanspruchten Tragwerk wird dabei genutzt, um Schalensegmente mit geringen Abmessungen zu erzeugen. Diese können dann wesentlich einfacher transportiert werden und vor Ort über gelenkige Verbindungen zusammengesetzt werden.

## 2.2 Schalungssysteme

Im folgenden Abschnitt wird die Recherche auf textile und geometrisch flexible Schalungssysteme eingeschränkt, da diese die Randbedingungen der geometrischen Flexibilität und Wiederverwendbarkeit erfüllen. Arbeiten zu additiv gefertigter verlorener bzw. einmalig verwendeter Schalung wie jene von Peters und Trummer [13] oder Leschok et al. [14] werden aufgrund der inhärenten Eigenschaft nicht wiederverwendbar zu sein nicht weiter erläutert. Ebenso wurden Forschungen zu verlorenen textilen Schalungen (etwa Popescu [15]) untersucht, diese werden jedoch nicht weiter behandelt.

### 2.2.1 Geometrisch vordefinierte textile Schalungen

**CAST** Das Centre for Architectural Structures and Technology (CAST) der Universität Manitoba hat sich mit den Anwendungsmöglichkeiten von Textilien für das Schalen von Betonelementen beschäftigt. Besonders wurde das Verhalten der Faltenbildung doppelt gekrümmter, hydrostatisch belasteter Textilien untersucht. In Abb. 2.6a wird diese Vielfalt von Möglichkeiten sichtbar.

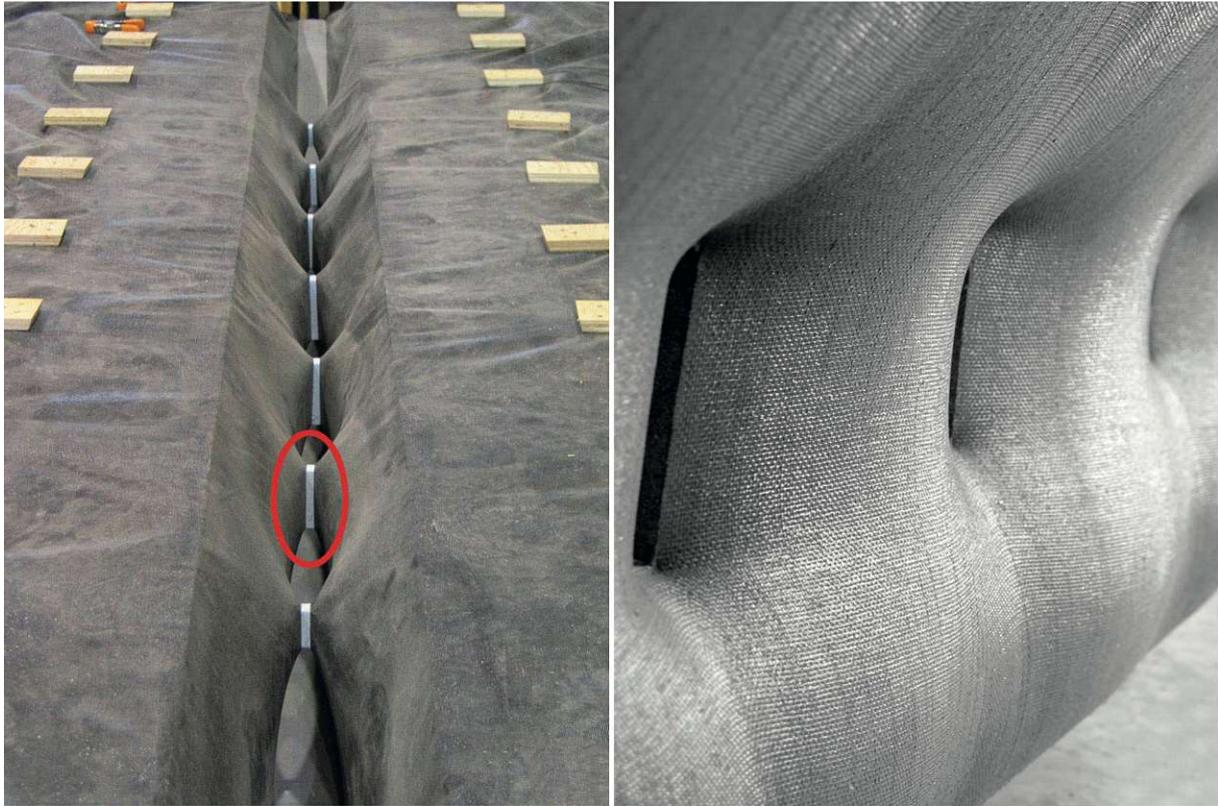


(a) Vielfalt der textil schalbaren Gebäude-Elemente, wie (b) Einfluss der Membranvorspannung auf die durch den gewichtsoptimierten Trägern oder verzweigten Stützen hydrostatischen Druck erzeugte Faltenbildung

**Abb. 2.6:** Textiles Schalaungssystem für das HiLo-Dach der BRG

Ein großer Unterschied textiler Schalungen im Gegensatz zu subtraktiv hergestellten rigiden Schalungskörpern, ist die schwierigere Prognose der Verformungen nach Gießen des Betons. Eine der größten Herausforderungen stellt dabei der Faltenwurf dar. West [16] liefert unter anderem zwei Antworten: Einerseits kann das Faktum, dass sich Falten meist in Richtung der durch den hydrostatischen Druck resultierenden Hauptzugspannungslinien bilden, genutzt werden, um diese als eine Form von Rippen zu verwenden. Diese können den Effekt haben, die Tragwerkwirkung in manchen Fällen zu verbessern. Andererseits können über eine Vorspannung orthogonal zur potenziellen Faltenbildungsrichtung diese verhindert werden. Eine zwar anfangs faltenfreie, beim Einbringen des Materials jedoch faltenwerfende Form ist in 2.6b links ersichtlich. Rechts davon wurde die Membran zuvor vorgespannt und die Faltenbildung verhindert - die Oberflächenbeschaffenheit dieses Objekts ist schwer von einem rigid geschalten zu unterscheiden. In Abb. 2.6b ist ein Beispiel eines fachwerkartigen Trägers zu sehen. Besonders dabei ist, welche große doppelte Krümmung die einzelnen Stegbereiche des Trägers aufweisen. Dennoch kommt es

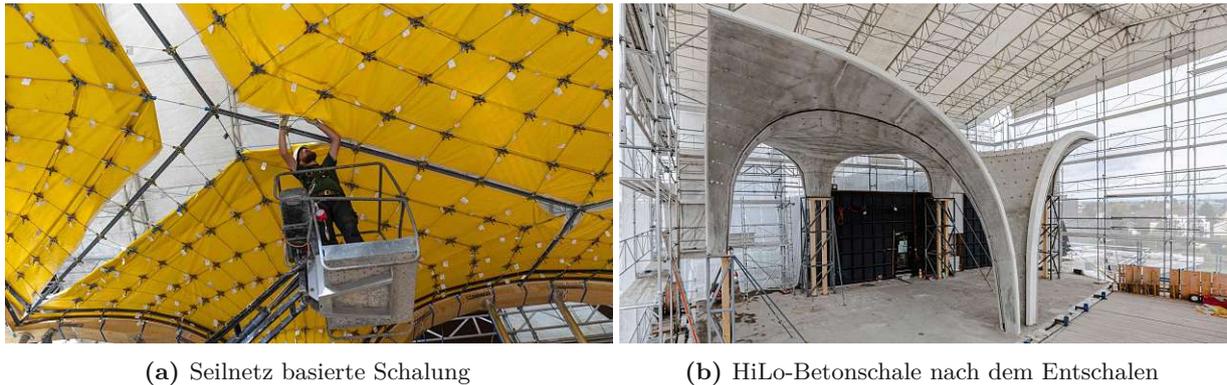
nicht zu Faltenbildung. Als Schalhaut wurde ein permeables verwobenes PP Geotextil (Propex 315ST) verwendet.[16]



**Abb. 2.7:** links: Vorrichtung für die Halterung der schalenden Membran, rechts: resultierende, faltenfreie und stark doppelt gekrümmte Oberfläche

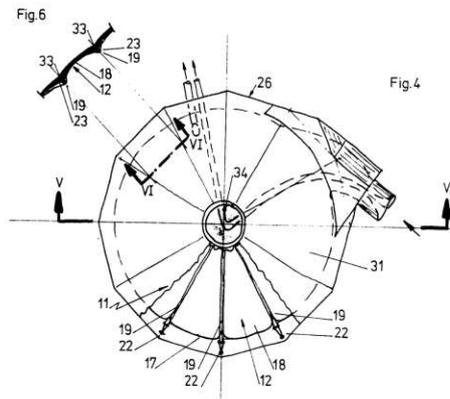
**HiLo** Die HiLo-Gebäudeeinheit (High Performance Low Emissions) der BRG wendet auch eine textile Schalung zur Herstellung der Schale an. Das grundlegende Ziel dieser Arbeit war es, den enormen Schalungsaufwand zu reduzieren, der normalerweise mit weit-spannenden doppelt gekrümmten Schalentragwerken verbunden ist. Die Form des Tragwerks wird über einen Formfindungsprozess generiert und daraus ein Seilnetz erstellt. In diesem Fall ermöglicht das Seilnetz die Einhaltung der globalen Geometrie. Jedes individuelle Seilelement wird exakt vorgefertigt und schließlich an seiner jeweiligen Stelle eingesetzt. Um die durch die Auflast der Schalhaut und des Betons entstehenden Verformungen auszugleichen, wird das Seilnetz vorgespannt. Als abschließende Schalhaut werden mehrere Membranstreifen aufgelegt und vernäht.

**Pnematische Schalung** Schlaich definiert ein pneumatisches Schalungsverfahren in einem Patent von 1986. [18] Die zuvor von Sobek durchgeführte Dissertation [17] untersucht die Eigenheiten der pneumatischen Formen und deren Auswirkungen auf die Tragwirkung der hergestellten Betonschalen. Ähnlich zu den in Abb. 2.2 gezeigten Bauten von Isler und Torroja wird die Steifigkeit der Betonschale durch sickenartige Rippen erhöht. Diese weisen nicht nur ein sehr günstiges Tragverhalten auf, sondern lassen sich auch sehr gut durch Seile mit größerer Spannkraft auf einer druckbeaufschlagten Membran bilden. Die Eigenschaften der pneumatischen Formen werden somit genutzt, um mit geringem Aufwand sickenartige Rippen auf einer Schale herzustellen.



(a) Seilnetz basierte Schalung

(b) HiLo-Betonschale nach dem Entschalen

**Abb. 2.8:** Textiles Schalungssystem für das HiLo-Dach der BRG

(a) Patentzeichnung zu pneumatischen Schalungen. Erkennbar ist auch der beim Betonieren resultierende Querschnitt



(b) Aufgeblasene Schalungsmembran mit Sicken erzeugenden Seilen, Sobek [17]

**Abb. 2.9:** Patent und pneumatische Schalung von Schlaich

### 2.2.2 Geometrisch flexible Schalungssysteme

Die Produktion und Errichtung von Schalungen im Betonbau können einen signifikanten Teil des Planungsaufwands und der Kosten einnehmen. Es liegt somit auf der Hand, die produzierten Schalungen auch wiederzuverwenden, um den anfänglichen Aufwand und Kosten zu amortisieren. Dies ist bei gleichbleibenden Projektbedingungen und Geometrien möglich, jedoch nicht mehr bei selbst kleinen Änderungen der Geometrie, der Lasten oder anderer Randbedingungen. Eine bekannte Lösung dafür sind geometrisch variable Schalungen. Um diese geometrische Variabilität und Wiederverwendbarkeit wirklich zu gewährleisten, benötigt man eine Menge an technischen Vorrichtungen und Systemen. Diese erhöhen die Komplexität und anfänglichen Kosten der Schalung. Es stellt sich daher die Frage, welches Maß an Komplexität wirklich erforderlich ist bzw. ob eine Amortisierung dieser Kosten in einem zeitlich sinnvollem Rahmen liegt. Die folgenden Beispiele greifen daher den status quo zu solchen geometrisch flexiblen Schalungssystemen auf.

**ADAPA** Die dänische Firma ADAPA Adaptive Moulds hat sich auf dieses Gebiet spezialisiert und bietet mittlerweile rekonfigurierbare Schalungssysteme für das Schalen von Beton-, Verbundwerkstoff-, als auch thermogeformten Paneelen.

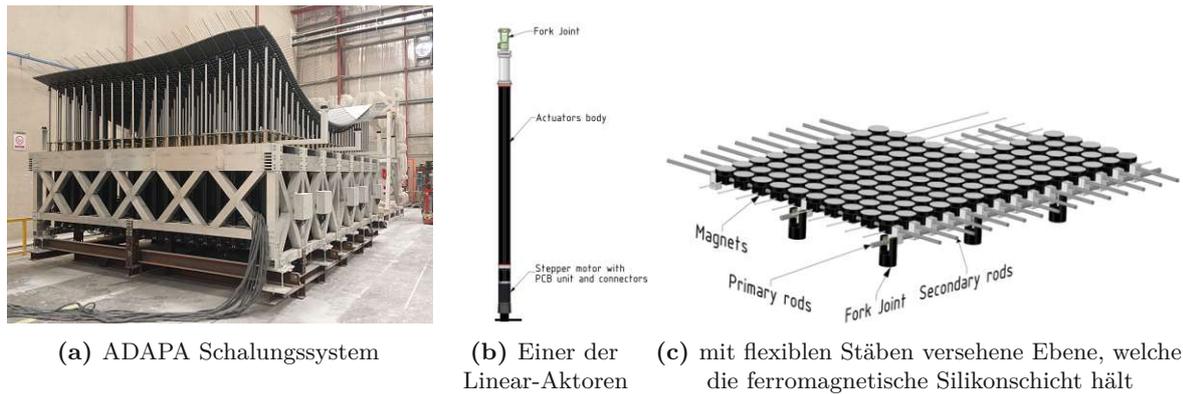


Abb. 2.10: Komponenten des ADAPA-Schalungssystems

Schalungseinheiten von bis zu 5400mm Länge und 3600mm Breite werden aktuell angeboten. Über 500 Linearaktoren, welche über Schrittmotoren mit hoher Präzision angetrieben werden, können einzeln angesteuert werden. Sie werden an den Enden mit Magneten gelenkig verbunden, die eine ferromagnetische Silikon-Verbund-Membran ( $40\text{kg/m}^2$ ) als grundlegende Schalhaut halten. Jene ist außerdem für die geometrische Interpolation der räumlich konfigurierten Enden der Linearaktoren zuständig. Die Magnetkräfte der Aktoren-Enden werden so dimensioniert, dass einerseits ein Verrutschen durch die Auflast des zu schalenden Elements verhindert wird, aber andererseits ein horizontales Verschieben der Silikon-Membran beim Formeinstellungsprozess noch möglich ist. Eine weitere Silikonmembran wird aufgelegt, um den Verschleiß der magnetischen Membranebene zu verringern.

Um auch die geometrische Flexibilität der Grundrisse zu gewährleisten, wurde ein flexibles magnetisches Berandungs-Element von ADAPA entwickelt. Laser projizieren exakte Kurven, an denen die Berandung platziert werden soll. Die Kosten eines ADAPA Schalungssystem inkl. des elektromechanischen Kontrollsystems und des 3D-Lasers belaufen sich auf etwa 250 000€. [19, 20] Das ADAPA Schalungssystem wurde zuletzt 2022 bei der Produktion von knapp 40 000 Betonpaneelen für den Flughafen in Kuwait eingesetzt.

Durch das System von ADAPA wird eine große Bandbreite an doppelt gekrümmten Formen produzierbar. Dies jedoch nur, solange keine großen lokalen Krümmungen, oder harten Kanten erzielt werden sollen. Eine geometrische Eigenschaft, die beispielsweise für die Erzeugung von Rippen oder Sicken erforderlich wäre. Die interpolierende Membran stellt hier den limitierenden Faktor dar.



Abb. 2.11: Einsatz von ADAPA für die Herstellung der rund 40 000 Betonpaneele des Flughafens in Kuwait

**Dynapixel** Die Einschränkung nur stetig gekrümmte Flächen erzeugen zu können, löst das Dynapixel-System mit dem Multipoint Forming Verfahren (MPF). Anstatt einer interpolierenden Membran wird die zu schalende Geometrie über automatisiert verstellbare Stifte diskretisiert. Diese sind im Gegensatz zum System ADAPA kleiner dimensioniert, dafür aber auch wesentlich dichter angeordnet. Wie in Abb. 2.12 erkennbar, sind so auch sich unstetig krümmende Flächen möglich. Die von den Stiften gebildete Oberfläche besitzt noch eine gewisse durch die Kugelflächen erzeugte lokale Unstetigkeit, die mit einer Silikonlage ausgeglichen wird. Das System soll den hohen Arbeits- und Zeitaufwand, der für den Formenbau — besonders für Prototypen — erforderlich ist, signifikant reduzieren.[21, 22]

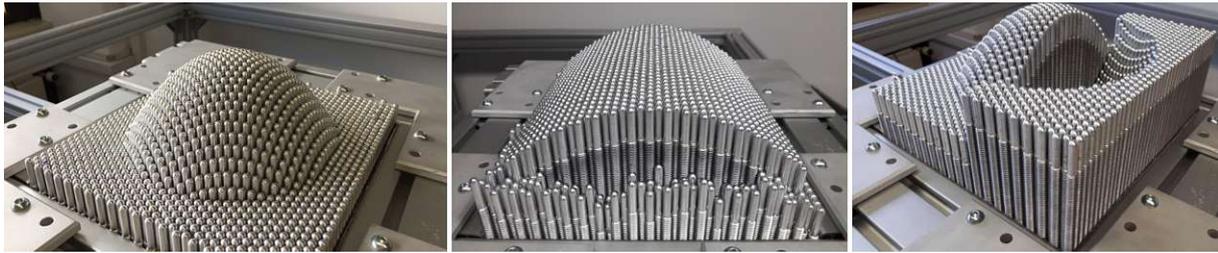


Abb. 2.12: Dynapixel Schalungssystem[21]

# Kapitel 3

## Entwicklung des Deckensystems

### 3.1 Grundlagen zu Bögen, Gewölben und Schalen

Bereits seit Jahrhunderten beschäftigt sich die Menschheit mit der praktischen Anwendung und der Theorie der Bogen- und Gewölbstrukturen. Die Motivation dafür stellen die zahlreichen Vorteile rein druckbeanspruchter Strukturen dar. Einfache Materialien von geringer Festigkeit können auf eine sehr effektive Art eingesetzt werden, um große Spannweiten bei filigraner Bauweise zu erzielen. Die Meisterschaft dieser Kunst wird vor allem bei gotischen Kathedralen sichtbar. Weiters ergibt sich durch die reine Druckbeanspruchung die Möglichkeit, Materialien mit geringer Zugfestigkeit, wie beispielsweise Mauerstein, Sandstein und Beton einzusetzen. Diese ist bei den genannten Materialien meist eine Größenordnung unter der jeweiligen Druckfestigkeit. Aufwändige, oder zur jeweiligen Zeit gar nicht mögliche Lösungen zur Zugbewehrung konnten daher weggelassen werden.

