

---

**GERNOT PARMANN**

---

**MODULAR  
STANDARD**

---

**MODULARE FERTIGTEILE ZUR REALISIERUNG  
VON NON - STANDARD GEBÄUDEHÜLLEN**

**DIPLOMARBEIT**

ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES  
EINES DIPLOM - INGENIEURS

STUDIENRICHTUNG: ARCHITEKTUR

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ  
ERZHERZOG-JOHANN-UNIVERSITÄT  
FAKULTÄT FÜR ARCHITEKTUR

---

INSTITUT FÜR TRAGWERKSENTWURF, Technische Universität Graz

Betreuer:

Stefan PETERS, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Andreas TRUMMER, Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.tech.



# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am ..... ..

Englische Fassung:

# STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked.

date ..... ..

---



---

# VORWORT

---

In den neunziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts entwickelte sich, ermöglicht durch den vermehrten Einsatz von CAD-Systemen in Entwurf und Realisierung, die so genannte Freiform-Architektur. Als Blob-Architektur, Nicht-Standard-Architektur oder Freiform-Architektur, werden Bauten und Entwürfe bezeichnet, die komplexe, fließende, oft gerundete und biomorphe Formen in der Gebäudehülle aufweisen.

Während meines Architekturstudiums konnte ich beobachten, dass immer mehr große, prestigeträchtige Objekte solche Freiformgeometrien in der Gebäudehülle als zentrales Thema teilten. Oft wird diesen Objekten, nicht zu Unrecht, verschwenderische Beliebigkeit vorgeworfen, da sie sich nur schwer in eine Stadtlandschaft eingliedern lassen und sich ihre komplexe Realisierung als höchst kostenintensiv erwies. Jedoch erfüllen sie sehr oft die Anforderung ein Landmark zu sein, eine Sehenswürdigkeit oder ein Kunstwerk an sich.

Versucht man nun über dieses, scheinbar für viele Menschen ansprechende, äußere Erscheinungsbild hinaus, weitere positive Aspekte für die Freiform zu finden, sind die Minimierung der außenluftberührten Oberfläche, die Verwendung von nur einer Konstruktionsweise für die horizontale und vertikale Gebäudehülle, sowie die Möglichkeit zur Kombination der tragenden und flächenbildenden Funktion zu nennen.

Letzteres wurde in den zeitgenössischen Beispielen eher vernachlässigt und ist in viel früher entwickelten Werken von Pier Luigi Nervi, Félix Candela und Heinz Isler in die Realität umgesetzt worden. Einige dieser Bauten sind bis heute mit ihren schlanken, eleganten und ebenso effektiven Tragwerkskonzepten Zeugen für das geglückte Zusammenspiel von Form und Effizienz. Sie motivieren dazu, heutige Bauaufgaben in diese Richtung zu überdenken und mit den jetzt gegebenen Möglichkeiten und Randbedingungen neu durchzuspielen.

Formfindungsprozesse, die zu der Zeit dieser großen Entwickler extrem aufwendig, arbeitsintensiv und ungenau waren, können jetzt mit Hilfe von geeigneter Software in einem Bruchteil der Zeit erledigt und weiters in einer Genauigkeit ausgegeben werden, die in der darauf folgenden Fertigung auch mit den modernsten Maschinen kaum zu erreichen ist.

Diese Arbeit befasst sich deshalb mit der Entwicklung eines mittels Parametrik adaptiv nutzbaren Fertigteilsystems zur Realisierung von raumabschließenden, selbsttragenden, mehrfach gekrümmten Gebäudehüllen.



---

## DANKSAGUNG

---

Besonderer Dank gilt Stefan Peters und Andreas Trummer für die aufgeschlossene und intensive Betreuung während dieser Diplomarbeit. Ich danke euch für eure Geduld, die vielen Gespräche außerhalb beschlossener Termine und euer Verständnis für meine Ideen.

Dank gebührt weiters auch meinen KollegInnen vom Institut für Tragwerksentwurf der TU-Graz, insbesondere Eva Maria Pirker und Felix Amtsberg, die ebenfalls jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen und Anliegen zu dieser Arbeit hatten.

Für die grammatikalische und syntaktische Durchsicht bedanke ich mich herzlich bei meiner Freundin Madeleine Klambauer.

Meinen Kommilitonen Robert Schmid, Mario Ruml, Claus Plazensia und Georg Hansemann möchte ich für die Zusammenarbeit und Freundschaft während der gesamten Studienzeit danken. Dem Architekturzeichensaal AZnull und allen seinen Mitgliedern gilt ebenfalls Dank für die gemeinsame Zeit, die anregenden Gespräche und die familiäre Gemeinschaft.

Meiner Familie und meinen Freunden, ganz besonders aber meinen Eltern Margit und Gernot Parmann möchte ich mit dieser Arbeit für die immerwährende Unterstützung und Ermutigung danken.



---

## KURZFASSUNG

---

Schalentragwerke sind in der zeitgenössischen Architektur hauptsächlich als Gitterschalensysteme umgesetzt. Obwohl sich Beton aufgrund seiner Eigenschaften ideal als Werkstoff für druckbeanspruchte Konstruktionen eignet, finden sich seit den Werken von Heinz Isler nur wenige Bauwerke aus dem formbaren Werkstoff, deren Tragsystem auf einer Schalenwirkung beruht.

Grund hierfür kann die aufwendige und teure Schalungstechnik sein, die zur Herstellung von Betonschalen notwendig ist. Könnten Schalen aus Betonfertigteilen gebildet werden, würde dieser Faktor verringert und dadurch eine kostengünstigere Schalenbauweise möglich.

Basis für eine derartige Entwicklung kann der effiziente Einsatz von modernen Betonwerkstoffen, wie zu Beispiel UHPC.

Derzeit wird zur konstruktiven Lösung von Schalentragwerken die zuvor ermittelte Geometrie nachträglich elementiert. Durch diese Arbeitsweise entstehen Schalen und Freiformflächen aus einer Vielzahl verschiedener Elemente, da sich die erzeugten doppelt-gekrümmten Flächen nicht von immergleichen Modulen annähern lassen. Aus diesem Grund und wegen der schlanken, transparenten Konstruktion werden derartige Strukturen derzeit hauptsächlich in Stahl umgesetzt. Die technischen Möglichkeiten des Stahl- und Maschinenbaus bieten durch ihre Fertigungsmethoden die ideale Plattform zur Herstellung von Einzelteilen, der Kostenfaktor bleibt aber auch bei dieser Bauweise überdurchschnittlich hoch.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde eine Methode entwickelt, bei der die Elementdimensionen schon vor der Formfindung bestimmt werden und somit das Einzelelement zu einer maßgeblichen Größe für die erzeugbaren Geometrien wird. Durch diese Arbeitsweise ist es nun möglich, Schalengeometrien durch ein einziges, sich wiederholendes, selbstgleiches Element anzunähern.

Dies bietet die Grundlage zur Konzeption einer modularen Bauweise und der dazu notwendigen Elementherstellung.

Um die überzeugenden Qualitäten von UHPC durch eine entsprechende Fertigungsmethode nutzbar zu machen, muss eine Weiterentwicklung der etablierten Verarbeitungstechnologien erfolgen. Ein weiterer Aspekt ist deshalb die Betrachtungsweise der Schalung als funktionelle und wiederverwendbare Form, die eventuell notwendige mechanische Nachbearbeitungen auf ein Mindestmaß reduziert.

Behandelt werden während der Grundlagenentwicklung hauptsächlich die raumabschließenden und tragenden Funktionen von Gebäudehüllen, bauphysikalische Anforderungen werden in dieser Arbeit deshalb nur peripher berücksichtigt.



VORWORT	5		
DANKSAGUNG	7		
KURZFASSUNG	9		
<b>1</b>	<b>KONZEPTENTWICKLUNG</b>	<b>13</b>	
	Topologieoptimierung	13	
	Homogene Parkettierungen von Freiformen	15	
	Geodätische Kuppeln	15	
	Parkettierung von Nurbs - Flächen	16	
	Physische Modellbildung	19	
	Formfindungsmethoden des Betonschalenbaus	21	
	Formulierung des Entwicklungszieles	23	
<b>2</b>	<b>VIRTUELLE HÄNGEMODELLE</b>	<b>25</b>	
	Kangaroo Physics	27	
	Polygonnetze	29	
	Weaverbird	31	
	Angleichen der Seitenlängen	34	
	Beispiele für virtuelle Hängemodelle	39	
	Einflüsse der Parkettierung auf die Schalengeometrie	53	
	Einflüsse der Auflager auf die Schalengeometrie	58	
	Grenzen der Methode und Bewertung	62	
<b>3</b>	<b>STATISCHE ÜBERPRÜFUNG</b>	<b>63</b>	
	Karamba	64	
	Analyse weiterer Schalengeometrien	73	
	Prototyp	79	
	Verbindungskonzept	82	
	Berechnungsmodelle	85	
	Finite Elemente, Dlupal RFEM	87	
	UHPC	102	
	Elementbewehrung	106	
<b>4</b>	<b>SCHNITTSTELLEN</b>	<b>109</b>	
	4.2 Version Stahlimplantat	112	
	4.3 Version integrierte Verschraubung	116	
	4.4 Verschraubung von Aufkantungen	120	
	4.5 Version zentrische Verschraubung	124	
	Auswertung der Verbindungskonzepte	128	
<b>5</b>	<b>HERSTELLUNG DES MODULS UND FORMENBAU</b>	<b>131</b>	
	Mechanische Bearbeitung	132	
	Aufbau der Form	135	
	Material und Beschichtung	139	
	Betoniervorgang	141	
<b>6</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>149</b>	
<b>7</b>	<b>THEORIE UND PROJEKTE</b>		
	Realisierte Objekte und Systematik des Schalenbaus	151	
	TRAGVERHALTEN VON SCHALEN	113	
	VLADIMIR ŠUCHOV Blechwalzwerk, Russland	158	
	PRINZIP DES SALATSIEBS Frei Otto, <i>Schlaich - Bergermann</i>	160	
	GEODÄTISCHE KUPPELN Ford Rotunda Dome, USA	162	
	BETONSCHALEN VON NERVI UND CANDELA Palazzetto dello Sport, Rom Los Manantiales, Mexiko	164	
	HEINZ ISLER Formfindung, Betonschalen	166	
<b>8</b>	<b>QUELLENANGABEN</b>	<b>171</b>	



---

# 1 PROJEKTENTWICKLUNG

---

Durch das Ziel ein modulares Bauteil zu entwickeln, das eine Vielzahl der technischen Funktionen einer Gebäudehülle umsetzen kann, ergaben sich folgende Entwurfsgrundlagen:

- Effizienz
- Ökologie
- Ansprechendes Erscheinungsbild
- Hoher Vorfertigungsgrad
- Wandelbares System
- Einsatz von CAM/CAD Systemen in der Fertigung
- Möglichst wenige verschiedene Teile
- Verwendung von neuen Betontechnologien

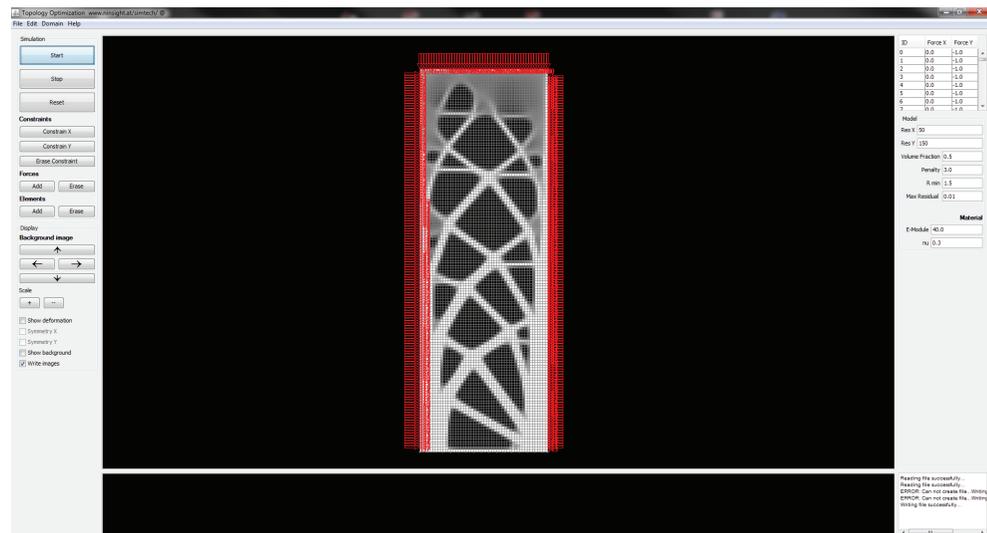
Die Verwendung von Beton für ein Fertigteil und die Idee, seine Verarbeitungsweisen weiterzuentwickeln, also die Formgebung, den Schalungsbau weiter in die Richtung des im Maschinenbau verwendeten Formen- und Werkzeugbaus anzunähern, scheint aus ökologischen Gründen plausibel. Die einzigartigen Eigenschaften dieses Werkstoffs, wie die Vergießbarkeit bei Raumtemperatur ohne zusätzliche Energiezufuhr, sowie die im ausgehärteten Zustand gesteinsartige Haltbarkeit, bieten die richtige Grundlage für eine derartige Entwicklung. Außerdem versprechen die jüngsten Errungenschaften in der Beton-Technologie einen durch Faserbewehrung und Feinstkorn-Anteile homogenen Werkstoff, welcher noch höhere Belastungen aufnehmen kann und eine ausgesprochen gute Bewitterungsbeständigkeit aufweist.

## TOPOLOGIEOPTIMIERUNG

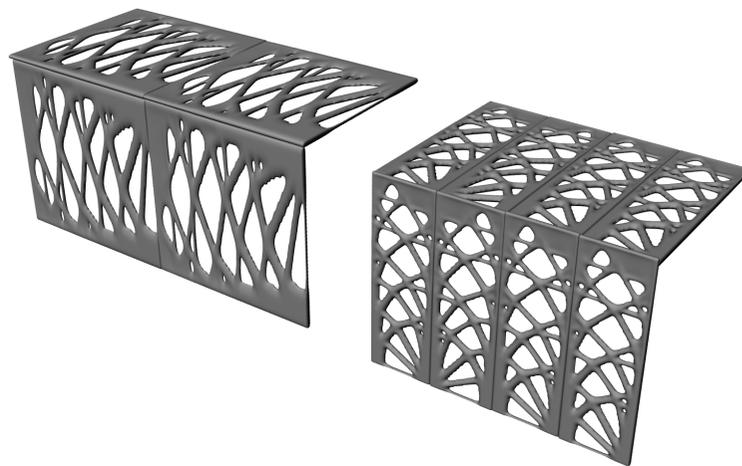
Zunächst stand der Versuch, ebene Systeme zu entwickeln, die reduziert auf ihre tragende Funktion im Element selbst Freiräume ausbilden sollten, welche die Integration von bauphysikalisch notwendigen Maßnahmen, wie zum Beispiel die thermische Isolierung, bieten könnten. Nach dem Vorbild der humanen Knochenstruktur ist es durch Topologieoptimierungsprogramme möglich, statisch unbelastete Materialzonen eines Bauteils zu ermitteln und diese auszusparen. Wählt man als Randbedingungen den Lastfall einer vertikal tragenden Wand, erhält man je nach festgelegten Lasteinleitungspunkten, Auflagerbedingungen und dem gegebenen Materialwiderstand eine dem Kraftfluss im Bauteil angepasste, dreidimensionale Geometrie. Diese hoch effizienten Strukturen würden sich hervorragend eignen, um ganze tragende Gebäudestrukturen zu optimieren, jedoch müsste diese Optimierung für jedes Objekt individuell durchgeführt werden.

Abb 1.1.1 Software TOP-OPT, Tool zur Herstellung von kraftflussoptimierten, dreidimensionalen Elementen, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Stadler, TU Graz, [www.ninsight.at](http://www.ninsight.at) (Lehrveranstaltung Simtech, TU-Graz)  
 Abb 1.1.2 Horizontale und vertikale Aneinanderreihung von einzelnen, auf Drucklasten optimierten Platten(modulen); die Darstellung zeigt, dass die Module nur für einen bestimmten Lastfall optimiert werden können, der Einsatz eines immergleichen Elements für die horizontale und vertikale Einbaulage ist also nicht sinnvoll.

1.1.1



1.1.2



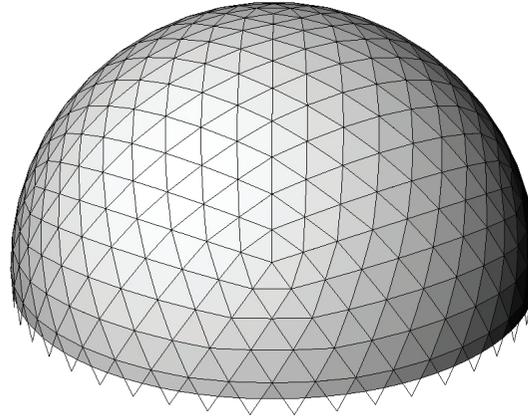
Wirkungsweise von gekrümmten Bauteilen siehe Abschnitt: 7.1 Tragverhalten von Schalen.

Die Erstellung eines sich selbst ähnlichen und sich im Endobjekt ständig wiederholenden Moduls mittels dieser Topologieoptimierung stellte sich durch die vielen verschiedenen Lastfälle in einem Gebäude als nicht zweckmäßig und optisch wenig ansprechend heraus.

Weiters zeigten die Versuche zu den ebenen Elementen auch, dass jene, um auch horizontal wirksam zu sein und dabei nicht selbst zum maßgeblichen Lastfall in der Bemessung zu werden, eine schalenartige Krümmung ausbilden können müssen. Um ohne weitere statisch wirkende Hilfskonstruktionen weit gespannte Decken und Dächer damit realisieren zu können, wären horizontal verbaute Elemente, auch wenn sie in ein statisches System, wie zum Beispiel einen Trägerrost, integriert wären, durch das aufzunehmende Biegemoment an den Verbindungspunkten definiert, da diese Kräfte um ein Vielfaches einflussreicher wären, als die in den vertikalen Bauteilen entstehenden Druckkräfte. Da als Ziel der Entwicklung ein modulares Element und eine damit einhergehende Bauweise definiert wurde, würde diese Eigenschaft bedeuten, dass eine große Anzahl der immer gleichen Elemente mehrfach überdimensioniert wäre.

1.2.1 Geodätische Kuppel, erstellt mittels Panning-Tools in Rhinoceros, Projektion eines Ikosaeders mit gleichmäßig triangulierten Hauptdreiecken. Das Ergebnis ist eine elementierte Kuppel die, in sich wiederholenden Zonen, gleiche Elemente aufweist, aber dennoch insgesamt aus verschiedenen Flächen besteht. Gut erkennbar ist dieser Umstand in den Bereichen, in denen sich die Dreiecke zu einem Fünfeck statt zu einem Sechseck zusammensetzen (Projektion der Ikosaederecken).

1.2.1



## HOMOGENE PARKETTIERUNG VON FREIFORMEN

### GEODÄTISCHE KUPPELN

Um doppelt gekrümmte Flächen in möglichst viele ähnliche, ebene Teile aufzulösen, muss es sich bei den Flächen um Kugeln oder zumindest Kugelausschnitte handeln. Diese, durch Projektion von einem im Zentrum der Kugel positionierten, platonischen Körper elementierten Kugelausschnitte, werden geodätische Kuppeln genannt und finden sich in den Werken Buckminster Fuller als gebaute Realität. Als Basis für die Kachelung der Kugelkalotte dient meist ein Ikosaeder, dessen Einzeldreiecke nochmals in kleinere Dreiecke unterteilt werden bis, durch die feinere Auflösung des Rasters, das gewünschte Ergebnis erzielt wird. Auch wenn die Dreiecke nach der Projektion auf den ersten Blick gleichseitig und gleich groß wirken, sind sie es in Wahrheit nicht. Der Abstand zwischen der ebenen Dreiecksfläche des Ikosaeders und der gekrümmten Kugeloberfläche variiert bei der Projektion und erzeugt deshalb immer verschiedene Seitenlängen am Umfang.

Abb. 1.2.1

Zwar gibt es Vorgangsweisen, die das Ergebnis weiter verbessern, nichtsdestotrotz bleiben die Einzelteile, bei einer immer genauer angenäherten Kugelgeometrie und sich wiederholenden Elementgrößen, verschieden. Obwohl diese minimalen Abweichungen bei einer modularen Bauweise eventuell über ein adaptierbares Verbindungsglied zwischen den einzelnen Bauteilen ausgeglichen werden könnten, bleibt immer noch die vorgeschriebene Kugelgeometrie.<sup>1</sup>

Es bliebe also nur die Möglichkeit, komplexe Gebäudehüllen in Kugelkalotten zu unterteilen, die jeweils denselben Radius besitzen und somit eine äußerst eingeschränkte Formensprache und Verwendbarkeit bedeuten. Natürlich ist es denkbar, Module für einige verschiedene Basisradien vorzufertigen und somit ein wenig flexibler auf zu realisierende Geometrien eingehen zu können, jedoch sind die damit einhergehenden Schnittstellen zwischen den Kugelkalotten und deren Verbindung auf effiziente Weise nicht zu lösen und somit ein auf geodätischen Kuppeln basierendes System nicht zielführend.

*Theorie zu geodätischen Kuppeln  
und Werke von Buckminster  
Fuller unter:  
7.4 Geodätische Kuppeln*

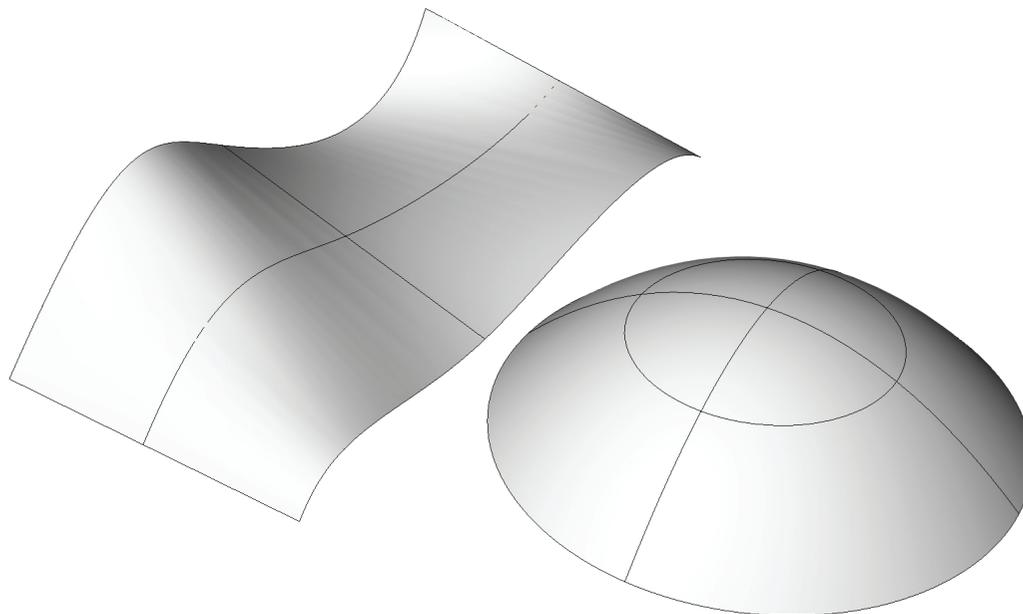
<sup>1</sup> Vgl. Nerdinger, Winfried:  
Wendepunkt(e) im Bauen. Von der  
seriellen zur digitalen Architektur,  
München 2010, 43.  
ISBN: 978-3-920034-40-9  
Verlag: Edition Detail

1.3.1 In Rhinoceros 3D generierte Nurbs-Flächen; geloftete Fläche definiert durch zwei Randkurven. Die entstandene Fläche ist nur in jeweils einer Richtung gekrümmt.

1.3.2 Paraboloid definiert durch Fokus, Richtung und Radius, an jeder Stelle zweifach gekrümmt.

1.3.1

1.3.2



### PARKETTIERUNG VON NURBS - FLÄCHEN

2 Vgl.  
Hans-Günther Bigalke,  
Heinrich Wippermann:  
Reguläre Parkettierungen,  
Heidelberg 1994, 12

Vgl.  
<http://www.rhino3d.com>

Vgl.  
<http://wiki.mcneel.com/labs/panelingtools>

Folglich galt es zu versuchen, freier definierte, doppelt gekrümmte Flächen in selbstständige Elemente zu unterteilen. Die lückenlose und überlappungsfreie Überdeckung einer Ebene oder auch des höherdimensionalen Raums durch gleichförmige Teilflächen wird als homogene Parkettierung oder Flächenschluss bezeichnet.<sup>2</sup>

Das Nurbs-modeling Programm Rhinoceros 3D stellt uneingeschränkte Möglichkeiten zur Erstellung und Bearbeitung von Freiformgeometrien zur Verfügung und bildet deshalb die geeignete Plattform für dieses Vorhaben. Zugleich ist diese Software durch viele als Freeware erhältliche Plugins individuell, je nach Anforderung erweiterbar und mittels des grafischen Algorithmus Editors Grasshopper auch offen für parametrische Funktionen.

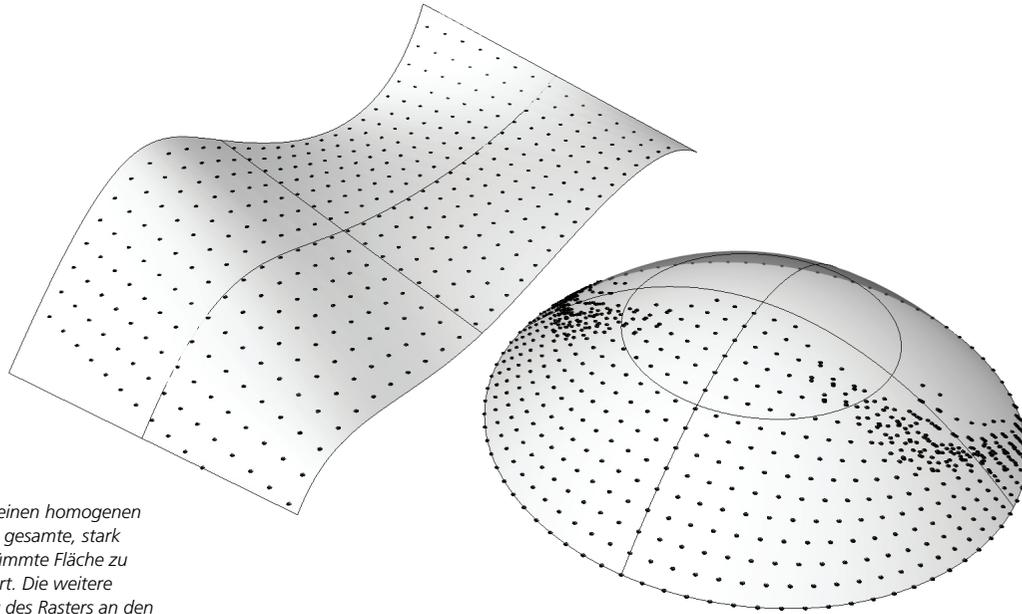
Ein vielversprechendes Tool zur Generierung und Rationalisierung von dreidimensionalen Rastern ist Paneling Tools. Durch dieses Rhino-Plugin können aus Nurbs-Flächen so genannte Paneling Grids extrahiert werden, welche anschließend bearbeitbar sind und die Grundlage für einen rechteckigen Raster bilden. Dieser Punktraster kann einen konstant definierten Punktabstand besitzen und mit Kacheln belegt werden. Da zu jeder Kachel vier, auf der Ausgangsfläche liegende Eckpunkte und vier Seitenkanten gehören, entstehen selbst bei konstanter Seitenlänge unzählige unterschiedliche Panele. Die viereckigen Umrisse können also gleiche Seitenlängen besitzen, deren eingeschlossene Winkel sind aber variabel. Außerdem befinden sich die Eckpunkte grundsätzlich nicht in derselben Ebene, was zwar möglich wäre, aber eine starke Abweichung von der Ausgangsfläche bewirkt.

Es entstehen also im besten Fall gleichschenkelige Dreiecke mit verschiedenen Basislängen, erzeugt von rautenartigen Flächen, die über eine Diagonale geknickt sind. Deutlich wird die Un-

1.3.3 Durch die Flächen bestimmter Punktraster, Punktabstand konstant zwei Einheiten; es entstehen starke Fehlstellen bei der Rasterung der doppelt gekrümmten Geometrie, auch bei der einfach gekrümmten Fläche können die Randzonen nicht zur Gänze gerastert werden.

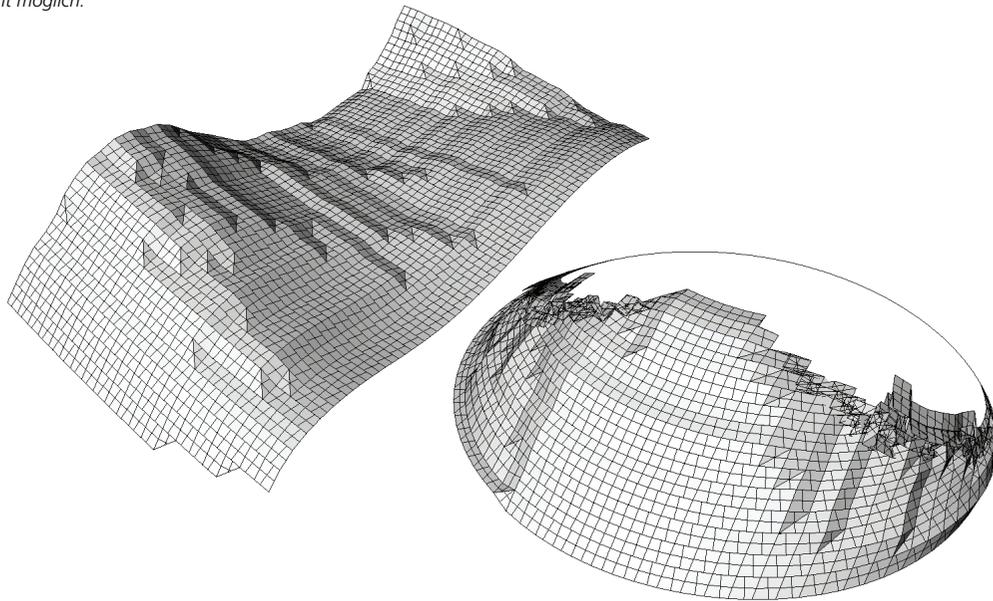
1.3.4 Kachelung des konstanten Rasters mit planaren, unregelmäßigen Vierecken. Die viereckigen Kacheln besitzen an ihren Umrissen die gleichen Seitenlängen, die eingeschlossenen Winkel unterscheiden sich voneinander. In Zonen mit besonders starker Krümmung werden die Flächen über eine Winkelhalbierende geknickt.

1.3.3



Der Versuch, einen homogenen Raster auf die gesamte, stark doppelt gekrümmte Fläche zu legen, scheitert. Die weitere Beeinflussung des Rasters an den Fehlstellen ist nicht möglich.

1.3.4



vollkommenheit dieser Lösungsvariante bei stark doppelsinnig gekrümmten Flächen. Darüber hinaus ist an dieser Stelle festzuhalten, dass frei definierte Geometrien noch nicht im Sinn des Tragverhaltens optimiert sind.

Dennoch weisen diese ersten Simulationsversuche am Rechner auf die Vorteile des Dreiecks als Modul hin, nicht nur die Tatsache, dass ein Dreieck unweigerlich eine Ebene definiert und somit im Gegensatz zu allen anderen parkettierbaren Geometrien eine Variable zur Lösung der Aufgabenstellung ausschließt, sondern auch die bekannten Vorteile bei Verwendung dieser geometrischen Form für Tragwerkselemente überzeugen.

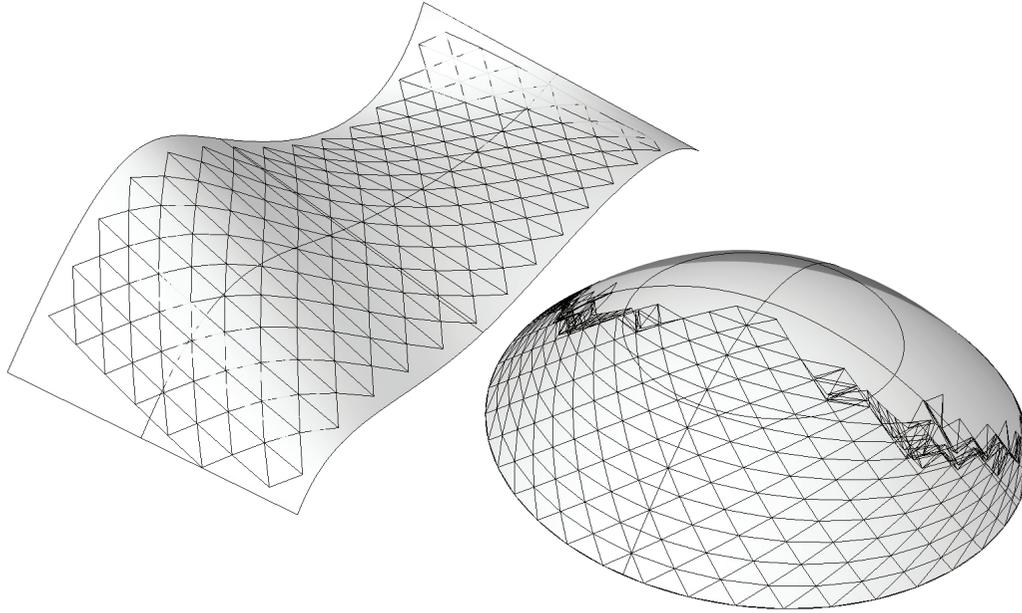
---

1.3.4 Zweidimensionale, triangulierte Kachelung einer einfach gekrümmten Fläche; vier Außenpunkte werden verbunden und über die entstehende Diagonale geteilt. Es entstehen gleichschenkelige Dreiecke mit verschiedenen Basislängen.

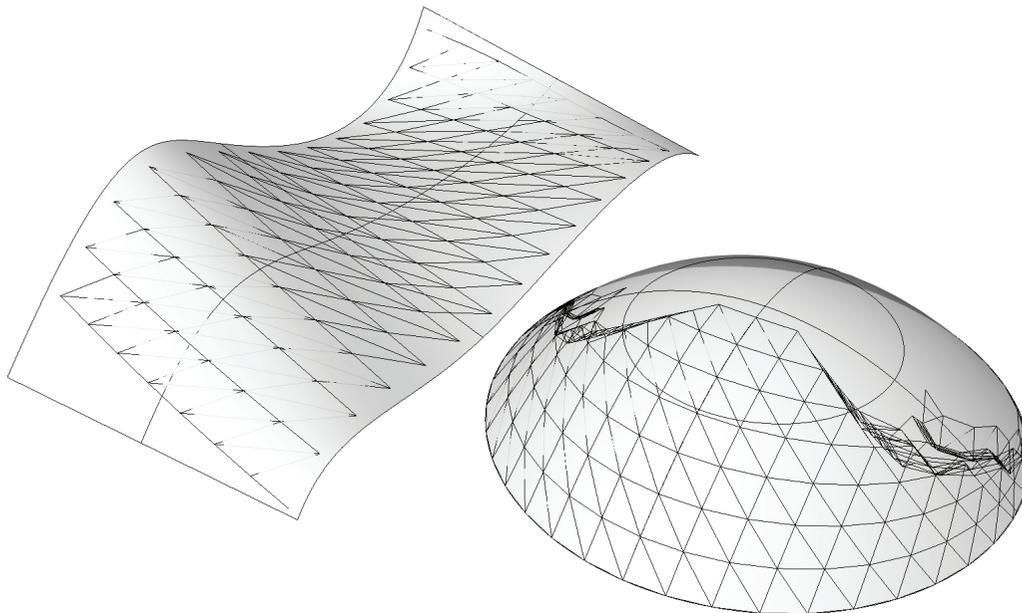
1.3.5 Zweidimensionale, triangulierte Kachelung einer doppelt gekrümmten Fläche; zuvor geänderte Ausrichtung des konstanten Rasters durch den Befehl «convert to diamond», es wird in jeder Reihe immer entgegengesetzt jeder zweite Punkt entfernt.

---

1.3.4



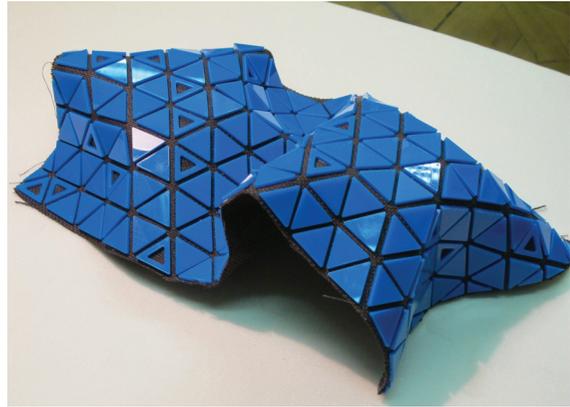
1.3.5



1.4.1 Auf ein Textil aufgeklebte, gleichseitige Dreiecke aus Acrylglas; die einzelnen Elemente wurden lasergeschnitten. Zur Darstellung eines zu umhüllenden Volumens dienen Äpfel.

1.4.2, 1.4.3 Die entstehende räumliche Struktur lässt zu einem großen Grad Verformungen zu, treten starke Krümmungen auf, kommt es im Umfeld zu Faltungen.

1.4.1



1.4.3



1.4.2

## PHYSISCHE MODELLBILDUNG

Da an dieser Stelle der gesammelte Input noch nicht durch eine computerbasierte Lösung visualisiert werden konnte, galt es ein physisches Modell zu bauen, um die getroffenen Entscheidungen zu überprüfen.

Ein Textil mit, in Form von Sechseckanordnungen, aufgeklebten gleichseitigen Dreiecken ermöglicht die ersten Versuche zur Abbildbarkeit von Freiformen durch eine solche Struktur. Viel aufschlussreicher ist jedoch die Option, ein reales Modell durch seine naturgegebene Masse in seine Stützlinie zu bringen. Sofort ist die zuvor fehlende Information über eine den Randbedingungen entsprechende Tragfähigkeit abzulesen.

Abb. 1.4.4

Diese Tatsache weist ohne Zweifel auf die Effizienz und Sinnhaftigkeit von Schalen geometrien hin, die aus dem Umkehren von Hängemodellen erzeugt werden können und dient deshalb als Grundlage für die folgende Entwicklung .

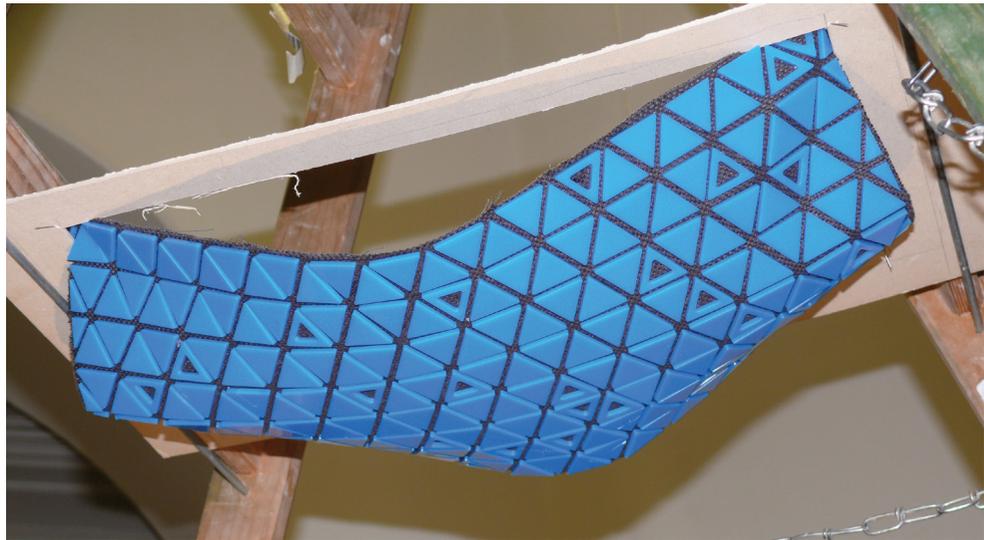
---

1.4.4 Durch Aufhängen an den Eckpunkten erzeugtes Hängemodell

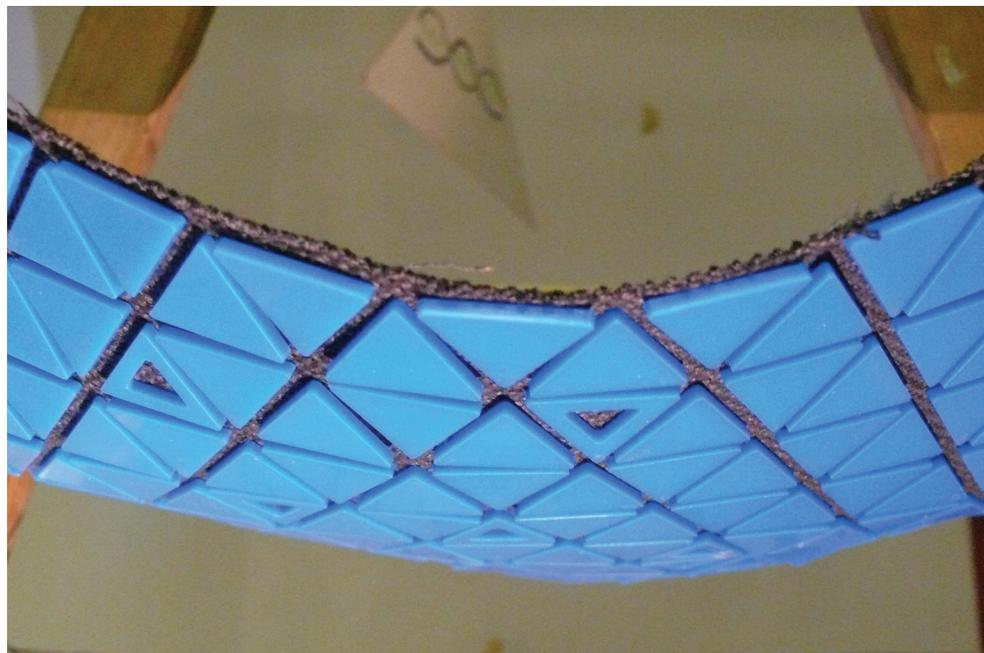
1.4.5 Die Annäherung an eine Schalengeometrie scheint im Großteil der Modellfläche möglich zu sein, im Randbereich bilden sich leichte Faltungen aus.

---

1.4.4



1.4.5



Die Auswertung des Modells liefert einige richtungsweisende Informationen zu einem möglichen Lösungsweg. Zunächst macht es deutlich, dass es im Bereich des Machbaren liegt, doppelt gekrümmte Flächen mit exakt gleichen Teilen anzunähern. Eine derartige Formfindung in eine effiziente Bauweise zu integrieren scheitert jedoch an der Schnittstelle von physischem Modell zu Computer.

Ideal wäre die exakte Kopie der Modellsituation am Rechner, sprich ein gegebenes, sich wiederholendes, selbst ähnliches Modul, das parkettierbar angeordnet ist und sich an den Berührungskanten frei verdrehen kann.

Die zu Grunde liegende Systematik ist also aus dem Modell abzulesen und wie folgt zu definieren:

- Es ist von planar lückenlos parkettierbaren Grundelementen auszugehen.
- Sind diese an ihren Berührungskanten gelenkig verbunden, können Hängemodelle erzeugt werden.
- Die Geometrie des Grundelements nimmt Einfluss auf die Umrissform der Gesamtform.
- Abweichungen von der Idealgeometrie äußern sich durch Auffaltungen der Elemente.
- Größe und Teilung des Moduls bestimmen das Ausmaß der Abweichungen.
- Anzahl und Positionierung der Hängepunkte sind maßgebliche Parameter.

Die aus diesen Vorgaben erstellbaren virtuellen Hängemodelle wären die Basis für die Planung von leistungsfähigen Schalen aus einem modularen Fertigteil und verlangen deshalb die nähere Betrachtung von gekrümmten Flächentragwerken, um weitere wichtige Parameter definieren zu können.

## FORMFINDUNGSMETHODEN DES BETONSCHALENBAUS

3 Vgl.  
 Illsler, Heinz: *Die Kunst der leichten Schalen. Moderner Schalenbau*, in: *Arcus 2003*, 18, 50-66  
 Verlagsg. Rudolph Müller, Deutschland

*Wirkungsweise von gekrümmten Bauteilen siehe Abschnitt: 7.1 Tragverhalten von Schalen.*

Die dünnwandige Schalenmembran ist eines der leistungsfähigsten Tragwerkskonzepte und benötigt, abgesehen von einer geeigneten Lagersituation, keinerlei weitere Addition von zusätzlichen statisch wirksamen Elementen. Grundlegend sind unter Schalen gekrümmte Flächentragwerke zu verstehen, die sich im Membranspannungszustand befinden und deren Dicke im Vergleich zu den anderen Abmessungen gering ist. Seit je her zeigt uns die Natur, ablesbar an Muscheln, Schädeln und Eierschalen, wie es möglich ist mit minimalem Materialaufwand einen kostbaren Inhalt zu umhüllen und zu schützen.

Da am Anfang der Baugeschichte genau diese Prinzipien, aufgrund fehlender Alternativen, angewendet werden mussten, um große Spannweiten überbrücken zu können, weisen uns heute zahlreiche Gewölbe und Kuppeln aus dieser Ära, wie zum Beispiel das Phanteon in Rom (119/125 n. Chr.), immer wieder auf die Leistungsfähigkeit dieser Strukturen hin. Bedenkt man dass, wenn eine ebene Platte räumlich gekrümmt und an den Enden entsprechend gelagert wird, eine fünfzig mal höhere Tragfähigkeit erzielt werden kann, wird die Effizienz dieser Systeme erfassbar.

Allerdings ist diese Annahme auch einzugrenzen, denn die Schale ist als eine Geometrie des Gleichgewichts hauptsächlich durch Druckkräfte belastet, eine Punktlast von innen oder eine andere übermäßige einseitige Belastung, die Zugkräfte und Biegemomente im Inneren erzeugen, kann zum Versagen des Systems führen. Da Beton sehr gut durch Druckkräfte belastbar ist, sich im flüssigen Zustand in annähernd jede beliebige Form bringen lässt und darüber hinaus, richtig ausgeführt, wasserdicht und witterungsbeständig sein kann, eignet er sich hervorragend um als Werkstoff für Schalen Verwendung zu finden.

Obwohl viele Argumente und die realisierten Bauten von Candela und Nervi für den intelligenten Einsatz von Schalen zu Bildung effizienter Gebäudehüllen aus Beton sprachen, blieb diese Bauweise eine nur selten in die Realität umgesetzte.

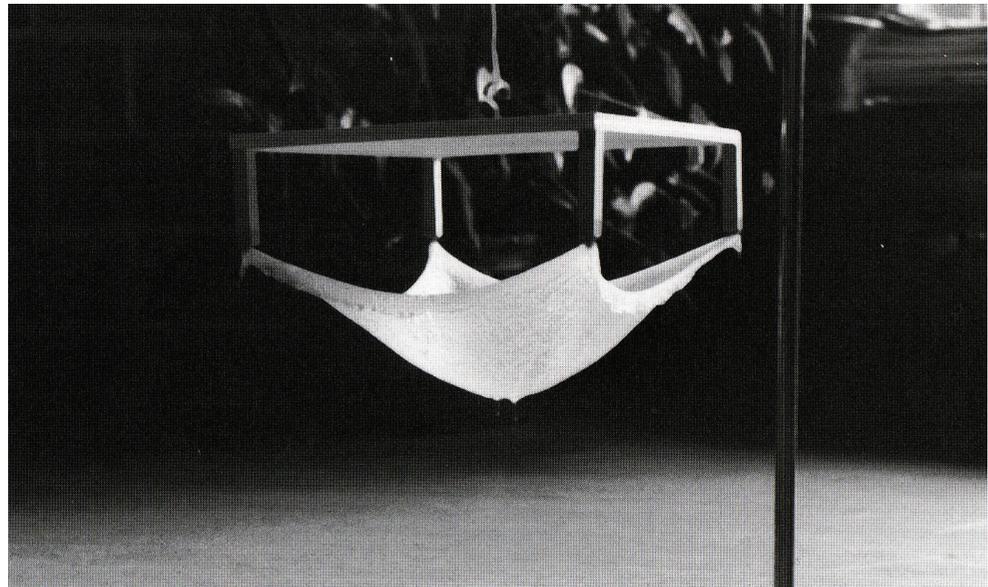
1.5.1 Autobahn-Raststätte Deitingen Süd, dreieckige Schalenflügeldächer (Isler-Schale) aus Beton des Schweizer Bauingenieurs Heinz Isler, gebaut 1968; Solothurn, Schweiz. Fotograf: Christian Kleis, 2009

1.5.2 Formfindung durch ein physisches Modell, Hängemodell aus einem mit Polyester getränktem Textil, das durch UV-Licht Bestrahlung aushärtet und umgedreht werden kann, ohne die gefundene Form zu verlieren. Heinz Isler 1994.

1.5.1



1.5.2



Betonschalen-Pionier Heinz Isler sieht die Gründe hierfür in unterschiedlichen Bereichen.

Zum einen nennt er die notwendige ganzheitliche Betrachtungsweise des Planers, der seiner Meinung nach Entwurf, Theorie, Funktion und Ausführung beherrschen und in Einklang bringen muss, zum anderen die im Vergleich zu Massenware spezialisiertere Konstruktion und die damit verbundenen höheren Kosten, sowie die Forcierung des Stahlbaus und dessen Befreiung vom Feuerschutz in der Zeit der Hochkonjunktur.

Als wahren Grund jedoch bezeichnet Isler die Beschränktheit des Formenrepertoires zu jener Zeit und den dadurch wenigen kreativen Möglichkeiten. Aus diesem Grund und weil auch die von ihm selbst bis dahin verwendeten Formfindungsmethoden ästhetisch nicht zufriedenstellend

---

waren, beschäftigte er sich ab 1954 mit alternativen Prozessen zur Generierung von Schalengeometrien. Durch unzählige Versuche, die organischen Formen konstruktiv zu definieren, war er irgendwann genug sensibilisiert um die Lösung im Alltag zu entdecken.

Abb. 1.5.2

Zuerst konnte er durch die genaue Betrachtung eines Kopfpolsters die Kissenmethode entwickeln und später, inspiriert durch ein nasses, hängendes Tuch, die noch viel einfacher durchzuführende Hängemethode. Beide Varianten sind der Modellstatik zuzuordnen, sprich ein physisches Modell bildet nicht nur Größendimensionen einer Struktur verkleinert ab, sondern auch das tatsächliche Tragverhalten.

Diese Modelle werden anschließend unter Laborbedingungen vermessen und entsprechend skaliert, um mit den auf diese Weise erlangten Informationen ein Tragwerk realisieren zu können. Isler konnte durch dieses Konzept weltweit 1400 Schalen von etwa 40 verschiedenen Typen herstellen.<sup>3</sup>

Er versuchte dabei stets die aufwendigen, zur Realisierung aber notwendigen, Schalungen wirtschaftlich herzustellen und rational einzusetzen. Dazu verwendete er die Schalungen nicht nur projektintern mehrmals, sondern auch projektübergreifend.

## FORMULIERUNG DES ENTWICKLUNGSZIELES

Die mittels des real gebauten Modells erzielten Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Simulationstechnik, die auf den Modellprinzipien beruht, die konstruktive Grundlage für eine adaptive, modulare Bauweise bilden könnte. Das bedeutet, es ist notwendig, zuvor definierte Module abstandslos aneinanderreihen und verknüpfen zu können, um anschließend das sich bildende Netz aus Elementen einer Gravitationskraft auszusetzen. Ziel ist also die Entwicklung einer virtuellen Formfindungsmethode für Schalen aus identen Fertigteilen

Gleichermaßen muss dieses Tool in kurzer Zeit wechselnde Randbedingungen simulieren und bewerten können, um für die jeweilige Bauaufgabe die richtige Wahl in Bezug auf Grundelemente, Modulgröße, Erscheinungsbild, Tragfähigkeit und Lagerbedingungen treffen zu können. Anders als im Modell also, sollten die verschiedenen Variablen in Echtzeit editierbar sein, um für die jeweilige Situation das bestmögliche Ergebnis zu erreichen.

Dementsprechend ist nicht nur ein sich wiederholendes Element zur Herstellung von Schalen zu entwickeln, sondern auch dessen Fertigung zu konzipieren und die systembedingt variablen Schnittstellen ebenso adaptiv und effizient zu lösen, wie die Geometrie selbst.

Ziel ist also die umfassende Entwicklung eines mittels Parametrik adaptiv nutzbaren Fertigteil-Systems zur Erstellung von Schalengeometrien aus identischen, hochfesten Betonhalbzeugen.

Dazu gehören die formale und statische Simulation der Schalen, die Extraktion der einzelnen Module und die Entwicklung eines variablen Verbindungssystems. Dies ist notwendig, um die Machbarkeit des Systems umfassend betrachten zu können und auch die Anforderungen einer effizienten Fertigung bei der Entwicklung zu beachten. Die Aufbereitung der Daten zur nahtlosen Integration von CAD/CAM Lösungen in den Produktionsvorgang ist Grundlage hierfür.



---

## 2 VIRTUELLE HÄNGEMODELLE

---

Um die zuvor festgelegten Anforderungen umzusetzen ist es naheliegend, die Entwicklung in einer Softwareumgebung, die alle benötigten Funktionen beinhaltet oder um diese erweiterbar ist, fortzusetzen.

Das 3D-Konstruktionsprogramm Rhinoceros bietet, durch die vielen erhältlichen Add-Ons und den grafischen Algorithmus Editor Grasshopper, die geeignete Plattform zur Umsetzung der fixierten Ziele. Angesichts der Tatsache, dass die Struktur während des gesamten Formfindungsprozesses variabel bleiben muss und mehrere Parameter veränderlich gestaltet werden sollen, wäre eine herkömmliche CAD - Konstruktion einer modularen Schale ineffizient und außerdem, wie im ersten Kapitel erläutert, mit identen Teilen unmöglich. Auch die normalerweise zur ingenieurmäßigen Betrachtung von Membrantragwerken verwendeten Programme, die zur Formfindung, Optimierung und Bemessung von Schalengeometrien verwendet werden, können aufgrund ihrer eingeschränkten Schnittstellen und Editierbarkeit im Bezug auf die Elementierung von Geometrien, nicht zur weiteren Entwicklung genutzt werden.

Weiterführend ist auch zu beachten, dass eine Struktur, die zwar aus vielen gleichen Teilen besteht, jedoch in der Gesamtform adaptiv ist, große Flexibilität in der Planung verlangt. So sind zum Beispiel in dem physisch gebauten Modell die Winkel zwischen den Einzelteilen die maßgeblichen Größen zur Fertigung der Schale. Deshalb müssen auch diese Schnittstellen effizient auszulesen sein und sich eindeutig den jeweiligen Modulen zuweisen lassen. Aus diesem Grund entsteht die Anforderung, die Planung gänzlich mit parametrisierbaren Werkzeugen durchzuführen, um an jedem Anknüpfungspunkt der Realisierung die notwendigen Informationen generieren zu können.

Vgl:  
<http://www.grasshopper3d.com>

Grasshopper bietet die Möglichkeit solch komplexe Zusammenhänge mittels einer grafischen Oberfläche zu vereinfachen und somit auch einem weniger spezialisierten Anwenderkreis den Zugang zu parametrisierten Geometrien. Grundsätzlich werden in diesem Programm Buttons, die für Funktionen oder Objekte stehen, durch Verbindungen kombiniert. Die Funktionen bleiben dabei editier- und erweiterbar bis das gewünschte Ergebnis erreicht ist. Ein simples Beispiel zeigt auf der folgenden Seite die prinzipielle Funktionsweise eines parametrisierten Grasshopper-Skripts anhand der Erzeugung einer beliebigen, editierbaren Geometrie.

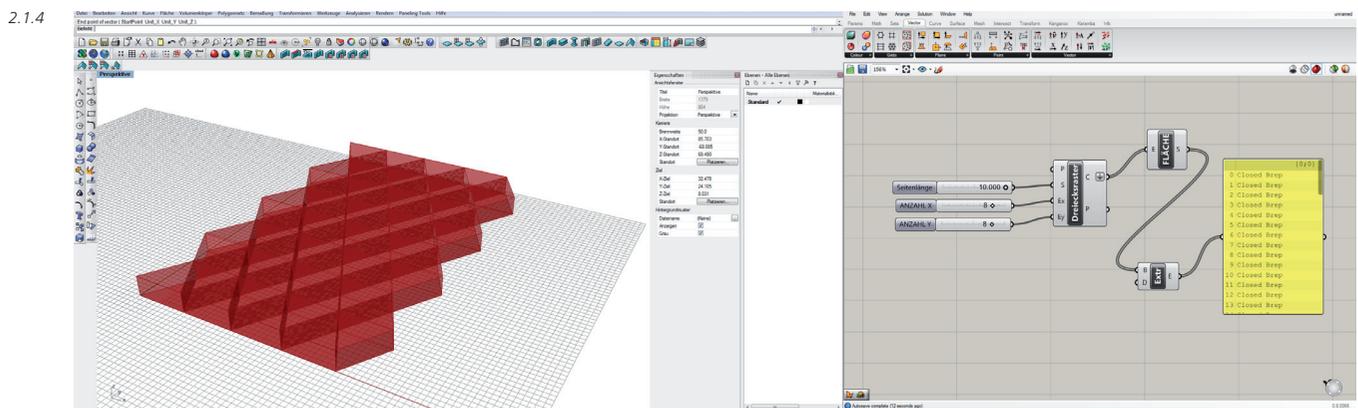
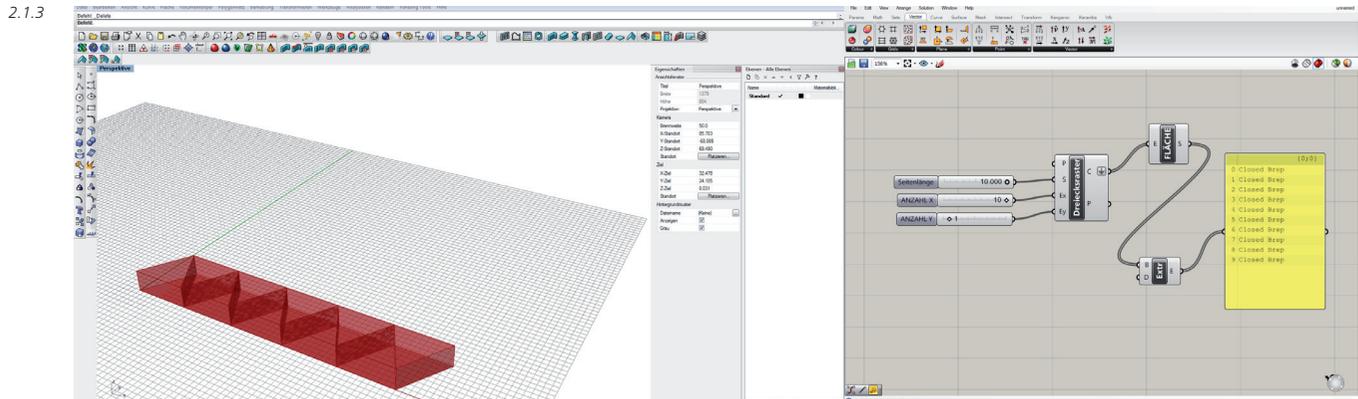
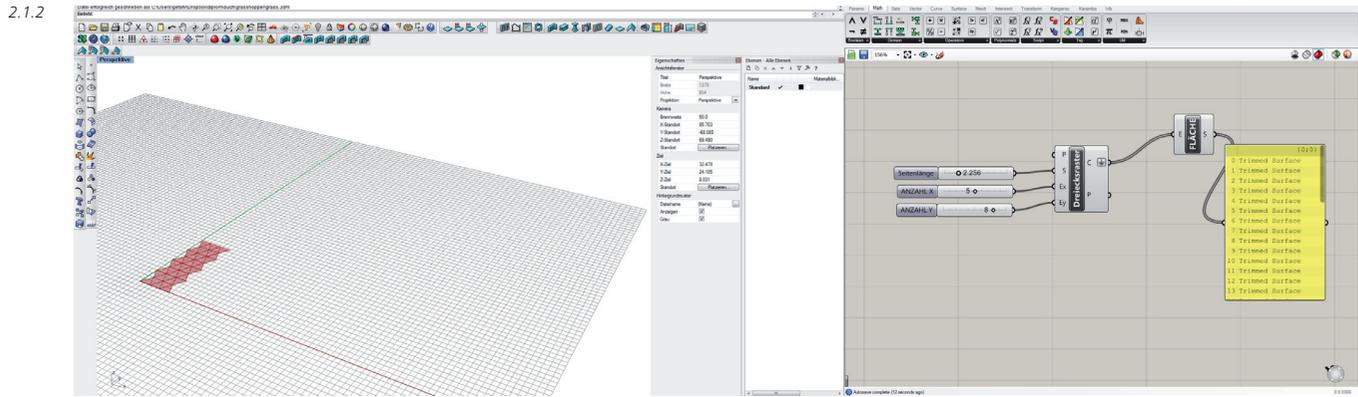
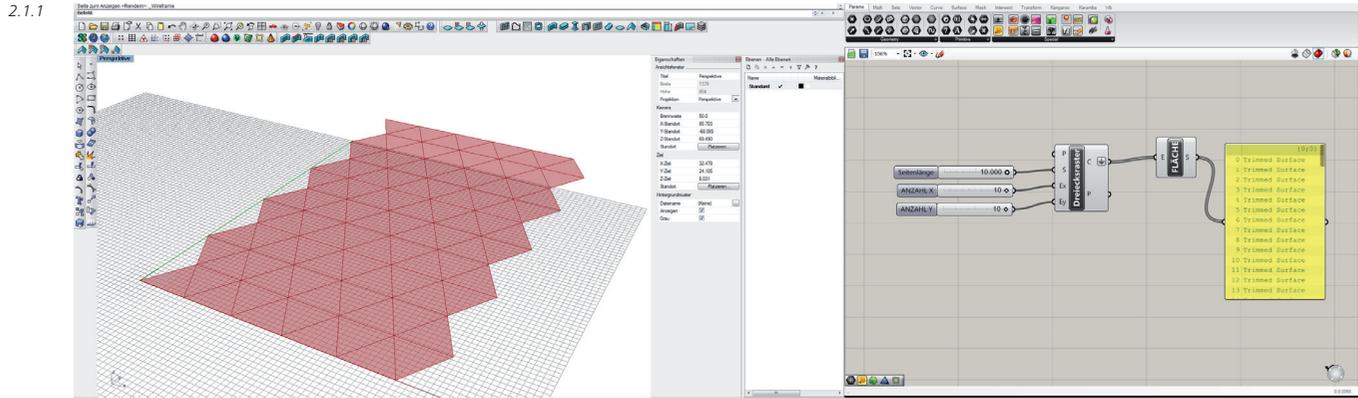
Dieses Kapitel beschreibt die Umsetzung von virtuellen Hängemodellen in Rhinoceros 4 durch die Plugins Grasshopper, Kangaroo Physics und Weaverbird.

2.1.1 **Prinzipielle Funktionsweise von Grasshopper**; ein Dreiecksraster kann über die Nummernslider im Bezug auf Seitenlänge und Dreiecksanzahl (x, y) verändert werden. Einstellung: 10,10,10

2.1.2 Kleinerer Raster, Seitenlänge 2.3, Anzahl X 5, Anzahl Y 8

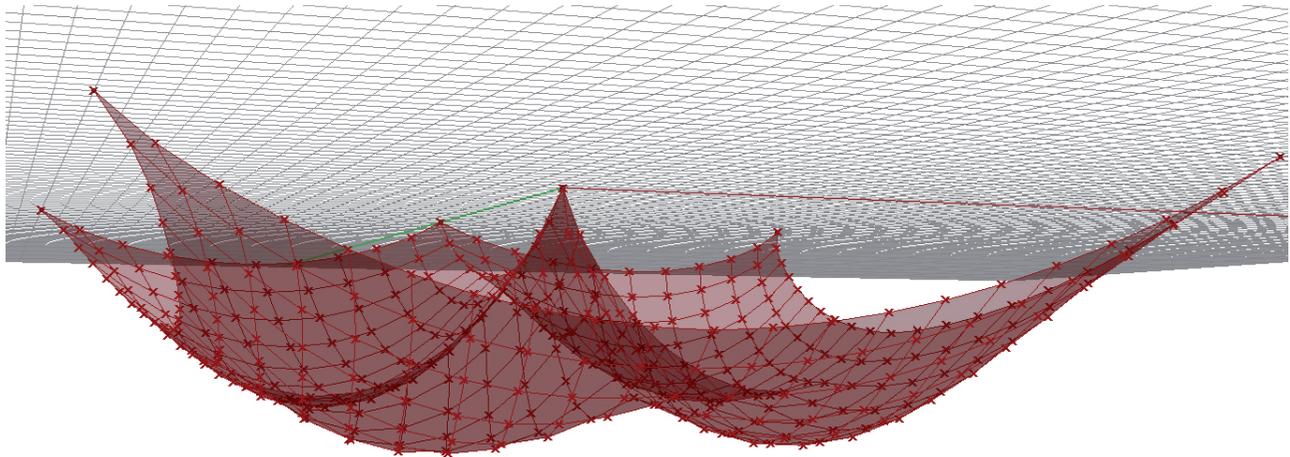
2.1.3 Zusätzliche Funktion extrudieren.

2.1.4 Nach wie vor sind alle Variablen editierbar.



### 2.2.1 Hängemodell aus Kangaroo Physics:

Ein an sechs Punkten fixiertes Polygonnetz aus regelmäßigen Vierecken wird an jedem Punkt der Rasterung mit einer Gewichtskraft belastet. Die Linien zwischen den Punkten verhalten sich wie elastische Stäbe. Es entstehen rautenförmige Netzmaschen mit unterschiedlichen Kantenlängen.



2.2.1

## KANGAROO PHYSICS

4 Vgl.

Piker, Daniel:

Using Kangaroo, 2012, 1-12.

<http://www.food4rhino.com/project/kangaroo>

Daniel Piker Blog:

<http://spacesymmetrystructure.wordpress.com>

Eine Grasshopper-Erweiterung, mit der Hängeformen simuliert werden können, ist das Plugin Kangaroo. Bei der Software handelt es sich um eine Physics-Engine, die unter anderem mit Massepunkten und Federn arbeitet. Massepunkte sind Objekte die durch Masse, Position, Geschwindigkeit und die Eigenschaft, Kräfte empfangen zu können, definiert sind. Sie eignen sich in idealer Weise um flexible Strukturen zu simulieren, da sie mit Hilfe des Programms durch einfache axiale Federn verbunden werden können. Diese Federn sind wie elastische Stäbe zu verstehen und können die Aktions- und Reaktionskräfte zwischen den Partikeln weitergeben.

Es wird also jede Kraft, die einen Punkt beansprucht, durch die Federn auch auf die anderen Partikel einer Struktur übertragen. Da die Federn somit einen wichtigen Einfluss auf das gesamte System haben, können sie über einige Variablen, wie zum Beispiel Steifigkeit, Dämpfungskonstante, Restlänge und elastische Länge, angepasst werden.

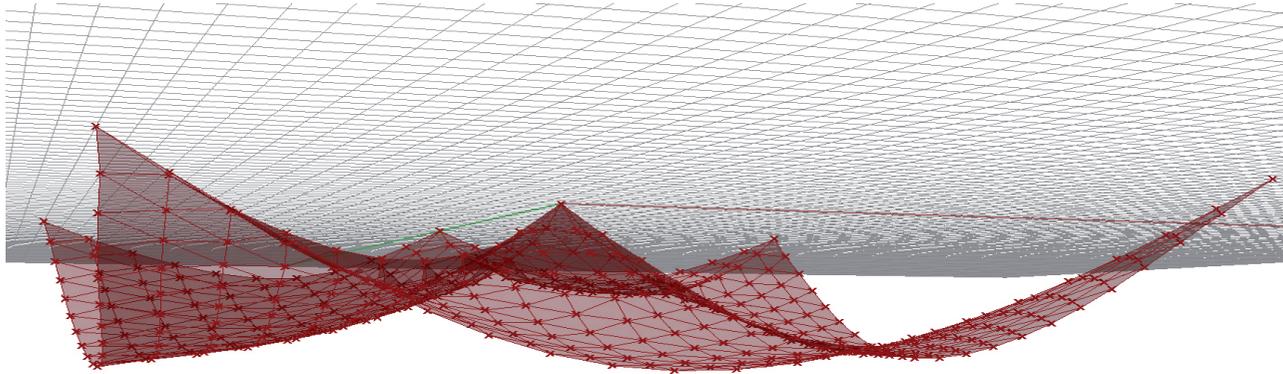
Kangaroo ermittelt auf Basis des ersten und zweiten Newtonschen Gesetzes aus den angegebenen Einwirkungen und den dadurch im System entstehenden, internen Kräften die resultierende Kraft für jeden Partikel. <sup>4</sup>

*„Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Translation, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.“*

*„Die Änderung der Bewegung einer Masse ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.“*

2.2.2 Hängemodell aus Kangaroo Physics; ein an sechs Punkten fixiertes Polygonnetz aus regelmäßigen Dreiecken wird an jedem Punkt der Rasterung mit einer Gewichtskraft belastet. Die Linien zwischen den Punkten verhalten sich wie elastische Stäbe. Die Dreiecksmaschen schließen eine Ebene ein und haben unterschiedliche Seitenlängen.

2.2.2



z  
.. ..

Da aufgrund dieser Gesetze Kraft, Masse und Beschleunigung im Zusammenhang stehen, kann Kangaroo über Differenzialgleichungen die Positionen der Massepunkte nach einer Kräfteinwirkung errechnen und darstellen. Durch diese Funktionsweise eignet sich Kangaroo Physics hervorragend zur Simulation von hängenden Textilien und stellt durch das breite Spektrum an verknüpfbaren Lasteinwirkungen und Zusatzoptionen eine ideale Plattform zur Virtualisierung von Hängemodellen dar.

Die Funktion «equalizen» zum Beispiel, ermöglicht die Berücksichtigung einer möglichst gleichwertigen Federlänge in der Berechnung und ist somit ein wichtiger Baustein für die weitere Ausarbeitung.

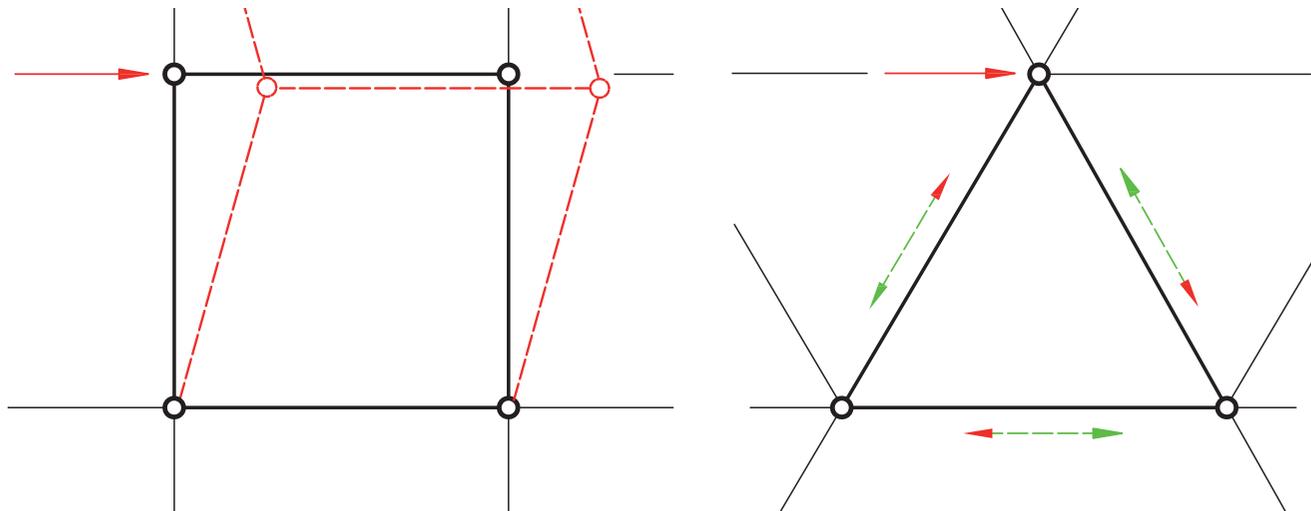
Um in Kangaroo Physics ein Hängemodell erzeugen zu können, müssen zunächst Punkte (Partikel) und Linien (Federn) erzeugt werden. Diese Komponenten bestimmen im Wesentlichen die Form und Größe der Einzelfelder, sowie das Erscheinungsbild der gesamten Geometrie. Die Versuche zur gleichmäßigen Parkettierung von Nurbs-Flächen mittels Panneling-tools wiesen schon auf die Vorzüge eines triangulierten Rasters hin, die Simulationen in Kangaroo zeigen an dieser Stelle jedoch noch deutlicher die Notwendigkeit einer Triangulation bei der Erzeugung der Grundelemente.

Abb. 2.3.1

Drei verbundene Eckpunkte bilden ohne Zweifel eine Ebene und darüber hinaus, bei fixierten Seitenlängen, ein unverschiebliches System und somit die ideale Basis für Hängemodelle aus identen Einzelteilen. Besteht der Grundraster aus rechteckig angeordneten Punkten und Linien bilden sich nach der Beaufschlagung einer Gravitationskraft rautenartige Teilungen aus, die sich deutlicher voneinander unterscheiden als bei Netzen aus Dreiecken.

Als Grundlage für ein simuliertes hängendes Stabmodell sind also verschiedene ebene Drei-

2.3.1 Können in der Simulation die Seitenlängen fixiert werden, ist es möglich eine Selbstähnlichkeit der Elemente auch im Bezug auf deren eingeschlossenen Winkel zu generieren. Grundlage hierfür ist die Triangulierung des Gitternetzes und das somit erzeugte unverschiebliche System. Dient ein Rechteckraster als Grundlage, entstehen zwar Einzelfelder mit gleichen Seitenlängen, die eingeschlossenen Winkel unterscheiden sich jedoch von Feld zu Feld sehr stark.



2.3.1

ecksparkettierungen herzustellen. Die Rasterlinien werden in der Simulation zu elastischen Stäben zwischen den Kraftangriffspunkten und, je nach Position und angreifender Kraft, mehr oder weniger gedehnt. Es entstehen also grundsätzlich im Hängemodell verschiedene dreieckige Elemente. Allerdings sind die Abweichungen gering und die einzelnen Module planar. Ein theoretisch angenommenes, unendlich steifes Federmaterial würde alle realen Anforderungen in der Simulation erfüllen, dies ist aber unmöglich, da ein derartiges Material die gesamte Berechnungsmethode ausschließt.

Auch die im physischen Modell angewandte Methode des Verschiebens der Auflagerpunkte und der damit einhergehenden Schalenbildung aus gegebenen gleichen Teilen lässt sich in Kangaroo aufgrund dieses Umstandes nicht ohne Umwege umsetzen.

## POLYGONNETZE

Zur Herstellung von in Kangaroo Physics verwertbaren Gitternetzen können Punkte und Linien gezeichnet werden. Einfacher und effektiver ist die Möglichkeit, mittels dem Plugin Weaverbird kontrolliert, Polygonnetze aus ebenen Flächen zu erzeugen und aus diesen anschließend Polygonkanten und Schnittpunkte zu extrahieren.

Da im Laufe der Entwicklung des Planungstools mehrere Instanzen von Kangaroo notwendig werden, eignen sich Meshes sehr gut um die Einzelergebnisse in den nächsten Berechnungsschritt überzuführen, weil sämtliche Gitternetz-Informationen in einer Geometrie verpackt sind. Polygonnetze bestehen, bestimmt durch die Randkurven einer Fläche, aus dreieckigen und rechteckigen Einzelpolygonen.

Ist eine Fläche durch orthogonale, gerade Randlinien definiert, wird sie in gleiche Rechtecke

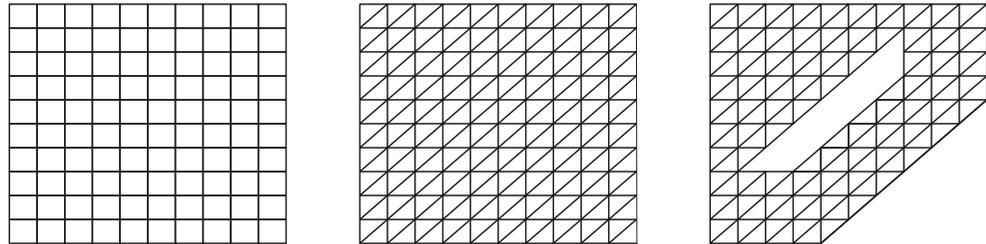
2.4.2 Mögliche regelmäßige Parkettierungen bei Umwandlung einer ebenen Fläche in ein Polygonnetz. Die Bearbeitungsoptionen von Polygonnetzen sind sehr beschränkt, es können aber zum Beispiel einzelne Polygone entfernt werden.

2.4.3 Die Außenkontur der Gesamtfläche beeinflusst immer die Regelmäßigkeit der Polygonstruktur.

2.4.4 Besteht eine Struktur bereits aus regelmäßigen strukturierten Elementen, können diese weiter unterteilt und somit die erzeugbaren Außenkonturen erweitert werden. Einzelne Polygonnetzflächen können entfernt werden.

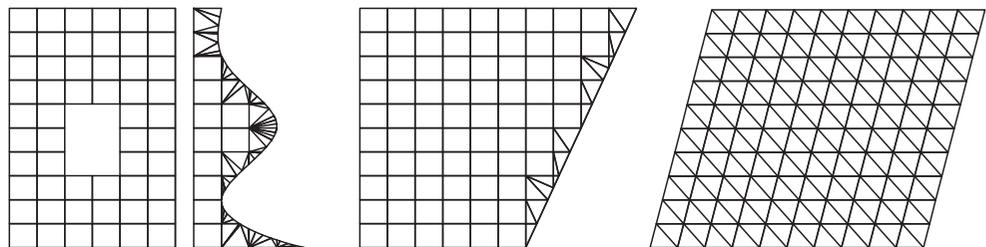
2.4.2

Durch die weitere Unterteilung der Polygone entlang ihrer Winkelhalbierenden wird eine Achsrichtung hinzugefügt. Der Umriss muss nun nicht mehr rein orthogonal sein.



2.4.3

Entspricht der Umriss nicht den Achsrichtungen der gleichmäßigen Einzelpolygone, müssen die Zwischenräume durch viele andersartige Polygone aufgefüllt werden.



2.4.4

Ein Polygonnetz aus gleichseitigen Dreiecken erzeugt Sechsecke als nächste parkettierbare Größe, durch eine weitere Unterteilung der homogenen Parkettierung kann ein geradliniger Umriss in zwei Richtungen erzeugt werden.

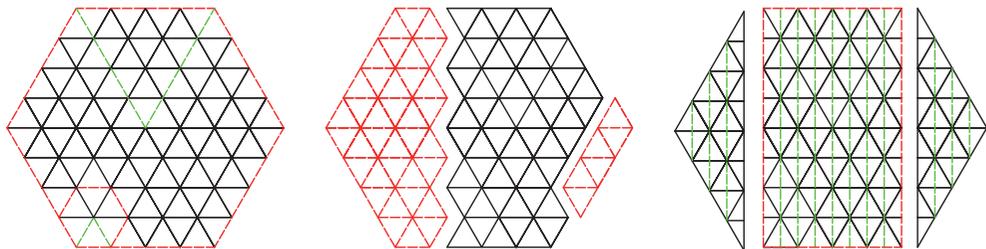


Abb. 2.4.2

oder gleiche Dreiecke unterteilt. Die Triangulierung erfolgt in diesem Fall durch Teilung der Rechtecke über eine ihre Diagonalen. Ist eine Randkurve nicht orthogonal zu den anderen, wird die Restfläche, die nicht durch Rechtecke angenähert werden kann, trianguliert.

Abb. 2.4.3

Soll eine Fläche mit planaren, gekrümmten Randkurven in ein Polygonnetz umgewandelt werden, entstehen hierbei, um die Kreisflächen zu füllen, viele verschiedene Dreiecke. Diese Tatsache zeigt deutlich den starken Zusammenhang der Außenkontur einer Fläche zu der möglichen Parkettierung der Fläche.

Ein strukturiertes, reguläres Polygonnetz ist demnach nur erzeugbar, wenn die Randkurven eine restlose Anordnung von gleichen Polygonen zulassen. Es kann davon ausgegangen werden, dass aus diesem Grund die Gesamtstruktur die gleichen Umrisse aufweist wie das erzeugende Polygon oder auch ein Vielfaches davon. Ein Beispiel hierfür ist das gleichseitige Dreieck, aus dem durch anstandslose Anordnung Sechsecke gebildet werden können, die somit die nächste parkettierbare Größe abbilden.

5 Vgl.  
Heinrich Heesch, Otto Kienzle:  
Flächenschluß, Hannover 1963,  
45-53.

Das Prinzip der Erstellung von Polygonnetzen aus gleichen Polygonen verdeutlicht die Notwendigkeit von platonischen Parkettierungen zur Erzeugung von äquivalent geteilten Flächen. Als Module können also alle Geometrien verwendet werden, die sich Kante an Kante gefügt restlos überdecken und die dadurch in den Eckpunkten immer die gleiche Anzahl an Vielecken

bilden.<sup>5</sup> Wie zuvor erläutert eignen sich aufgrund der Simulationsmethode ausschließlich triangulierte Raster zur Bildung von Hängemodellen aus gleichen Modulen. Um eine orthogonale Außenkontur mit Dreiecken parkettieren zu können, dient jedoch der rechtwinklige Raster als Grundlage.

2.4.4 Eine weitere Möglichkeit die Umriss des Gitternetzes auf Lagerpositionen und Umfangsänderungen anzupassen, ist die Beschneidung des Netzes entlang der erzeugten Polygonkanten.

Besteht das Mesh aus gleichseitigen Dreiecken, kann eine weitere Teilung der Polygone in rechtwinklige Dreiecke ebenfalls eine orthogonale Außenkante erzeugen. Darüber hinaus wird auf diese Weise die umfangreichste Flexibilität im Bezug auf umzusetzende Schalengrundrisse erreicht.

Zur Herstellung der verschiedenen Polygonnetze wird ein konstruiertes Modul zu einem Mesh, bestehend aus nur einem Polygon, umgewandelt. Dieses Element wird anschließend kopiert und parkettiert, um letztendlich in einem Polygonnetz zusammengefasst zu werden.

## WEAVERBIRD

Vgl.  
<http://www.giulio-piacentino.com/weaverbird/>

Ein weiteres nützliches Tool zur Virtualisierung der Modellsituation ist Weaverbird. Durch dieses Grasshopper Add-On können Polygonnetze erzeugt und genauer definiert werden.

Die eingebetteten Funktionen zur Extraktion von Eckpunkten, Polygonnetzkannten und anderen Mesh-Komponenten, sowie die Möglichkeit, einzelne Flächen zu einem großen Mesh zusammenzuführen, machen Weaverbird zu einem hilfreichen Werkzeug zur umfassenden Parametrisierung der folgenden Simulationen. Eine ebene Fläche, die durch Randkurven gebildet und definiert wird, welche die Aufhängepunkte umrissartig verbinden, kann auf diesem Weg zur Generierung des Gitternetzes dienen. Um ein strukturiertes, reguläres Netz erzeugen zu können, müssen jedoch die Lagerpunkte als maßgebliche Größe eine derartige Parkettierung zulassen.

Die Lagerpunkte sind also so zu positionieren, dass sie in einem regulären, strukturierten Gitternetz an einem Eckpunkt liegen. Dies ist machbar durch die Vorbestimmung des Rasters mit wenigen Hauptpunkten und die anschließende Ergänzung von weiteren Punkten, die dem Raster entsprechen. Das Mesh kann dann um die notwendigen Polygone erweitert oder reduziert werden. Die Hängepunkte unterliegen also während der Gitternetzerzeugung den Randbedingungen einer platonischen Parkettierung. In der finalen Version der Formfindungsmethode können die Lagerpunkte jedoch während der Simulation frei verschoben werden, ohne dadurch die einheitliche Parkettierung zu verändern.

Letztendlich kann durch Weaverbird ein auf die beschriebene Weise erzeugtes Gitternetz vor der Hängesimulation, im Bezug auf Feldgröße und Anzahl, parametrisch adaptiert werden. Die bestehende Parkettierung wird hierbei wiederholt, halbiert oder gröber aufgelöst und entspricht deshalb nach wie vor den gestellten Anforderungen.

Die durch Weaverbird parametrisierten Polygonnetzoperationen erlauben in der Prozesskette also eine umfassende, adaptive Generierung der Grundlage für jede weitere Simulation.

Da Kangaroo zur Formfindung immer eine Ausgangsgeometrie, also jene Punkte und Linien die zu einem Gitternetz verknüpft werden, benötigt und diese notwendigen Komponenten in einem Polygonnetz verpackt werden können, bilden diese die ideale Basis. Folglich werden im nächsten Schritt editierbare Grasshopper-Scripts erstellt durch die, mit Hilfe von Weaverbirdfunk-

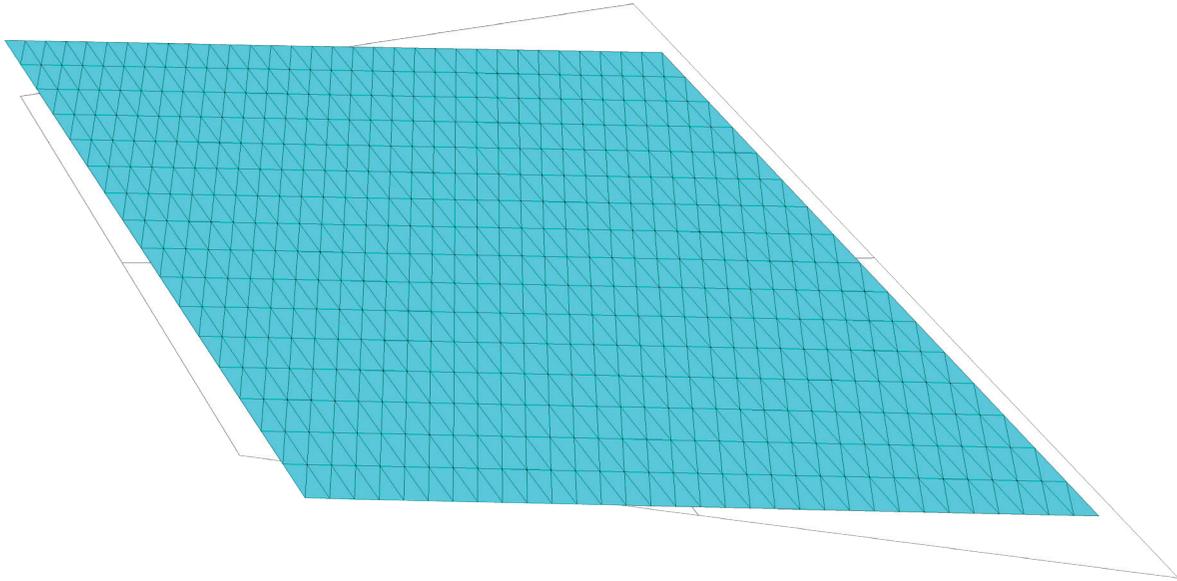
---

Zur simplen Herstellung der für die Hängesimulation notwendigen Gitternetze aus identen Dreiecken wurde ein weiteres Script erstellt, das ebene Flächen in regelmäßige, strukturierte Polygonnetze umwandelt.

2.5.3 Die Umwandlung bedingt eine Veränderung des Umrisses der Ausgangsfläche, wenn diese nicht den Bildungsregeln für die gewünschten Meshes entspricht.

---

2.5.3



tionen, alle verwertbaren Dreiecksparkettierungen effizient hergestellt und je nach gewünschter Schalen geometrie angepasst werden können. Da aufgrund der erläuterten Bildungsregeln verschiedene Parkettierungen für einige Schalenumrisse möglich sind, können somit schnell alle möglichen Varianten in eine Hängesimulation übernommen werden.

Nach der Generierung eines passenden Meshes müssen nur noch Flächen entfernt werden, die nicht dem gewünschten Umriss entsprechen, sich also außerhalb des zu erzeugenden Schalengrundrisses befinden.

Zusätzlich wurde ein Script aus Weaverbird und Kangaroo-Physics Komponenten erstellt, das aus einer unregelmäßigen, ebenen Fläche ein regelmäßiges, trianguliertes Polygonnetz erzeugt. Hierzu kann in Rhinoceros eine ebene Brep-Fläche gezeichnet werden, an deren Eckpunkte die späteren Lagerpunkte liegen. Anschließend wird die Fläche in ein unregelmäßig trianguliertes Mesh umgewandelt. Die Seitenlängen der Dreiecke werden danach so lange angeglichen, bis sie der Durchschnittslänge der anfänglich ungleichen Ausgangskanten entsprechen.

Die Art der entstehenden homogenen Dreiecksparkettierung hängt ebenfalls von der Angleichung ab und kann nicht beeinflusst werden. Jedoch zeigten Versuche, dass die unregelmäßige Ausgangsparkettierung Einfluss auf das Ergebnis nimmt. Bei der Nutzung des Scripts kann diese durch Verdrehen der Brep-Fläche im Raum geändert werden.

Durch die Generierung des regelmäßigen, strukturierten Meshes erfolgt zwar, je nach Komplexität der Geometrie, eine mehr oder weniger starke Umrissänderung, diese kann jedoch in der späteren Hängesimulation durch Repositionierung der Auflagerpunkte wieder kompensiert werden. Grundsätzlich versucht das Tool die Längengleichung bei geringst möglicher Positionsänderung der Schnittpunkte zu bewerkstelligen.

Weaverbird wird also zur Erzeugung der Simulationsgrundlage, den Polygonnetzen, genutzt und dient weiters zur Extraktion der Polygonkanten und Eckpunkte die in Kangaroo-Physics als Linien und Punkte zur Hängesimulation benötigt werden.

2.5.1 Eine unregelmäßige, ebene Fläche definiert durch Randkurven, die die Lagerpunkte verbinden, dient als Grundlage zur Erzeugung des Gitternetzes.

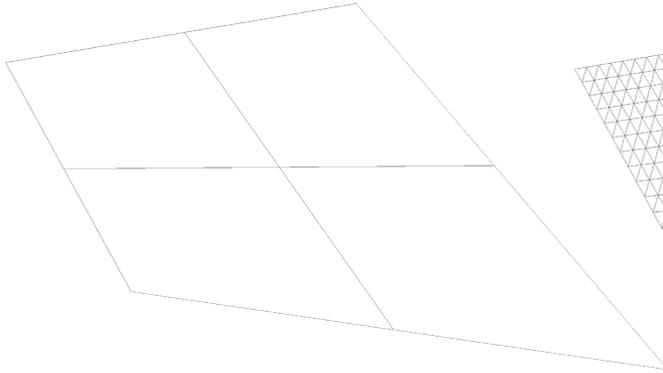
2.5.2 Die Brep-Fläche wird in ein unregelmäßiges Polygonnetz umgewandelt.

2.5.3 Das Script gleicht die zuvor verschiedenen Seitenlängen an, der erzeugte Dreieckstyp ist nicht steuerbar.

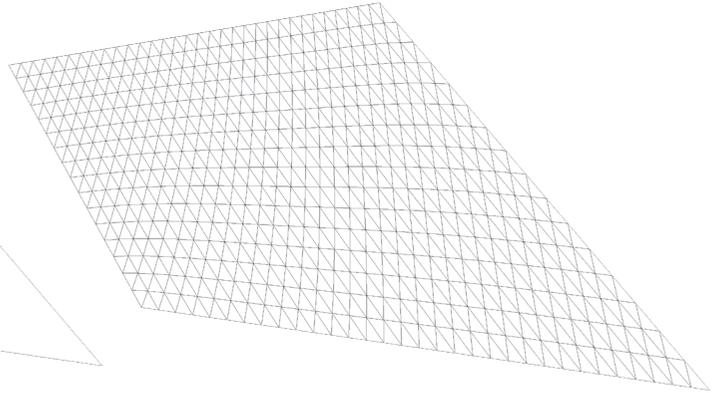
Durch die Angleichung ändert sich der Grundriss und somit auch die Lagerpunktpositionen.

2.5.4, 2.5.5 Während der Hängesimulation können die Hängepunkte wieder an die ursprüngliche Stelle gesetzt werden.

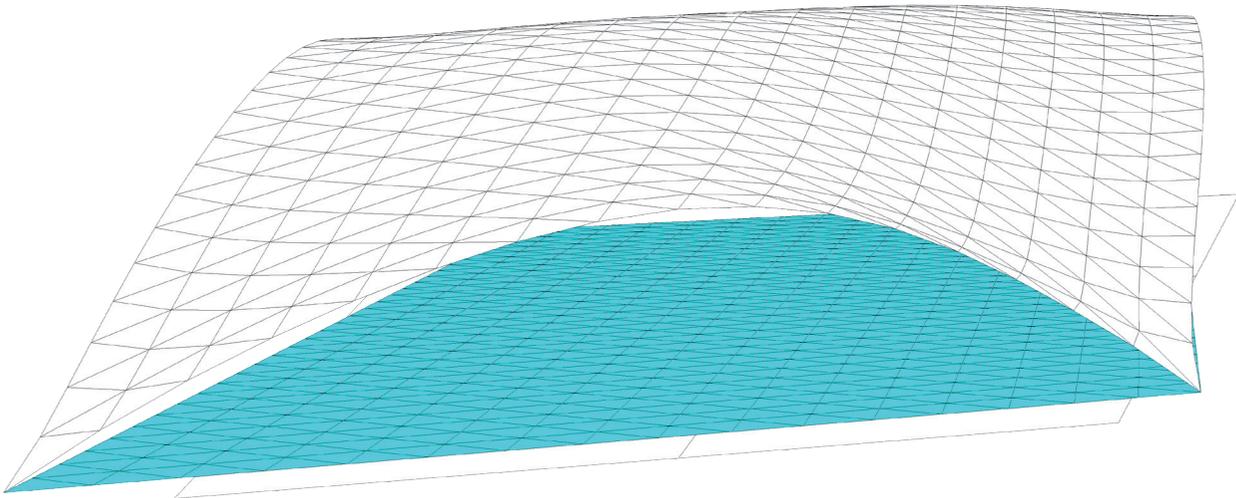
2.5.1



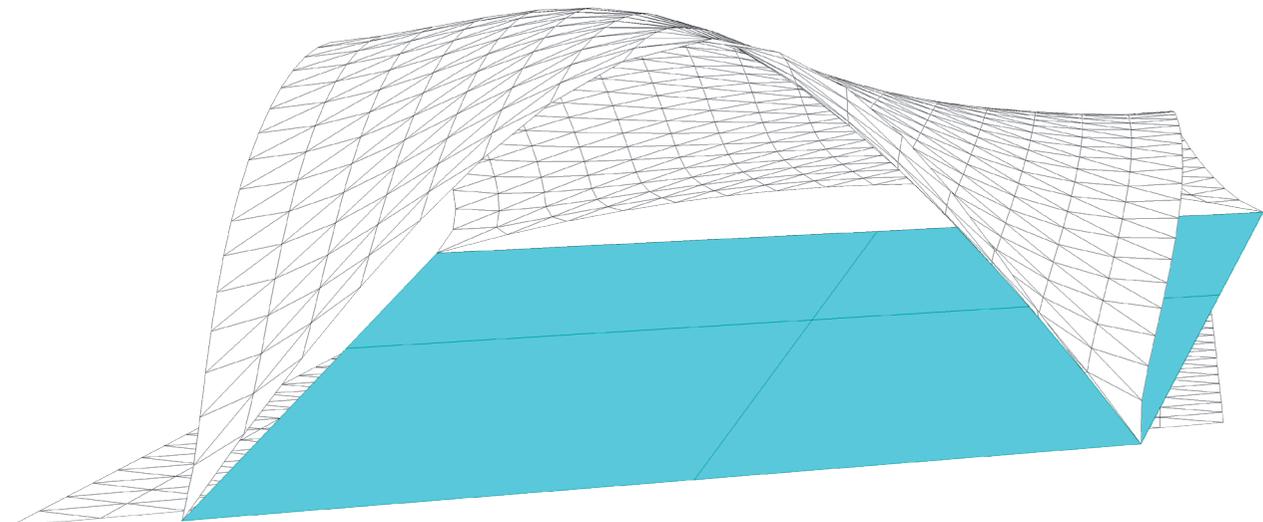
2.5.2

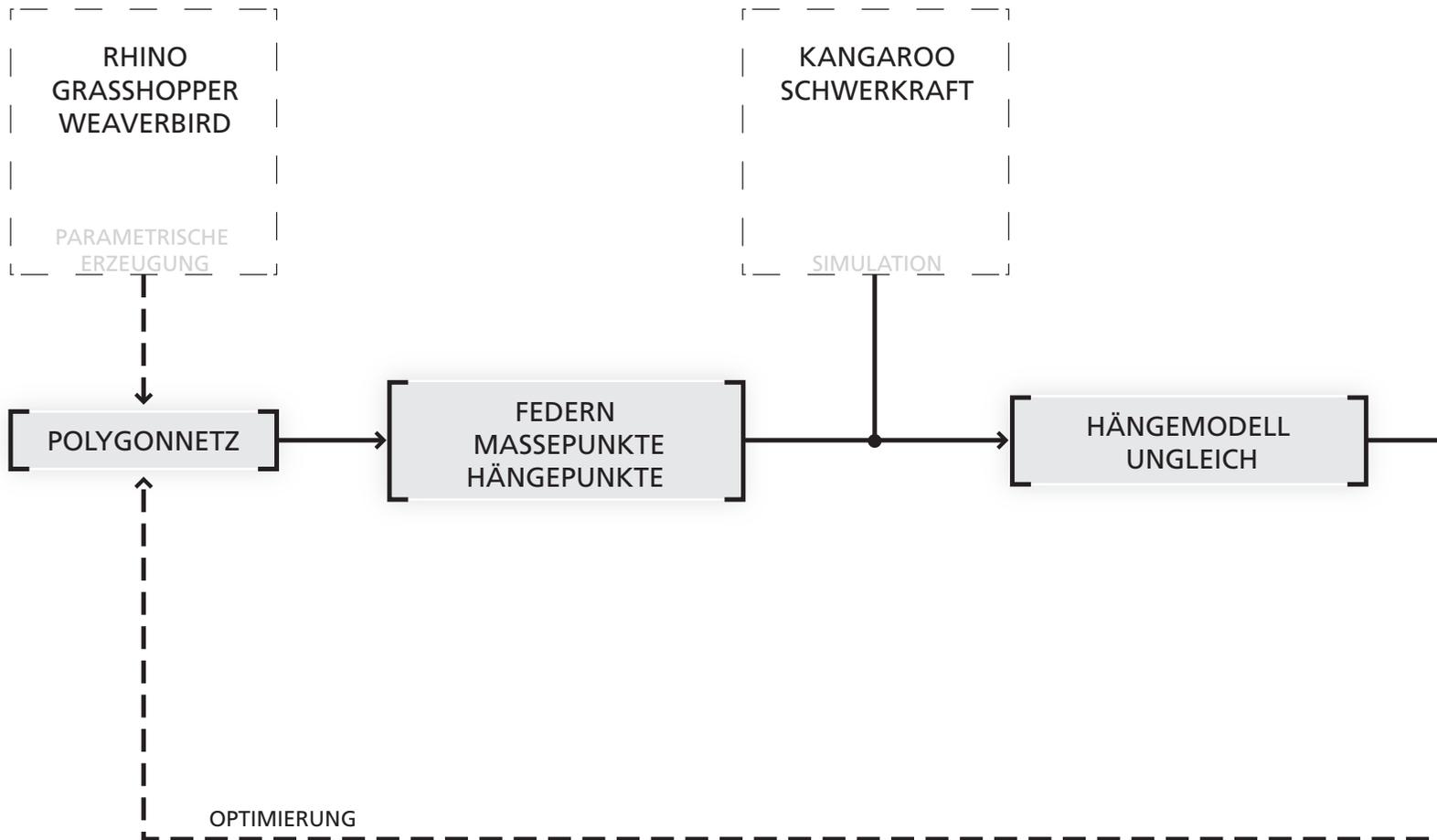


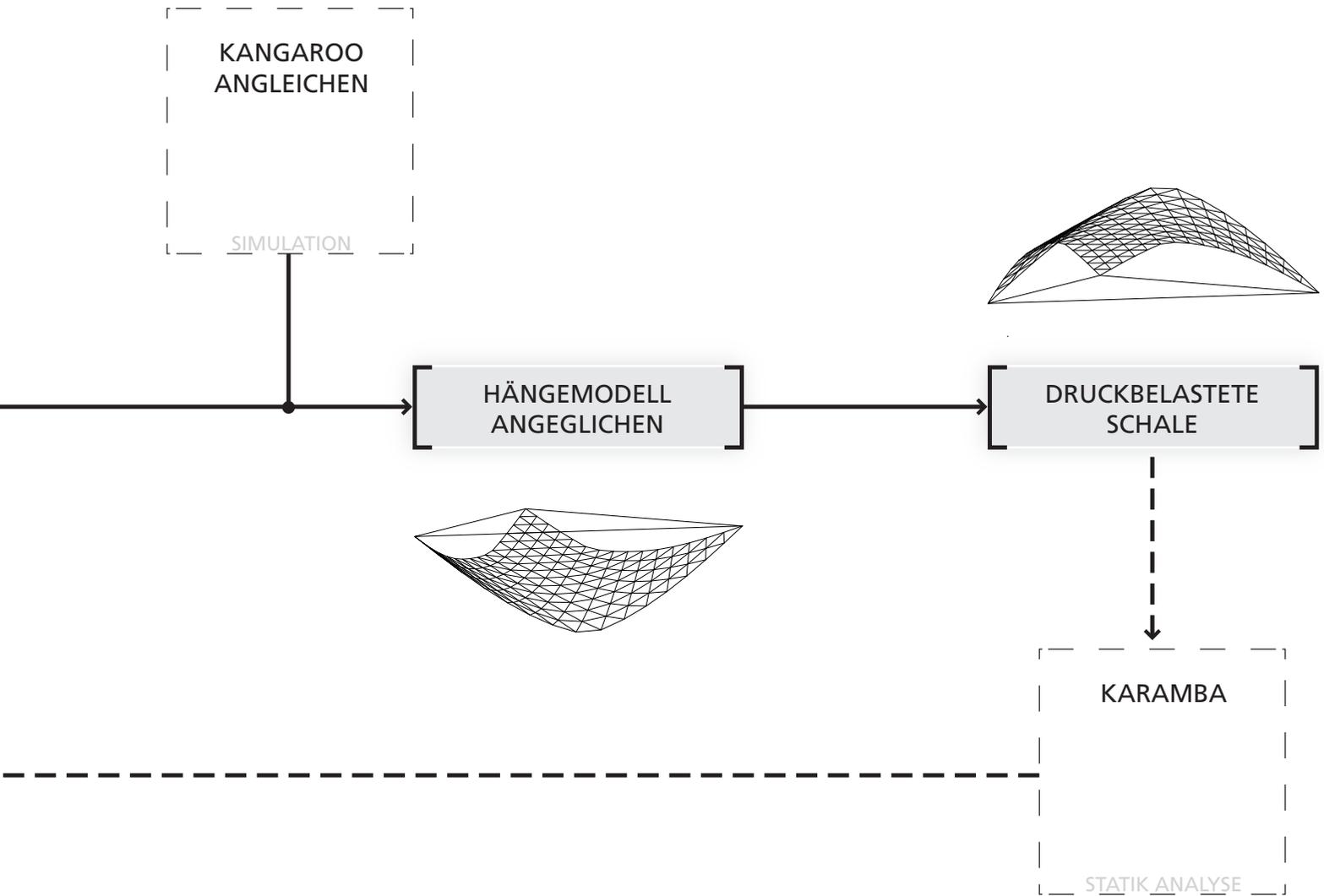
2.5.4



2.5.5







---

## ANGLEICHEN DER SEITENLÄNGEN

*Siehe Kangaroo Physics,  
Seite 27.*

Wird nun ein ebenes, regulär strukturiertes Gitternetz in Kangaroo-Physics editiert, ändern sich zwangsläufig die zuvor identen Seitenkanten der Einzeldreiecke, egal ob die Einwirkung auf das Mesh durch eine Kraft erzeugt wird oder eine einfache Neupositionierung der verknüpften Lagerpunkte erfolgt. Durch die zu Grunde liegende Berechnungsmethode bewirkt eine simple Bewegung eines einzelnen Partikels eine Reaktion des ganzen Systems. Wie zuvor erläutert, ist die Struktur während der laufenden Situation wie ein Stabmodell aus geraden elastischen Stäben zu betrachten und somit die Einflussnahme der Stabeigenschaften auf die Wechselbeziehungen plausibel. Der Wirkungsgrad dieser Federn ist hauptsächlich über ihre Steifigkeit, eine abgrenzbare wirksame Länge und die sogenannte Restlänge definiert. Als Restlänge wird in Kangaroo-Physics jene Länge bezeichnet, die eine Feder bei Belastung zu erreichen «versucht». In den folgenden Simulationen entsprechen diese Werte immer den Längen der ebenen Polygonnetzseiten, die der Berechnung zu Grunde liegen, um die Federverformung so gering wie möglich zu halten.

Wird zusätzlich die maximal mögliche Steifigkeit gewählt, ist bereits nur mehr eine geringe Abweichung der Kantenlängen festzustellen, die Elemente können dadurch aber noch nicht als gleichwertig angesehen werden. Festzuhalten ist an dieser Stelle auch, dass diese editierbaren Werte als Gewichtungen im Vergleich zu den einwirkenden Kräften zu sehen sind und nicht als charakteristische Werte eines Federmaterials. Im weiteren Verlauf der Entwicklung wird klar, dass auf diese Weise die Einflussnahme der einzelnen Komponenten auf die erzeugte Geometrie geregelt werden kann.

Um zum Beispiel das editierte Netz durch die Funktion „Equalizen“ wieder in gleiche Teile zurückzuführen muss die zuvor hohe Steifigkeit der Federn reduziert werden, da sie ansonsten die exakte Angleichung der Elemente verhindern. Es stehen also mehrere Einflüsse in ständiger Wechselwirkung, weshalb einige Grundkomponenten auch nicht aus der Berechnung ausgeschlossen werden können. Die Angleichung der veränderten Federlängen gelingt also mit einer minimalen Federsteifigkeit und bewirkt, waren gleichseitige Dreiecke die Basiselemente, eine Annäherung der Seitenlängen um den Mittelwert aller nach der Simulation vorhandenen Längen.

Ein frei verformtes Polygonnetz aus identen gleichseitigen Dreiecken kann in Kangaroo folglich durch die Eingabe einer hohen Federsteifigkeit während der Verformung und die anschließende Angleichung der Seitenlängen bei geringer Steifigkeit erstellt werden. Die entstehenden Meshes besitzen an Stellen, an denen die Kantenlängen signifikant vergrößert werden müssen, Auffaltungen, die aufgrund einer fehlenden richtungsgebenden Komponente auf der Ober- oder Unterseite der Fläche entstehen können. Ausschlaggebend hierfür ist die möglichst kleinste Positionsänderung der einzelnen Punkte während der Angleichung. Sollen aber virtuelle Hängemodelle simuliert werden, muss der Berechnung ohnehin eine solche richtungsgebende Größe, eine Gravitationskraft, hinzugefügt werden.

Abb. 2.6.2

Durch diese weitere Variable, kann ein Hängemodell erzeugt werden, das in Bezug auf Form, Gleichmäßigkeit und Dimension im Mittelmaß liegt. Je nach der definierten Stärke des Angleichens, der Gewichtskraft und Federsteifigkeit ändert sich das Ergebnis in die am stärksten gewichtete Eigenschaft. Sind alle Faktoren gleichmäßig gesetzt entsteht eine endlose Vergrößerung der Struktur, da auf diese Weise nie ein Ziel erreicht werden kann. Die Gravitationskraft beeinflusst die Federlänge, die äquivalent werden soll, die Federlänge wiederum die Ausdehnung der Feder, die unter der Gewichtskraft erzeugt wird. Somit ist mit einer einzelnen Kangaroo Instanz kein zufriedenstellendes Ergebnis zu erreichen, jedoch ist es möglich in einem Skript zwei oder

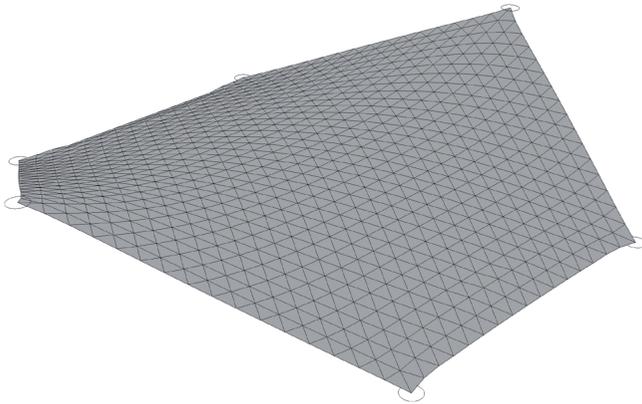
---

2.6.1 Polygonnetz aus gleichseitigen Dreiecken, durch Abheben zweier Eckpunkte frei verformt. Die Einzelpolygone werden durch die Verformung geringfügig verzerrt, die Struktur ist nicht mehr homogen.

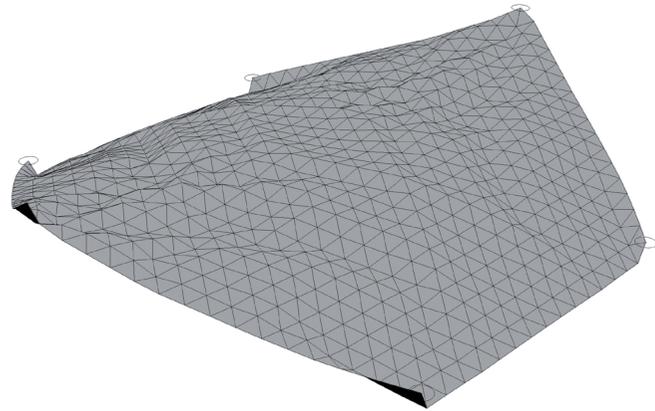
2.6.2 Die verformte Struktur nach dem Angleichen der Seitenlängen. Da keine richtungsgebende Komponente, wie zum Beispiel eine Gravitationskraft, vorhanden ist, falten sich die Elemente in unterschiedliche Richtungen auf. Ausschlaggebend hierfür ist die Neupositionierung bei geringst möglicher Abweichung von der Ausgangsstruktur.

---

2.6.1



2.6.2



mehr Berechnungen nacheinander zu schalten.

Die finale Version des Entwurfstools beinhaltet zunächst die Formfindungsfunktion, mit der ein entsprechendes Gitternetz in die gewünschte Schalenform gebracht werden kann. Die zur Simulation notwendigen Linien und Punkte werden dazu mit Weaverbird aus einem Polygonnetz extrahiert, das schon vor der Simulation aus gleichen Polygonen bestehen sollte. Die editierbaren Parameter sind hierbei Federsteifigkeit, einwirkende Kraft und Lagerpositionen.

Entspricht die Geometrie den geforderten Bedingungen, wird anschließend in einer zweiten Instanz von Kangaroo Physics die Längenangleichung ausgeführt. Während dieser Berechnung erfolgt eine leichte Abweichung der Struktur von der zuvor ermittelten Schalenform, welche aber keine signifikanten Auswirkungen auf die grundlegende Wirksamkeit des statischen Systems hat. Diese geringe Abweichung kann nur durch die homogene Ausgangsparkettierung und eine leichte Skalierung (Faktor ca. 0,95) der Lagerpunkte während der Simulation in Richtung Zentrum erreicht werden. Durch diese Skalierung kann sich die Gesamtstruktur verformen, ohne dabei zu einer großen Federlängenänderung gezwungen zu werden. Über die Eingabe einer Restlänge kann, bei gleichseitigen dreieckigen Polygonen, die Annäherung der Seitenlängen um den gewünschten Wert erreicht werden.

Besitzen die Parkettierungselemente drei verschiedene Seitenlängen, wird jeder dieser drei Abstände separat und in Zusammenhang mit den anderen analogen Polygonkanten im Gesamtsystem angeglichen. Die finale Seitenlänge ergibt sich somit aus der durch die Dehnung veränderten Durchschnittslänge aller gleichrangigen Kanten. Mit Hilfe des nun verfügbaren parametrisierten Werkzeugs können die festgelegten Gitternetz Typen simuliert werden. Darüber hinaus kann die Element Anzahl editiert und die Position und Anzahl der Hängepunkte verändert werden. Das Ergebnis wird dabei ständig in Echtzeit grafisch und in Datensätzen dargestellt. Am Ende einer Simulation entsteht immer eine Geometrie aus identen Elementen, die als Polygonnetz ausgegeben wird und alle zur Weiterverarbeitung notwendigen Informationen enthält.



---

## BEISPIELE FÜR VIRTUELLE HÄNGEMODELLE

Die folgenden Beispiele bilden die möglichen homogenen Parkettierungen ab und zeigen damit umsetzbare Umrisse. Als allgemeine Vergleichsgeometrie wird immer eine rechteckige Grundfläche simuliert, wobei bei manchen Varianten kein geradliniger Abschluss in zwei Richtungen möglich ist oder eine Raute, als dem Rechteck ähnlichste erzeugbare Form, analysiert werden muss. Weiters ist pro Gitternetzvariante eine, nur durch die jeweilige Parkettierung umsetzbare komplexe Grundrissvariante simuliert. Diese Beispiele zeigen nicht nur ideale Ergebnisse, sondern zur besseren Visualisierung, auch Unregelmäßigkeiten. Grundlage für eine Bewertung der erzeugten Geometrien kann an dieser Stelle nur das Ausmaß der Abweichung von der theoretisch idealen Hängeform nach Angleichung der Seitenlängen sein.

Die Dimensionen der Beispiele sind skalierbar und deshalb abstrakt zu sehen, es kann jedoch von einer Einzelementseitenlänge von 70 cm - 250 cm ausgegangen werden. Die gebildeten Schalen hätten also eine Spannweite von 12 - 35 Metern. Um direkt Schalengeometrien zu erhalten wirkt die Gravitationskraft in den Beispielen in Richtung Z+, also nach oben.

**Auf den linken Seiten wird die Extraktion eines komplexeren Grundrisses aus der jeweiligen Polygonnetzvariante und eine daraus erzeugbare Schalengeometrie gezeigt.**

**Auf den rechten Seiten wird versucht mit derselben Parkettierung eine Schale mit rechteckigem Grundriss zu erzeugen, um dann die verschiedenen Parkettierungen untereinander vergleichen zu können.**

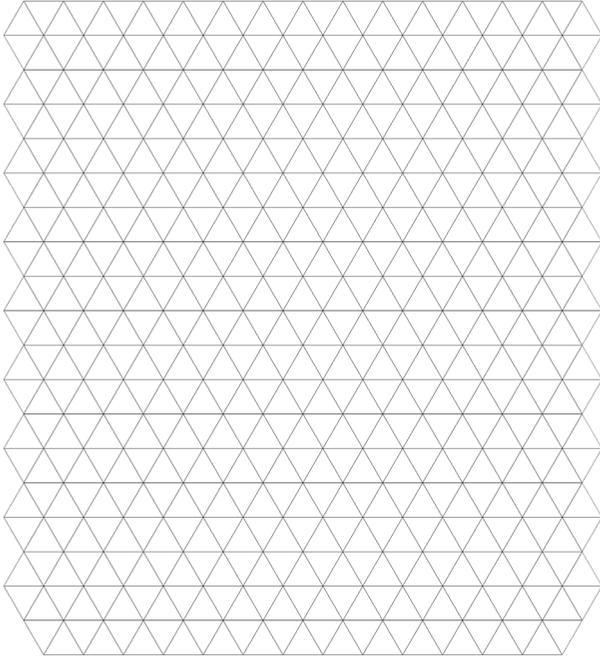
Bildungsregeln für eine ideale Parkettierungs- und Lagerpunktwahl sind anschließend unter Einflüsse der Parkettierung und Einflüsse der Lagerpunkte definiert.

---

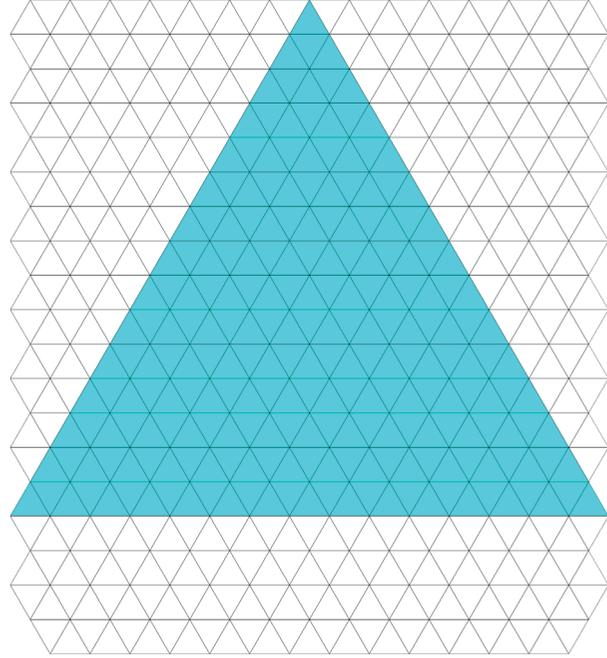
**Beispiel für eine Parkettierung aus gleichseitige Dreiecken.** Ein geradliniger Abschluss des Grundrisses ist orthogonal in nur einer Richtung möglich.  
Erzeugbare Umrisse sind das Sechseck, Dreieck oder Abschnitte davon.  
Die gesamte Struktur kann in drei Richtungen knicken, um sich der idealen Schale anzupassen.  
Ideale Lagerpunktanzahl: 3, 6  
2.6.3 Parametrisch erzeugtes, regelmäßiges, strukturiertes Polygonnetz aus gleichseitigen Dreiecken.

---

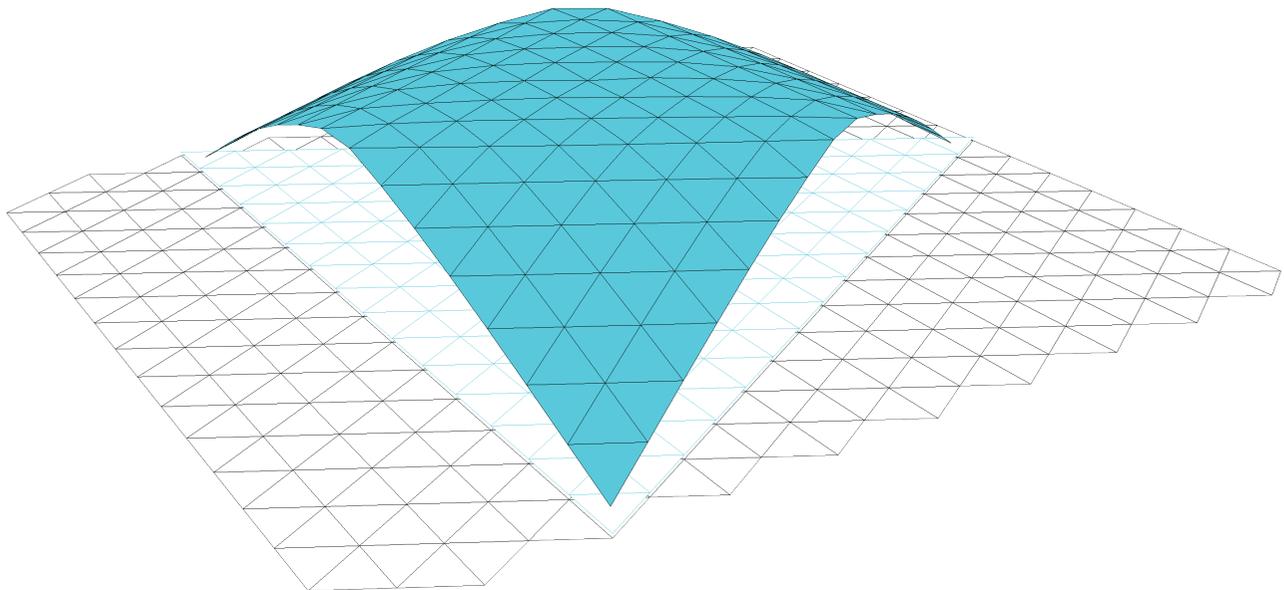
2.6.3



2.6.4

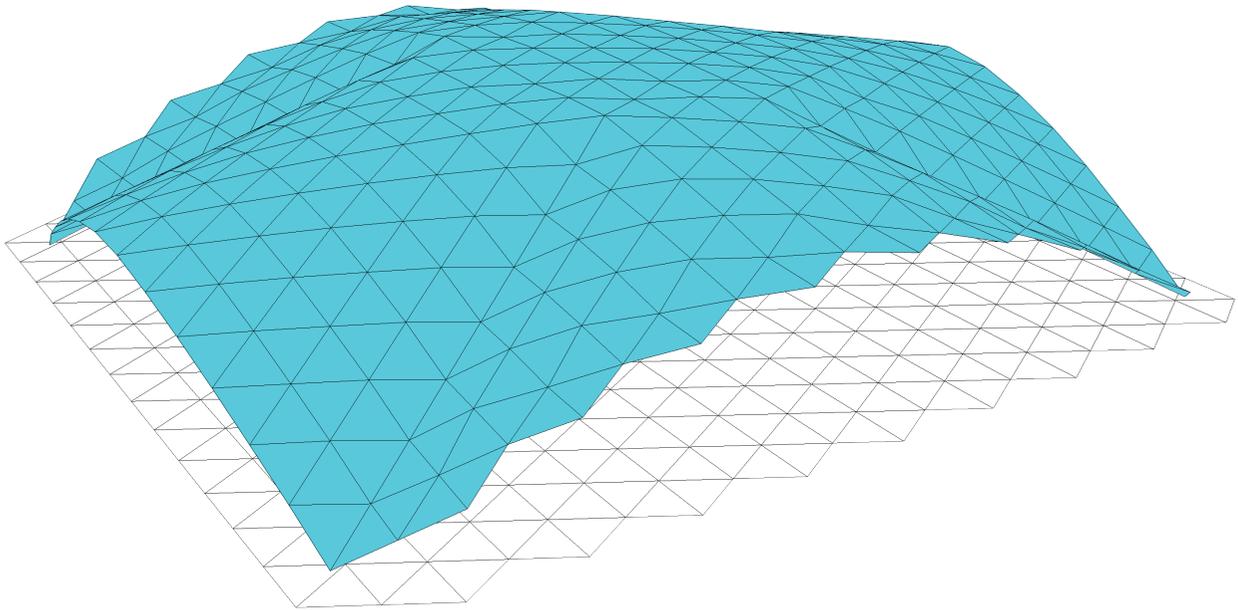


2.6.5

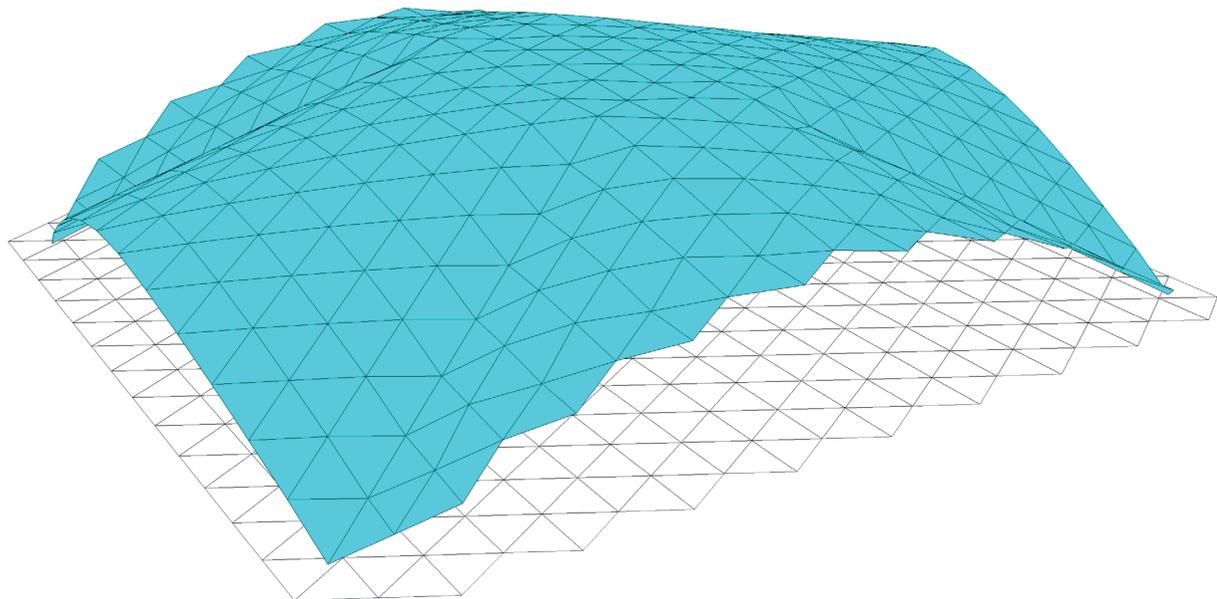


- 
- 2.6.4 Ein Dreiecksriss kann aus dem Gesamtnetz extrahiert werden, überschüssige Polygone werden gelöscht.  
2.6.5 Angegliches Hängemodell einer Schale mit dreieckigem Grundriss. Im Zuge der Simulation wurden die Hängepunkte um ca. 5% in Richtung Zentrum verschoben.  
2.6.6 **Vergleichsgeometrie**; das Gitternetz wird zunächst mit einer Gravitationskraft belastet, diese bewirkt die Verformung der ursprünglich gleichen Einzelstäbe und die Erzeugung eines virtuellen Hängemodells.  
2.6.7 Die Seitenlängen werden angeglichen, die Abweichung von der Idealgeometrie ist bei dieser Parkettierung minimal.
- 

2.6.6

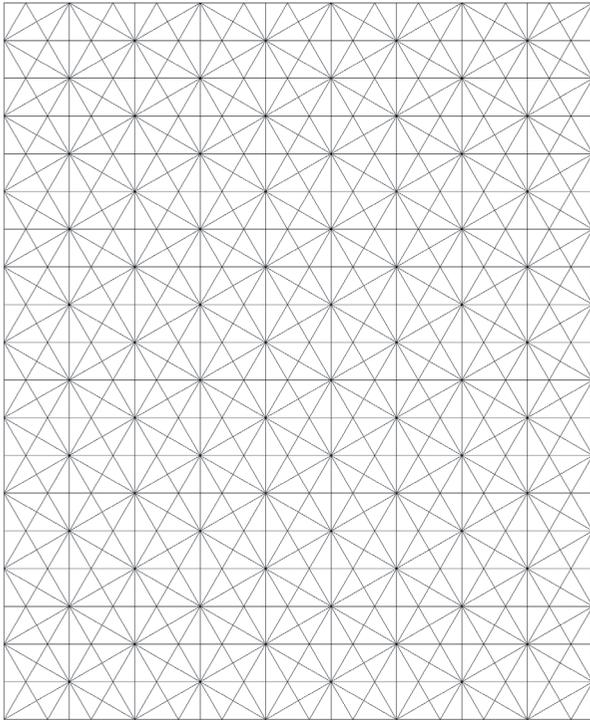


2.6.7

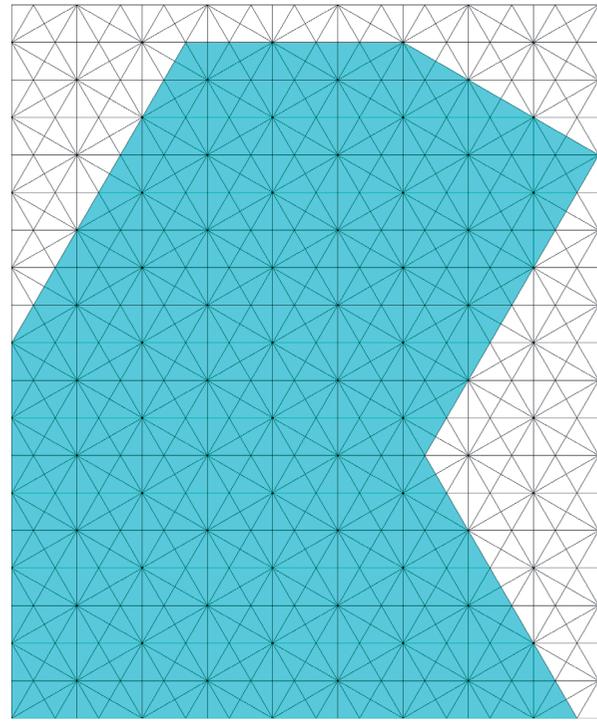


**Parkettierung aus nochmals geteilten gleichseitigen Dreiecken.** Von jedem Punkt, in dem sich sechs Polygone treffen, wurde eine Normale auf die gegenüberliegende Seitenkante gezogen. Ein geradliniger Abschluss des Grundrisses ist orthogonal in sechs Richtungen möglich. Erzeugbare Umrisse sind das Sechseck, Dreieck, Rechteck, Deltoid, Raute, Rhombus oder Abschnitte davon. Die gesamte Struktur kann in sechs Richtungen knicken, um sich der idealen Hänge-Form anzupassen, ist daher aber auch insgesamt freier und neigt eher zu Auffaltungen. Lagerpunktzahl: 4, 6, 8, 12. Ideal: > 8

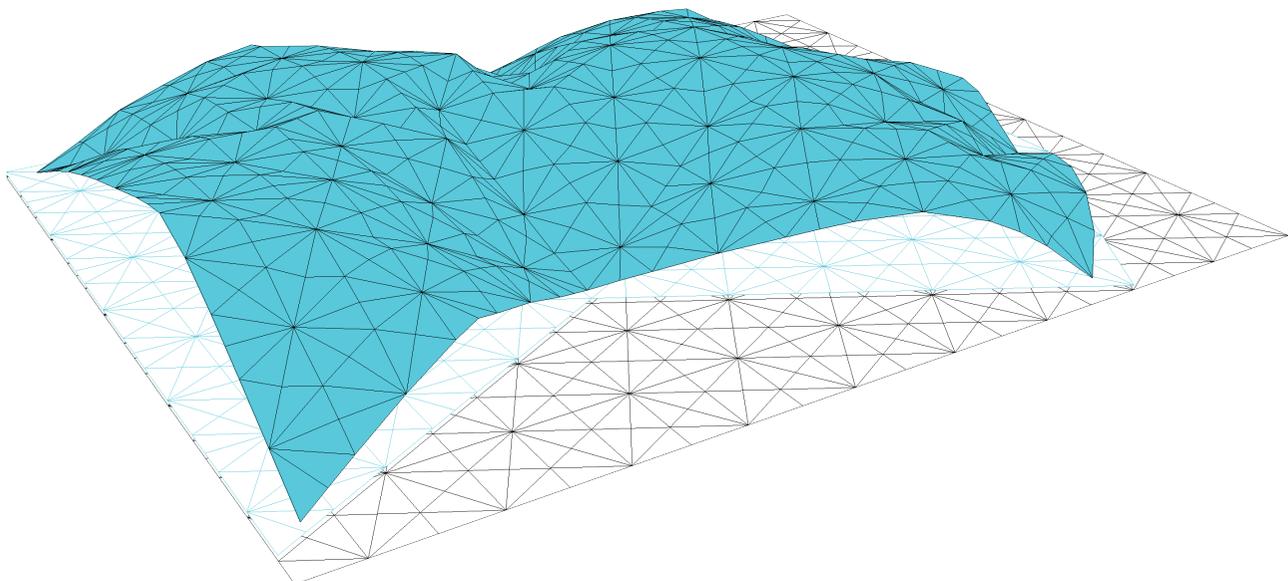
2.6.8



2.6.9



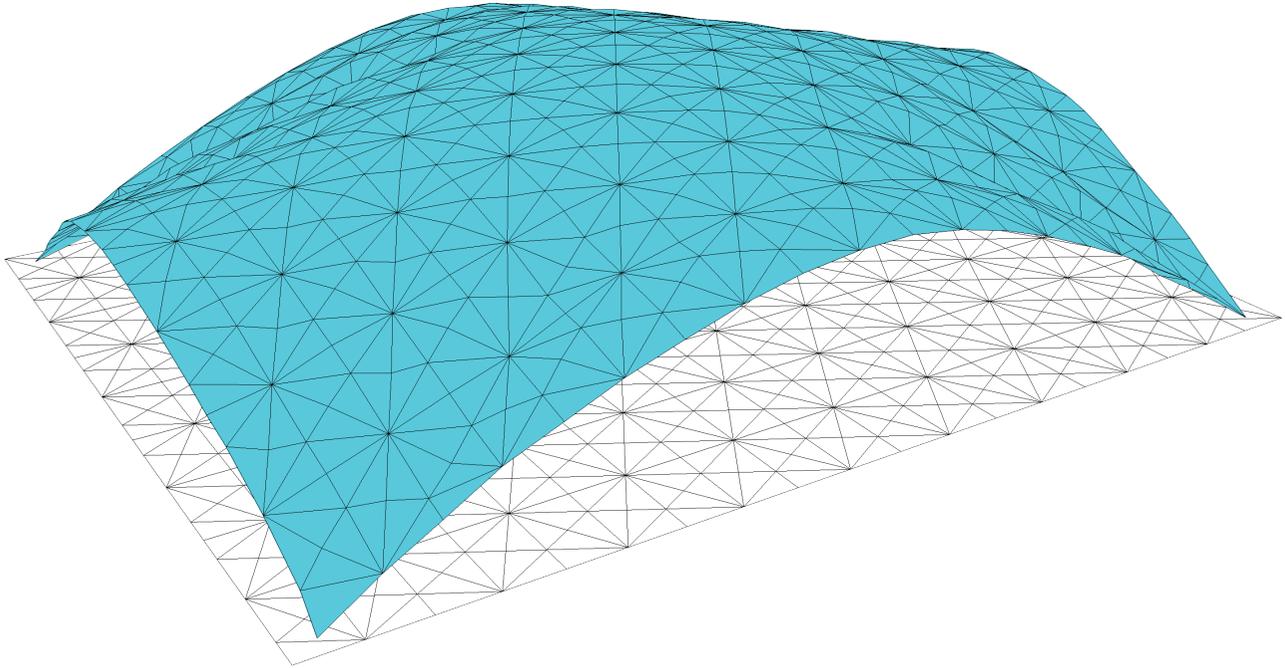
2.6.10



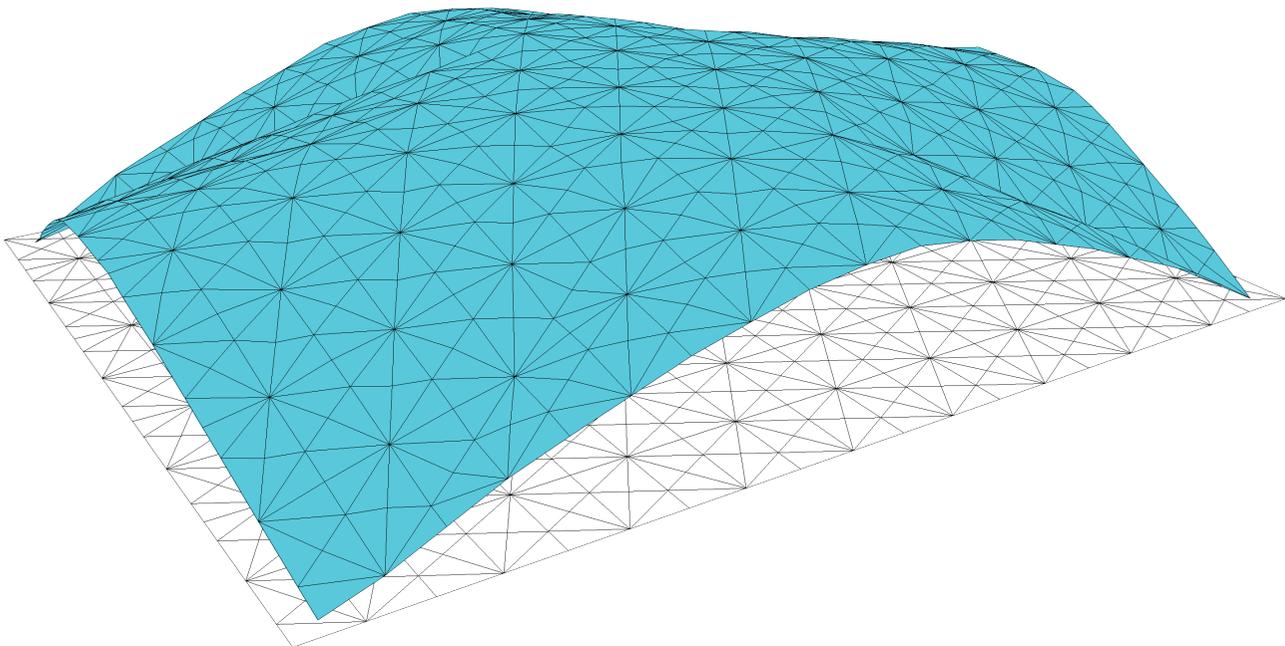
---

2.6.9 Ein Vieleckumriss kann aus dem Gesamtnetz extrahiert werden, überschüssige Polygone werden gelöscht.  
2.6.10 Angeglichenes Hängemodell einer Struktur mit unregelmäßigem Grundriss und vielen Faltungsmöglichkeiten. 2.6.11 **Vergleichsgeometrie**; das Gitternetz wird zunächst mit einer Gravitationskraft belastet, diese bewirkt die Verformung der ursprünglich gleichen Einzelstäbe und die Erzeugung eines virtuellen Hängemodells. Im Zuge der Simulation wurden die Hängepunkte um ca. 5% in Richtung Zentrum verschoben.  
2.6.12 Die Seitenlängen werden angeglichen, es sind vermehrt Auffaltungen zu erkennen.

---



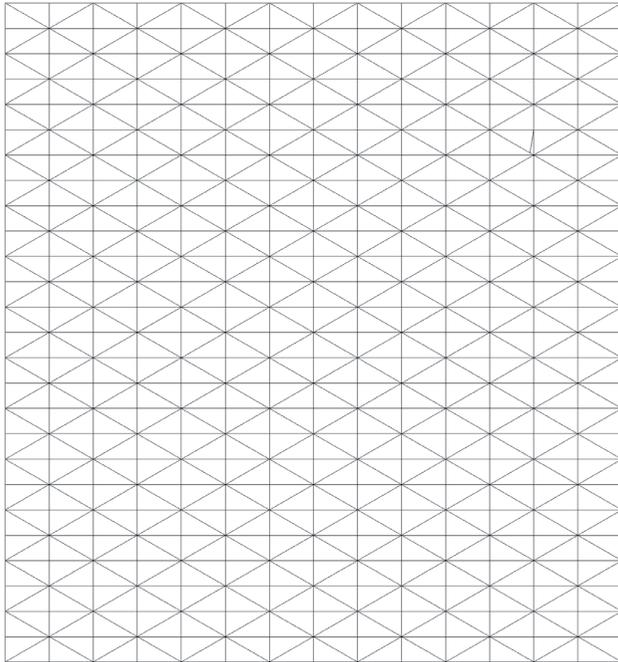
2.6.11



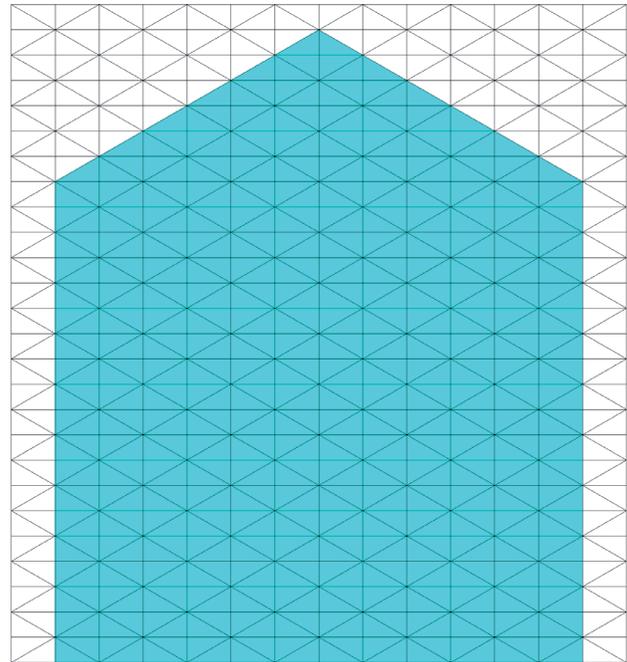
2.6.12

**Parkettierung aus nochmals geteilten gleichseitigen Dreiecken.** Die Eckpunkte der gleichseitigen Dreiecke wurden mit einem orthogonalen Raster überlagert und somit nochmals geteilt. Ein geradliniger Abschluss des Grundrisses ist orthogonal in 2 Richtungen möglich. Erzeugbare Umrisse sind das Sechseck, Dreieck, Rechteck, Raute, Rhombus oder Abschnitte davon. Die gesamte Struktur kann in 4 Richtungen knicken, um sich der idealen Hängeform anzupassen. Lagerpunktzahl: 3, 4, 6, 8 Ideal > 4  
2.6.13 Parametrisch erzeugtes, regelmäßiges, strukturiertes Polygonnetz aus rechtwinkligen Dreiecken.

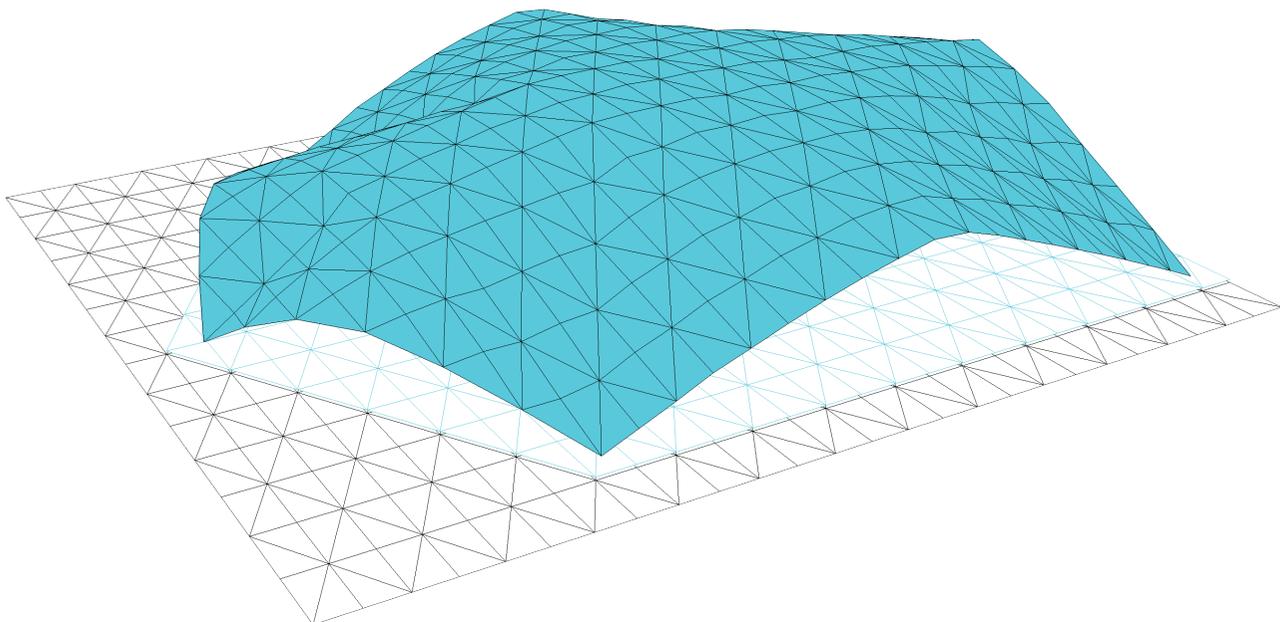
2.6.13



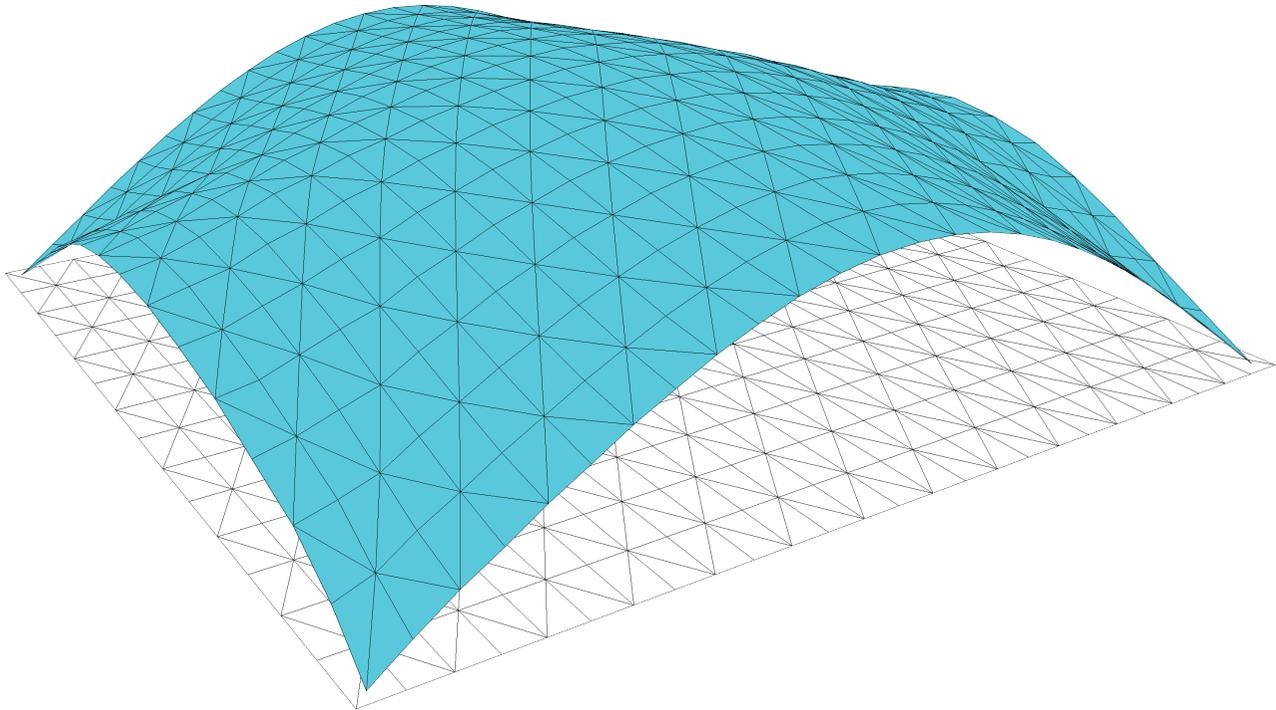
2.6.14



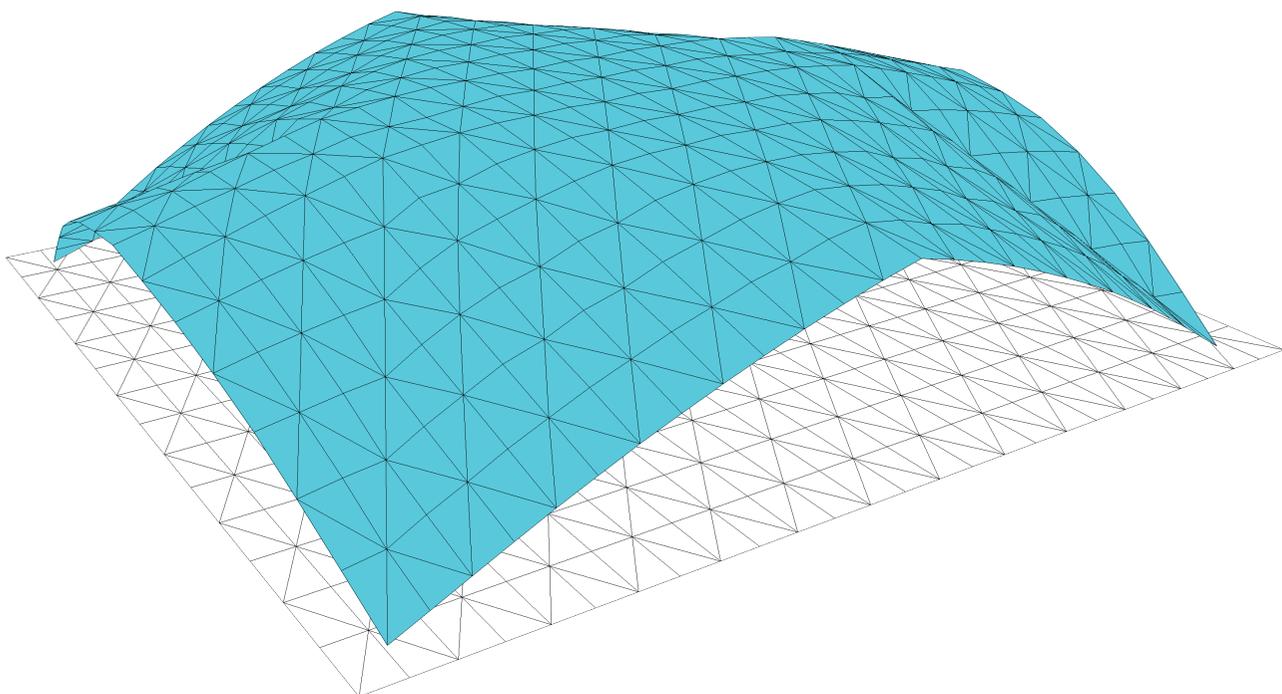
2.6.15



- 
- 2.6.14 Ein Vieleckumriss kann aus dem Gesamtnetz extrahiert werden, überschüssige Polygone werden gelöscht.  
2.6.15 Angeglienes Hängemodell einer Struktur mit fünf Lagerpunkten.  
2.6.16 **Vergleichsgeometrie**; das Gitternetz wird zunächst mit einer Gravitationskraft belastet, diese bewirkt die Verformung der ursprünglich gleichen Einzelstäbe und die Erzeugung eines virtuellen Hängemodells. Im Zuge der Simulation wurden die Hängepunkte um ca. 5% in Richtung Zentrum verschoben.  
2.6.17 Die Seitenlängen werden angeglichen, die Abweichungen von der Idealgeometrie sind deutlich erkennbar.
- 



2.6.16



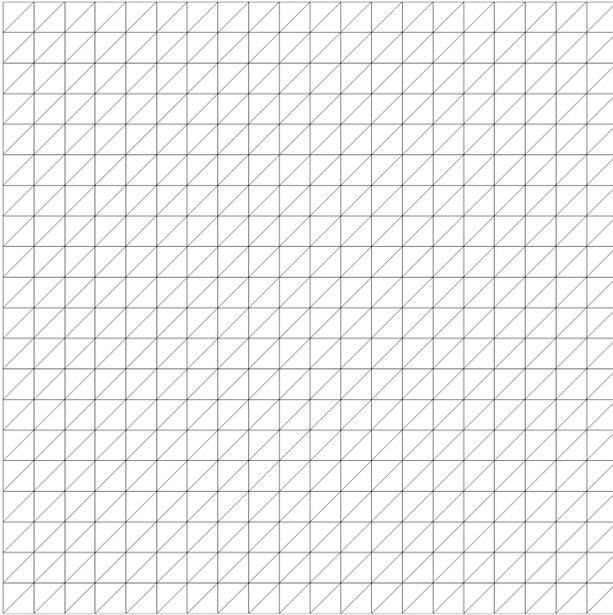
2.6.17

---

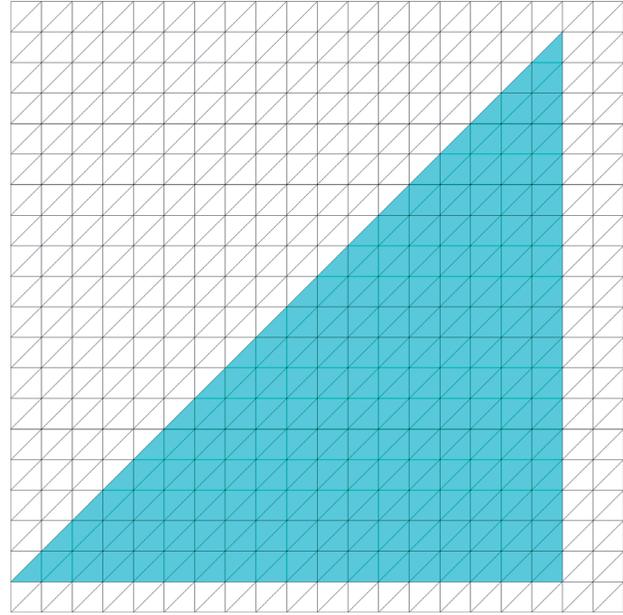
**Parkettierung aus einem einfach diagonal geteilten, rechteckigen Raster.** Ein geradliniger Abschluss des Grundrisses ist orthogonal in 2 Richtungen möglich.  
Erzeugbare Umriss sind das Dreieck, Rechteck oder Abschnitte davon. Die gesamte Struktur kann in 3 Richtungen knicken, um sich der idealen Hängeform anzupassen.  
Ideale Lagerpunktanzahl: 3, 4, 6  
2.6.18 Parametrisch erzeugtes, regelmäßiges, strukturiertes Polygonnetz aus rechtwinkligen Dreiecken.

---

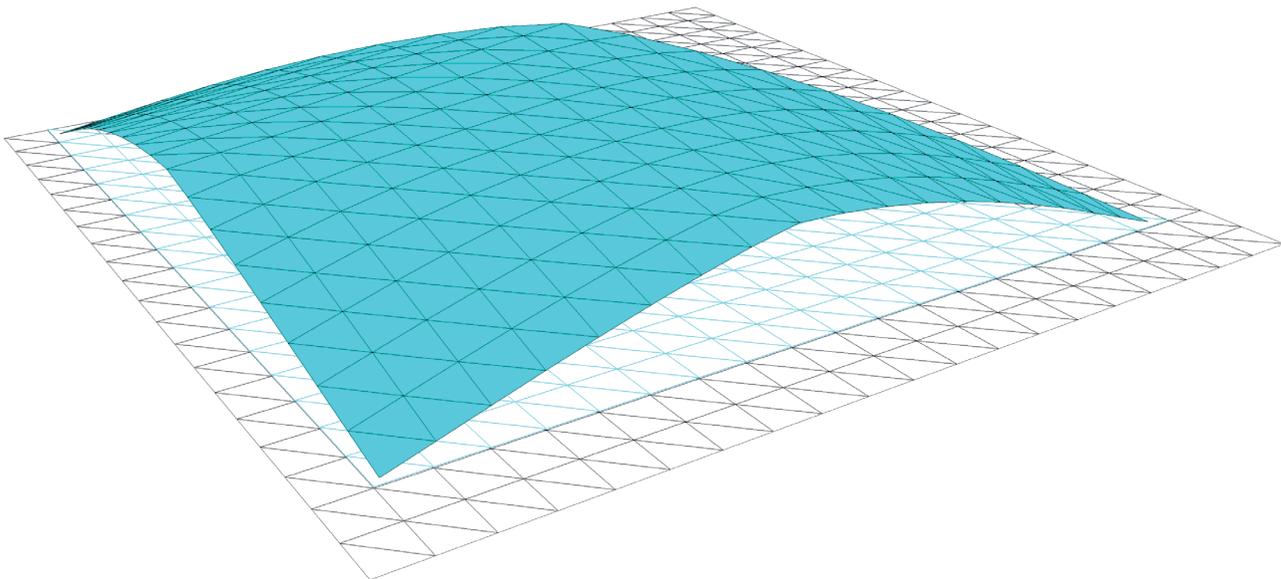
2.6.18



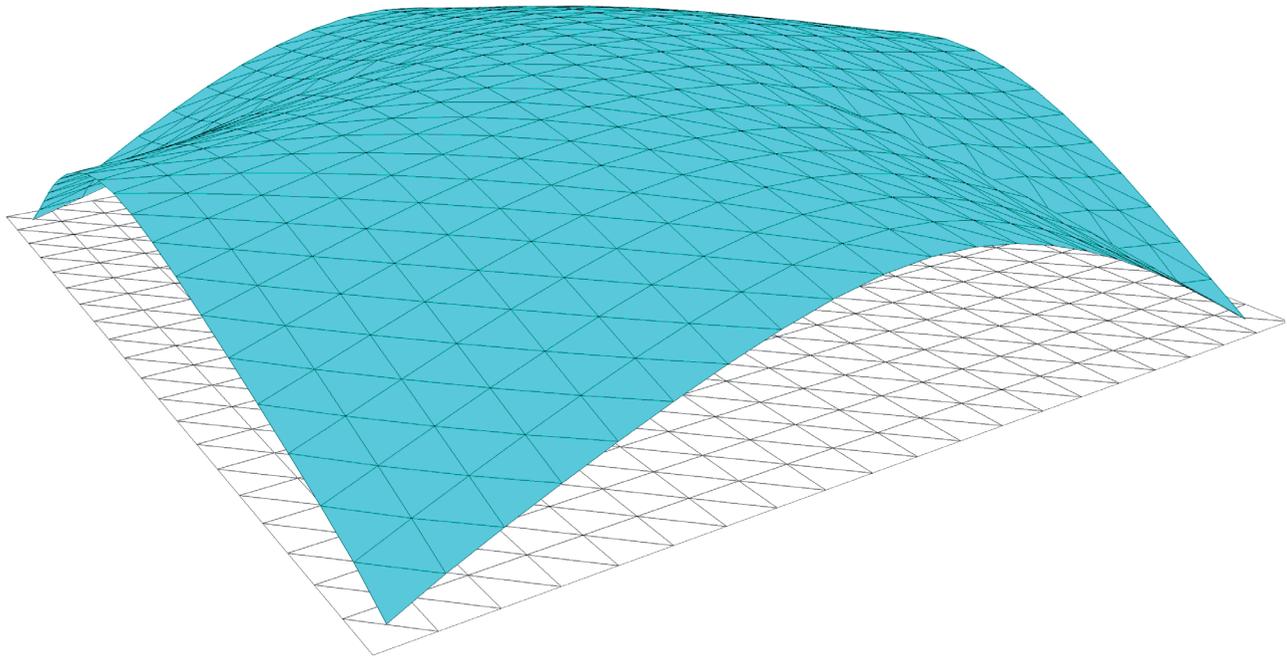
2.6.19



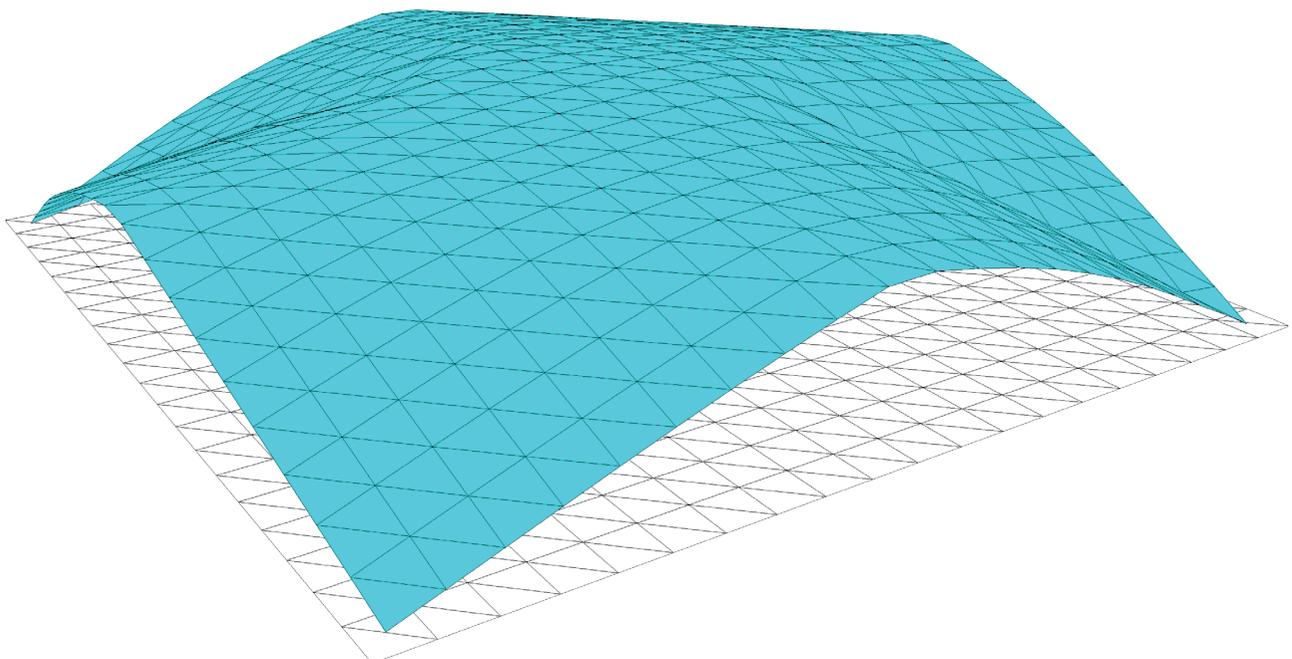
2.6.20



- 
- 2.6.19 Ein dreieckiger Grundriss kann aus dem Gesamtnetz extrahiert werden, überschüssige Polygone werden gelöscht.  
2.6.20 Angeglichenes Hängemodell zur Herstellung einer Schale mit dreieckigem Grundriss.  
2.6.21 **Vergleichsgeometrie**; das Gitternetz wird zunächst mit einer Gravitationskraft belastet, diese bewirkt die Verformung der ursprünglich gleichen Einzelstäbe und die Erzeugung eines virtuellen Hängemodells. Im Zuge der Simulation wurden die Hängepunkte um ca. 5% in Richtung Zentrum verschoben.  
2.6.22 Die Seitenlängen werden angeglichen, die Abweichungen von der Idealgeometrie sind gering.
- 



2.6.21



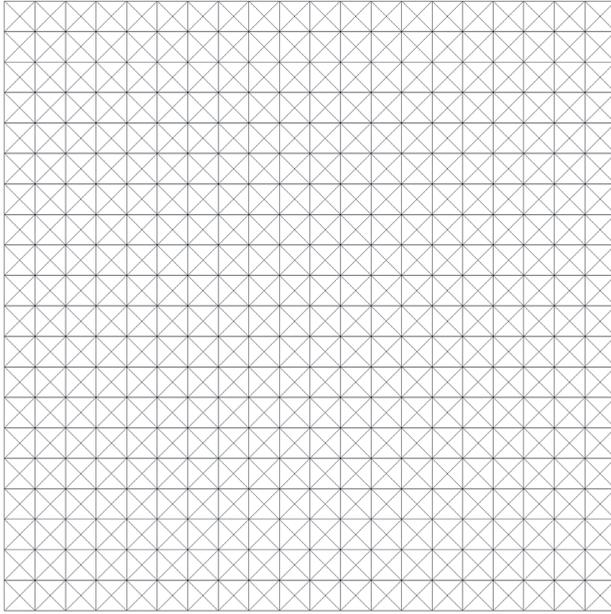
2.6.22

**Parkettierung aus einem doppelt diagonal geteilten, rechteckigen Raster.** Ein geradliniger Abschluss des Grundrisses ist orthogonal in vier Richtungen möglich. Erzeugbare Umrisse sind das gleichschenkelige Dreieck, Sechseck, Rechteck, Rhombus, Raute und Quadrat oder Abschnitte davon. Die gesamte Struktur kann in vier Richtungen knicken, um sich der idealen Hängeform anzupassen. Lagerpunktzahl: 3, 4, 6 Ideal: >4

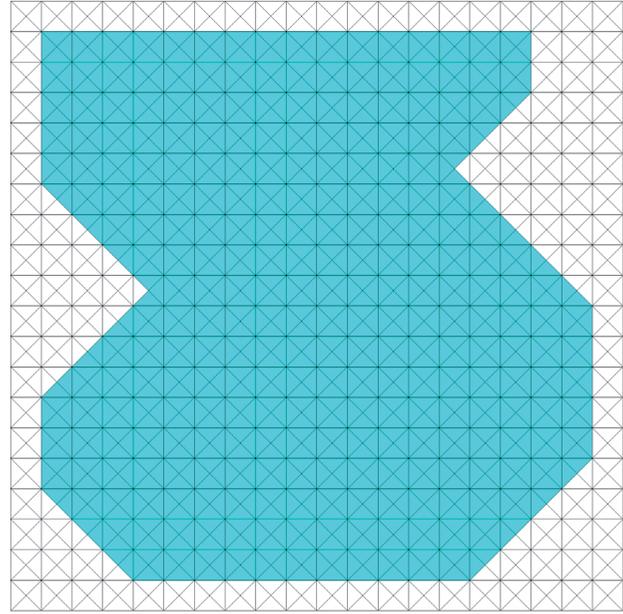
2.6.23 Parametrisch erzeugtes, regelmäßiges, strukturiertes Polygonnetz aus rechtwinkligen Dreiecken.