Die Idealform des Bogens wurde erstmals durch Robert Hooke beschrieben. Er verschlüsselte seine Erkenntnis in einem 1675 veröffentlichten Anagramm:

*abcccddeeeefggiiiiillmmmmnnnnnooprrrsstttttuuuuuuuux.*

welches entschlüsselt ergibt:

*Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum.*

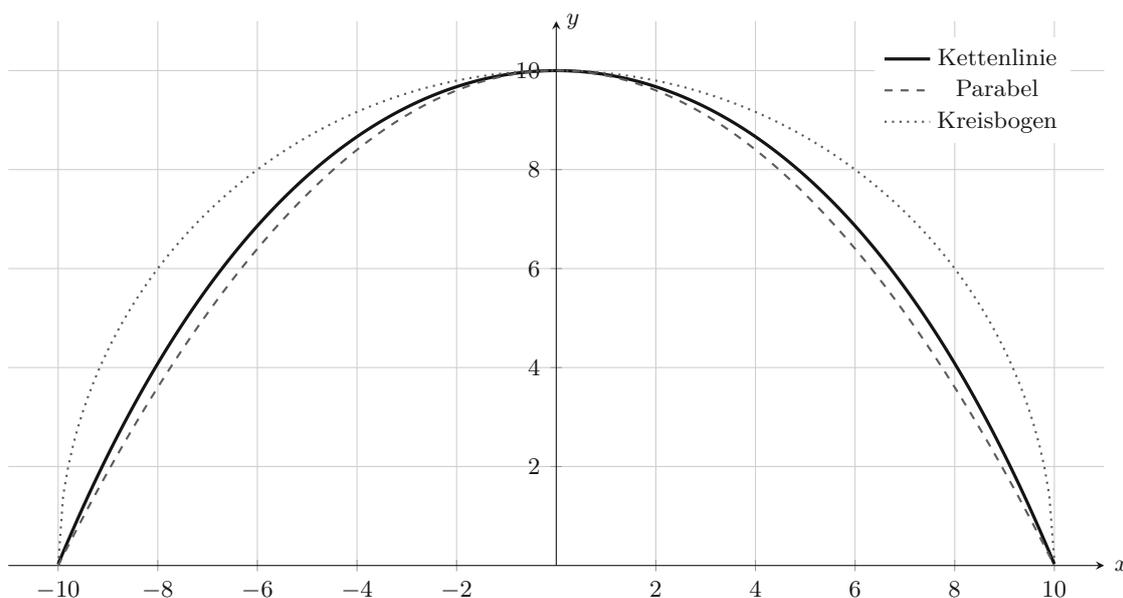
Wie eine Kette flexibel hängt, so wird es [der Bogen] als fest Zusammenhängendes umgekehrt stehen.

Damit beschreibt er den optimalen, unter Gleichlast belasteten Bogen, welcher sich durch die Inversion der Form einer ebenso unter Gleichlast belasteten flexiblen Kette, der Kettenlinie oder Katenoide ergibt. Abhängig von der gewählten Seillänge und den Auflagerpositionen, ergeben sich unterschiedliche Kurven. Die Katenoide beschreibt auch die bei homogener Massenverteilung eines Bogens resultierende Stützlinie. Jene Kurve, auf welcher die resultierenden Normalkräfte entlang laufen. Hooke konnte die Kettenlinie noch nicht exakt mathematisch beschreiben. Erst später wurde sie durch den Cosinus Hyperbolicus definiert:

$$y(x) = a \cosh \frac{x}{a} \tag{3.1}$$

Mithilfe der Katenoide kann auch die Tragsicherheit eines Bogens bzw. Gewölbes homogener Massenverteilung bestimmt werden. Solange eine Katenoide durchgehend innerhalb des Querschnitts gebildet werden kann, gilt dieser als grundsätzlich tragfähig. Für einen Kreisbogen lässt sich somit der minimal erforderliche Querschnitt bestimmen. Dieser liegt bei rund  $r/10$ . Bei kleinerem Querschnitt tritt ein Stabilitätsversagen ein. Liegt die Dicke beispielsweise bei dem dreifachen, so ergibt sich ein geometrischer Sicherheitsfaktor von 3.[12]

Dieses Wissen ist in den Skizzen von Poleni zur Untersuchung der Stabilität und Rissbildung der Kuppel des St. Petersdom aus dem Jahre 1748 erkennbar. Abb. 3.2 stellt den Querschnitt der



**Abb. 3.1:** Invertierte Kettenlinie mit  $y(x) = r - a \cosh a/x + a$ , Parabel mit  $y(x) = r - ax^2$  und Kreisbogen mit  $y(x) = \sqrt{r^2 - x^2}$ . Parameter  $a$  wurde jeweils so gewählt, sodass sich die Auflagerpunkte aller Kurven berühren.

Kuppel dar, die Katenoide unter Gleichlast und jener Stützlinie bei inhomogen verteilter Masse (aus dem Querschnitt entnommen). Interessant bei dieser Untersuchung ist, dass die ermittelte Stützlinie zum Großteil genau im leeren Zwischenraum der Kuppel liegt. Das stellt jedoch kein Problem für die Tragsicherheit dar, da sich die Stützlinie dennoch im Bereich des strukturell wirksamen Querschnitts befindet.

Zur Anwendung an Gewölben und Schalen lässt sich die Kettenlinie auch in den dreidimensionalen Raum als invertierte hängende flexible Membran erweitern. Diese weist dabei jedoch andere Eigenschaften auf: Beispielsweise können bei gleichbleibender Form eine große Bandbreite von Lastfällen aufgenommen werden - mit der Voraussetzung, dass es bei diesen Lasten zu keiner Faltenbildung kommt. Diese würden das Vorhandensein von Druckspannungen und beim Invertieren das Auftreten von Zugspannungen bedeuten.

Die Invertierung einer Membranform bewirkt analog zur invertierten Kettenlinie, dass Kräfte ohne Biegespannungen, d.h. über Membranspannungen abgetragen werden. Bei einer reinen Biegebeanspruchung werden die Randfasern des Querschnitts maximal und Mittelfaser gar nicht beansprucht, während bei einer Belastung mit Normalspannungen der gesamte Querschnitt ausgenutzt werden kann. Dies hat zur Folge, dass Material optimal ausgenutzt wird und Schalenquerschnitte daher wesentlich kleiner dimensioniert werden können.[12]

Dieser Membranspannungszustand kann jedoch nur unter bestimmten Randbedingungen aufrechterhalten bleiben. Unter anderem muss ein stetiger Verlauf der Schalenfläche, des Querschnitts und der Lasten gegeben sein und es dürfen an den Auflagerstellen keine Momente oder Querkräfte eingeleitet werden. Kann dieser Zustand nicht aufrechterhalten werden, so kommt es zu Zugspannungen, welche die Effektivität der Ausnutzung des Materials verringern.

Abb. 3.3 zeigt auf, welchen Einfluss die Exzentrizität der resultierenden Druckkräfte bezogen auf die Schalenmittelfläche hat. Bei einer Abweichung von  $e = \pm t/6$  können alle Lasten noch über Druckspannungen abgetragen werden. Bei einer Exzentrizität von  $t/6 \leq e \leq t/2$  kommt es zwar noch nicht zum Versagen der Schale, es treten jedoch Zugspannungen im Querschnitt auf,

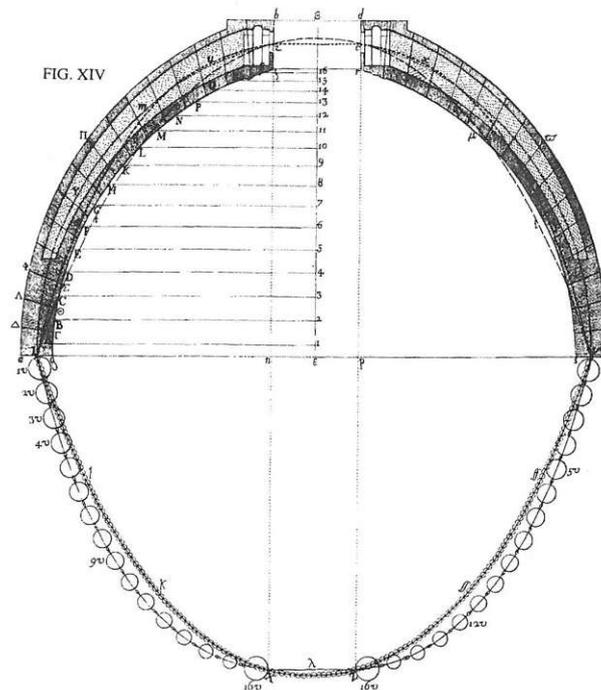


Abb. 3.2: Untersuchungen Polenis zur Stabilität und Rissbildung des St. Petersdom in Rom, 1748

welche bei Gewölbestructuren zu Rissen führen und eventuell von den geringen Zugfestigkeiten des Materials noch aufgenommen werden können.

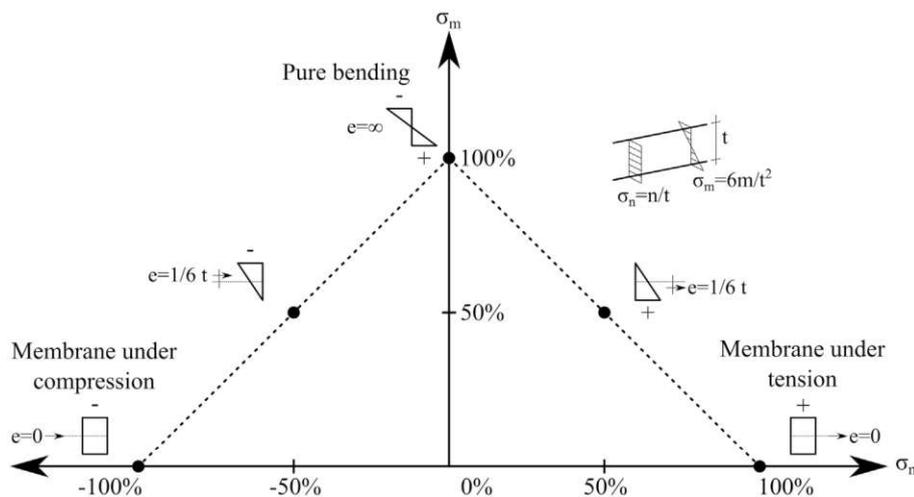
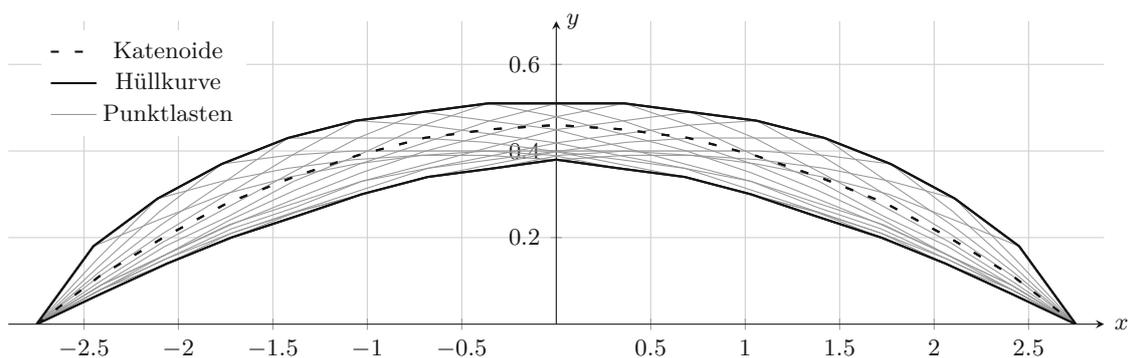


Abb. 3.3: Einfluss der Exzentrizität auf das Verhältnis zwischen Normalspannung durch Biegemoment und Normalspannung aufgrund von Normalkräften (Druck bzw. Zug)[23]

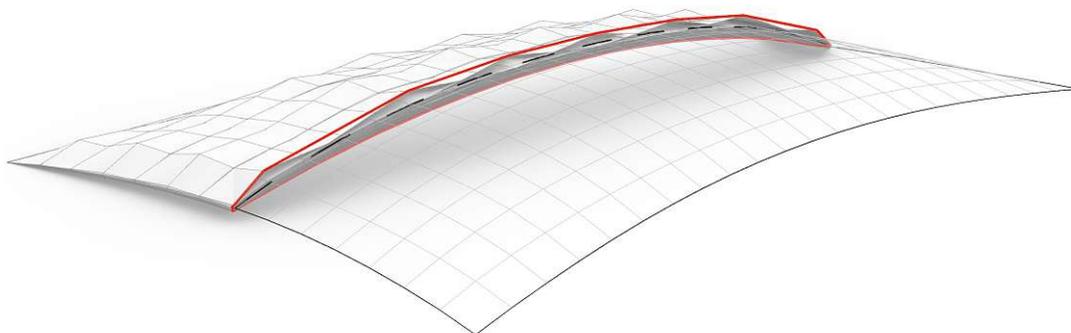
## 3.2 Ansatz zur geometrischen Steifigkeit

### 3.2.1 Problematik der asymmetrischen Lastfälle

Das lokale Verlassen der resultierenden Druckkurve bzw. Druckfläche aus dem Querschnitt wird meist durch den Eintritt einer asymmetrischen oder einer Punktlast verursacht. Abb. 3.4 zeigt die



**Abb. 3.4:** Resultierende Stützcurven und Hüllkurve bei Kombination aus Gleich- und asymmetrischer Einzellast mit  $q=3\text{kN/m}$  und  $F=2\text{kN}$



**Abb. 3.5:** Resultierende Stützflächen und hüllender Querschnitt (rot) bei Kombination aus Flächen- und asymmetrischer Einzellast mit  $q=3\text{kN/m}^2$  und  $F=3\text{kN}$

Schar von Druckkurven, welche sich bei einer Kombination von Gleich- und Punktlast ergeben. Die Punktlast wurde dabei iterativ über den gesamten Querschnitt bewegt. Eine konvexe Hülle aller resultierenden Kurven liefert einen Querschnitt, welcher nun in der Lage ist, die definierten Lastfälle abzutragen. Abb. 3.5 überträgt die Idee auf den dreidimensionalen Raum. Abhängig von der Größe der asymmetrischen Lastfälle, wird klar, dass das Einhüllen der Stützcurven, respektive Stützflächen eine signifikante Querschnitts- und somit Massenvergrößerung mit sich bringt. Es ergibt sich die Frage nach einem alternativen, effektiveren Lösungsansatz.

**Aufnahme der Zugspannungen über Bewehrung** Der Querschnitt des Tragwerks kann klein gehalten werden, wenn große Zugspannungen in Kauf genommen werden. Materialien mit geringer Zugfestigkeit, wie Beton, würden diese jedoch nicht aufnehmen können und eine Bewehrung wäre erforderlich. Diese Option fällt jedoch aufgrund der Zielsetzung der Material- und Emissionsminimierung, sowie der einfachen sortenreinen Rezyklierung weg. Hier sei wieder auf eine Übersicht der spezifischen Emissionen unterschiedlicher Materialien aus Tab. 1.1 aus Kapitel 1 verwiesen.

**Erhöhung der Steifigkeit über Rippen** Einen wesentlich effektiveren Lösungsansatz stellt die Addition von Rippen auf das Gewölbe dar. Das eingangs erwähnte Rippendeckensystem der BRG wendet genau diesen Ansatz an. Der strukturell wirksame Querschnitt wird erhöht, das dafür erforderliche Material fällt jedoch aufgrund der entstandenen Hohlkörper gering aus. Im Zuge dessen wird auch die Steifigkeit des Schalentragerwerks wesentlich erhöht. Dies ist nicht nur

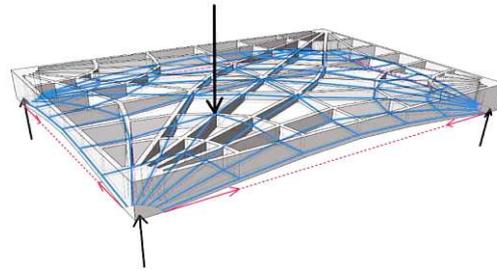


Abb. 3.6: Aufnahmefähigkeit von asymmetrischen Lastfällen der BRG-Rippendecke [8]

strukturell von Vorteil, sondern bringt auch eine Verbesserung der akustischen Eigenschaften mit sich.[24]

Als nachteilig erweist sich jedoch die Herstellbarkeit solcher Rippengeometrien. Die zur Schalung benötigte negative Form eines Rippendeckensystems erfordert u.a. eine präzise Fertigung aller für die Rippen erforderlichen Hohlkörper. Besonders in Anbetracht der Zielsetzung einer geometrisch flexiblen Schalung stellen diese Schalungskörper ein großes Problem dar.

Der Lösungsansatz mit Rippen mag somit für die Fertigung von Deckenelementen mit Standardmaßen sinnvoll sein, nicht jedoch für die Herstellung geometrisch flexibler Deckenelemente.

**Erhöhung der Steifigkeit über Sicken** Die Steifigkeit und Aufnahmefähigkeit der asymmetrischen Lastfälle einer Schale lässt sich auch über lokale, Rippen bildende Vertiefungen, sog. *Sicken* verbessern. Der strukturell wirksame Querschnitt wird entlang der Sicken durch die Vertiefungen erhöht. Die in Kapitel 2 erwähnten Bauten von Torroja und Isler sind Beispiele der Anwendung dieser Rippen bildenden Sicken.

Die erhöhte Steifigkeit der V-förmigen Rippen bewirkt zudem aber auch, dass Spannungen in diesen Bereichen stärker angezogen werden. Die Unstetigkeit der Schalenfläche an den Sicken hat auch zur Folge, dass durch die erforderliche Kraftumlenkung Spannungskonzentrationen auftreten.

Außerdem wird durch die Vertiefung der lokale Krümmungsradius orthogonal zur Sicke zwar verkleinert, tangential jedoch vergrößert. Folgende Gleichungen zur Meridianspannung  $n_\varphi$  und Ringspannung  $n_\vartheta$  einer Kugelsegmentschale machen den Zusammenhang zwischen Krümmung und resultierenden Kräften klar.

$$n_\varphi = -\frac{r\gamma}{1 + \cos \varphi} \quad (3.2) \quad n_\vartheta = +r\gamma \left( \frac{1}{1 + \cos \varphi} - \cos \varphi \right) \quad (3.3)$$

Hierbei beschreibt  $r$  den Radius der Schale,  $\gamma$  die Wichte des Materials und  $\varphi$  den Winkel der Kugelschale bezogen zur Rotationsachse. Bei gegebenem Material wird ersichtlich, mit steigendem Radius die Spannungen  $n_{\varphi,\vartheta}(r, \varphi)$  ebenfalls ansteigen.

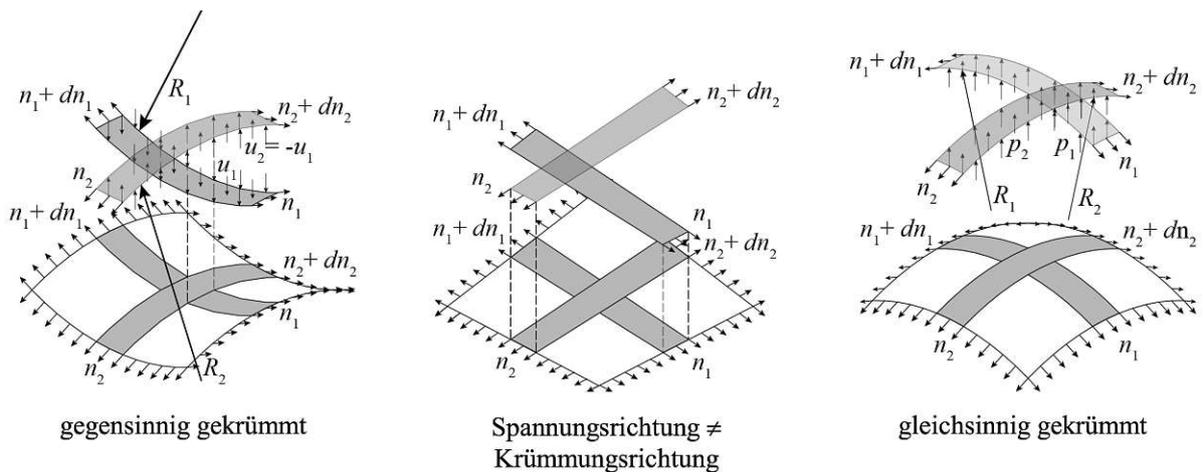
Mit den erhöhten Spannungen entlang der Sicken kommt es bei konstanter Querschnittshöhe somit zu einer inhomogenen Materialbeanspruchung. Um ein homogeneres Spannungsfeld zu erreichen und dadurch eine näher am Optimum liegende Materialbeanspruchung, sowie ein leichteres Tragwerk auszubilden, ist eine Erhöhung des Querschnitts entlang der Sicken notwendig. Die Antwort auf diese Fragestellung wird anhand der FE-Berechnungen im nächsten Abschnitt genauer betrachtet.

### 3.3 Entwurf des Gewölbedeckensystems

#### 3.3.1 Erzeugung von Sicken in pneumatischen Formen



Abb. 3.8: Erhöhung der lokalen Krümmung durch Bespannung mit einem Seilnetz



$$\frac{n_1}{r_1} - \frac{n_2}{r_2} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{n_1}{r_1} + \frac{n_2}{r_2} = p_1 + p_2 = p \quad (3.5)$$

Abb. 3.9: Spannungen für doppelt gekrümmte Membranflächen in den Richtungen 1 und 2 [25]

Bei pneumatischen Formen lassen sich diese V-förmigen Rippengeometrien über das Spannen von Seilen bzw. Bändern größerer Dehnsteifigkeit über mit Überdruck beaufschlagten Membranen erzeugen. Das Spannen von Seilen bei pneumatischen Formen hat jedoch im Gegensatz zu den V-förmigen Rippen einen etwas anderen Hintergrund: Mithilfe der Seile ist es möglich, die Krümmung einer Membran bei gleichen Randbedingungen zu erhöhen und daher, wie in Gleichung 3.5 ersichtlich, die Spannungen signifikant zu verringern. Somit wird es beispielsweise möglich, große Spannweiten mit relativ geringen Festigkeiten der Membran zu bewältigen. Die genannten Vorteile haben den Preis, dass wesentlich erhöhte Zugspannungen in den Seilen auftreten (ähnlich

zu den erhöhten Druckspannungen in den V-förmigen Rippen der Schale). In Abb. 3.8 ist die Anwendung solcher Spannseile sichtbar.

Genau diese Eigenschaft der pneumatischen Formen stellt die Grundlage der vorliegenden Arbeit dar. Sie wird in Form eines pneumatischen Schalungssystems genutzt. Weiters wird nun auch die geometrische Flexibilität einer Schalung denkbar: Membran und Seile stellen flexible und geometrisch veränderbare Formen dar. Die detaillierte Herangehensweise zu diesem Gedanken wird in Kapitel 4 beschrieben.

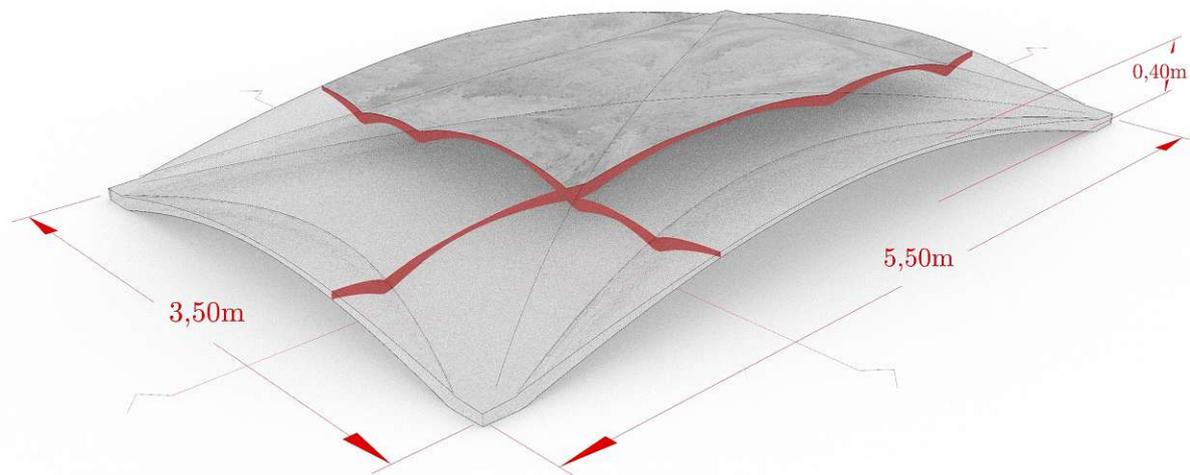
Es ergibt sich also eine sinnvolle Schnittmenge aus geometrisch flexibel herstellbaren Formen einerseits und einer mit Rippen versehenen Schalengeometrie andererseits.

Bei Anwendung pneumatischer Formen sind die folgenden Randbedingungen zu erfüllen [17, 25]:

- Pneumatisch gebildete Flächen müssen eine stetige ein- oder zweiachsige Krümmung aufweisen. Harte Kanten sind etwa nur mit zusätzlichen Bauelementen möglich.
- Die Gleichgewichtsbedingungen müssen an jedem Punkt der Fläche nur mithilfe von Membrankräften erfüllbar sein.
- In jedem Punkt der Fläche müssen die Normalspannungen größer Null sein.

Die daraus bildbaren Geometrien können somit gewisse Abweichungen von jenen der rein tragwerkstechnisch optimal ausgelegten Geometrien aufweisen. Es ist daher zu untersuchen, wie groß diese Abweichungen sind und welchen Einfluss diese Approximation auf die Tragwerkeigenschaften hat.

### 3.3.2 Schalengeometrie der V-Form



**Abb. 3.10:** V-Form: Erzielen der geometrischen Steifigkeit über Sicken

Die Ausgangsform des Deckenelements ist ein Rechteck, das zu einem Viereck verallgemeinerbar ist. Dies wird durch das geometrisch flexible Schalungssystem (Kapitel 4) ermöglicht. Gekrümmt berandete Elemente wären prinzipiell denkbar, werden in dieser Arbeit jedoch nicht behandelt. Die V-förmigen Rippen werden entlang der unter Gleichlast auftretenden Hauptspannungstrajektorien in Druckrichtung ausgelegt. Die Anzahl dieser wurde auf 6 Rippen beschränkt, als

Mittelmaß zwischen Material- bzw. Herstellungsaufwand und strukturellem Verhalten gegenüber asymmetrischen Lasten. Zwei davon laufen diagonal, die restlichen vier nach innen gekrümmt von der jeweiligen Berandung im Grundriss. Alle Rippen laufen zu den in den Ecken befindlichen Auflagerpunkten. Um an diesen Stellen Spannungskonzentrationen zu verhindern, wurden die Auflagerstellen verbreitert ausgeführt.

Die aus der Schalentragswirkung entstehenden Schubkräfte werden über Zugseile kurzgeschlossen. Sie können dabei mit einer Vorspannkraft versehen werden. Einerseits wird somit die Durchbiegung reduziert — unter Eigenlast kann diese sogar auf Null reduziert werden — und andererseits können teilweise auftretende Biege- und somit Zugspannungen in reine Normalspannungen überführt werden.

Der Stich der Schale ist ebenso variabel wie das Verhältnis von Rippenkrümmung zu Membrankrümmung und kann je nach Projektbedingungen optimiert werden. Ein größerer Stich bringt geringe Schubkräfte und Normalspannungen mit sich. Ein höheres Verhältnis von Rippen- zu Membrankrümmung bringt eine größere Steifigkeit mit sich. Erfordert dabei aber auch ein größeres Volumen.

Die Schalendicke ist auch variabel — diese kann beim Betonieren der jeweiligen Belastung entsprechend festgelegt werden — weist jedoch eine verlaufende Querschnittserhöhung hin zu den Sicken auf.

## 3.4 FE-Berechnungen

### 3.4.1 Erstellung des FE-Modells

Für die Berechnungen wurde das parametrische Finite Elemente Programm Karamba3D verwendet. Die Schalengeometrie wurde mithilfe von in Karamba3D implementierten TRIC-Elementen modelliert. Die direkte Integration mit der CAD-Modellierungsumgebung ermöglichte einen schnellen Workflow, bei dem die Geometrie anhand der berechneten Ergebnisse iterativ angepasst wurde, bis eine Schalengeometrie mit zufriedenstellender Leistung erreicht werden konnte.

Die FE-Berechnung wurde dem Karamba-Workflow entsprechend aufgesetzt: Diskretisierung der Geometrie in ein Dreiecksnetz → Konvertierung dieser in Schalen-Elemente und Definition der Randbedingungen → Erstellung des FE-Modells → Berechnung mittels Theorie erster bzw. zweiter Ordnung → Ausgabe und Darstellung der Ergebnisse.

**Erstellen des Dreiecksnetzes** In erster Linie wurde eine Konvergenz-Analyse für die Größe der Dreieckselemente durchgeführt. Maximalwerte der ersten und zweiten Hauptspannungen der jeweils unteren und oberen Außenfläche wurden als relevante Parameter herangezogen. In Abb. 3.11 wird sichtbar, dass ab einer Anzahl von circa  $2 \cdot 10^5$  Elementen eine ausreichende Genauigkeit der Werte erreicht wird. Alle folgenden Berechnungen wurden mit dieser Mesh-Dichte durchgeführt.

**Auflagerrandbedingungen** Anfangs wurden Netzknoten an der Auflagerfläche um alle drei Achsen gelenkig gelagert sowie in ihrer Translation in allen Achsen gesperrt. Diese Art der Lagerung bewirkte jedoch, dass das Tragwerk effektiv biegesteif eingespannt wurde. Es wurden somit unerwünschte Störmomente in die Schale eingeleitet, da die Auflagerstellen Druck- wie auch Zugkräfte aufnehmen konnten. Eine Lösung wäre gewesen, die Auflagerpunkte unidirektional wirken zu lassen, dies wird jedoch aktuell in Karamba3D nicht unterstützt.

Um die Problematik der Spannungskonzentrationen sowie der Störmomente zu umgehen, wurden alle Auflagerknoten auf steifen Federelementen gelagert. Dies hatte den Effekt, dass die

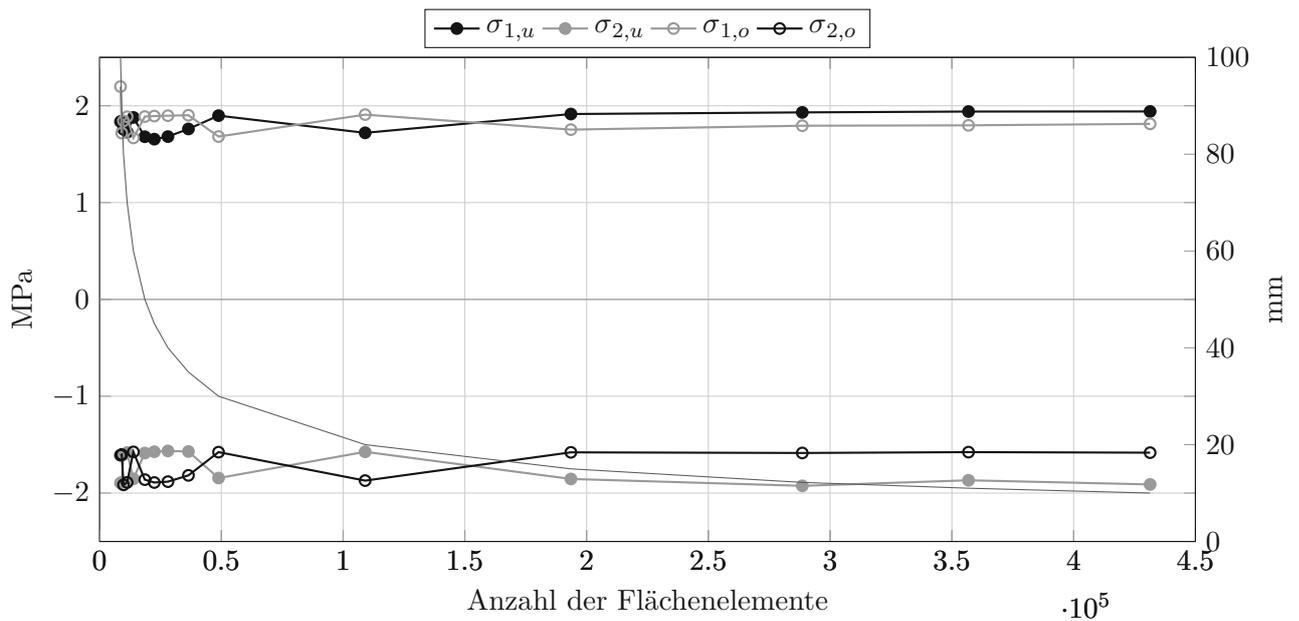


Abb. 3.11: Konvergenzanalyse für das FE-Modell

Kräfte an den Auflagerstellen flächiger eingetragen wurden und dass Störmomente zwar nicht vollständig entfernt, jedoch signifikant reduziert wurden.

Die gefederte Lagerung gibt unter horizontalem Schub zwar etwas nach, müsste jedoch noch genauer definiert werden, um den realen Fall noch besser zu approximieren. Dies hängt jedoch unter anderem von der genauen Größe der Vorspannung, den Querschnitten der Zugseile und deren Materialeigenschaften ab. Eine genauere Untersuchung diesbezüglich wurde in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

**Modellierung der Sicken** Die anfänglich scharfkantig modellierten Sicken des Deckenelements führten ebenso zu Spannungsspitzen. Mit einer Verrundung konnte dieses Problem gelöst werden. Der Radius wurde dabei so gewählt, dass Spannungen stetig verteilt werden konnten.

**Vorspannungen** Wie in Ranaudo et al. [8] erwähnt, bringt eine nachträgliche Vorspannung des Deckenelements große Vorteile mit sich. Potenzielle Zugspannungen werden reduziert und die Durchbiegung im Mittelpunkt der Decke unter ständigen Lasten wird verhindert. Für das FE-Modell wurde eine Vorspannung über eine Verschiebung der Auflager um insg.  $\Delta l = -0,5\text{mm}$  erreicht. Im völlig unbelasteten Zustand wäre dies äquivalent mit einer Vorspannung von 15kN.

**Querschnittsverlauf** Wie bereits erwähnt erzeugen Sicken Spannungskonzentrationen. Dieses inhomogene Spannungsfeld sollte daher auch mit einer angepassten Querschnittshöhe einhergehen. Wie später in Abschnitt 3.4.3 erläutert, bringt eine lokale Anpassung des Querschnitts eine sehr große Materialreduktion mit sich. Eine linear von  $t_{max} = 80\text{mm}$  auf  $t_{min} = 30\text{mm}$  verlaufende Querschnittsfläche wurde gewählt.  $t_{min}$  erfüllt dabei die rein strukturellen Anforderungen. Mit Einbeziehung des Brandschutzes, sowie der bauphysikalischen Anforderungen und vor allem der eingesetzten Korngröße des Zuschlags und der sich damit ergebenden minimalen Wandstärke, ist noch eine leichte Erhöhung von  $t_{min}$  zu erwarten.

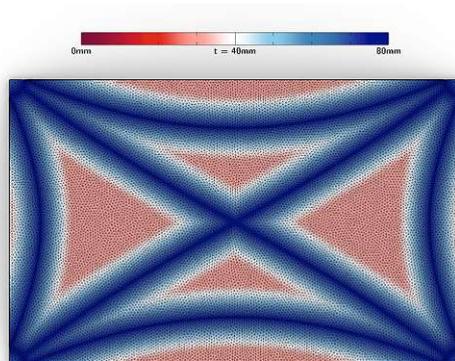


Abb. 3.12: Querschnitt

**Lastannahmen und Material** Der Tragsicherheitsnachweis wird gemäß Eurocode durchgeführt. Die Lasten werden daher wie folgt berechnet:

$$E_d = \sum \gamma_{G,i} E_{Gk,i} + \sum \gamma_{Q,j} E_{Qk,j} \quad (3.6)$$

Die ständigen Lasten  $E_{Gk,i}$  mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G = 1.35$  inkludieren das Eigengewicht  $E_{Gk,1}$ , sowie die Auflast mit  $E_{Gk,2} = 1\text{kN/m}^2$ . Die veränderlichen Lasten mit  $\gamma_Q = 1.5$  werden  $E_{Qk,1} = 3\text{kN/m}^2$  angenommen und vollflächig oder asymmetrisch verteilt aufgetragen.