2.6.24 Ein komplexer Grundriss kann aus dem Gesamtnetz extrahiert werden, überschüssige Polygone werden gelöscht.

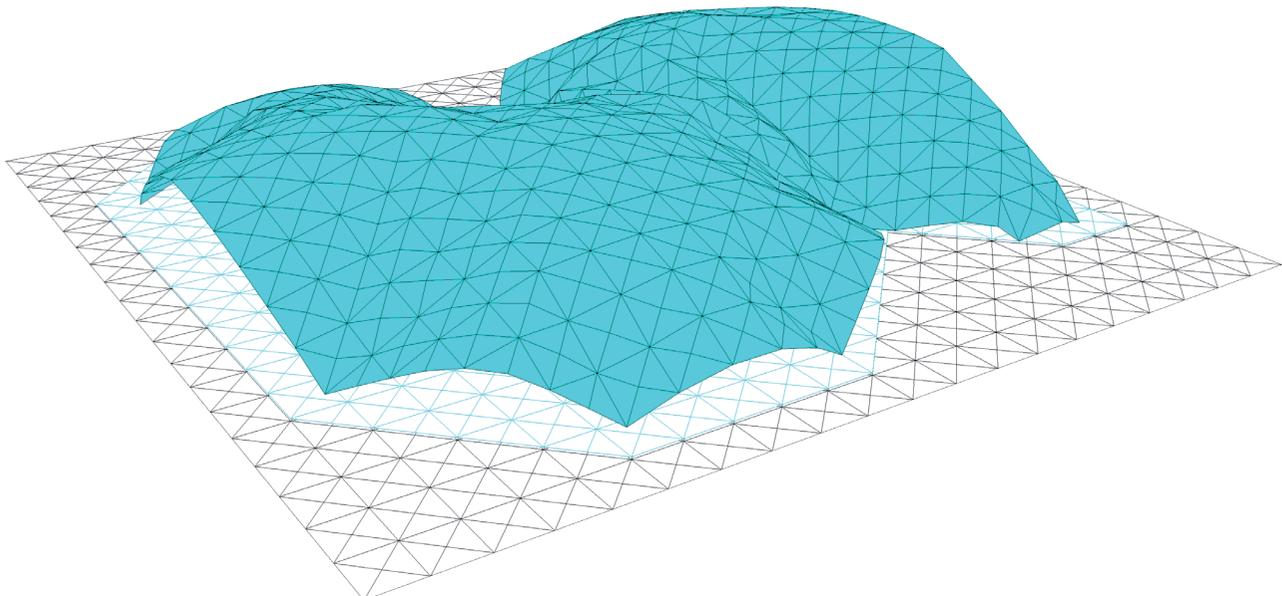
2.6.23



2.6.24



2.6.25



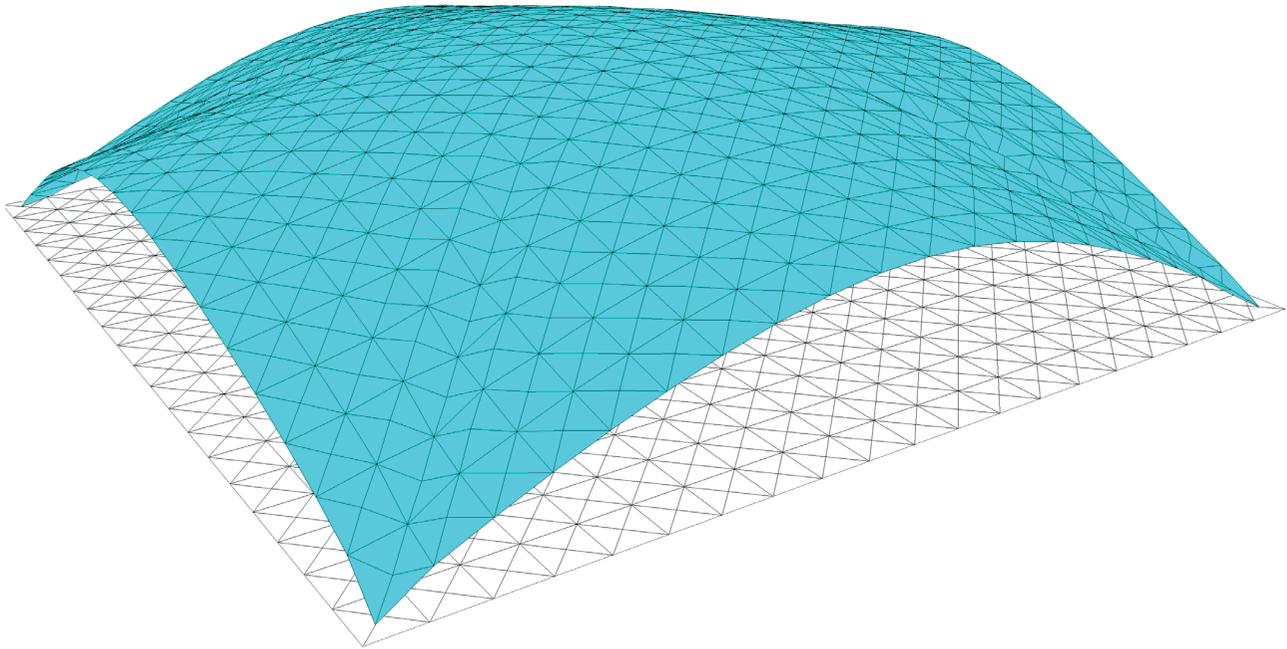
---

2.6.25 Angegliches Hängemodell zur Herstellung einer Schale mit dreieckigem Grundriss.

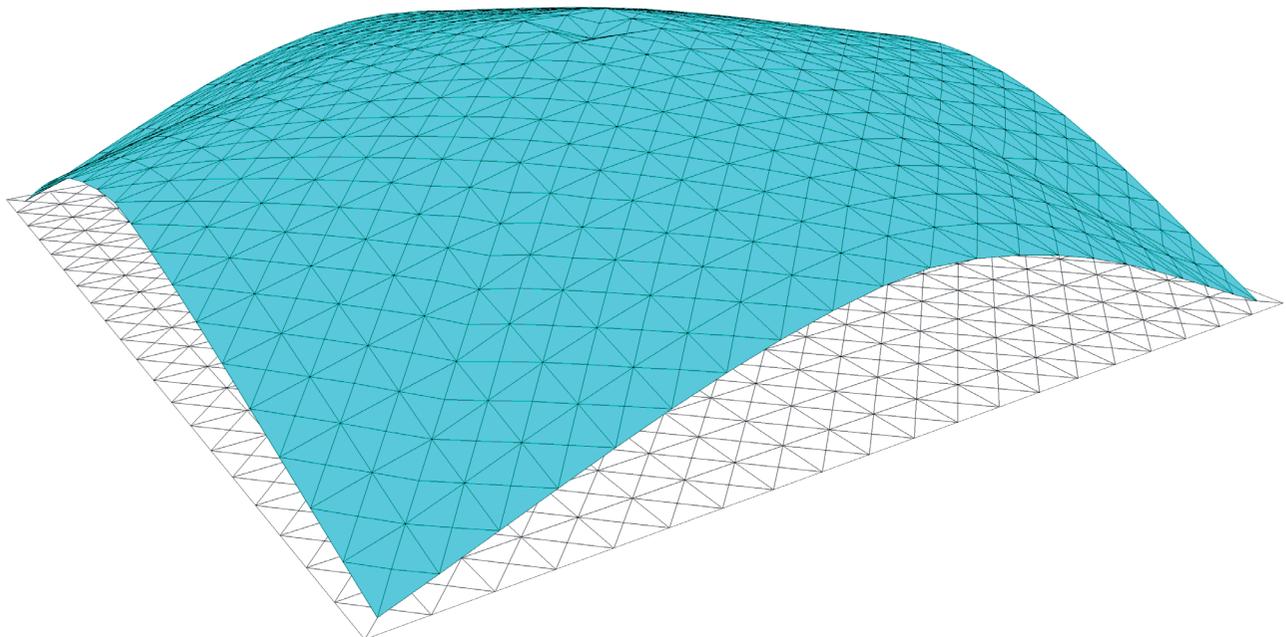
2.6.26 **Vergleichsgeometrie**; das Gitternetz wird zunächst mit einer Gravitationskraft belastet, diese bewirkt die Verformung der ursprünglich gleichen Einzelstäbe und die Erzeugung eines virtuellen Hängemodells. Im Zuge der Simulation wurden die Hängepunkte um ca. 5% in Richtung Zentrum verschoben.

2.6.27 Die Seitenlängen werden angeglichen, die Abweichungen von der Idealgeometrie sind gering. An der flachsten Stelle der Schalengeometrie entsteht eine Delle, diese Elemente könnten entfernt werden.

---



2.6.26



2.6.27

**Parkettierung von gleichwertigen, allgemeinen Dreiecken.**

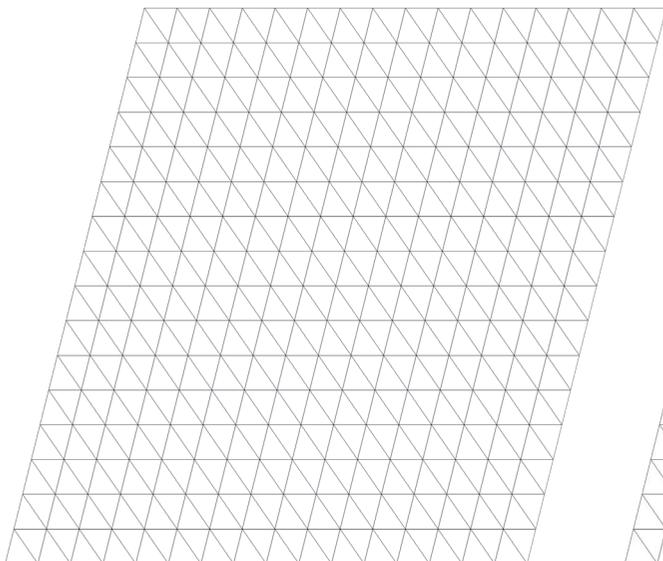
Eine orthogonale Eckausbildung des Grundrisses ist nicht möglich. Erzeugbare Umrissformen sind das unregelmäßige Dreieck, Sechseck, Rhombus und Raute oder Abschnitte davon.

Die gesamte Struktur kann in drei Richtungen knicken, um sich der idealen Hängeform anzupassen.

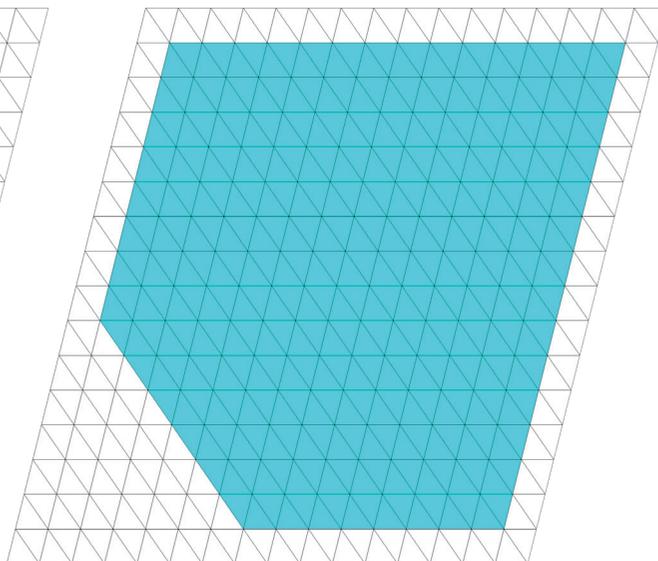
Ideale Lagerpunktanzahl: 3, 4, 6

2.6.28 Durch das Parkettierungsscript erzeugtes Polygonnetz aus allgemeinen Dreiecken.

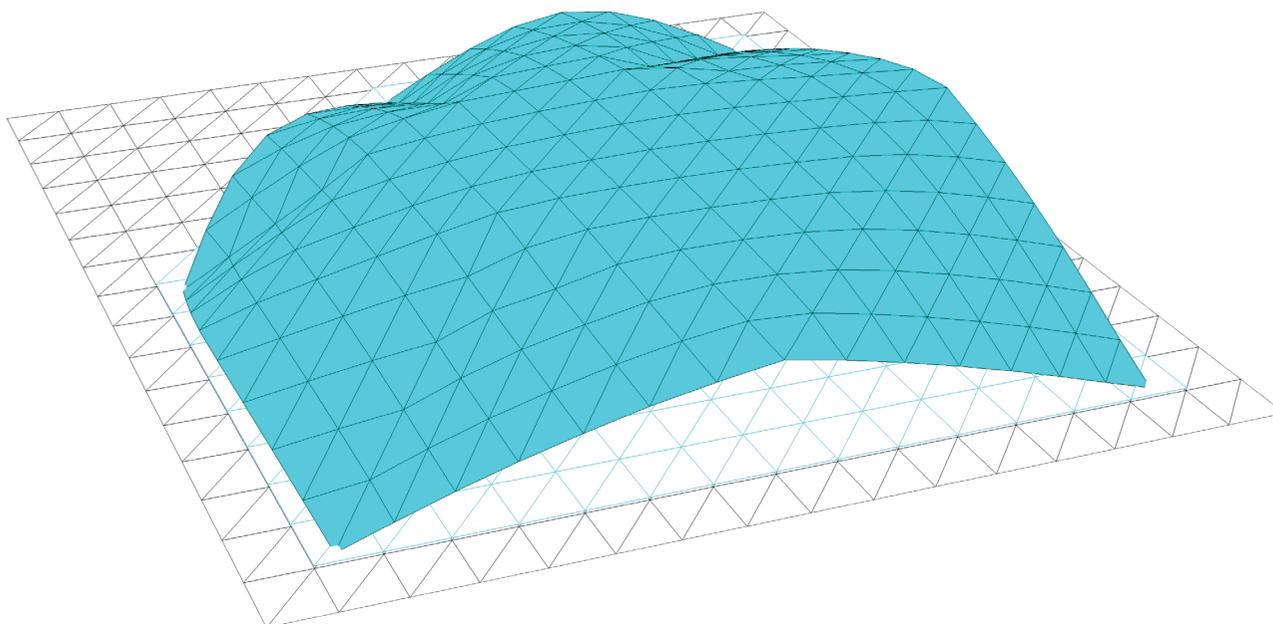
2.6.28



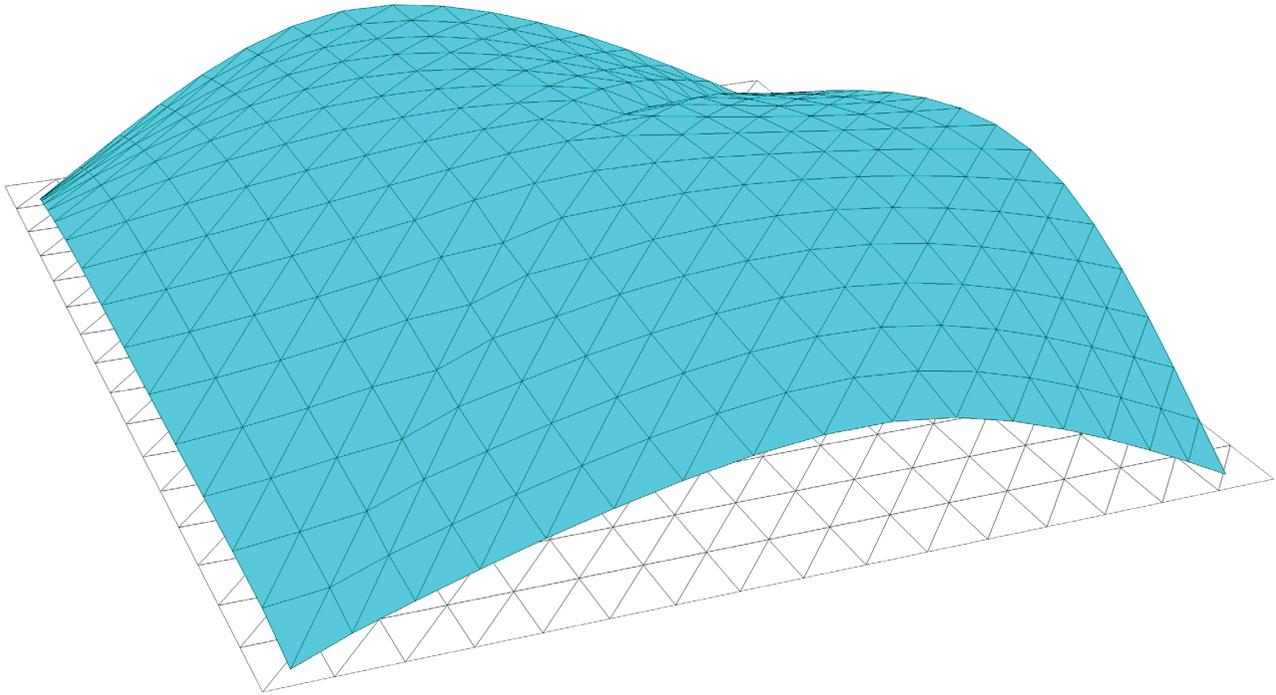
2.6.29



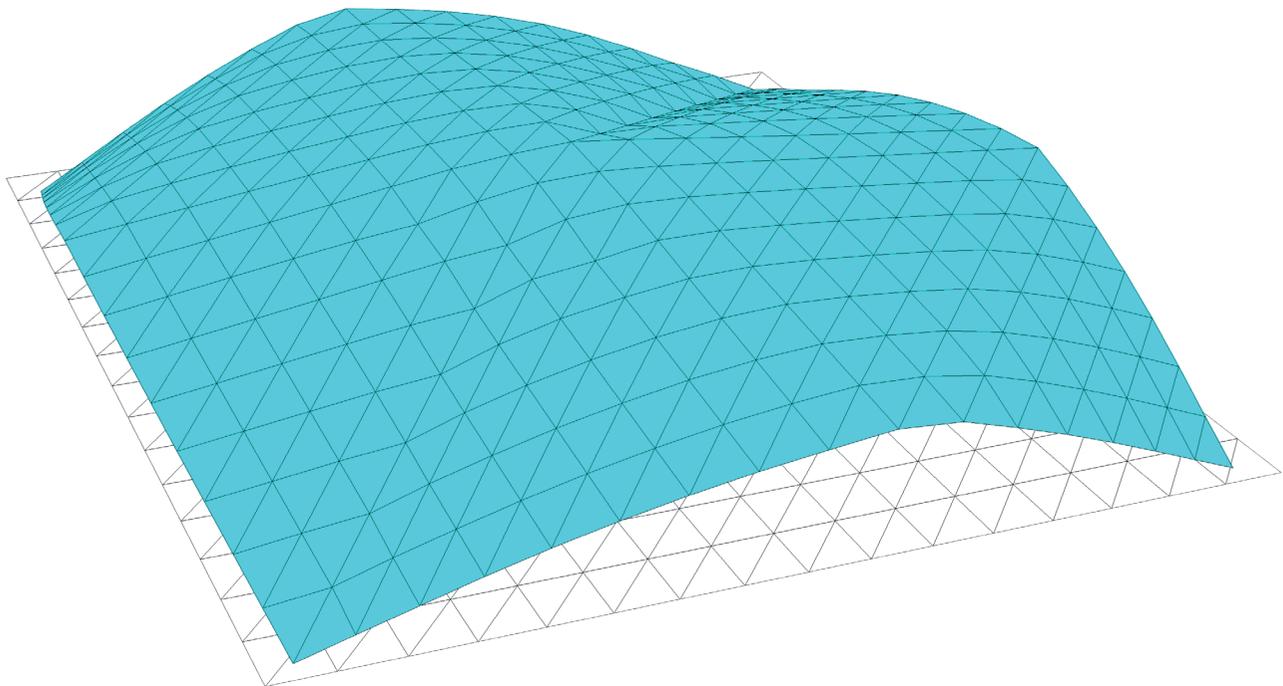
2.6.30



- 
- 2.6.29 Ein komplexer Grundriss kann aus dem Gesamtnetz extrahiert werden, überschüssige Polygone werden gelöscht.  
2.6.30 Angeglichenes Hängemodell zur Herstellung einer Schale mit unsymmetrischem Grundriss. Im Zuge der Simulation wurden die Hängepunkte um ca. 5% in Richtung Zentrum verschoben.  
2.6.31 **Vergleichsgeometrie**; das Gitternetz wird zunächst mit einer Gravitationskraft belastet, diese bewirkt die Verformung der ursprünglich gleichen Einzelstäbe und die Erzeugung eines virtuellen Hängemodells.  
2.6.32 Die Seitenlängen werden angeglichen, die Abweichungen von der Idealgeometrie sind äußerst gering.
- 



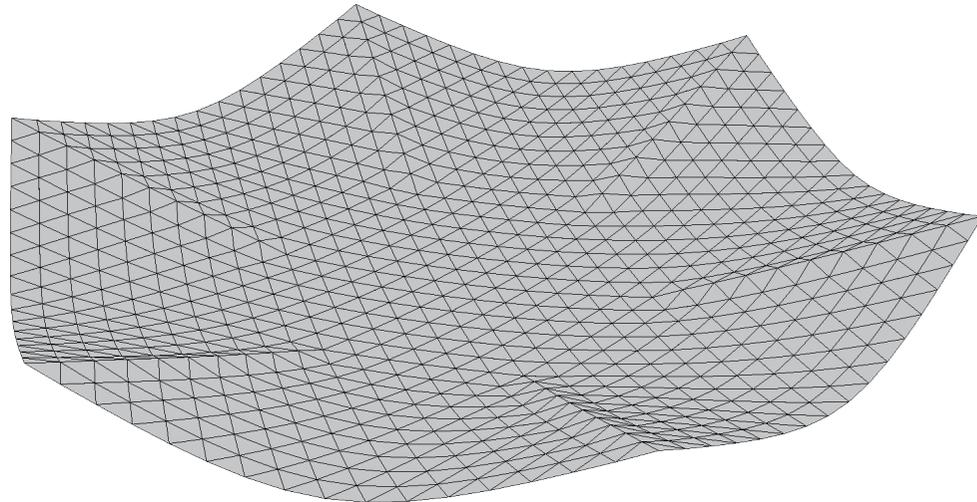
2.6.31



2.6.32

2.7.1 Mit den entwickelten Grasshopper-Skripts erstelltes Hängemodell aus identen gleichseitigen Dreiecken. Bei dieser Simulation wurde die richtige Parkettierung für den gewünschten Grundriss gewählt. Dies bewirkt annähernd keine Abweichungen von der Stützlinie der Struktur und ein stimmiges Erscheinungsbild. Der sechseckige Umriss eignet sich ohnehin durch seine Symmetrie und die Abbildung eines Vielfachen des parkettierten Elements hervorragend für Schalen aus nur einem sich wiederholenden Element. Weiters ist die Platzierung der Hängepunkte für diese Kombination von Parkettierung und Schalenumriss ideal.

2.7.1



## EINFLÜSSE DER PARKETTIERUNG

Die festgelegten Parkettierungsvarianten unterscheiden sich nicht nur durch die von ihnen erzeugbare Außenkontur, sondern auch durch weitere Eigenschaften. Wird zum Beispiel ein Netz aus gleichseitigen Dreiecken durch eine weitere Teilung der Einzelelemente entlang ihrer Symmetrieachse neu aufgelöst, entsteht dadurch eine größere Federsteifigkeit des Gesamtnetzes. Das bedeutet, es ist eine größere Kraft zur Verformung des Gitternetzes erforderlich. Da dieser Faktor nur auf der höheren Anzahl an Federn beruht, kann darauf mit einer niedrigeren Steifigkeit pro Feder reagiert werden.

Weiters bewirkt eine höhere Anzahl an Feldern pro Flächeneinheit eine genauere Annäherung der Schalengeometrie, da die Module planar sind. Es muss hierbei jedoch unterschieden werden, ob eine einfache Skalierung der Elemente erfolgt oder eine zuvor erwähnte Teilung eines bereits parkettierbaren Moduls in äquivalente Teile. Eine Verkleinerung der Parkettierungspolygone bewirkt eine bessere Annäherung der Stützlinie und ist nur durch eine sinnvolle Modulgröße im Hinblick auf die Fertigung begrenzt. Bei der Halbierung von gleichseitigen Dreiecke entsteht durch die zusätzlichen Biegekanten eine höhere Anzahl an Auffaltungen nach der Angleichung der Seitenlängen. Dieser Typ der Parkettierung ist also hauptsächlich wegen der vielen Möglichkeiten zur Herstellung von unregelmäßigen Außenkonturen vorteilhaft und in Verbindung mit einer hohen Hängepunktanzahl zu verwenden.

Abb. 2.7.2

Ein weiterer wichtiger Einfluss ist die Ausrichtung der Gitternetzlinien im Bezug auf die Außenkontur und die Lagerpunkte. Wurde eine besonders flache Schalenkrümmung erzeugt, besteht beim Angleichen der Kantenlängen die Gefahr eine annähernd ebene Fläche zu erzeugen.

Abb. 2.7.5

Um dies zu unterbinden erwiesen sich Parkettierungen mit wenigstens einer nicht symmetrischen Kante von Vorteil. Ein Beispiel hierfür ist die Kachelung eines diagonal geteilten, rechteckigen Rasters.

---

2.7.2 Zu viele unnötige Gitternetzrichtungen für eine derartige Lagerpunktconstellation.

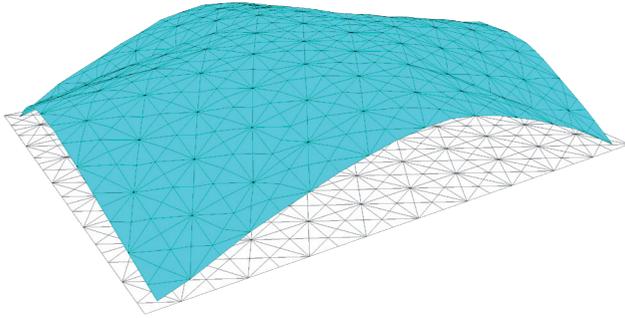
2.7.3 Die Komplexität des Grundrisses erfordert eine feinere Auflösung des Meshes, weiters ist die ideale Lagerpunktanzahl mit sieben Punkten um einen Punkt unterschritten.

2.7.4 Die Struktur besitzt eine Gitternetzachse zu viel, keine der Achsen ist unsymmetrisch - dies wäre zur Erzeugung einer eher flachen Schale vorteilhaft.

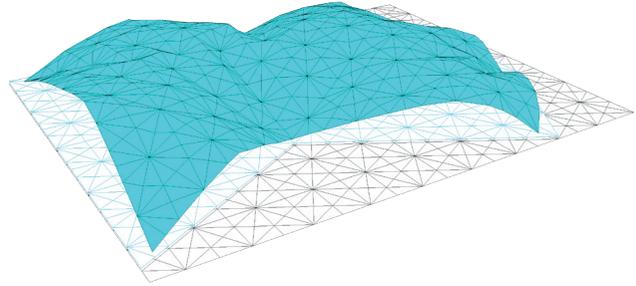
2.7.5 Für die zu erzielende Geometrie ideal gewählte Parkettierung.

---

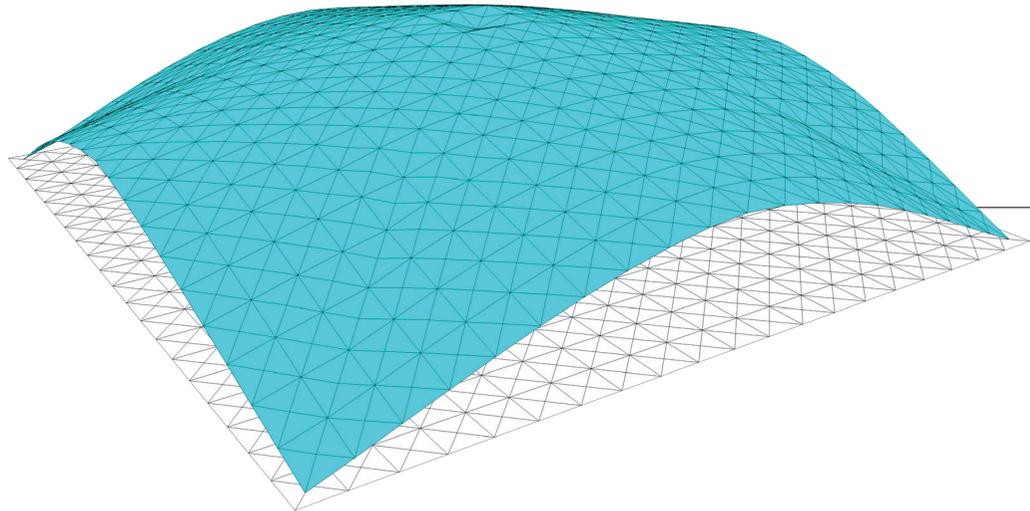
2.7.2



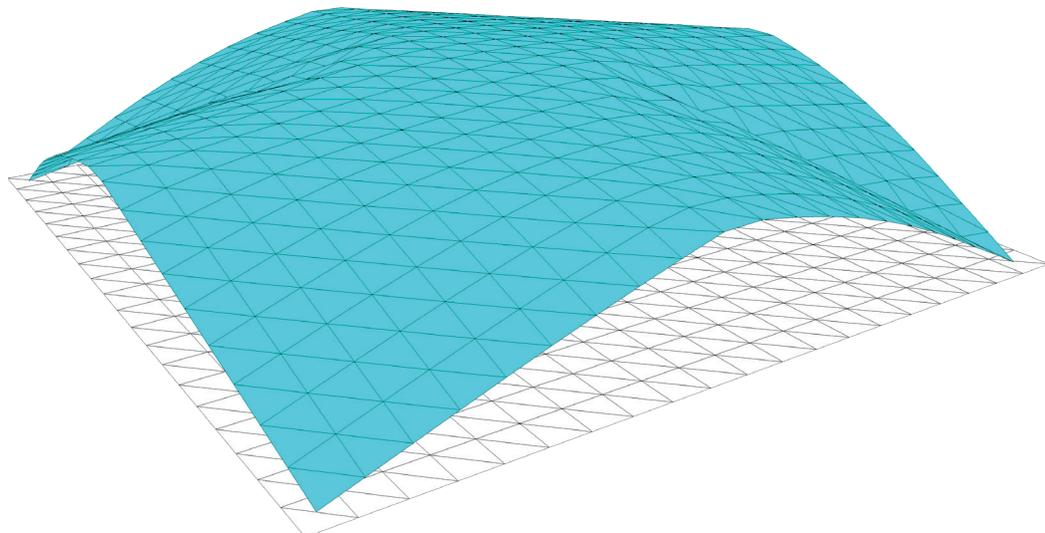
2.7.3



2.7.4



2.7.5



Am Anfang der Formfindung stehen die aus dem Raumprogramm und der zu erfüllenden Funktion abzuleitenden Grundlagen. Weitere Einflussgrößen sind wie bei jedem Entwurf Grundstück und Umgebung. Der daraus entwickelte Schalengrundriss, die Dimensionen und die Höhe bilden die Basis für die zu erstellende Schalegeometrie. Da schon der Grundriss homogen parkettiert werden muss, können bereits an dieser Stelle einige der möglichen Auflösungen ausgeschlossen werden. Wie im Abschnitt Polygonnetze beschrieben, können die Parkettierungsvarianten, je nach aneinandergereihtem gleichwertigen Einzelpolygon, nur wenige verschiedene Umrisse abbilden. Lediglich einfache symmetrische, rechteckige oder quadratische Grundrisse lassen mehrere Parkettierungsvarianten zu.

Dieser Umstand macht es schwer die zuvor gezeigten Parkettierungen untereinander zu vergleichen, jede kann für gewisse Randbedingungen die passendste oder auch unpassendste Wahl sein.

#### BILDUNGSREGELN:

*Es ist immer die Parkettierungsvariante zu wählen, deren Gitternetz die wenigsten Achsrichtungen besitzt.*

*Eine unsymmetrische Gitternetzrichtung verhindert lokale Asymmetrien bei flachen Schalegeometrien.*

*Die Lagerpunktanzahl weist auf die ideale Anzahl von Gitternetzrichtungen hin. Es gilt: Lagerpunktanzahl gleich oder doppelt so groß wie die Anzahl an Richtungen.*

*Symmetrische Grundrisse in Verbindung mit einer geraden Anzahl an Lagerpunkten lassen mit annähernd jeder Parkettierung ein zufriedenstellendes Ergebnis zu.*

*Im Sinne einer effizienten Fertigung ist eine Parkettierung aus gleichseitigen Dreiecken zu bevorzugen. Durch die identen Seitenlängen entstehen bei der Herstellung der Elemente weniger verschiedene Bauteile.*

*Eine feinere Auflösung des Meshes ist durch Skalierung der einfachsten Polygonanordnung zu erreichen, eine unnötige Erweiterung der Gitternetzrichtungen durch Teilung der Einzelpolygone ist zu vermeiden.*

*Die Seitenlängen der Einzelelemente sollten bei Spannweiten bis **20 Meter** maximal einem **Zehntel** der Länge der Hauptspannrichtung entsprechen, jedoch nicht unter **70 cm** lang sein.*

*Spannweiten bis **30 Meter** sollten der Länge eines **Fünftehtels** der Hauptspannrichtung entsprechen. Darüber hinaus ist von Elementgrößen bis maximal **250cm** Seitenlänge auszugehen, da ansonsten der Transport der Fertigteile nicht mehr sinnvoll bewerkstelligt werden kann.*

2.7.6 Workflow zur Formfindung für Schalen aus gleichen Elementen bei Verwendung des entwickelten parametrischen Skripts.

Da die Einflussgrößen in einer ständigen Wechselwirkung stehen, können mehrere Durchgänge bis zur Annäherung an die ideale Geometrie notwendig sein.

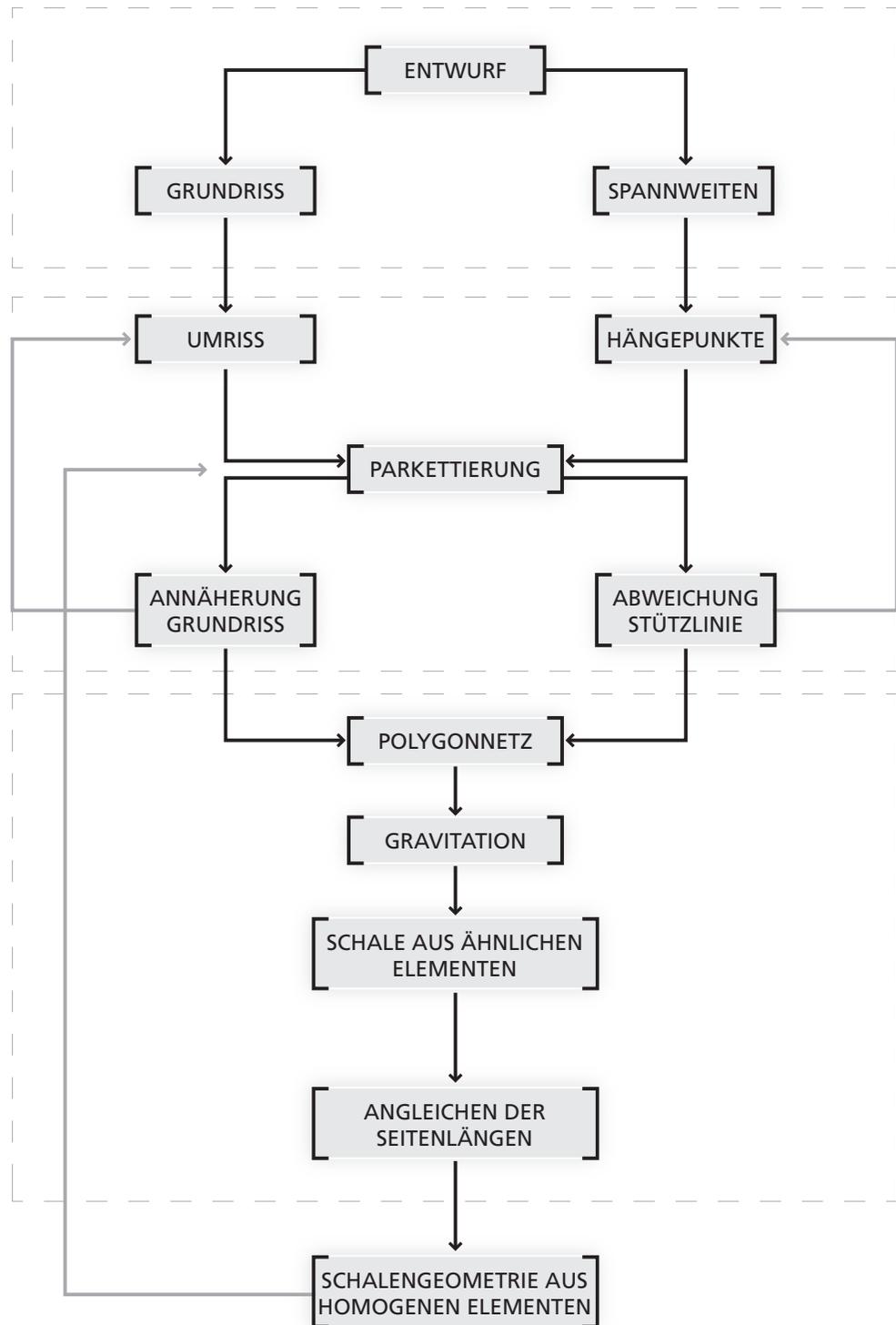
Grundlegende Randbedingungen werden durch eine konkrete Entwurfsaufgabe bestimmt. Daraus können der Schalenumriss und die Spannweiten ermittelt werden.

Der Umriss und die Lagerpunkte lassen je nach Beschaffenheit nur wenige oder eventuell auch nur eine Parkettierung zu. Ist keine homogene Parkettierung ohne Änderung des Grundrisses möglich, muss dieser angepasst werden. Das Gleiche gilt somit auch für die Hängepunkte.

Das strukturierte, reguläre Polygonnetz wird nun an den Lagerpunkten aufgehängt und so lange mit einer Gravitationskraft belastet, bis die gewünschte nutzbare Schalenhöhe erreicht ist.

Wurde der Grundriss wegen einer gleichwertigen Auflösung angepasst, können die Lagerpunkte während der Hängesimulation an die geplante Stelle zurückgesetzt werden.

Abschließend wird die Angleichfunktion ausgeführt, ist das Ergebnis nicht zufriedenstellend, muss eine andere mögliche Parkettierung simuliert werden.

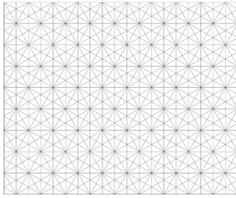
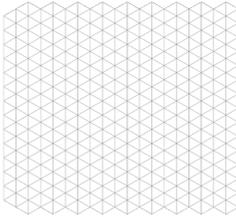


2.7.6

2.7.7 Die Annäherung an die Stützlinie wird von den Elementgrößen beeinflusst; eine feinere Parkettierungsauflösung bewirkt die genauere Abbildung der Stützlinie durch ebene Elemente.

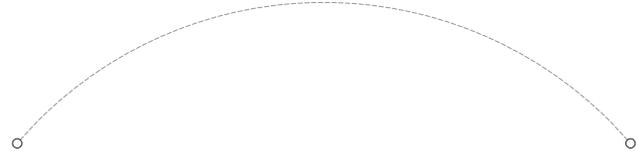
2.7.8 Wird diese feinere Auflösung durch das Teilen der Polygone entlang ihrer Winkelhalbierenden erzeugt, entstehen eher lokalen Asymmetrien, aufgrund der zusätzlichen Faltungsmöglichkeiten. (Abb. 2.7.2)  
Die einfache Skalierung der Polygone bei Beibehaltung der Umrissform bringt jedoch keine negativen Einflüsse mit sich.

2.7.8

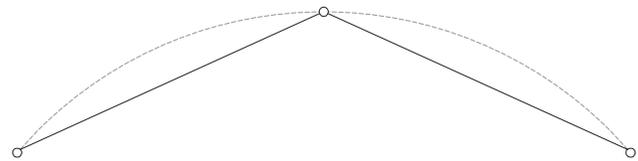


Teilung der Polygone  
entlang einer  
Winkelhalbierenden

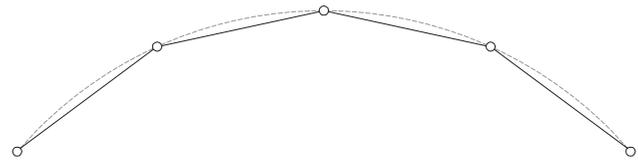
Ideale Stützlinie



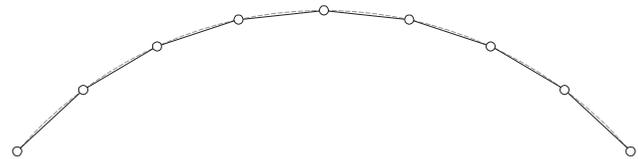
2 Elemente



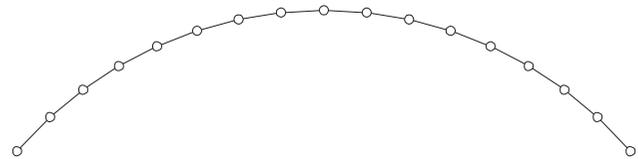
4 Elemente



8 Elemente



16 Elemente

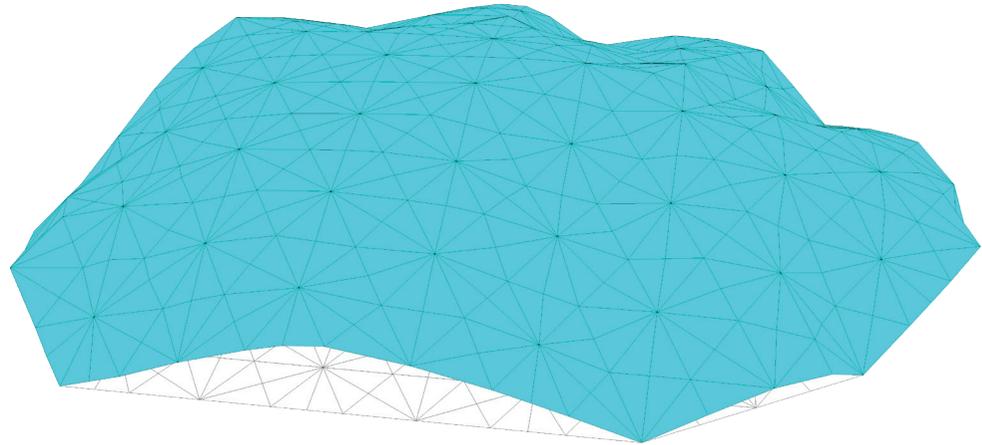


2.7.7



2.7.7 Auch mit einer in Bild 2.7.4 gezeigten Parkettierung können Schalenformen generiert werden, die nahe an ihrer idealen Stützlinie liegen. Erfordert ein komplexerer Grundriss viele Achsrichtungen, muss lediglich eine genaue und sinnvolle Abstimmung der Lagerpunkte im Bezug auf diese Richtungen erfolgen. Ein optimales Ergebnis ist also immer durch die stimmige Kombination von Lagerpunkten, Achsrichtungen und Richtungsanzahl zu erreichen.

2.7.7



## EINFLÜSSE DER AUFLAGERPUNKTE

Über die logischen formgebenden und grundrissbildenden Einflüsse der Lagerpunkte bzw. Hängepunkte hinaus, ergeben sich durch die Funktionsweise des entwickelten Lösungswegs weitere weniger offensichtliche Einflussgrößen. Zum einen können die Lagerpunkte während der Simulation verschoben werden und bewirken somit eine Veränderung der Schalengeometrie. Zum anderen müssen sich die Ankerpunkte vor der Simulation an Knotenpunkten des Gitternetzes befinden.

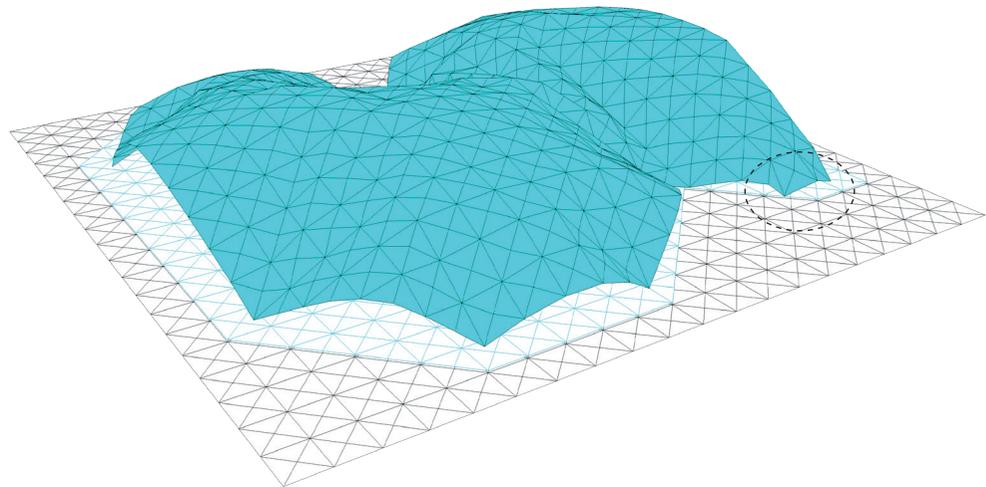
Werden zum Beispiel Punkte weiter in Richtung ihres gemeinsames Zentrums verschoben, kann die Gesamtstruktur bei geringerer Federspannung eine größere lichte Höhe ausbilden, da zum Erreichen der gewünschten Form eine geringere Längenausdehnung der Federn notwendig ist. Durch diesen Schritt kann die Veränderung der Dreiecksseitenlängen schon während der Formfindung niedrig gehalten werden.

Die durch die notwendige Triangulierung der Ausgangsfläche eingeschränkten erzeugbaren Außenkonturen können durch derartiges nachträgliches Verschieben der Lagerpunkte während der Simulation weiter angepasst werden. Im Grunde kann somit beim Erzeugen der Schalengeometrie jede sinnvolle Ankerpunktconstellation und Grundrissform realisiert werden.

Nicht nur die Position der Ankerpunkte, sondern auch deren Anzahl wirkt sich sehr stark auf die endgültige Form aus. Versuche zeigten, dass eine eher große Menge an eng gesetzten Ankerpunkten die angegliche Geometrie in Auffaltungen zwingt, da die verlängerten Kanten sich an den fixierten Ankerpunkten «abstützen» und somit der Ausgleich in ausschließlich eine Richtung erfolgt. Da ja jeder Partikel bzw. Knotenpunkt die umliegenden Punkte beeinflusst, ergeben sich Faltungskanten, die sich über die gesamte Schale ausbreiten. Daher bedingt eine hohe Anzahl an

2.8.1 Zur Simulation der Geometrie wurden zunächst mehr Auflagerpunkte als notwendig gesetzt und der empfohlene Mindestabstand der Lagerpositionen unterschritten. Der negative Einfluss dieser Randbedingungen äußert sich in spitzeren Faltungswinkeln der Parkettierungselemente.

2.8.1



Lagerpunkten ein Polygonnetz, das viele Achsrichtungen besitzt, da dann genügend Spielraum für eine Angleichung ohne Auffaltungen besteht. Weil aber ohnehin ein Zusammenhang zwischen Grundrissen mit vielen Richtungen am Umriss und einer hohen Anzahl an Lagerpunkten in den erzeugten Eckpunkten besteht, zeigt sich dieser Zusammenhang nicht als störend.

- Abb. 2.8.3 Ist ein einzelnes Grundelement an mehr als einem Eckpunkt mit einem Ankerpunkt verknüpft, ist die Simulation nicht möglich. Dadurch wäre die durch 2 Lagerpunkte eingeschlossene Kante nicht variabel und somit maßgeblich für die Angleichung. Das Ergebnis ist dann eine ständig flacher werdende Gesamtgeometrie, die letztendlich wieder eine ebene Fläche aus gleichen Elementen ergibt, da nur so die übrigen Kantenlängen der durch die Ankerpunkte fixierten Länge entsprechen. Gleichermaßen sollte ein Lagerpunkt Abstand von drei Elementseitenkanten nicht unterschritten werden.
- Abb. 2.8.1 Sind nur zwei Randfedern zwischen einem Lagerpaar, teilen sich die beiden Federn einen gemeinsamen Kraftangriffspunkt und werden daher im Vergleich zu den anderen Federstäben im Gitternetz weniger gedehnt. Dadurch muss bei der Angleichung eine stärkere Verkürzung aller anderen Linien erfolgen.
- Abb. 2.8.4

Grundsätzlich bewirkt eine möglichst niedrige Auflageranzahl und eine feine Gitternetzauflösung mit wenigen Achsrichtungen die geringste Abweichung von der idealen Schalenform bei der Angleichung der Seitenlängen oder, genauer definiert, eine geringere Änderung der Winkel zwischen den Einzelelementen. Die verschiedenen Polygonnetztypen verlangen aber immer eine gewisse Mindestanzahl an Auflagerpunkten, diese sollte nicht unterschritten werden.

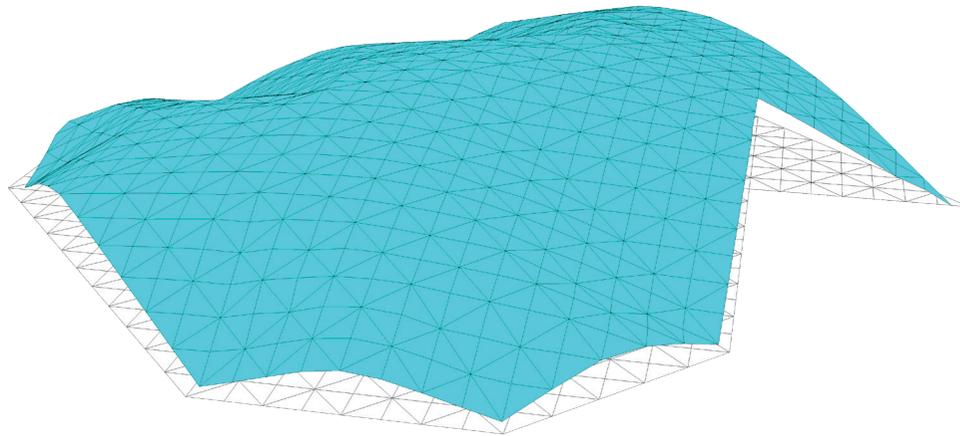
Es kann hierbei von mindestens einem Lagerpunkt pro Achsrichtung oder, bei Gitternetzen mit mehr als drei Richtungen, von mindestens der doppelten Anzahl ausgegangen werden.

---

2.8.2 Nach Verminderung der Lageranzahl und Anpassung der Abstände erneut simulierte und angegliche Struktur. Der Unterschied in der nun entstandenen Schalen-Geometrie ist deutlich zu erkennen. Die spätere statische Auswertung zeigt jedoch, dass die ursprüngliche Struktur unter der gleichen Belastung eine geringere Verformung aufweist. (Abb. 3.1.20, 3.1.21)

---

2.8.2



---

## BILDUNGSREGELN

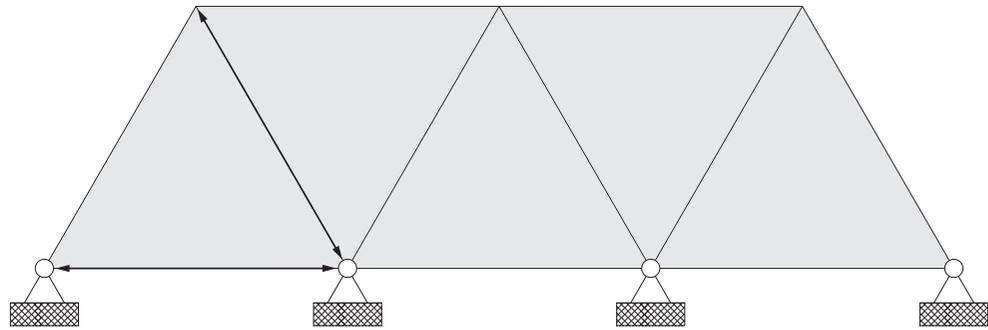
1. *Es ist immer die geringst mögliche Anzahl an Lagerpunkten zu wählen.*
2. *Ein Einzelelement sollte nicht an mehr als ein Auflager verknüpft sein.*
3. *Die Gitternetzrichtungen weisen auf die ideale Anzahl von Lagerpunkten hin.*
4. *Es gilt: Lagerpunktanzahl gleich oder doppelt so groß wie die Anzahl an Richtungen.*
5. *Eine symmetrische Positionierung der Auflagerpunkte ist zu bevorzugen.*
6. *Der Mindestabstand zwischen den Lagerpunkten sollte größer oder gleich drei Elementseitenlängen betragen.*
7. *Die Auflagerpunkte sollten während der Simulation um 5% in Richtung Grundrisszentrum skaliert werden, um der Struktur eine stärkere Verformung bei geringer Federdehnung zu ermöglichen. Daher muss diese Größe bei der Erstellung des Polygonnetzes und Positionierung der Lager zunächst addiert werden.*

2.8.3 Wird mehr als ein Eckpunkt eines Grundelements mit zwei Auflagern verknüpft, entsteht dadurch eine fest definierte Seitenlänge, da die anderen Elemente an die nun unveränderliche Länge angepasst werden müssen.

2.8.4 Sind nur zwei Randfedern zwischen einem Lagerpaar, teilen sich die beiden Federn einen gemeinsamen Kraftangriffspunkt und werden dadurch im Vergleich zu den anderen Federstäben im Gitternetz weniger gedehnt. Dadurch muss bei der Angleichung eine stärkere Verkürzung aller anderen Linien erfolgen.

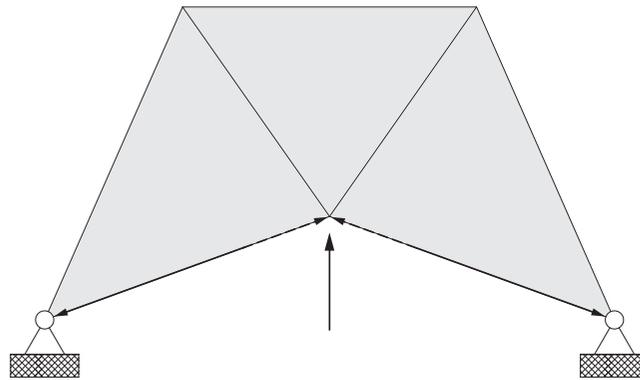
2.8.5 Der Mindestabstand zwischen den Lagerpunkten sollte größer oder gleich drei Elementseitenlängen betragen.

Für das Angleichen der Seitenlängen ungünstige Lagerpunktwahl. Eine Simulation ist nur möglich, wenn das Durchhängen der Struktur durch die Verschiebung der Auflager zum Netzzentrum ermöglicht wird (ähnlich dem physikalischen Modell).



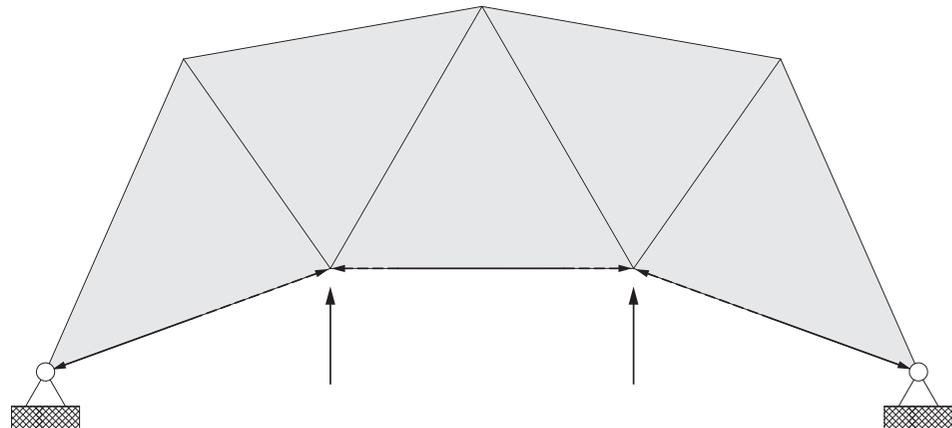
2.8.3

Die geringere Dehnung beeinflusst bei der Angleichung alle Seitenlängen in der Struktur.



2.8.4

Mindestabstand für zufriedenstellende Ergebnisse



2.8.5

---

## GRENZEN DER METHODE UND BEWERTUNG

Da die erzeugten Schalenformen schon vor dem Angleichen der Seitenlängen durch das Aufhängen einer homogenen Struktur an ihren Eckpunkten erzeugt werden und die Seitenlängenänderung während dieser Simulation durchschnittlich nur bei etwa 3% der Ausgangslänge liegt, sind die geometrischen Einflüsse der folgenden Angleichung eher gering. Es kann also davon ausgegangen werden, dass jede der herstellbaren Strukturen nach einer entsprechenden Bemessung durch ihr Eigengewicht belastbar ist, ohne zu versagen. Ob zum Beispiel eine einseitige Schneelast von einer Schale mit besonders ausgeprägten Assymetrien oder flachen Abschnitten getragen werden kann, muss durch exaktere Berechnungen überprüft werden. Die Formfindung basiert also nur auf einem Lastfall, dem des Eigengewichts. Die entstehenden Beanspruchungen aus weiteren möglichen Lastfällen sind gesondert zu untersuchen. Eine Bewertung der tragenden Funktion kann also nur mit Hilfe einer Berechnungssoftware erfolgen.

Kriterien, die schon durch die einfache Kontrolle der Abmessungen augenscheinlich für oder gegen eine erzeugte Schalengeometrie sprechen, sind eine zu niedrige lichte Höhe oder besonders spitze Winkel zwischen den Elementen.

Kann keine ausreichende Höhe erzeugt werden, ohne die grundlegend erstrebenswerte Bogenlinie in den Achsrichtungen signifikant zu verändern, kann die erzeugte Geometrie die Anforderungen seitens der Tragfähigkeit in der Regel nicht erfüllen.

Spitze Übergangswinkel stellen darüber hinaus außergewöhnlich hohe Anforderungen an die zu entwickelnden Verbindungsdetails. Die Schnittstellenausbildung als einzig variable Komponente im gesamten System muss unter positiven und negativen Winkeln kraftschlüssig verbinden und dabei kein einzigartiges Sonderbauteil, sondern konstant an jedem Element gleich verwendbar sein. Der maximale Faltungswinkel wird also vom zu entwerfenden Verbindungsdetail begrenzt, da dieses in Anbetracht der zu erwartenden geringen Elementdicke einen begrenzten Wirkungsbereich haben wird.

Einzelne stark gefaltete oder asymmetrische Abschnitte von komplexen Schalengeometrien könnten aus der Struktur ausgelöst und durch eine Hilfskonstruktion, wie zum Beispiel einen Rahmen, ersetzt werden, falls diese formal nicht entsprechen. Die Rahmen können dann opake Elemente einschließen und somit eine Möglichkeit bieten, um Lichtöffnungen in die ansonsten lichtundurchlässige Struktur einzubinden. Da diese Zonen hauptsächlich an den Scheitelpunkten entstehen, würden sich Öffnungen ausbilden, die auch in baugeschichtlichen Vorbildern, wie zum Beispiel dem Phanthéon, zu finden sind.

Die zuvor definierten Bildungsregeln zeigen die Grenzen der Methode im Bezug auf die Formfindung mit der entwickelten Systematik. Um den Nutzungsbereich weiter und klarer definieren zu können sind eine Vordimensionierung am Beispiel eines einfachen Prototypen und die konstruktive Lösung der Verbindungsweise notwendig.

Diese Ergebnisse wiederum stehen in enger Beziehung zur Fertigungsplanung der Einzelelemente und beeinflussen massiv deren Komplexität.

Die endgültigen Grenzen und Möglichkeiten der Bauweise zeigen sich erst, wenn diese weiteren Anforderungen erarbeitet wurden und sind noch nicht aus der Formfindungsfunktion abzulesen.

### 3 STATISCHE ÜBERPRÜFUNG

Wurde nun mit der entwickelten Formfindungsmethode die gewünschte Geometrie definiert, erhält man zunächst als Ergebnis ein dreidimensionales Stabmodell, das aufgrund seiner Charakteristik einer Gitterschale entspricht. Das Datenpaket enthält also alle notwendigen Informationen, um in einer Berechnungssoftware weiterverarbeitet und bewertet zu werden.

Abb.3.1

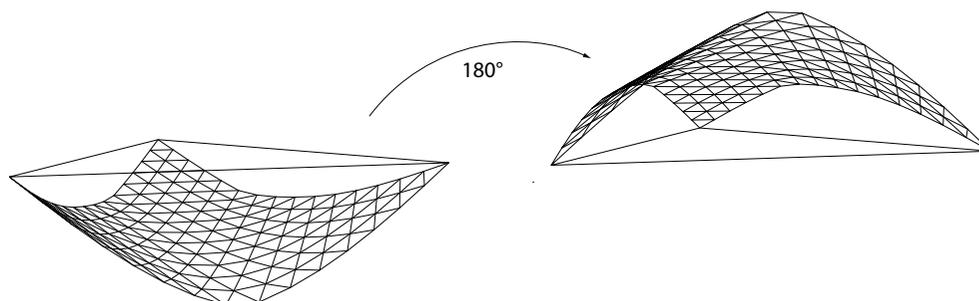
Während der Formfindung entstehen zunächst rein zugbeanspruchte Gleichgewichtsstrukturen. Ein Gitternetz wird durch eine Gravitationskraft belastet und verformt sich daher zu einem Hängemodell, das die Stützlinien der Struktur abbildet. Dreht man diese Geometrie nun um 180 Grad, wird dieselbe Struktur ausschließlich auf Druck beansprucht. Im Lastfall Eigengewicht entstehen also kaum Biegemomente. Da sich nach dem Angleichen der Seitenlängen Abweichungen der Schalengeometrie von der statisch idealen Hängefigur ergeben, ist eine Überprüfung des Tragwerks während der Formfindung notwendig.

Um diesen Schritt fließend in den Prozess zu integrieren, erscheint eine Lösung in der bisher verwendeten Softwareumgebung sinnvoll und für eine schnelle Auswertung zweckmäßig. Die Kontrolle während der Formfindung sollte, außer einer Vordimensionierung bezüglich der im Gitterschalenmodell entstehenden Schnittkräfte, eventuell auftretende Biegemomente aufzeigen und die maximale Verformung auswerten.

Diese Anforderungen erfüllt ein weiteres Grasshopper-Plugin, das zur strukturellen Analyse von Tragwerken dient. Karamba ist ein Tool zur Auswertung der notwendigen Daten und erweist sich schon in der kostenlosen Version als ausreichend genau und funktionell, um die Qualität der entwickelten Geometrie vorzeitig bewerten zu können.

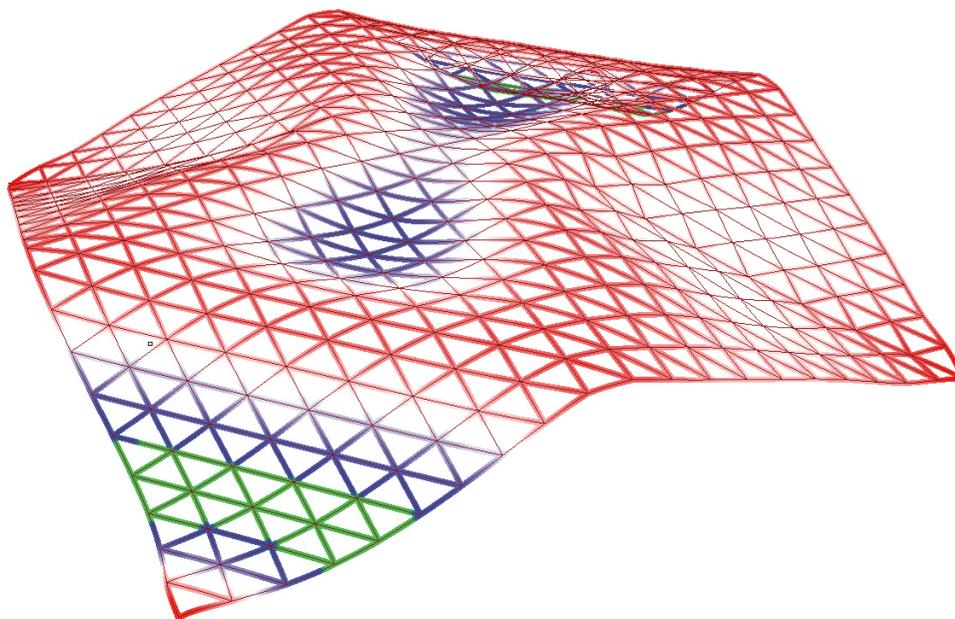
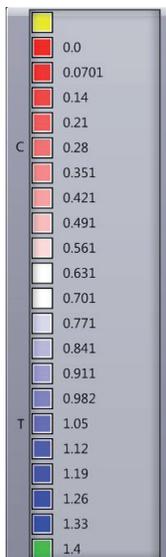
Verglichen wird zunächst das Tragverhalten einer Schale **vor und nach der Elementangleichung**.

3.1



3.1.1 **Karamba für Grasshopper; Analyse der maximalen Verformung** unter Eigengewicht und einer Schneelast von  $2 \text{ KN/m}^2$ . Gewählt wurde ein massiver, kreisrunder Stabquerschnitt mit  $12 \text{ cm}$  Durchmesser aus C90/105. Die zuvor als für den Umriss ideal homogen parkettiert bezeichnete Gitterschale (2.7.6) überspannt diagonal  $27 \text{ m}$  und weist dabei eine maximale Verformung von  $14 \text{ mm}$  auf. Die Seitenlängen der gleichschenkeligen Triangulierung betragen  $142$  auf  $100 \text{ cm}$ . Die Gesamtstruktur hat eine Masse von  $40 \text{ Tonnen}$ . Bei einem Stabdurchmesser von  $6 \text{ cm}$  würde die maximale Verformung  $12 \text{ cm}$  und die Masse  $10 \text{ Tonnen}$  betragen.

3.1.1 Die Werte in der Legende zeigen die Verformung in cm.



## KARAMBA

6 Vgl:  
Preisinger, Clemens, (2012)  
Karamba User Manual, <http://www.karamba3d.com/downloads>, in: <http://www.karamba3d.com>

Stand: Juni 2012

In Karamba können statische Systeme aus Knoten und Stäben berechnet und dimensioniert werden. Die Gitternetzlinien der erzeugten Geometrie werden folglich als Stäbe betrachtet, die Schnittpunkte als statisch wirksame, biegesteife Knoten.

Die Auflager müssen entsprechend den Ankerpunkten positioniert werden und können in ihren Freiheitsgraden angepasst werden. Die Berechnung der zu analysierenden Schalengeometrien glückt in Karamba jedoch nur bei einer eingespannten Lagerung.

In der frei erhältlichen Version von Karamba ist vor der Berechnung die Querschnittsauswahl manuell durchzuführen. Die Vollversion kann optional Profile je nach Material und Lasteinwirkung wählen und somit automatisch die optimale Ausnutzung des Tragwerks ermitteln.

Ein System kann allgemein verschiedene Querschnitte enthalten und ist letztendlich durch ständige und veränderliche Lastfälle beanspruchbar. Ausgegeben wird eine grafische Darstellung der Verformung und der Schnittgrößen sowie eine numerische Auswertung.<sup>6</sup>

Die erste überschlägige Bewertung des Tragverhaltens kann beispielsweise über die Gebrauchstauglichkeit, sprich die Verformungen unter Eigengewicht und einer global wirkenden Schneelast von  $2 \text{ KN/m}^2$  erfolgen. Da weiterführend plattenförmige Fertigteile entwickelt werden sollen, dient Karamba hauptsächlich zur einfachen und vorzeitigen Kontrolle der Schalenwirkung und nicht zur finalen Dimensionierung.

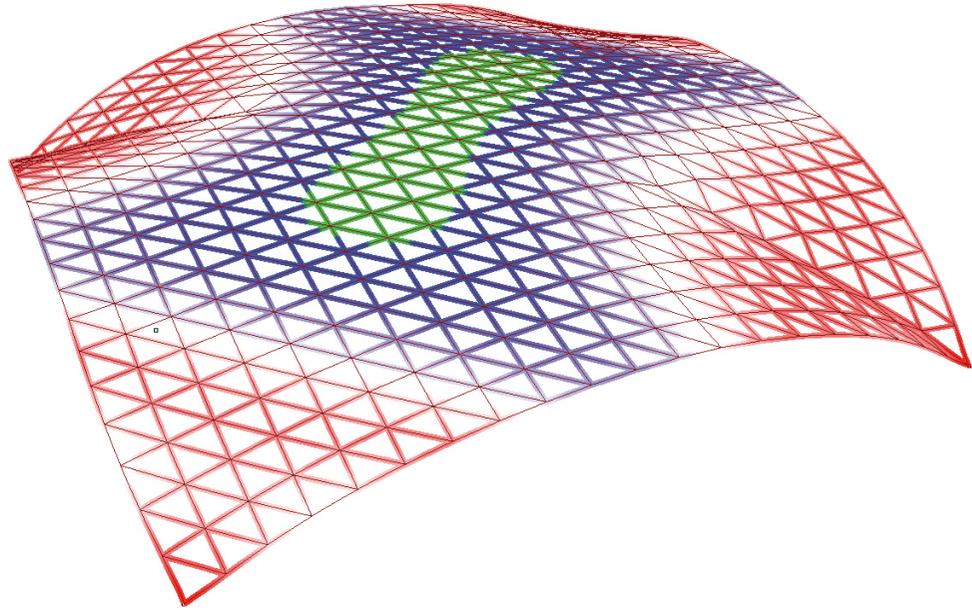
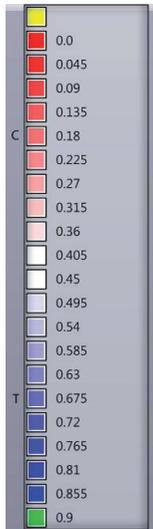
Ob die Formfindung im Sinne einer Gleichgewichtsfigur, welche unter Eigengewicht hauptsächlich auf Druck beansprucht wird, erfolgreich war, kann nur durch eine vergleichende Berechnung der Schnittgrößen beurteilt werden. Dazu wird anschließend eine aussagekräftige Vergleichsstruktur in einem ingenieurmäßigem Finite Elemente Programm als Flächentragwerk analysiert.

3.1.2 **Vergleichsgeometrie zu 3.1.1**; analysiert wird die Hängegeometrie **vor Angleichung der Seitenlängen**. Die maximale Verformung ist mit 9 mm um 35 % geringer als bei der finalen Struktur.

3.1.3 Darstellung der Auflagerkräfte und des Nutzungsgrades der Stabquerschnitte, Werte über 20% treten nur im Bereich der Lagerung auf.

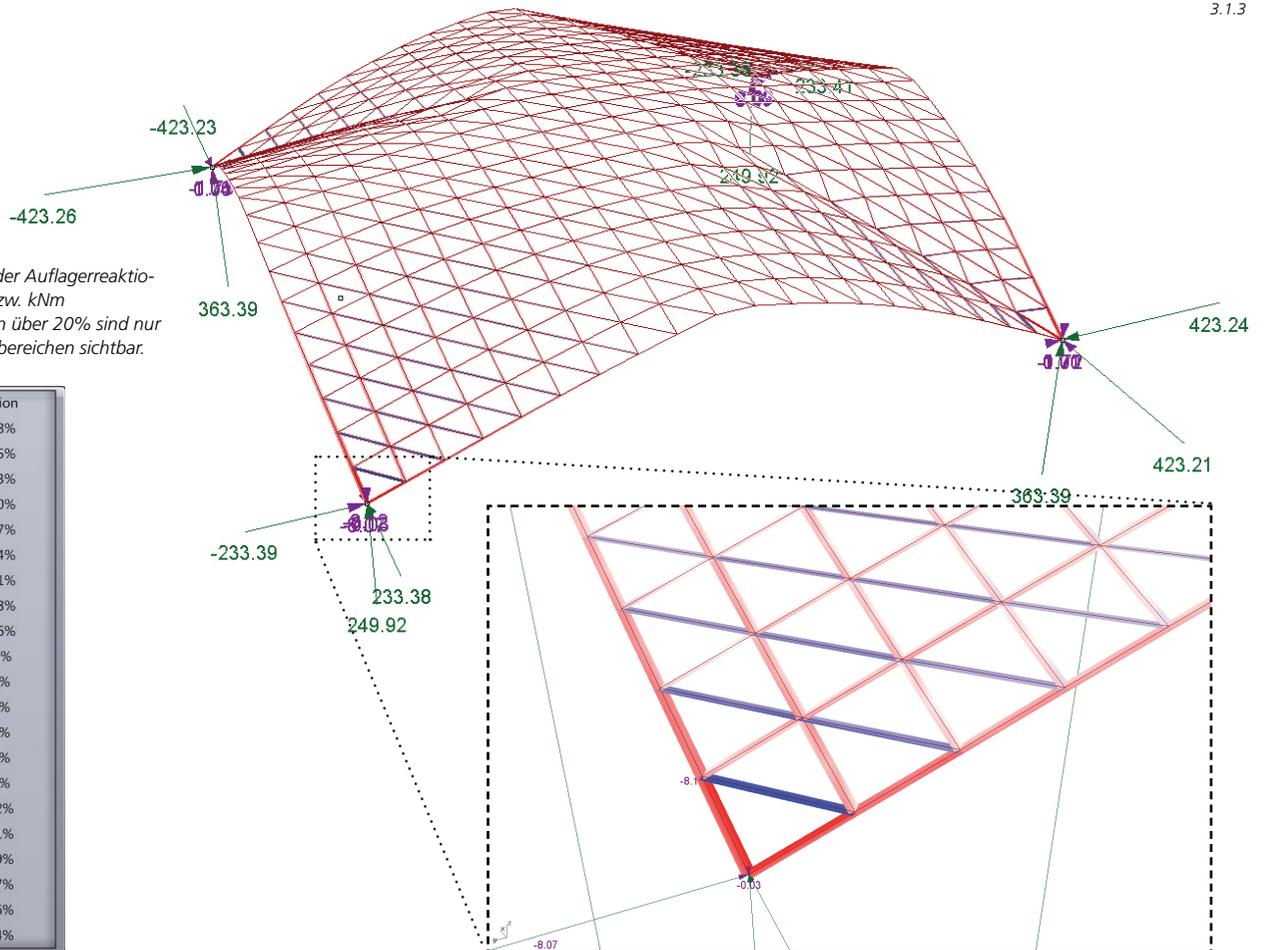
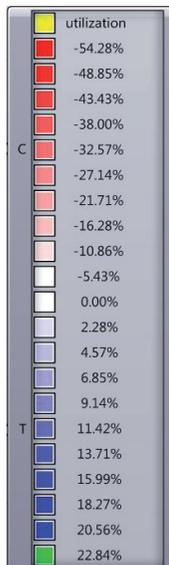
Die Verformungsfiguren vor und nach der Elementangleichung unterscheiden sich massiv voneinander. Einheit: cm

3.1.2



Darstellung der Auflagerreaktionen in kN, bzw. kNm  
Auslastungen über 20% sind nur in den Lagerbereichen sichtbar.

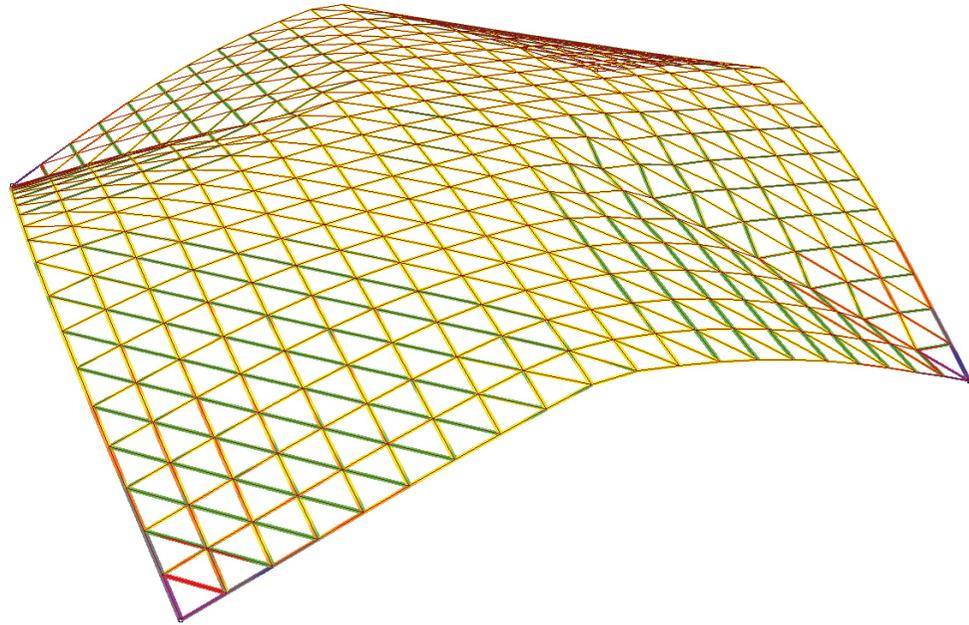
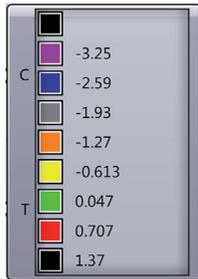
3.1.3



3.1.4 **Analyse der maximal auftretenden Spannungen** in der Gitterschale mit angeglichenen Seitenlängen, positive Werte sind Zugspannungen, negative Druckspannungen. Es treten also in der Struktur zum größten Teil Druckspannungen von 0.7- 1.27 kN/cm<sup>2</sup> auf.

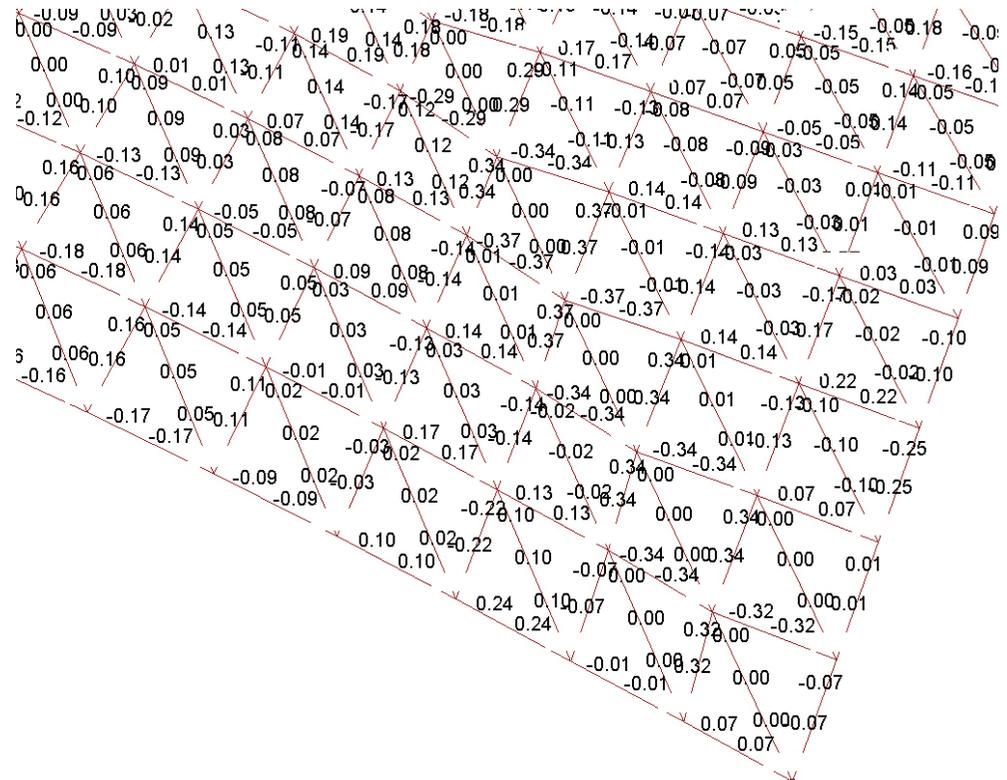
3.1.5 **Darstellung der Stabschnittkräfte im Auflagerbereich;** die Auswertung zeigt die auftretenden Stabmomente in Richtung X. Die auftretenden Momente in der Gesamtstruktur sind äußerst gering, die maximalen Momente sind wiederum in den Lagerzonen zu finden. Die Anzahl der durchgeführten Schnitte pro Stab kann variiert werden.

3.1.4 Die Werte in der Legende zeigen die resultierenden Druck- und Zugspannungen in kN/cm<sup>2</sup>.



3.1.5 Stabmomente in Richtung MX. my, mz sind ebenso auswertbar, zeigen aber geringere Werte. Einheit: kNm

Ausschnitt Auflagerzone



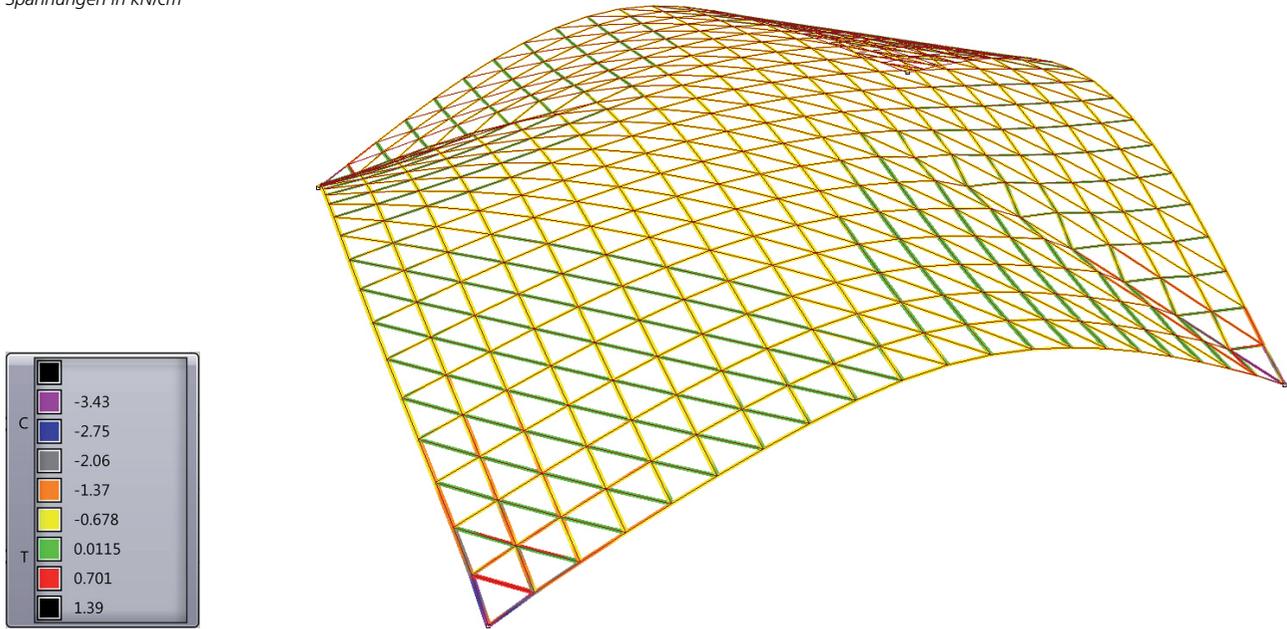
3.1.6 **Analyse der maximal auftretenden Spannungen** in der Gitterschale **ohne gleichmäßige Seitenlänge**.

Es treten etwas höhere Druckspannungen auf, jedoch sinken die häufigsten Zugspannungen (grün) auf ein Viertel von 0.047- 0.0115 kN/cm<sup>2</sup>

3.1.7 **Darstellung der Stabschnittkräfte**; die Auswertung zeigt die auftretenden Stabmomente in der inhomogenen Struktur. Die auftretenden Momente sind in der Gesamtstruktur geringer, die maximalen Momente in den Lagerzonen wiederum höher.