Als Ausgangsmaterial wurde Beton mit der Festigkeitsklasse C30/37, mit einer Druckfestigkeit von  $f_{ck} = 30/37\text{MPa}$ , einer um eine Größenordnung kleineren Zugfestigkeit von  $f_{ctm} = 3\text{MPa}$  gewählt und einer Dichte von  $\rho = 2500\text{kg/m}^3$ . Der Teilsicherheitsbeiwert für Beton liegt bei  $\gamma_M = 1.5$ . Für Gleichung 3.6 ergibt sich somit folgende Flächenlast:

$$E_d = \gamma_G(1,42\text{kN/m}^2 + 1,00\text{kN/m}^2) + \gamma_Q 3\text{kN/m}^2 = 7,8\text{kN/m}^2$$

### 3.4.2 Interpretation der Ergebnisse

**Festigkeitshypothese für spröde Materialien** Als Festigkeitshypothese für das spröde Materialverhalten von Beton wird die Hauptnormalspannungshypothese nach Rankine angewandt. Für die zweiachsige Beanspruchung wird die Vergleichsspannung  $\sigma_{v,R} = \sigma_{1,2}$  mithilfe der Hauptnormalspannungen definiert:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.7)$$

mit

$$\sigma_x = \frac{Fx}{t} + \frac{6M_x}{t^2} \quad (3.8)$$

$$\sigma_y = \frac{Fy}{t} + \frac{6M_y}{t^2} \quad (3.9)$$

$$\tau_{xy} = \frac{F_{xy}}{t} + \frac{6M_{xy}}{t^2} \quad (3.10)$$

Ein Versagen tritt ein, wenn eine der beiden Hauptspannungen die Druck- bzw. Zugfestigkeit des Materials überschreitet.

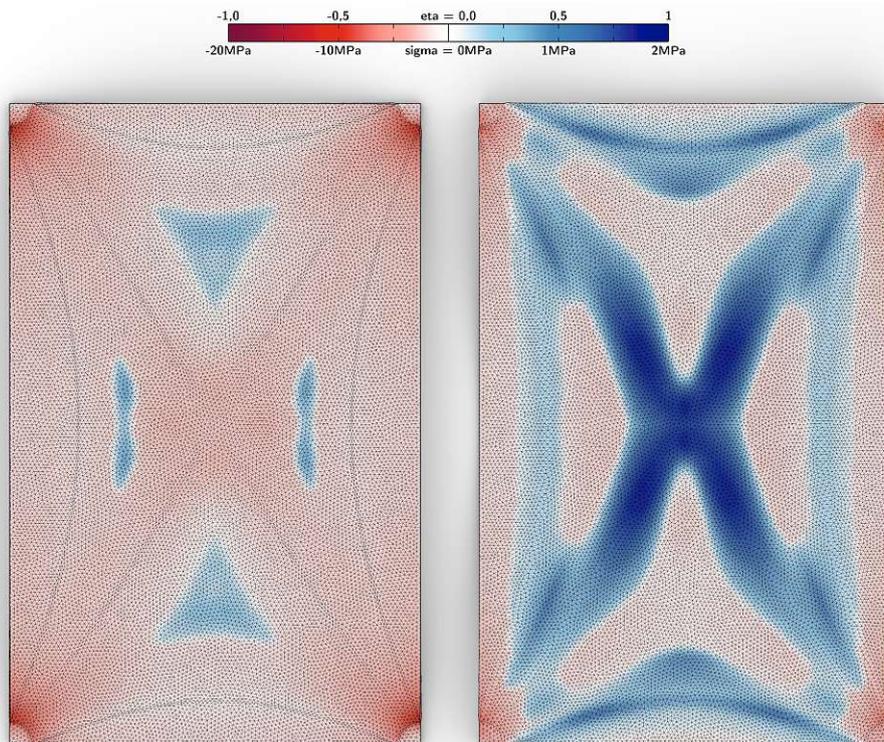


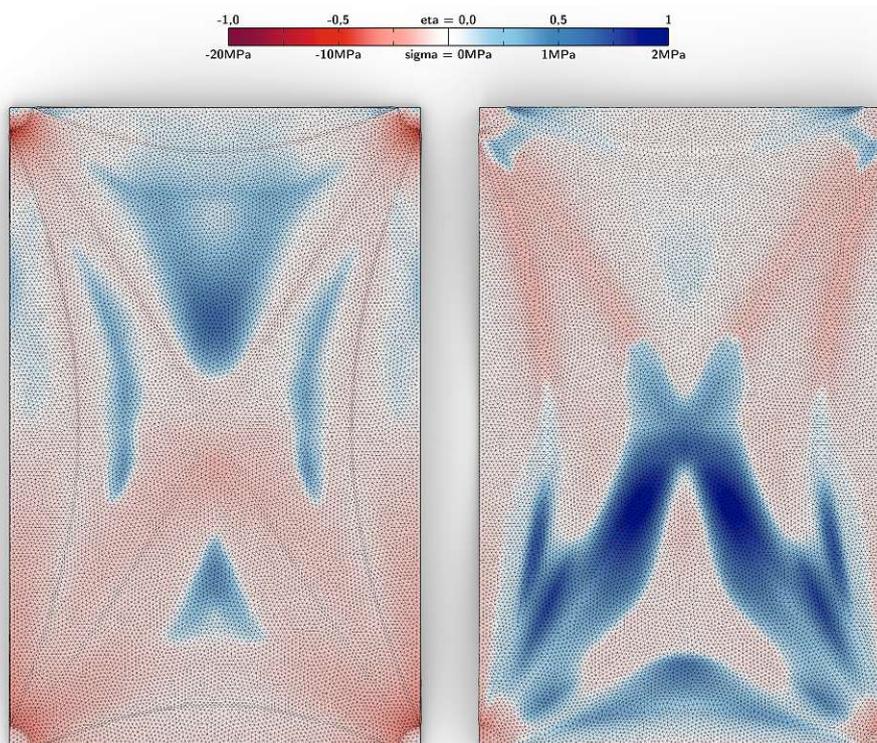
Abb. 3.13: Ausnutzungsgrad der Schale bei Gleichlast, links: Oberseite, rechts: Unterseite

**FE-Ergebnisse** In Abb. 3.13 und 3.14 sind Ausnutzungsgrade  $\eta_f$  des Materials für jeweils Ober- und Unterseite der Schale dargestellt, wobei Abb. 3.13 den Lastfall unter gleichmäßig verteilter Nutzlast und Abb. 3.14 jenen unter asymmetrischer Nutzlast zeigt — die untere Hälfte der Decke wurde mit  $3\text{kN/m}^2$  belastet. Der Ausnutzungsgrad  $\eta_f \in [-1; 1]$  wird der Normalspannungshypothese entsprechend mit  $\sigma_1 \gamma_M / f_{ctm}$  für die Zugspannungen und mit  $\sigma_2 \gamma_M / f_{ck}$  für die Druckspannungen berechnet. Hier ist zu betonen, dass aufgrund der Definition des Ausnutzungsgrades absolute Werte der Spannungen im Zugbereich um einen Faktor 10 farblich stärker dargestellt werden als jene im Druckbereich.

Für den symmetrischen Lastfall in Abb. 3.13 befindet sich die Schale weitgehend unter Druck, mit Spannungen auf Oberseite von bis zu  $\sigma_d = -6,9\text{MPa}$  und von bis zu  $\sigma_d = -9,3\text{MPa}$  an den Auflagerstellen, während sich kleine Zugspannungen entlang der Unterseite der Sicken ergeben. Mit  $\sigma_z = +1,8\text{MPa}$  liegen diese jedoch unter der Zugfestigkeit  $f_{ctm} = 3\text{MPa}$  und unter der abgeminderten Zugfestigkeit  $\sigma_{r,d} = 2\text{MPa}$  des Betons. Abb. 3.16 stellt daher Spannungen farblich noch einmal in ihrer tatsächlichen betragsmäßigen Größe dar.

Die Vorspannkraft hat neben der Stichhöhe einen großen Einfluss auf die im Endeffekt tatsächlich auftretenden Zugspannungen an der Unterseite des Deckenelements. Sie hängt aber auch von den maximal aufnehmbaren Vorspannkraften des Deckenelements unter ständigen Lasten ab. Die maximal mögliche Vorspannkraft setzt sich aus den jeweiligen horizontalen Auflagerreaktionen, sowie der Aufnahmefähigkeit der Decke gegenüber positiven Momenten zusammen. Unter ständigen Lasten ergeben sich  $F_y = 71\text{kN}$  parallel zur langen Seite und  $F_x = 51\text{kN}$  parallel zur kurzen Seite der Schale. Bei vollständiger Nutzlast — also  $E_d = 7,8\text{kN/m}^2$  betragen diese Werte  $F_y = 142\text{kN}$  und  $F_x = 95\text{kN}$ .

Die gleichmäßig aufgetragene Maximallast stellt zwar nicht den maßgebenden Lastfall dar, es sind dennoch große Spannungen im Mittelfeld der Decke erkennbar. Um die ungünstige



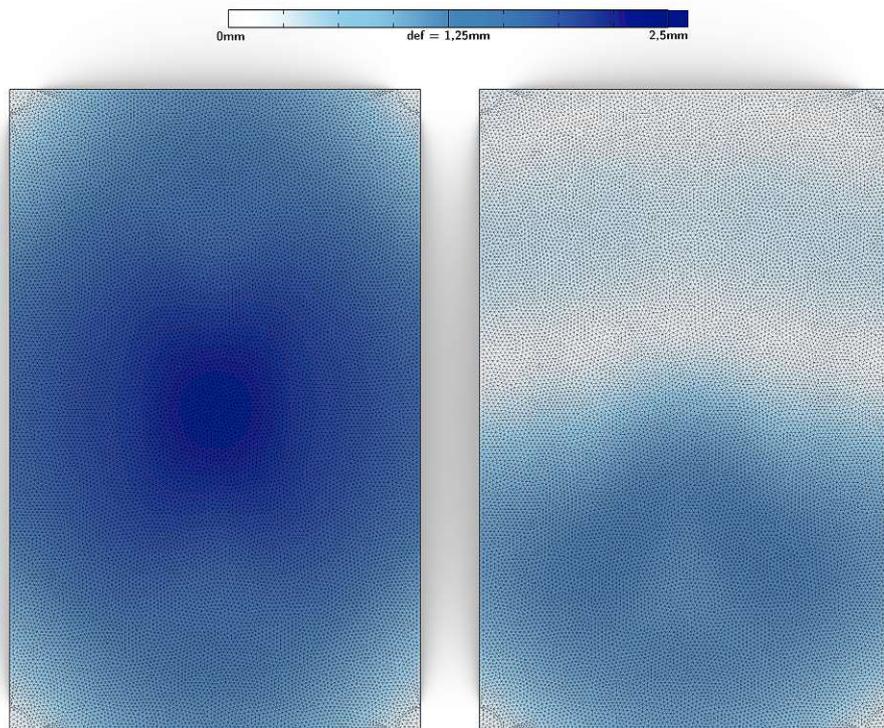
**Abb. 3.14:** Ausnutzungsgrad der Schale bei asymmetrischer Belastung in der unteren Hälfte, links: Oberseite, rechts: Unterseite

Materialbeanspruchung an dieser Stelle zu verbessern, sollte hier eine größere lokale Krümmung erzeugt werden. In weiteren Optimierungsschritten sollte dies verbessert werden.

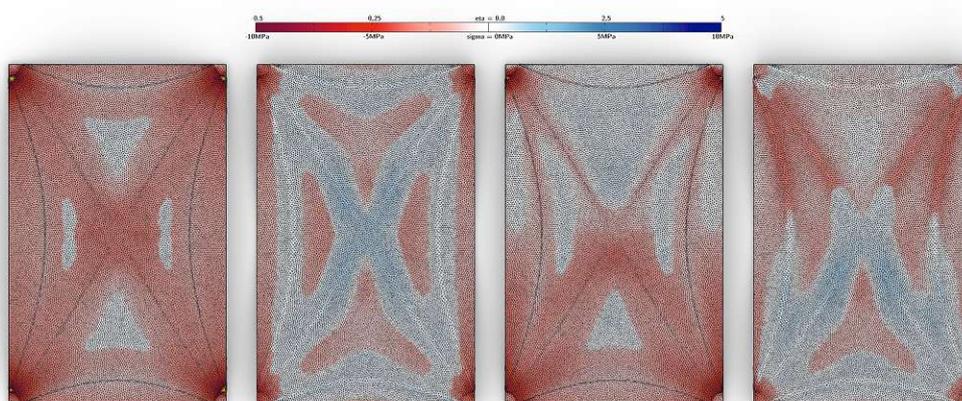
Beim asymmetrischen Lastfall in Abb. 3.14 wird die einseitige Belastung der V-förmigen Rippen sichtbar, welche lokal nun größere Zug- als auch Druckspannungen verursacht. Die Darstellung des Ausnutzungsgrades  $\eta_f$  zeigt eine anfangs unerwartete Verteilung: Zu erwarten wären klare Spannungsmaxima entlang der Sicken, denn an diesen Stellen wirken die größten Kräfte. Aufgrund der linearen Abnahme der Querschnittsfläche von den Sicken hin zur jeweiligen Segmentmitte, resultieren eigentlich kleinere Kräfte zu dennoch größeren Spannungen. Diese variierende Materialbeanspruchung weist darauf hin, dass bezüglich der Querschnittsabnahme noch Verbesserungen möglich sind.

Unter maximaler, gleichmäßig verteilter Belastung weist der Schalenmittelpunkt eine Verschiebung von  $z = -2,4\text{mm}$  auf (Abb. 3.15). Eine Erhöhung der Krümmung an dieser Stelle würde daher auch Verformungen der Decke reduzieren. Bei genauerer Betrachtung der Darstellung der Verformungen wird sichtbar, dass die Verformungszunahme zur Mitte hin noch einmal ansteigt.

Unter asymmetrischer Belastung bildet sich eine Wendezone der Decke mit  $z = 0\text{mm}$  ab. In der Darstellung aus Abb. 3.15 sind die Betragswerte der Verformungen gegeben. Die untere Hälfte der Decke verformt sich nach unten, die obere Hälfte nach oben.



**Abb. 3.15:** Absolutbeträge der Verformungen, bei links symmetrischer und rechts asymmetrischer Belastung

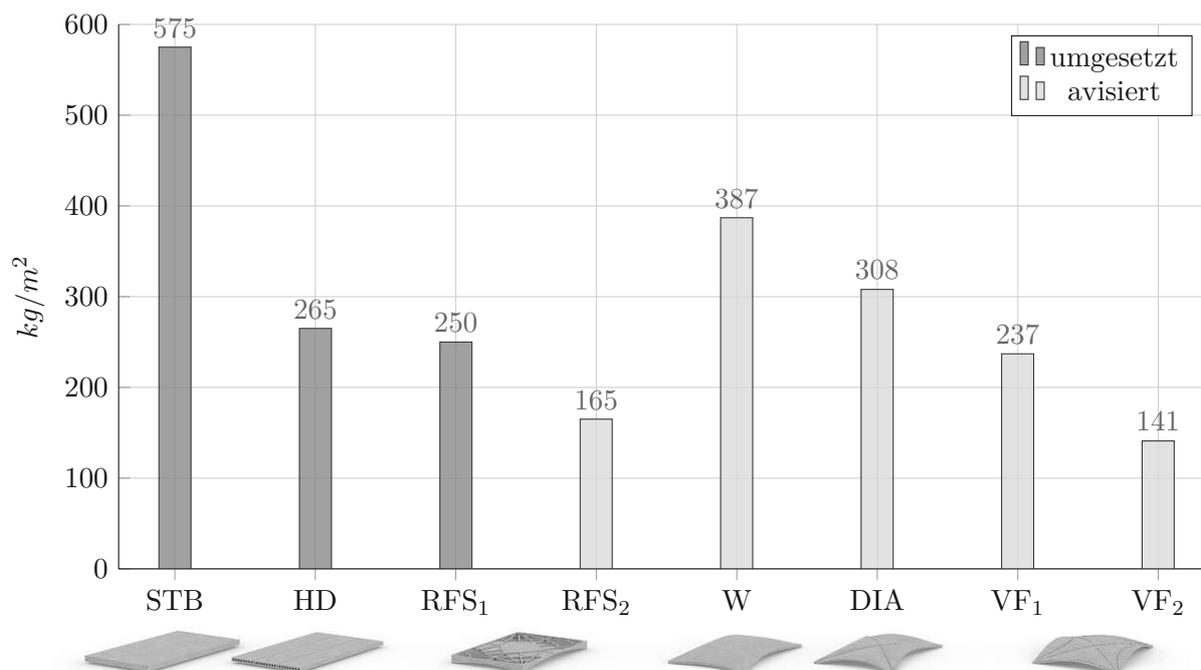


**Abb. 3.16:** Darstellung der maßgebenden Spannungen an jeweils Ober- und Unterseite der Schale, mit symmetrischen Lastfällen links und asymmetrischen Lastfällen rechts. Hierbei wurden Spannungen ihrem tatsächlichen Wert entsprechend farblich skaliert.

### 3.4.3 Einfluss der Geometrie auf die Masse

V-förmigen Rippen sind die Grundlage der vorliegenden Arbeit. Um die Effektivität und Wirkungsweise dieser Rippen zu verdeutlichen, wird im folgenden Graph die erste Fassung der V-Form Decke Schritt für Schritt aufgebaut und mit konventionellen Deckenlösungen anhand der spezifischen Masse verglichen.

Für den Vergleich wurden die gleichen Randbedingungen für alle Deckensysteme gewählt: Ein Deckenfeld von  $5,5m$  auf  $3,5m$ , sowie eine asymmetrische Nutzlast mit  $3kN/m^2$ .



**Abb. 3.17:** Spezifische Masse konventioneller Decken, des Rippmann Deckensystems und iterativ der V-Form Decke

**STB** Den größten Materialverbrauch weist die STB-Flachdecke bei einer Dicke von  $23cm$  mit  $575kg/m^2$  auf. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Großteil des Materials aufgrund der Verteilungen der Biegespannungen kaum beansprucht wird.

**HD** Das Beispiel der vorgespannten Hohldielen (HD) zeigt deutlich, dass mithilfe der Vorspannung der Decken eine Materialreduktion um den Faktor 2 auf  $265kg/m^2$  möglich wird. Die in der Zug-, als auch in der Druckzone platzierten vorgespannten Zugglieder bewirken eine starke Reduktion von Biegezugspannungen. Der Beton kann somit effektiver beansprucht werden. Die Vergleichbarkeit der vorgespannten Hohldielen ist jedoch nicht vollständig gegeben. Diese müssen aufgrund ihrer Spannrichtung in beiden Enden linear gelagert werden. Die dafür erforderlichen Unterzüge werden hier nicht mit einberechnet. Die HD sind auch nur in Standardmaßen verfügbar — das Achsraster der tragenden Elemente muss daher auf dieses Standardmaß vorab angepasst werden.

**RFS<sub>1</sub>** Das bei der Hilo-Einheit eingebaute Rippmann Deckensystem zeigt die Effektivität der Gewölbetragswirkung mit einer Materialreduktion von einem Faktor von über 2 deutlich. Der angestrebte von rund  $165kg/m^2$  konnte jedoch noch nicht erreicht werden. Der Brandschutz stellte hier eine Limitierung für noch dünnere Betonquerschnitte dar.

**RFS<sub>2</sub>** Weitere Verbesserungen werden in Block et al. [5] avisiert.

**W — erste Iteration** Die V-Form Decken versuchen eine effektive Materialbeanspruchung über die Schalentragwirkung zu erzielen. W zeigt eine kuppelartig gewölbte Decke, die jedoch noch einen hohen Materialaufwand erfordert. Die doppelte Krümmung erzeugt zwar eine höhere Steifigkeit der Schale, aber der offene, nach unten geneigte Rand erzeugt eine Schwachstelle für asymmetrische Belastungen — besonders für Punktlasten in diesem Bereich. Zudem wird die Deckenfläche im Grundriss nicht vollständig abgedeckt. Die erste Iteration als kuppelartig gewölbtes Deckenelement stellt somit nur ein hypothetisches Beispiel dar.

**DIA — zweite Iteration** Mit DIA werden nun diagonale Sicken eingeführt, welche das Tragverhalten der Schale gegenüber asymmetrischer Belastung verbessern. Der offene Rand stellt noch immer ein Problem dar.

**VF<sub>1</sub> — dritte Iteration** Mit DIA 2 wird der offene, nach unten geneigte Rand über die Einführung vier weiterer Sicken gelöst. Es werden V-förmige Rippen entlang dieser ursprünglich offenen Ränder gebildet. Die spezifische Masse dieses Systems liegt nun unter jener der vorgespannten Hohldielen. DIA 2 ist jedoch unbewehrt und setzt nur in den kurzschließenden Zuggliedern Stahl ein.

**VF<sub>2</sub> — vierte Iteration** Die letzte Iteration, V-Form, bringt nochmals eine große Materialreduktion mit sich, indem die Schalenquerschnitte an die erhöhten Kräfte entlang der Sicken angepasst werden. Dabei wird nur die Schalendicke variiert, die Schalenmittelfläche bleibt unverändert.

### 3.4.4 Parameterstudien der V-Form

Das V-Form Deckensystem ist tragwerkstechnisch noch anhand sehr vieler Parameter optimierbar. Diese beinhalten unter anderem: Systemhöhe, Sickentiefe, exakter Verlauf der Sicken im Grundriss, Graduierung der Schalendicke, Materialwahl, sowie die Vorspannung der umschließenden Zugglieder.

In Abb. 3.18 sind erste Parameterstudien zur Betongüte und Stichhöhe ersichtlich. Mit steigender Betongüte können nicht nur mehr Spannungen aufgenommen werden, sondern es wird auch weniger Eigenlast verursacht. Mit höherer Betongüte sinkt das Eigengewicht. Eine Reduktion der Materialgüte und der damit einhergehenden Erhöhung des Materialaufwands könnte sich aber durch einen wesentlich geringeren CO<sub>2</sub>-Wert des jeweiligen Betons auszahlen. In Purnell [26] wird ein Optimum bezüglich des CO<sub>2</sub>-Wertes bei einer Betongüte von C50 für STB-Stützen und STB-Träger gezeigt. Eine direkte Übertragung dieser Ergebnisse auf ein primär druckbeanspruchtes Deckenelement ist aufgrund der wesentlich abweichenden Materialbeanspruchung nicht möglich. Die ideale Wahl der Materialgüte müsste daher noch untersucht werden.

Ähnlich zum Verhalten der horizontalen Schubkräfte eines Bogens in Abhängigkeit der Höhe mit  $F_h = \frac{gt^2}{8f}$  und der damit verbundenen Normalkräfte, bringt die Erhöhung des Stiches der V-Form Decke ebenso eine Materialreduktion mit sich. Auch hier muss ein Optimum aus Stichhöhe mit der einhergehenden Massenreduktion und des Mehrverbrauchs an Raumvolumen gefunden werden. Denn auch ein effizient genutztes Raumvolumen resultiert in einer effizienten Nutzung des dafür aufgewandten Materials. Weitere Faktoren wie die Integration der TGA-Komponenten und deren erforderliches Volumen sind hier ebenso mit einzubeziehen. Der durch die größere Wölbung verlorene Raum kann mit diesen ohnehin zu platzierenden Komponenten sinnvoll genutzt werden.

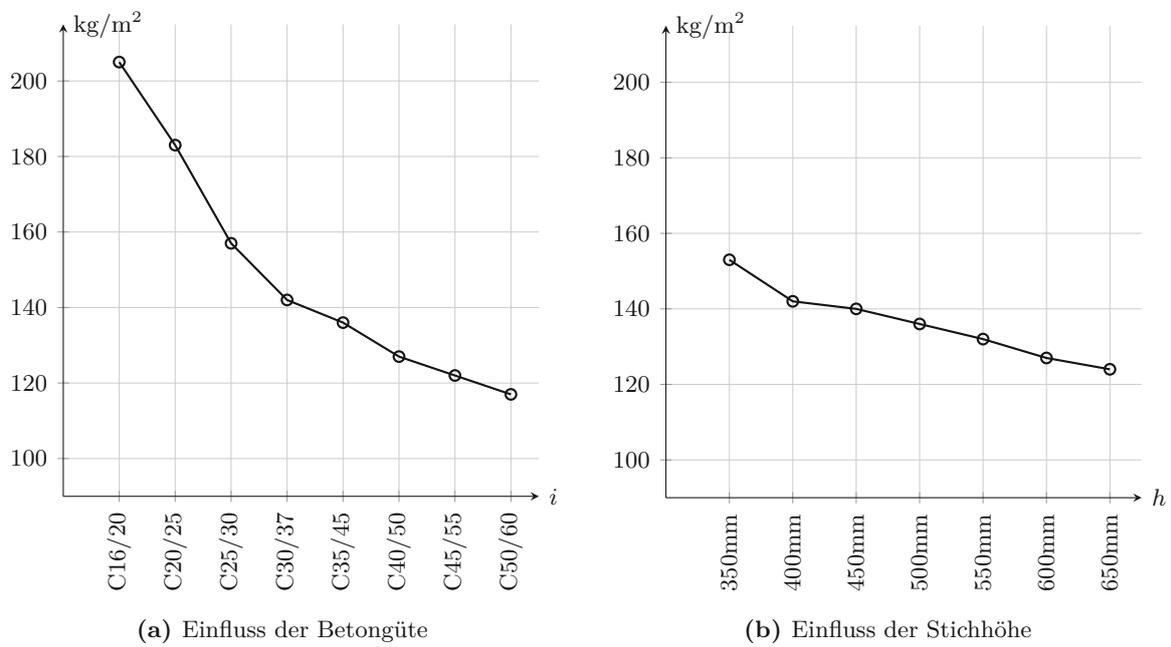


Abb. 3.18: Parameterstudien

### 3.5 Deckensystem

Die resultierende Schalengeometrie der V-Form Decke benötigt noch eine Ständerkonstruktion für eine planare Oberfläche. Die folgenden Faktoren sind im Hochbau zu berücksichtigen.

**Lasteintragung** Die Ständerkonstruktion spielt eine große Rolle bezüglich der Eintragung der Nutz- und Aufbaulasten in die Schale. Die Anzahl der Steher und die jeweilige Detaillierung des Fußpunktes entscheiden, wie gleichmäßig Lasten in die Schale eingetragen werden können. Punktförmige Spitzenlasten gilt es beispielsweise zu vermeiden.

**Bauphysik** Die Detaillierung der Ständerkonstruktion spielt neben der Lasteintragung auch eine große Rolle für die Übertragung des Luft- und Körperschalls. Sie ist daher so auszubilden, dass Schallbrücken möglichst vermieden werden. Die genauere Ausbildung der einzelnen Steher und Bodenpaneele liegen jedoch außerhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit.

**Volumen für TGA** Die Ständerkonstruktion erzeugt einen Zwischenraum, in der der Großteil der TGA platziert werden kann. Für die Ständerkonstruktion ist ein modulares System angedacht, wodurch eine Zugänglichkeit zum Zwischenraum einfach möglich wird. Die Wartung oder nachträgliche Aufrüstung der TGA stellen somit keine großen Herausforderungen dar — ein großer Vorteil, vor allem hinsichtlich einer zukünftigen potenziellen Umnutzung des jeweiligen Gebäudes. Das für die TGA verfügbare Volumen bildet sich an den Rändern. Es weist an den Eckbereichen eine maximal verfügbare Höhe beinahe in Höhe des Stiches der Schale auf. Entlang der Sicken ist durch die lokalen Vertiefungen ebenso ein höheres Volumen verfügbar.

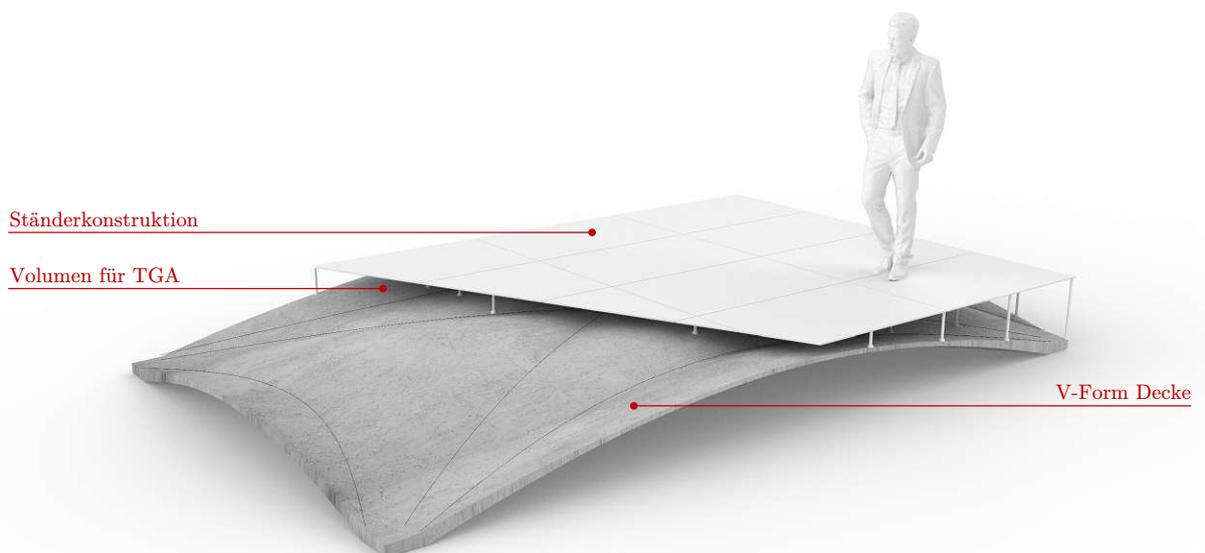


Abb. 3.19: V-Form Deckensystem mit Ständerkonstruktion und Sicken

# Kapitel 4

## Entwicklung des Schalungssystems

### 4.1 Bedingung der geometrischen Flexibilität

Bei der Fertigung von Betontragwerken, besonders bei geometrisch komplexen Formen, trägt die Schalung einen großen Teil zu den Kosten bei. Aktuell sind zwei Herstellungsmethoden gängig: Entweder werden Elemente mit Standardmaßen hergestellt, die Schalung dabei wiederverwendet, oder es werden speziell an das Projekt angepasste Elemente entworfen und die dafür erforderliche Schalung gefertigt. Letztere wird jedoch wegen ihrer maßgefertigten Geometrie nicht wieder verwendet und muss somit entsorgt werden. Selbst wenn die eingesetzten Schalungskörper prinzipiell wiederverwendbar wären, könnten diese nur für die Herstellung der exakt gleichen Geometrie eingesetzt werden. Selbst kleinste Änderungen der Randbedingungen schließen eine Wiederverwendung aus.

Das zweite Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, diese Problematiken mit einem Schalungssystem für V-Form Decken zu lösen, welches die Vorteile dieser zwei Methoden kombiniert. Dieses ist wiederverwendbar und vor allem geometrisch flexibel!

**Definition der geometrischen Flexibilität** Die geometrische Flexibilität bedeutet dabei im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Möglichkeit, Parameter des in Kapitel 3 beschriebenen Deckensystems zu variieren und die jeweiligen resultierenden Geometrien herzustellen. Die Parameter inkludieren:

- Position der vier Eckpunkte im Grundriss
- Krümmung und Verlauf der Sicken
- Höhe des Schalenstichs
- Verhältnis zwischen Sicken- und Schalensegmentkrümmung

Um solch eine Anpassbarkeit wirtschaftlich sinnvoll zu gestalten, muss sie mit möglichst minimalem Aufwand verbunden sein. Die Einstellung der einzelnen Komponenten des Schalungssystems sollte daher großteils automatisiert stattfinden. Es ist zu erwarten, dass die ersten Iterationen dieses Schalungssystems noch einen gewissen Anteil an manuellen Aufwand aufweisen werden, welcher mit der Weiterentwicklung des Systems Schritt für Schritt geringer werden sollte. Im Rahmen dieses Kapitels wird ein Konzept für die Automatisierung beschrieben.

**Einschränkung der geometrischen Flexibilität** Das Maß an technischer Komplexität des zu entwickelnden Schalungssystems hängt auch stark von der abzudeckenden Bandbreite an Geometrien ab. Die mögliche Bandbreite der Parameter sollte daher so gewählt werden, dass ein Optimum aus geometrischer Flexibilität und Komplexität des Systems erreicht wird. Die folgende Abbildung zeigt, welche geometrische Vielfalt mit Festlegung der Bandbreite im Grundriss möglich ist.

Sollten Abmessungen eines V-Form Deckenelements außerhalb dieser herstellbaren Bandbreite liegen, so muss für diesen Fall eine kleinere bzw. größere Version des V-Form Schalungssystems eingesetzt werden.

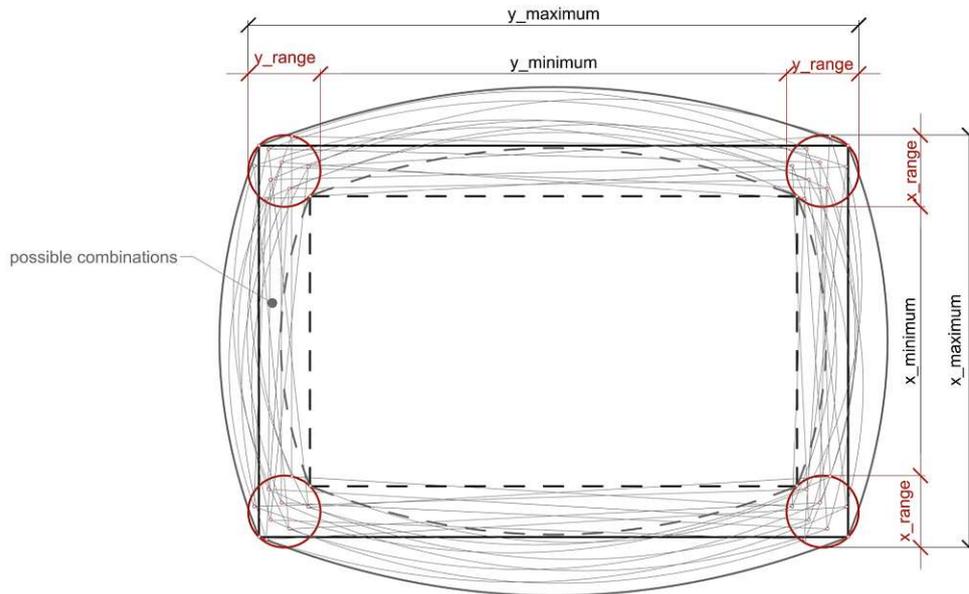


Abb. 4.1: Darstellung der geometrischen Flexibilität mit Variation der Position der Eckpunkte.

## 4.2 Beschreibung der Subsysteme

### 4.2.1 Formbildender Seilnetz-Pneu

Die V-Form Decke wird mithilfe einer luftgestützten Membran hergestellt, auf welcher Sicken bildende Zugbänder gespannt sind. Die Form ist dabei so ausgebildet, dass die Neigung der vier umschließenden Schalensegmente erreicht werden kann.

Es stellt sich nun die Frage, wie sich die geometrische Flexibilität für solch ein pneumatisches System erreichen lässt. Eine Längenänderung der Zugbänder lässt sich noch mit einer wickelnden Spule erreichen. Für die geometrische Anpassung der Membran sieht die Situation jedoch wesentlich komplizierter aus.

Um mit Membranen bauen zu können, müssen üblicherweise die zu erzielenden Formen mit den jeweiligen Spannkraften vorberechnet und daraus das Schnittmuster erstellt werden. Das liegt daran, dass die eingesetzten Materialien — beispielsweise beschichtete Glasfasergewebe — eine hohe Dehnsteifigkeit aufweisen. Doppelt gekrümmte Flächen sind somit schwer bildbar. Daher werden diese Geometrien mittels abwickelbarer Streifen approximiert, welche dann miteinander vernäht, oder verschweißt werden. Durch diesen Vorgang kann eine im vorgespannten Zustand faltenfreie Membranfläche erreicht werden. Da das Schnittmuster basierend auf einer vorberechneten Form erstellt wird, führen kleine Abweichungen der finalen Geometrie jedoch zur Bildung von Falten und damit zu Spannungskonzentrationen im Membran-Gewebe. An diesen Schwachstellen kann es dann zu Rissen in der Membran kommen.

Um diese Problematik zu umgehen, wird die formgebende Funktion nicht mit einer vorbestimmten Membran, sondern mit einem Netz von sekundären Zugbändern erreicht. Jedes einzelne dieser Zugbänder kann dabei in seiner Länge verändert werden. Die jeweiligen dafür erforderlichen



**Abb. 4.2:** V-Form Schalungssystem im pneumatisierten Zustand

Seillängen können mithilfe der vorsimulierten Zielgeometrie bestimmt werden. Dieses Netz von Sekundär-Zugbändern wird, zusammen mit den Hauptzugbändern, mit einer druckbeaufschlagten Membran in die Zielposition mit der jeweiligen Maximallänge gebracht.

Durch die Abnahme der global formgebenden Funktion durch die Zugbänder sind nun wesentlich geringere Anforderungen an die Membran gestellt. Der Großteil der durch den Innendruck entstehenden Kräfte wird über das Netz der Zugbänder aufgenommen. Somit kann die luftbeinhaltende Membran mit einem Material geringerer Dehnsteifigkeit ausgeführt werden. Diese Dehnbarkeit führt nun auch dazu, dass ein exakt vorbestimmtes Schnittmuster nicht mehr notwendig ist, da sich die Membran mittels Innendruck und dem geometrisch limitierenden Netz in die Zielform begibt. Analog zur Anpassung der Seillängen wird Fläche und Position des druckbeaufschlagten Teils der Membran durch das Membranzugsystem angepasst. Je nach Dehnbarkeit können sich zwar lokal noch Falten bilden, diese stellen jedoch aufgrund der geringen Belastung strukturell kein Problem dar. Die Materialwahl und Festlegung des erforderlichen Elastizitätsmoduls müsste hier mithilfe von genaueren Simulationen und Prototypen ermittelt werden und wird deshalb im Rahmen der Arbeit nicht genauer beschrieben.