Die Spannungsverläufe der Strukturen unterscheiden sich kaum voneinander.  
Spannungen in kN/cm<sup>2</sup>

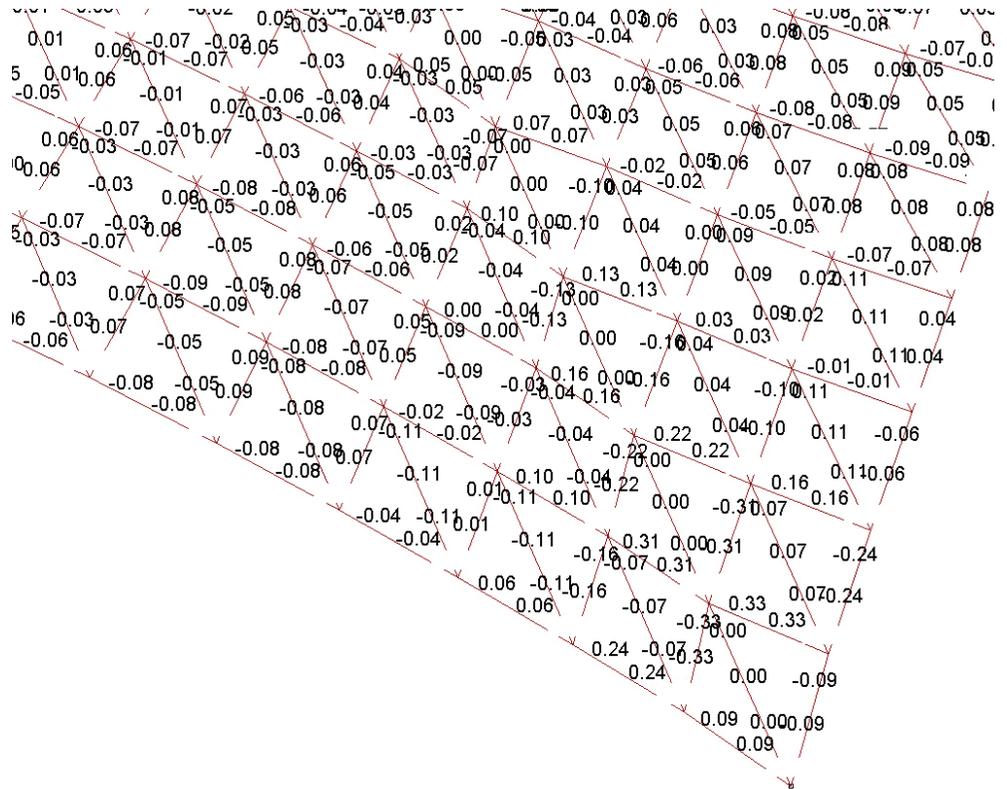
3.1.6



Stabmomente in Richtung MX.

Einheit: kNm

Ausschnitt Auflagerzone



3.1.7

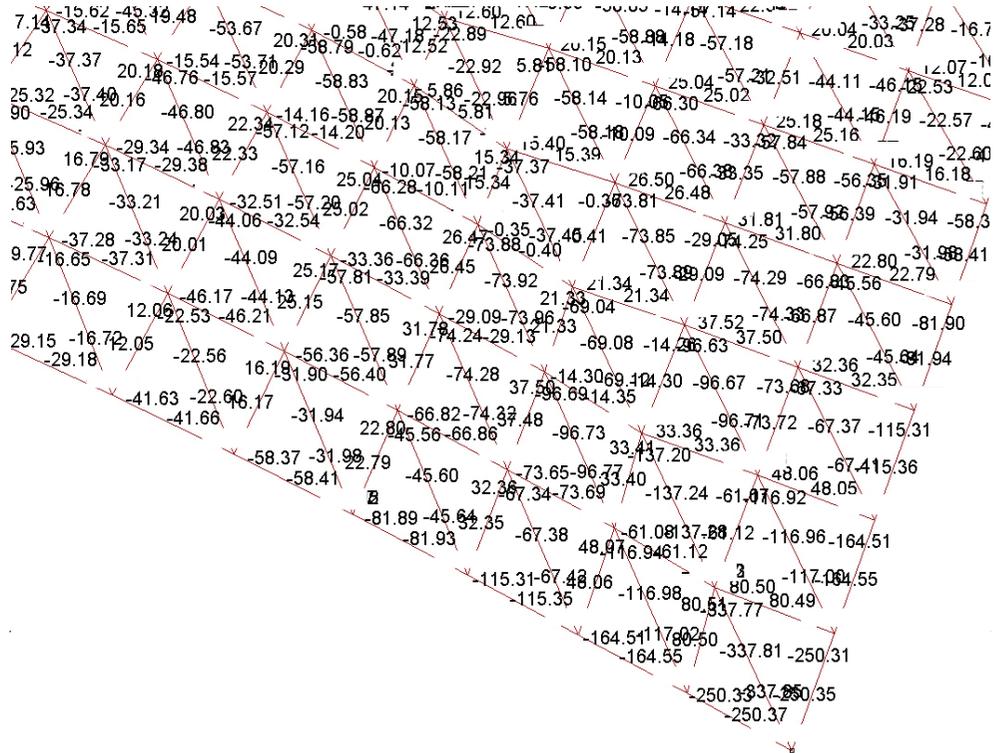
3.1.8 Gezeigt werden die **Stabschnittkräfte**; Auswertung der Normalkräfte in der homogenen Struktur.

Die Normalkräfte sind wie zu erwarten aufgrund des Gitterschalensystems die einflussreichste Größe.

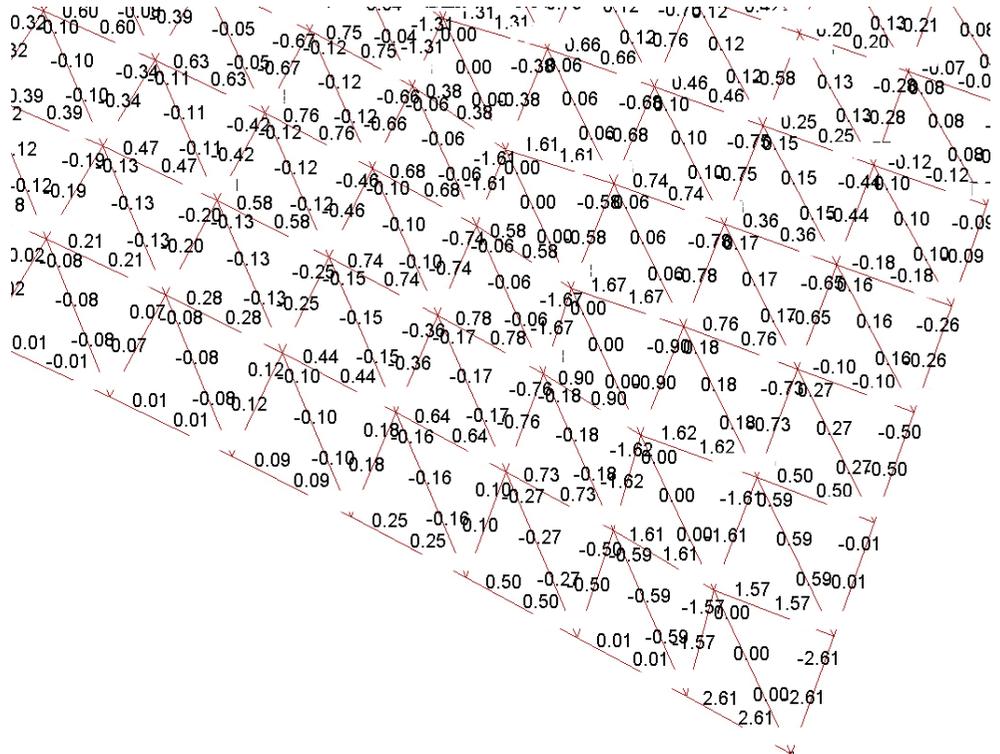
Deutliche Maximalstellen befinden sich im Bereich der Auflager.

3.1.9 Darstellung der Querkräfte in Richtung  $V_y$ , die Ergebnisse sind wie die auftretenden Momente im Vergleich zu den Normalkräften äußerst niedrig.

3.1.8 Stabnormalkräfte in kN.  
Ausschnitt Auflagerzone



3.1.9 Querkräfte in Richtung  $V_y$  in kN.  
Ausschnitt Auflagerzone



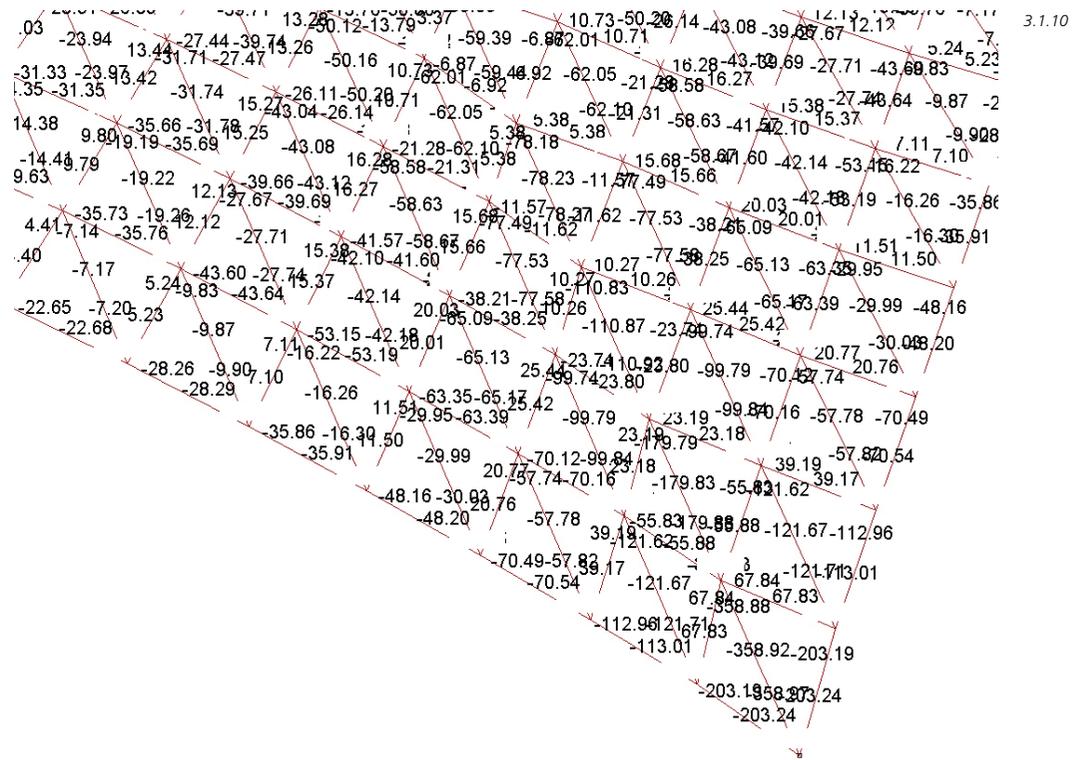
3.1.10 Auswertung der Normalkräfte in der noch nicht angeglichenen Struktur.

Die Normalkräfte sind durch die genauer angenäherte Hängelinie deutlich geringer, da sie insgesamt gleichmäßiger in den Stäben verteilt sind.

3.1.11 Darstellung der Querkräfte in Richtung  $V_y$ , im Vergleich sind in beiden Strukturen annähernd die gleichen Querkräfte festzustellen, deren örtliche Verteilung auf die Stäbe ist jedoch unterschiedlich.

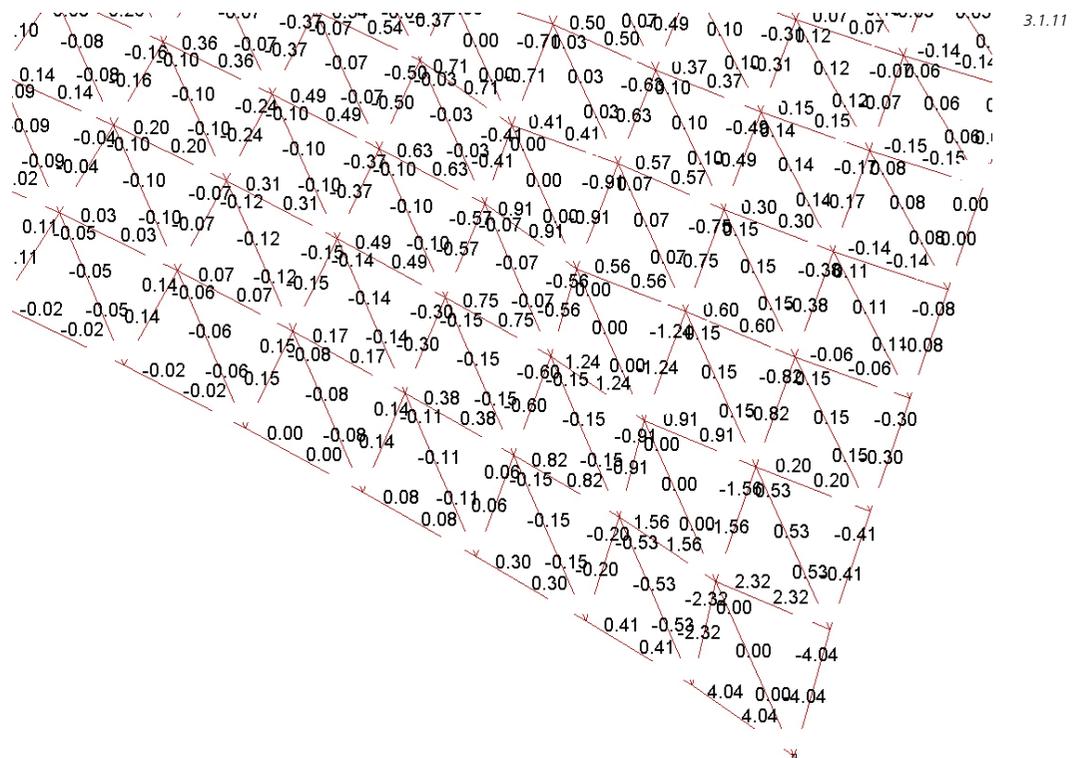
Stabnormalkräfte in kN.

Ausschnitt Auflagerzone



Querkräfte in Richtung  $V_y$  in kN.

Ausschnitt Auflagerzone

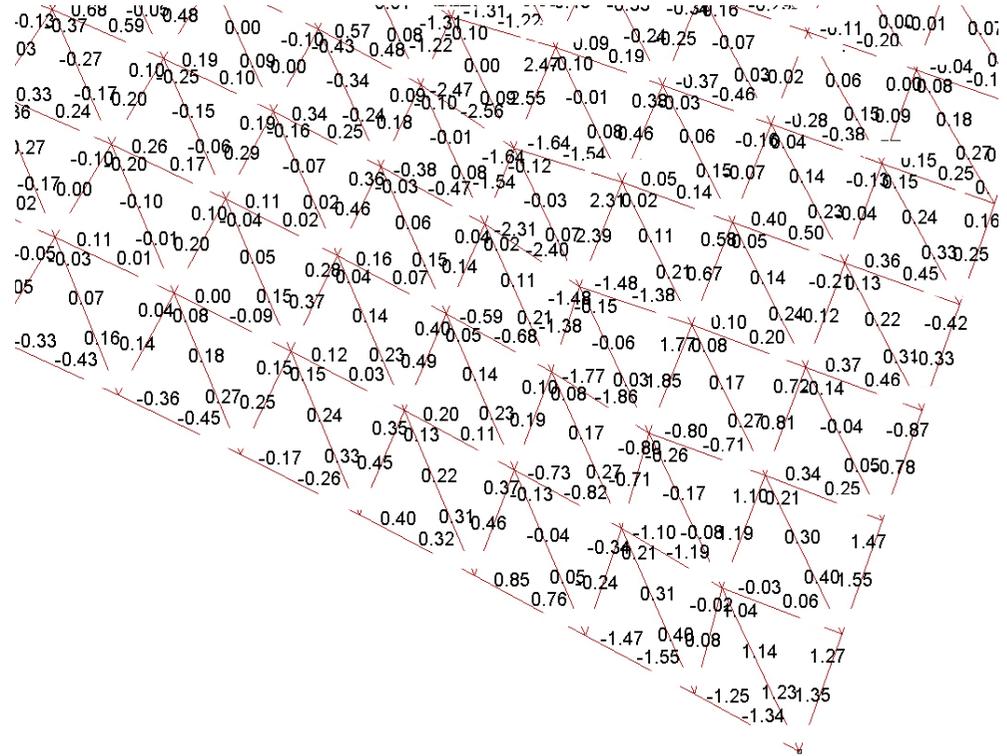


3.1.12 Auswertung der **Querkräfte in Richtung Vz** für die **homogene Gitterschale**, die Ergebnisse sind wie die auftretenden Momente und Querkräfte in Vy im Vergleich zu den Normalkräften äußerst niedrig. Maximalstellen sind nicht nur im Bereich der Lager, sondern auch im Umfeld von **Auffaltungen** festzustellen.

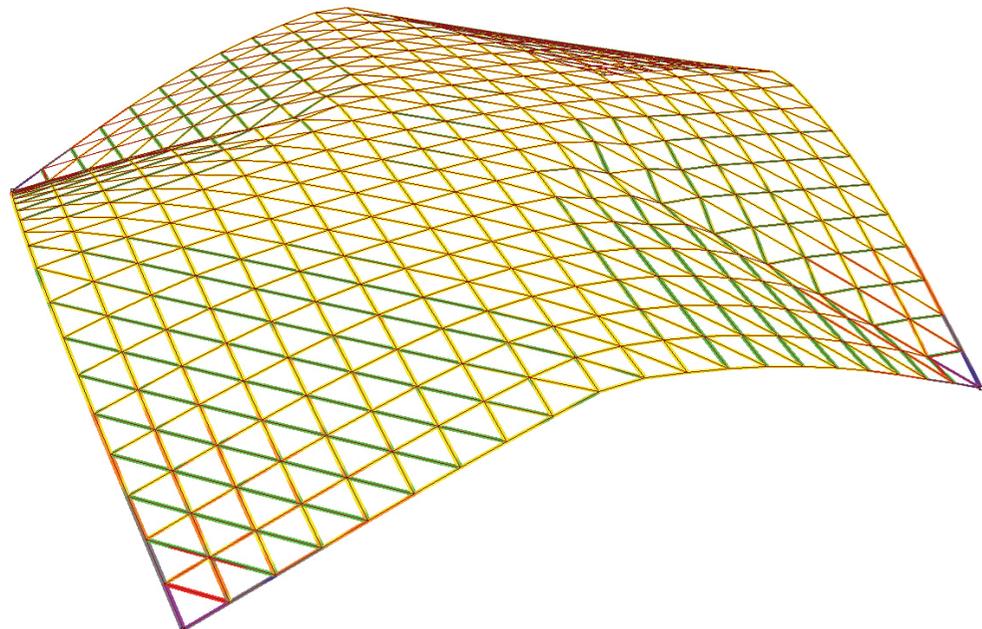
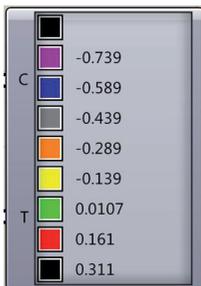
3.1.13 Übersicht der durch Belastung eintretenden **Längenänderungswerte pro Meter**. Wie die Normalkraftentwicklung schon zeigte, werden die Stäbe zum größten Teil gedrückt.

3.1.12 Querkräfte in Richtung Vz in kN.

Ausschnitt Auflagerzone



3.1.13 Längenänderung unter Belastung in mm/m

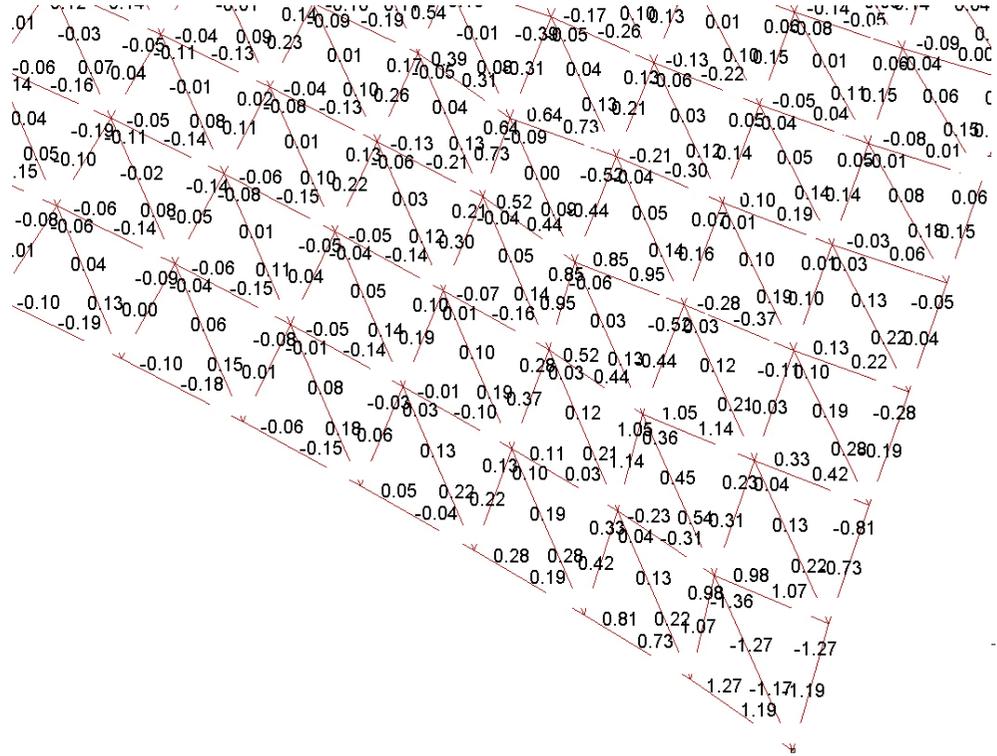


3.1.14 Auswertung der **Querkräfte in Richtung Vz bei verschiedenen Stablängen**, die Querkräfte sind im Bereich der Faltung um ca. 50% geringer.

3.1.13 Übersicht der durch Belastung eintretenden **Längenänderungswerte in Millimeter pro Meter**. Die Längenänderung steigt bei druckbelasteten Stäben wegen der besseren Ausnutzung der Querschnitts um ca. 5% an.

Querkräfte in Richtung Vz in kN.

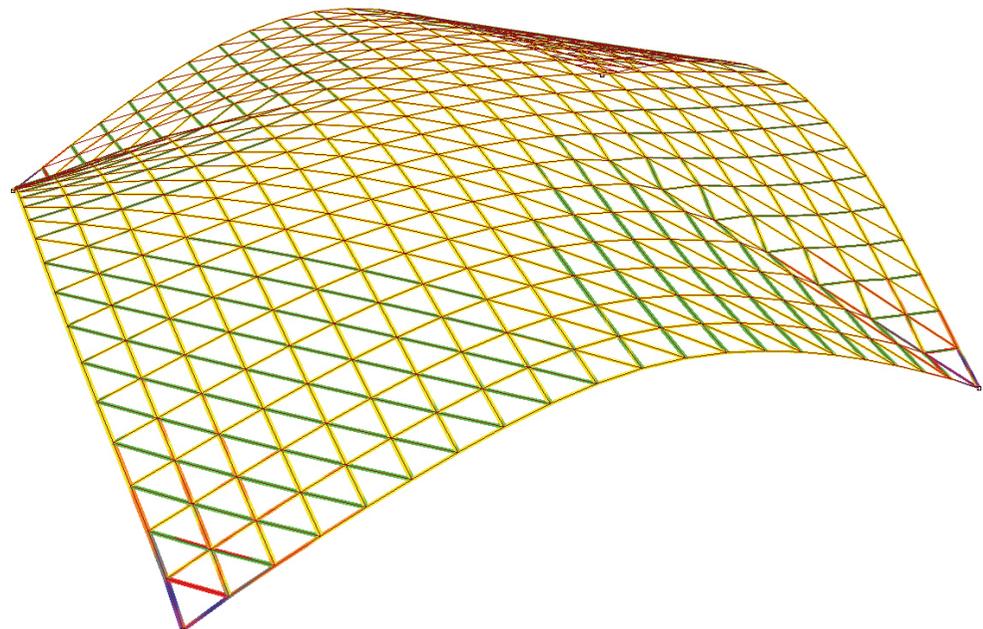
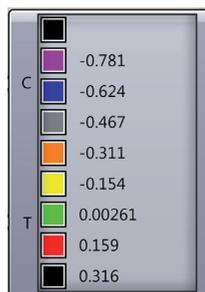
Ausschnitt Auflagerzone



3.1.14

Längenänderung unter Belastung in mm/m

3.1.15





---

Dennoch kann durch Karamba eine zu erzeugende Schale während der Formfindung optimiert und die gewünschte Konkretisierung der Formfindungsmethode erreicht werden. Das bedeutet, dass die Karamba Auswertung durch Ändern des Gitternetzes im Bezug auf Maschengröße und Ausrichtung, sowie der Erhöhung der Schalenkrümmung in der Simulation berücksichtigt werden kann und eine neuerliche Analyse der optimierten Struktur erfolgt.

Die Auswertung der Verformungen, Schnittkräfte und Auflagerreaktionen erscheint in ihrer Ganzheit schlüssig und läßt nicht auf signifikante Ungenauigkeiten schließen. Ermittelt sind weiters Dehnungen aufgrund von Krafteinflüssen und maximal auftretende Gesamtspannungen in Stabachse.

Die Auswertungen zeigen, dass die an die Auflagerpunkte geknüpften Elemente ungleich stärker belastet werden, sie müssen Beanspruchungen aufnehmen, die um ca. 50 % höher sind als die der übrigen Struktur. Diese Elemente sollten nicht als maßgeblich für die Bemessung der Module gelten, da die Schnittstelle Struktur-Auflager eine Lösung erfordert, mit der die homogene Tragstruktur geometrisch richtig aufgenommen werden kann. Geplant ist, die Kontaktflächen der theoretisch letzten Elemente in die Auflager zu integrieren, es entsteht also ein massives, geometrisch dem Randelement entsprechendes Lager, das ebenfalls aus Beton gefertigt werden kann.

Vergleichend gegenübergestellt weisen eine inhomogene- und eine Schale aus identen Einzelteilen markant unterschiedliche Verformungsfiguren auf. Nach dem Angleichen der Seitenlängen steigt die Verformung unter der gleichen Last um ca. 35% an. Die resultierenden maximalen Spannungen in den Stäben bleiben hingegen annähernd ident und sind in beiden Fällen deutlich höhere Druck- als Zugspannungen.

Dieser Umstand weist auf eine gleichmäßigere Verteilung der Kräfte vor der Angleichung und auf die immense Wichtigkeit einer äußerst steifen Knoten-, bzw. Verbindungslösung bei der späteren Konzipierung der Flächentragwerke hin.

Weitere stärker belastete Zonen bilden sich laut den Analysen durch Karamba an den Scheitelpunkten der Gitterschalen, sowie an Stellen mit besonders flacher Krümmung. Die Auswertung der Querschnittsauslastung zeigt jedoch, dass meist schon bei Werten von 50% der aufnehmbaren Maximalspannungen des Materials die Verformung des Tragwerks zu hoch ist und deshalb der Durchmesser der Stäbe vergrößert werden muss.

Die Bereiche zwischen Auflager- und Scheitelzonen hätten also bei einem immer gleichen Bauteil genug Reserven um Öffnungen zuzulassen, es könnten somit aus den geplanten Plattenelementen Ausschnitte entfernt und der Beton durch Glas ersetzt werden. Deutlich zu erkennen ist weiters auch der Einfluss der Stablängen auf eine größere Verformung. Längere Stäbe, also weniger Elemente pro Flächeneinheit, erzeugen höhere Verformungswerte.

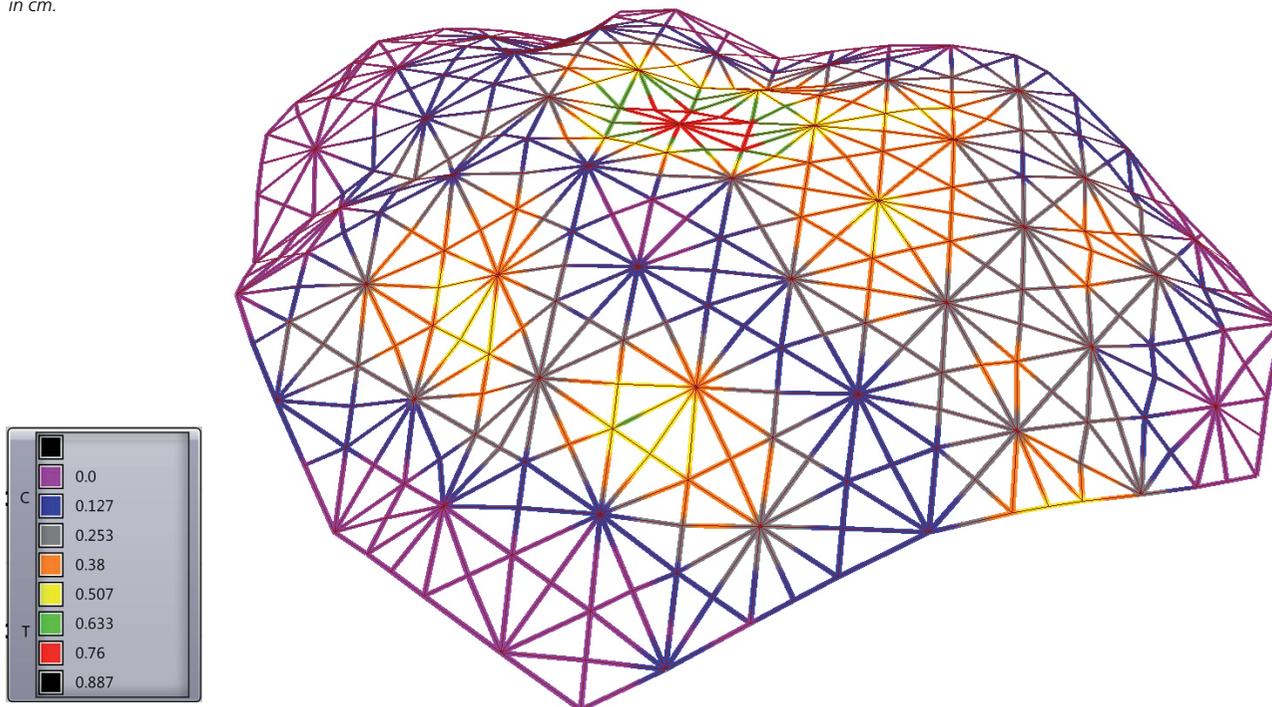
## ANALYSE WEITERER SCHALLENGEOMETRIEN

Zur Bewertung von auftretenden Unregelmäßigkeiten, wie lokalen Asymmetrien, starken Auffaltungen und besonders flachen Schalenbereichen, werden nun weitere unterschiedliche Schalentypen auf ihre Gebrauchstauglichkeit untersucht und miteinander verglichen.

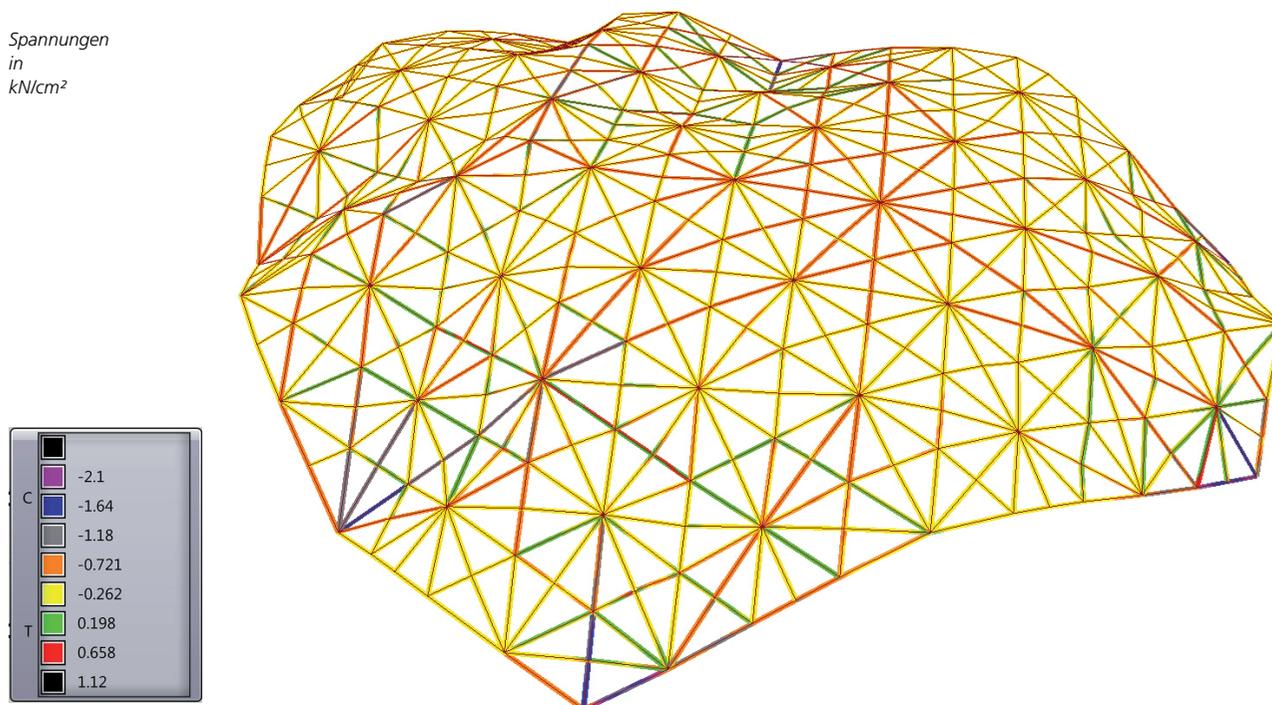
3.1.16 **Verformung einer Geometrie, die über eine Vielzahl an Auffaltungen und vier Achsrichtungen verfügt.**  
 Lagerpunkte: 8, max. Spannweite 23 m, Stabquerschnitt 10 cm, Beton: C90/105, Stablängen: 163.5 cm, 141.6 cm, 81.8 cm. Eigengewicht: 22 Tonnen, Schneelast 2kN/m<sup>2</sup>. Die maximale Verformung der Struktur beträgt 7.5 mm.

3.1.17 Visualisierung der auftretenden maximalen Gesamtspannungen, Werte in kN/cm<sup>2</sup>.  
 Die erzeugte Schalengeometrie scheint trotz der Faltungen und ihrer Kleinteiligkeit keine extremen Schwachstellen auszubilden.

3.1.16 Verformung  
in cm.



3.1.17 Spannungen  
in  
kN/cm<sup>2</sup>

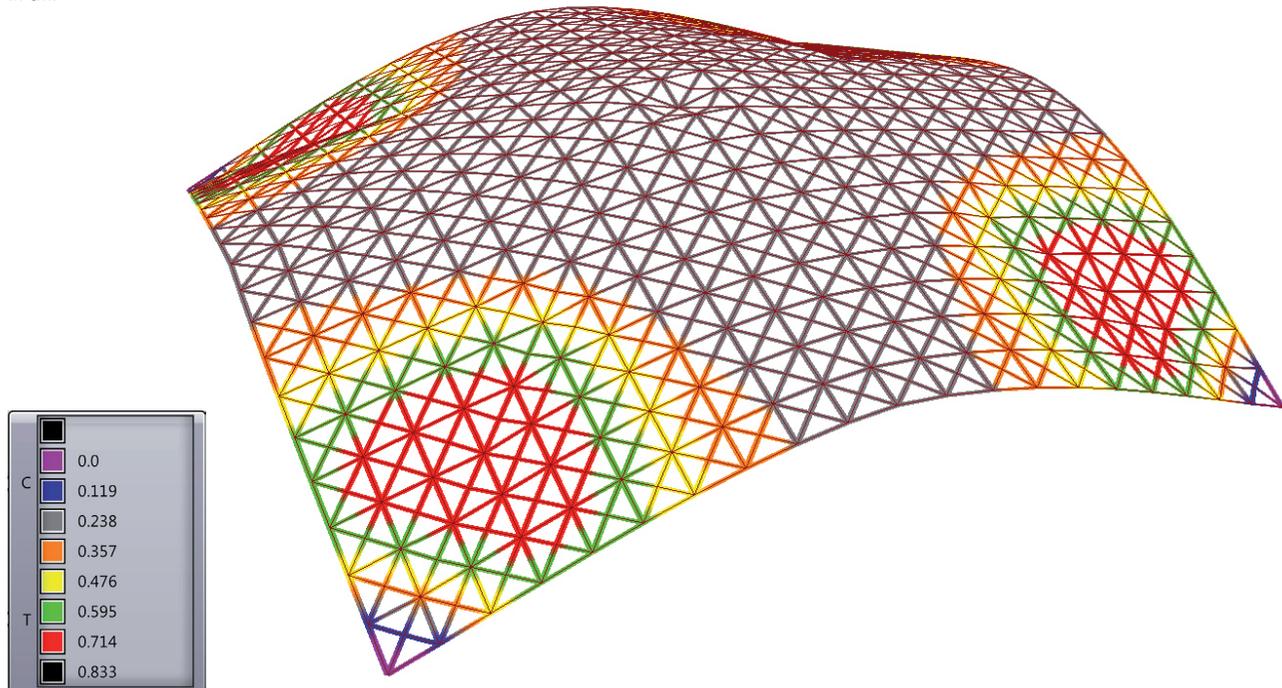


3.1.18 **Analyse einer Gitterschale, die an ihrer höchsten Stelle eine lokale Asymmetrie aufweist.** Lagerpunkte: 4, max. Spannweite 27 m, Stabquerschnitt 12 cm, Beton: C90/105, Stablängen: 103 cm, 72 cm. Eigengewicht: 56 Tonnen, Schneelast 2 kN/m<sup>2</sup>. Die maximale Verformung der Struktur beträgt 7 mm. Die Schalengeometrie ist trotz der Eindellung an der Spitze äußerst tragfähig und überdeckt denselben Grundriss wie Struktur 3.1.1 bei einer um 50% geringeren Verformung. Grund hierfür ist die kürzere Stablänge, sowie die dadurch erzeugte feinere Gitterauflösung.

3.1.19 Visualisierung der auftretenden maximalen Gesamtspannungen der Struktur; Werte in kN/cm<sup>2</sup>.

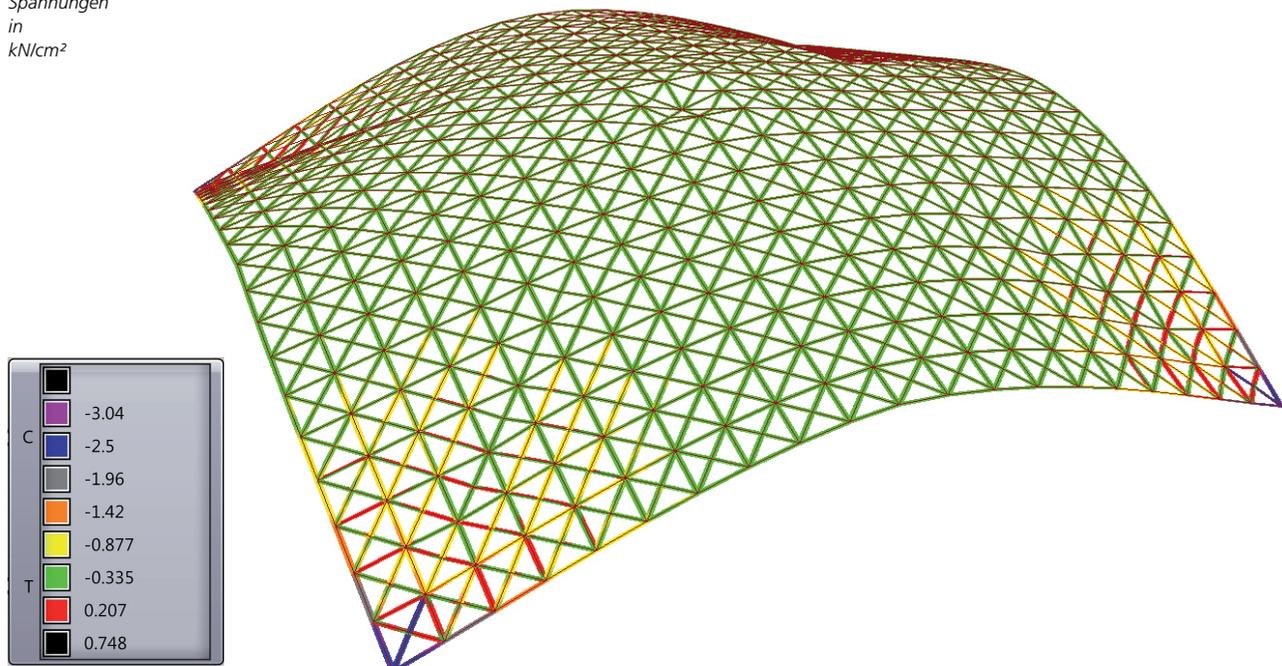
Verformung  
in cm.

3.1.18



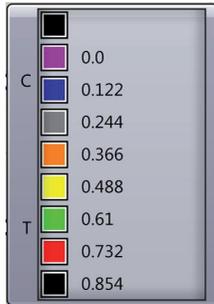
Spannungen  
in  
kN/cm<sup>2</sup>

3.1.19

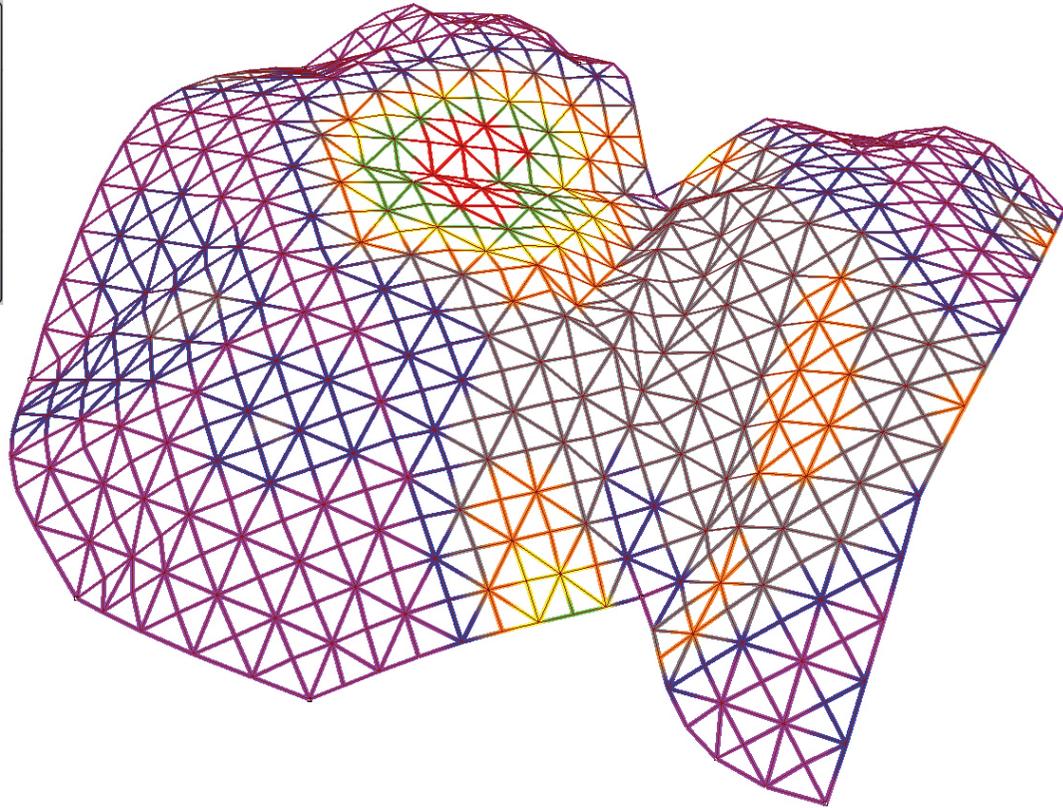


3.1.20, 3.1.21 **Vergleich der** unter «Einflüsse der Lagerpunkte» **korrigierten Struktur mit der ursprünglichen Variante.** Max. Spannweite 22 m, Stabquerschnitt 8 cm, Beton: C 90/105, Stablängen: 103 cm, 72 cm. Eigengewicht: 17 Tonnen, Schneelast 2 kN/m<sup>2</sup>. Die maximale Verformung der Struktur beträgt zuvor 7 mm, nach der Lagerpunktänderung steigt der Wert um über 60% (16 mm) an. Ausschlaggebend hierfür sind die auf Grund der Lagerpunktminimierung strukturintern gestiegenen Spannweiten und die größere lichte Höhe. Die Korrektur war also konstruktiv und formal sinnvoll, hatte aber keinen positiven Einfluss auf das Tragverhalten.

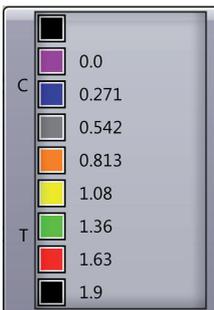
3.1.20



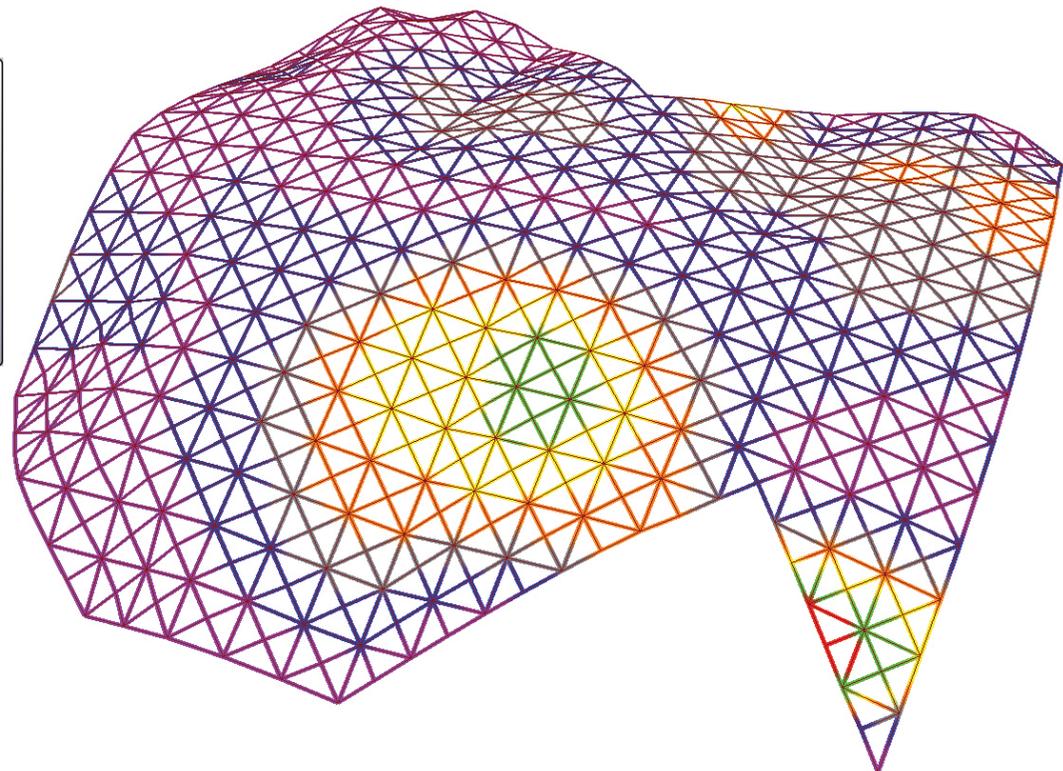
Verformung  
in cm.



3.1.21



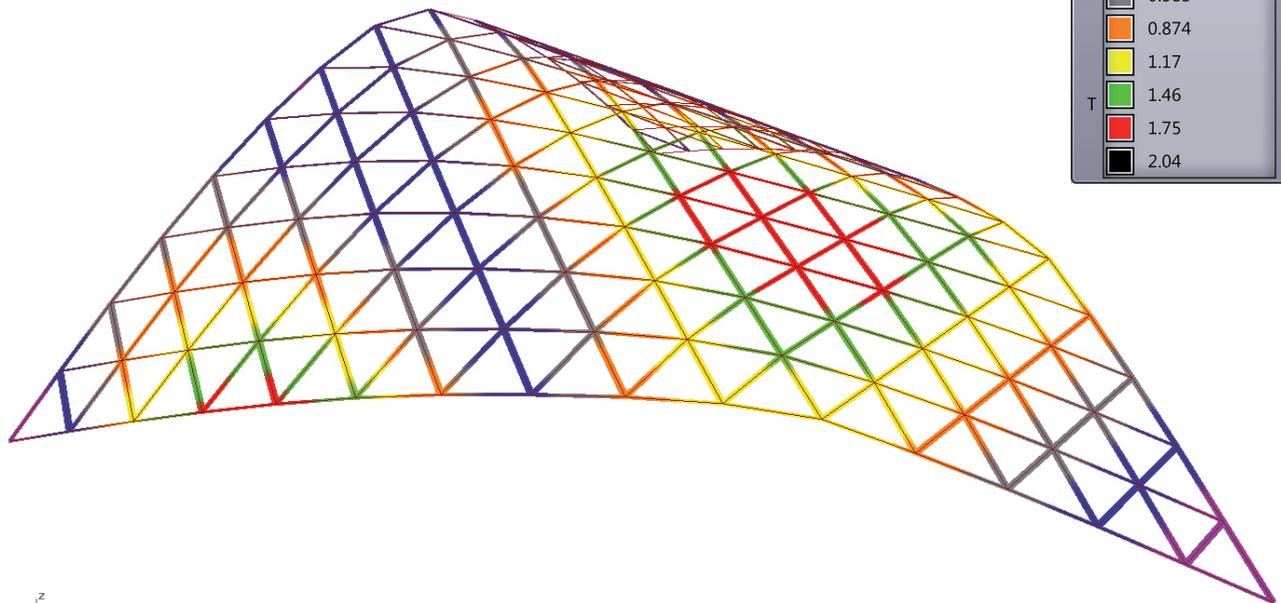
Verformung  
in cm.



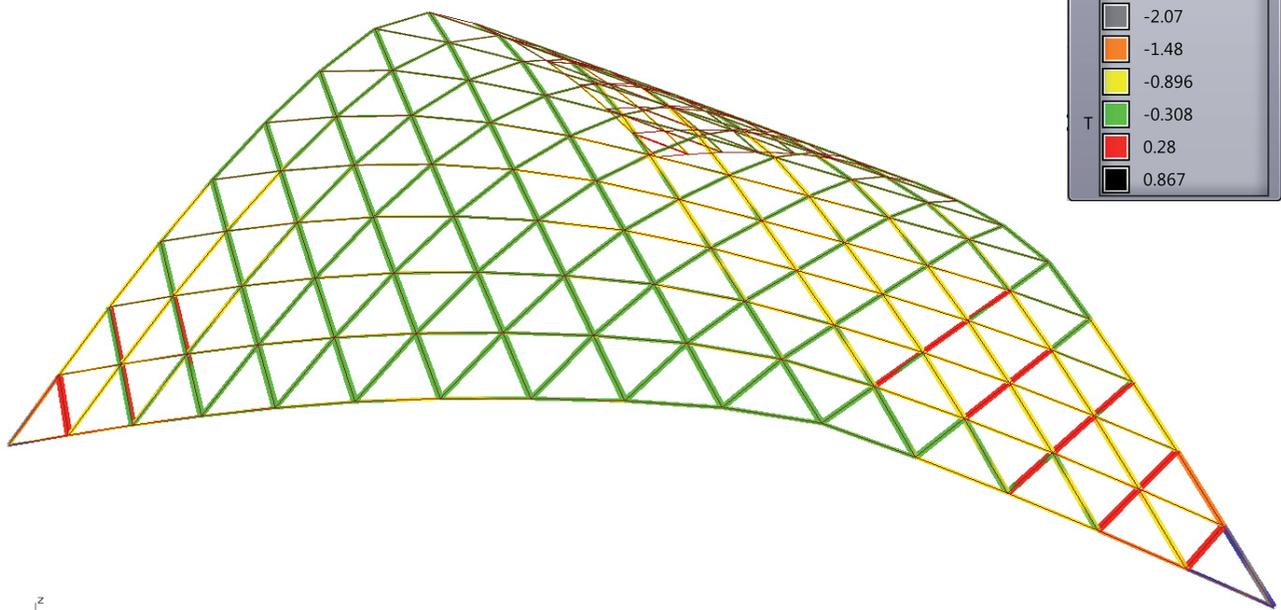
3.1.22, 3.1.23 **Analyse eines geometrisch simplen Schalentyps.** Durch die geringe Anzahl an Auflagern, die gleiche Anzahl an Achsrichtungen und eine durchschnittliche Seitenlänge können genauere Aussagen über das zu entwickelnde Element selbst getroffen werden.

Max. Spannweite 16.7 m, Stabquerschnitt 10 cm, Beton: C 90/105, Stablänge: 116 cm, Eigengewicht: 8.2 Tonnen, Schneelast 2 kN/m<sup>2</sup>. Obwohl die Verformung mit 1.7 cm auf 16 Metern die größte im Vergleich zu den anderen Strukturen ist, nehmen die Spannungen nur minimal zu.

Verformung  
in cm.

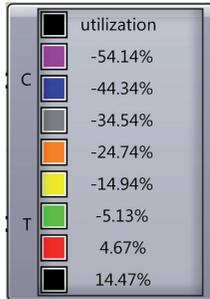


Spannungen in  
kN/cm<sup>2</sup>

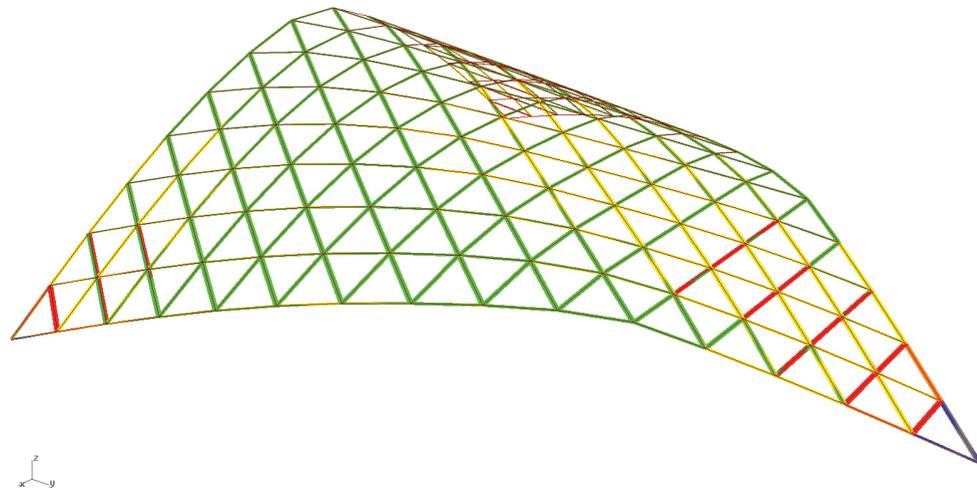


3.1.24 **Auswertung des Nutzungsgrades** eines gewählten Betonquerschnitts, die Struktur weist im Vergleich zu den anderen Geometrien eine hohe Verformung bei einer eher geringen Spannweite auf. Obwohl die maximale Auslastung im Strukturinneren bei 15% liegt, scheint das Tragwerk nicht ausreichend steif zu sein. Da dieser Schalentyp von allen gezeigten der einzige mit erkennbaren Abweichungen bei der Auswertung durch Karamba ist und ein überschaubares Grundsystem für die weitere Entwicklung benötigt wird, bildet dieses Gitterschalmodell die Vorlage für einen baubaren Prototypen .

3.1.24



Auslastung der Stabquerschnitte  
in %,  
Stabdurchmesser :10 cm  
Beton: C 90/105  
Stablänge:116 cm



Die Auswertungen der unterschiedlichen Geometrien zeigen, dass Auffaltungen in den Strukturen grundsätzlich nicht als Fehlstellen zu bewerten sind, da sie offensichtlich keinen eindeutig negativen Einfluss auf das Tragverhalten haben. Auch lokale Asymmetrien verschlechtern die Leistungsfähigkeit des Tragwerks nicht merklich. Deutlich wird jedoch, dass wie zu erwarten Zonen mit besonders flachen Krümmungen starke Verformungen und Spannungen aufweisen.

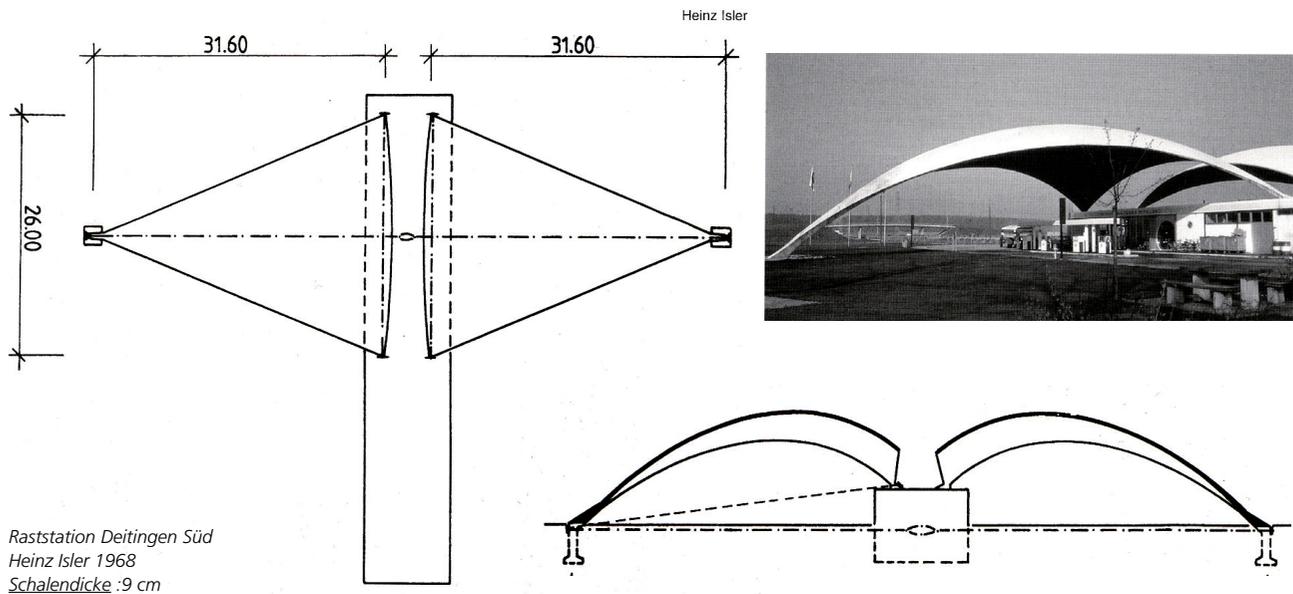
Die Annahme einer eingespannten Lagersituation bedeutet in der Realisierung einen großen Mehraufwand bei der Tragwerksplanung und ist nicht üblich. Es kann dadurch aber eine Aussteifung der Gesamtstruktur erfolgen, die auch bei eingespannten Bogentragwerken genutzt wird.

Karamba erfüllt die Aufgabe der Überprüfung und Verbesserung der Geometrien während der Formfindung. Eine zu erzeugende Schale kann somit einfach und in derselben Softwareumgebung gebildet und optimiert werden, um anschließend an der erfolgversprechendsten Variante eine Vordimensionierung als Plattentragwerk vorzunehmen.

Die Auswertung der für Verformung, Auslastung und Schnittkräfte berechneten Werte liegt im nachvollziehbaren und wiederholbaren Bereich und ist auch in den Vergleichssituationen logisch und stimmig. Infolge der vergleichbaren Werte der analysierten Strukturen zeigte sich die Geometrie aus gleichseitigen Dreiecken 3.1.22 als Ausnahme. Bei einer relativ geringen Spannweite (17 m) entstand eine maximale Verformung von 2 cm bei einem Stabquerschnitt von 12 cm. Dieser Wert übertrifft alle anderen und ist auf die Stablänge, also die geringe Anzahl an Elementen und die niedrige Auflagerzahl, zurückzuführen. Aufgrund dieser Tatsache würde sich diese Struktur ideal zur weiteren Untersuchung eignen, da die Einflussgrößen weniger umfangreich sind und das eigentliche Fertigteil in den Vordergrund rückt.

3.2.1 Dem gewählten Schalentyp zur Herstellung eines Prototypen ähnliche, realisierte Doppelschale von Heinz Isler. Bei einer minimalen Materialstärke von 90 mm überspannt eine einzelne Schale ca. 32 Meter. Die beiden Teile sind durch Spannkabel miteinander verbunden und bilden dadurch ein geschlossenes System. Auch in der zweiten Achsrichtung wird der auftretende Horizontalschub durch ein Spannkabel abgefangen.

3.2.1



## PROTOTYP

Um vergleichbare und konkrete Werte für Elementgrößen, auftretende Schnittkräfte, Biege-  
spannungen in den Plattenelementen und Schnittstellen zu erhalten, wird für die weitere Ent-  
wicklung von einem einfach umzusetzenden Schalen-Prototypen ausgegangen.

Diese Schalengeometrie wird auf Basis der bisher erarbeiteten Inhalte gebildet und in einer  
Finite Elemente Analyse untersucht. Das gleichseitige Dreieck scheint an diesem Punkt der Ent-  
wicklung aufgrund seiner Eigenschaften das beste, weil simpelste Element für die Planung der  
weiteren Aspekte zu sein. Vorzüge aufgrund der Symmetrie sind bei der Entwicklung der Verbind-  
ungsweisen und deren umfassenden Parametrisierung zu erwarten, sowie bei der Fertigung und  
Montage der Fertigteil-Elemente.

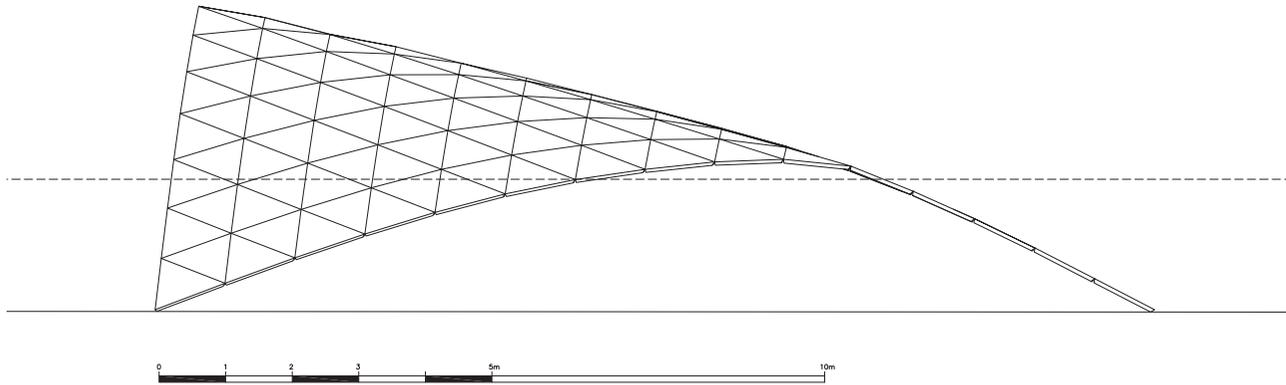
Da parkettierte, gleichseitige Dreiecke, wie zuvor erläutert, nur wieder Dreiecke desselben  
Typs oder ein Vielfaches davon abbilden können (Sechsecke), fällt die Wahl auf eine Schale, die  
an drei Punkten gelagert ist und eine dreieckige Grundfläche überdeckt.

<sup>7</sup> Vgl.  
Chilton, John: *The Engineers  
Contribution to contemporary  
Architecture.* HEINZ ISLER,  
London 2000, 92-95.

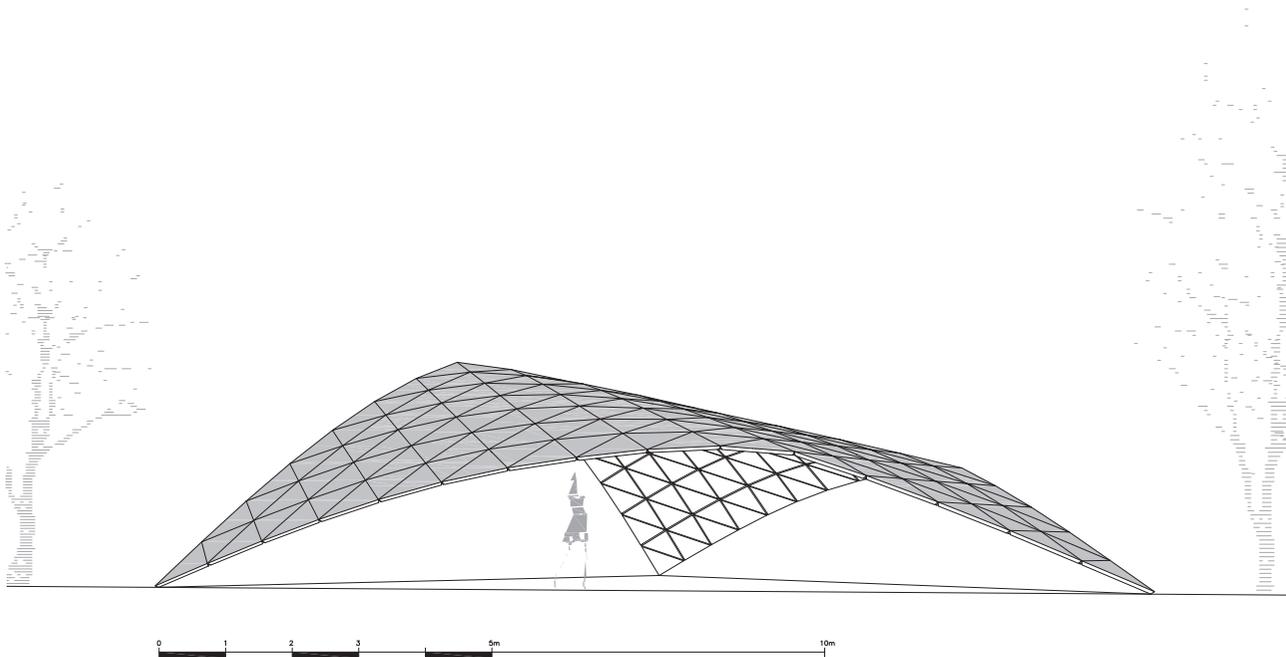
Vorbild und Referenz hierfür kann die unter «Formfindungsmethoden des Betonschalensbaus»  
gezeigte Schale von Heinz Isler sein, die in Deitingen eine Raststation beherbergt. Signifikante  
Abweichungen gibt es im Sinne einer späteren Realisierung bei den beiden höherliegenden, par-  
allelen Auflagern. Die Hängepunkte werden bei der Simulation also in einer gemeinsamen Ebene  
liegen. Die gewählte Geometrie ist auch in den Dimensionen um 50% skaliert und nicht, wie die  
Isler-Schale, Teil eines verknüpften Mehrschalensystems. <sup>7</sup>

3.2.2 Seitenansicht des umzusetzenden Prototypen. Die folgenden Entwicklungen werden am Beispiel dieser Fertigteilschale ausformuliert. 225 idente, gleichseitige Dreiecke sollen zu einer selbsttragenden Struktur zusammengefasst werden. Die Seitenlänge der Elemente liegt mit 116 cm im mittleren Bereich der theoretisch möglichen Abmessungen. Die Gesamtstruktur zeigte sich in den bisherigen Analysen stärker verformungsanfällig und ist deshalb ideal, um mit dem auf dieser Grundlage konstruierten Fertigteile und dessen Verbindungsvariante auch weniger stark beanspruchte Schalen realisieren zu können.

3.2.2



3.2.3

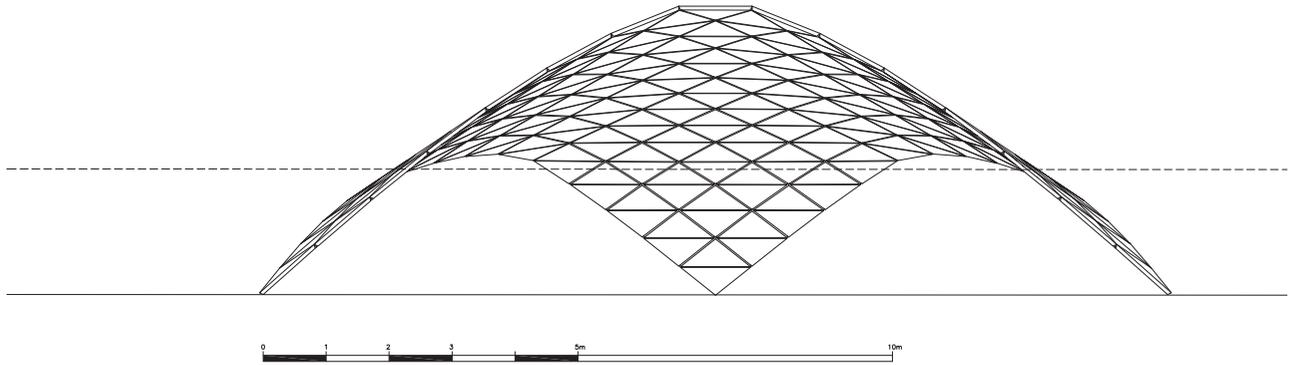


3.2.3 Perspektivische Darstellung des Schalenentwurfs.

3.2.4 Die Frontansicht zeigt den maximalen Faltungswinkel der Elementschale, dieser beträgt  $22^\circ$  und tritt am Schalenscheitel auf ( $11^\circ$  pro Element). Verschnidungen der Elemente aufgrund der jetzt zu berücksichtigenden dritten Plattendimension werden auf der Schaleninnenseite vorgesehen.

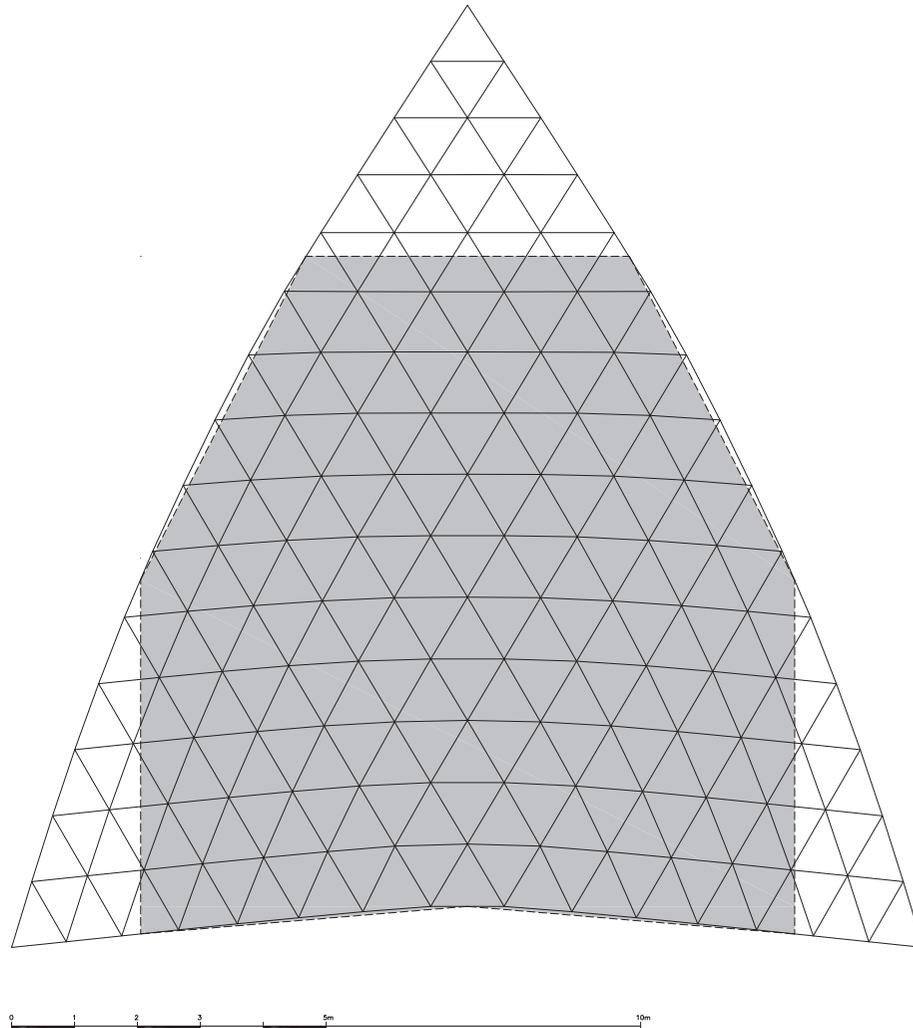
3.2.5 Eine nutzbare Fläche von  $96.4 \text{ m}^2$  wird unter dem dreieckigen Umriß gebildet, als nicht nutzbar werden Bereiche unter  $2 \text{ m}$  Raumhöhe gewertet.

3.2.4



*Nutzfläche* :  $96.4 \text{ m}^2$   
*Höhe* :  $460 \text{ cm}$   
*Spannweite X* :  $16.7 \text{ m}$   
*Spannweite Y* :  $12 \text{ m}$   
*Stablänge* :  $116 \text{ cm}$   
*Elementanzahl* :  $225$

3.2.5

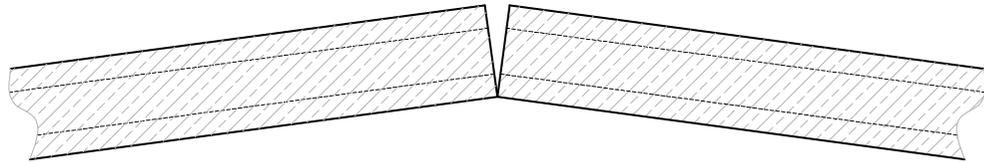


3.3.1 Stoßen zwei idente Fertigteile aneinander, kann die erstellte homogene Parkettierungskante an Innen- oder Außenseite liegen.

3.3.2 Um möglichst kleine Fugenmaße an der bewitterten Außenseite zu erhalten, werden diese Kanten nach außen gelegt. An der Innenseite entstehen dadurch Verschneidungen der Plattenelemente. Notwendige Änderungen an den Fertigteilen aufgrund der Faltungswinkel werden durch mechanische Bearbeitung des Betons umgesetzt. Der Umfang dieser Nachbearbeitung wird von der Verbindungsvariante und den an den Schnittstellen zu übertragenden Kräften bestimmt.

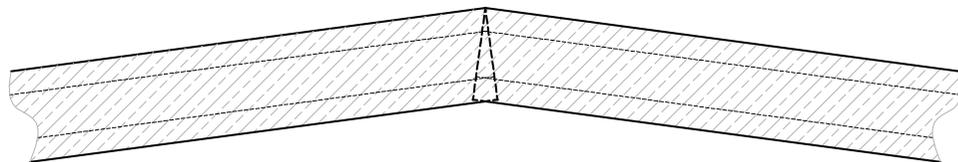
3.3.1

Homogene Parkettierung  
an Elementinnenseite angelegt.



3.3.2

Homogene Parkettierung  
an Elementaußenseite.



## VERBINDUNGSKONZEPT

Bevor der Schalenprototyp weiterentwickelt und in einem Finite Elemente Programm vorbemisst werden kann, muss ein Verbindungskonzept definiert werden. Da die immer gleichen Elemente gefügt werden müssen und die einzige sich ändernde Größe, der Winkel zwischen den einzelnen Bauteilen, nicht durch viele verschiedene zusätzliche Bauteile gelöst werden soll, ist eine variable Lösung zu entwickeln.

Um ein gleichmäßiges Fugenbild an der Außenseite zu erhalten und die Witterungsbeständigkeit des Betons maximal auszunützen, wird die Parkettierungskante an die Außenseite der Elemente gelegt, der Berührungspunkt bildet somit eine gedachte Drehachse. Dies bedeutet, dass die Elemente um den größten auftretenden Knickwinkel in der Struktur freigestellt sein müssen oder die gesamte Kontaktfläche den jeweils notwendigen Winkel aufweisen muss. Ein breiteres und unregelmäßiges Fugenbild entsteht dadurch an der Schaleninnenseite, wobei diese Fugen eventuell durch mögliche bauphysikalische Maßnahmen, wie eine Wärmedämmung, verdeckt werden können.

*Bei der Herstellung von Vollformen muss die zerstörungsfreie Entformbarkeit der Elemente berücksichtigt werden. Der Aufbau der Formen ist in Kapitel 5 beschrieben.*

Zusätzlich ermöglicht diese Ausrichtung einen einfacheren Schalungsaufbau und eine einseitige mechanische Bearbeitung bei der Herstellung der Elemente. Die mechanische Bearbeitung nach dem Betoniervorgang kann also entweder an der ganzen Kontaktfläche oder an einigen Punkten, die von einer Freistellung ausgenommen sind, erfolgen.

Nach einer überschlagsmäßigen Vordimensionierung der zur Fügung notwendigen Teile können Verbindungstechniken für Betonfertigteile auf ihre Eignung überprüft werden. Die ausgewählten Varianten müssen dann weiter konzeptionell auf die Anforderungen der entwickelten Modulbauweise angepasst werden. Unterschieden wird grundsätzlich die Fügung bei voller Kontaktfläche oder die partielle Verbindung an kleineren Flächen.

3.3.3 Der maximale Faltungswinkel kann am Großteil des Umfangs aller Elemente freigestellt sein, nachgefräst müssen dann nur Ansätze werden, die regelmäßig verteilt sind.

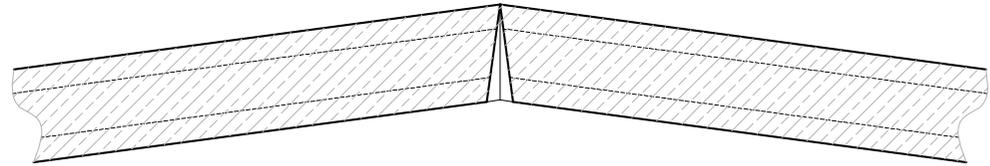
3.3.4 Kontaktflächen können zur Gänze an den Verbindungswinkel angepasst werden. Da dies eine Nachbearbeitung am gesamten Elementumfang bedeuten würde, wäre eine Lösung bei der nur partiell Flächen gefräst werden müssen effizienter und weniger kostenintensiv.

3.3.5 **Beispiele für das Fügen bei voller Kontaktfläche;** die Elementbewehrungen werden in die Fuge geführt und überlappen sich dort. Die Fuge wird mit Beton ausgefüllt, um einen Verbund zu erzeugen.

3.3.6 Verkleben der Fertigteile mit zweikomponentigem Epoxidharzmörtel; geringe Fugenbreiten sind möglich.

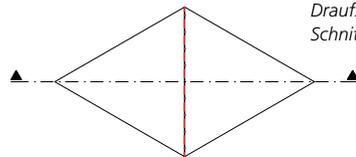
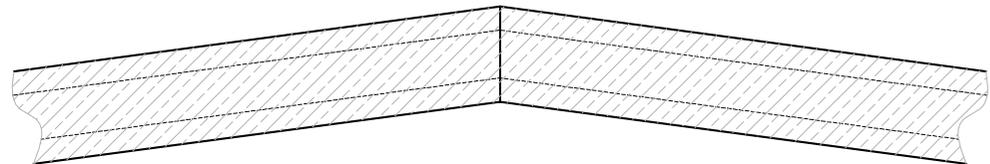
3.3.3

Fuge mit Freistellung und Ansätzen.



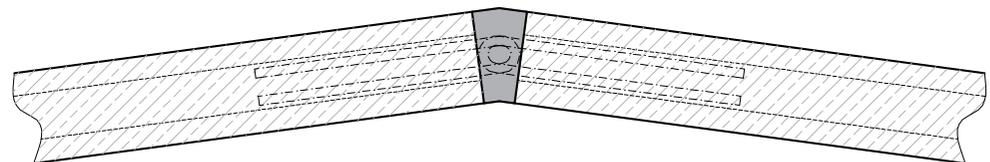
3.3.4

Volle Kontaktfuge



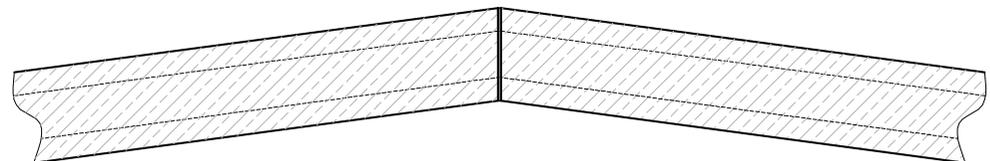
Draufsicht und Schnittführung

Ausbetonieren der Fugen bei überlappender Bewehrung.



3.3.5

«Verkleben» des Betons bei einer Fugenbreite von ca. 5 mm.



3.3.6

**Beispiele für kontinuierliche Verbindungen**

Die Beispiele auf Seite 71 und 72 zeigen prinzipiell anwendbare Verbindungstechniken, die noch nicht an die Randbedingungen, wie zum Beispiel das Bewehrungskonzept, statische Anforderungen oder die variablen Faltungswinkel angepasst sind. Es besteht jedoch grundlegend die Möglichkeit, die Elemente durch eine lösbare Verschraubung oder Stahlimplantate zu verbinden, zu verkleben oder die Fugen auszubetonieren.

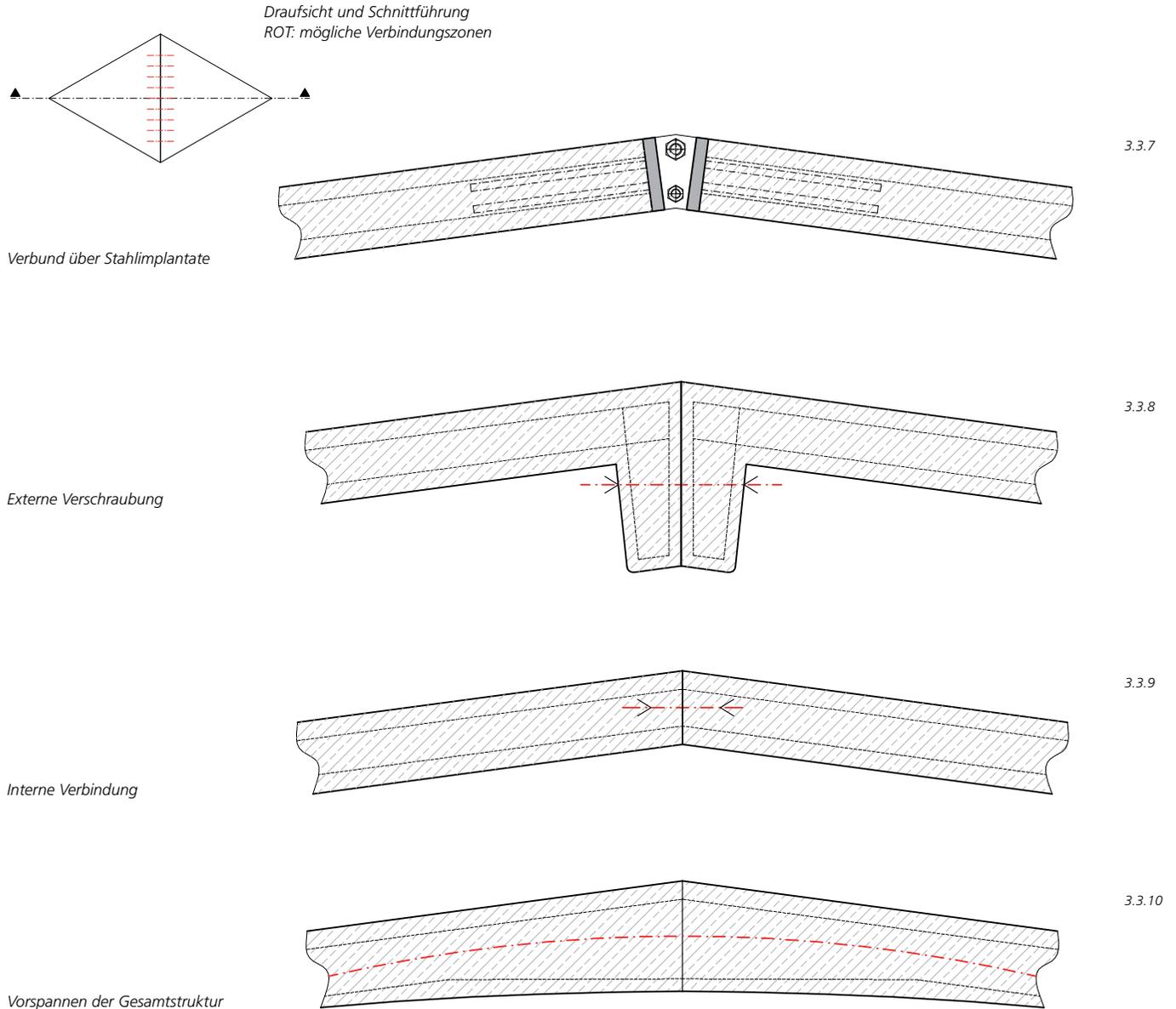
Durch die durchgehend digitale Entwicklung stehen alle notwendigen Daten für die Fertigung der Elemente jederzeit zur Verfügung. Die Geometrie kann durch ein CAD/CAM System auf die

3.3.7 Verbindung durch Stahlimplantate; die Stahlbauteile werden tief in den Betonelementen verankert, der Verbund wird durch das Einschweißen zusätzlicher Bauteile oder auch durch Verschraubung erzeugt.