In Abb. 4.2 ist diese formbildende Komponente des V-Form Schalungssystems — der Seilnetz-Pneu — sichtbar.

Um keine Unstetigkeiten in den Oberflächen durch diese potenzielle Faltenbildung auf die zu schalende V-Form Decke zu übertragen, wird beim Schalungsprozess eine Zwischenlage aufgelegt. Materialien, die sich dafür anbieten würden, wären etwa ein dehnbare beschichtetes Vlies oder eine dehnbare Kunststoffolie. Diese Trennlage verhindert zudem einen Verbund des Betons mit dem Seilnetz-Pneu. Diese Schicht ist somit jene Komponente des Seilnetz-Pneu Systems mit den geringsten strukturellen Anforderungen. Durch ihre Dehnbarkeit fällt auch hier die Notwendigkeit eines angepassten Zuschnitts weg. Der große Planungs- und Herstellungsaufwand für jeweils angepasste Trennlagen bleibt somit erspart.

Die Vorgabe der individuellen Zugbandlängen allein reicht noch nicht aus, um die mit Sicken versehene Form zu erreichen. Die quer zu den Hauptzugbändern verlaufenden Sekundärbänder

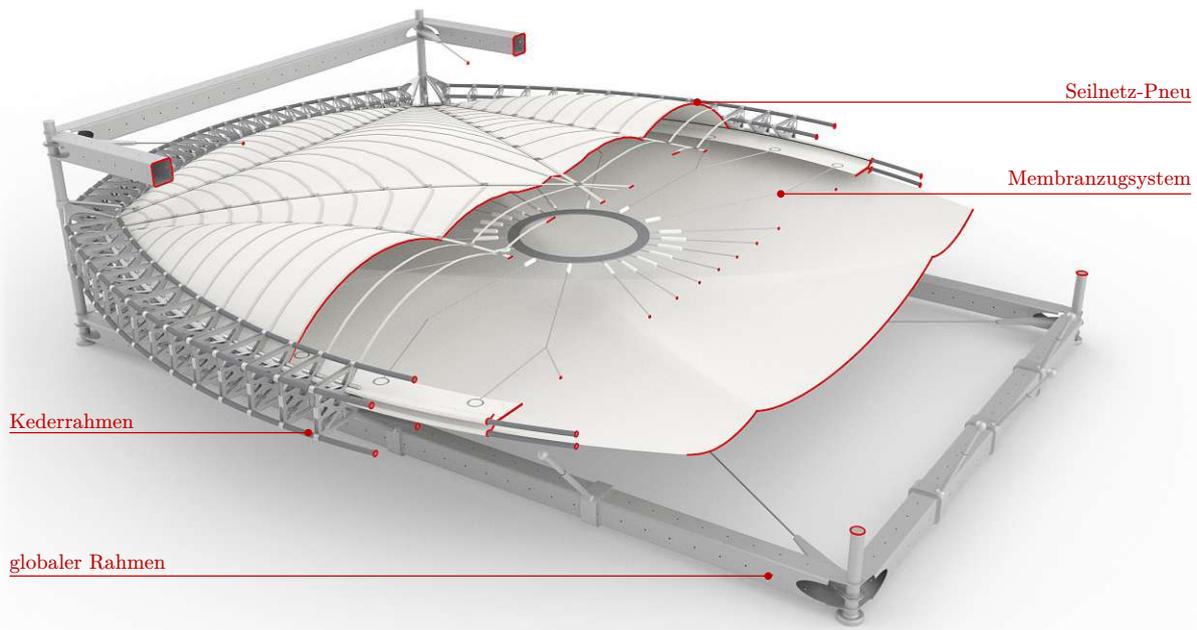


Abb. 4.3: Schnitt des Schalungssystem mit Komponenten

schneiden sich in Knotenpunkten mit diesen und werden dort in Zugbandabschnitte unterteilt. Um die Längen dieser Abschnitte vorgeben zu können, werden die Segmentenden mithilfe der Knotenpunkte in ihrer Position entlang des jeweils schneidenden Hauptzugbands, sowie der Verteilung der verfügbaren Gesamtbandlänge auf die Segmente eingestellt und fixiert.

Mit der Pneuformel aus Kapitel 2 können aus Überdruck resultierende Spannungen des jeweiligen Zugbandsegments bestimmt werden. Mit gleichem Überdruck für die Segmente und  $r_2 \rightarrow \infty$  lässt sich die Spannung nun in Abhängigkeit des Segment-Radius  $r_{s,i}$  mit  $n(r) = p_i r_{s,i}$  ausdrücken. Aus diesen Spannungen können die horizontalen Komponenten der Auflagerreaktionen bestimmt werden. Zusammen mit der orthogonalen Kraft-Komponente der gespannten Hauptzugbänder kann nun ein für die gewünschte Segmentendenposition erforderliches Kräftegleichgewicht gefunden werden. Aus diesem lassen sich dann die jeweiligen Radien und daraus die Seilsegmentlängen bestimmen. Die für die Gleichgewichtsposition erforderlichen Komponenten sind in Abb. 4.4 dargestellt.

Die in Kapitel 3 beschriebenen Auflagerstellen des Deckenelements müssen in der durch den Seilnetz-Pneu gebildeten Form integriert werden. Dies wird mit abgerundeten Stahlscheiben-Segmenten an den Ecken erreicht. Bei der Pneumatisierung drücken sie die Membran an diesen Stellen ein und erzeugen so die flachen Auflagerstellen. Zudem erleichtern sie später auch den Entschalungsprozess und das Abheben des ausgehärteten Deckenelements.

Die bei der Druckbeaufschlagung des Seilnetz-Pneus entstehenden Kräfte müssen kurzgeschlossen werden. Dies wird für die vertikalen Kräftekomponenten mit einem zweiten vereinfachten Seilnetz-Pneu gelöst. Die Verankerung an einem festen Untergrund bleibt somit erspart und ein mobiler Einsatz des Schalungssystems wird möglich.

#### 4.2.2 Kederrahmen

Die horizontalen Komponenten der Auflagerreaktionen werden mithilfe des *Kederrahmens* aufgenommen. Mit den jeweils vier Rundstäben wird zusammen mit den *Kederelementen* eine

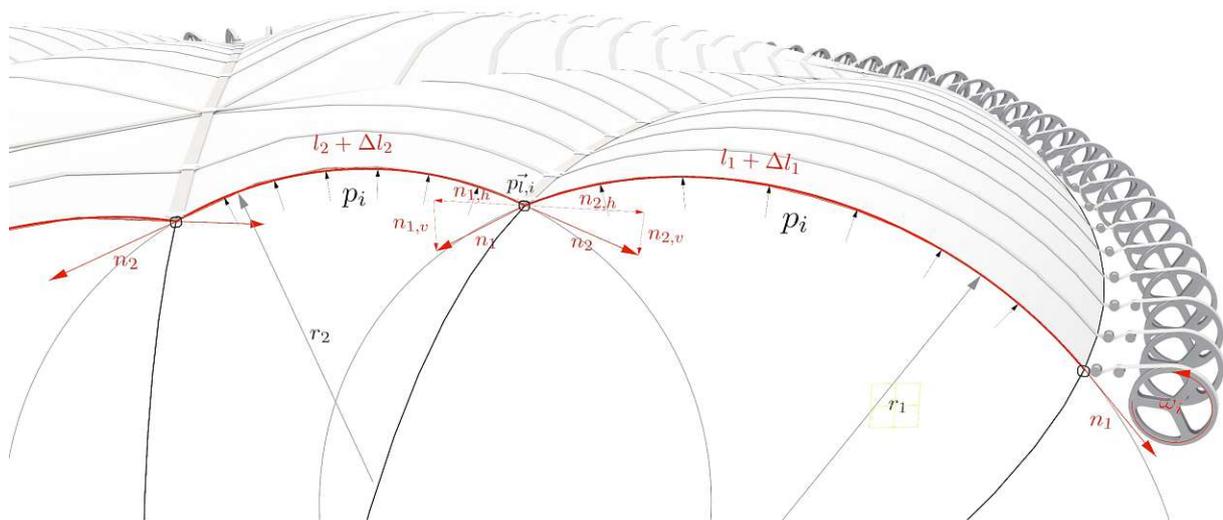


Abb. 4.4: Kräftegleichgewicht der Nebenzugbänder und Bestimmung des Punktes  $p_i$

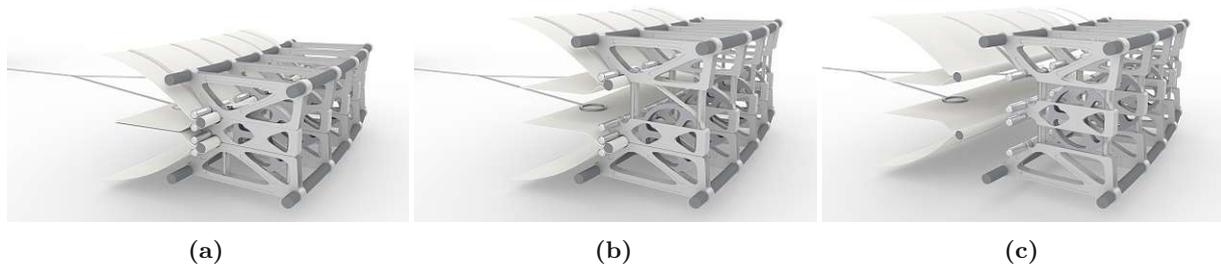


Abb. 4.5: Schritte zum Austauschen der Membran

bogenartige Tragwirkung erzielt. Die geometrisch flexible Herstellung erfordert dabei die Anpassbarkeit der Länge sowie der Krümmung. Die Befestigungsstellen sind daher gelenkig und die Rundprofile mit einem Teleskop-Mechanismus ausgebildet. Die Kederelemente werden an ihren vier Eckpunkten mit den Rundstäben festgeschnallt und können beim Einstellen der Schalungsgeometrie an den Eckpunkten gelockert werden, sodass eine Längenänderung der Rundstäbe ermöglicht wird.

### 4.2.3 Kederelement

Das Kederelement stellt ein Auflager für die Zugbänder und die zwei Membranen dar. Es ist so ausgebildet, dass die beiden Komponenten des Seilnetz-Pneus in ihren Maßen angepasst und auch ausgetauscht werden können. Für die Zugbänder wird dies mit einer drehbaren Spule erreicht, wobei zylindrische Lager dafür sorgen, dass die Zugbänder direkt auf der Membranebene liegen. So können diese verlängert und verkürzt werden.

Für die zwei Membranen ist eine andere Lösung erforderlich, da diese mithilfe eines umlaufenden Keder gehalten werden und Luftdichtigkeit geben muss. Würde man diese mittels einer konventionellen Kederhalterung befestigen, so wäre aufgrund großer Reibungskräfte ein Anpassen der Membranlängen nicht möglich. Diese Einschränkung wird aufgehoben, indem der umlaufende Keder mit einem Paar drehbar gelagerter Zylinder jeweils an der Ober- und Unterseite gehalten

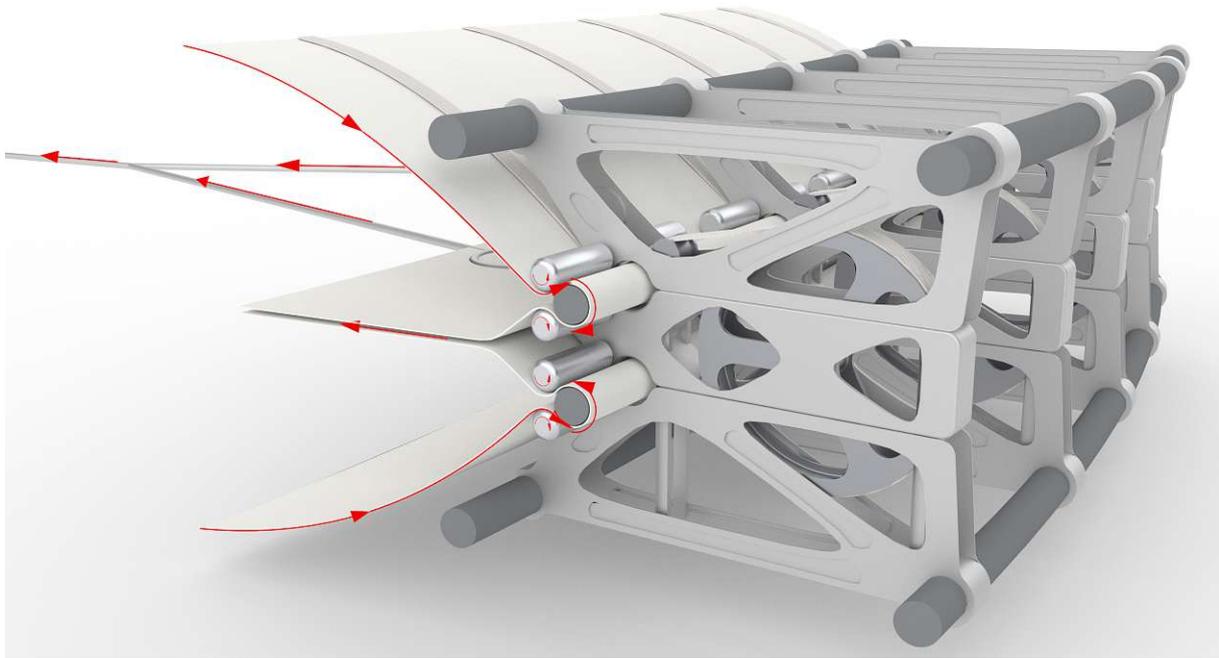


Abb. 4.6: Längenänderung der Membran am Kederelement

wird. Aus Abb. 4.6 wird ersichtlich, dass nun kaum Reibungskräfte bei der Längenänderung mit dem Membranzugsystem entstehen.

Falls ein Austausch der Seilnetz-Pneu Komponenten erforderlich ist, so kann das Kederelement geöffnet und die Komponenten wie in Abb. 4.6 eingesetzt werden.

#### 4.2.4 Globaler Rahmen

Mit dem globalen Rahmen des Schalungssystems wird der Grundriss des jeweiligen Deckenelements, sowie die Position und Länge aller bisher genannten Komponenten festgelegt. Vier teleskopartig verlängerbare Hohlprofile werden jeweils über und unter dem Seilnetz-Pneu entlang des Umrisses gelenkig miteinander verbunden. Der globale Rahmen nimmt auch die aus dem Kederrahmen entstehenden Druck- bzw. Zugkräfte auf.

Durch eine ebenso in ihrer Seillänge variablen Auskreuzung wird der Rahmen zu einem statisch bestimmten System.

Vertikale Stützrohre verbinden den oberen und unteren Rahmen und ermöglichen die geometrische Anpassung zu einem allgemeinen Viereck. Entlang des unteren globalen Rahmens sind verschiebbare Rohrprofile platziert, welche das Eigengewicht des Seilnetz-Pneus, sowie die Auflast des geschalteten Deckenelements aufnehmen.

### 4.3 Aktuation

Um die wirtschaftlichen Vorteile des V-Form Schalungssystem zu maximieren, sollte der für den Decken-Fertigungsprozess erforderliche Arbeits- und Zeitaufwand minimiert werden. Das kann erreicht werden, indem die GeometrieEinstellung möglichst automatisiert stattfindet — das genauere Prozedere für das Schalen eines Deckenelements wird in Kapitel 5 beschrieben. Die Automatisierung wird über CNC-gesteuerten aktiven Aktuatoren, sowie sekundären reaktiven Aktuatoren erreicht.

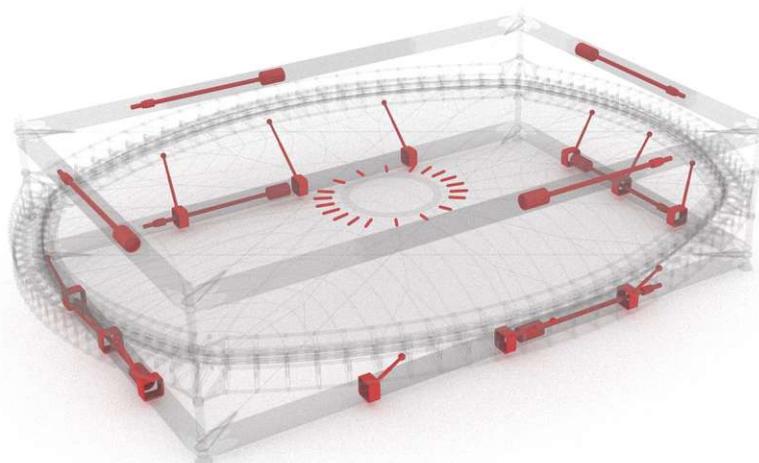


Abb. 4.7: Aktive Komponenten

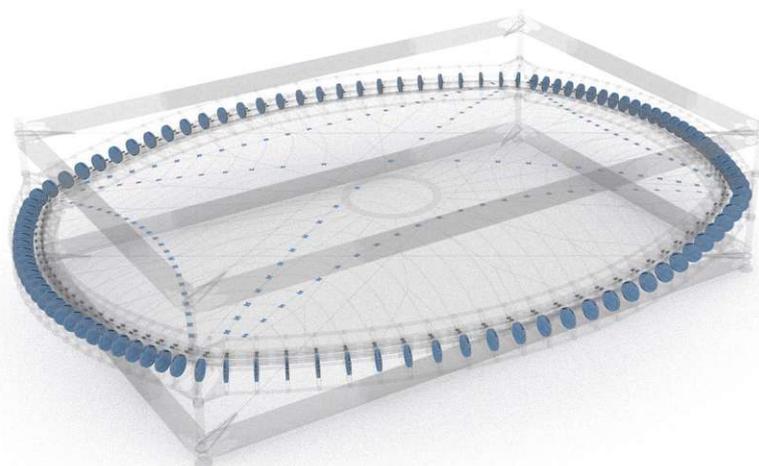


Abb. 4.8: Reaktive Komponenten

### 4.3.1 Aktive Komponenten

Mithilfe von Spindelgetrieben in den jeweiligen Teleskop-Hohlprofilen des globalen Rahmens wird eine Längenänderung ermöglicht. Die Stützrohre sind so auszuführen, dass eines dieser bezüglich Translationen fest gelagert ist und sich die restlichen drei horizontal bewegen können, um so eine freie Geometrieänderung des Schalungssystem zu ermöglichen.

Die auskreuzenden Seile müssen ihre Längen den Diagonalen des oberen und unteren Rahmens entsprechend anpassen. Die Aktoren werden vor den Seilendbeschlägen platziert und können über ein Gewinde die erforderlichen Längen erreichen.

Die den Kederrahmen stützenden Rohrprofile entlang des unteren Rahmens sind ebenso mit Spindelgetrieben versehen. Sie werden dabei aufgrund ihrer Anzahl mit entsprechend geringerer Leistung dimensioniert.

Die Zugseile des Membranzugsystems laufen zu einem zentralen Ring zwischen den Membranen, an dem Aktoren befestigt sind, die die jeweiligen Seillängen steuern.

### 4.3.2 Reaktive Komponenten

Die Haupt- und Neben-Zugbänder münden in den jeweiligen Zugbandspulen. Diese sind drehbar und mit Rotationsfedern versehen. Bei der Pneumatisierung des Systems können, sobald die richtigen Längen der Zugbänder erreicht sind, die Rotations-Winkel der Spulen mithilfe von Magnetschiebern eingerastet werden. Die ohnehin notwendige Druckbeaufschlagung des Seilnetz-Pneus kann somit effektiv genutzt werden, um eine simple Aktuation jedes Zugbands zu ermöglichen.

Die genaue Geometrie des V-Form Deckenelements bedingt auch, dass über die Kreuzungstellen der Neben- mit den Hauptzugbändern einzelne Abschnitte der Nebenzugbänder gebildet werden. Dazu werden Knotenelemente eingesetzt, welche ähnlich zu den Zugbandspulen mithilfe von Magnetschiebern bei der Pneumatisierung des Systems die kreuzenden Seile bei richtiger Länge festhalten. Die dafür erforderliche Reibungskraft wird anfangs von den Magnetschiebern erzeugt. Mit steigendem Druck erzeugt die Bespannung der Membran größere Reibungskräfte zwischen den Zugbändern, sodass die resultierenden Reibungskräfte beim Erreichen des Maximaldrucks für die Positionshalterung ausreichen, ohne die Magnetschieber zu benötigen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



# Kapitel 5

## Anwendung des V-Form Systems

### 5.1 Schalungsprozess

#### 5.1.1 Einstellung der Zielgeometrie

Wie bei den meisten CNC-Werkzeugmaschinen, muss auch beim V-Form Schalungssystem die herzustellende Geometrie zuerst im CAD als 3D-Modell erstellt werden. Faktoren wie die pneumatische Bildbarkeit und der zur Verfügung stehende Bauraum müssen dabei berücksichtigt werden. Aus diesem Modell können dann alle Bewegungsparameter für die Aktuatoren erstellt werden. Beim V-Form Schalungssystem wird die Steuerung in eine primäre direkte Steuerung und eine sekundäre indirekte Steuerung unterteilt. Während die direkte Steuerung großteils einfach vorhersehbar abläuft, benötigt die indirekte Steuerung einen komplexeren Regelkreis mit Sensor- und Positionsdaten aus dem Kamera- und Messsystem.

**Direkte Steuerung des globalen Rahmens** Nach Übertragung der Parameter an das Schalungssystem begeben sich der globale Rahmen samt Teleskop-Hohlprofilen, variablen Auskreuzungen und Stützrohren zur Zielposition.

Der Krümmungsverlauf des Keder-Rahmens beschreibt einen Bogen, dessen Endpunkte über die vom globalen Rahmen positionierten Stützprofile mitbewegt werden. Der Krümmungsradius wird mithilfe der jeweils drei am globalen Rahmen aufgelagerten Stützrohren eingestellt. Dieser Radius beeinflusst den Verlauf der äußeren Hauptzugbänder und damit der Sicken im betonierten Zustand, sowie die maximale Höhe und Krümmung der Schalenrandsegmente. Sobald die gewünschte Krümmung des Kederrahmens erreicht ist, schnallen sich die Kederelemente an den Rundprofilen fest und erhöhen die Steifigkeit des Kederrahmens, indem statisch betrachtet Ober- und Untergurt-Rundprofile miteinander verbunden werden.

**Indirekte Steuerung des Seilnetz-Pneus** Ist die Zielposition der primären Komponenten erreicht, startet die hauptsächlich über den Überdruck kontrollierte Bewegungssequenz des Seilnetz-Pneus.

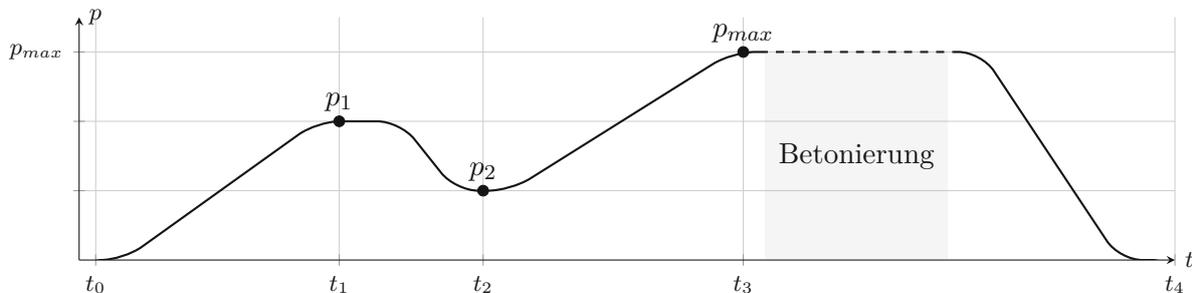
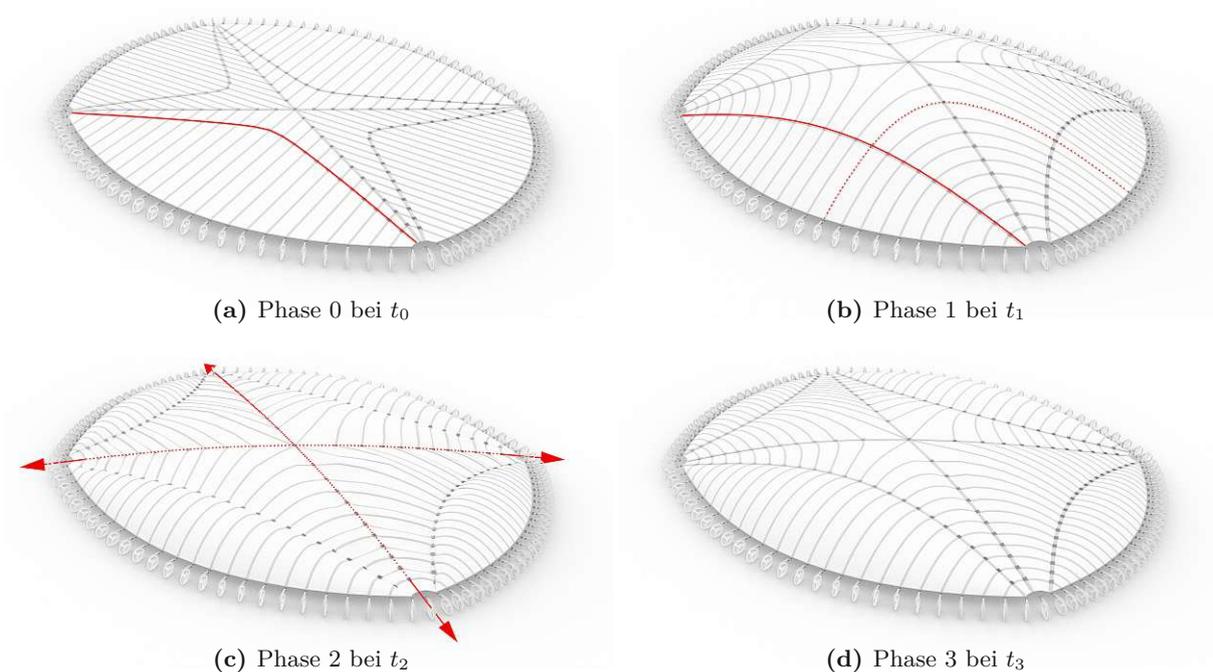


Abb. 5.1: Schematischer Druckverlauf beim Schalungsprozess



**Abb. 5.2:** GeometrieEinstellung des Seilnetz-Pneus

Der Druckverlauf vom GeometrieEinstellungsprozess bis hin zum Entschalen ist in Abb. 5.1 schematisch dargestellt.

**Phase 0** Im Ruhezustand mit  $p_0 = 0$ bar, liegen die beiden Membranen schlaff, während alle Zugbänder — mit Ausnahme der vier äußeren Hauptzugbänder — durch die Rotationsfedern in den Kederelementen gespannt sind. Die Zugbänder begeben sich dabei in ihre minimale Länge und liegen somit in einer gemeinsamen oberen und unteren Ebene. Die vier äußeren Hauptzugbänder werden vorab zum Mittelpunkt gezogen.

**Phase 1** Die langsam zunehmende Druckbeaufschlagung auf  $p_1$  und die einhergehende Vergrößerung des von den Membranen umschlossenen Volumens führt dazu, dass ein immer größer werdender Teil Zugbänder auf den pneumatisierten Bereich der Membran gegen die Auflager-Federkräfte gezogen werden. Die durch die Volumensveränderung erhöhte Membranoberfläche wird mithilfe des Membranzugsystems eingestellt. Durch die individuelle Kontrolle der Seillängen kann dieses System je nach Flächenänderung eine lokal angepasste Membranfläche zur Verfügung stellen.

Bei der Längenänderung der Zugbänder drehen sich die Bandspulen mit und jene der Neben-Zugbänder rasten beim Erreichen der auf dem pneumatischen Bereich liegenden Ziellänge ein. Über diese Methode kann mit einfachen Mitteln eine individuelle Längeneinstellung aller Nebenzugbänder erreicht werden.

Dadurch, dass die Länge der Hauptzugbänder noch nicht limitiert wird, bildet sich eine kuppelartige Form der Membran. Das hat den Effekt, dass sich anfangs ein zentraler Hochpunkt der Membranen bildet. Durch die Neigung vom Hochpunkt zu den Rändern rutschen die vier äußeren Haupt-Zugbänder in Richtung der umschließenden Kederstellen. Die sich bei diesem Prozess verschiebenden und unterteilende Schnittpunkte von äußeren Haupt- und den Nebenzugbändern,

können beim Erreichen der vorberechneten Neben-Zugbandabschnitte mit den Knotenelementen fixiert werden.

**Phase 2** Ist dieser Schritt abgeschlossen, wird der Druck wieder auf  $p_2$  abgesenkt, sodass die Rotations-Federkräfte die diagonalen Hauptzugbänder auf ihre richtige Länge ziehen können. Die Spulen der diagonalen Hauptzugbänder rasten bei der korrekten Länge wieder ein.

### 5.1.2 Betonieren des Deckenelements

**Phase 3** Beim Erreichen dieser Längen rasten die Bandspulen ein und der Druck wird kontinuierlich auf den Schalungsdruck  $p_{3,max}$  erhöht. Sodann kann das beschichtete Vlies als Trennlage aufgelegt werden — es verhindert einen Verbund zwischen Seilnetz-Pneu und Deckenelement. Auf diesem können nun die Betonierarbeiten beginnen. Der Schalungsdruck wird in Abhängigkeit der Frischbetonaufasten so reguliert, dass minimale Verformungen beim Betonieren auftreten. Die lokale Höhe des herzustellenden Querschnitts kann mit aus Zement vorgefertigten Höhenindikatoren sichtbar gemacht werden. Bereits Van et al. [27] haben Höhenindikatoren aus Metall dazu verwendet. Das Fließmaß des Betons ist so zu wählen, dass das durch die Schalhautkrümmungen verursachte Abrutschen des Frischbeton keine signifikante Größe annimmt. Hier ist auch zu erwähnen, dass das Abrutschen des Betons in Richtung der Tiefpunkte auch sinnvoll genutzt werden könnte. An den lokalen Tiefpunkten sind ohnehin größere Querschnitte erforderlich.

### 5.1.3 Aushärten und Entschalen

**Phase 4** Der Innendruck des Seilnetz-Pneus wird so lange aufrechterhalten, bis das Deckenelement eine ausreichende Festigkeit erreicht hat. Die Dauer hängt sehr stark von der Betonrezeptur ab und kann von weniger als einer Stunde bis hin zu mehreren Stunden in Anspruch nehmen.

Sobald der Beton ausreichend ausgehärtet ist, wird der Druck wieder langsam auf  $p_0$  abgesenkt. Während der Druckabnahme wird das Eigengewicht des Deckenelements zunehmend von seinen Auflagerpunkten getragen. Unter diese kann nun die Transport-Vorrichtung angebracht und das Deckenelement aus dem Schalungssystem enthoben werden.

Für die Herstellung des nächsten Deckenelements müssen bei gleichbleibender Geometrie nur die Phasen 3 und 4 wiederholt werden. Bei abweichenden Abmessungen wird der Geometrie-einstellungsprozess erneut durchgeführt.

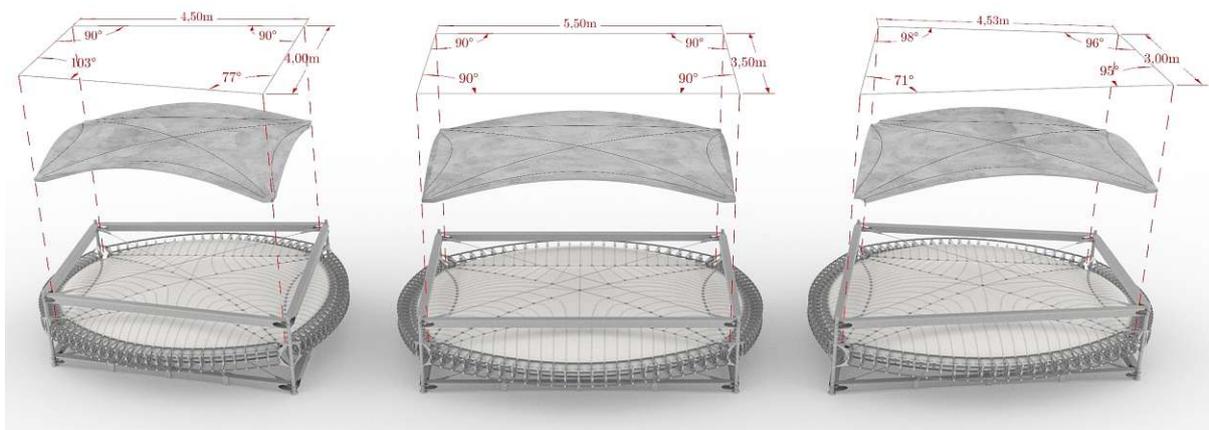
## 5.2 Herstellungsmethoden

### 5.2.1 Herstellung in situ

Das V-Form Schalungssystem kann direkt auf der Baustelle eingesetzt werden. Aufgrund der Abmessungen des Systems ist jedoch eine direkte Schalung auf den bereits vorhandenen Stützen nicht möglich. Aufgrund der Abmessungen ist auch eine direkt anliegende serielle Herstellung von Deckenelementen ausgeschlossen. Diese Methode macht daher nur bei geringen Stückzahlen Sinn.

### 5.2.2 Vorfertigung im Werk

Die beste Kontrolle der Umgebungsbedingungen bietet die Vorfertigung im Werk. Der Transport der Deckenelemente bedingt hier jedoch, dass diese segmentiert werden. Sie werden orthogonal zu den Hauptdruckspannungen unterteilt und können über Nut-Feder-Verbindungen vor Ort gelenkig zusammen gesetzt werden. Die strukturellen Auswirkungen dieser gelenkigen Unterteilung sollte jedoch genauer untersucht werden.



**Abb. 5.3:** Drei herstellbare Schalen mit unterschiedlichem Grundriss und den jeweils dazu geometrisch eingestellten V-Form Schalungssystemen

### 5.2.3 Herstellung neben situ

Die kurzfristig womöglich sinnvollste Methode ist die Herstellung neben situ. Mithilfe von Bauzelten können ein Witterungsschutz und bessere Arbeitsbedingungen erreicht werden. Mehrere V-Form Schalungssysteme würden dabei parallel eingesetzt werden, um eine große Anzahl an Deckenelementen herzustellen. Die Schalungsprozesse werden zeitlich so versetzt, dass möglichst geringe Wartezeiten für die GeometrieEinstellung der Schalungssystem und den Einbau entstehen. Fertige Deckenelemente können dann neben dem Zelt gelagert und von dort mit Kränen im Rohbau eingesetzt werden.

Das V-Form Deckenelement ist primär für vertikale Belastungen bei punktförmiger Lagerung ausgelegt und weniger für dynamische punktförmige Lasten, die beim ungeschickten Heben mit dem Kran entstehen können. Für das Abheben mit dem Kran sollte daher ein angepasstes Lastaufnahmemittel eingesetzt werden. Eine verstellbare Hebevorrichtung kann dafür sorgen, dass die vertikalen Lasten von den Auflagerpunkten der Decke gesammelt werden. Diese Hebevorrichtung kann an die Traverse befestigt und dann vom Kran gehoben werden.

## 5.3 Resultierende Architektur

Die V-förmigen Rippen besitzen nicht nur strukturelle und herstellungstechnische Vorteile, sondern bringen auch räumliche Qualitäten mit sich. Mit der effizienten Nutzung des für die TGA zur Verfügung stehenden Volumens kann die Gewölbeoberfläche mit den Sicken vollflächig sichtbar ausgeführt werden. Die daraus resultierenden visuellen Qualitäten sind in Abb. 5.5 abgebildet.

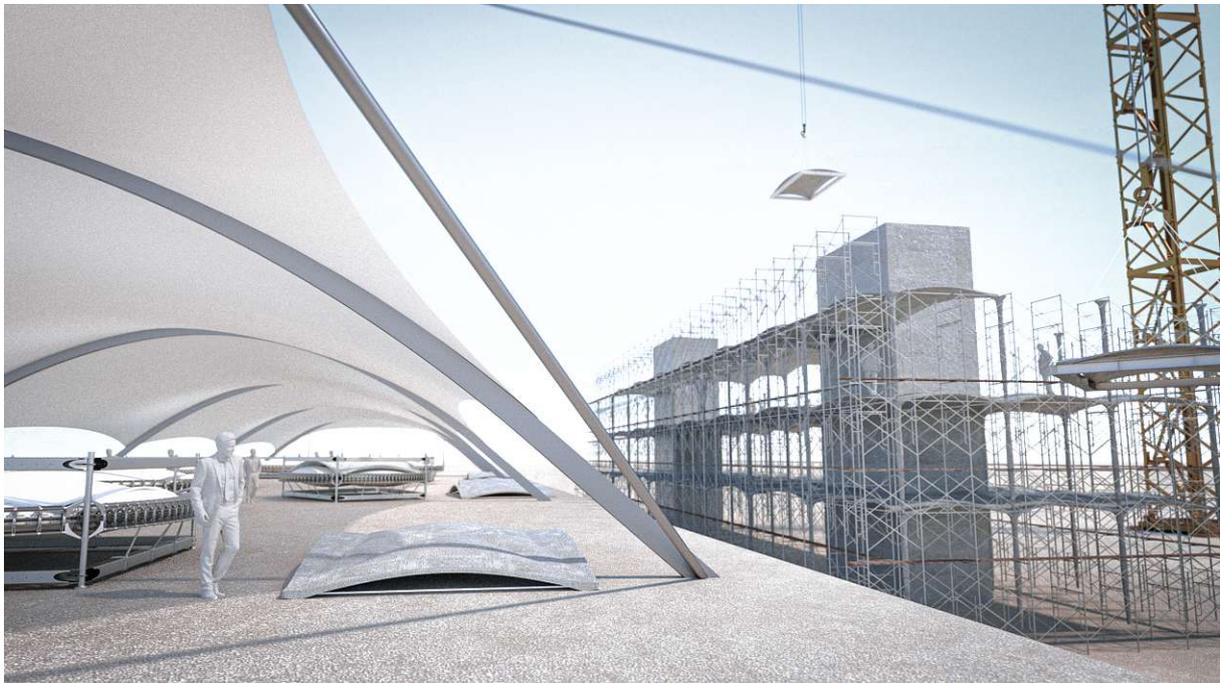


Abb. 5.4: Einsatz der V-Form Schalungssysteme unter einem Bauzelt neben situ



Abb. 5.5: Innenraumansicht eines mit V-Form Decken ausgestatteten Bürogebäudes

# Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein neuer Ansatz zu Entwurf und Herstellung unbewehrter Gewölbedecken vorgestellt. Die V-Form Decken legen eine hohe Reduktion von Material und CO<sub>2</sub> nahe. Das Schalungssystem ermöglicht die geometrisch flexible Herstellung dieser Decken.