3.3.8 Verschraubung von zusätzlichen Aufkantungen; Verbund durch punktuelle Überdrückung der Fuge durch Schraubverbindungen.

3.3.9 Interne Verbindung durch zusätzliche Bauteile; Verknüpfung der Elementbewehrungen im Fugenbereich.

3.3.10 Fügen durch Vorspannen der Gesamtstruktur; Spannkabel werden durch die Elemente geführt.



#### Beispiele für punktuelle Verbindungen

ROT: Zusätzliche Bauteile

Fertigteile übertragen und somit die einzige sich ändernde Größe, der Faltungswinkel exakt und effizient umgesetzt werden.

Die Elemente können anschließend gefügt werden und erzeugen somit selbst die geplante Form der Gesamtstruktur. Die Bearbeitung kann auch durch Auslesen der Winkel pro Fertigteil und anschließende konventionelle Fertigung erfolgen.

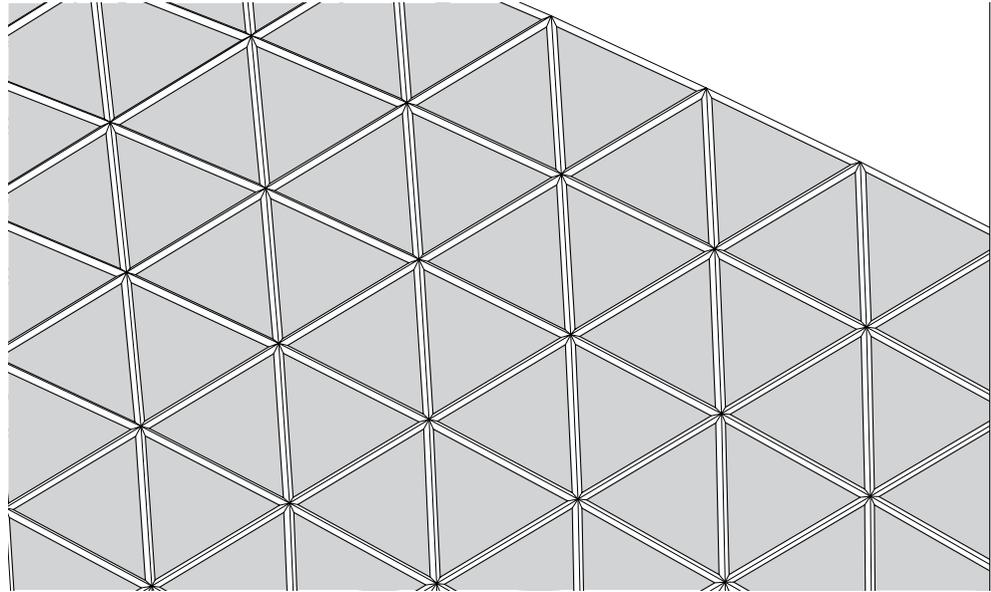
Eine weitere Bedingung ist die Verbindung der Fertigteile unter negativen Winkeln, um Faltungen in beiden Richtungen umsetzen zu können. Sollen die Anforderungen an diese, in das Konzept passende, Verbindungsvarianten ermittelt werden, müssen sie mit Hilfe von weiteren Skripts in das virtuelle Modell integrierbar sein.

---

3.4.1 Darstellung der Ausgabe eines Skripts zur Visualisierung und Auswertung der Plattendicken und Freistellungswinkel. Der maximale Faltungswinkel und die Plattendicke können per Skript sofort in das Fertigteil integriert werden.

---

3.4.1



---

## BERECHNUNGSMODELLE

Um genauere Aussagen über die in der Schale auftretenden Kräfte treffen zu können, ist es notwendig, die exportierte Geometrie weiter anzupassen.

Bis zu dieser Stelle bestehen die Schalenmodelle nach der Formfindung aus dreidimensionalen Polygonnetzen, die sich aus einfachen, dreieckigen und planaren Polygonen zusammensetzen.

Grundlegend müssen, im Unterschied zu den zuvor analysierten Strukturen, zunächst jeweils drei in sich geschlossene Stäbe eine einzelne Fläche einschließen, die das endgültige homogene Fertigteil simuliert und somit eine Änderung des statischen Systems von der Gitterschale zu flächig wirksamen Fertigteilsschalen darstellt.

Eine weitere wichtige, maßgebliche Größe sind die an den Elementschnittstellen entstehenden Kräfte. Sie sind die Grundlage für die Entwicklung und Dimensionierung des Verbindungsdetails. Um diese Kräfte ermitteln zu können wird ein Skript entwickelt, das die benötigten Flächen erzeugt und an den Berührungskanten kleine Verbindungsstäbe einsetzt. An diesen Stäben können in der folgenden Finite-Elemente-Analyse die maßgeblichen Schnittgrößen abgelesen werden, die an den Verbindungspunkten stehen.

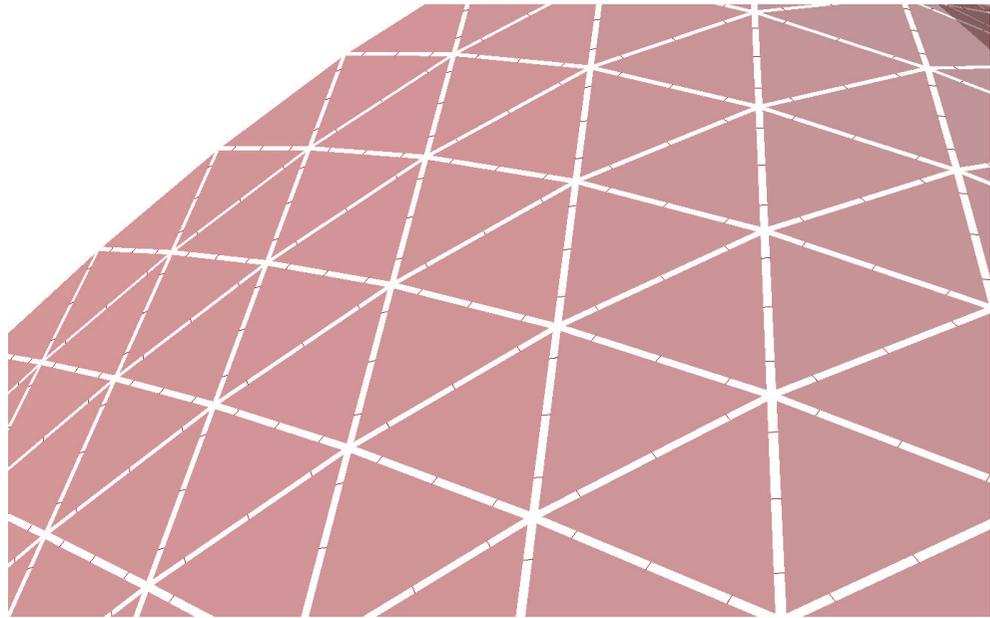
Durch dieses parametrische Werkzeug können gebildete Schalengeometrien in kürzester Zeit zur Berechnung adaptiert und anschließend mit verschiedenen Verbindungspunktanordnungen exportiert werden.

---

3.4.2 Für die Analyse in einem Finite Elemente Programm adaptierte Geometrie. Die Verbindungsstabanzahl und Position kann parametrisch editiert werden. Stabanzahl: 3  
4.4.3 Version mit Stabanzahl 5

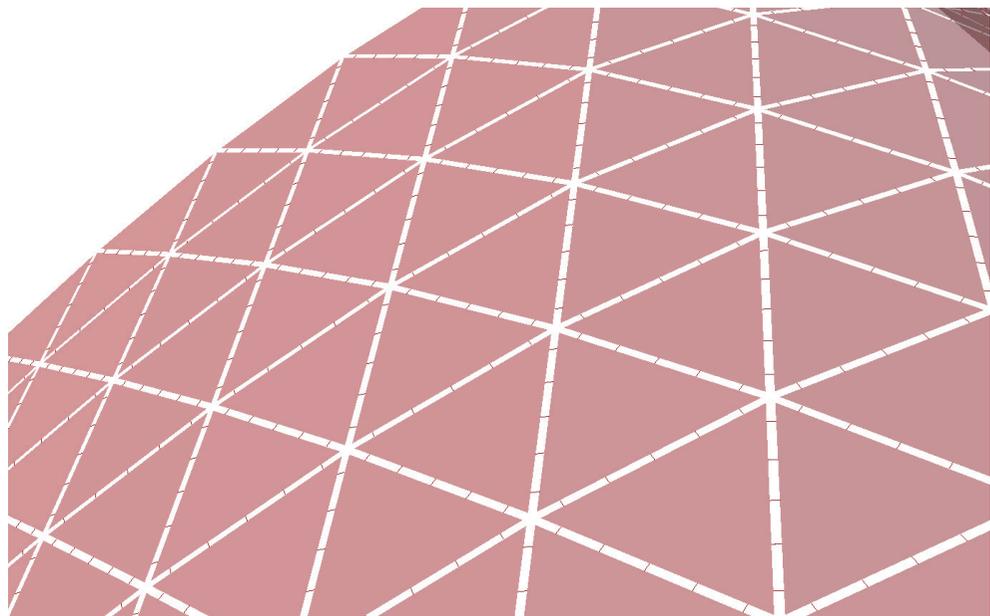
---

3.4.2



Die Stäbe dienen zur Auswertung der zu übertragenden Kräfte an den Verbindungsstellen.

3.4.3



Erzeugt durch Teilung der Seitenkanten und anschließende Verbindung der sich nächsten Punkte.  
Das Skript ist dadurch frei von Sortierungseinflüssen und kann für jede Struktur verwendet werden.

---

## FINITE ELEMENTE, DLUBAL RFEM

Die zuvor durch das Skript angepassten, virtuellen Modelle können nun in ein Finite Elemente Programm importiert werden, in dem eine Vorbemessung als Plattentragwerk erfolgen kann.

Vgl.  
[www.dlubal.de/rfem-4xx.aspx](http://www.dlubal.de/rfem-4xx.aspx)

Eine Software, die den Anforderungen des modernen Ingenieurbaus entspricht und deshalb einem professionellen Anwenderkreis bei unzähligen realisierten Objekten als Werkzeug dient, ist das Programm RFEM der Firma DLUBAL.

Das FEM-Statikprogramm für Platten, Scheiben, Schalen, Volumenkörper und Stabwerke dient zur Ermittlung von Schnittgrößen, Verformungen und Lagerreaktionen. Durch weitere Zusatzmodule kann RFEM um Bemessungsfunktionen erweitert werden und so zur Berechnung von kompletten Tragwerken aus unterschiedlichsten Materialien verwendet werden. RFEM verfügt über eine nahtlose Integration von AUTODESK AUTOCAD, ein in ACAD geöffnetes File kann ohne Zwischenschritte in die RFEM Softwareumgebung exportiert werden.

Über diese Schnittstelle funktioniert auch der Import von RHINOCEROS Files problemlos. Die zu analysierende Struktur kann in RHINOCEROS als dwg exportiert, und dann über die Autocad-Schnittstelle in RFEM geöffnet werden. Wichtig ist hierbei, dass Elemente, die als plattenartige Elemente erkannt werden sollen, in ACAD als 3D Faces gelten.

Ein durch die entwickelten Formfindungstools hergestelltes virtuelles Schalenmodell kann also ohne weitere Adaptierung importiert und berechnet werden.

Nach dem Import muss den einzelnen Elementen ein Material und eine Dimension gegeben werden. Sind Auflager und Lastfälle definiert, wird ein FE-Netz generiert und die Berechnung kann erfolgen. Zunächst sind die Geometrien auf Gebrauchstauglichkeit im Hinblick auf die maximale Verformung zu dimensionieren. Das bedeutet die Lasten, in diesem Fall Eigengewicht und eine frei gewählte Schneelast von 2 kN/m<sup>2</sup>, werden ohne Sicherheitsbeiwert zur Berechnung herangezogen. Entsprechen die Verformungswerte den gültigen Grenzbereichen, kann eine weitere Betrachtung der Struktur erfolgen.

Sollen für eine Vordimensionierung notwendige Werte, wie die Schnittkräfte in den Plattenelementen und den Verbindungsstellen auf Traglastniveau, ermittelt werden, muss eine Berechnung mit den vorgeschriebenen Sicherheitsbeiwerten, also 1.35 für ständige und 1.5 für veränderliche Lasten erfolgen.

Ziel der Analyse ist die Bestimmung der Bauteilstärke und die Ermittlung der an den Verbindungspunkten entstehenden Schnittgrößen. Diese Größen sind maßgeblich für die weitere Entwicklung einer Verbindungslösung wobei, wie unter «Verbindungskonzept» beschrieben, an dieser Stelle zwei verschiedene Schnittstellenlösungen möglich sind, die bei der Berechnung eine differenzierte Betrachtungsweise erfordern. Zum einen die Verbindung an einzelnen Punkten am Umfang, zum anderen ein theoretisch biegesteifer Zusammenschluss der vollen Kontaktflächen.

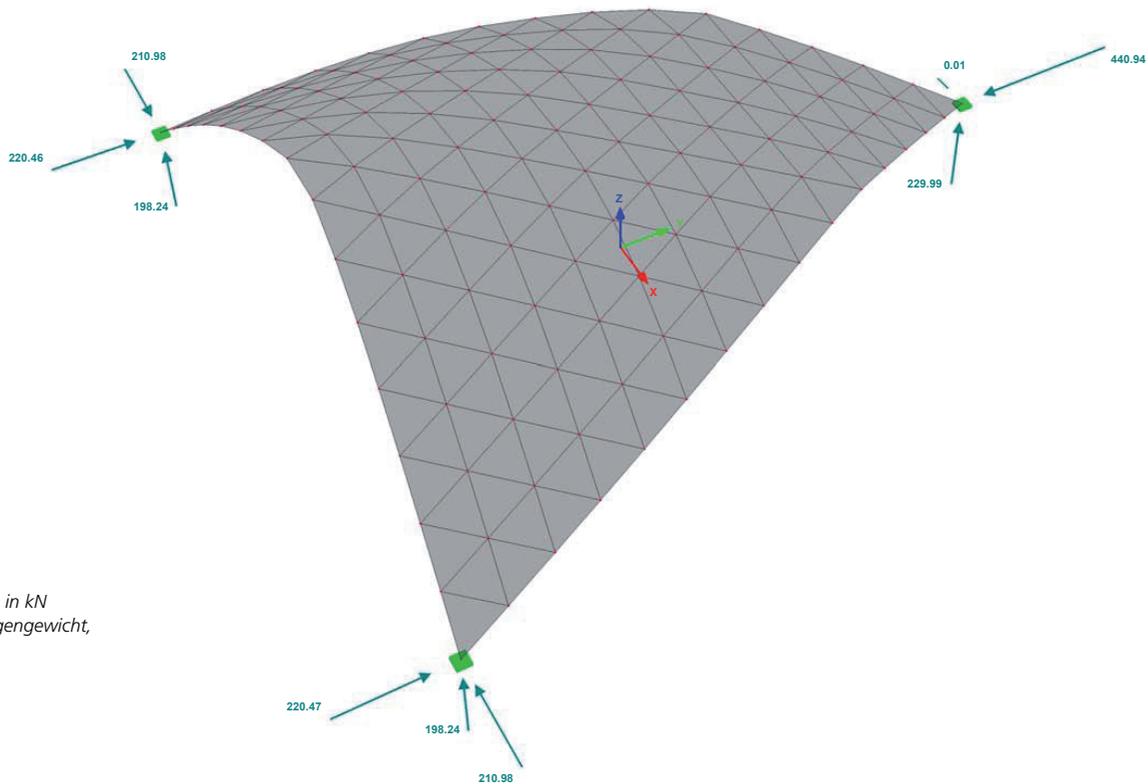
Um das Tragverhalten der Varianten zu prüfen, werden im Anschluss beide Versionen analysiert und verglichen.

Zusätzlich kann durch die RFEM Ergebnisse eine Bewertung bzw. Überprüfung der Karamba-Auswertungen erfolgen.

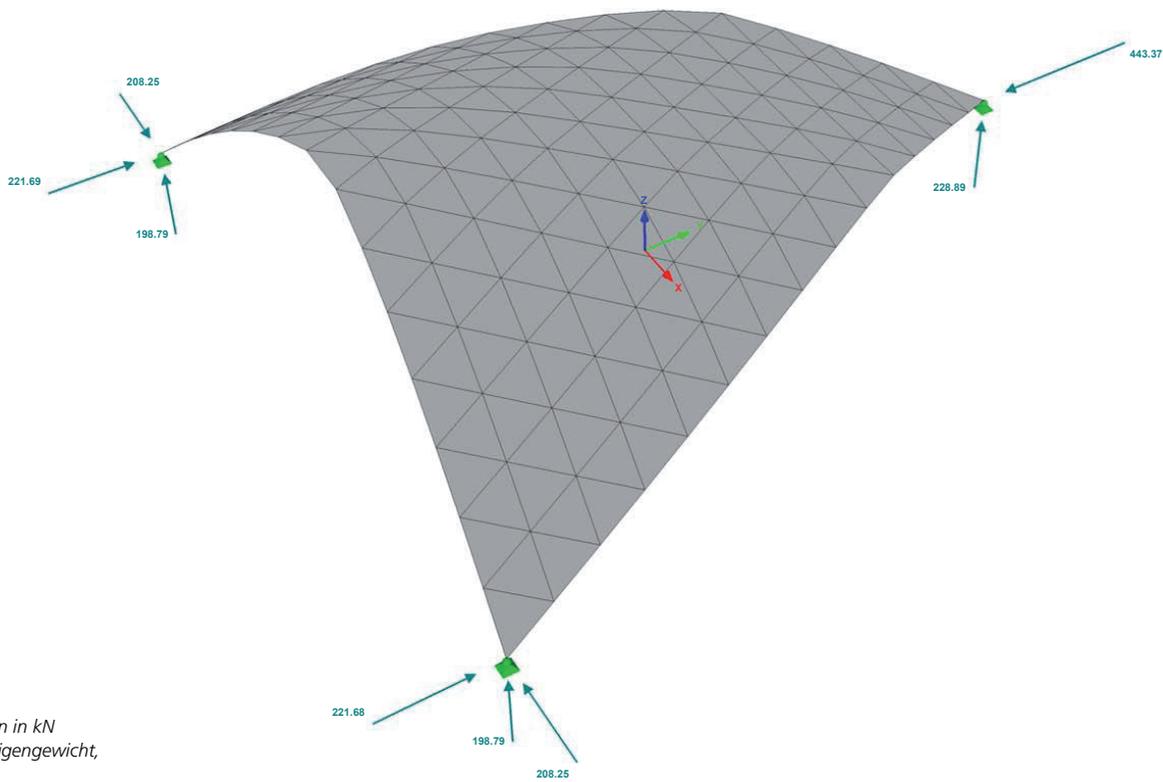
3.5.1 **Auswertung der Auflagerreaktionen** anhand der flächig verbundenen Schale in x, y, und z- Richtung **bei einer Einspannung**. Die Ergebnisse stimmen nach Abzug des nun höheren Eigengewichts und der Lasterhöhung durch Sicherheitsbeiwerte mit Karamba-Auswertungen überein.

3.5.2 Auswertung der Auflagerreaktionen anhand der flächig verbundenen Schale in x, y, und z- Richtung **bei gelenkiger Lagerung**, Einheit kN.  
Der auftretende Horizontalschub kann durch Spannkabel zwischen den Auflagern aufgefangen werden.

3.5.1

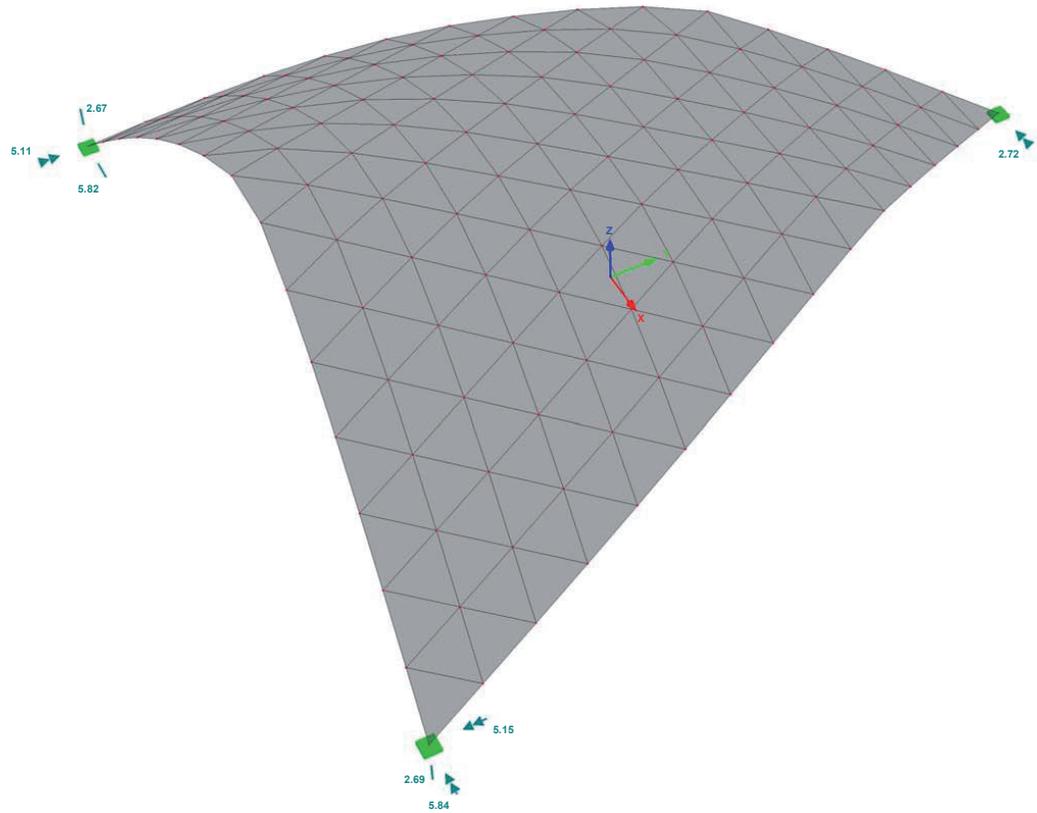


3.5.2

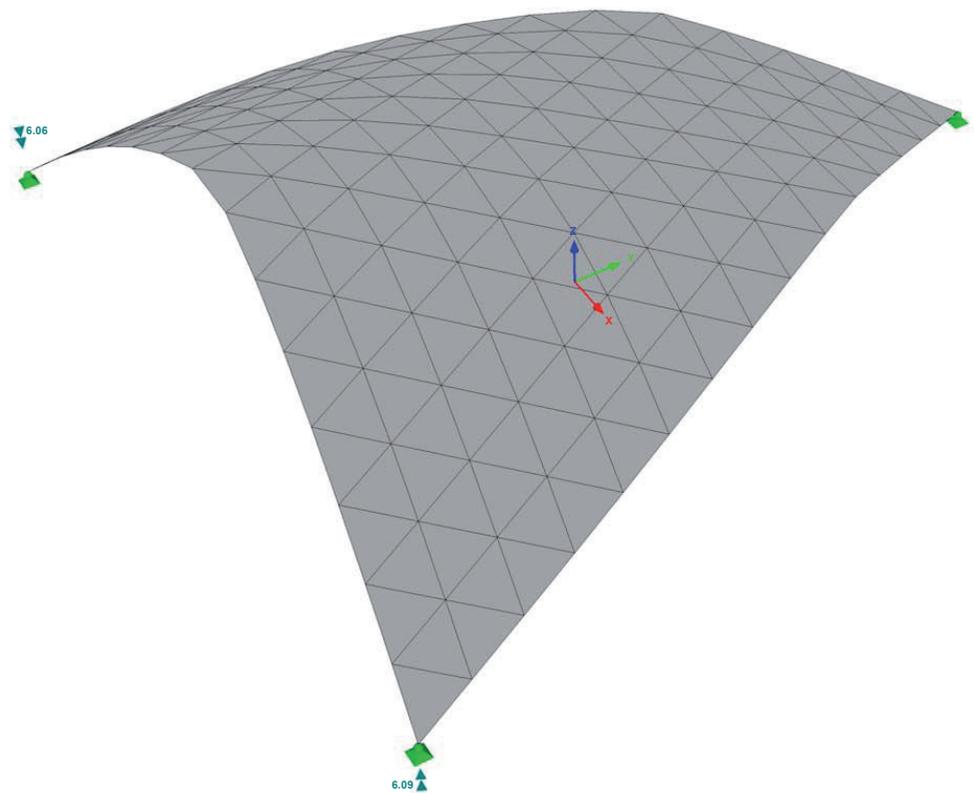


3.5.3 Auflagerreaktionen der flächig verbundenen Schale **bei einer Einspannung**; auftretende Momente um X-, Y- und Z-Achse. Einheit kNm. Die Auswertung zeigt, dass die auftretenden Momente gering sind und nicht für eine Einspannung sprechen.  
 3.5.4 Momente um die Z-Achse bei **gelenkiger Lagerung**.

3.5.3



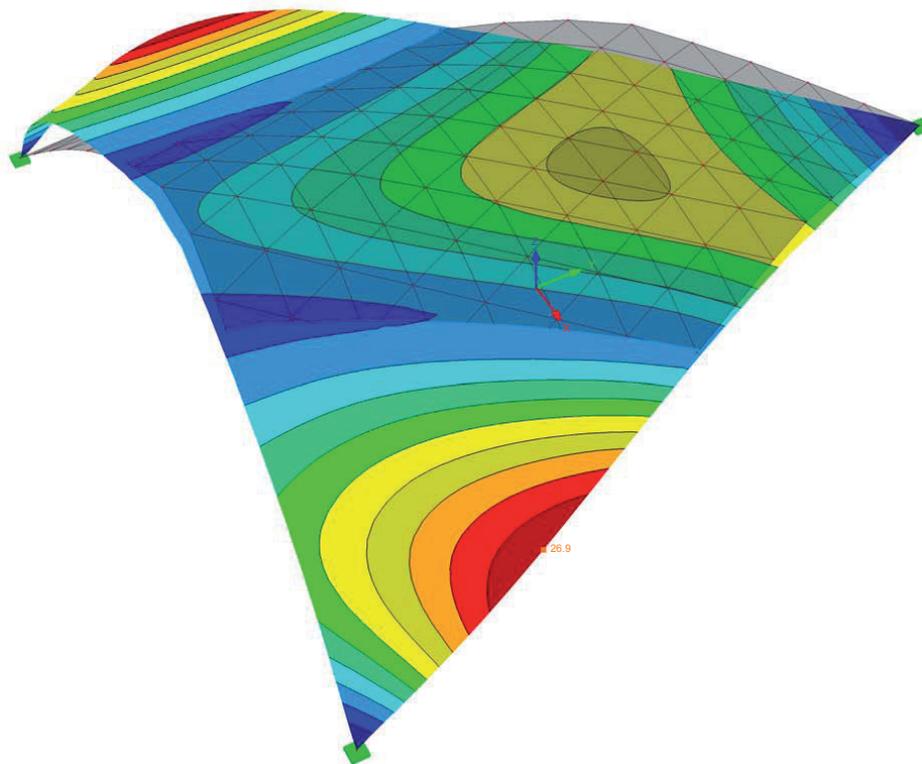
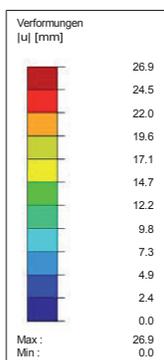
3.5.4



3.5.5 **Auswertung der Verformungen** anhand **der eingespannten und flächig verbundenen Struktur** für die Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit. Die theoretisch biegesteif und abstandslos verbundenen Flächen erzeugen bei einer eingespannten Lagersituation eine steifere Struktur als bei gelenkiger Lagerung. **Spannweite: 16.7 m**

3.5.6 Ermittlung der Verformung bei **gelenkiger Lagerung**. Die maximale Verformung steigt um 33% ( 8.8 mm ) an. Es kann also eine Stabilisierung der Struktur durch das Einspannen der Lagerpunkte erzeugt werden.

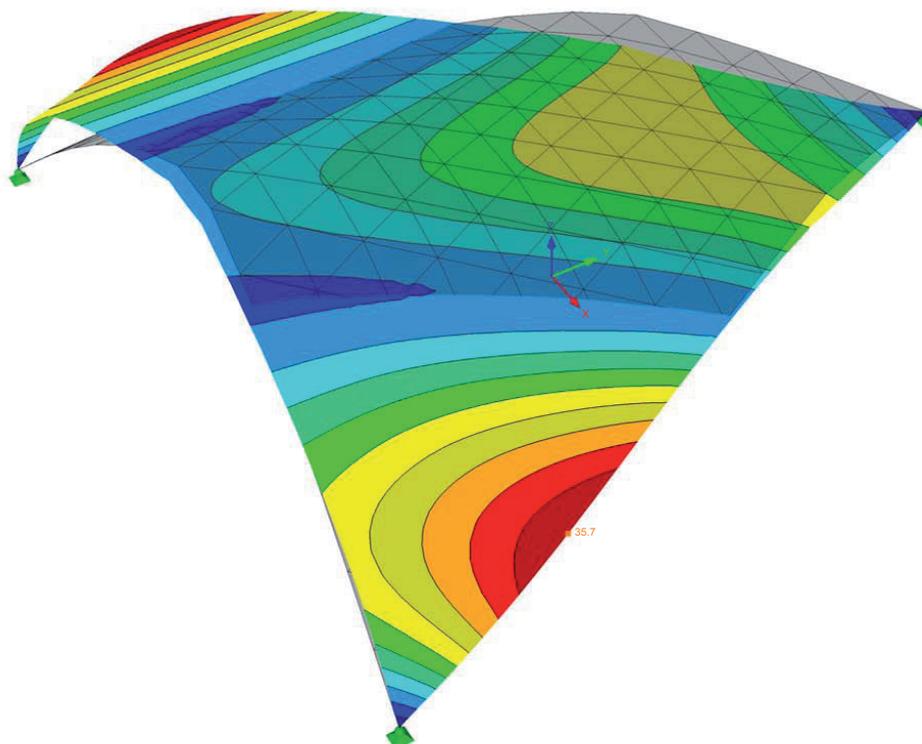
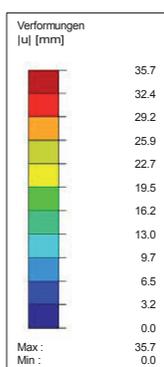
3.5.5

LG1: Gebrauchstauglichkeit  
u

Da im Beton unter Belastung eine Rissbildung entsteht, die den wirksamen E-Modul vermindert, sollten die Werte mit zwei multipliziert werden. Die maximale Verformung kann theoretisch also immer doppelt so hoch sein wie gezeigt.

Max u: 26.9, Min u: 0.0 [mm]  
Faktor für Verformungen: 43.00

3.5.6

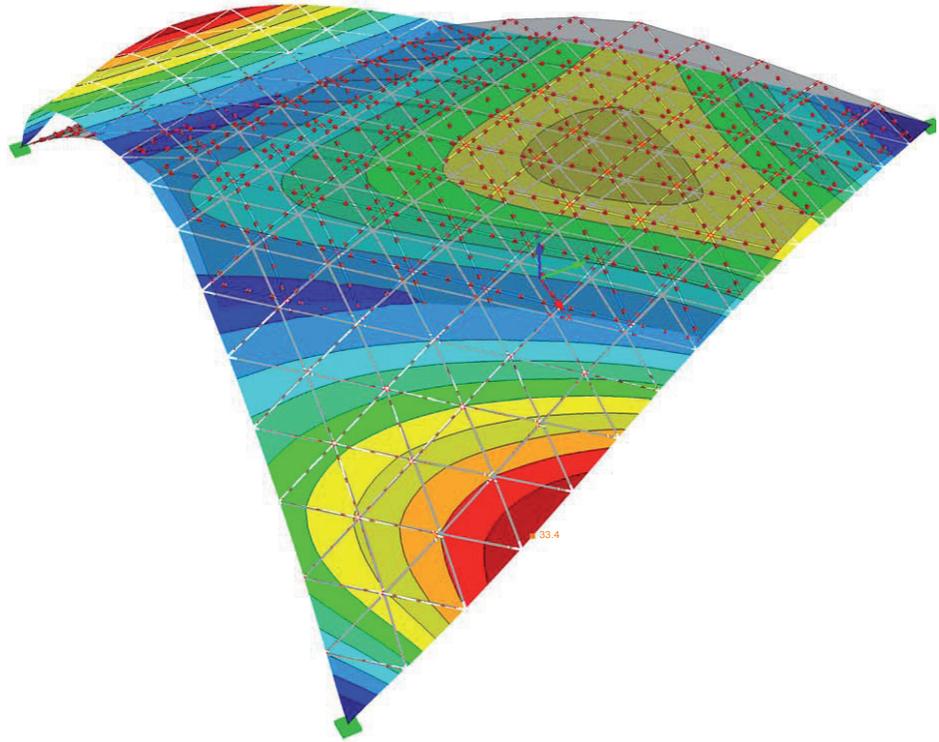
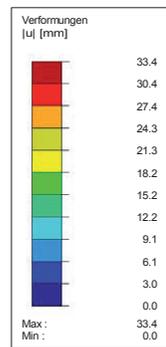
LG1: Gebrauchstauglichkeit  
u

Max u: 35.7, Min u: 0.0 [mm]  
Faktor für Verformungen: 33.00

3.5.7 **Auswertung der Verformungen** in der **mit Stäben verbundenen Struktur** zur Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit. Die Verformung steigt bei einem dreifach stabartig verbundenen Flächentragwerk um rund 25% ( 6.5 mm ) an.  
 3.5.8 Ermittlung der Verformung der mit Stäben verbundenen Struktur bei **gelenkiger Lagerung**. Die maximale Verformung steigt nochmals um 46 % (15.5 mm) an.  
 Die Einspannung mindert die Verformungen also auch hier deutlich.

3.5.7

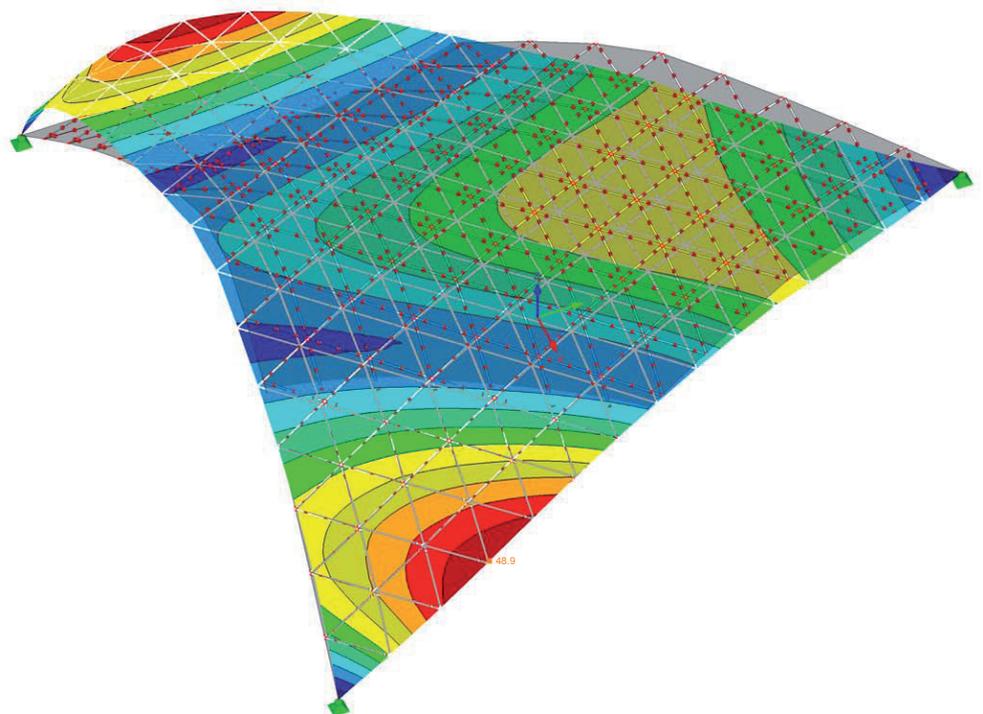
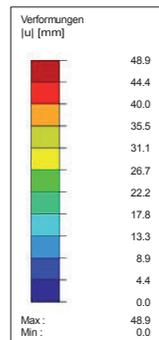
LG1: Gebrauchstauglichkeit  
u



Max u: 33.4, Min u: 0.0 [mm]  
Faktor für Verformungen: 34.00

3.5.8

LG1: Gebrauchstauglichkeit  
u

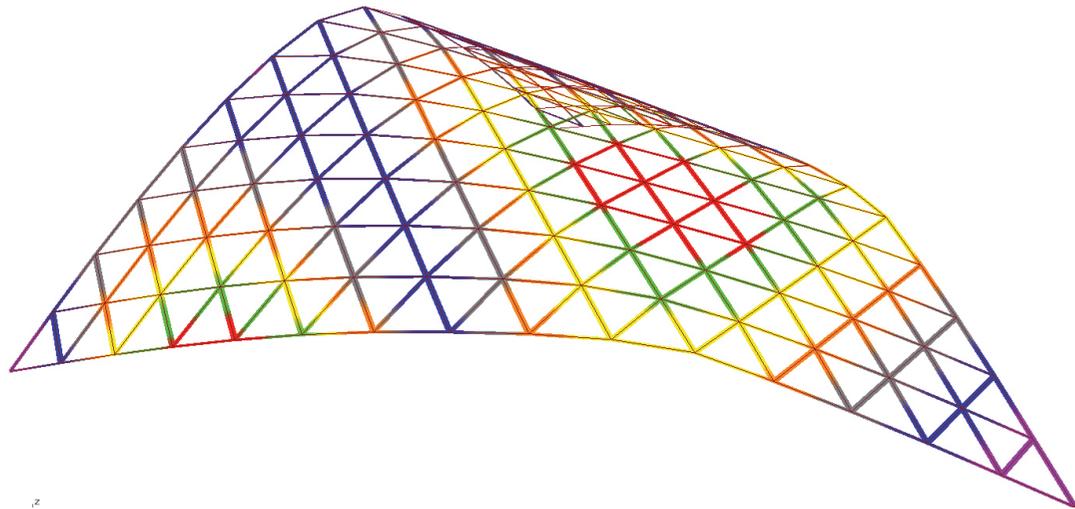
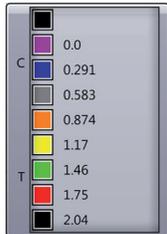


Max u: 48.9, Min u: 0.0 [mm]  
Faktor für Verformungen: 24.00

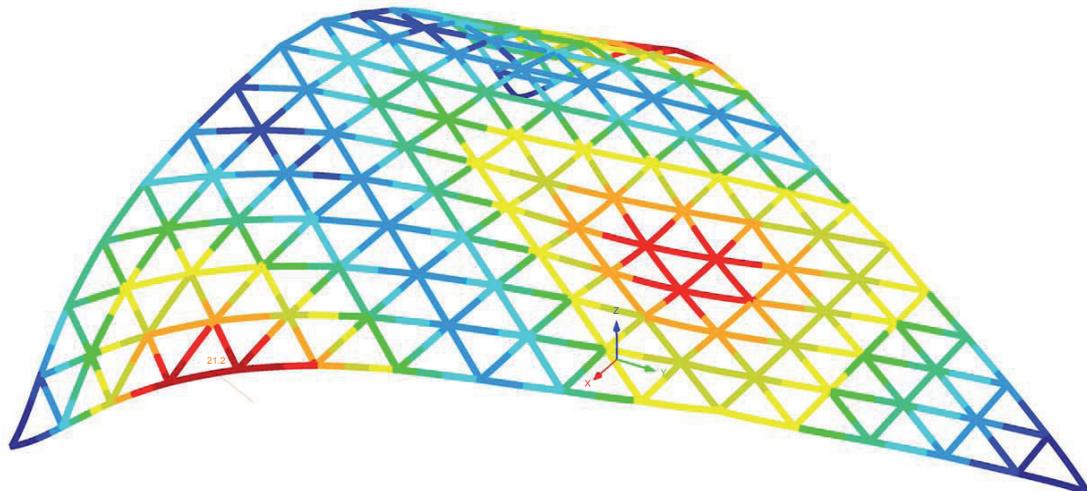
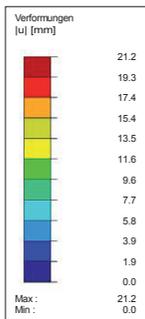
### Vergleich der Verformungsanalysen von Karamba und Dlubal RFEM

3.5.9 Auswertung der auftretenden Verformungen einer Gitterschale durch Karamba; die Verformungsfiguren können grafisch nicht gänzlich gleich dargestellt werden, der Vergleich der Farbbereiche zeigt jedoch annähernd idente Ergebnisse.  
 3.5.10 Verformungsanalyse derselben Struktur In RFEM; Lagersituation in beiden Berechnungen: Einspannung.  
 Max. Spannweite 16.7 m, Stabquerschnitt 10 cm, Beton: C 90/105, Stablänge: 116 cm, Schneelast 2 kN/m<sup>2</sup>

3.5.9 Verformung  
in cm.



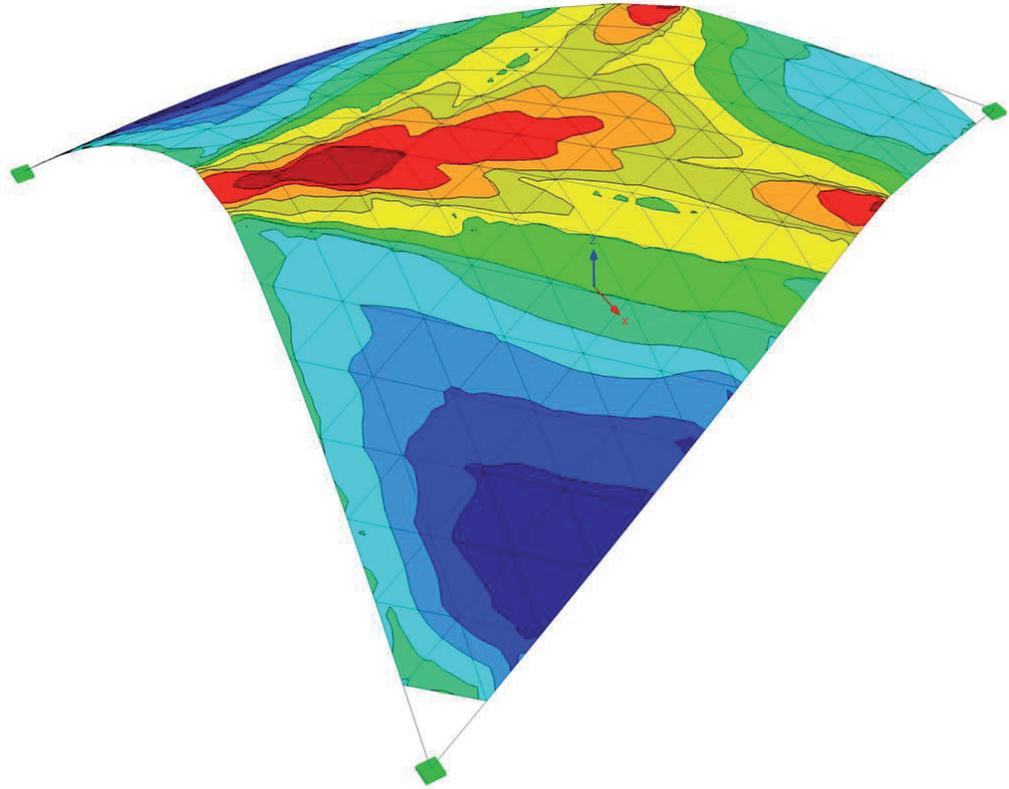
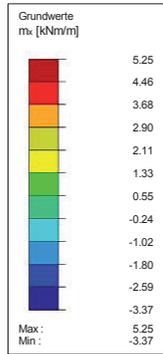
3.5.10 LG1: Gebrauchstauglichkeit  
u



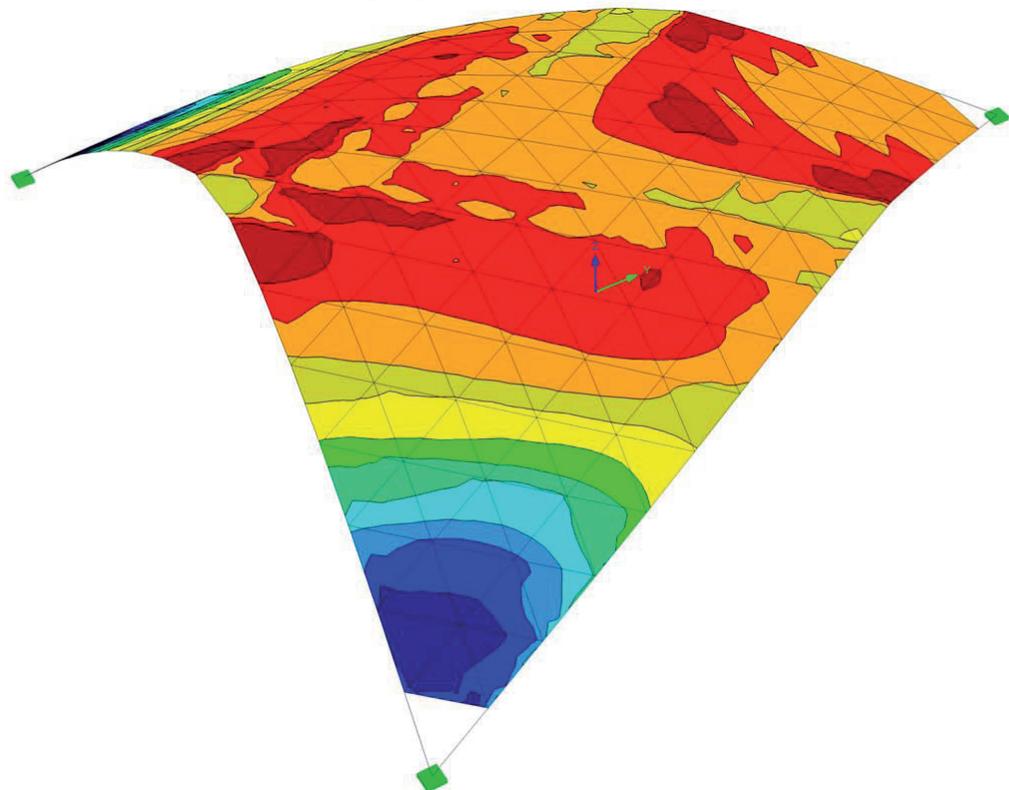
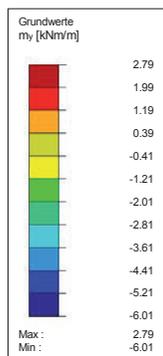
Max u: 21.2, Min u: 0.0 [mm]  
Faktor für Verformungen: 49.00

**Auswertung der Flächenschnittgrößen bei eingespannter Lagerung; Momente**3.5.11 Darstellung der in den Flächenelementen auftretenden Biegemomente  $m_x$  in  $\text{kNm/m}$ .3.5.12 Darstellung der in den Flächenelementen auftretenden Biegemomente  $m_y$  in  $\text{kNm/m}$ .

3.5.11



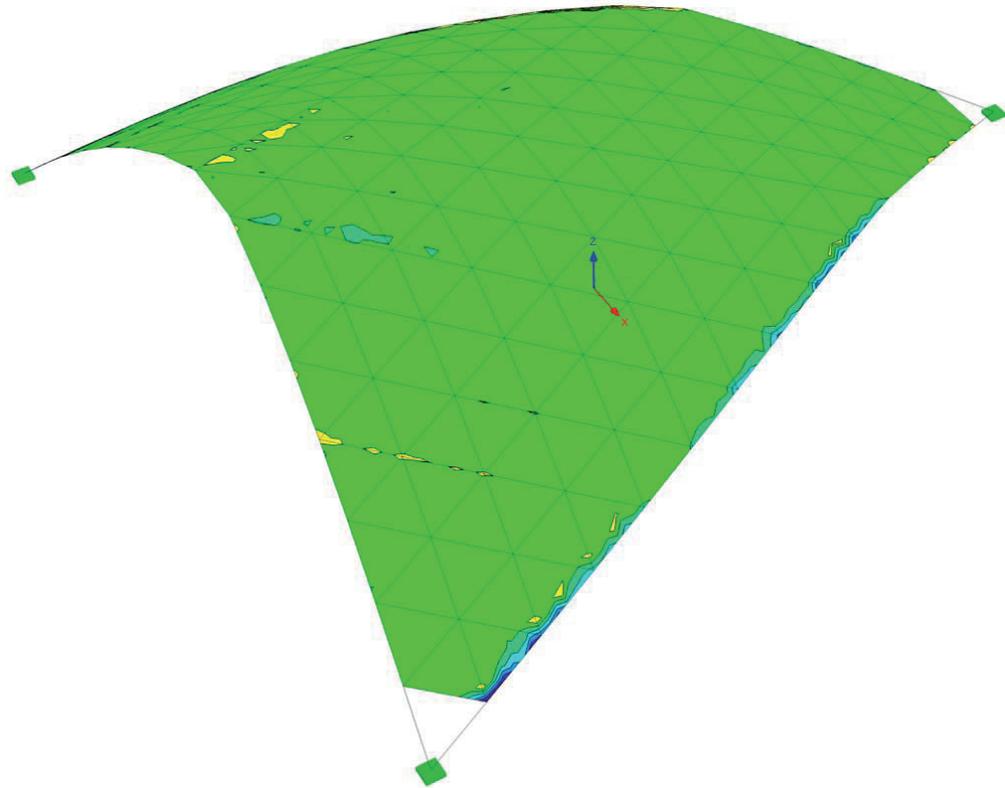
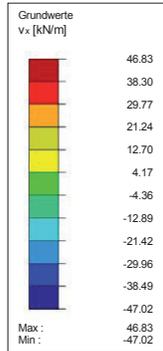
3.5.12



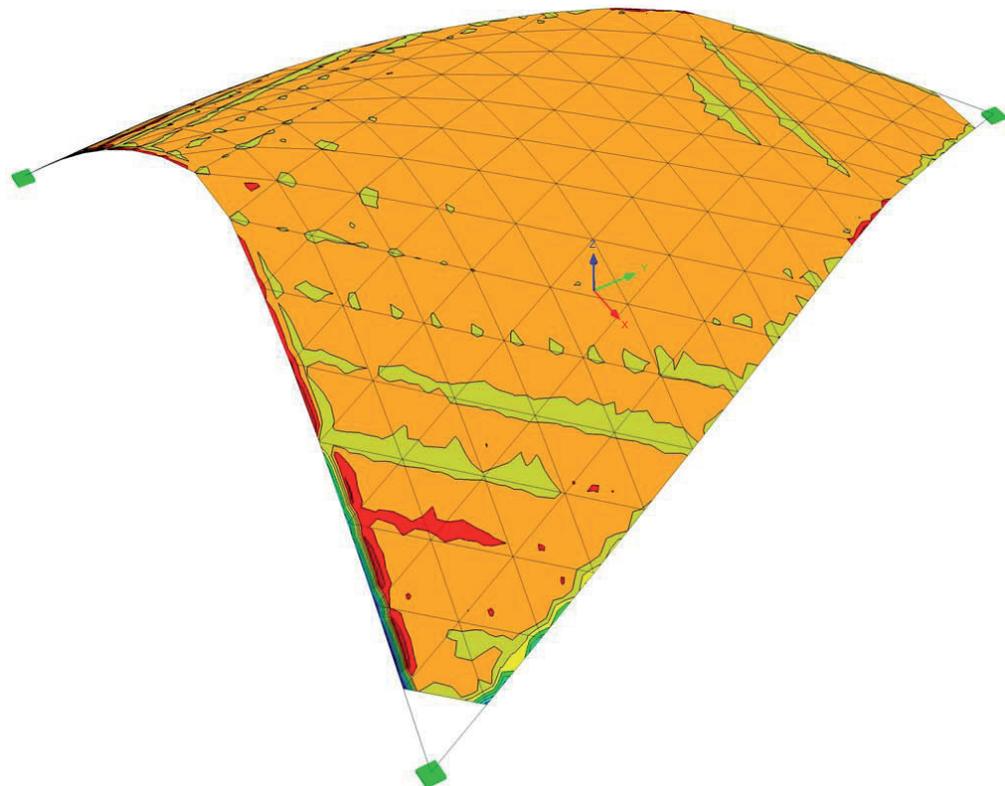
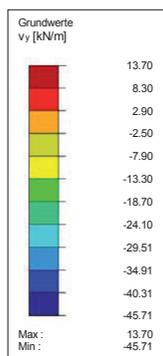
**Auswertung der Flächenschnittgrößen bei eingespannter Lagerung; Querkräfte**

3.5.13 Querkraftentwicklung  $v_x$  in der flächig verbundenen Struktur. Auffällig sind die höheren Werte an den weit gespannten Außenkanten aufgrund des Kraftflusses entlang der Elementteilungsrichtung.  
 3.5.14 Querkräfte in Richtung  $v_y$ ; Eine Steigerung der Werte ist im Bereich der Auflagerzonen zu erkennen.

3.5.13

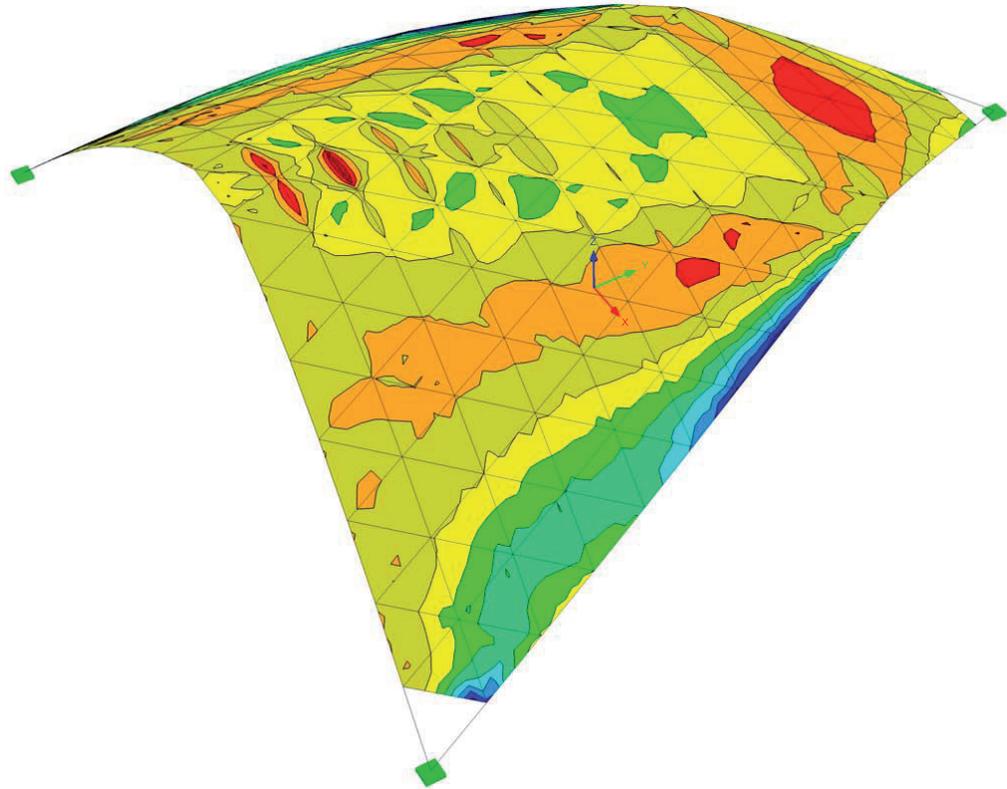
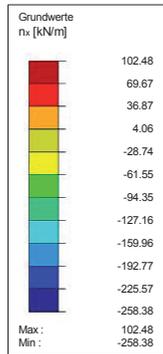


3.5.14

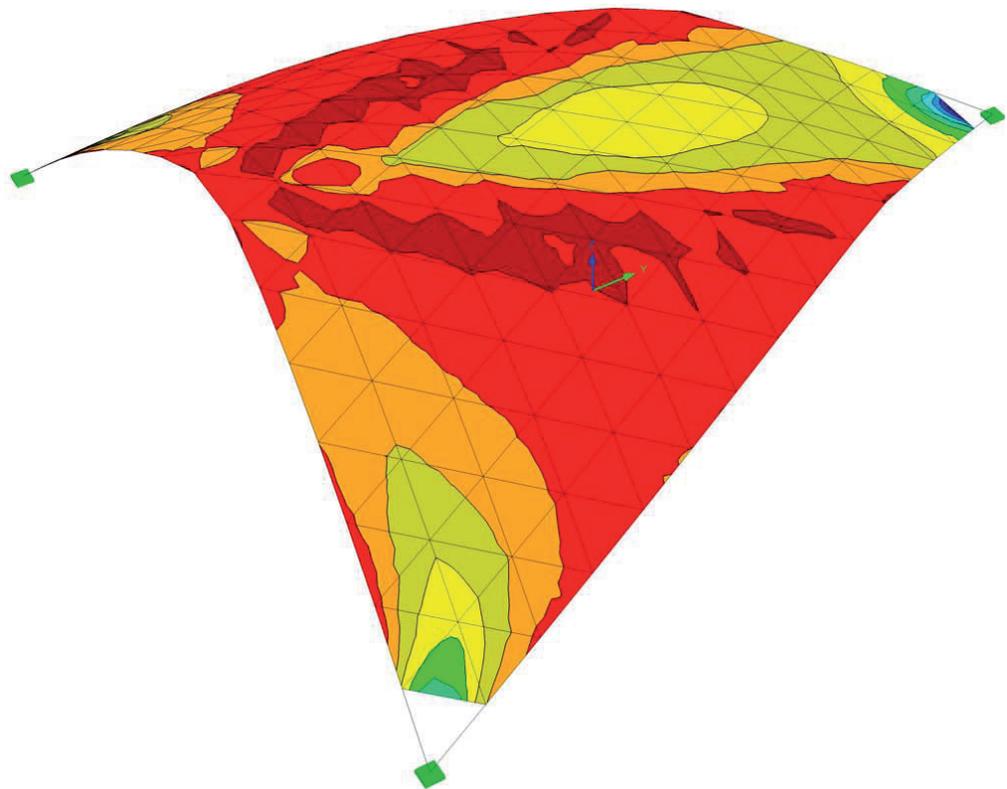
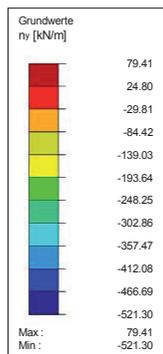


**Auswertung der Flächenschnittgrößen bei eingespannter Lagerung; Normalkräfte**3.5.15 Auswertung der auftretenden Normalkräfte in den Flächenelementen.  $n_x$ 3.5.16 Auswertung der auftretenden Normalkräfte in den Flächenelementen.  $n_y$ *Maximalwerte entstehen an den freien und weitgespannten Seitenrändern und in den Auflagerzonen. Neben den erwarteten hohen Druckkräften entstehen auch signifikante Zugkräfte.*

3.5.15



3.5.16



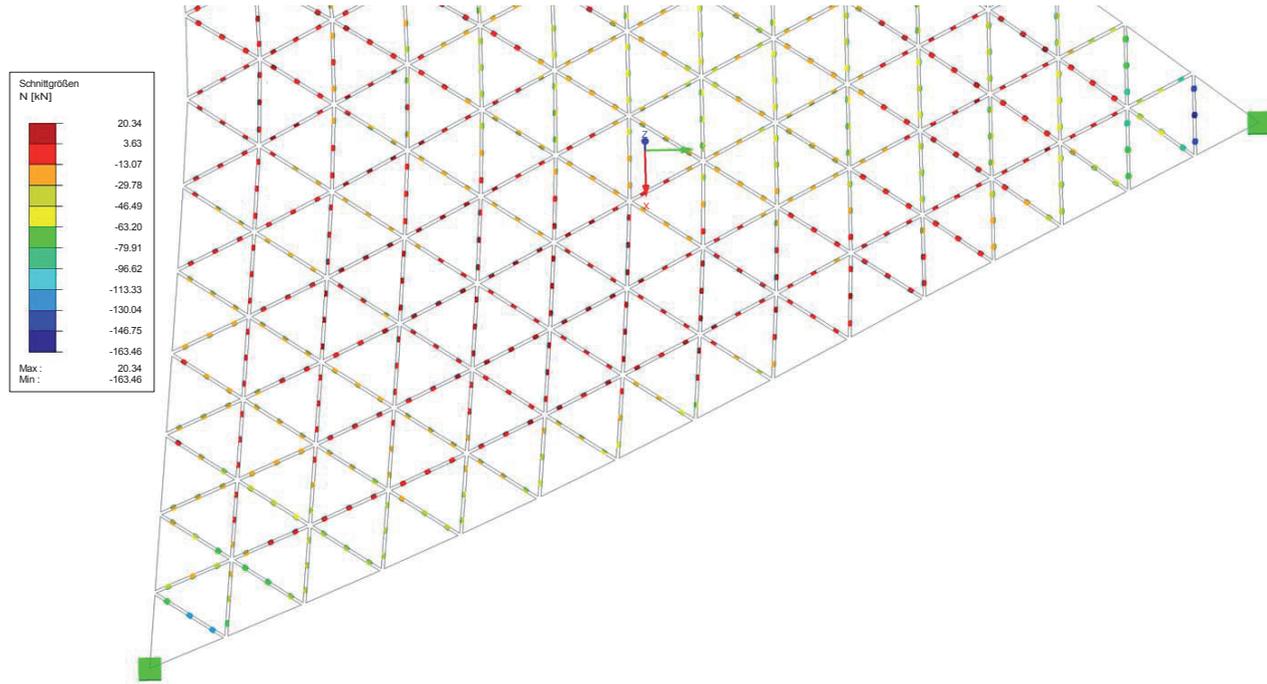
**Auswertung des Berechnungsmodells zur Ermittlung der Verbindungsschnittgrößen**

Um genauere Aussagen über die Anforderungen an das Verbindungsdetail treffen zu können, werden nun die eingesetzten Stäbchen analysiert. Die an ihnen ablesbaren Kräfte zeigen deutlich, welche Größen von Element zu Element übertragen werden müssen.

3.5.17 Auflagerzone an der die maximalen **Normalkräfte** in den Verbindungsstäben auftritt: Hintere Einspannung.

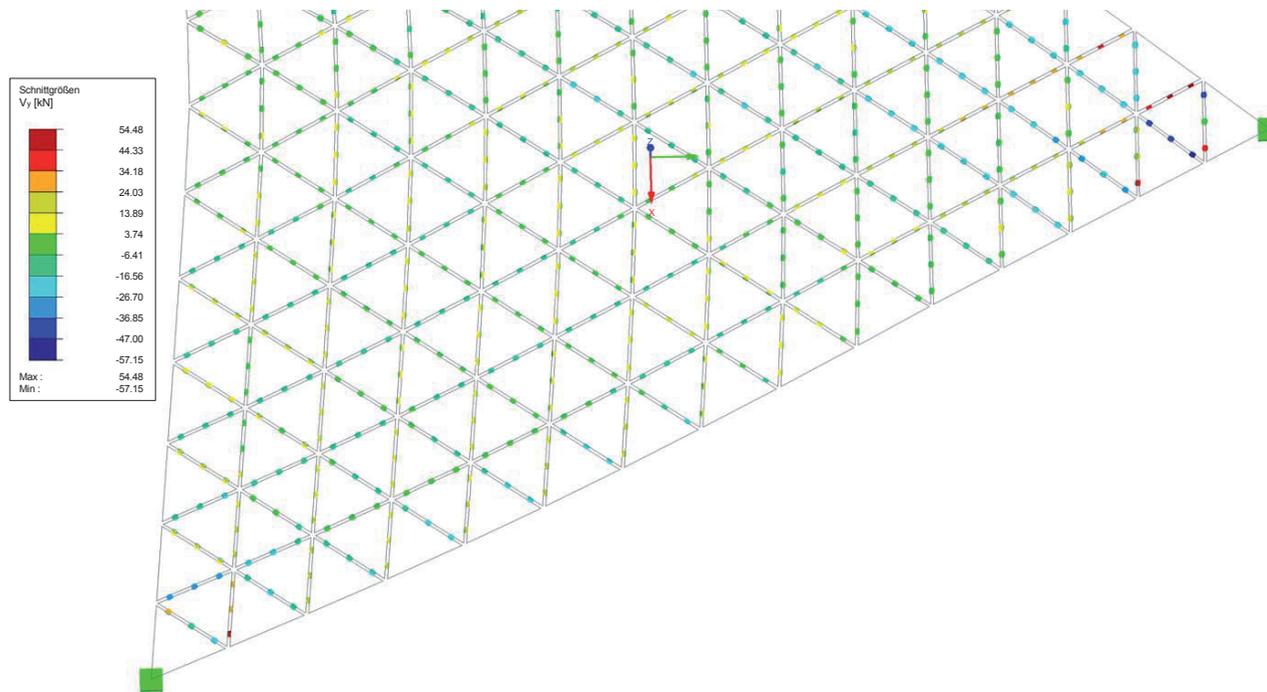
3.5.18 Das **Querkraft** - Maximum tritt in derselben Zone auf.  $V_y =$  Scheibenrichtung

3.5.17



Max N: 20.34, Min N: -163.46 [kN]

3.5.18

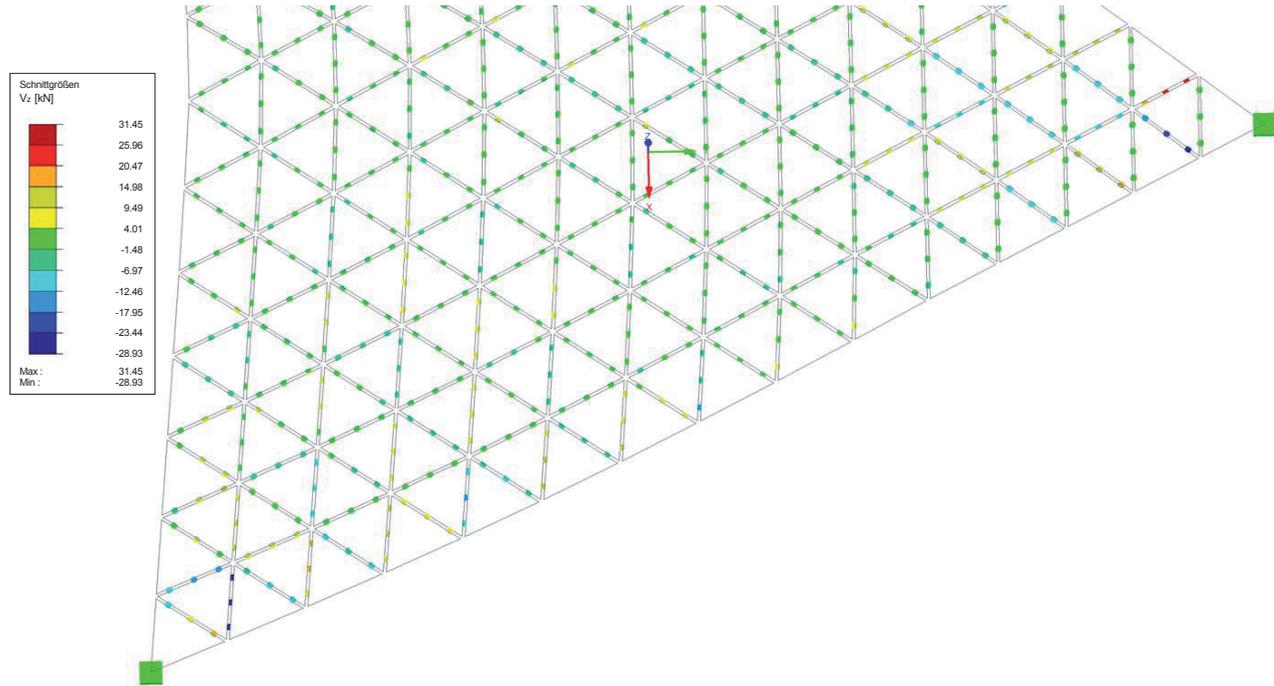


Max  $V_y$ : 54.48, Min  $V_y$ : -57.15 [kN]

**Auswertung des Berechnungsmodells zur Ermittlung der Verbindungsschnittgrößen**3.5.19 **Querkräfte** in den Verbindungsstäben in Richtung **Vz**.3.5.20 **Stabmomente** in den Verbindungsstäben in Richtung **My**.

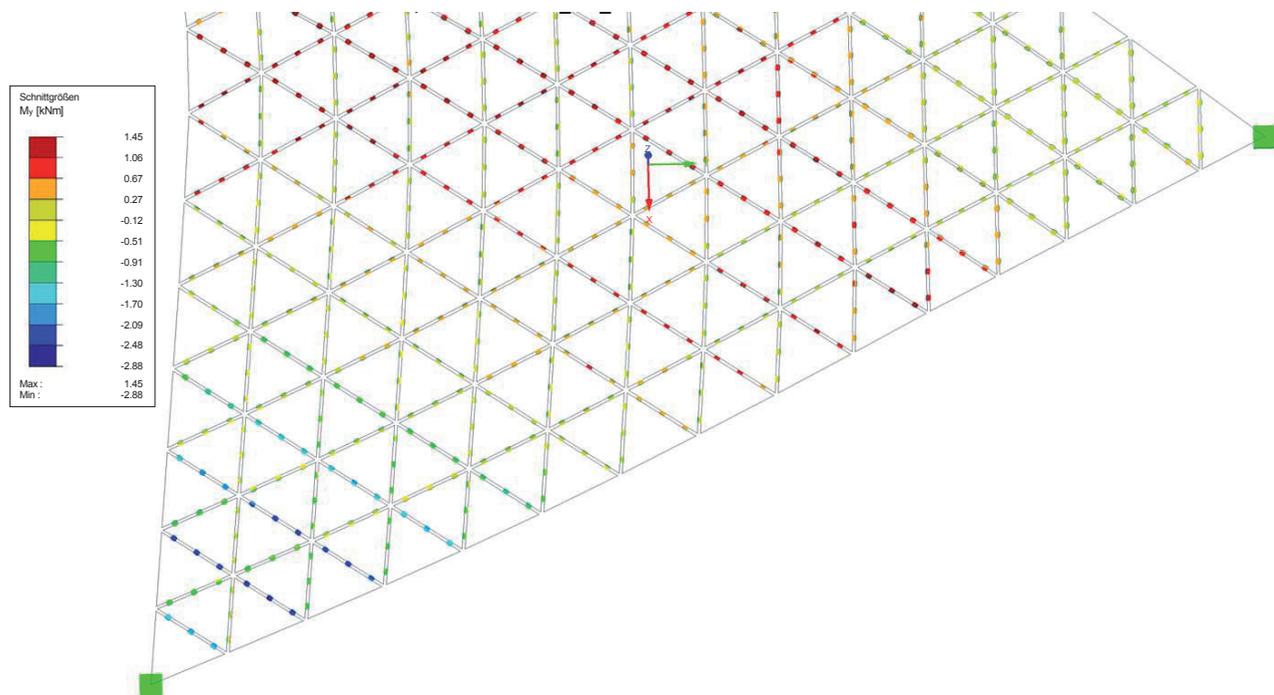
Die beiden vorderen, symmetrischen Lagerzonen weisen die höchsten Beanspruchungen auf.

3.5.19



Max V-z: 31.45, Min V-z: -28.93 [kN]

3.5.20



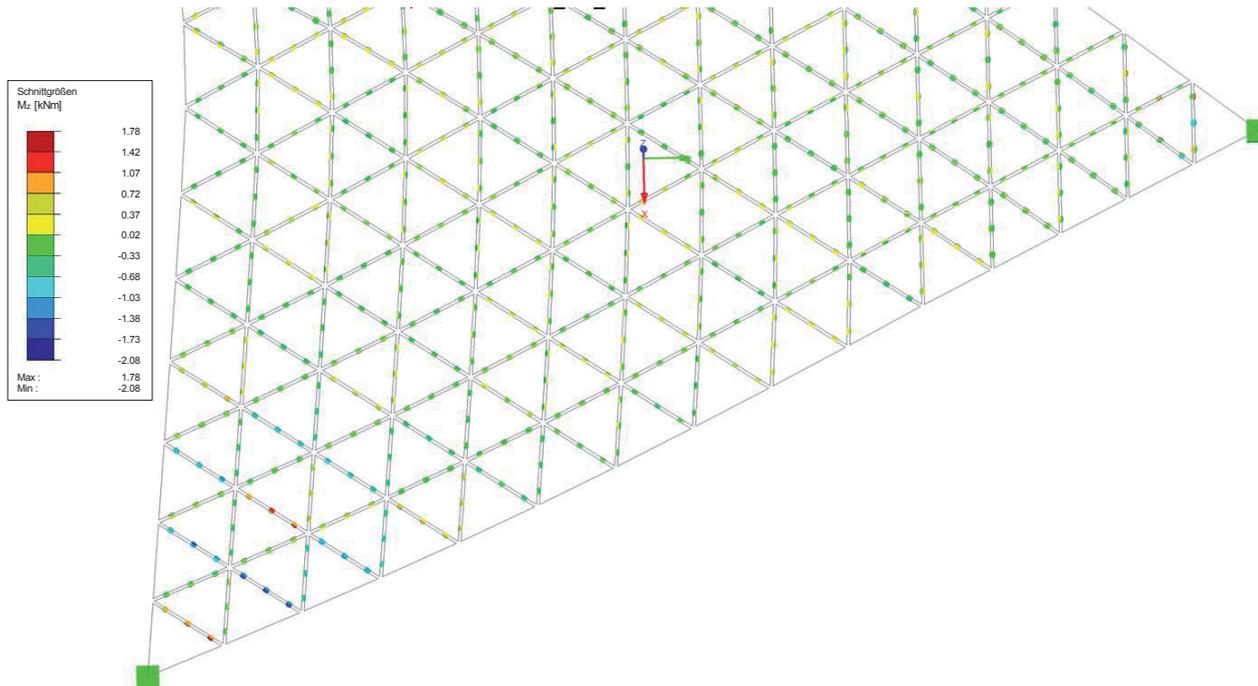
Max M-y: 1.45, Min M-y: -2.88 [kNm]

### Auswertung des Berechnungsmodells zur Ermittlung der Verbindungsschnittgrößen

#### 3.5.21 Stabmomente in den Verbindungsstäben in Richtung $M_z$ .

Die beiden vorderen, symmetrischen Lagerzonen weisen hohe Beanspruchungen auf.

3.5.21



Max M-z: 1.78, Min M-z: -2.08 [kNm]

### AUSWERTUNG

Schnittkräfte	Flächenschnittgrößen	Stabschnittgrößen
mx (Mz)	5.25 kNm/m	1.78 kNm
mx - (Mz)	-3.37 kNm/m	-2.1 kNm
my (My)	2.97 kNm/m	1.4 kNm
my - (My)	-6.01 kNm/m	-2.8 kNm
nx	102.48 kN/m	
nx-	-258.38 kN/m	
ny, (N)	79.41 kN/m	20.4 kN
ny - (N)	-521.30 kN/m	-163.0 kN
vx (Vz)	46.83 kN/m	31.5 kN
vx - (Vz)	-47.02 kN/m	-28.9 kN
vy (Vy)	13.7 kN/m	54.0 kN
vy - (Vy)	-45.71 kN/m	-57.1 kN

Die Tabelle zeigt die maximalen Schnittgrößen in den Flächenelementen und Verbindungsstäben.

Zur Berechnung der Schnittgrößen wurde den Plattenelementen eine Stärke von 6 cm gegeben und als Material der hochfeste Beton C 100/115 zugewiesen. Die zur Bewertung der Verbindungskräfte eingefügte dreifache Stabverbindung erfolgt im FE-Modell durch quadratische Vollprofile mit den Abmessungen 6 x 6 cm, die ebenfalls die Eigenschaften von C 100/115 besitzen.

---

Der Vergleich des einfachen, durchgehend flächigen Modells und der zur Analyse aufbereiteten Struktur aus Platten und Stäben zeigt, dass die Variante ohne Stäbe wenig aussagekräftig ist.

Die in dieser Version theoretisch flächig und durchgehend sowie absolut biegesteif miteinander verbundenen Elemente in die geplante Bauweise zu überzuführen, ist aufgrund der Modularität und Variabilität des Systems nur schwer möglich. Weiters ist der Umsetzung einer solch leistungsstarken Verbindung in einer Beton Fertigteilbauweise mit derartig geringen Bauteilquerschnitten wegen des Platzbedarfs eine Grenze gesetzt.

Diese Modellbetrachtung ermöglicht jedoch die Auswertung der Schnittgrößen in den Flächenelementen bei idealer Ausführung der Elementverbindung.

Die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit (Seite 76-77) zeigt deutlich, dass die Leistungsfähigkeit der Verbindungstechnik einen massiven Einfluss auf die Verformung und somit auch auf das Tragverhalten hat, da bei punktueller Verbindung ein Anstieg der Maximalverformung um 25% entsteht. Wird diese Betrachtung zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit herangezogen, bleiben die Verformungen dennoch im zulässigen Bereich.

Zudem wird durch die Betrachtung der Verformungen bei wechselnden Lagerbedingungen auch die Aussteifung der Struktur durch Einspannung der Lager ersichtlich. Diese Maßnahme ist im Schalenbau eher unüblich, wird aber in gleicher Form zur Aussteifung von Bogentragwerken verwendet.

Die vorzeitige Tragwerksüberprüfung durch Karamba scheint schlüssige Ergebnisse zu liefern. Durch die Bildung derselben Modellsituation in RFEM, also der Betrachtung der Struktur als Gitterschale, werden bei Analyse der Gebrauchstauglichkeit vergleichbare Werte erzielt.

Da die Übertragung der Kräfte von einem Element zum anderen oder noch anschaulicher, die Verknüpfung der jeweiligen Elementbewehrung auf solch engem Raum ohne zusätzliche Stahlbauteile nicht zu lösen ist, muss diese Schnittstelle genauer ausgewertet werden. Zunächst müssen die Dimensionen der Bauteile ermittelt werden, die für eine ausreichend steife Verbindungslösung notwendig sind.

Für diese Analysen eignen sich die hinzugefügten Stäbchen zwischen den Elementen ideal, an ihnen können die maximal zu übertragenden Kräfte abgelesen werden. Um die Verbindungskräfte in die Flächenelemente überleiten zu können, muss an den Schnittstellen eine ideale Verknüpfung von Bewehrung, Beton und Verbindungselement geschaffen werden. Es besteht die Möglichkeit, die Elemente durch eine lösbare Verschraubung oder Stahlimplantate zu verbinden, zu verkleben oder die Fugen auszubetonieren.

Grundlegend sind zur weiteren Detaillierung der Verbindungsweise zunächst Plattendicke, Bewehrungslagen und eine mögliche Verschraubung vorzudimensionieren.

---

**Bestimmung der notwendigen Betonfestigkeit über die Auswertung der maximal in den Stäben auftretenden Druckspannung:**

$$\sigma_d = \frac{N}{A} + \frac{M}{W}$$

$$\sigma_d = \frac{163 \text{ kN}}{6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}} + \frac{0.86 \text{ kNm} \times 100}{\frac{b \times h^2}{6}} = 6.8 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Siehe UHPC, Seite 102.

Derartige Größen verlangen, unter Berücksichtigung der Sicherheitsbeiwerte, einen ultrahochfesten Beton. Für einen Werkstoff der Klasse C 135 kann dann eine Druckfestigkeit von 90 N/mm<sup>2</sup> angenommen werden.

**Bestimmung der Schraubendimension über die Auswertung der maximal in den Stäben auftretenden Querkräfte:**

$$V_{yd} = -57 \text{ kN}, V_{zd} = 27 \text{ kN}$$

$$V_{ges,d} = \sqrt{V_y^2 + V_z^2} = 63 \text{ kN}$$

$$N_{erf} = \frac{V_{ges,d} \times 2}{\mu} = \frac{63 \text{ kN} \times 2}{0.7} = 180 \text{ kN} \quad \mu = \text{Reibbeiwert}, 2 = \text{Sicherheitsbeiwert}$$

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine variable Verbindungslösung eine ausreichende Lochleibung bietet, kann die Dimensionierung der eventuell notwendigen Schrauben über die durch Vorspannung und Reibung aufzunehmenden Querkräfte erfolgen.

Sollen die Fugen punktuell überdrückt werden, um die auftretenden Querkräfte durch Reibung an den Kontaktflächen zu übertragen, muss die Schraube mit einer Zugkraft von 180 kN beansprucht werden. Ausreichend wäre hierfür eine hochfeste Schraube der Güte 12.9 mit einem Nenndurchmesser von 16 mm (M 16).

---

**Ermittlung der maximal aufnehmbaren Biegemomente bei Verwendung von Carbonfasermatten zur Bewehrung:**

$$a = 1.69 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \quad (\text{Querschnittsfläche des Textils pro Meter})$$

$$f_{t,d} = 502 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Bemessungsspannung des Textils})$$

$$M_{r,d} = f_{t,d} \times a \times z \quad (z = \text{innerer Hebelsarm})$$

$$M_{r,d} = 50.2 \text{ kN/cm}^2 \times 1.69 \text{ cm}^2/\text{m} \times z$$

$$M_{r,d} = 84 \text{ kNm} \cdot 0.05 \text{ m} = 4.2 \text{ kNm/m}$$

SGL GROUP  
SIGRATEx 600  
Siehe Elementbewehrung,  
Seite 106.

Um die geringe Betonbauteildicken mit zwei außenliegenden Bewehrungslagen umsetzen zu können, wäre der Einsatz von schlanken, multiaxialen Carbonfasermatten denkbar. Berechnet wurden die aufnehmbaren Biegemomente bei 5 cm Bewehrungslagenabstand. In den Plattenelementen treten partiell höhere Momente ( 6 kNm/m ) auf, in diesen Elementen können doppelte Mattenlagen eingesetzt werden.

3.6.1 Die Gärtnerplatzbrücke in Kassel besteht aus schlanken, verklebten UHPC Bauteilen. Deutlich sind die veränderte Konstruktionsweise und die schlankeren Abmessungen zu erkennen, die durch die Verwendung von UHPC statt Normalbeton erzeugt werden. Vgl. <http://www.gaertnerplatzbruecke.de>

3.6.2 Maschinenbett aus UHPC, das Bild zeigt deutlich wie exakt Konturen durch eine geeignete Form abgebildet werden können.

3.6.3 Überdachung aus flächigen UHPC Elementen; die Oberfläche weist eine außerordentliche Qualität auf und ist ohne weitere Maßnahmen witterungsbeständig. Vgl. François, Lamarre, (2012) in <http://www.lafarge.com>.

**PROJEKT:**  
Gärtnerplatzbrücke  
**ORT:** Kassel / Deutschland  
**FORSCHUNG:**  
Universität Kassel  
**PLANUNG:**  
Fehling+Jungmann GMBH  
**AUSFÜHRUNG:**  
2006

3.6.1



3.6.2

3.6.3



**PROJEKT:**  
Villa Navarra  
**ORT:** Frankreich  
**ARCHITEKTUR:**  
Rudy Ricciotti  
**INGENIEURE:**  
Romain Ricciotti,  
Mouloud Behloul

## UHPC

8 Vgl.  
Deutscher Ausschuss für Stahl-  
beton DAfStb: Sachstandsbericht  
Ultrahochfester Beton,  
Berlin 2008, 7-20.

Unter UHPC ist ein fein- oder grobkörniger Beton zu verstehen, der über eine Druckfestigkeit von mindestens 150 N/mm<sup>2</sup> verfügt. Es gelten also alle Betonwerkstoffe, die eine Druckfestigkeit besitzen, die über der des hochfesten Betons C130 liegt, als UHPC. UHPC unterscheidet sich nicht nur durch seine hohe Festigkeit, sondern auch durch sein besonders dichtes Gefüge von Normalbeton. Durch dieses dichte Gefüge steigt die Dauerhaftigkeit und Dichtheit des Werkstoffes an und macht so den Beton noch haltbarer. Erzielt wird diese Gefügeänderung durch die Kombination von reaktiven Feinstkornstoffen.

Ziel der UHPC Entwicklung ist die Umsetzung von schlanken und effizienten Konstruktionsweisen, die bis jetzt nur in Stahl realisierbar waren. Um das Bruchverhalten des äußerst spröden Werkstoffes zu verbessern, wird UHPC zumeist faserbewehrt eingesetzt, dies erzeugt eine erhöhte Duktilität und eine ausreichende Resttragfähigkeit. Durch die Bewehrung des Betons mit Stahlfasern kann die Zugfestigkeit auf bis zu 15 N/mm<sup>2</sup> erhöht werden und die Biegezugfestigkeit Maximalwerte von 50 N/mm<sup>2</sup> erreichen. Stahlfasern und Fasern aus Werkstoffen wie Kunststoff, Glasfaser und Kohlenstoff werden unter dem geringen Verhältnis von nur ca. 2% Faseranteil beigemischt, um die Eigenschaften des Betons weiter zu verbessern.

Grundsätzlich wird bei der Herstellung von UHPC, aufgrund des hohen Zementgehaltes, mehr CO<sup>2</sup> erzeugt als bei Normalbeton, weil aber bei UHPC wesentlich geringere Volumina zur Erzeugung derselben Tragfähigkeit notwendig sind, kann eine positive Gesamtbilanz gezogen werden. Ähnlich zeigt sich die Kostenbilanz, der eigentlich teurere UHPC kann wegen seiner Leistungsfähigkeit sparsamer eingesetzt werden und verursacht im Idealfall nur die Hälfte der Kosten einer Normalbetonlösung.<sup>8</sup>

3.6.4 Vergleich dreier Lösungen für eine Fußgängerbrücke (Sherbrook/Kanada) in Hinsicht auf die Umweltverträglichkeit.

3.6.5 Preisvergleich für Träger gleicher Momententragfähigkeit.

Durch die geringeren Volumina bei Konstruktionen aus UHPC kann im Bezug auf Umweltverträglichkeit und Materialkosten eine positive Gesamtbilanz gezogen werden.

Quelle: 8 Vgl. deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Sachstandsbericht ultrahochfester Beton, 2008

3.6.4

	Normalbeton	Hochfester Beton	Ultrahochfester Beton
äquivalente Dicke [mm]	500	400	150
Volumen [m <sup>3</sup> ]	126	100	33
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	330	450	700
Zementverbrauch + CO <sub>2</sub> -Emission [t]	44	48	28
Zuschlagverbrauch [t]	225	170	60

3.6.5

	UHFB	Stahl	Spannbeton	bewehrter Beton
Höhe [mm]	370	350	700	700
Breite [mm]	320	300	350	600
Gewicht [kg/m Länge]	140	112	467	530
Preis [€/m Länge]	30	33	26	33

Die Eigenschaften von UHPC machen den Beton zum idealen Werkstoff für schlanke, druckbeanspruchte Bauteile. Durch seine gesteigerte Dichtigkeit sind geringere Bewehrungsüberdeckungen realisierbar, die zusätzlich zur gesteigerten Druckfestigkeit eine weitere Verminderung von Betonquerschnitten ermöglichen.

Da in den geplanten Schalentragwerken unter anderem hohe Druckkräfte auftreten und die Außenfläche ohne zusätzliche Vergütung witterungsbeständig sein soll, zeigt sich UHPC in jeder Betrachtungsweise als zu wählender Werkstoff. Zusätzlich ergaben die Analysen mit RFEM, dass die auftretenden Druckspannungen in den Verbindungszonen bei einer Elementstärke von 6 cm nicht mehr von Normalbeton aufgenommen werden können und ein hochfester Beton verwendet werden muss.

Obwohl viele Anforderungen seitens der Materialtechnologie bereits erfüllt sind, gibt es viele offene Fragen im Bereich der Verarbeitung von UHPC und in der Fertigung von Produkten aus dem leistungsfähigen Werkstoff. Da die mechanische Bearbeitung von UHPC noch nicht in einem Ausmaß, wie zum Beispiel bei Stahl, zu bewerkstelligen ist, kann versucht werden, die technisch fortgeschrittene Schalungstechnologie in Richtung des Formenbaus weiterzuentwickeln, um komplexere Bauteile in UHPC umsetzen zu können.

Die größten Unterschiede zwischen Schalungen und Formen liegen wohl in den Stückzahlen und den geschlossenen, an der gesamten Oberfläche formgebenden Werkzeugen. Die im Maschinenbau verwendeten Gusstechniken haben als Kernstück immer eine verlorene oder ständige Form, die der Betonschalung vom grundlegenden Charakter gleicht. Ein großer Vorteil des Betons gegenüber Stahl jedoch ist die Vergießbarkeit bei Raumtemperatur.

Aus Metall gegossene Produkte erreichen, je nach Verfahren, schon vor einer weiteren

---

Nachbereitung Genauigkeiten, die den im Bauwesen auftretenden Toleranzen entsprechen. Dies lässt darauf schließen, dass ähnlich gefertigte Betonteile ebenfalls ausreichend genau sein könnten. Sind noch exaktere Abmaße einzuhalten oder zusätzliche Änderungen umzusetzen, wird das Produkt nach dem Gussverfahren mechanisch nachbearbeitet.

Festzuhalten ist jedoch auch, dass Gusstechniken aufgrund der hohen Herstellungskosten für Formen hauptsächlich bei hohen Stückzahlen oder ausgesprochen großen Bauteildimensionen Anwendung finden. UHPC findet überdies bereits Anwendungen im Maschinenbau und wird dort zur Herstellung von Maschinenbetten genutzt.

Um nun eine derartige Technologie in die UHPC Verarbeitung überführen zu können oder überhaupt erst notwendig zu machen, sind architektonische Konzepte notwendig, die zwar flexibel sind und dadurch verschiedene Endprodukte zulassen, im Kern aber modular und wiederholbar bleiben.

Da die in dieser Arbeit entwickelten Fertigteile eine Form an der gesamten Oberfläche verlangen und deshalb äußerst schmale Bauteilkonturen vergossen werden müssen, wird auf Faserbewehrung verzichtet, da sich die Fasern negativ auf das Ausbreitmaß und somit die Vergießbarkeit von UHPC auswirken. Zusätzlich kann eine gerichtete Bewehrung zielführender aktiviert werden und ist somit effektiver. Verwendet wird deshalb eine schlaffe Bewehrung aus einem schlanken Bewehrungstextil.



3.7.1 Lage der vorgesehenen Bewehrung im Bezug zu den Elementdimensionen. Um ein Maximum an Biegemomenten aufnehmen zu können, werden die Bewehrungslagen so weit wie möglich nach außen verschoben. Es entsteht eine äußerst geringe Betonüberdeckung.

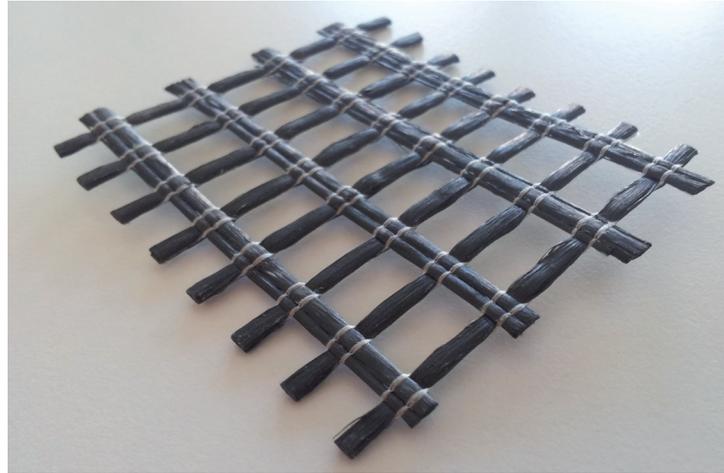
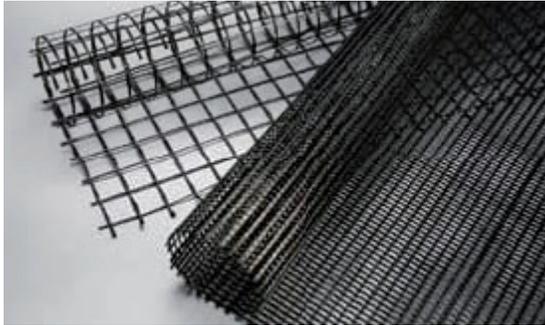
3.7.2 Die Kohlenstofffasern sind einfach zu verarbeiten und können in verschiedenen Webungen hergestellt werden.

3.7.3 Sigratex 600, biaxiale Bewehrungsmatte aus Carbon, Rovingabstand 10.8 mm auf 18 mm.

3.7.1



3.7.2



3.7.3

## ELEMENTBEWEHRUNG

Die Integration einer Bewehrung in schlanke Betonelemente stellt hohe Anforderungen an das Bewehrungskonzept. Durch die schlanken Bauteildimensionen wird es nahezu unmöglich, die für eine Stahlbewehrung notwendige Betonüberdeckung von 2-3 cm zur Unterbindung von Korrosion einzuhalten. Bei Verwendung von UHPC ist wegen der erhöhten Dichtigkeit des Betons zwar eine geringere Überdeckung möglich, die Abmessung einer herkömmlichen schlaffen Stahlbewehrung an sich scheint aber bei einer Bauteilstärke von 6cm zu groß.

Das Bewehrungskonzept für die Fertigteile sieht je eine schlaffe Bewehrungslage in einem Abstand von 2-2.5 cm zu der Element-Mittelachse vor. Das heißt, es entsteht eine Betonüberdeckung der Bewehrung von einem Zentimeter. Die Notwendigkeit einer beidseitig geführten Bewehrung beruht auf den in den Elementen auftretenden Biegemomenten.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, scheint eine schlanke textile Bewehrung aus einem leistungsfähigen Werkstoff das geeignete Bewehrungsmittel zu sein. Eines der einsetzbaren Materialien, das auch im Verbundwerkstoff CFK Anwendung findet, ist Kohlenstoff. Die Eigenschaften der Carbonfasern erfüllen alle Anforderungen, die für einen Verbund mit UHPC gelten und sind dabei noch deutlich leistungsfähiger als vergleichbare Stahlquerschnitte. So kann durch Verwendung von gewebten Carbonfasermatten laut Hersteller im Idealfall eine 4-fach höhere Biegefestigkeit erreicht werden als bei einer konventionellen Stahlbewehrung.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Vgl. SGL Technologies GmbH, (2012): Bauverstärkungsmaterialien aus Carbonfasern, <http://www.sglgroup.com>, Stand 2012

Vorteilhafte Eigenschaften des Werkstoffes Carbon:

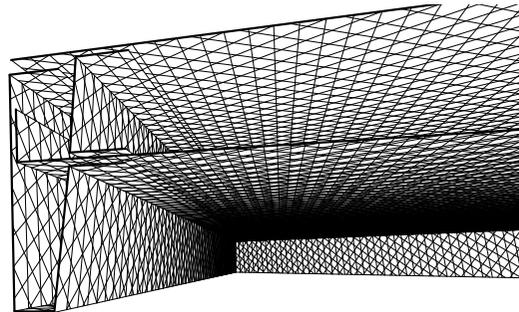
- Hohe Festigkeit und Steifigkeit
- Korrosionsbeständigkeit

3.7.4 Durch Epoxidharzbeschichtung ausgesteifte Carbonbelege können zu Profilen geformt und verklebt werden.

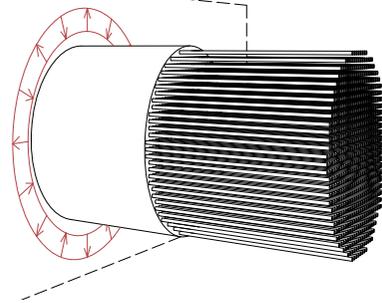
3.7.5 Beispiele für ein dreiachsiges Webemuster, die entwickelten Elemente müssen aufgrund des dreieckigen Umrisses durch ein Textil bewehrt werden, dessen Bewehrungsstränge unter  $60^\circ$  verwebt wurden. Die genaue Ausrichtung müsste über Versuche definiert werden.

3.7.6 Sind die Kohlenstofffasern in eine Kunststoffmatrix eingebettet, können auch innenliegende Stränge für den Verbund mit UHPC aktiviert werden.

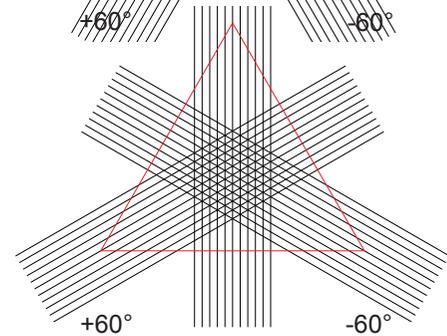
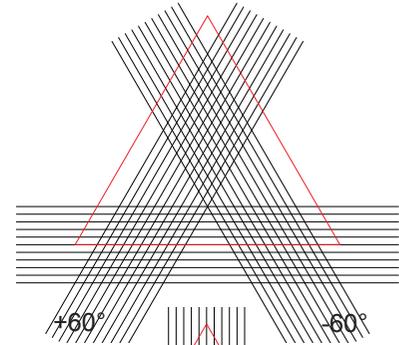
3.7.4



3.7.6



3.7.5



- Chemische Beständigkeit
- Hohe Dauerhaftigkeit und Duktilität
- Geringes Gewicht
- Einfache Handhabung und Verarbeitung

Ein Hersteller von Carbonprodukten für den Betonverbund ist die Firma SGL TECHNOLOGIES GmbH. Sigratex 600 zum Beispiel ist eine grob gewobene textile Bewehrungsmatte, die bei einem Gewicht von 560 Gram pro Quadratmeter eine Bemessungsspannung von 502 N/mm<sup>2</sup> aufweist.

Diese Matte verfügt über eine orthogonale, biaxiale Rovingausrichtung.<sup>9</sup> Zur Bewehrung der entwickelten Fertigteile müsste jedoch ein triaxiales Roving verfügbar sein, dessen Faserstränge unter  $60^\circ$  verwebt sind und in alle Richtungen dieselbe Querschnittsfläche pro Längeneinheit besitzt. Um eine hohe Lagegenauigkeit zu erzeugen, müssen die Bewehrungstextilien fest in der Form positioniert und vor Verrutschen gesichert werden. Es ist daher eine leichte Vorspannung in der Form selbst oder über einen Rahmen vorgesehen. Um auch zur Fügung der Elemente notwendige Zusatzbauteile ausreichend mit der Bewehrung verknüpfen zu können, werden unter Umständen auch Carbonformteile notwendig. Diese können durch das Verfestigen des Carbontextils mittels einer Epoxidharzschicht hergestellt werden. Die Einbindung der Kohlenstofffasern in eine derartige Kunststoffmatrix könnte allgemein mehrere Funktionen zur Lagesicherung und Ausrichtung der Bewehrungselemente während des Betoniervorganges erfüllen. Denkbar ist zum Beispiel Profile und Matten im Bauzustand mit Epoxidharz zu verkleben. Durch die Umhüllung der Fasern kann eventuell zusätzlich ein besseres Verbundverhalten zwischen Bewehrung und UHPC erreicht werden.



---

## 4 SCHNITTSTELLEN

---

Die Analyse der homogen geteilten Fertigteilshalen durch das FE Programm RFEM und das Grasshopper Plugin Karamba zeigte unter anderem die hohen Anforderungen an die zu verbindenden Schnittstellen zwischen den einzelnen Fertigteilen.

Da jede mögliche Verbindungslösung massive Einflüsse auf das endgültige Erscheinungsbild, die Komplexität der Schalung oder Form und den Umfang der notwendigen mechanischen Nachbearbeitung der Bauteile nimmt, ist die Entwicklung des Verbindungsdetails eng mit allen anderen Bereichen des Konzepts verknüpft. Die Übergabe der Kräfte von einem zum anderen Element zeigt sich somit als maßgebliche Größe für das endgültige Design und ist gleichermaßen eng mit allen technischen Aspekten, wie Bewehrungskonzept und Materialeigenschaften, verknüpft. Grundlegend wird bei der Entwicklung des Verbindungsdetails versucht, die Bauteile weiterhin so variabel und adaptiv zu erhalten wie möglich.

Da ein weiteres Ziel die maximale Ausnutzung und Verwendung von Beton ist, kommt eine ideale Verbindungsvariante ohne vielzählige andere Sonderbauteile aus einem anderen Material, zum Beispiel Stahl, aus. Auf diese Weise kann die Aufgabenstellung, eine selbsttragende Struktur aus nur einem sich wiederholendem Fertigteil herzustellen, am ehesten erfüllt werden. Zusätzlich soll die Verbindung in Hinsicht auf den späteren Aufbau und die Möglichkeit, Elemente austauschen zu können, lösbar sein.

Obwohl ein notwendiger leistungsfähiger Beton grundlegend Elementstärken von 6 cm zulässt, ist es bei solch geringen Dimensionen schwierig ein Verbindungselement zu integrieren, ohne die Plattenelemente an dieser hochbelasteten Stelle zu sehr zu schwächen. Ein einfaches und kostengünstiges Standardteil, wie zum Beispiel eine ausreichend dimensionierte Maschinenschraube, muss einen Durchmesser von 16 mm aufweisen, um den Anforderungen gerecht zu werden. Eine derartige Schraube nimmt also schon ein Drittel der für den Prototyp bestimmten Plattendimension ein.

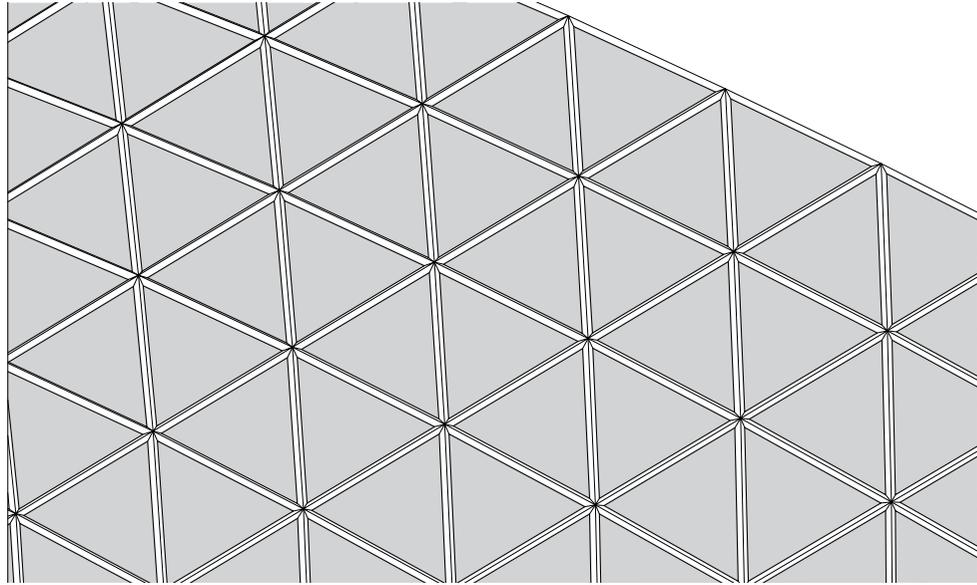
Ein weiterer Punkt, der über die ganze Detaillierungsphase beachtet werden muss, ist die steigende Komplexität der zur Fertigung notwendigen Schalung oder Form. Hohlräume in den Fertigteilen verlangen zum Beispiel einen aufwendigen Formenaufbau. Eine spätere zerstörungsfreie Entfernung der zur Abbildung von Löchern integrierten Formteile ist für eine Serienherstellung von mehreren hundert Elementen unabdingbar.

Die geeignetste Verbindungsvariante kann je nach Fertigteilgröße und statischer Anforderung variieren. Entwickelt werden deshalb mehrere Lösungsansätze, die verschiedene Schwerpunkte abdecken und nicht nur ein für den Prototyp passendes Verbindungsdetail.

Die Untersicht der Schale wird von der Fugenausbildung und den zu integrierenden Verbindungselementen bestimmt. Notwendige bauphysikalische Maßnahmen, wie eine Wärmedämmung, würden die Fugenausbildung jedoch verdecken.

4.1.1 Die Abbildung zeigt die Fertigteilelemente mit der notwendigen Freistellung zur Realisierung aller Faltungswinkel. Die Positionierung und Größe der Kontaktflächen hängt von der jeweiligen Verbindungslösung ab.

4.1.1



## DETAILIERUNGSGRUNDLAGEN

*Beton soll weitestgehend nicht durch Stahl ersetzt werden.*

*Die statischen Anforderungen müssen erfüllt werden.*

*Das Verbindungsmittel soll die Elementschlankheit möglichst nicht beeinflussen.*

*Zusätzliche Bauteile müssen mit der Elementbewehrung zusammengeschlossen werden.*

*Die Plattenelementkonturen müssen durch eine möglichst einfache Form herstellbar sein.*

*Das Verbindungsmittel soll gestalterisch nicht in den Vordergrund rücken.*

*Der Umfang der mechanischen Nachbearbeitung der Betonfertigteile soll gering gehalten werden.*

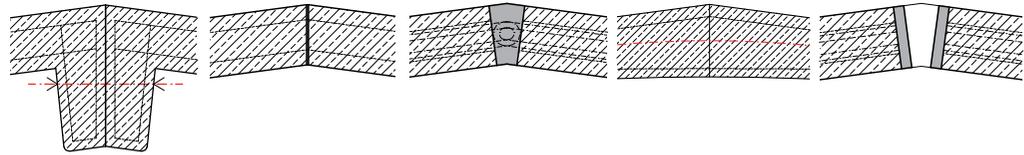
*Das Verbindungselement soll positive wie auch negative Faltungswinkel umsetzen können.*

*Die Prozessgenauigkeit darf nicht gemindert werden.*

*Die Fugen sollen nach außen abdichten.*

4.1.2 Die Auswertung zeigt, welche Verbindungstechniken die gestellten Anforderungen am besten erfüllen können und deshalb weiter ausgearbeitet werden.

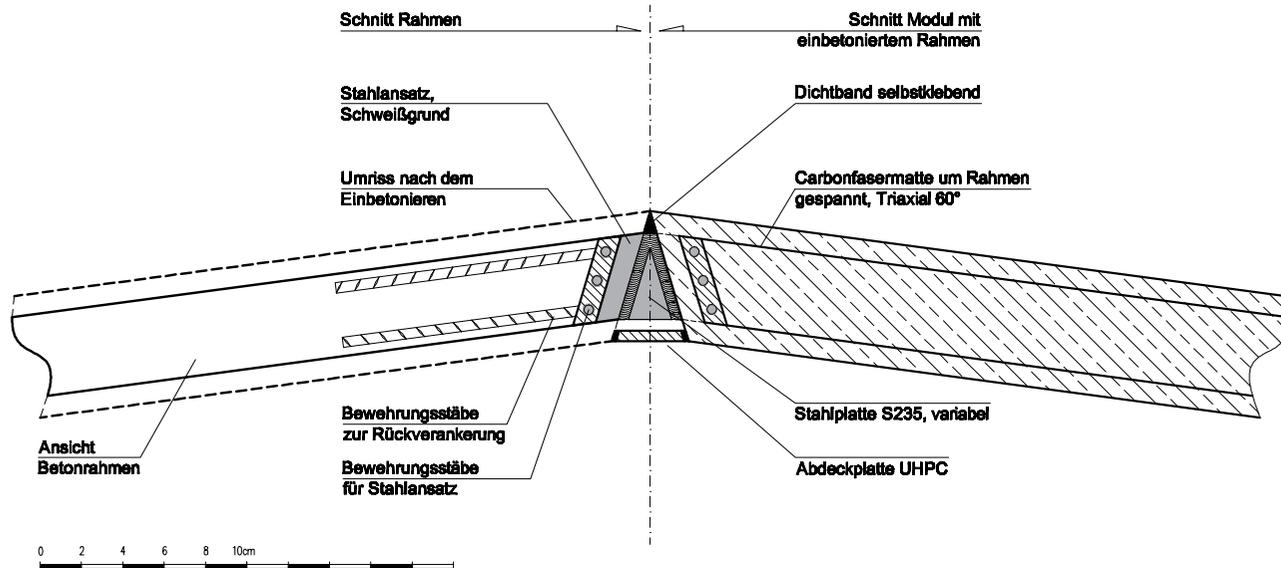
4.1.2



	LÖSBARE INTEGRATION VON ZUSÄTZLICHEN BAUTEILEN	FÜGEN DURCH KLEBEN	FÜLLBETON, VERBINDUNG DER ELEMENT-BEWehrUNGEN	VORSPANNEN DURCH KABEL	VERBINDUNG DURCH STAHLIMPLANTATE
<b>Anforderung umsetzbar</b>					
<b>Anforderung nur schwer umsetzbar</b>					
<b>ABDICHTUNG</b>					
<b>STATISCHE ANFORDERUNGEN</b>		Die hohen Biegemomente können ev. nicht über die schmalen Klebeflächen übertragen werden. Da die Kontaktflächen systembedingt bearbeitet werden müssen, erzeugt eine Klebefuge erste unnötige Abweichungen.	Dimensionen bei einem ausreichenden Betonvolumen in den Fugen zu groß. Elementgenauigkeit erfordert exakte Verbindungslösung.	Knicke verhindern gleichmäßigen Verlauf der Spannkabel.	
<b>PROZESSGENAUIGKEIT</b>					
<b>VARIABLE WINKEL</b>				Knicke verhindern gleichmäßigen Verlauf der Spannkabel.	Nötige Fugenbreite sehr groß.
<b>VERBINDUNG MIT ELEMENTBEWEHRUNG</b>	Bewehrungsverlauf muss an die nachträglich integrierten Bauteile angepasst werden.	Verbindung in der Klebefuge unexakt.	Bewehrungsüberdeckung nicht ausreichend.		
<b>LÖSBARKEIT</b>			Nicht lösbar ohne Zerstörung.	Einzelne Elemente nicht entfernbar.	Bei Verschweißung nicht lösbar.
<b>PLATZBEDARF FUGENDIMENSIONEN</b>	Bauteildicken von 6 cm bieten wenig Platz zum Einbau von Verbindungselementen.		Dimensionen bei einem ausreichenden Betonvolumen in den Fugen zu groß.		Nötige Fugenbreite sehr groß.
<b>KOMPLEXITÄT DER MONTAGE</b>		Variable Vermittlungskonstruktion zur vorübergehenden Fixierung der Elemente während der Trocknung notwendig.	Variable Vermittlungskonstruktion zur vorübergehenden Fixierung der Elemente während der Trocknung notwendig.	Keine Tragfunktion während der Montage bis zur Überdrückung.	
	Wird weiterbearbeitet:				Wird weiterbearbeitet:
	Verbindungsvariante für geringe Elementstärken bei der die Elementbewehrungen verknüpft werden.				Verbindungsvariante mit geriner Fugenbreite und einer kleinen Anzahl an Stahlteilen.

4.2.1 Betonrahmen, in die ein Stahlbauteil eingearbeitet ist, werden in die Schalung eingelegt und bilden an der freigestellten Seitenfläche einen Schweißgrund. Über den Rahmen wird die notwendige textile Bewehrung gespannt und somit während des Betoniervorganges ideal positioniert. Eingeschweißte Stahlbleche definieren den Faltungswinkel und verbinden die Elemente effektiv, ihre Umrisse werden von einem Skript ausgegeben um durch eine CNC Fertigungsmaschine produziert werden zu können.

4.2.1

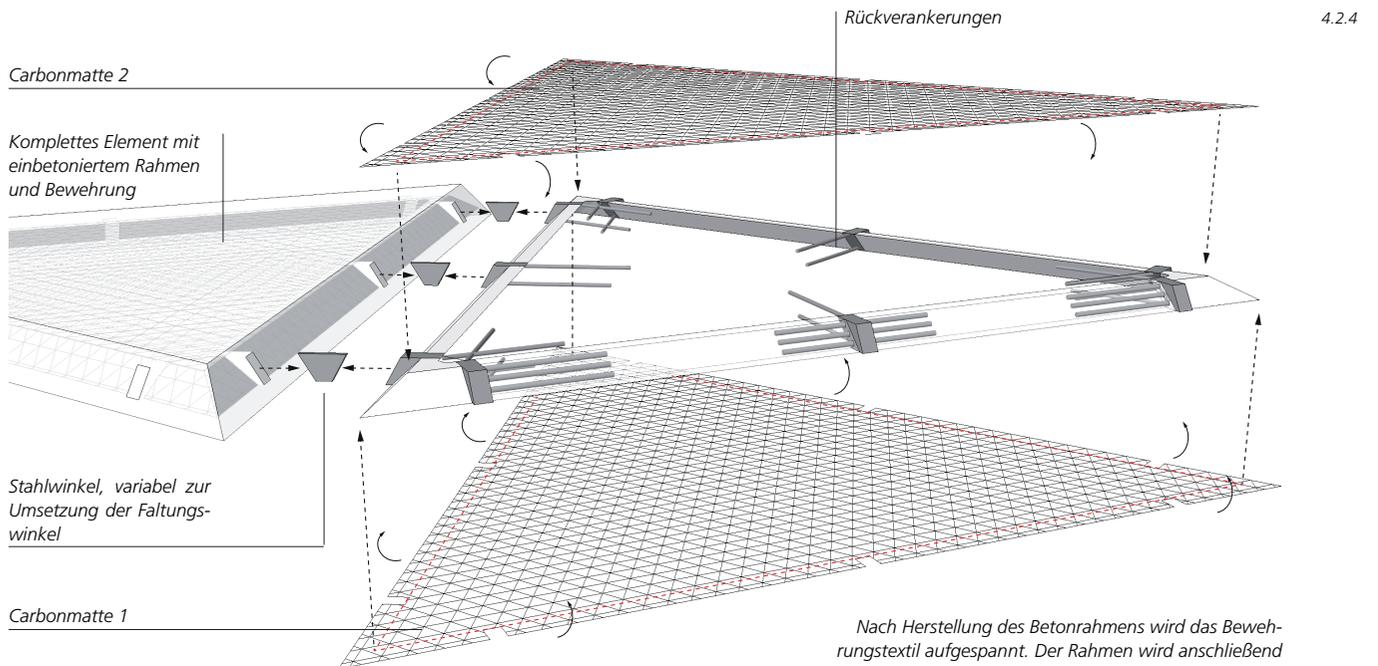
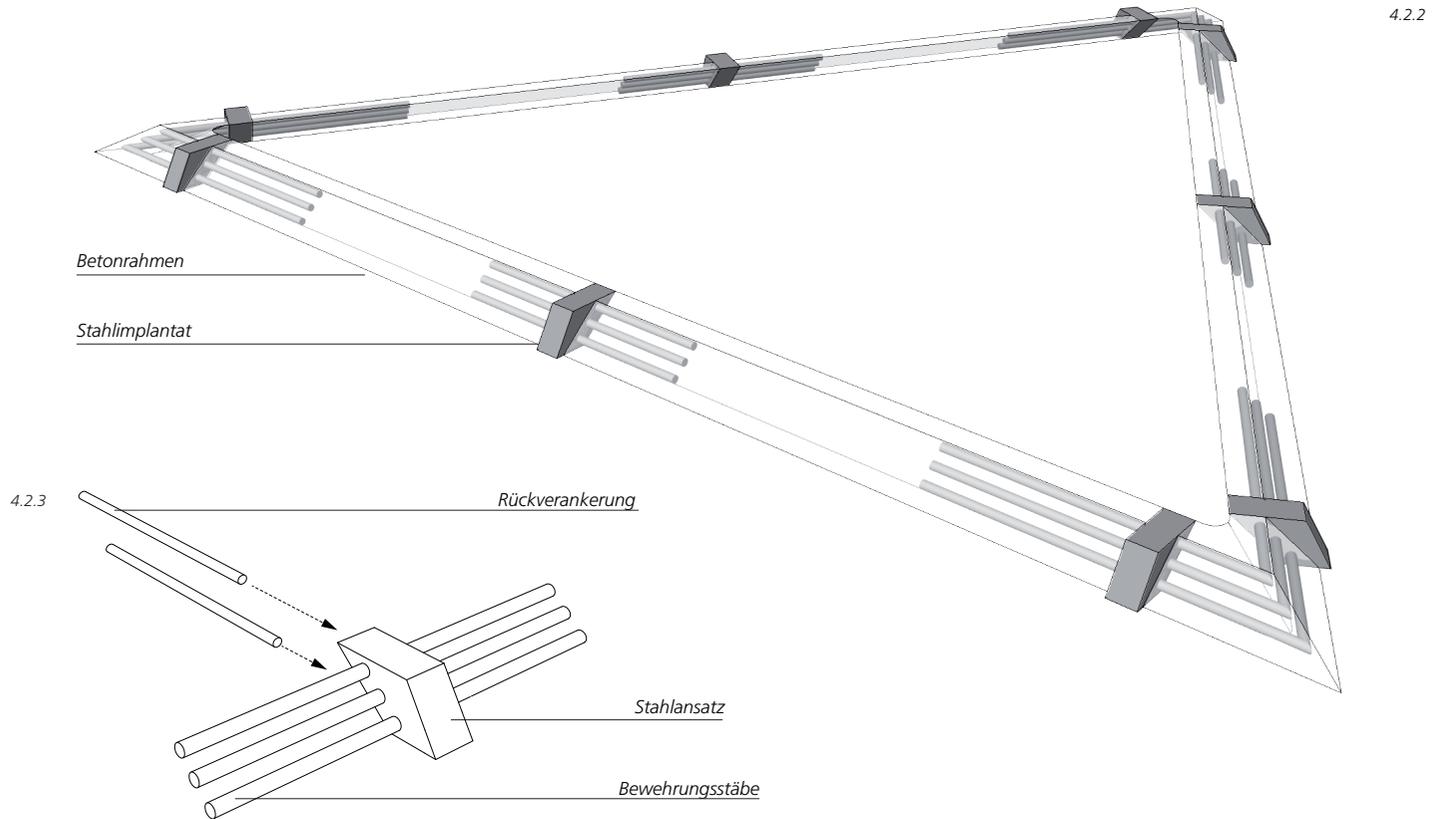


## VERSION STAHLIMPLANTAT

Durch die Integration von Stahlbauteilen in den noch flüssigen Beton kann ein hoch wirksamer Verbund von Implantat und Bewehrung erzeugt werden. Um diese positive Eigenschaft mit den anderen gewählten Systemkomponenten kombinieren zu können wurde eine Variante entwickelt, die die beiden Bewehrungsbestandteile, also textile Carbonbewehrung und Stahlstäbe, schon vor dem Betoniervorgang zueinander positioniert und dadurch eine unkomplizierte Verarbeitung ermöglicht. Der zuvor hergestellte Betonrahmen trägt die Stahlimplantate in sich und wird anschließend mit den Carbonmatten umspannt. Diese sind dadurch an der vorgesehenen Position fixiert und können mit dem Rahmen in die Fertigteilform eingelegt werden. Die zur Verbindung notwendigen Stahlbleche besitzen bei unsymmetrischen Schalen in jeder Fuge einen anderen Winkel und können durch ein weiteres Grasshopperskript automatisch in der zur Herstellung notwendigen Form ausgegeben werden. Gefertigt werden die Stahlelemente dann zum Beispiel durch Wasserstrahl- oder Laserschneiden. Die Verbindungsvariante eignet sich für Elementgrößen mit 100 - 200 cm Seitenlänge.

- Da Schweißarbeiten am fertigen Element erfolgen, muss die Fuge breiter sein.
- Es ist keine mechanische Bearbeitung des Betons notwendig.
- Eine zweite Form muss zu Herstellung des Rahmens gebaut werden.
- In den breiten Fugen können Installationen verlegt werden.
- Die Stahlbauteile müssen vor Korrosion geschützt werden.
- Zum Lösen der Verbindung müssen die Schweißnähte aufgetrennt werden, das Betonelement bleibt unberührt und kann wieder eingesetzt werden.
- Es können positive und negative Winkel umgesetzt werden.

4.2.2 Darstellung des Betonrahmens; der Rahmen wird in einer offenen Schalung betoniert, die Stahlimplantate werden in die Schalung eingelegt. (Abb. 4.2.5) Grundsätzlich kann der Rahmen auch aus Stahl oder CFK gefertigt werden.  
 4.2.3 Der Stahlansatz wird von Bewehrungsstäben durchstoßen; die Stäbe können je nach Einsetzposition angepasst werden. Nach dem Einbetonieren in den Betonrahmen werden zusätzliche Bewehrungsstäbe als Rückverankerungen in die Stahlansätze geschraubt.  
 4.2.4 Der Rahmen wird mit Carbonmatten umspannt; an den Flanken des Rahmens werden die Matten umgefaltet und zusammengeführt. Die sich überlappenden Ränder werden nun mechanisch mit dem Rahmen verbunden oder eventuell mit Epoxidharz verklebt.



4.2.5 Offene Schalung zur Erzeugung des Rahmens; die Stahlimplantate werden in die Schalung eingelegt und anschließend einbetoniert.

4.2.6 Die innere Rahmenfläche wird von einem entfernbaren Kernelement abgebildet, das nach dem Einlegen der Stahlbauteile eingesetzt wird.

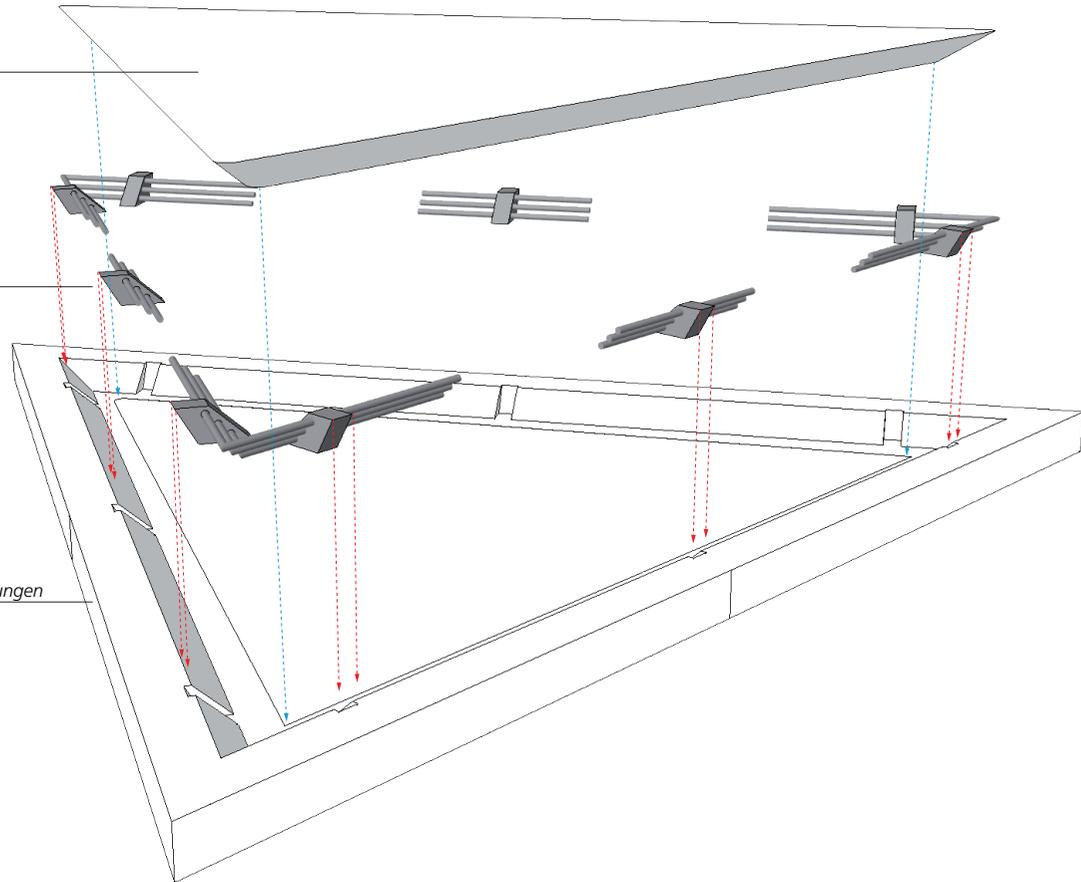
Zum Entnehmen des fertigen Rahmens muss zunächst das Kernelement entfernt werden. Der nötige Formaufbau zur Integration eines Rahmens ist in Kapitel 5, Bild 5.2.2, beschrieben.

4.2.5

Entfernbarer  
Kern

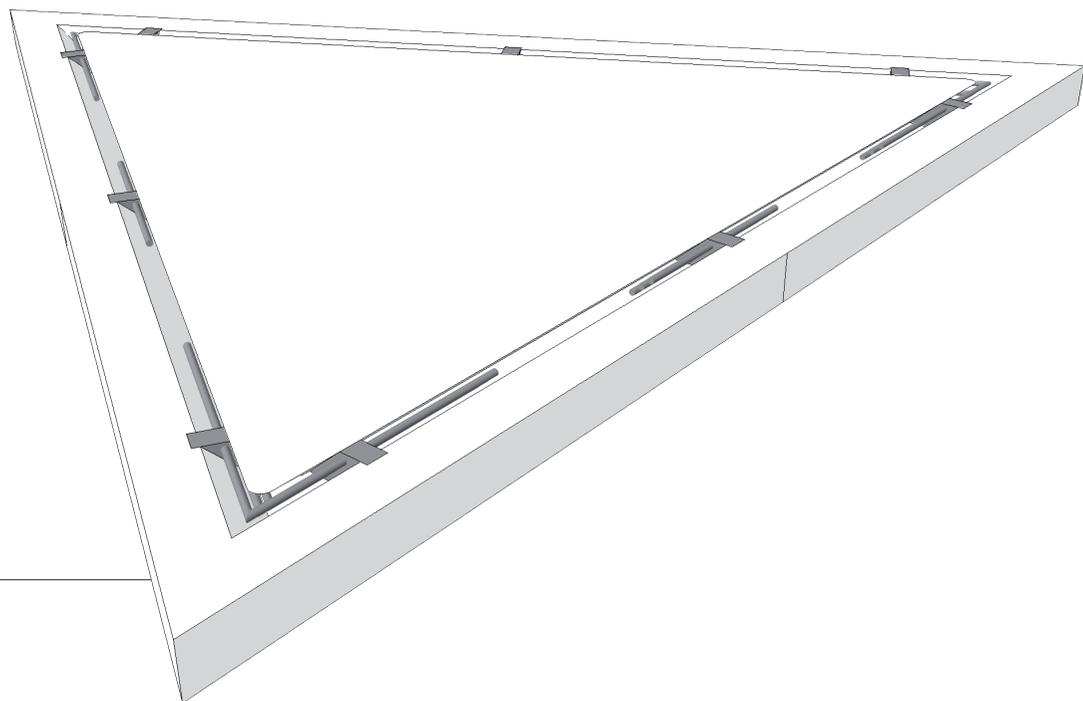
Stahlimplantate

Schalung mit Ausnehmungen  
zur Positionierung  
der Stahlimplantate.



4.2.6

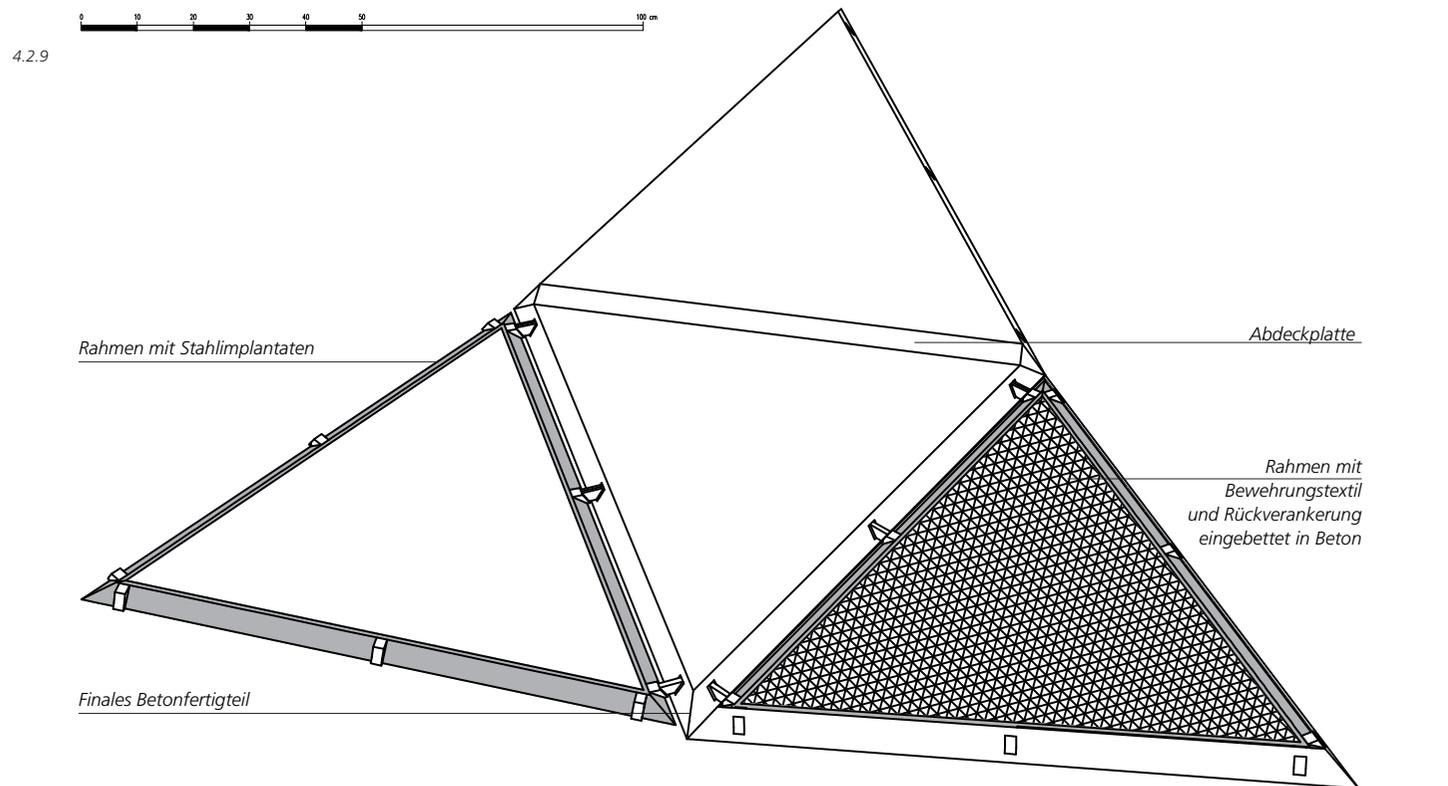
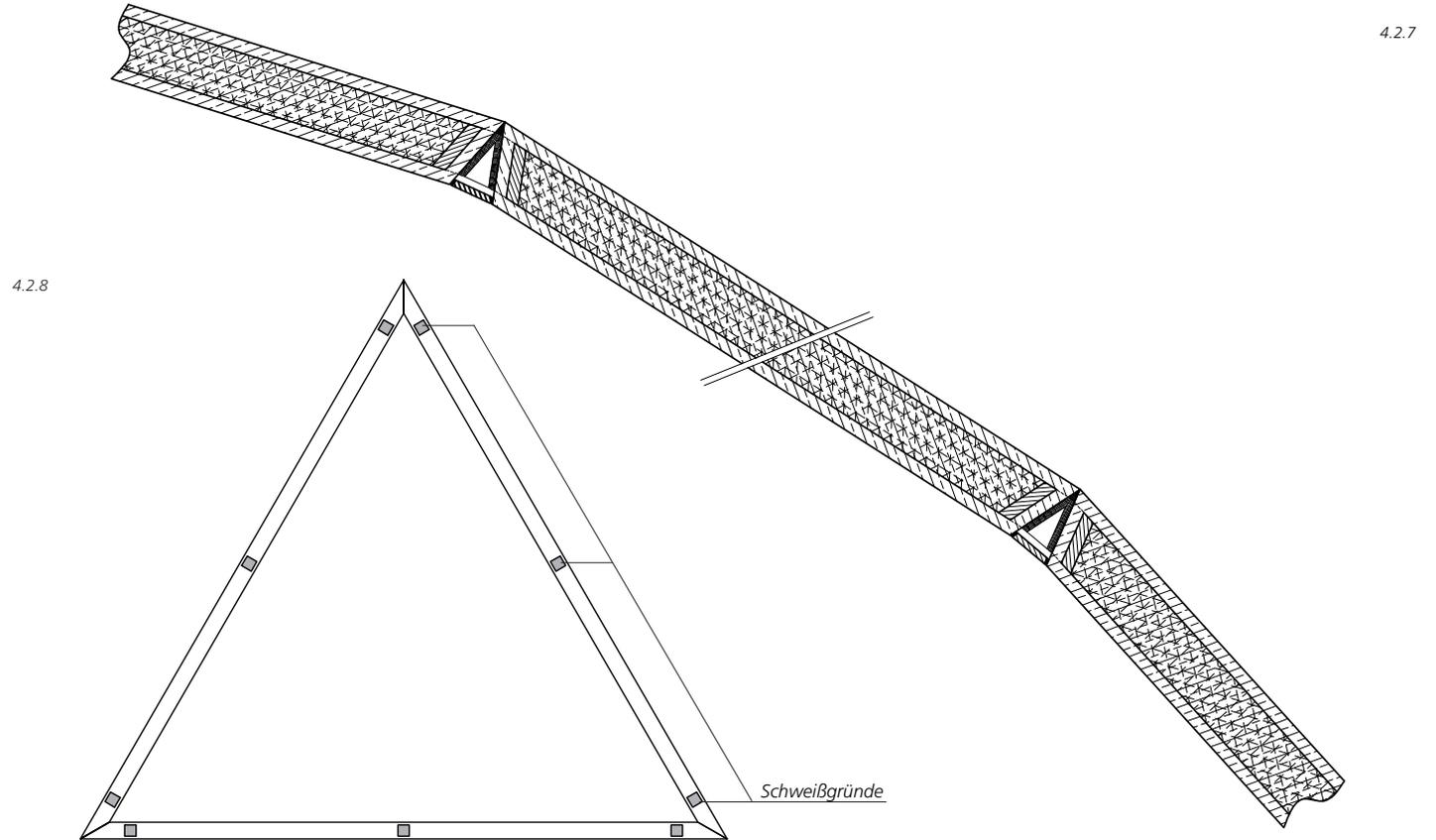
Zusammengesetzte Form



4.2.7 Schnitt durch mehrere gefügte Fertigteile, die Fugen müssen an der Innenseite durch Plattenelemente abgedeckt werden. Werden die Stahlwinkel durchbohrt, können in den Fugen Installationen gelegt werden.

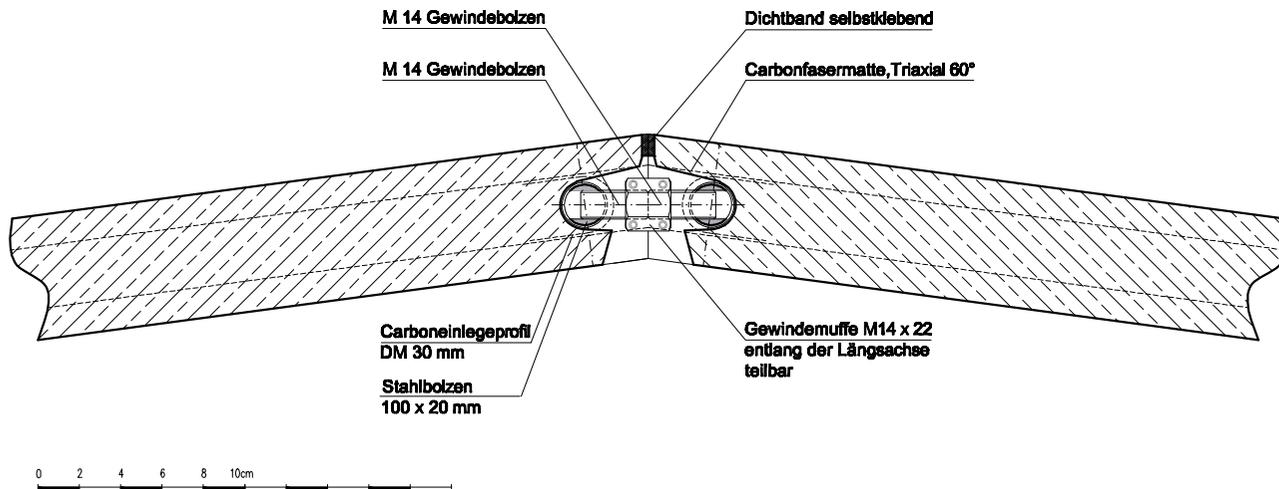
4.2.8 Es muss keine weitere Bearbeitung der Betonelemente erfolgen, die ursprüngliche Gestalt wird nicht verändert.

4.2.9 Räumliche Darstellung der Verbindungsvariante; Betonrahmen mit Stahlansätzen, Rahmen mit aufgespannter Bewehrung im Zentrum des Moduls, komplettes Modul mit einbetoniertem Rahmen.



4.3.1 Durch seitlich in das Bauteil eingeführte, lose Bolzen wird eine zentrische Verbindung möglich. Da die Bolzen verdrehbar gelagert sind, können verschiedene Verbindungswinkel umgesetzt werden. Die Verbindung ist einfach zu lösen und zu warten und benötigt dabei nur die gewünschte Bauteilhöhe von 6 cm. Der Kraftschluss erfolgt zentrisch und kann bei einer entsprechenden Bewehrungsführung die Kräfte gut übertragen. Zur Herstellung sind zwei Stahlbauteile, die nicht als Normteile verfügbar sind, sowie ein Carbonprofil notwendig.

4.3.1



## VERSION INTEGRIERTE VERSCHRAUBUNG

Eine Lösungsvariante für eher kleine Fertigteilelemente ist eine interne Verschraubung, aufgrund der eher geringen Kontaktflächengröße und der Positionierung der Verschraubung sollte diese Variante für Elementseitenlängen von 80 cm - 100 cm verwendet werden.

Bei der Montage müssen die frei drehbaren Bolzen seitlich in die Elemente gesteckt werden. Sind sie positioniert, können die sich nun gegenüberliegenden Bolzen durch eine Kombination von Gewindestangen und einer teilbaren Gewindemuffe verbunden werden. Während des Betoniervorganges muss die Bewehrung um die Bolzenlöcher geführt werden, um später die auftretenden Kräfte in das Element ableiten zu können. Eingesetzt werden hierfür halbrunde Carbonprofile.

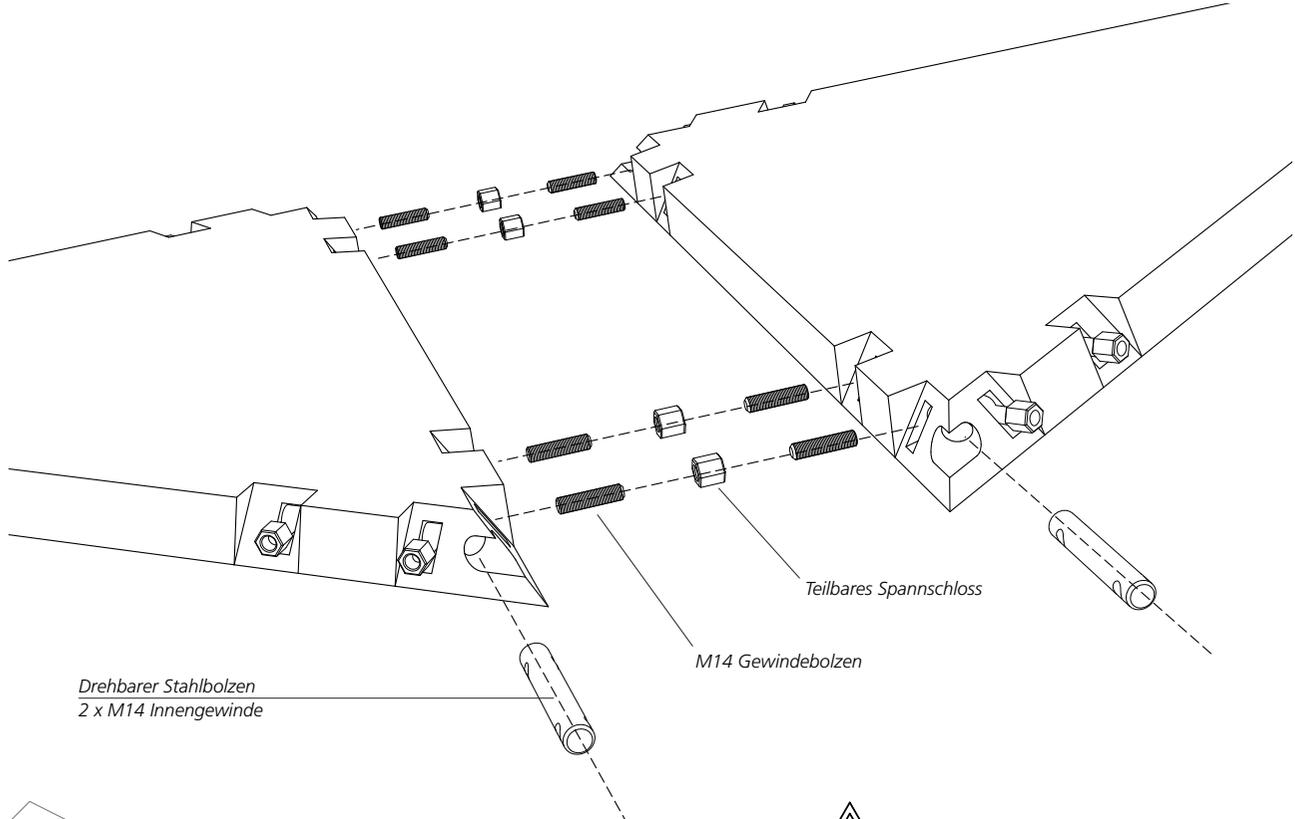
Die so erzeugte Schraubverbindung kann unzählige Male gelöst und wieder montiert werden. Die Verbindungsart würde sich durch diese Eigenschaft für ein Standardsystem zur Herstellung von kleineren temporären Strukturen mit Spannweiten bis zu zehn Metern eignen. Eine Fertigung von hohen Stückzahlen ist bei dieser Variante auch aufgrund der verwendeten Stahlbauteilen und der notwendigen komplexen Form anzustreben.

- Die Herstellung der Elemente ist vergleichsweise aufwendig.
- Die mechanische Bearbeitung muss nur an zwei Kontaktflächen pro Seite erfolgen.
- Da die Form wegen der entfernbaren Kerne zwei Teilungsebenen haben muss, kann das Bewehrungstextil in die Formrahmen gespannt werden.
- Eine Erhöhung der Bauteildicke ist nicht notwendig.
- Die Stahlbauteile müssen vor Korrosion geschützt werden.
- Die Verbindung ist einfach wieder lösbar.
- Es können positive und negative Winkel umgesetzt werden.
- Die Fugen müssen nur im Eckbereich verbreitert werden.

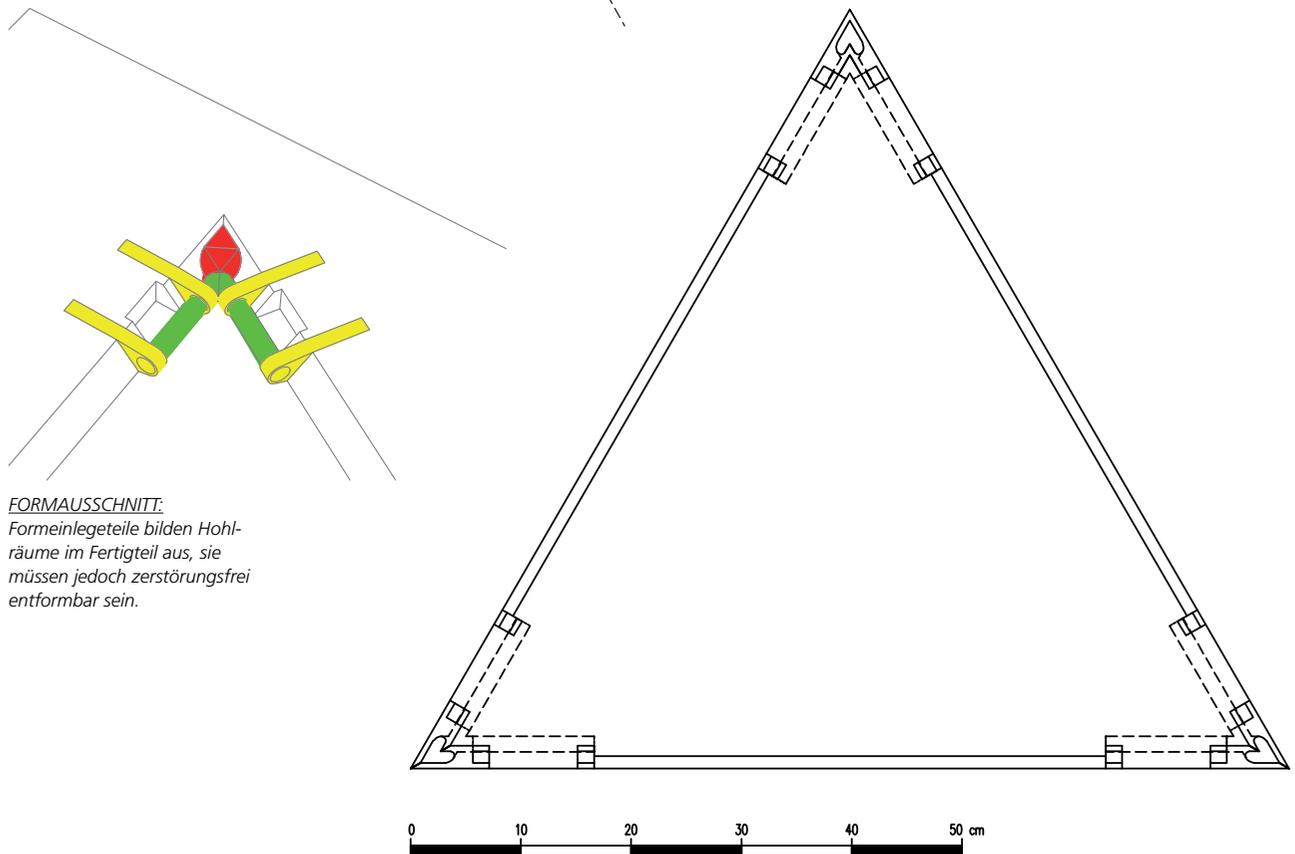
Der genaue Formaufbau ist in Kapitel 5.2 beschrieben.

4.3.2 Explosionszeichnung der Verbindungsvariante; drehbare Bolzen werden bei der Montage der Fertigteile in dafür vorgesehene Bohrungen eingefügt und anschließend über ein teilbares Spannschloss miteinander verbunden.  
 4.3.3 Die Verbindungskonstruktion tritt an den Elementeckpunkten in Erscheinung, die Fugen können abgedeckt werden.  
 4.3.4 Darstellung eines Formausschnittes; die farbigen Bauteile (Kerne) werden mit dem Fertigteil ausgeformt und dann in der Reihenfolge rot, grün, gelb aus dem Element gezogen. Zurück bleiben die notwendigen Betonaussparungen im Elementinneren.

4.3.2



4.3.4



**FORMAUSSCHNITT:**  
 Formeinlegebauteile bilden Hohlräume im Fertigteil aus, sie müssen jedoch zerstörungsfrei entformbar sein.

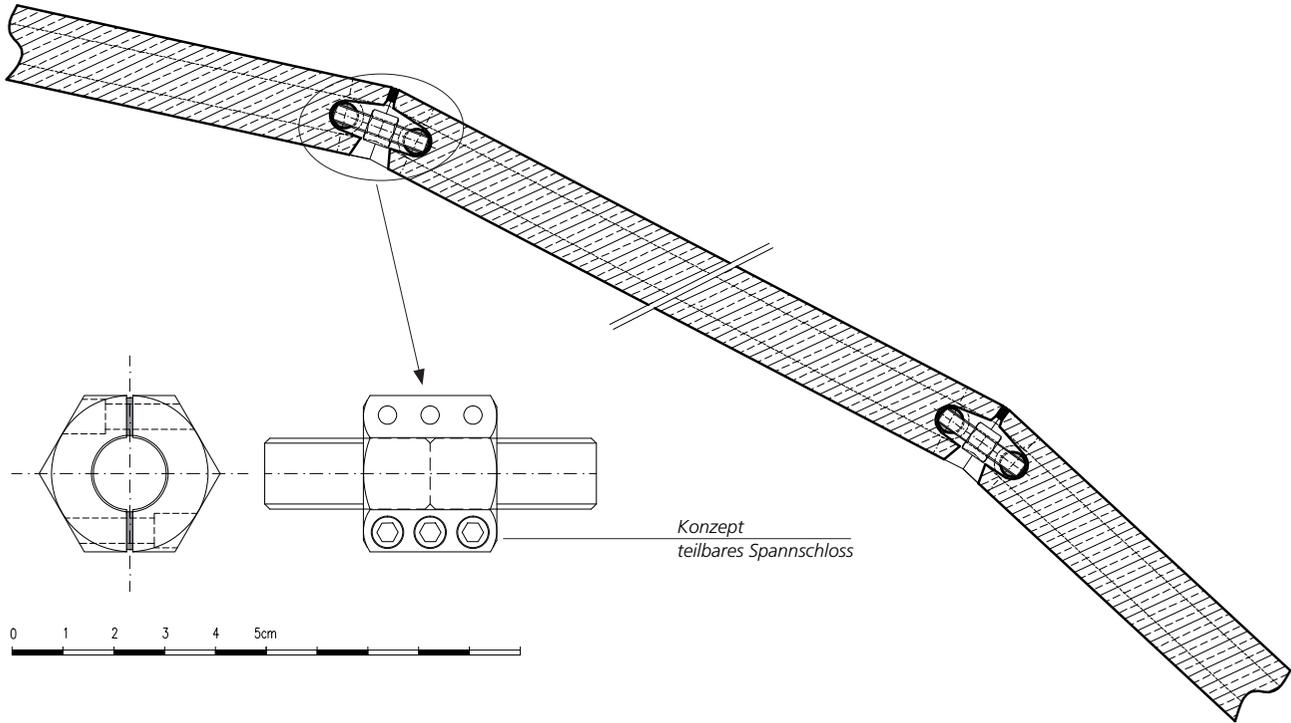


4.3.4 Schnitt durch mehrere gefügte Fertigteile.

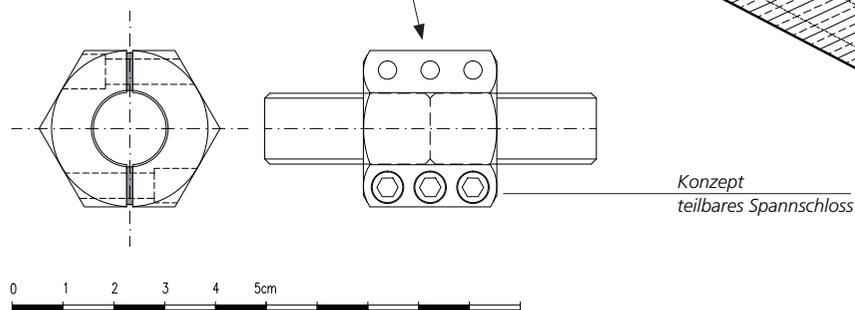
4.3.5 Um die Elemente verbinden zu können, wird ein teilbares Spannschloß benötigt. Das zweigeteilte Bauteil wird zerlegt, um die Gewindebolzen gelegt und anschließend wieder verbunden. Die Gewindebolzen müssen hierfür passend zum Spannschlossgewinde orientiert werden. Die Mutter selbst wird ebenfalls über Schrauben verbunden. Die hier dargestellte Version zeigt ein grundlegendes Konzept.

4.3.6 Räumliche Darstellung von zwei verbundenen Elementen.

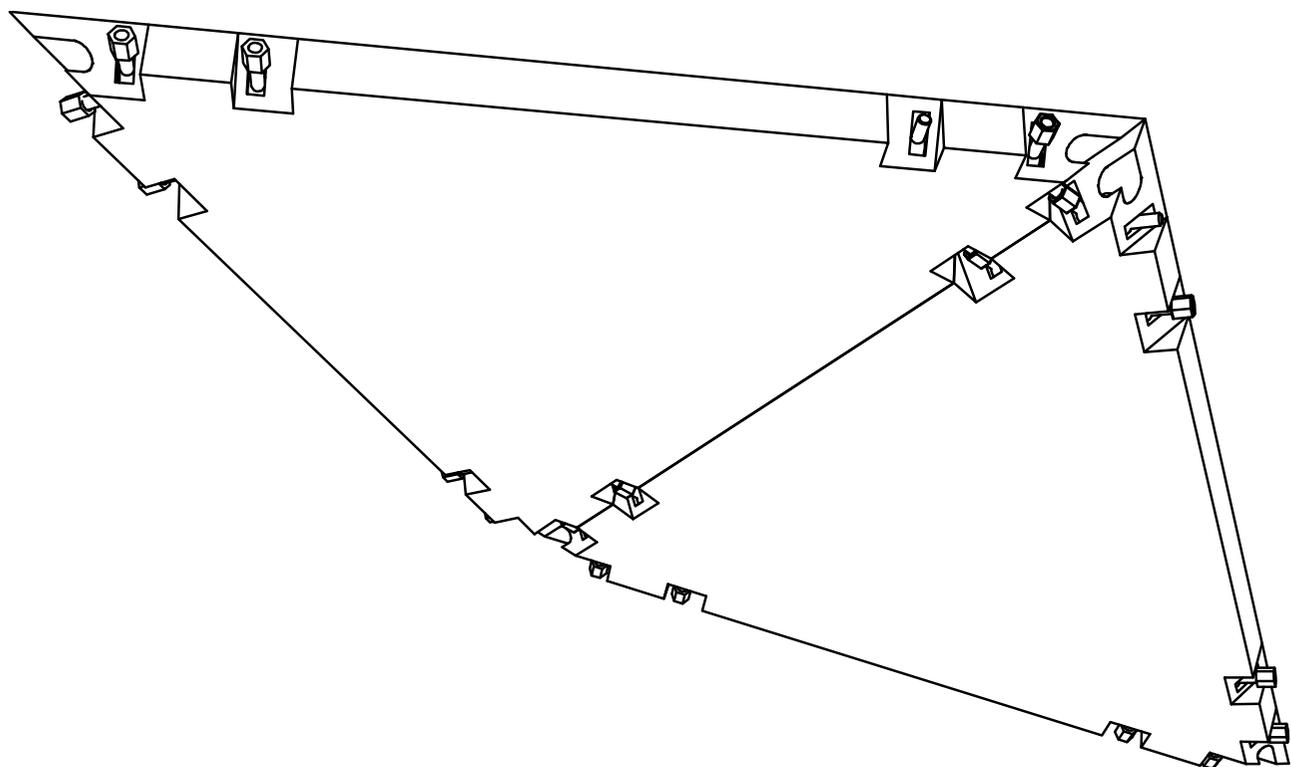
4.3.4



4.3.5



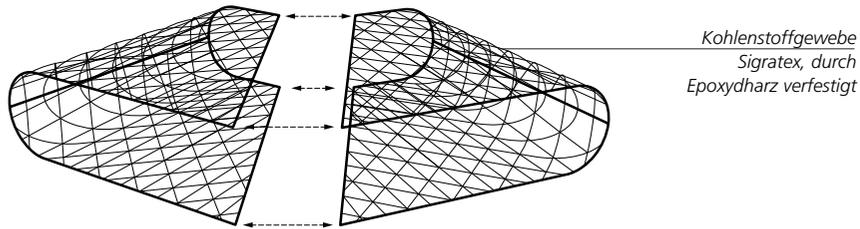
4.3.6



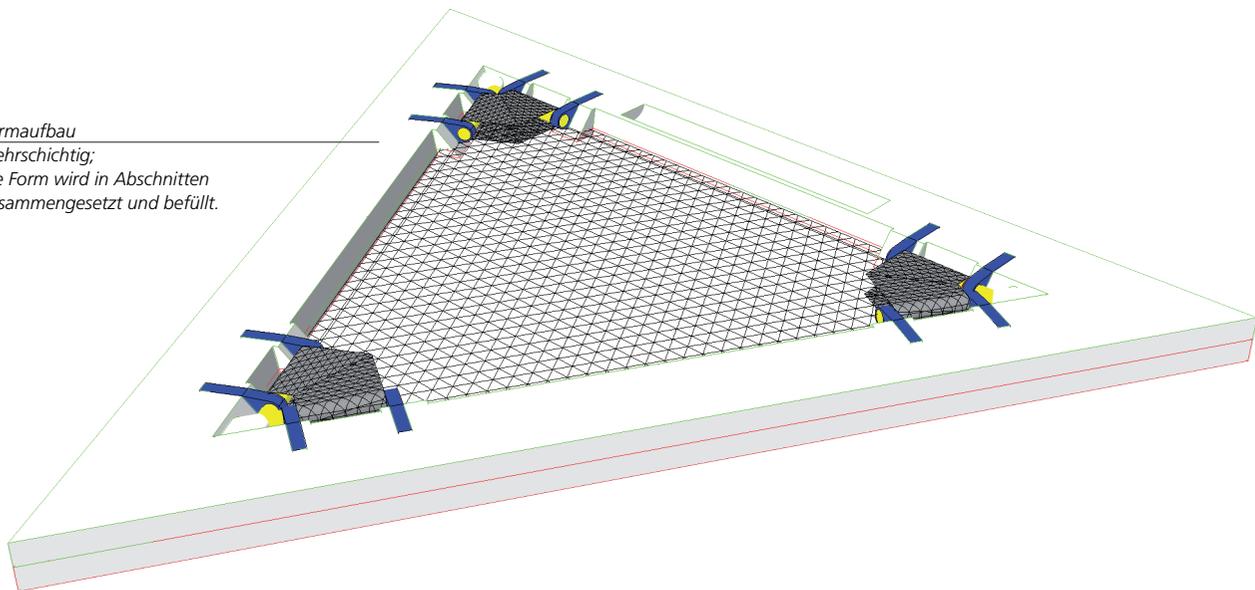
4.3.7 Vorgeformtes Carbongelege; das unter Bewehrungskonzept gezeigte Kohlenstoffasertextil Sigratex der Firma SGL könnte über eine Negativform gelegt und mit Epoxidharz verfestigt werden.

4.3.8 **Auszug aus Kapitel 5.2, Aufbau der Formen;** die vorgefertigten Bewehrungselemente können in die Form eingelegt und mit anderen Bewehrungskomponenten verbunden werden.

4.3.7



Formaufbau  
mehrschichtig;  
die Form wird in Abschnitten  
zusammengesetzt und befüllt.



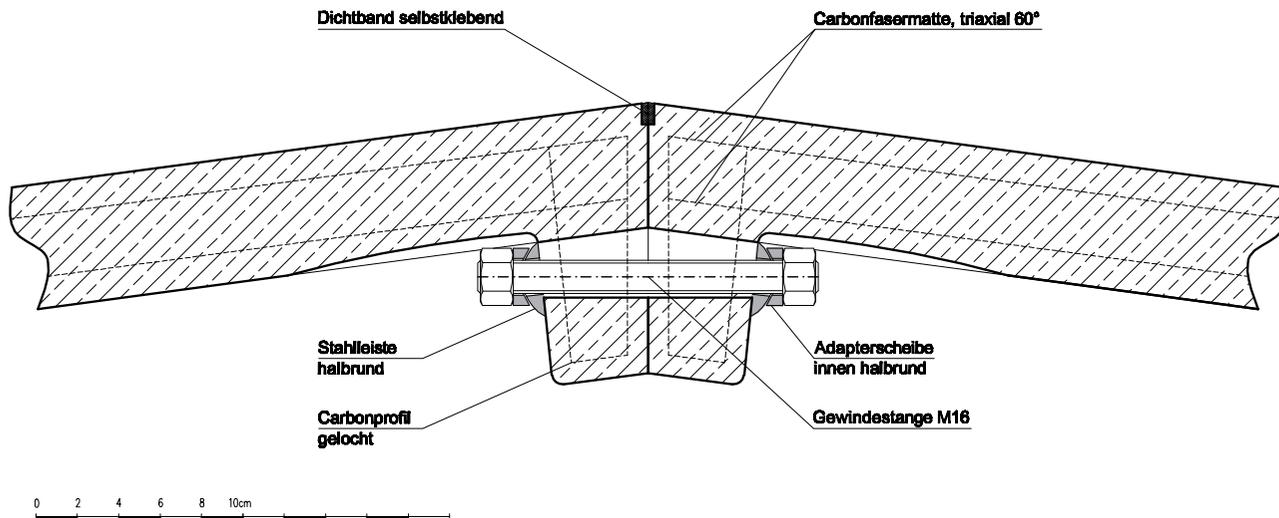
4.3.8

Der in Kapitel 5.2 beschriebene Aufbau der Formen erlaubt die Integration einer schlaffen Bewehrung durch das Einspannen des Textils in Formrahmen. Eine mehrschichtige Form ist für die Herstellung dieses Elementtyps aufgrund der Einlegeteile zur Ausbildung der Hohlräume ohnehin notwendig und bietet zusätzlich die Möglichkeit, die schlaffen Kohlenstoffasermatten auf die beschriebene Weise in der Form zu fixieren.

Vorgeformte Bewehrungselemente können über die Kerne, zur Ausbildung der späteren Bolzenlöcher, gelegt werden, um im fertigen Bauteil die an dieser Stelle auftretenden Kräfte in die Bewehrungslagen einleiten zu können. Die vorgeformten Carbonprofile können während des Betonvorganges in den Überlappungsbereichen mit den eingespannten Textilgelegen verklebt werden.

4.4.1 An den maximalen Faltungsgrad angepasste Langlochbohrungen ermöglichen die Umsetzungen von variablen Winkeln. Die Einlegeeile zur Erzeugung der Bohrungen müssen an die jeweilige Struktur angepasst werden. Auch die Ansatzbreite kann durch Formeinlegeeile adaptiert werden, um die mechanische Nachbereitung zu minimieren. Halbrunde Stahlleisten verteilen die Kräfte auf die gesamte Seitenlänge und ermöglichen die verschiedenen Schraubwinkel. Negative Verbindungswinkel können aufgrund der Entformbarkeit nur durch eine aufwendigere Schalung umgesetzt werden und greifen bei dieser Lösungsvariante durch die steigende Ansatzbreite massiv in das Erscheinungsbild der Untersicht ein.

4.4.1



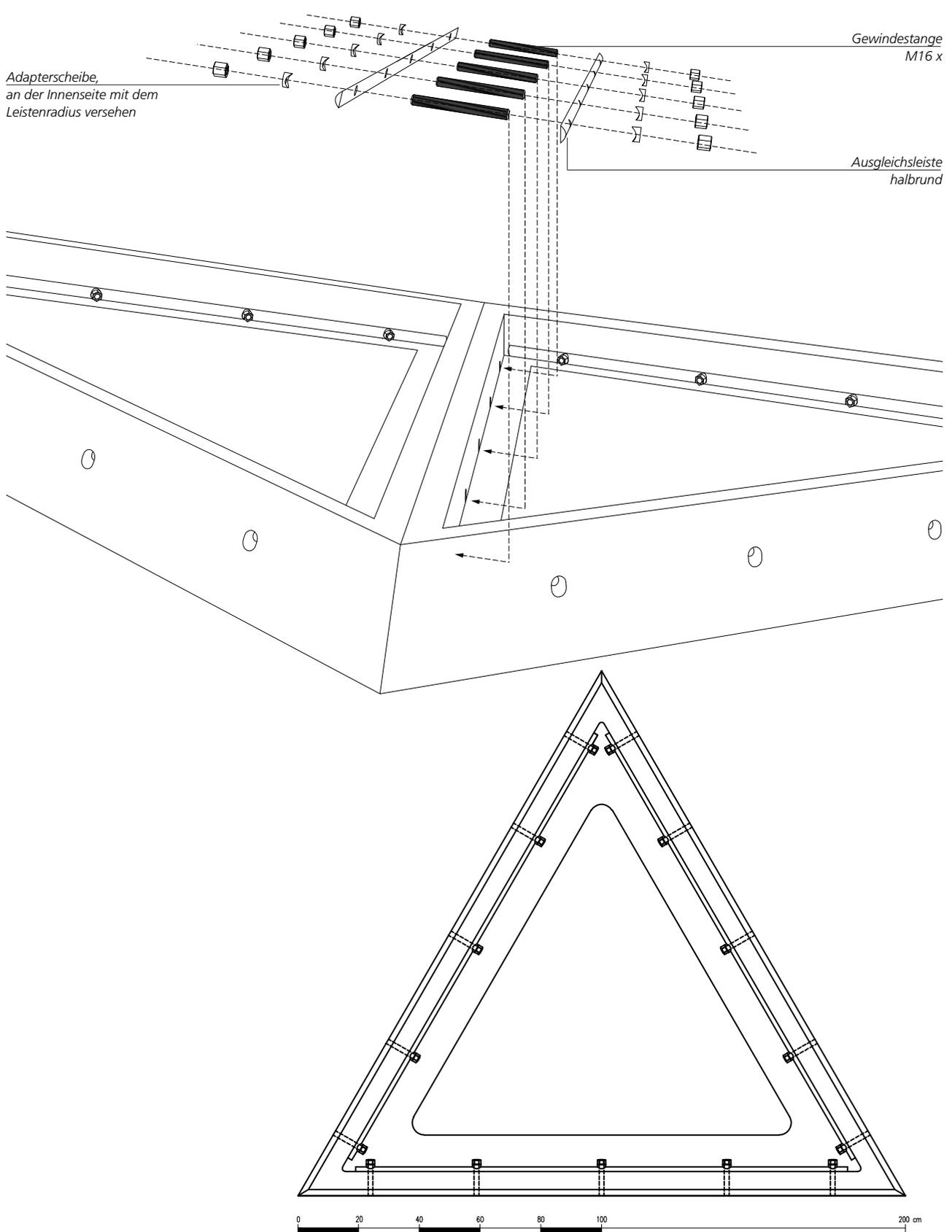
## VERSCHRAUBUNG VON AUFKANTUNGEN

Sollen Fertigteilelemente von 170-200 cm Seitenlänge gefügt werden, ist eine Erhöhung der Kontaktfläche sinnvoll, da die Analysen mit Karamba zeigten, dass bei Verwendung der entwickelten Formfindungsmethode bei größeren Elementen die statischen Anforderungen an das Element steigen.