Die weiteren Schritte zur V-Form:

**Genauere Analyse des Deckenelements** Zunächst sollte genau überprüft werden, ob die potenziell herstellbare Geometrie des V-Form Deckenelements die erwarteten Vorteile erbringt. Wie in Kapitel 3 erläutert, wurden erste FE-Berechnungen zum V-Form Deckenelement durchgeführt. Die Auflager-Randbedingungen wurden dabei mit Feder-Elementen approximiert und die real auftretenden Dehnungen des Auflagers sowie der Zugseile nicht genau betrachtet. In weiteren Schritten sollte das Auflager als unidirektional modelliert und die Dimensionierung der Zugseile durchgeführt werden — dadurch würde sich das Nachgeben an den Auflagerstellen besser vorhersehen lassen. Ebenso ist ein Optimum für die Vorspannkraft der Zugseile zu suchen. Für eine realitätsnähere Simulation sollten für den spröden Werkstoff Beton nichtlineare FE-Berechnungen durchgeführt werden. Besonders die strukturellen Unterschiede von bewehrten zu unbewehrten Betonschalen sollten dabei untersucht werden. Im Anschluss können zerstörende Prüfungen von den V-Form Deckenelementen durchgeführt werden.

**Weiterentwicklung des Schalungssystems** Nach erfolgreicher Analyse des Deckenelements kann das Schalungssystem im Detail weiter entwickelt werden. Zu untersuchen wären das Dehnungsverhalten der Seilnetz-Pneu Komponenten und die optimale Wahl der Materialien mit den jeweiligen Elastizitätsmoduln.

Während die primäre direkte Regelung des Schalungssystems mit bekannten Lösungsansätzen erreicht werden kann, müssen für die sekundäre indirekte Regelung eigene Regelkreise mit Simulationsmodellen entwickelt werden.

## Ausblick

Zur praktischen Umsetzung des V-Form Schalungssystems werden folgende Iterationen benötigt. Die technologischen Anforderungen sind bei der ersten Iteration auf ein Minimum reduziert und nehmen mit jeder Iteration zu, bis die finale Vision des V-Form Schalungssystems erreicht ist.

**Herstellung mit konventioneller Schalung** Um die Vorteile der V-Form Decken möglichst früh zu nutzen, können diese anfangs mit einer konventionell subtraktiv oder additiv gefertigten Schalung produziert werden. Das bedeutet aber auch zugleich, dass hauptsächlich Standardmaße hergestellt werden können. Mit diesem anfänglichen Ansatz sollte die Schalung möglichst oft wiederverwendet werden, um den dafür erforderlichen Materialaufwand zu minimieren.

**Einsatz von zugeschnittenen PTFE-Membranen** Die nächste Iteration wäre eine Herstellung mit einem partiellen V-Form Schalungssystem. Anstatt dem Seilnetz-Pneu könnte eine zugeschnittene PTFE-Schalungsmembran eingesetzt werden. Diese Membran wäre dann zwar nicht

geometrisch flexibel, dafür aber wiederverwendbar. Sie würde einen geringen Materialaufwand als die Herstellung mit konventioneller Schalung erfordern.

**Halb-automatisierte GeometrieEinstellung** Die GeometrieEinstellung des V-Form Schalungssystems könnte halb-automatisiert stattfinden. Die einfacheren primären Komponenten könnten automatisiert und die sekundären Komponenten manuell eingestellt werden. Diese Methode erzeugt zwar einen höheren Arbeitsaufwand beim Umstellen der Geometrie, erfordert dafür aber nicht die komplexe Regelung des Seilnetz-Pneus

**Automatisierte GeometrieEinstellung** In der finalen Iteration kann die GeometrieEinstellung des V-Form Schalungssystem dann vollständig automatisiert stattfinden. Dafür ist die Regelung des Seilnetz-Pneus und die dafür erforderlichen Kamera-Messsysteme, sowie Simulationsmodelle für die Druckbeaufschlagung des Seilnetz-Pneus zu entwickeln. Der immense Vorteil wäre der minimale Arbeitsaufwand bei einer schnellen GeometrieEinstellung und Herstellung variabler Deckenelemente.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Gewölbedeckensystem der Block Research Group . . . . .	11
a	Prototyp einer Gewölbedecke der BRG in der HiLo Unit bei Zürich . . . . .	11
b	Schalung einer Rippengewölbedecke in der HiLo Einheit des Nest-Gebäudes in Zürich . . . . .	11
2.1	Rippenschalentragwerke von Nervi, links: Palazzetto dello Sport, 1956 ©Eduardo Pompeo, rechts: Hangar in Orvieto, Quelle: <a href="https://structurae.net/en/structures/orvieto-hangars">https://structurae.net/en/structures/orvieto-hangars</a> . . . . .	14
2.2	Schalentragwerke von Heinz Isler und Eduardo Torroja . . . . .	15
a	Wyss Garden Center, Solothurn, 1961 Quelle: <a href="https://structurae.net/en/structures/wyss-garden-center">https://structurae.net/en/structures/wyss-garden-center</a> . . . . .	15
b	Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, 1935 ©Ximo Michavila . . . . .	15
2.3	links: Rippen-Gewölbedeckensystem der BRG, rechts: grundlegendes Konzept [5]	15
2.4	links: Mittels Heißdraht-Schneideverfahren hergestellte Schalung, rechts: Mittels Freistrahlf-Bindemittelauftrag additiv gefertigtes Deckenelement. Die mit Sand als Ausgangsmaterial gedruckten Elemente besitzen eine relativ geringe Druckfestigkeit von 4-5,5MPa. . . . .	16
2.5	ACORN-Deckensystem, links: Konzept für die Fertigung, Einbau und Abbau, rechts: Flexibles Schalungssystem für Segmente . . . . .	16
2.6	Textiles Schalungssystem für das HiLo-Dach der BRG . . . . .	17
a	Vielfalt der textil schalbaren Gebäude-Elemente, wie gewichtsoptimierten Trägern oder verzweigten Stützen . . . . .	17
b	Einfluss der Membranvorspannung auf die durch den hydrostatischen Druck erzeugte Faltenbildung . . . . .	17
2.7	links: Vorrichtung für die Halterung der schalenden Membran, rechts: resultierende, faltenfreie und stark doppelt gekrümmte Oberfläche . . . . .	18
2.8	Textiles Schalungssystem für das HiLo-Dach der BRG . . . . .	19
a	Seilnetz basierte Schalung . . . . .	19
b	HiLo-Betonschale nach dem Entschalen . . . . .	19
2.9	Patent und pneumatische Schalung von Schlaich . . . . .	19
a	Patentzeichnung zu pneumatischen Schalungen. Erkennbar ist auch der beim Betonieren resultierende Querschnitt . . . . .	19
b	Aufgeblasene Schalungsmembran mit Sicken erzeugenden Seilen, Sobek [17]	19
2.10	Komponenten des ADAPA-Schalungssystems . . . . .	20
a	ADAPA Schalungssystem . . . . .	20
b	Einer der Linear-Aktoren . . . . .	20
c	mit flexiblen Stäben versehene Ebene, welche die ferromagnetische Silikonschicht hält . . . . .	20
2.11	Einsatz von ADAPA für die Herstellung der rund 40 000 Betonpaneele des Flughafens in Kuwait . . . . .	20
2.12	Dynapixel Schalungssystem[21] . . . . .	21

3.1	Invertierte Kettenlinie mit $y(x) = r - a \cosh a/x + a$ , Parabel mit $y(x) = r - ax^2$ und Kreisbogen mit $y(x) = \sqrt{r^2 - x^2}$ . Parameter $a$ wurde jeweils so gewählt, sodass sich die Auflagerpunkte aller Kurven berühren. . . . .	23
3.2	Untersuchungen Polenis zur Stabilität und Rissbildung des St. Petersdom in Rom, 1748 . . . . .	24
3.3	Einfluss der Exzentrizität auf das Verhältnis zwischen Normalspannung durch Biegemoment und Normalspannung aufgrund von Normalkräften (Druck bzw. Zug)[23] . . . . .	24
3.4	Resultierende Stützkurven und Hüllkurve bei Kombination aus Gleich- und asymmetrischer Einzellast mit $q=3\text{kN/m}$ und $F=2\text{kN}$ . . . . .	25
3.5	Resultierende Stützflächen und hüllender Querschnitt (rot) bei Kombination aus Flächen- und asymmetrischer Einzellast mit $q=3\text{kN/m}^2$ und $F=3\text{kN}$ . . . . .	25
3.6	Aufnahmefähigkeit von asymmetrischen Lastfällen der BRG-Rippendecke [8] . . .	26
3.8	Erhöhung der lokalen Krümmung durch Bespannung mit einem Seilnetz . . . . .	27
3.9	Spannungen für doppelt gekrümmte Membranflächen in den Richtungen 1 und 2 [25]	27
3.10	V-Form: Erzielen der geometrischen Steifigkeit über Sicken . . . . .	28
3.11	Konvergenzanalyse für das FE-Modell . . . . .	30
3.12	Querschnitt . . . . .	31
3.13	Ausnutzungsgrad der Schale bei Gleichlast, links: Oberseite, rechts: Unterseite . .	32
3.14	Ausnutzungsgrad der Schale bei asymmetrischer Belastung in der unteren Hälfte, links: Oberseite, rechts: Unterseite . . . . .	33
3.15	Absolutbeträge der Verformungen, bei links symmetrischer und rechts asymmetrischer Belastung . . . . .	34
3.16	Darstellung der maßgebenden Spannungen an jeweils Ober- und Unterseite der Schale, mit symmetrischen Lastfällen links und asymmetrischen Lastfällen rechts. Hierbei wurden Spannungen ihrem tatsächlichen Wert entsprechend farblich skaliert.	34
3.17	Spezifische Masse konventioneller Decken, des Rippmann Deckensystems und iterativ der V-Form Decke . . . . .	35
3.18	Parameterstudien . . . . .	37
a	Einfluss der Betongüte . . . . .	37
b	Einfluss der Stichhöhe . . . . .	37
3.19	V-Form Deckensystem mit Ständerkonstruktion und Sicken . . . . .	38
4.1	Darstellung der geometrischen Flexibilität mit Variation der Position der Eckpunkte.	40
4.2	V-Form Schalungssystem im pneumatisierten Zustand . . . . .	41
4.3	Schnitt des Schalungssystem mit Komponenten . . . . .	42
4.4	Kräftegleichgewicht der Nebenzugbänder und Bestimmung des Punktes $p_{l,i}$ . . . .	43
4.5	Schritte zum Austauschen der Membran . . . . .	43
a	. . . . .	43
b	. . . . .	43
c	. . . . .	43
4.6	Längenänderung der Membran am Kederelement . . . . .	44
4.7	Aktive Komponenten . . . . .	45
4.8	Reaktive Komponenten . . . . .	45
5.1	Schematischer Druckverlauf beim Schalungsprozess . . . . .	48
5.2	GeometrieEinstellung des Seilnetz-Pneus . . . . .	49
a	Phase 0 bei $t_0$ . . . . .	49
b	Phase 1 bei $t_1$ . . . . .	49

c	Phase 2 bei $t_2$ . . . . .	49
d	Phase 3 bei $t_3$ . . . . .	49
5.3	Drei herstellbare Schalen mit unterschiedlichem Grundriss und den jeweils dazu geometrisch eingestellten V-Form Schalungssystemen . . . . .	51
5.4	Einsatz der V-Form Schalungssysteme unter einem Bauzelt neben situ . . . . .	52
5.5	Innenraumansicht eines mit V-Form Decken ausgestatteten Bürogebäudes . . . . .	53

# Literatur

- [1] B. ; Dean, J. ; Dulac, K. ; Petrichenko und P. Graham. *General rights Towards zero-emission efficient and resilient buildings. Global Status Report Towards zero-emission efficient and resilient buildings. Global Status Report. Global Alliance for Buildings and Construction (GABC)*. Techn. Ber. 2019.
- [2] S. Weidner, A. Mrzigod, R. Bechmann und W. Sobek. „Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 116.12 (Dez. 2021), S. 969–977. ISSN: 14371006. DOI: 10.1002/best.202100065.
- [3] T. Ibn-Mohammed, R. Greenough, S. Taylor, L. Ozawa-Meida und A. Acquaye. *Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends*. 2013. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.07.026.
- [4] M. Ashby. „Materials and the Environment“. In: *Materials and the Environment*. Elsevier, 2013, S. i–iii. DOI: 10.1016/b978-0-12-385971-6.00016-6.
- [5] P. Block, C. Calvo Barentin, F. Ranaudo und N. Paulson. *Imposing Challenges, Disruptive Changes: Rethinking the Floor Slab*. Techn. Ber. URL: <https://www.gatesnotes.com/2019-Annual-Letter>.
- [6] N. Huberman und D. Pearlmutter. *448: Efficient structural roof form as a tool for energy savings in building design*. Techn. Ber., S. 22.
- [7] F. Xi, S. J. Davis, P. Ciais, D. Crawford-Brown, D. Guan, C. Pade, T. Shi, M. Syddall, J. Lv, L. Ji, L. Bing, J. Wang, W. Wei, K. H. Yang, B. Lagerblad, I. Galan, C. Andrade, Y. Zhang und Z. Liu. „Substantial global carbon uptake by cement carbonation“. In: *Nature Geoscience* 9.12 (Dez. 2016), S. 880–883. ISSN: 17520908. DOI: 10.1038/ngeo2840.
- [8] F. Ranaudo, T. van Mele und P. Block. „A low-carbon, funicular concrete floor system: Design and engineering of the HiLo floors“. In: *IABSE Congress, Ghent 2021: Structural Engineering for Future Societal Needs*. International Association for Bridge und Structural Engineering (IABSE), 2021, S. 2016–2024. DOI: 10.2749/ghent.2021.2016.
- [9] D. López López, D. Veenendaal, M. Akbarzadeh und P. Block. *Prototype of an ultra-thin, concrete vaulted floor system*. Techn. Ber. 2014.
- [10] G. Habert und N. Roussel. „Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives“. In: *Cement and Concrete Composites* 31.6 (Juli 2009), S. 397–402. ISSN: 09589465. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001.
- [11] R. Oval, J. J. Orr, P. Shepherd, S. A. Behnejad, G. A. R. Parke, O. A. Samavati, E. Costa, M. Nuh, D. Thomas-Mcewen und J. Orr. *A path towards off-site automated fabrication of segmented concrete shells as building floors*. Techn. Ber. 2021. URL: <https://www.researchgate.net/publication/353998436>.
- [12] J. Heyman. *The Stone Skeleton*. Techn. Ber. 1966, S. 249–279.
- [13] S. Peters und A. Trummer. „Gedruckte Schalungen für den Stahlbeton-Leichtbau“. In: *Deail* (2020).

- [14] M. Leschok, K. Graser, E. Zurich, B. Dillenburger, Z. Mania, A. Meibodi, Z. Andrei, J. Dbt, R. Giesecke, Z. Demetris, S. Dbt, Z. Mathias und B. Dbt. *Smart Slab: Computational Design and Digital Fabrication of a Lightweight Concrete Slab*. Techn. Ber.
- [15] M. A. Popescu. *KnitCrete Stay-in-place knitted formworks for complex concrete structures*. Techn. Ber. 2019.
- [16] M. West. *The fabric formwork book : methods for building new architectural and structural forms in concrete*. eng. New York: Routledge, 2016. ISBN: 1317380932. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315675022>.
- [17] W. 1. Sobek. *Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen*. ISBN: 3980108511.
- [18] R. Schlaich Jörg; Bergermann. „Pneumatische Schalung“. In: (1986).
- [19] *Adaptive moulds - adapa - adaptive moulds*. März 2021. URL: <https://adapamoulds.com/>.
- [20] G. Gardiner. *Reconfigurable tooling: Revolutionizing Composites Manufacturing*. Sep. 2017. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/reconfigurable-tooling-revolutionizing-composites-manufacturing>.
- [21] G. Gardiner. *DYNAPIXEL: Automated, reconfigurable molds*. Feb. 2020. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/dynapixel-automated-reconfigurable-molds>.
- [22] *Dynapixel: MIT Rekonfigurierbaren Werkzeugen zum mass-customization von composite bauteilen - cikoni - innovate. develop. realize. - composite engineering. Carbon Entwicklung - CFK (carbon)*. Nov. 2018. URL: <https://cikoni.com/de/dynapixel-mit-rekonfigurierbaren-werkzeugen-zum-mass-customization-von-composite-bauteilen>.
- [23] P. Eigenraam, A. Borgart, J. Chilton und Q. Li. „Structural analysis of Heinz Isler’s bubble shell“. In: *Engineering Structures* 210 (Mai 2020). ISSN: 18737323. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110265.
- [24] H. Wu, A. Liew, T. Van Mele und P. Block. „Analysis and optimisation of a rib-stiffened vaulted floor for dynamic performance“. In: *Engineering Structures* 213 (Juni 2020). ISSN: 18737323. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110577.
- [25] R. Wagner. *Bauen mit Seilen und Membranen*. ger. Berlin: Beuth Verlag, 2016. ISBN: 3410217193.
- [26] P. Purnell. „The carbon footprint of reinforced concrete“. In: *Advances in Cement Research* 25.6 (Dez. 2013), S. 362–368. ISSN: 09517197. DOI: 10.1680/adcr.13.00013.
- [27] T. Van, M. Tomás, M. Echenagucia, D. Pigram, A. Liew und P. Block. *Ultraleichtes, flexibles Schalungssystem für dünne, textildbewehrte Betonschalen Ultralight, flexible formwork system for thin, textile-reinforced concrete shells*. Techn. Ber.