Das Element an sich ist einfach zu fertigen und verlangt keine äußerst komplexe Schalung oder Sonderbauteile. Zur effizienten Herstellung der Elemente wären jedoch aufwendige Carbonbauteile nötig, da die Bewehrung eine möglichst biegesteife Elementecke erzeugen muss. Hierzu wäre der Einsatz von eigens angefertigten Carbonprofilen denkbar, die an die textile Bewehrung angeschlossen werden. Die verwendeten Bewehrungsmatten aus Carbongewebe könnten aber auch vorgeformt und mit Epoxidharz gebunden werden, um während des Betonierens den geplanten Bewehrungsverlauf nicht durch Verrutschen zu verändern. Ein Holznegativ kann für die Herstellung eines solchen Halbzeugs geformt werden.

- Die zur Herstellung der Elemente notwendige Form ist vergleichsweise einfach.
- Eine mechanische Bearbeitung muss an weiten Teilen der Seitenflächen erfolgen (Freistellungen können jedoch eingefügt werden).
- Das Bewehrungstextil kann zum Teil direkt in eine Formebene gespannt werden. Zusätzliche Bewehrungsteile werden in die Form eingelegt.
- In den Randbereichen erfolgt eine Verdopplung der Bauteildicke.
- Die Stahlbauteile müssen vor Korrosion geschützt werden.
- Die Verbindung ist einfach montier- und demontierbar.
- Negative Faltungswinkel können nur sehr begrenzt umgesetzt werden.
- Das Erscheinungsbild der Untersicht ändert sich durch die Aufkantungen massiv.

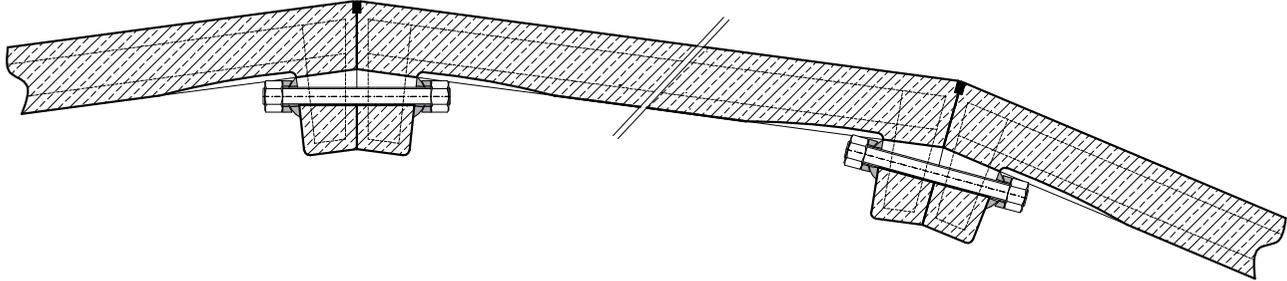
4.4.2 Explosionszeichnung der Verbindungsvariante; die Fertigteile werden über halbrunde Ausgleichleisten verbunden, die zur Anpassung an die verschiedenen Faltungswinkel notwendig sind. Um die Vorspannkkräfte der Verschraubung auf die Leisten übertragen zu können, sind Ausgleichsscheiben mit demselben Radius beigelegt.  
 4.4.3 Untersicht des Fertigteils; die Verschraubungsanzahl kann angepasst und erweitert werden.



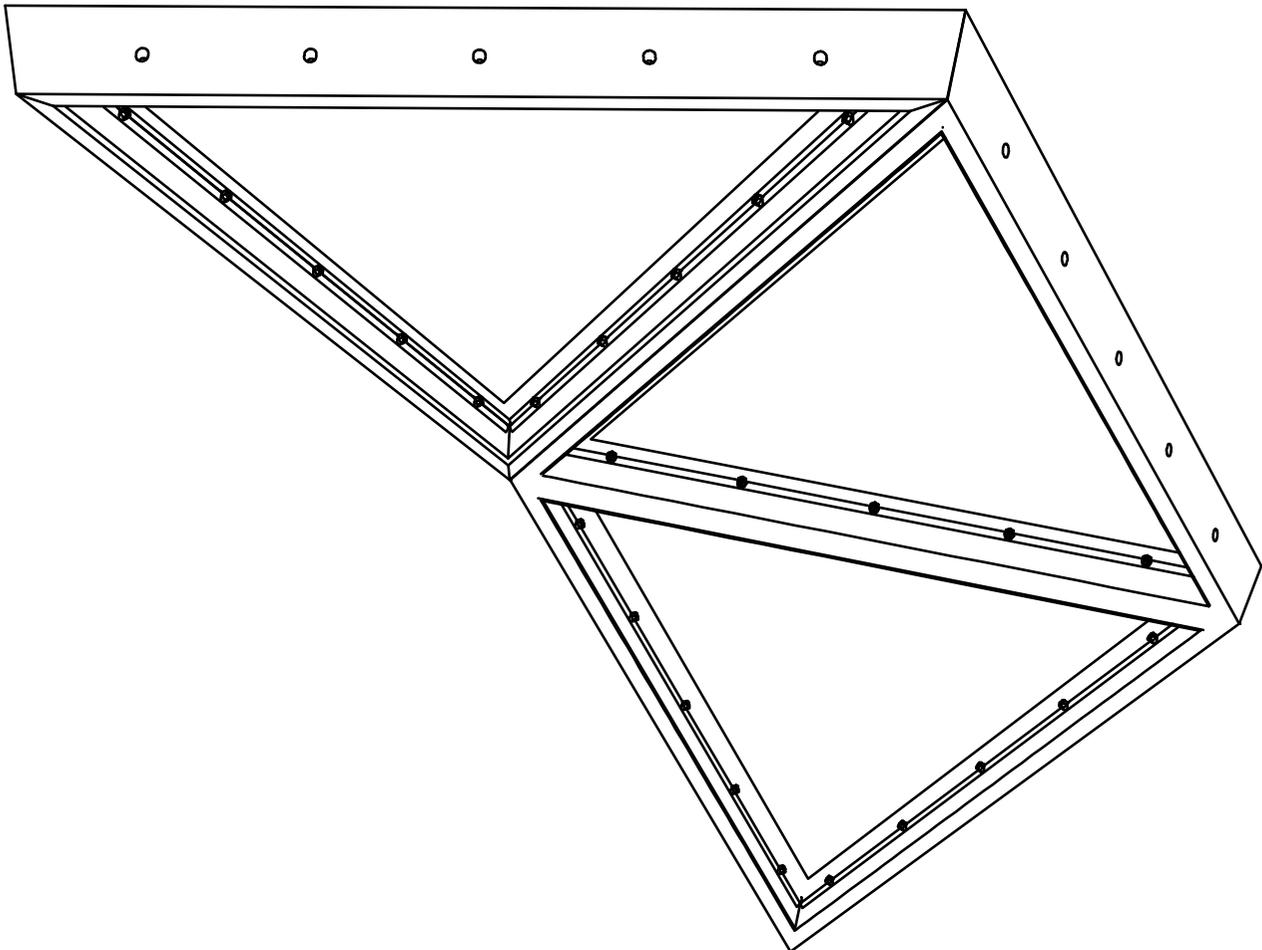
4.4.4 Schnitt durch drei gefügte Elemente.

4.4.5 Räumliche Darstellung der Verbindungsvariante, das Erscheinungsbild der Untersicht unterscheidet sich deutlich von den anderen Varianten. In der entstehenden Zwischenebene können eine eventuell zu integrierende Wärmedämmung und gebäudetechnische Installationen untergebracht werden. Durch die Aufkantungen wird die Kontaktfläche erweitert und somit ein leistungsfähigeres Fertigteile für die Umsetzung längerer Elementseitenkanten gebildet. Um diese Anforderung umsetzen zu können, muss eine aufwendige Bewehrungsführung umgesetzt werden.

4.4.4



4.4.5

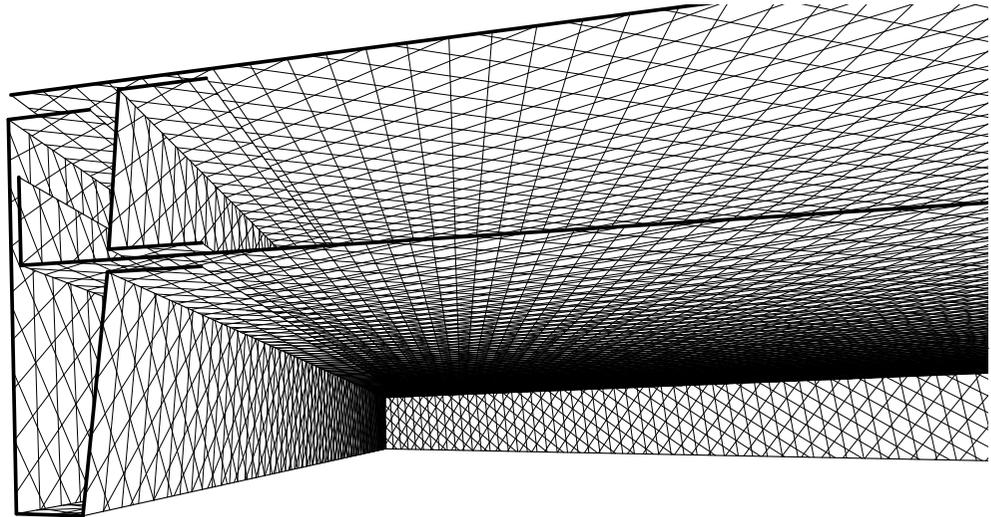


4.4.6 Mögliche Kombination von Carbonbewehrungsteilen zur Ausbildung einer biegesteifen Ecke im Betonverbund.

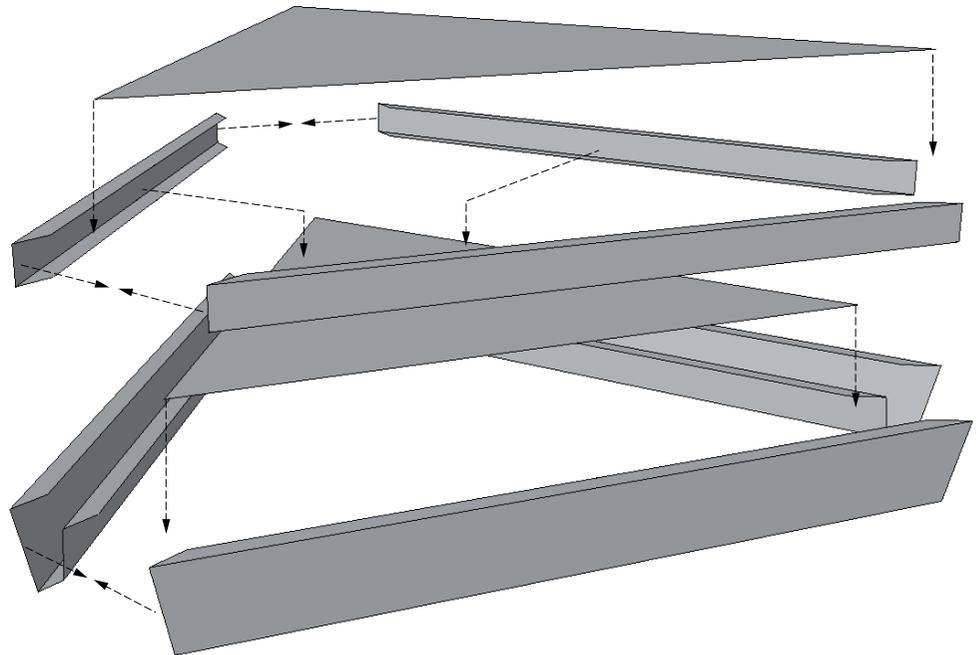
4.4.7 Vorgefertigte Carbonkomponenten werden miteinander verklebt und ermöglichen so eine mehrdimensionale Bewehrungsführung.

Der Verbund der Profile könnte über eine Kunststoffmatrix erzeugt werden.

4.4.6



4.4.7

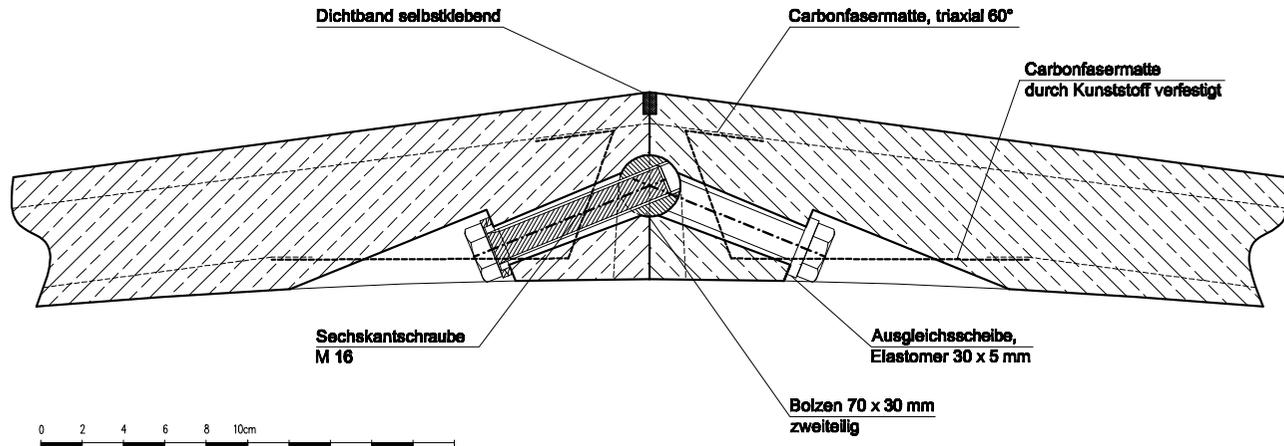


Könnten die Carbontextilien ausreichend stark miteinander verbunden werden, wäre es denkbar, die großmaschigen Gelege durch Negativformen zu profilieren, mit Epoxidharz zu verfestigen und die Einzelteile anschließend miteinander zu verkleben. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Bewehrungsquerschnitt aus speziell angefertigten CFK-Profilen zusammenzusetzen.

Diese Profile müssten jedoch, um den Betoniervorgang nicht zu behindern, perforiert sein. Durch die in Kapitel 5 beschriebenen Formkonzepte wäre sowohl das Einlegen eines kompletten Bewehrungskorbes in eine zweifach geteilte Form denkbar, als auch die Zusammensetzung und Verklebung der Komponenten analog zu den Betonierschritten.

4.5.1 Von der Unterseite zum Kontaktflächenzentrum geführte Schrauben verbinden die Fertigteilenelemente über einen verdrehbaren Bolzen. Die Formteile zur Ausbildung der Durchgangsbohrungen sind mit der Form verschraubt, vor dem Ausschalen wird die Verschraubung gelöst. Diese Kerne können abschließend entlang der Bohrungsschse herausgezogen werden. Die Verdrehung der Schraubachse durch die Positionsänderung des Bolzens mit den unterschiedlichen Faltungswinkeln im Zentrum ist gering und wird an den Schraubenköpfen durch eine radial verschiebliche Lagerscheibe oder eine Elastomerscheibe kompensiert.

4.5.1



## VERSION ZENTRISCHE VERSCHRAUBUNG

Elemente mit einer Seitenlänge von 100-150 cm und Faltungswinkeln bis 25 ° können auch auf diese Weise intern miteinander verschraubt werden. Die Schrauben werden dabei von unten zum Zentrum der Kontaktfläche geführt, wo ein drehbarer Bolzen eingelegt ist, der Gewindebohrungen in zwei Richtungen besitzt. Diese Bohrungen sind verdrehbar und ermöglichen so die Verbindung unter verschiedenen Winkeln. Da der drehbare Bolzen je nach Winkel der Kontaktflächen seine Position zu den Schrauben ändert, muss auch hier die Schraubbohrung als an diese Veränderung angepasstes, asymmetrisches Langloch ausgeführt werden.

Die Funktionsweise erfordert jedoch eine komplexe mechanische Bearbeitung, da die Kontur des Bolzens immer je zu einer Hälfte in eine Seitenfläche eingearbeitet werden muss.

Um wieder nur ein immer gleiches Bauteil betonieren zu können, sind die Durchgangslöcher trotz der Verwendung von nur einer Schraube pro Bauteilseite und Drehbolzen doppelt angeordnet.

Vorteil dieser Variante ist die exakte Positionierung der Elementachsen zueinander, da der Bolzen auch vertikal eine formschlüssige Verbindung erzeugt.

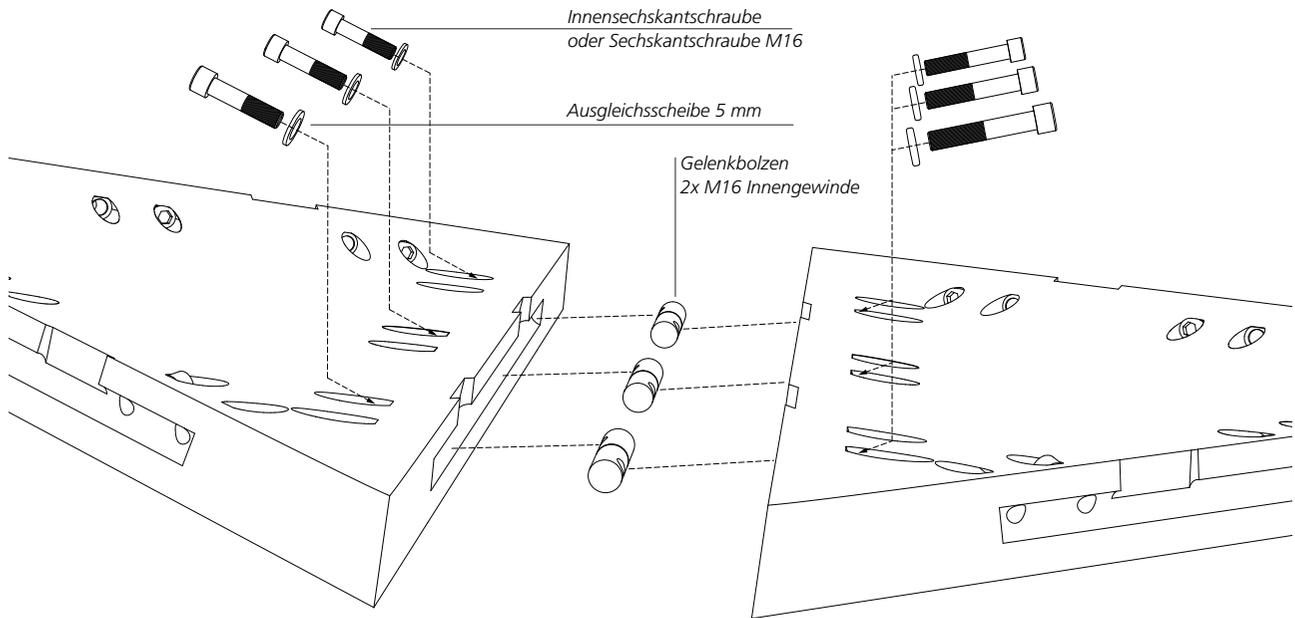
- Die Herstellung der Elemente erfordert keine aufwendige Form.
- Eine umfangreiche mechanische Bearbeitung ist erforderlich.
- Das Bewehrungstextil kann mit vorgeformten Seitenkanten eingelegt werden.
- In den Randbereichen erfolgt eine Zunahme der Bauteildicke um 50%.
- Die Stahlbauteile müssen vor Korrosion geschützt werden.
- Die Verbindung ist einfach montier- und demontierbar.
- Negative Faltungswinkel können gut umgesetzt werden .
- Das Erscheinungsbild der Untersicht ändert sich durch die Schraublöcher.
- Der drehbare Bolzen ist kein Normteil und muss eigens angefertigt werden.

4.5.2 Die Fertigteile können je nach Einbaulage zunächst auch ohne Bolzen aneinandergesetzt werden, dieser wird danach über eine Öffnung an der Innenseite eingeschoben. Sind die Bolzen positioniert entsteht auch normal zur Achsrichtung eine definierte formschlüssige Verbindung.

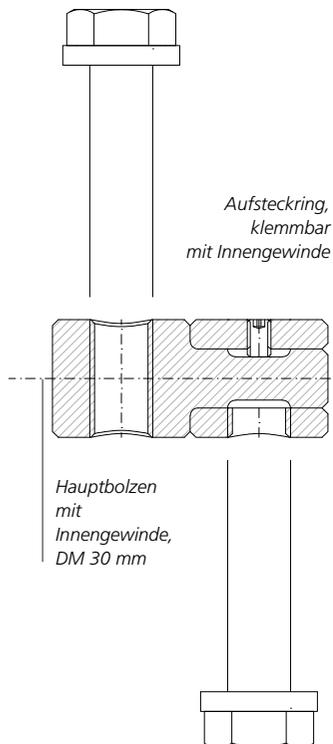
4.5.3 Schraubbolzendetail: Die Gewindebohrungen können zueinander frei verdreht und geklemmt werden.

4.5.4 Die Schraublöcher treten an der Untersicht in Erscheinung. Die gekrümmten Innenflächen erzeugen an ihren Schnittkanten eine weitere triangulierte Textur.

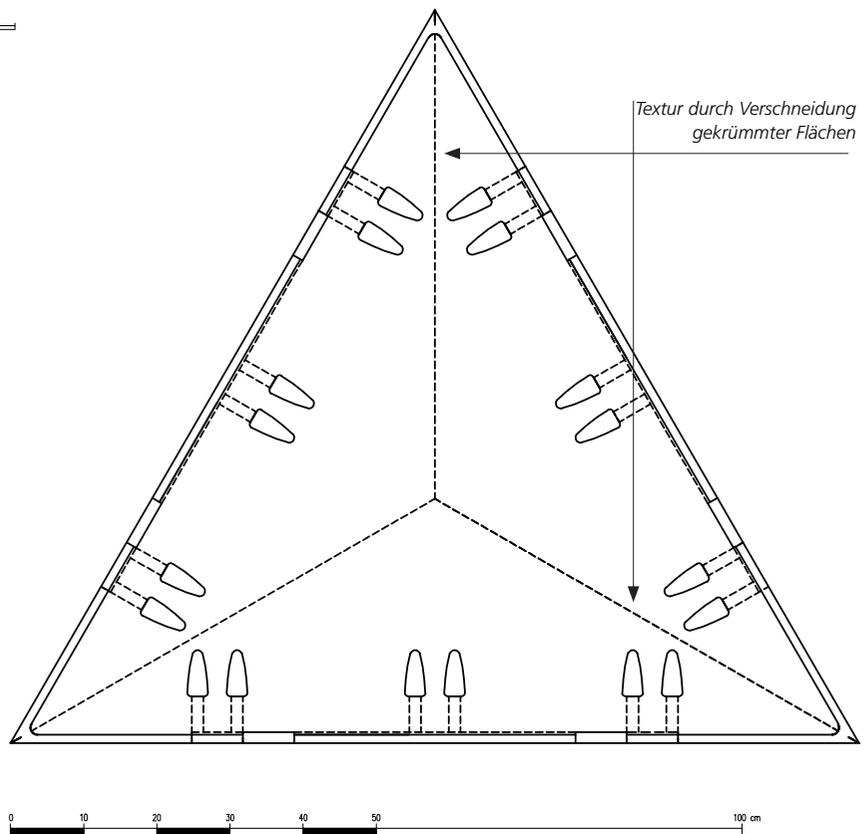
4.5.2



4.5.3



4.5.4

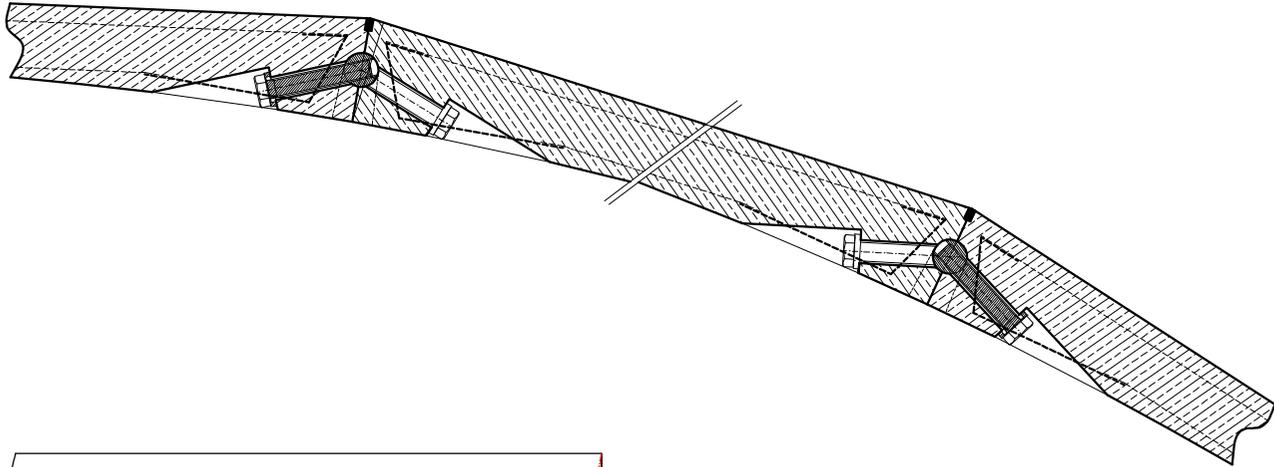


4.5.5 Durch die Erhöhung der Plattenstärke in den Randbereichen, kann über die größere Kontaktfläche ein besseres Verbundverhalten erreicht werden, darüberhinaus erfolgt eine genauere Annäherung der Stützlinie bei Schalengeometrien mit eher gleichmäßigem Krümmungsverlauf.

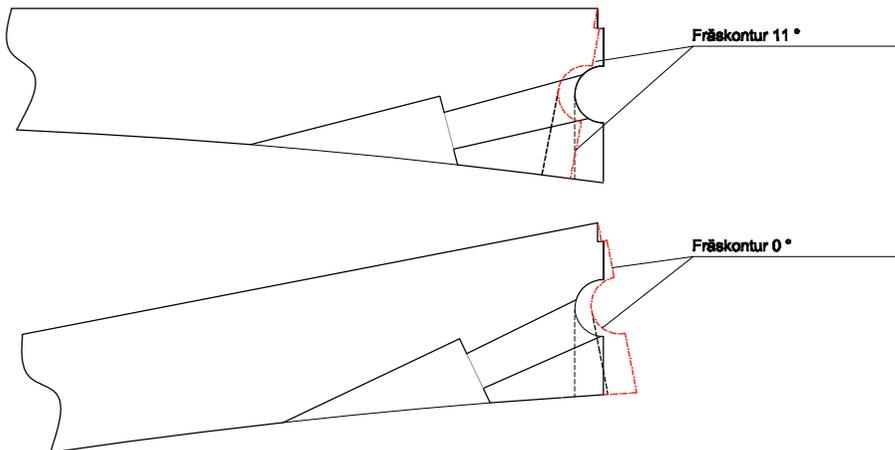
4.5.6 Umzusetzende Fräskontur bei einem Faltungswinkel von  $22^\circ$  ( $11^\circ$  pro Element). Die gesamte Kontaktfläche muss an jedem Bauteil aufwendig mechanisch nachbearbeitet werden.

4.5.7 Die Öffnungen an den Berührungskanten dienen zum Einlegen des Bolzens.

4.5.5



4.5.6

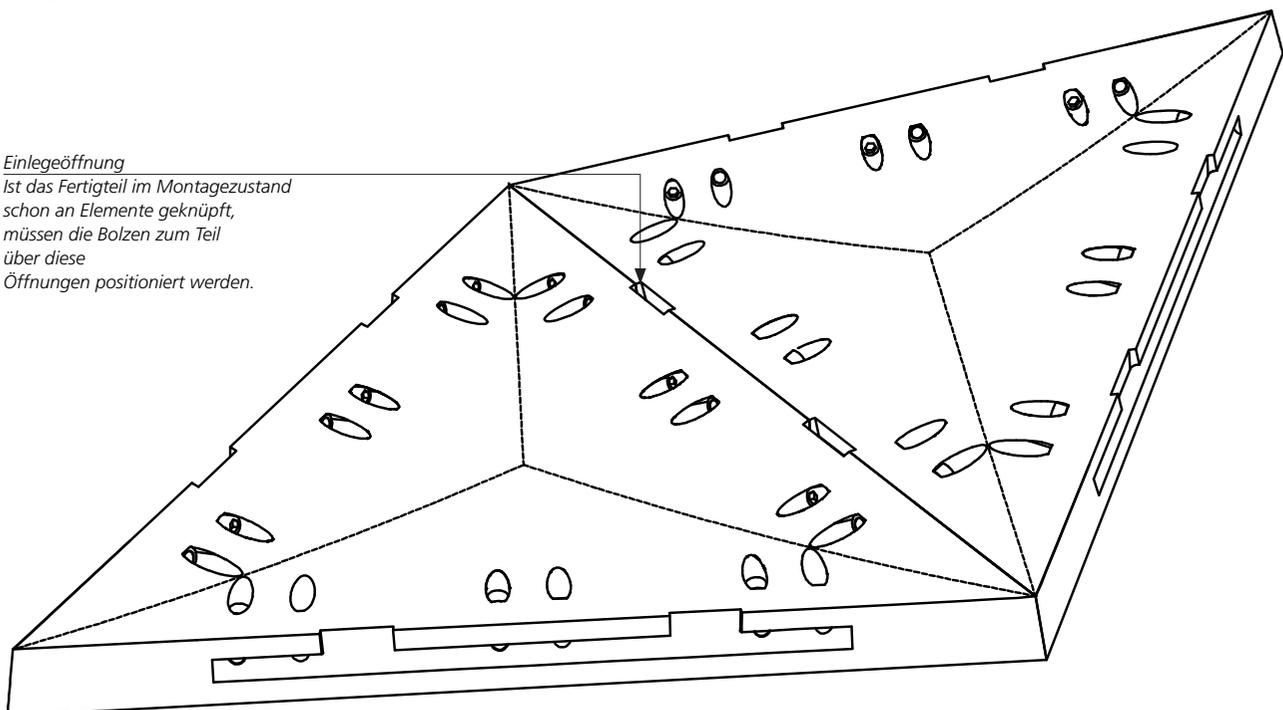


Um eine derartige mechanische Bearbeitung in UHPC umsetzen zu können, sind leistungsfähige Werkzeuge notwendig. Für die radialen Abschnitte der Kontur müsste ein Kugelkopffräser oder ein kugelförmiges Schleifwerkzeug eingesetzt werden.

4.5.7

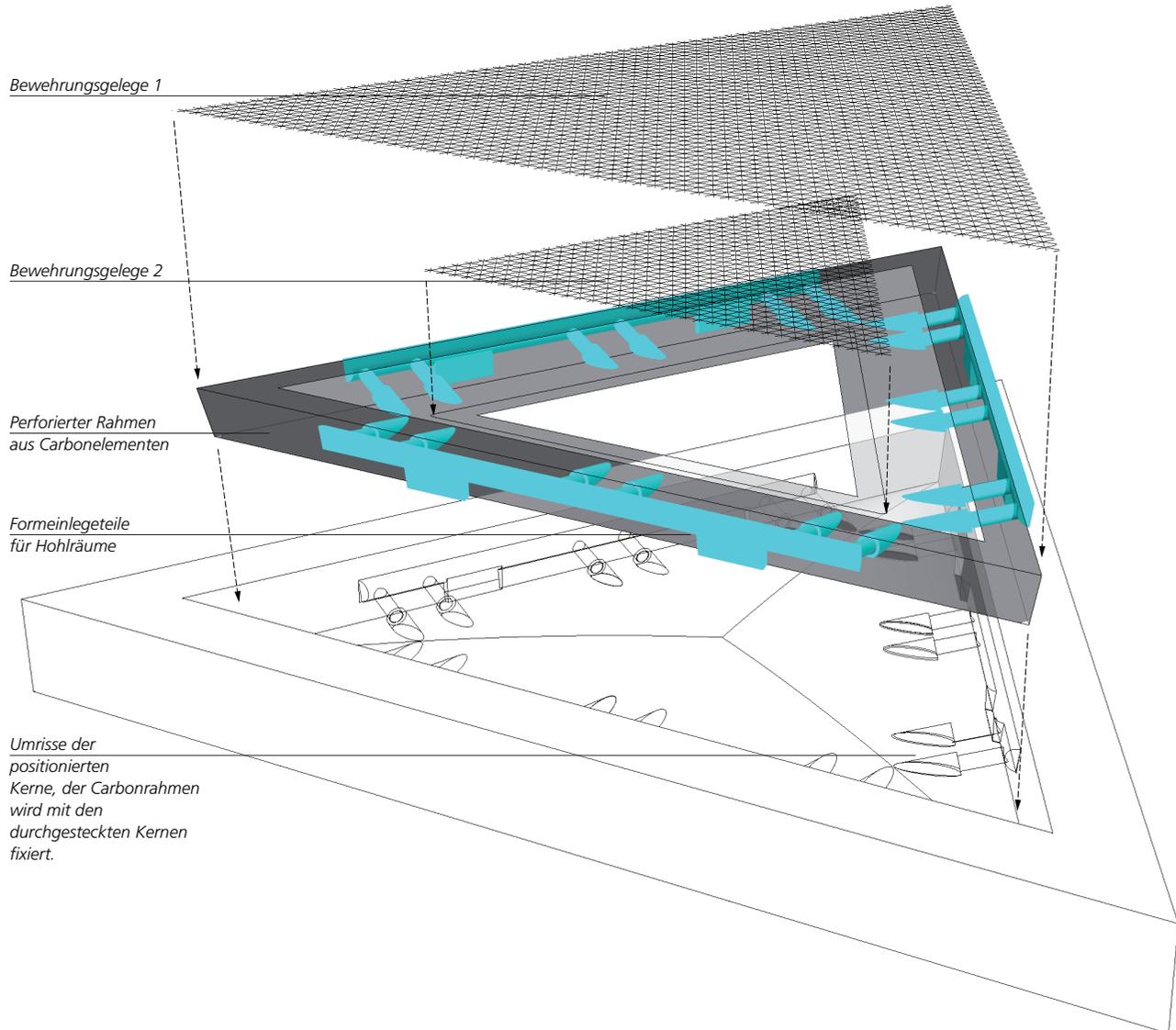
#### Einlegeöffnung

Ist das Fertigteil im Montagezustand schon an Elemente geknüpft, müssen die Bolzen zum Teil über diese Öffnungen positioniert werden.



4.5.9 Möglicher dreiteiliger Bewehrungsaufbau für die Herstellung der Elemente in einer einfach geteilten Form; der Hauptrahmen kann auch hier aus vorgeformten, grobmaschigen Carbondtextilien oder festen CFK-Profilen hergestellt werden. Die Carbonprofile müssten aber, um die Ausbreitung des Betons nicht zu behindern, perforiert sein. Die Zusammensetzung und Verklebung der Bewehrungselemente erfolgt mit den Betonierschritten. Diese sind ausführlich in Kapitel 5 beschrieben.

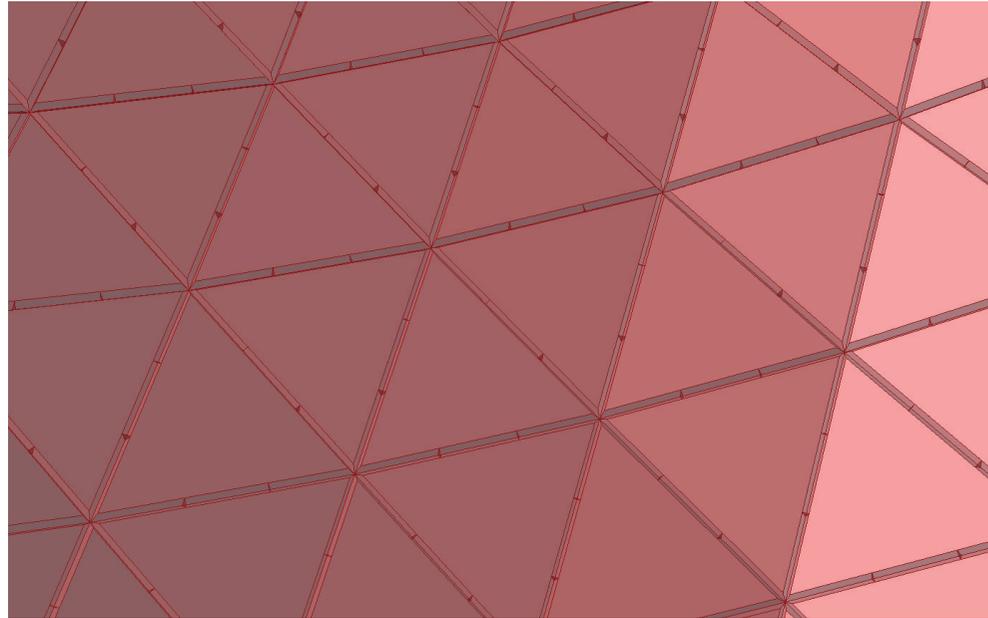
4.5.9



Bei der hier gezeigten Bewehrungsvariante können die Formteile zur Ausbildung von Hohlräumen mit dem Bewehrungsrahmen eingelegt werden. Die mehrteiligen Bauteile werden durch den Rahmen gesteckt und dann zusammengesetzt. Durch die anschließende Fixierung dieser Kerne in der Hauptform wird auch der Rahmen und somit die gesamte Bewehrung in der Form positioniert. Je nach Formaufbau ist es möglich, die Bewehrungskomponenten nacheinander einzusetzen und während des Betoniervorganges zu verkleben oder einen vorgefertigten Korb einzubetonieren.

4.6.1 Darstellung des Produktes eines parametrischen Skripts zur Herstellung der für Variante 4.1 benötigten Stahlwinkelumrisse.  
Die jeweils unterschiedlichen Stahlplatten können nach Ausgabe der Umriss durch eine CNC Wasserstrahlschneideanlage produziert werden.  
Die Faltungswinkel der Elemente selbst können zur Umsetzung der anderen Varianten auf dieselbe Weise exportiert werden.

4.6.1



## AUSWERTUNG DER VERBINDUNGSKONZEPTE

Bei der Bewertung der Verbindungsvarianten muss eine Vielzahl an Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Zum einen kann eine Vorauswahl über die Elementgröße und statische Anforderungen erfolgen, zum anderen sind Randbedingungen, wie Elementanzahl und zur Verfügung stehende Fertigungstechniken zu beachten. Weiters ist das Erscheinungsbild, also die Optik der sich mit den Verbindungsvarianten ändernden Untersicht, ein Bewertungskriterium.

Grundsätzlich können Teile der Varianten weiter untereinander kombiniert werden, um die geeignete Version für die jeweilige Struktur zu finden. Die gezeigten Lösungsansätze können als weiterentwickelbare Vorschläge gewertet werden. Anhand ihrer Betrachtung sind folgende, zur Auswertung wichtige Eigenschaften festzuhalten:

**Verbindungskonzepte, die keine aufwendigen schalungstechnischen Maßnahmen und Sonderbauteile erfordern, sind die Varianten:**

4.2 Verbindung durch Stahlimplantate und 4.4 Verschraubung von Aufkantungen.

Können die Elemente ähnlich wie in diesen beiden Varianten beschrieben gefügt werden, sollte die Herstellung der Fertigteile in Betrieben möglich sein, die sich mit Schalungstechnik auseinandersetzen. Auch Kleinserien wären ohne immense Kosten für Schalung und sonstige Verbindungsmittel denkbar.

---

**Eine komplexe und umfangreichere mechanische Nachbearbeitung erfordert die Variante:**

4.5 «Zentrische Verschraubung»

Es müsste nicht nur der jeweilige Kontaktflächenwinkel umgesetzt werden, sondern wegen der polaren Positionsänderung auch die Bolzenkontur.

Variante 4.4 «Verschraubung von Aufkantungen»

Lange Seitenkanten und die doppelte Kontaktflächenbreite erzeugen den steigenden Bearbeitungsumfang. Es könnten jedoch Freistellungen eingefügt werden.

**Um vieles aufwendigere Formen sind zur Herstellung von Elementen notwendig, die auf Grundlage der folgenden Variante verbunden werden sollen:**

4.3 «Interne Verschraubung»

Die parallel zu den Deckflächen liegenden Hohlräume in den Betonelementen erfordern eine mehrfach geteilte und stabilere Form. Zudem sind mehrere Formeinzelteile, wie zum Beispiel die Kerne (Abb. 4.3.4), passgenau in der Form zu positionieren und zu befestigen. Die Elementversion ist dadurch wohl eher für Grossserien geeignet.

**Verbindungselemente aus Stahl, die nicht als Normteile erhältlich aber einfach zu fertigen sind, werden in den Konzepten;**

4.3 «Interne Verschraubung» und 4.5 «Zentrische Verschraubung» verwendet.

**Ein besonders aufwendiges Bewehrungskonzept erfordert die Variante:**

4.4 «Verschraubung von Aufkantungen»

Sollte nun zum Beispiel der zuvor festgelegte Schalenprototyp realisiert werden, scheint aufgrund der Systemgrösse, der notwendigen Stückzahl und den geringeren fertigungstechnischen Anforderungen, Verbindungsvariante 4.1 «Verbindung durch Stahlimplantate», am geeignetsten. Um den Aufwand weiter zu minimieren, könnte der einbetonierte Rahmen auch aus Stahl gefertigt werden. Somit wäre nur eine Form zur Herstellung notwendig. Zur Umsetzung dieses Verbindungskonzepts müssten die eingeschweißten Stahlbleche durch den Export ihrer Geometrie aus dem virtuellen Modell effizient mit CAM Systemen herstellbar sein. Dieser Anforderung kann durch ein Grasshopperskript entsprochen werden.

Für eine lösbare Verbindung wäre Variante 4.5, die zentrische Verschraubung durch die untere Deckfläche, zu wählen. Die Elementgröße von ca. 120 cm Seitenlänge und die zur Herstellung notwendigen Fertigungsschritte sprechen für diese Lösung, da zum gleichen Teil der Formenbau und auch die mechanische Bearbeitung erprobt werden könnten.



---

## 5 HERSTELLUNG DES MODULS UND FORMENBAU

---

Da das finale Fertigteil in seinem Umriss von der Formfindung, in seiner Dicke von den statischen Anforderungen und an den Seitenkanten von der Verbindungstechnik bestimmt wird, unterscheiden sich die Ergebnisse je nach Gesamtstruktur. Die grundlegende Systematik bleibt aber bei jeder möglichen Variante gleich. Die Struktur besteht immer aus einer Vielzahl an identen Dreiecken, die aus UHPC hergestellt und anschließend an ihren Kontaktflächen bearbeitet werden müssen. Lediglich Verbindungskonzept 4.2 «Version Stahlimplantat», in dem Stahlwinkel zur Umsetzung der verschiedenen Faltungswinkel genutzt werden, bedarf keiner weiteren mechanischen Bearbeitung des UHPC.

Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der festgelegten Bauteildimensionen und Parkettierungsregeln selten Strukturen mit weniger als 150 Elementen entstehen. Anhand dieser Überlegung wird deutlich, dass zur Herstellung der Elemente Formen notwendig sind, die wiederverwendbar und hochwertig sind. Da jedoch UHPC erst nach einer Aushärtzeit von mindestens einem Tag ausgeformt werden kann, muss die Form kostengünstig herstellbar sein, um mit mehreren Exemplaren eine schnellere Produktion zu ermöglichen.

Werden die Formen also aus günstigen Materialien wie Holz oder geschäumten Kunststoffen hergestellt, müsste eine 20-fache Wiederverwendung bei geringen Wartungsmaßnahmen möglich sein. Dies kann am ehesten über eine Vergütung dieser Werkstoffe durch Oberflächenbehandlungen erreicht werden. Die relativ weichen und großporigen Materialien könnten also durch eine Beschichtung aufgewertet werden, um vor den chemischen Bestandteilen und der Feuchtigkeit des UHPC geschützt zu sein. Zur Realisierung eines Standardelements können Dauerformen aus Stahl gefertigt werden, die über eine viel höhere Standzeit verfügen und somit eine effiziente Serienproduktion ermöglichen. Wie Versuche zur Parkettierung zeigten, würde eine standardisierte Elementabmessung die Einschränkung der realisierbaren Grundrisse und somit auch Schalenformen bedeuten, dennoch bleiben genügend Variationen erhalten, um ein Standardelement vielseitig einsetzen zu können.

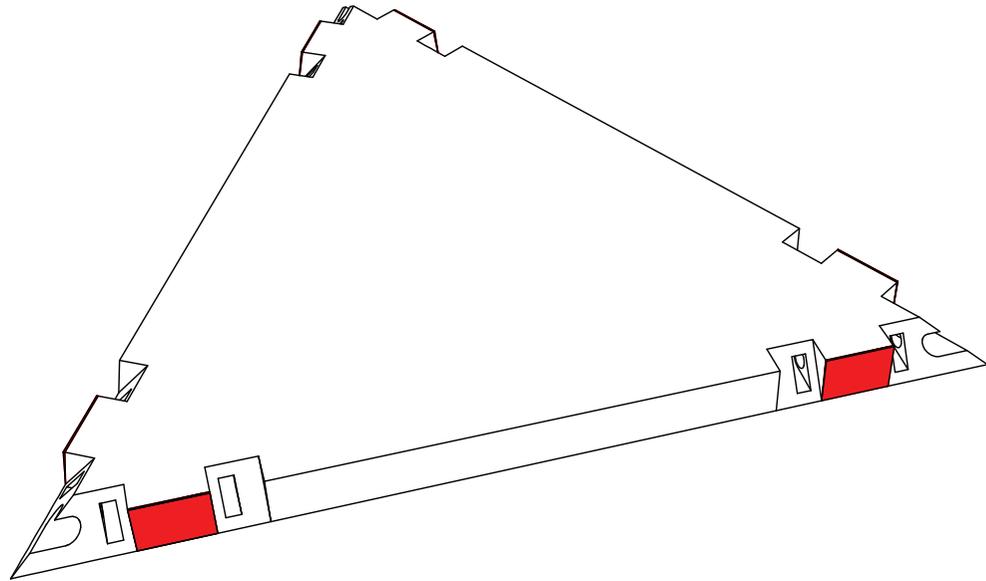
Um auch Formen aus weniger festen Materialien dauerhaft standfester zu gestalten, können einzelne Bauteile, die sich in den je nach Struktur unterschiedlichen Elementen dennoch wiederholen, als Einsatzmodule für Formen geplant werden.

So ist es zum Beispiel möglich, Formteile, die Verbindungsbohrungen in den Elementen erzeugen, sogenannte Kerne, zur Herstellung von verschiedenen Fertigteilen zu nutzen. Es sollten also hochwertige Standardelemente in günstigere Gesamtformen eingesetzt werden, um somit eine effiziente und vor allem flexible Technologie zur Herstellung der Fertigteile zu erhalten.

Denkbar wäre weiters sogar die Herstellung von Formkomponenten und Kernen aus UHPC, ebenfalls beschichtet könnten diese Bauteile an stärker beanspruchten Stellen eingesetzt werden.

5.1.1 Fertigteil mit geringem Nachbearbeitungsaufwand; die rot markierten Flächen werden durch eine zerspanende Bearbeitung, die eher dem Schleifen zuzuordnen ist, an die elementeigenen Faltungswinkel angepasst. Die Fertigung kann durch CAD/CAM Systeme oder durch konventionelle Schleif- und Fräsmaschinen erfolgen. Wichtig ist die einzuhaltende Lagetoleranz der Kontaktflächen zueinander.

5.1.1



## MECHANISCHE BEARBEITUNG

Fertigteile, die den elementeigenen Faltungswinkel direkt über Betonkontaktflächen umsetzen, sind nach dem Betoniervorgang als Halbzeuge zu sehen, die erst durch die Anpassung des Winkels zum verbaubaren Produkt werden. Diese Halbzeuge müssen daher im Bereich der Kontaktflächen ein Übermaß aufweisen, die dem geringsten Faltungswinkel der Gesamtstruktur entspricht.

Die Adaptierung erfolgt dann über eine mechanische Bearbeitung, die entweder durch ein CAD/CAM System oder durch konventionelle Maschinen umgesetzt wird.

Als Fertigungstechnik ist hierbei ein nasses Zerspanen vorgesehen, bei dem durch einen rotierenden Schneidkörper ein Materialabtrag erzeugt wird.

Durch die virtuelle Erstellung der Struktur können die Einzelemente mit den jeweiligen Winkeln direkt in ein CAM Programm exportiert werden, um anschließend die zu erzeugenden Konturen mit einem Bearbeitungszyklus zu belegen. Ist die jeweilige Bearbeitungsmaschine groß genug, werden dann alle drei Seiten des Elements mit nur einer Aufspannung abgearbeitet werden.

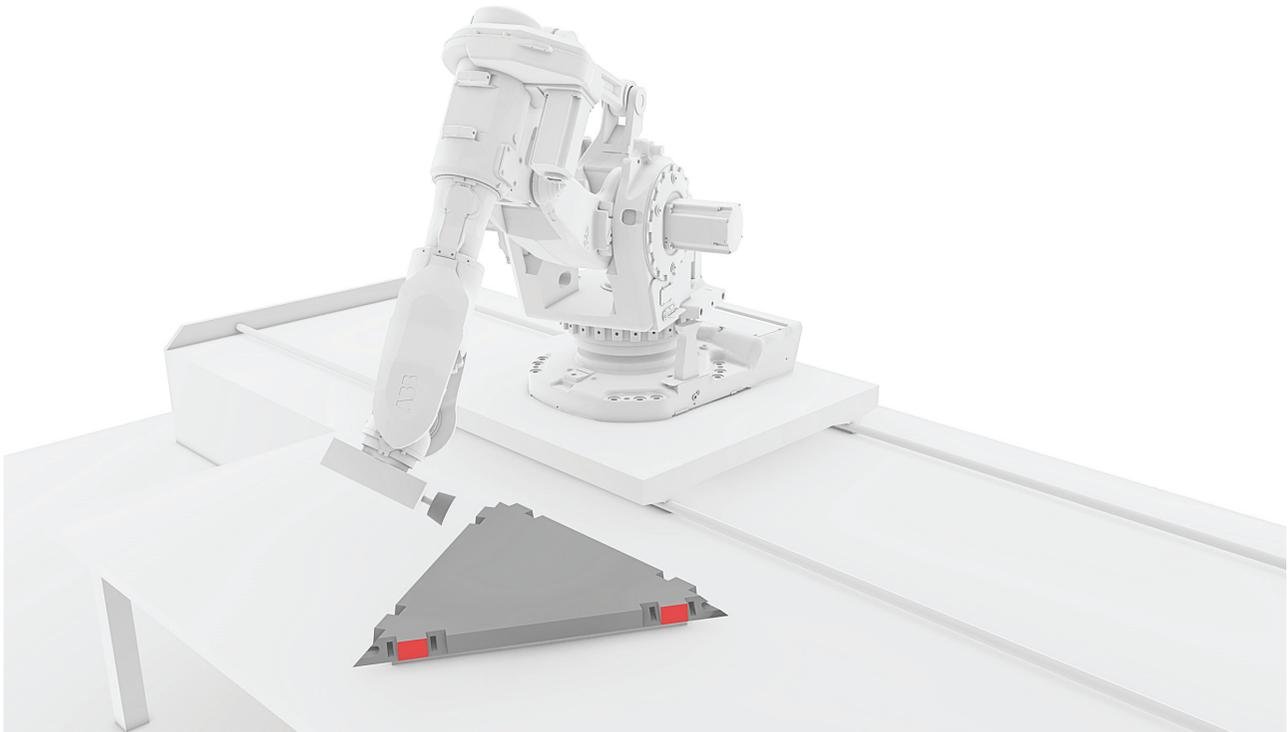
Auf diese Weise entstehen die geringsten maßlichen Abweichungen von der zu erreichenden Außenkontur.

Die Umsetzung durch konventionelle Maschinen erfordert das Auslesen der Elementwinkel und die anschließende manuelle Einstellung einer Schleifmaschine. Als Bezugskante zur Sicherstellung der ausreichenden Genauigkeit der Seitflächen zueinander können die immer gleichbleibenden oberen Elementränder verwendet werden. Durch diese Bezugskante kann das Fertigteil nach dem Bearbeiten der ersten Fläche, zur korrekten Fertigung der weiteren Flächen, richtig positioniert werden.

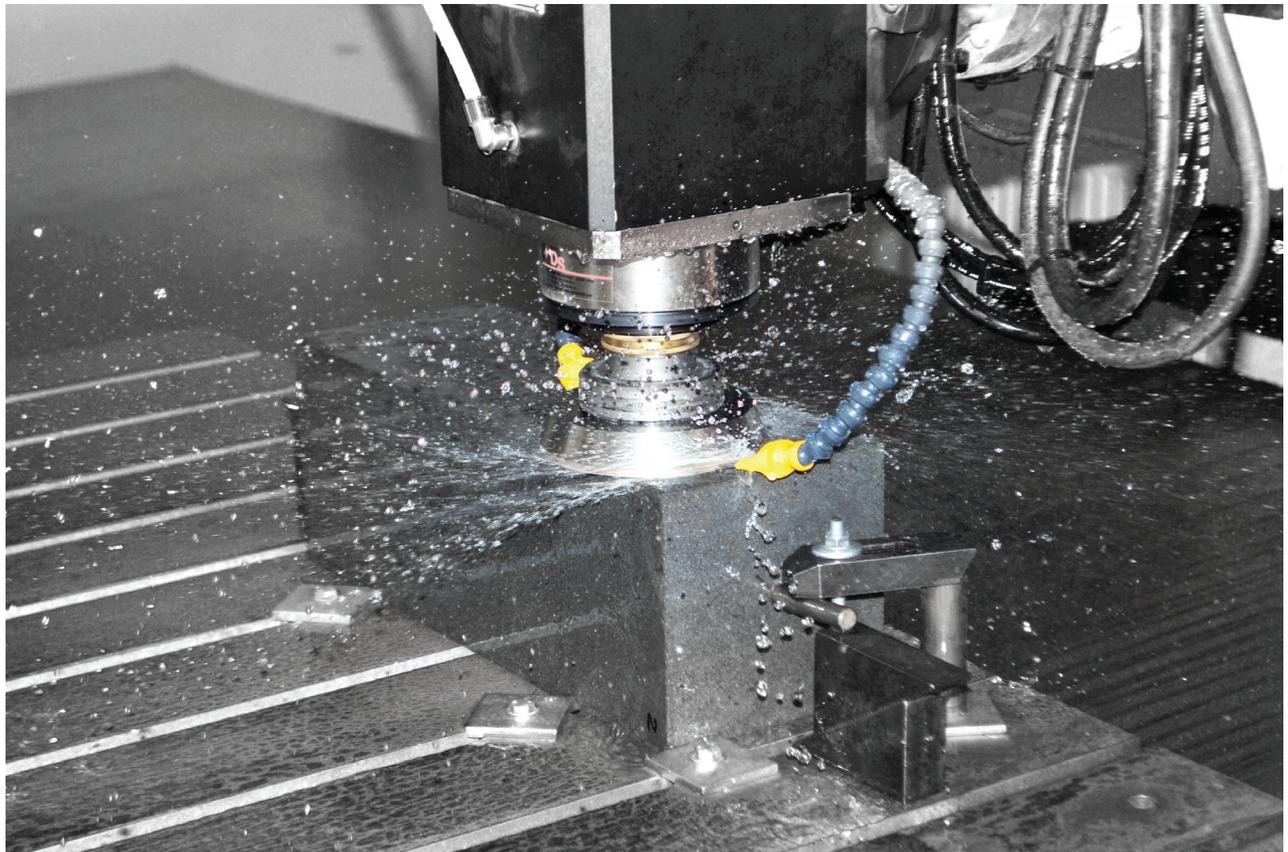
5.1.2 Fertigungsroboter des Roboter Design Labors der TU Graz; derartige Anlagen können die Elemente in einer einzigen Aufspannung abarbeiten. Durch die Verwendung einer CAD/CAM Lösung ist der Workflow komplett digitalisiert.

5.1.3 UHPC Probebearbeitung im RDL der TU Graz; bei der Bearbeitung handelt es sich um eine Schleifbearbeitung bei hohen Drehzahlen und niedrigen Vorschüben.

5.1.2



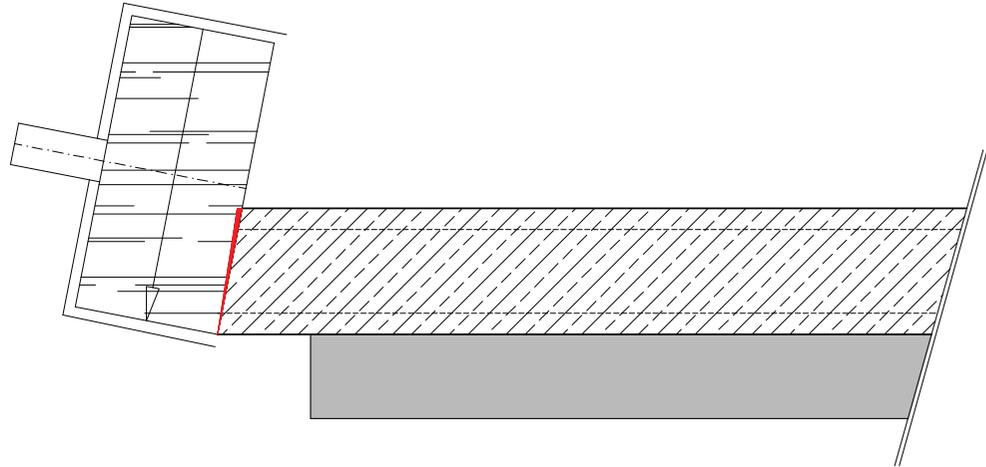
5.1.3



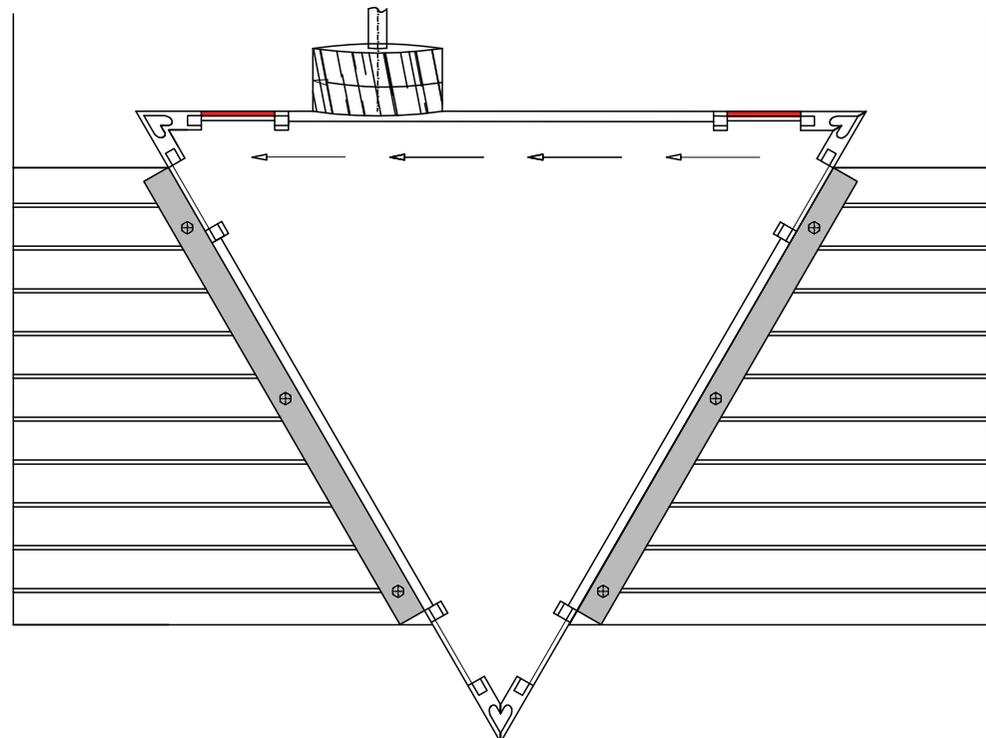
5.1.4 Werden die Elemente schon mit dem flachsten Faltungswinkel betoniert, kann der Bearbeitungsumfang gering gehalten werden. Der Einsatz des Werkzeugs bleibt bei CNC oder konventioneller Bearbeitung gleich.

5.1.5 Bei der konventionellen Fertigung muss ein Spannsystem aus Anschlägen die Passgenauigkeit der Kontaktflächen zueinander sichern. Das Element wird hierbei definiert aufgespannt und nach der Bearbeitung einer Seitenfläche nachgedreht. Die später außenliegende Elementkante kann als Ausgangspunkt dienen.

5.1.4

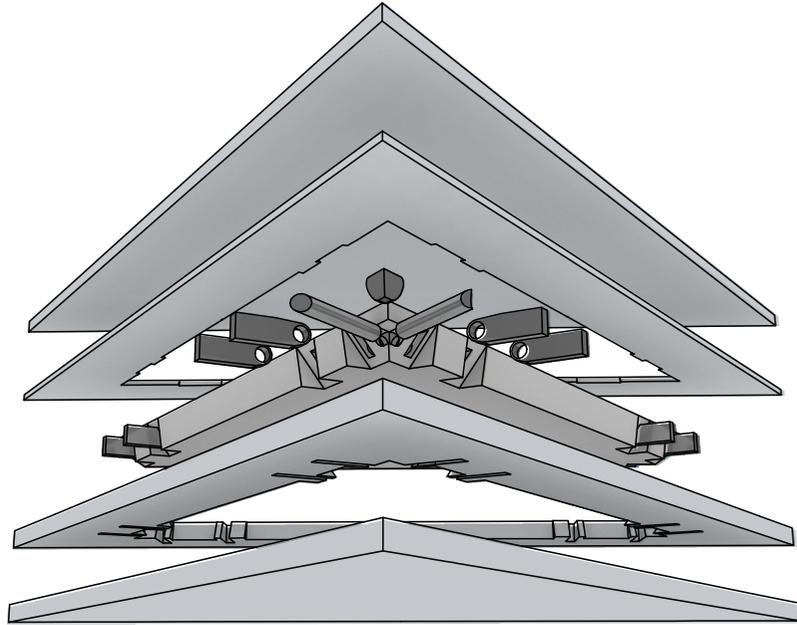


5.1.5



5.2.1 Explosionszeichnung einer vielschichtigen Form zur Herstellung von Fertigteilen, die durch die unter 4.3 beschriebene Verbindungstechnik gefügt werden können.  
 Durch die drei Teilungsebenen kann die Bewehrung auf den Formrahmen positioniert und fixiert werden. Zusätzlich ist die Herstellung von internen Hohlräumen durch den Einsatz von Kernen in der mittleren Formebene möglich.  
 Durch Aufsetzen einer Deckebene kann rundum eine hohe Oberflächenqualität erreicht werden.

5.2.1



## AUFBAU DER FORM

Die Eigenschaften des entwickelten Fertigteils erfordern eine konstant gleichbleibende Qualität an der gesamten Oberfläche. Da UHPC an Oberflächen, die nicht von Schalungselementen bedeckt werden, eine so genannte Elefantenhaut ausbildet, die sich durch massive Einbuchtungen äußert, kann keine offene Schalung zur Herstellung der Elemente verwendet werden.

Eine Fertigung muss folglich durch eine Vollform erfolgen, die jede Oberfläche definiert in Beton abbilden kann. Formen, die diese Anforderung erfüllen und trotzdem wiederverwendbar sind, müssen deshalb eine zerstörungsfreie Entformbarkeit zulassen. Möglich wird dies durch die Segmentierung der Gesamtform entlang einer Teilungsebene, die nach dem Aushärten das Öffnen der Form zulässt und eine zerstörungsfreie Extraktion des Bauteils erlaubt.

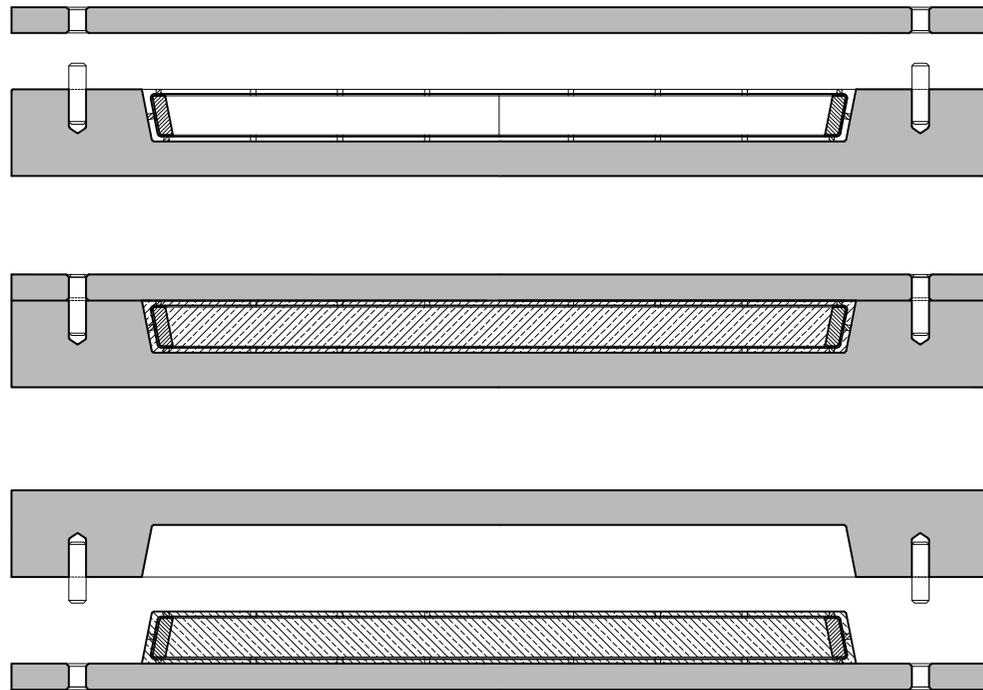
Mit steigender Komplexität einer Form kann die notwendige Teilungsebenenanzahl von mindestens einer auf eine Vielzahl ansteigen. Grund hierfür sind weitere in das Bauteil zu integrierende Elemente. Im konkreten Fall sind das die Bewehrungstextilien und Profile, sowie die zur Abbildung von Hohlräumen zu platzierenden Kerne. So kann die Form zum Betonieren von Elementen, die nach Variante 4.2 verbunden werden, aus nur zwei Teilen bestehen, zur Herstellung von Elementen, die Verbindungsversion 4.3 umsetzen sollen, muss jedoch eine dreifach geteilte Form hergestellt werden.

Die zu integrierende textile Carbonbewehrung soll in zwei Ebenen und in einem Zentimeter Abstand zu den Deckflächen in den Elementen positioniert werden. Um ihr Verrutschen während des Betoniervorganges zu verhindern, können die Bewehrungsmatten in je einer Teilungsebene in die Formränder gespannt, oder auf einen dafür eingelegten Rahmen aufgezogen werden.

Die Rahmen werden durch Distanzstücke in der Form fixiert und verbleiben so nach dem Zusammensetzen der Ebenen richtig positioniert.

5.2.2 Schema eines einfach geteilten Formaufbaus; wird die textile Bewehrung über einen Spannrahmen gezogen, kann dieser durch den Einsatz von Distanzstäbchen aus Beton korrekt in der Form positioniert werden. Besteht der Rahmen selbst ebenfalls aus UHPC, erfolgt durch diese Variante kein Materialwechsel. Beim Betoniervorgang muss eine homogene Verteilung des Betons unter dem Rahmen und in den entstehenden Zwischenräumen beachtet werden. Das Betonieren an sich gestaltet sich aufgrund der bereits integrierten Bewehrungsmatten etwas aufwendiger. Die Formhälften werden durch Passbolzen zueinander positioniert und nach dem Befüllen zusammengespannt.

5.2.2



Die dazu notwendigen Rahmen können aus Beton oder Carbonprofilen gefertigt werden, die Profilierung der textilen Matten selbst ist aber auch eine vielversprechende Variante um die Bewehrung korrekt in Form zu platzieren. Denkbar ist hier die Verhärtung des Textils durch den Auftrag von Epoxidharz, nachdem die Matten auf ein Negativ aufgelegt wurden. Sinnvoll ist dieser durch die weiteren notwendigen Bewehrungsformen entstehende Mehraufwand, wenn das Fertigteil dadurch durch eine einfache, einmal geteilte Form herstellbar ist.

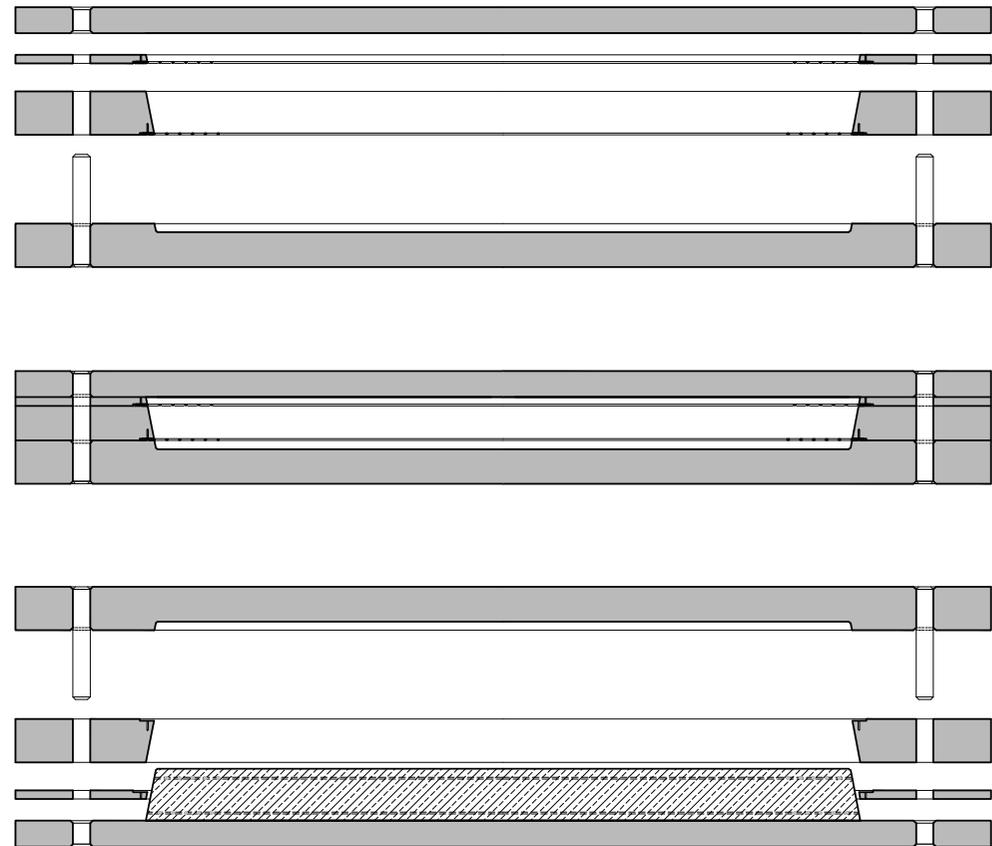
Der grundsätzliche Formaufbau erfolgt demnach in Schichten und bietet so die Möglichkeit den Betoniervorgang in Abschnitten durchzuführen. Die einzelnen Schichten werden beim Zusammensetzen der Form durch Passbolzen zueinander formschlüssig ausgerichtet und am Ende des Betoniervorganges zusammengespannt. Obwohl die entstehenden Vollformen durch eine zusätzliche Öffnung befüllt werden können, weist die eher zähflüssige Konsistenz von UHPC auf die Notwendigkeit einer schrittweisen und gezielten Einbringmethode hin. Zur Abbildung von komplexen Konturen bei geringen Bauteilstärken muss die Verteilung des flüssigen Betons in der Form ersichtlich und beeinflussbar sein.

Der Betoniervorgang erfolgt also in umgekehrter Ausformreihenfolge durch Ausfüllen eines Formsegments und anschließendes Aufsetzen des nächsten. So können auch die Bewehrungsmaterialien an der gewünschten Stelle eingesetzt und mit Beton hinterfüllt werden.

Die Formen verfügen zusätzlich über ein Betonreservoir, das mit jedem Betonierabschnitt mitgefüllt wird und zum Ausgleich von eventuell fehlendem Material dient.

Die fertig befüllte Form wird geschlossen und anschließend aufgestellt, wobei das Zusatzbetonvolumen im Reservoir an der Oberseite liegt. Durch die Schwerkraft kann nun Beton nachfließen

5.2.3 Beispiel für einen vielschichtigen Formaufbau; die Fixierung der Bewehrungsmatten kann in der Teilungsebene an den Formrahmen erfolgen. Das Befüllen der Form erfolgt in Schichten, die den Teilungsebenen entsprechen. Klemmelemente zur Befestigung der Matten sind an den Rahmenunterseiten angebracht und liegen somit beim Ausformen frei, um gelöst werden zu können. Die überstehenden Mattenränder werden vor dem Abziehen der Trägerebene abgeschnitten. Der genaue Ablauf dieses Trennvorgangs ist in der Beschreibung des Betonierablaufs (Abb. 5.4.8) erläutert.



5.2.3

und minimale Leerstellen auffüllen. Um Lufteinschlüsse zu verhindern ist die Deckfläche mit kleinen Entlüftungsbohrungen versehen.

Nach dem Aushärten wird das Paket zum Entformen umgedreht zu Boden gelegt, wobei nun die zuvor als Grundfläche dienende Formhälfte zuerst abgehoben wird. Kommt als nächste zu entfernende Ebene ein Formrahmen mit befestigtem Bewehrungstextil, muss dies zunächst abgetrennt werden, um das Ablösen nicht zu verhindern.

Wurden Kerne zur Erzeugung von Hohlräumen in den Formbauteilen befestigt, muss auch ihre Verankerung gelöst werden, um das Entformen des Bauteils zu ermöglichen. Die Kerne werden anschließend separat aus dem fertigen Bauteil entfernt und können dann wieder in die Form eingesetzt werden.

Das so entstandene Betonfertigteile muss noch von dem zusätzlichen Reservoirbeton befreit werden, was durch das simple Abschlagen des Betons erfolgen kann, wenn eine Kerbe in die Form integriert wurde. Ein Abtrennen kann aber auch im Zuge der folgenden mechanischen Bearbeitung durchgeführt werden.

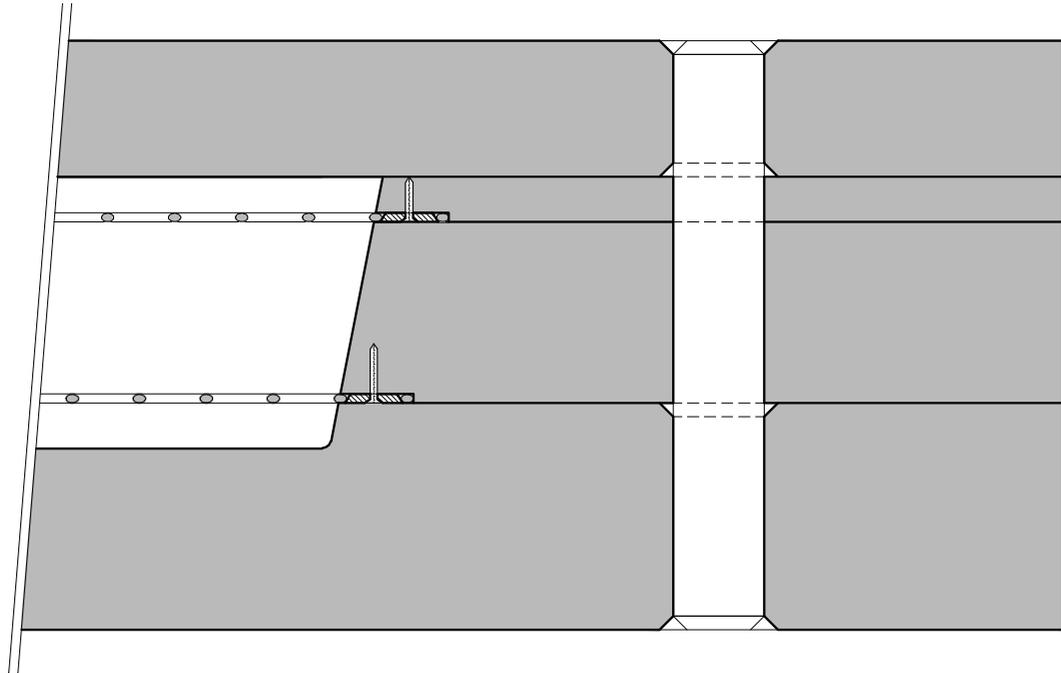
Die Formen müssen grundsätzlich den geltenden Regeln des Formenbaus entsprechen und über Entformschrägen und Kantenradien verfügen, nur so kann eine dauerhaft wiederverwendbare Form gebildet werden.

Betonreservoir:  
Zusätzliches Volumen zum  
Ausgleich von Fehlstellen. Siehe  
Abb. 5.4.6

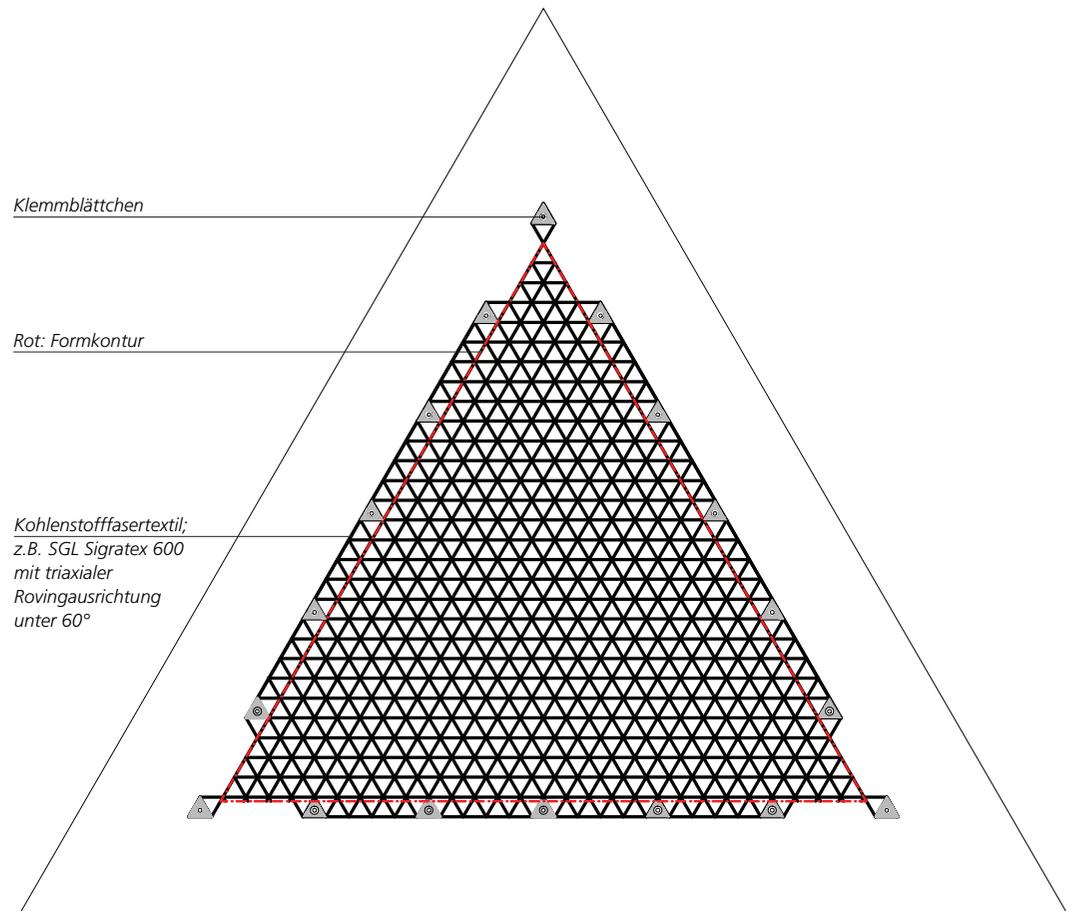
5.2.4 Detaillierte Darstellung der Klemmblättchen in der zusammengesetzten Form; die dreieckigen Elemente entsprechen der Maschenweite des triaxialen Geleges und werden in einem gefrästen Ansatz an der Unterseite der Formebene verschraubt. Nicht bedeckte Mattenfelder im Ansatzbereich werden mit einer aufstreichbaren Masse vor eindringendem Beton geschützt.

5.2.5 Die punktuelle Befestigung ermöglicht unregelmäßige Formkonturen. Ist die Klemmung der Matte aufgrund von anderen Formbauteilen in manchen Bereichen nicht möglich, können diese Zonen ausgelassen werden.

5.2.4



5.2.5



---

## MATERIALIEN UND BESCHICHTUNG

Die aus der Konzeptionierung des Formaufbaus deutlich werdenden Anforderungen an eine Form weisen darauf hin, dass allein aufgrund der Bauteildimensionen und deren Gewicht grundlegend Materialien mit einer gewissen Mindestfestigkeit zur Herstellung der Form notwendig sind. Um wie geplant 20-fach wiederverwendbare Formen zu erhalten, sind Holzwerkstoffe als Formstoff naheliegend und ausreichend mechanisch beanspruchbar. Die Verwendung von geschäumten Kunststoffen, wie zum Beispiel Polyurethan, ist für die Herstellung von einzelnen Formbauteilen denkbar, wenn diese durch Beschichtungen aufgewertet sind. Den gesamten Formkörper aus derartigen Materialien zu fertigen ist jedoch in Hinsicht auf die Manipulierbarkeit einer befüllten Form nicht zweckmäßig. Weiters erfordern die Gegebenheiten des umzusetzenden Betoniervorganges bei Kleinserien einen kostengünstigen, aber dennoch verschleißfesten Werkstoff.

Holzwerkstoffe weisen in natürlicher Form immer eine Faserrichtung auf, die für die Anisotropie des Werkstoffs verantwortlich ist. Da für die Form ebene, plattenförmige Grundelemente benötigt werden, die in ihren Teilungsebenen exakt aneinandergespresst werden müssen, darf es nicht zu einem Quellen oder Schwinden des Holzes aufgrund der Betonfeuchtigkeit kommen. Plattenmaterialien, die aus verleimten Vollholzkomponten bestehen, müssen also umfassend vor Feuchtigkeit geschützt werden. Der Einsatz derartiger Werkstoffe ist demnach erst durch eine Oberflächenbeschichtung möglich. Eine derartige Beschichtung kann dann auch Bearbeitungsungenauigkeiten ausgleichen, die beim Ausfräsen der Kontur aufgrund der wechselnden Materialfestigkeit entstehen.

Die Industrie bietet hier eine umfassende Palette an Epoxidharz und Polyesterbeschichtungen für den in verschiedenen Fertigungsverfahren notwendigen Holzmodellbau an. Derartige Beschichtungen werden hierbei zur Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit von Holzmodellen verwendet, die dadurch vielmals abgeformt werden können. Die in flüssiger Form aufgetragenen Kunststoffe können nach dem Aushärten verschliffen werden und sollten ab einer Schichtdicke von 0.5 mm ausreichend dicht und ausgleichend wirken. Die zuvor durch CNC-Bearbeitung exakt hergestellten Formkonturen werden durch die von Hand verschliffene Beschichtung also unweigerlich ungenauer.

Um den Nachteilen von Vollholz auszuweichen und trotzdem eine vergleichbare Festigkeit zu erzielen, muss ein möglichst homogener Werkstoff verwendet werden. Eine Variante wäre die Herstellung der Form aus MDF-Platten. Mitteldichte Faserplatten sind aus feinzerspannten Nadelholzhackgut gepresste Holzwerkstoffe, die aufgrund ihrer homogenen Struktur über keine spezielle Faserrichtung verfügen und deshalb ideal gefräst und profiliert werden können. Zwar sind MDF-Platten auch vor Feuchtigkeit zu schützen, die durch das Fräsen erreichbare Oberflächenqualität bedarf aber keiner nachträglichen Vergütung mehr. Bei der Verwendung von MDF-Platten kann deshalb eine dünne abdichtende Lackschicht die finale Formoberfläche bilden. Diese Lackschicht kann dann, je nach Abnutzung der Form, bei geringem Aufwand und niedriger Konturänderung erneuert werden.

Formteile, die beim Entformen stärker beansprucht werden und eine hohe Präzision erfordern, wie zum Beispiel Kerne zur Erzeugung von Hohlräumen, sollten aus Werkstoffen mit einer noch höheren Festigkeit erzeugt werden. Denkbar hierfür ist der Einsatz von Stahl oder Kunststoffen.

**Fräs- und Beschichtungsversuche für UHPC-Formen des Instituts für Tragwerksentwurf der TU Graz.**

5.3.1 Oberfläche einer befrästen KLH-Platte; die unterschiedliche Materialfestigkeit in den weichen (hell) und harten (dunkel) Zonen erzeugen Konturschwankungen und besitzen ein unterschiedliches Quell- und Schwindverhalten.

5.3.2 Mit Epoxydharz beschichtete und anschließend verschliffene KLH-Formplatte.

5.3.3 Offene UHPC-Form zur Abbildung einer Kugelkarlotte.

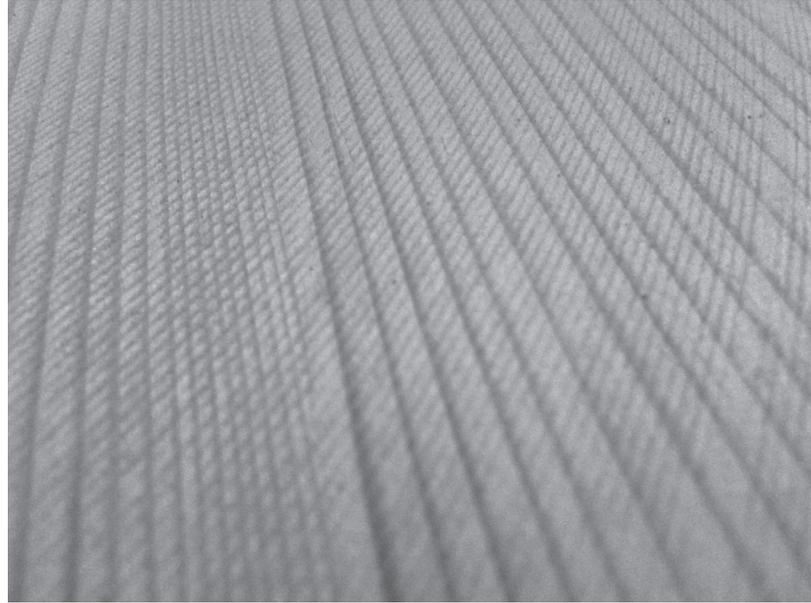
5.3.4 Oberfläche einer nach dem Fräsen leicht angeschliffenen und lackierten MDF-Platte; es erfolgt auch nach mehreren Stunden keine signifikante Feuchtigkeitsaufnahme mehr.

5.3.5 Die Konturen bleiben bei der Verwendung von MDF aufgrund der dünneren Beschichtung formtreuer, zusätzlich bleiben Fehlstellen aufgrund von partieller Feuchtigkeitsaufnahme aus.

5.3.2



5.3.1



5.3.3



5.3.5



5.3.4



---

## BETONIERVORGANG

Wie zuvor erläutert, beeinflusst die verwendete Verbindungstechnik und die dazu notwendige Elementkontur die Komplexität der Form massiv. Im folgenden Beispiel wird der Betonier- und Ausformvorgang anhand der aufwendigsten erarbeiteten Elementausführung erklärt und auf Machbarkeit überprüft.

Die Form verfügt über alle notwendigen Komponenten zur Erzeugung des finalen verschraubbaren Bauteils. Nach dem Ausformen des Fertigteils muss nur noch die mechanische Bearbeitung der Kontaktflächen erfolgen. Das bedeutet, dass zur Anpassung der Bewehrung oder der zur Verschraubung benötigten Bohrungen keine weiteren Arbeitsschritte durchgeführt werden müssen.

Der Betoniervorgang selbst wird in Schichten abgehandelt, die den Teilungsebenen der Form entsprechen. Die Schicht, die den Bereich zwischen den Bewehrungslagen erzeugt, ist hierbei die aufwendigste und verfügt über Kernmarken, in denen die Negative der Hohlräume, sogenannte Kerne, positioniert und fixiert werden. Die Verschraubung dieser Formelemente muss vor dem Entformen gelöst werden und ist deshalb von der Außenseite der Form erreichbar auszuführen.

Dadurch können die Kerne nach Entfernen der Trägerebene horizontal aus dem Fertigteil gezogen werden.

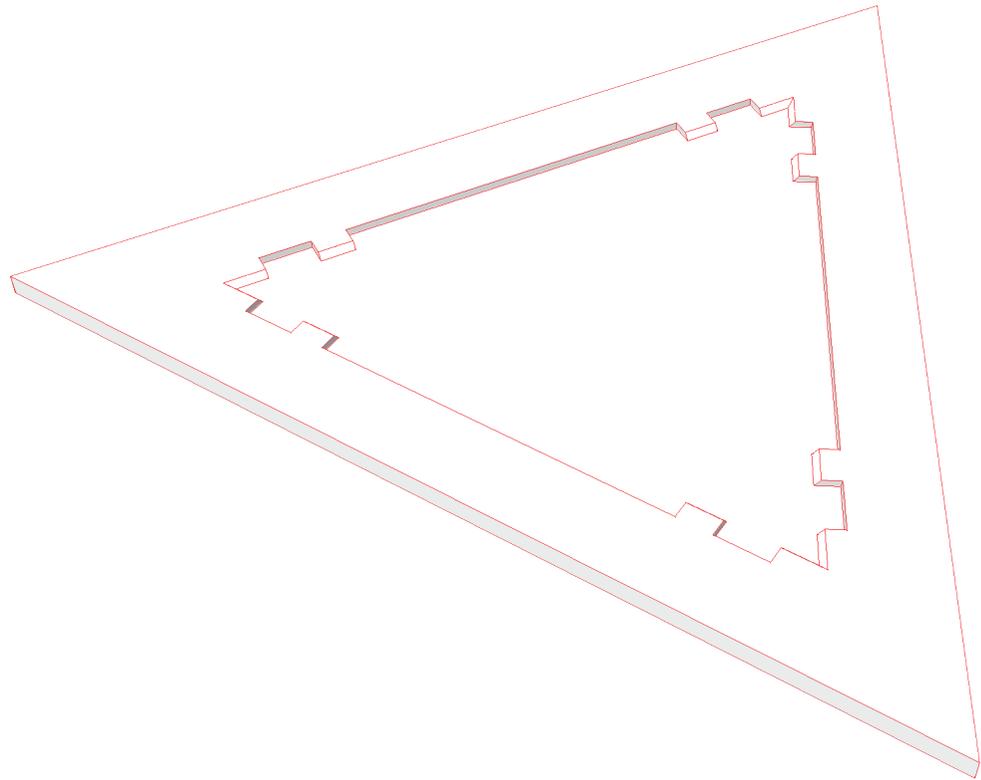
Da der Beton vor dem Aufsetzen der Deckplatte nur annähernd bis zur Trennebenenkante aufgefüllt werden kann, verfügt die Form über ein Ausgleichsreservoir aus dem, nach dem Verschließen und Aufstellen der Form, Material in leere Zonen nachfließen kann.

Das Betonreservoir muss nach dem Entformen vom Bauteil abgeschlagen werden, eine dafür eingeformte Sollbruchstelle erleichtert diesen Arbeitsschritt.

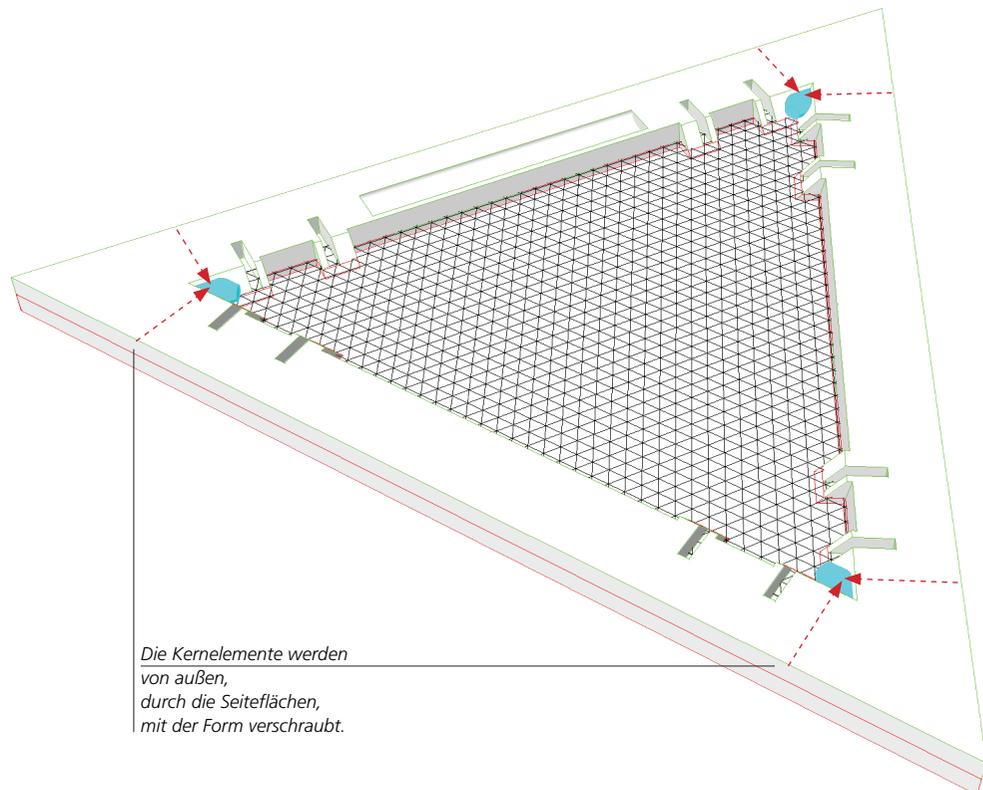
5.4.1 Zunächst wird eine massive Grundplatte befüllt, die zuvor wie alle anderen Formebenen mit einem Trennwachs oder Schalöl behandelt wurde. Das Füllniveau befindet sich hierbei knapp unter dem Konturrand, um ein problemloses Aufsetzen der nächsten Ebene zu ermöglichen.

5.4.2 Die mittlere Formebene wird aufgesetzt. An ihrer Unterseite ist das Bewehrungstextil befestigt. In der Formebene sind bereits Kernelemente (cyan) befestigt, die vor der Befüllung mit weiteren kombiniert werden müssen.

5.4.1

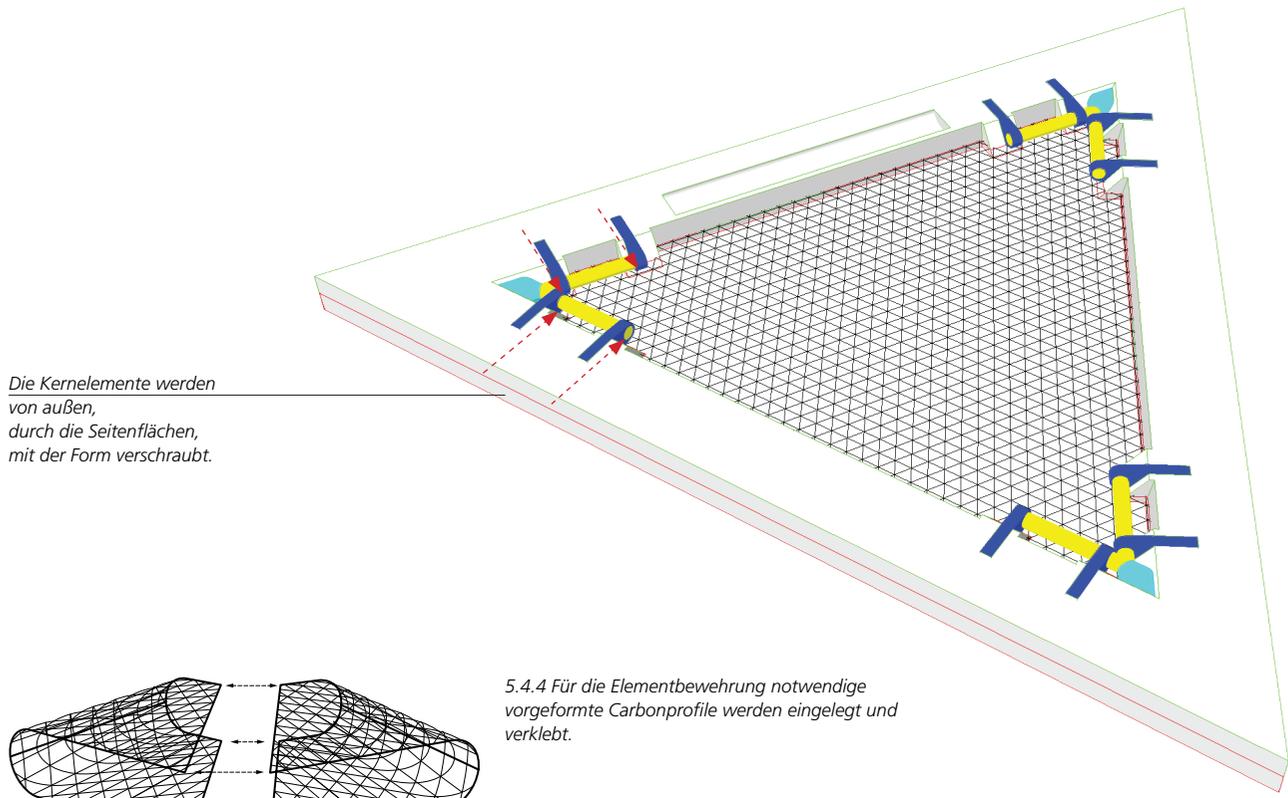


5.4.2



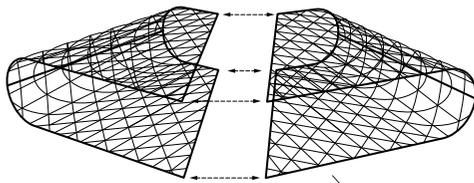
Die Kernelemente werden  
von außen,  
durch die Seiteflächen,  
mit der Form verschraubt.

5.4.3 Nun werden die weiteren Kernelemente eingesetzt; die gelben Bolzenbohrungen werden in den blauen Elementöffnungen positioniert und dann gemeinsam in die dafür vorgesehenen Aussparungen im Formrahmen eingesetzt. Die Verschraubungsführung zur Fixierung der Elemente muss parallel zur Teilungsebene und von außen erfolgen, da die Entformreihenfolge umgekehrt abläuft und die Verschraubungen ansonsten nicht zugänglich sind.  
 5.4.4 Einsetzen der vorgeformten und mit Epoxidharz verfestigten Kohlenstoffasertextilien in die Form. Die eingelegten Teile können mit der eingespannten Matte verklebt werden. Anschließend wird die Ebene befüllt.

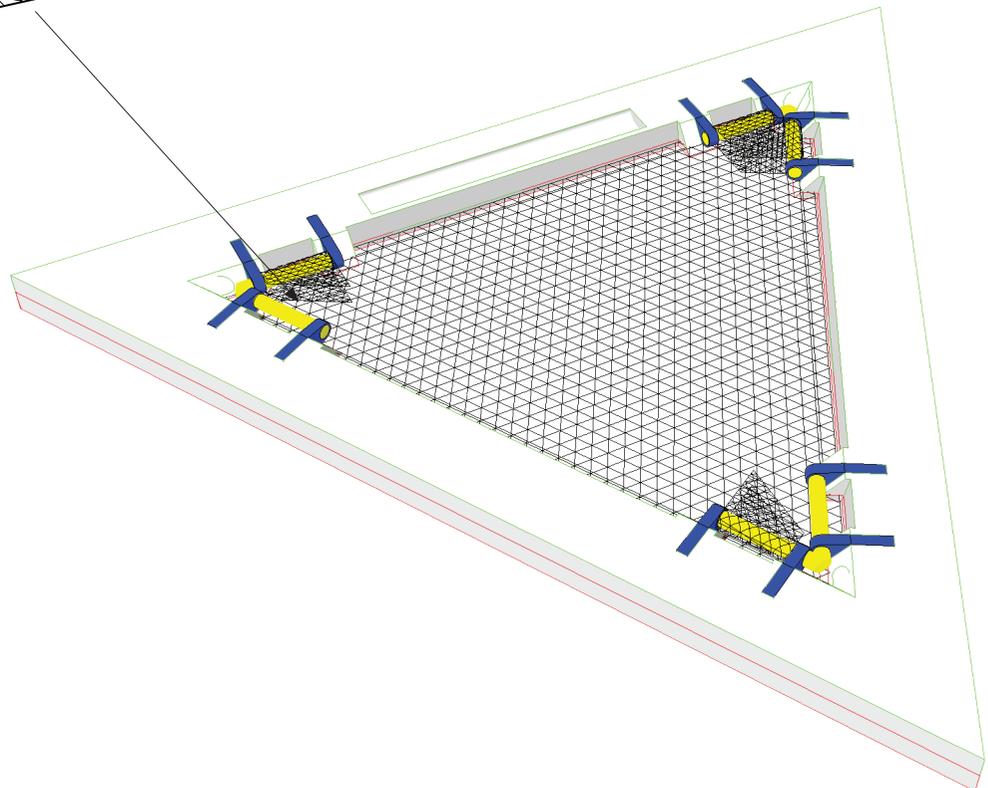


5.4.3

Die Kernelemente werden von außen, durch die Seitenflächen, mit der Form verschraubt.



5.4.4 Für die Elementbewehrung notwendige vorgeformte Carbonprofile werden eingelegt und verklebt.



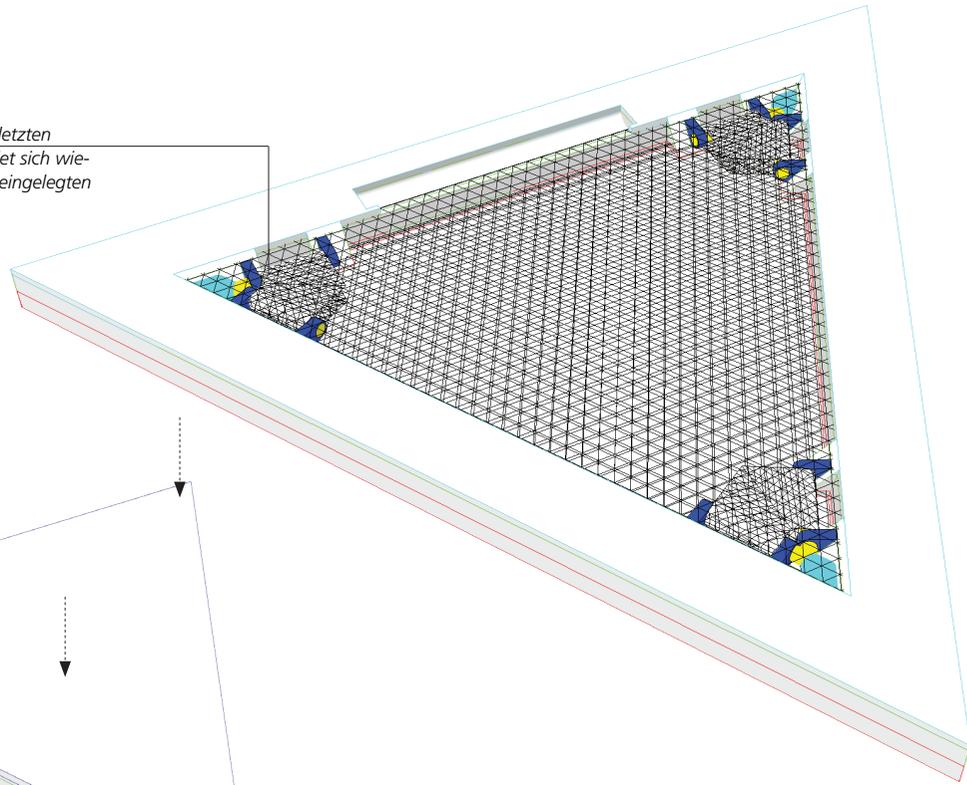
5.4.4

5.4.6 Die vollständig befüllte Form kann nun durch eine Deckfläche geschlossen werden. Das Gesamtpaket wird dann durch externen Spannrahmen aus Stahl zusammengepresst und fixiert, um anschließend aufgestellt und von einem Kran befördert werden zu können.

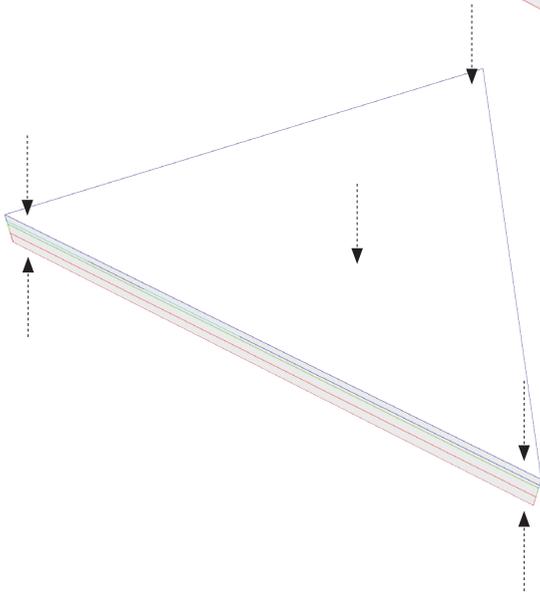
5.4.7, 5.4.8 Durch die Schwerkraft fließt vor der Aushärtung Material aus dem auf der Oberseite positionierten, zusätzlichen Betonvolumen in die Form nach und füllt so Leerstellen. Die Formen können bis zum Ausformen eng aneinandergelehnt gelagert werden, durch den dreieckigen Umriss sind dazu entsprechende Standböcke notwendig.

5.4.5 Aufsetzen und Betonieren der letzten Formebene; an der Unterseite befindet sich wiederum ein Carbontextil, das mit den eingelegten Bewehrungsteilen verklebt wird.

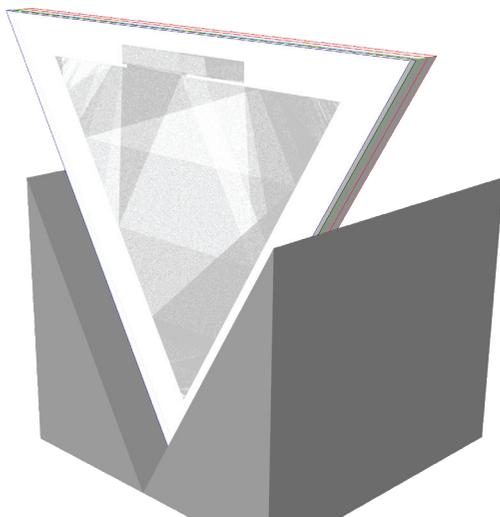
5.4.5



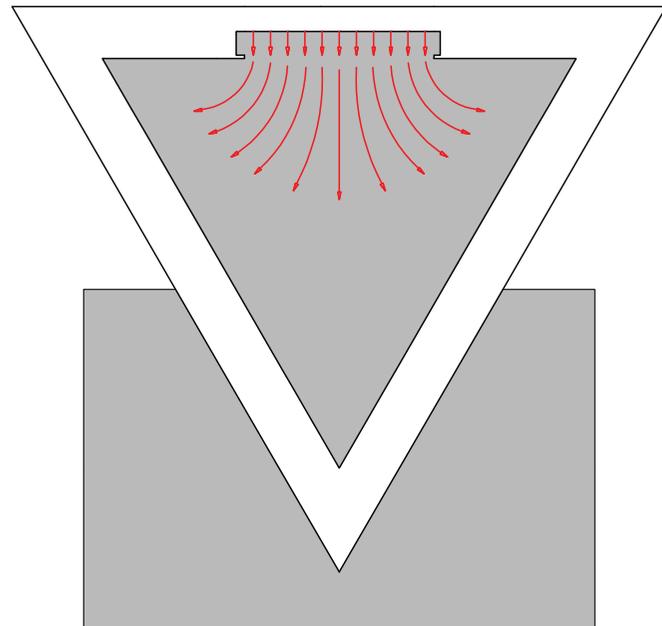
5.4.6



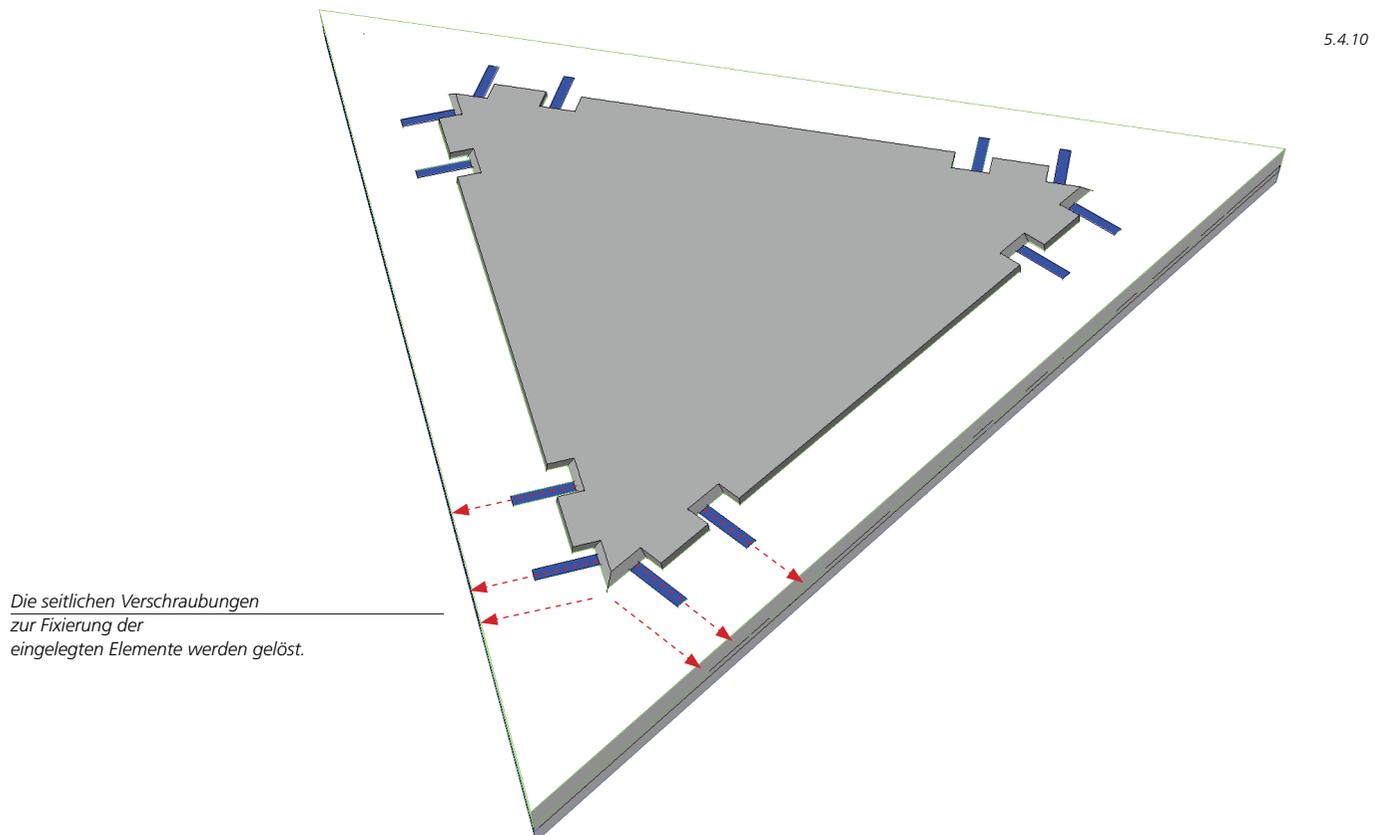
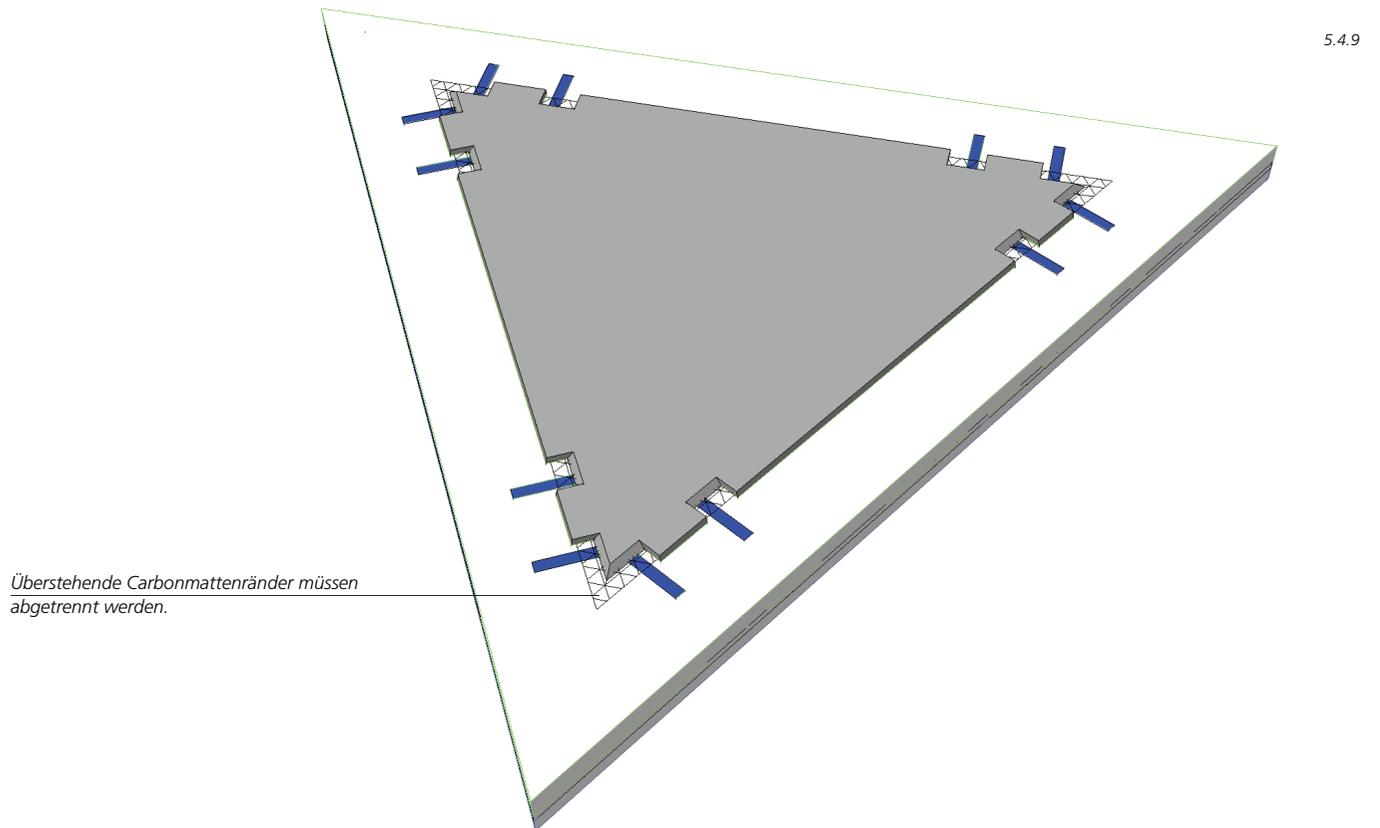
5.4.7



5.4.8



5.4.9 Nach dem Aushärten erfolgt das Entformen in umgekehrter Reihenfolge; wurde die Grundebene abgehoben, können die Bewehrungsmontageplättchen gelöst und die überstehenden Carbonmattenränder abgeschnitten werden.  
5.4.10 Damit die Mittelebene abnehmbar ist, müssen die Verschraubungen der Kernelemente gelöst werden, da diese nicht im Verbund mit dem Formrahmen entfernt werden können.



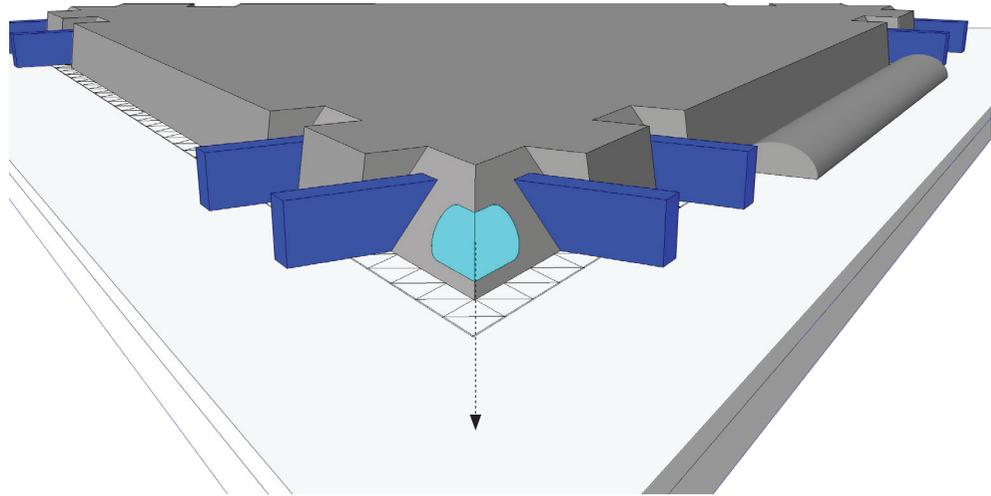
Wurde die Mittelebene entfernt, verbleiben die Kerne im Betonelement und können nun horizontal aus dem Bauteil gezogen werden.

5.4.11 Zunächst wird das Randelement, das den Zugang zu den Bolzenbohrungen ermöglicht, entformt. (cyan)

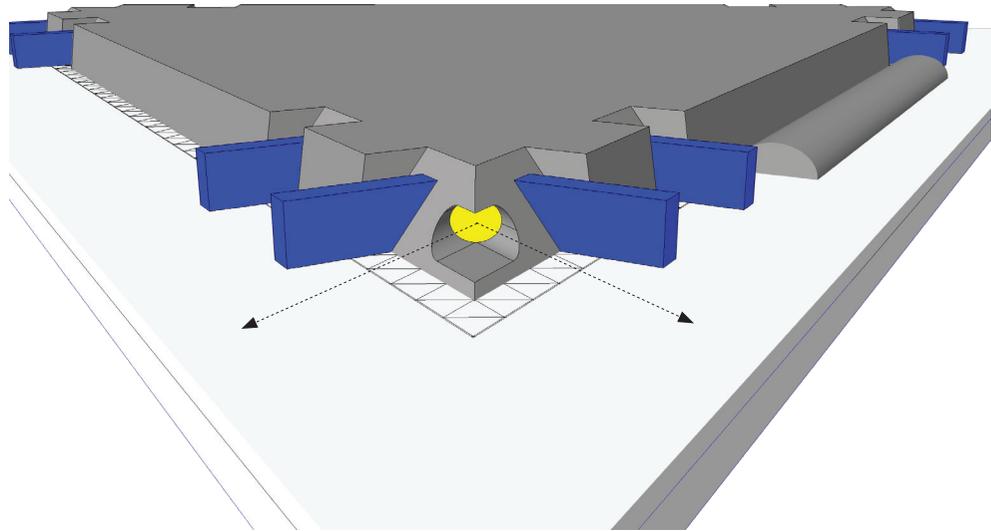
5.4.12 Nun können nacheinander die gelben Rundstäbe entfernt werden, sie sind zur besseren Entformbarkeit leicht konisch und besitzen an ihren Stirnseiten ein Innengewinde, in das ein Austreiber geschraubt werden kann.

5.4.13 Durch das Entfernen der Stäbe liegen auch die blauen Elemente frei und können aus dem Beton gezogen werden.

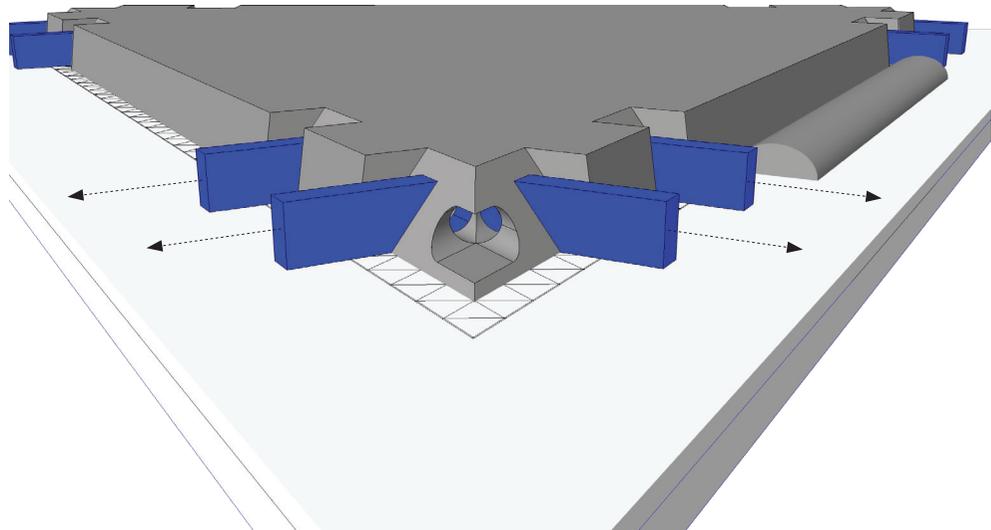
5.4.11



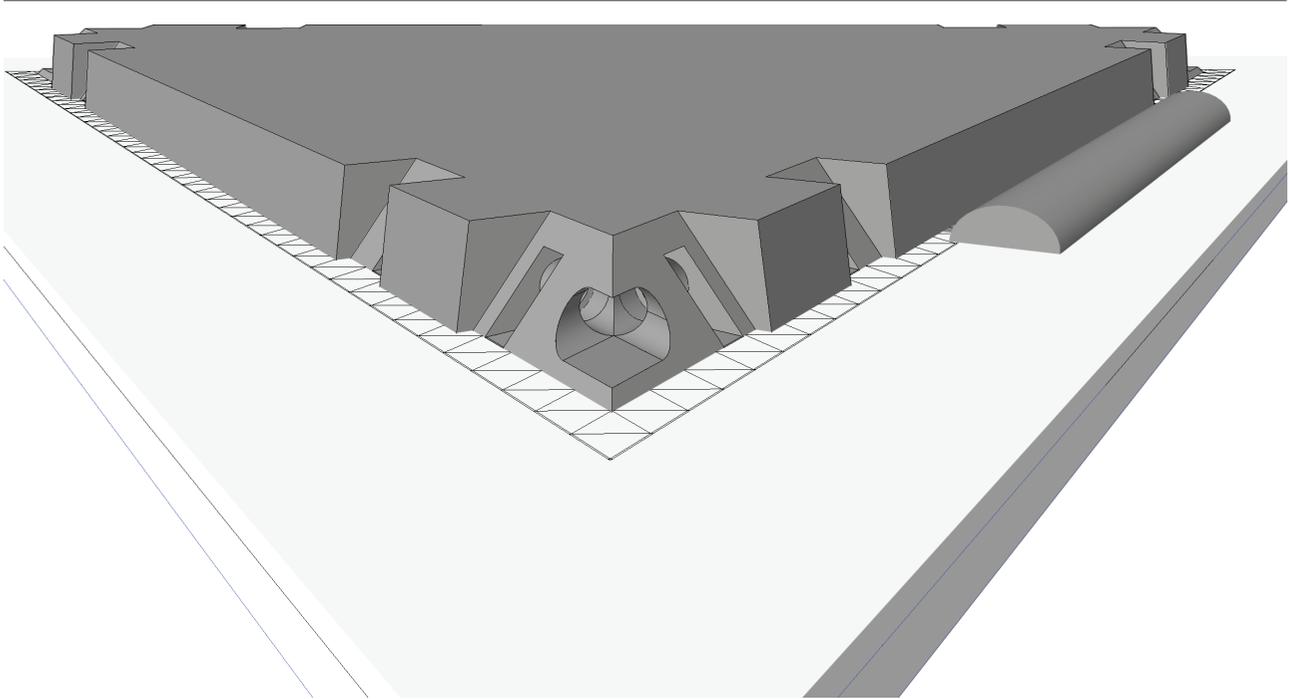
5.4.12



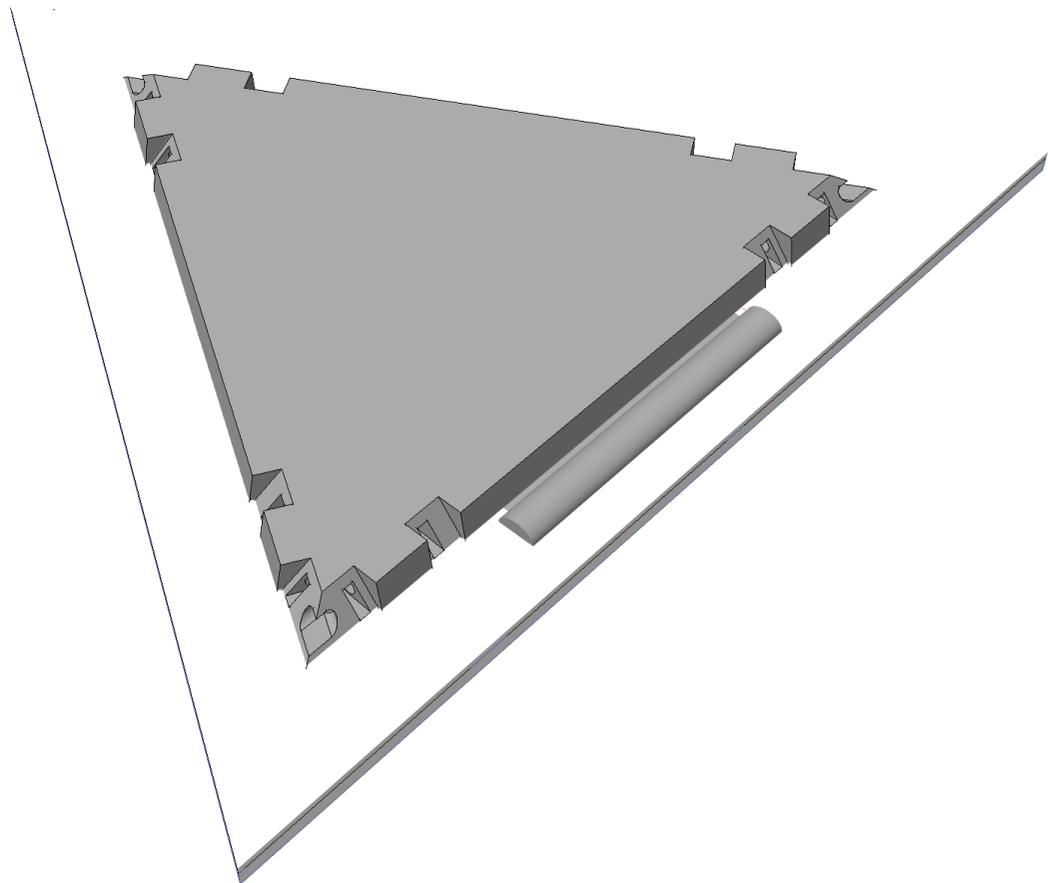
5.4.13



5.4.14 Vor dem Abnehmen des letzten Formrahmens muss wiederum die Bewehrungsbefestigung gelöst und überstehendes Carbondextil entfernt werden.  
5.4.15 Der nun freiliegende Formrahmen kann abschließend abgehoben werden und gibt somit das fertige Betonhalbzeug frei.



5.4.14

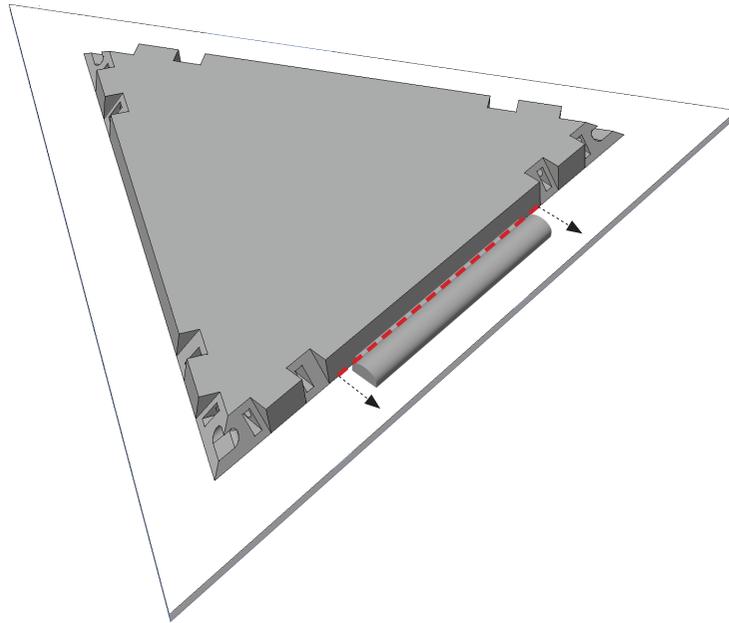


5.4.15

5.4.16 Das Betonfertigteile muss nun noch von dem zusätzlichen Betonreservoir getrennt werden und kann anschließend der mechanischen Bearbeitung zugeführt werden. Das Abtrennen kann durch Abschlagen erfolgen, eine eingeformte Sollbruchstelle erleichtert diesen Vorgang.

Der beschriebene Fertigungsprozess ist für alle erarbeiteten Modulvarianten grundsätzlich gleich. Die dargestellte Variante zeigt beispielhaft den aufwendigsten Formtypus.

5.4.16



Durch die erläuterte Form und Betoniermethode können alle erzeugbaren Modulurisse gefertigt werden. Dabei wechselnde Rahmenbedingungen, wie negative Faltungswinkel oder notwendige Konturänderungen, werden bei anderen Modulen ebenfalls durch zusätzliche Formeinlegeelemente umgesetzt. Durch die Vorplanung der Herstellungsmethoden erscheinen die entwickelten Betonfertigteile an dieser Stelle prinzipiell machbar. Vor allem die effiziente Fabrikation der Betonhalbzeuge muss als Herzstück der Produktion kostengünstig möglich sein, um mit den etablierten Verfahren zur Herstellung von Gitterschalen und freigeformten Gebäudehüllen konkurrieren zu können.

Erweist sich die geplante Halbzeuherstellung als zielführend, können weitere Verbesserungen der Formen vorgenommen und verschiedene Formstoffe, Beschichtungen und Trennmittel getestet werden. Nach den ersten umgesetzten Betoniervorgängen können zusätzlich charakteristische Werte für Entformschrägen und das Schwindmaß festgelegt werden, auch die Positionierung und Anzahl der Ausgleichsvolumen kann angepasst werden.

Durch den durchgängig digitalen Workflow stehen alle notwendigen Konstruktionsdaten zur Erstellung der Formen und zur mechanischen Nachbearbeitung ab der Formfindung bereit. Dieser Faktor senkt den Konstruktionsaufwand maßgeblich, da die exportierbaren dreidimensionalen Daten sofort zur Erzeugung der Formen verwendet werden können. Die Formhälften selbst werden durch das CAM gestützte Ausfräsen der Bauteilkonturen aus den MDF-Platten gebildet, wobei auch hier eine Abarbeitung in Kleinserien möglich ist.

Die 225 Betonmodule für die Realisierung der Prototypenschale könnten durch eine ausgereifte Fertigung, die auf dem konzeptionierten Herstellungsprozess basiert, bei Verwendung von zehn Formen in ca. 25 Tagen hergestellt werden.

---

## 6 AUSBLICK

---

Durch die entwickelte Formfindungsmethode können selbsttragende doppelt gekrümmte Gebäudehüllen aus immergleichen Fertigteilen hergestellt werden. Die Verwendung von UHPC als Fertigteilerwerkstoff bietet die Möglichkeit, den Beton gemäß seiner Eigenschaften ideal einzusetzen und dadurch das Konzept ressourceneffizient realisieren zu können. Die festgelegten Modulgrößen und die Reaktionen der Struktur auf die Parkettierungsseitenlängen zeigen, dass durch die entwickelte Formfindungsmethode Schalen bis zu einer Hauptspannweite von ca. 40 Meter erzeugbar sind. Ist es möglich, die Fertigteile in der geplanten Form herzustellen, kann durch diese modulare Bauweise die tragende und raumabschließende Funktion in ein nur 6 - 10 cm dickes, sich wiederholendes Bauteil verpackt und dabei trotzdem eine vielfältige Formensprache umgesetzt werden.

Die einzige sich von Modul zu Modul ändernde Größe ist der variable Faltungswinkel. Dieser Winkel kann durch das geplante System aufgenommen und durch eine minimale mechanische Nachbearbeitung am Modul adaptiert werden. Erweist sich die konzeptionierte Bauweise als kostengünstiger wie zum Beispiel die Herstellung von Schalen aus Ortbeton oder Gitterschalen mit ungleichen Maschenweiten, ist das Planungsziel erreicht.

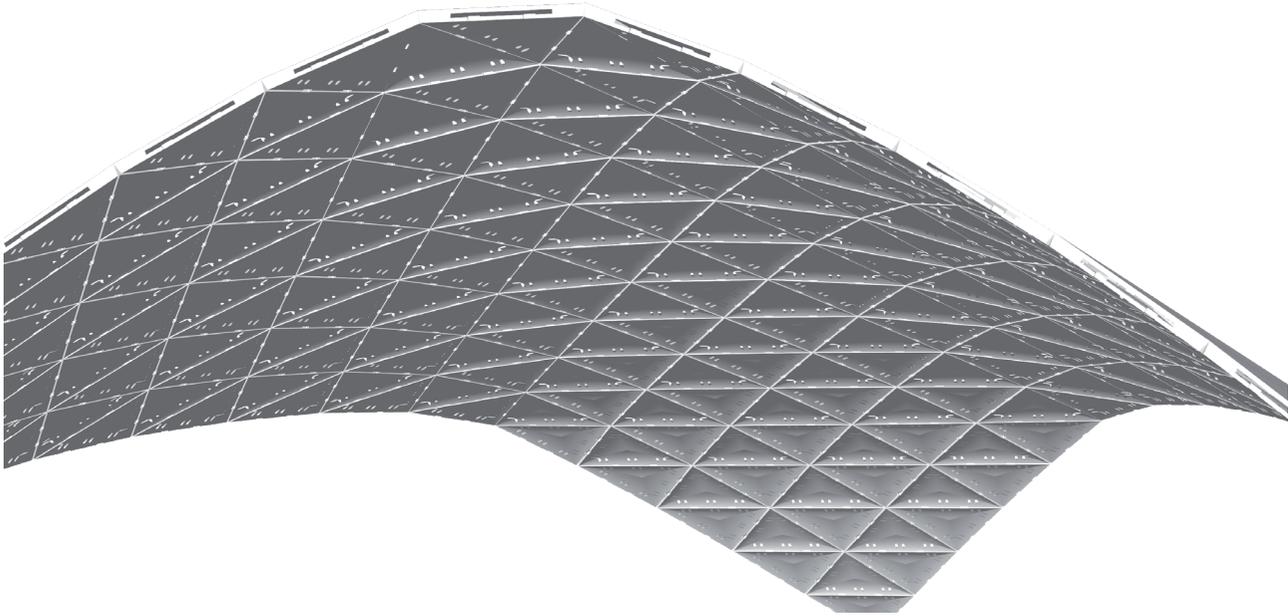
Als nächster Schritt müsste also eine Abschätzung der Kosten anhand des erstellten Konzepts erfolgen, um die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu den bisher eingesetzten Produktionsprozessen überprüfen zu können. Um das Gesamtkonzept an sich nutzbar zu machen, ist die Frage der Endmontage zu klären, denkbar wäre hier der Zusammenbau der Schale vom Zentrum aus, wobei die Struktur mit jeder außen angesetzten Reihe gehoben wird, oder die Verwendung eines Lehrgerüsts. Auch hier ist der Kostenfaktor entscheidend. Durch die Rückführung der Ergebnisse der statischen Analyse in die Schalenerzeugung kann diese weiter parametrisiert werden. Wie die Auswertungen zeigten, sind viele der Elemente in den Strukturen nur leicht belastet und bieten genügend Reserven um opake Bauteile einsetzen zu können, deren Ausmaß der jeweiligen Elementbelastung entspricht. Die Auswertung und Identifizierung dieser Elemente ist mittlerweile durch das verwendete Analysetool Karamba 3D möglich, da seit dem letzten Update (Oktober 2012) die Berechnung von flächigen Elementen implementiert ist. Die Entscheidung, welche der möglichen Elemente tatsächlich zum Rahmen für eine Verglasung werden sollen, liegt letztendlich beim Planer. Die zwischenzeitliche Betrachtung der Struktur als Gitterwerk, wie in dieser Arbeit gezeigt, ist also aufgrund der Funktionserweiterung von Karamba nicht mehr notwendig. Durch diese Weiterentwicklung kann die gesamte Auswertung in der Softwareumgebung der Formfindung stattfinden und auf ideale Weise eingebunden werden. Ein wichtiger Faktor für die Ausformulierung der konzipierten Bauweise und der Fertigteile ist die Integration von bauphysikalischen Maßnahmen, die in dieser Arbeit bislang nur peripher behandelt wurden. Da als Planungsziel ein Fertigteile definiert wurde, das in kompakter Weise viele Funktionen einer Gebäudehülle übernehmen kann, verlangt diese weitere Anforderung eine gesonderte und umfassende Betrachtung.

---

6.1 Prototypische Schalengeometrie aus identen Betonfertigteilen; die Struktur wurde mit Modulen belegt, die zur Gänze ausformuliert sind und alle notwendigen Komponenten zur Fügung beinhalten. Durch die digitale Prozesskette stehen alle zur Fertigung notwendigen Daten schon ab der Formfindung bereit. Verschiedene Varianten können getestet und bewertet werden, bevor die jeweilige Kombination aus Elementumriss, Verbindungstechnik und Schalengeometrie in die Fertigung überführt wird.

---

6.1




---

Weiters ist festzuhalten, dass das entwickelte Tool nicht nur zur Erzeugung von Schalen aus gleichen flächigen Elementen dienen kann, sondern auf Basis einer anderen Parkettierung auch Gitterschalen mit identen Stablängen und viereckigen Maschen generiert.

Zusätzlich ist es möglich, beliebig erzeugte Freiformen durch gleiche Elemente anzunähern.

Fraglich ist jedoch, ob es sinnvoll ist einer Struktur die wertvolle tragende Funktion zu entziehen.

Ob eine derartige Bauweise zum Einsatz kommt oder überhaupt richtig ist, hängt stark von wirtschaftlichen Faktoren ab. Die Geschichte zeigt, dass zum Beispiel die filigranen entmaterialisierten Strukturen des Ingenieur Vladimir Suchov aufgrund des Ressourcenmangels im damaligen Russland entstanden sind und trotz ihrer enormen Effizienz über lange Dekaden keine weiteren Anwendungen fanden.

Die in dieser Arbeit konzipierte Bauweise ist deshalb in vielerlei Hinsicht auf wirtschaftliche Faktoren abgestimmt und versucht nicht zur Lösung für wenige ausgewählte Landmarks zu werden, sondern zu einem Konzept, das durch seine umfassende Betrachtung unzählige Anwendungen findet. Von temporären Notunterkünften bis zu weit gespannten Überdachungen ist der Einsatz der Module je nach Größe und Gewicht denkbar.

In unseren Breiten ist eher die Integration der Planungsmethode in die bereits etablierten Fertigungsprozesse zu erwarten. Die Umsetzung des Gesamtsystems findet aber womöglich an Orten statt, die völlig andere Anforderungen an Tragsysteme aufgrund des vorherrschenden Klimas, der jeweiligen Gesellschaft und ihrer urbanen Strukturen stellen.

Verdichtungen in den Ballungszentren und die daraus entstehenden Megastrukturen verlangen nach weit gespannten und modularen Tragsystemen, die einfach herzustellen, erweiterbar und transportierbar sind. Zusätzlich weist die Entwicklung der Bauwerke in extremen Klimazonen durch die häufig überdachten Freibereiche auf die Notwendigkeit von leichten und weitgespannten Tragwerken hin.

## 7 THEORIE UND PROJEKTE

### REALISIERTE OBJEKTE UND SYSTEMATIK DES SCHALENBAUS

Die Inhalte dieser Arbeit beruhen auf Leistungen von Architekten und Ingenieuren, die schon seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts Lösungen für schlanke und effiziente Tragstrukturen entwickelt haben. Zwar gehen die Ursprünge der zur Überdachung genutzten Kuppeln noch viel weiter zurück, der Versuch jedoch, Tragwerke maximal zu entmaterialisieren und wirtschaftlich herstellen zu können, findet seine Anfänge erst in der Entwicklung der räumlichen Fachwerktheorie und der parallel dazu immer ausgereifteren Metalltechnik.

So zeigen Arbeiten von Vladimir Šuchov, einem russischen Ingenieur, Strukturen, die mit einem Minimum an Material auskommen. Die Ressourcenknappheit im Russland des späten 19. Jahrhunderts forderte schlichtweg nach derartigen Lösungen, die aber nicht nur durch die Ingenieursleistung und ihre Effizienz glänzten, sondern auch mit Eleganz und Bildkraft bestachen.

Wie fortschrittlich seine Ideen und Lösungen waren zeigt sich daran, dass viele dieser Ansätze in der High-Tech Architektur der 1990iger Jahre wieder aufgegriffen wurden.

Suchov schafft es dadurch schon 1897 doppelt gekrümmte Geometrien, durch das Verschieben von Kreisbogensegmenten entlang einer Parabel, durch ausnahmslos gleiche Elemente anzunähern.<sup>11</sup>

Trotz der von Šuchov entwickelten effizienten Konstruktionsweise für Gitterschalen werden diese in der darauf folgenden Zeit nur selten umgesetzt. Erst der Stuttgarter Architekt Frei Otto setzt sich in den 1960er Jahren mit dem Thema auseinander und entwickelt Formfindungsmethoden für Gitterschalen. Basis hierfür sind die von Antonio Gaudi zur Planung seiner Mauerwerkskulpturen verwendeten Hängemodelle. Diese anhand von durchhängenden Fäden oder Ketten erzeugten Hängemodelle bilden nach dem Umdrehen ideale, nur druckbeanspruchte Strukturen ab.

Abb. 7.1

Frei Otto entwickelte auf Basis der Modelle das sogenannte «Prinzip des Salatsiebs», das bei der Realisierung der Mannheimer Multihalle eingesetzt wurde. Das Prinzip beruht auf einem quadratischen Netz, das eben abwickelbar und in seinen Netzeckpunkten verdrehbar ist. Dieses Netz kann dreidimensional verzogen werden, wobei zwar die Elementlängen gleich bleiben, die quadratischen Felder sich aber zu Rauten formen.<sup>12</sup>

Abb. 7.2

Der Tragwerksplaner Jörg Schlaich entwickelte das Salatsiebprinzip weiter und setzte mit dieser Technik Stabwerksschalen mit konstant gleichen Stablängen um, ein Beispiel hierfür ist die Schwimmbadüberdachung in Neckarsulm. Veränderlich jedoch bleiben auch bei dieser Methode die in den Stäben eingelegten, flächenbildenden Elemente.<sup>13</sup>

Abb. 7.3

Die von Walter Bauersfeld und Richard Buckminster Fuller eingesetzte Technik zur Herstellung von geodätischen Kuppeln kann zumindest teilweise nicht nur gleiche Stablängen, sondern auch sich wiederholende Elementflächen erzeugen. Schlussendlich bedingt aber auch diese Methode, obwohl partiell eine gleichartige Elementierung möglich ist, die Herstellung von Sonderstäben und Sonderflächen bei der Realisierung. Dennoch wurden durch Fullers patentiertes System weltweit mehr als tausend Bauten errichtet, was auf die Notwendigkeit von leichten und weit gespannten Strukturen hinweist.<sup>14</sup>

Abb. 7.4

Da sich Beton aufgrund seiner Eigenschaften ideal für die Herstellung von Schalen eignet, ist es dem kostenintensiven Schalungsaufwand zuzuschreiben, dass in der zeitgenössischen Architektur so wenige Betonschalen realisiert werden. Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts jedoch setzten Planer wie Felix Candela und Pier Luigi Nervi eine Vielzahl von Schalen in Beton um. Die Formfindung für diese Projekte fand hauptsächlich durch geometrische Konstruktion, also die Verwendung von elementaren Körpern wie Zylinderabschnitten, Ellipsoiden, Rotationsflächen oder auch dem hyperbolischen Paraboloid, statt.

Pier Luigi Nervi suchte dabei in seinen Projekten nicht nur in der Planung der Tragstruktur nach Effizienz, sondern versuchte zusätzlich auch den Herstellungsprozess zu rationalisieren.

Der Einsatz von vorgefertigten Elementen beim Bau des Pallazetto dello sport ist beispielhaft für die Verwendung von Betonhalbzeugen zur Herstellung von Betonschalen.<sup>16 17</sup>

Abb. 7.5

Die Arbeiten von Felix Candela inspirierten den Schweizer Ingenieur Heinz Isler zur Weiterentwicklung der angewendeten Formfindungsmethoden und zur Herstellung von effizienten Ortbetonschalen. Die vielen realisierten Betonschalentragwerke Islers weisen deutlich auf das harmonische Zusammenspiel von Werkstoff und Tragsystem hin, das auf die von Isler verwendeten Planungsmethoden zurückzuführen ist. Auch Isler suchte die natürliche harmonische Form in physikalischen Hänge- und Kissenmodellen.<sup>18 19</sup>

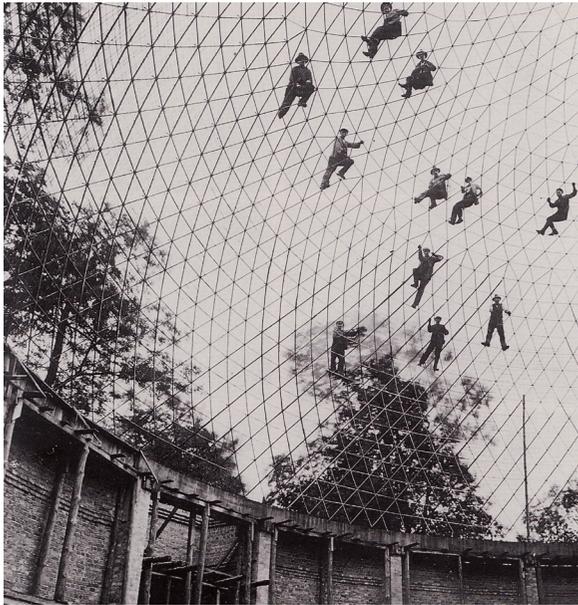
Das folgende Kapitel zeigt ausgewählte Arbeiten der erwähnten Protagonisten des Schalenbaus.

7.1 Frei Otto, Multihalle Mannheim; das erste Tragwerk nach dem Prinzip des Salatsiebs. 7.2 Durch Anwendung des Salatsiebprinzips können doppelt gekrümmte Gitterschalen mit gleichen Stablängen erzeugt werden.  
 7.3 Fertigung der geodätischen Kuppel des Planetariums in Jena; Walter Bauersfeld  
 7.4 Geometrische Formfindungsmethoden. 7.5 Heinz Isler, Raststätte Deitingen Süd

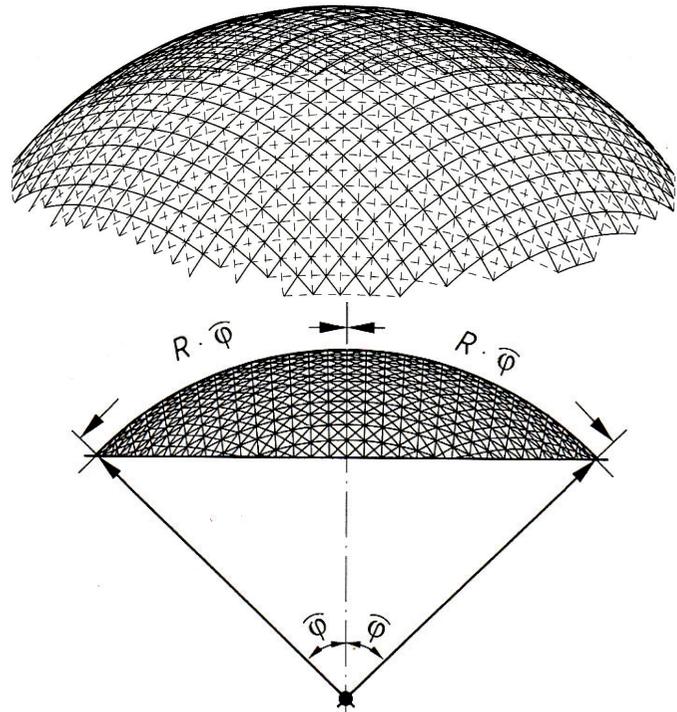
7.1



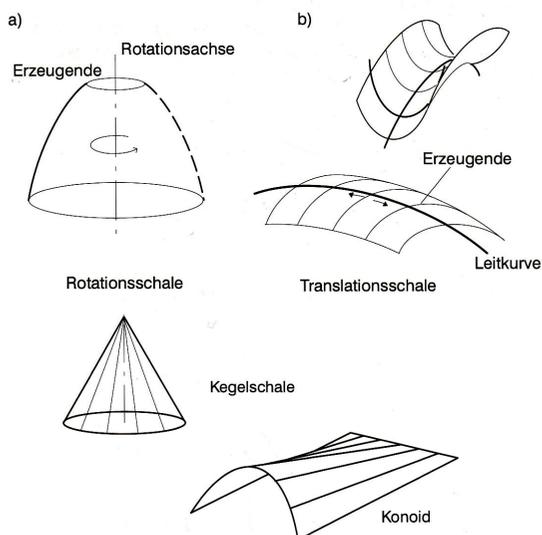
7.3



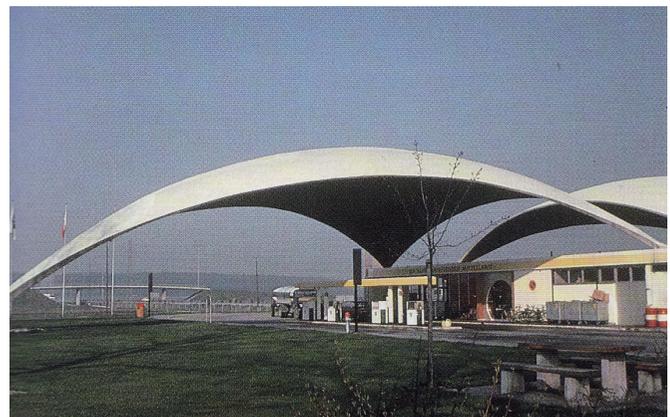
7.2



7.4



7.5



---

 TRAGVERHALTEN VON SCHALEN
 

---

QUELLE:

10 Vgl. Heinle, Erwin/Schlaich, Jörg: *Kuppeln. aller Zeiten aller Kulturen.*  
 Stuttgart 1996, 196-222.  
 Deutsche Verlags-Anstalt DVA  
 ISBN: 978-3421030627

Die prinzipielle Wirkungsweise von Schalentragwerken kann zunächst am zweidimensionalen Beispiel eines Bogens erläutert werden. Wird ein Bogen in idealer Weise an die Belastungsverteilung angepasst, entstehen im Bogenquerschnitt nur Normalkräfte.

Um einen derartigen Bogen zu erhalten, muss seine Achse der zur Belastung gehörenden Stützlinie folgen. Unter Stützlinie versteht man die umgekehrte Seillinie, die entsteht, wenn ein schlaffes Seil bei Belastung durch sein Eigengewicht durchhängt. Diese Seillinie ändert ihre Form sobald sich die Belastungsverteilung ändert, eine Zu- oder Abnahme der Lastgröße hingegen bewirkt keine Veränderung.<sup>10</sup>

Abb. 7.1.1

Die kontinuierlich gekrümmte Stützlinie entspricht bei Belastung durch eine Gleichlast grundsätzlich einem Parabelbogen. Bei einem reinen Eigengewichtslastfall entsteht eine geringfügig andere Linie, die sogenannte Kettenlinie, aufgrund der in den Auflagerbereichen steigenden Belastung.<sup>10</sup>

Abb. 7.1.2

Die Ermittlung der Stützlinie kann grafisch durch die Verwendung von Pol- und Seileckverfahren oder aber auch anhand eines Modellversuchs erfolgen, bei dem die Belastung eines Seils durch zusätzliche Gewichte simuliert wird. Die bei dem Modellversuch entstehenden Stab- und Spreng-, oder Strebenwerke bilden Polygonzüge ab, da die punktuell angebrachten Lasten das Seil an den Kraftangriffspunkten zu einer geknickten Linie umformen.

Abb. 7.1.4

Es kann also durch geometrische Konstruktion oder physische Modellbildung eine Form gefunden werden, in der nur axiale Druckkräfte herrschen, wenn auch in den Lagerbereichen nur axial gelagert wird.<sup>10</sup>

Abb. 7.1.3

In Realität ist dieser Zustand aber kaum umzusetzen, deshalb entstehen fast immer Störungen. Grund hierfür sind Längenausdehnungen wegen Temperaturschwankungen und einseitige oder punktuelle Lasten. Durch diese Laständerung und die damit einhergehende Verformung weicht die Drucklinie von der Stützlinie ab, wodurch Biegemomente im Querschnitt des Bogens auftreten. Eine Möglichkeit einen Bogen zu stabilisieren ist die Verstärkung des Querschnittes, um zu verhindern, dass die verformte Stützlinie außerhalb des auf Druck belastbaren Materials liegt.

Abb. 7.1.5

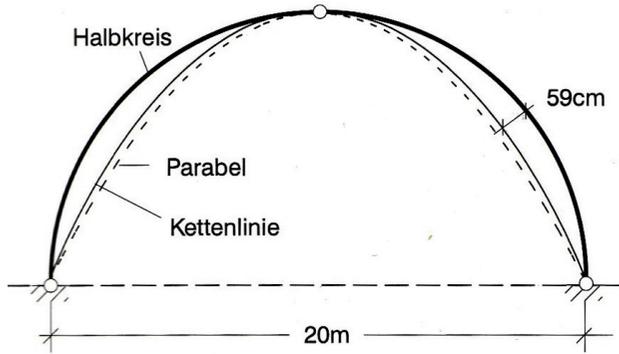
Abb. 7.1.6

Die beschriebene Methode zur Ermittlung der Stützlinie kann auch bei dreidimensionalen flächigen Strukturen angewendet werden. Diese Modellbetrachtung entspricht weitestgehend der in dieser Arbeit entwickelten Formfindungsmethode. Die entstehenden Schalengeometrien sind nicht nur ideal durch Druckkräfte beanspruchbar, sondern befinden sich aufgrund der räumlichen Krümmung auch im Membranspannungszustand, was die Tragfähigkeit weiter erhöht.<sup>10</sup>

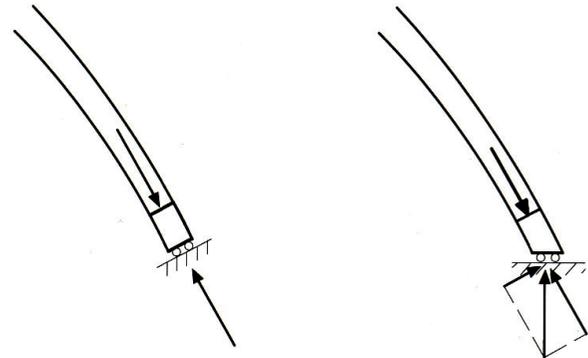
Ersichtlich wird dieser Zustand leicht an einem zylindrisch gekrümmten Blatt Papier, das ho-

7.1.1 Vergleich von typischen Stützlinien und einem Halbkreisbogen. 7.1.2 Modellaufbau zur physischen Ermittlung einer Stützlinie bei gegebener Lastverteilung. 7.1.3 Verformungen, Momente und Axialkräfte unter verschiedenen Belastungen. 7.1.4 Vergleich einer idealen, rein axialen Gleichgewichtslagerung und einer eher nachteiligen Lagersituation. 7.1.5 Verformung eines Bogens unter Gleichlast; die Struktur verlässt ihre Stützlinie.

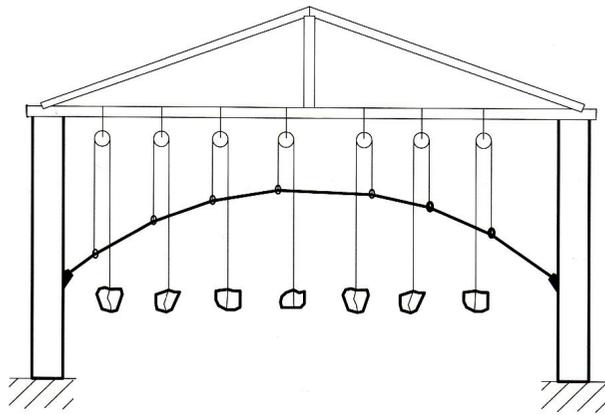
7.1.1



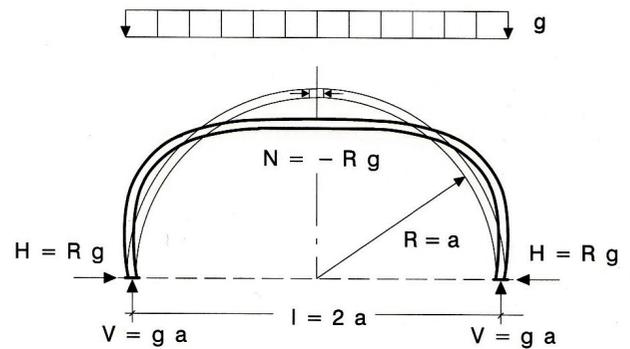
7.1.4



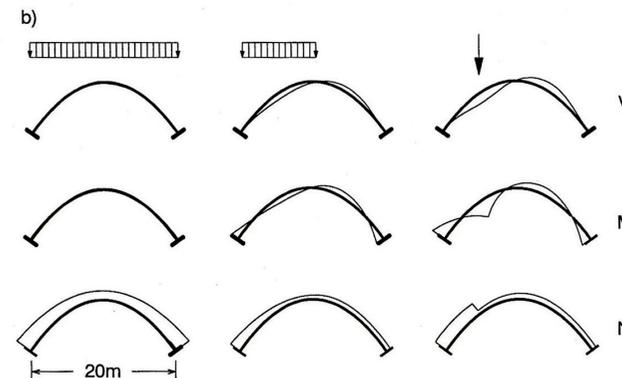
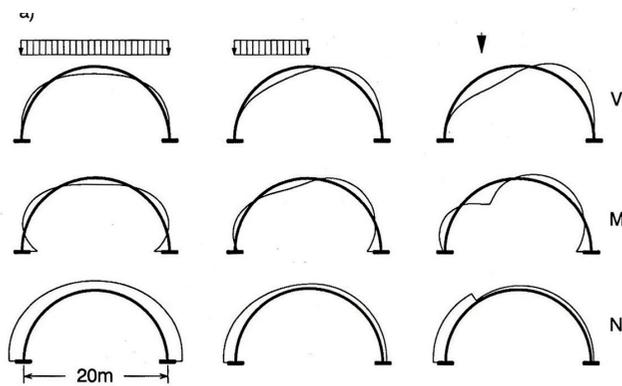
7.1.2



7.1.5



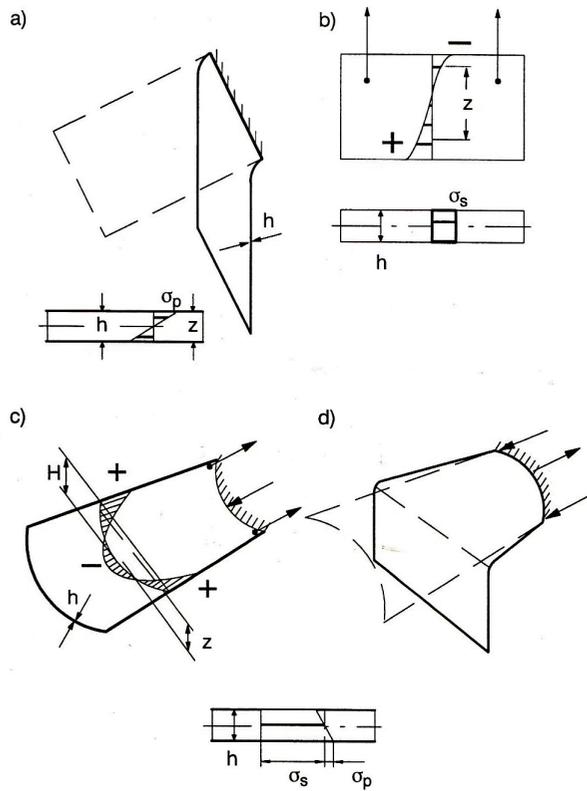
7.1.3



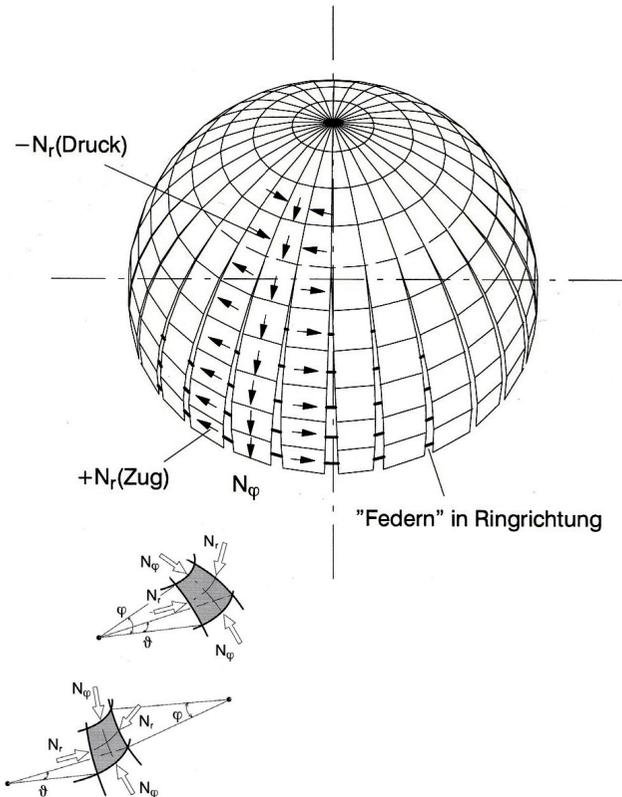
7.1.6 Darstellung zur Visualisierung des Membranspannungszustandes in einem zylindrisch gekrümmten Blatt Papier. Durch die größere aktive Bauteilhöhe bei gleichbleibender Bauteildicke entsteht ein leistungsfähigeres Tragwerkselement.

7.1.7 Modellannahme zur Darstellung der in Kugelschalen auftretenden Kräfte; durch die Verformung entstehen im unteren Bereich radiale Zugkräfte.

7.1.6



7.1.7



horizontal auskragt. Durch das Krümmen steigt die aktive Bauteilhöhe gegenüber eines ebenen Blattes um ein Vielfaches an, wodurch die Membranspannungen an den Blatträndern und im Zentrum ansteigen. Die auftretenden Biegespannungen sind aber deutlich geringer, wodurch insgesamt ein viel leistungsfähiges System entsteht, als eine ebene Platte.<sup>10</sup>

Das Tragverhalten von doppelt gekrümmten Schalen kann man anhand einer Modellannahme erklären. Sieht man die Schale als eine radiale Anordnung von Bögen, die in Ringrichtung durch Federn verbunden sind, erkennt man, dass hohe Ringzugkräfte entstehen. Die Bögen tragen die Lasten, deren Stützlinie sie entsprechen, in Meridianrichtung ab. Durch die damit einhergehende Verformung im oberen Teil entstehen aber im unteren Bereich große, radial wirkende Kräfte.<sup>10</sup>

Abb. 7.1.7

Auch bei Schalentragwerken hängt der ideale Membranspannungszustand von der axialen Lagerung und eventuell auftretenden Einzellasten ab, ist also auch in der Realität kaum zu erreichen.<sup>10</sup>

Die in dieser Arbeit erzeugten Schalen sind wegen ihrer auf einer Hängefigur basierenden Form den „klugen“ oder fließenden Schalen zuzuschreiben. Das heißt, dass die durch Lasten erzeugten Kräfte entlang der gefundenen Form zu den Auflagern fließen, die schon während der Formfindung Teil der Modellannahme sind.



---

## VLADIMIR ŠUCHOV BLECHWALZWERK

---

PROJEKT: Blechwalzwerk  
ORT: Vyksa, Russland  
INGENIEUR: Vladimir Šuchov  
AUSFÜHRUNG: 1897/98

QUELLE:  
11 Vgl. Nerdinger, Winfried: *Wendepunkt(e) im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur*, München 2010, 88-91  
ISBN: 978-3-920034-40-9  
Verlag: Edition Detail

---

Im Jahr 1897 errichtet der russische Ingenieur Vladimir Šuchov eine Halle für ein Blechwalzwerk mit einer großen konstruktiven Besonderheit.

Die Überdachung der Halle ist die weltweit erste doppelt gekrümmte Gitterschale, die zudem aus durchgängig gleichen Elementen gefertigt ist.

Die Halle ist durch vier, als Fachwerk ausgeführte Hauptgesperre gegliedert, die jeweils in einem Abstand von 14,6 Metern angeordnet sind. Die Obergurte dieser Dreigelenksrahmen sind durch Polygonzüge an eine Parabelform angenähert. Die Halle erstreckt sich in Hauptspannrichtung über 38,4 Meter und ist 73 Meter lang. <sup>11</sup>

Das Dachtragwerk erzeugt ein rautenartiges Netz aus zweilagig verlegten Z-Profilen. Die Profile wurden an einem Profilende an einem Obergurt befestigt, an dem anderen, um vier Montagepunkte versetzt, am jeweils gegenüberliegenden Obergurt fixiert. Da der Obergurt den Bogen durch einen Polygonzug annähert, mussten zum Teil Distanzbleche eingearbeitet werden.

Die Z-Profile sind alle mit dem gleichen Biegeradius geformt und besitzen eine identische Länge. Diese Profile werden also schräg gestellt entlang der Obergurtparabel verschoben und erzeugen so eine Bewegfläche.

Zur Aussteifung der Schale verwendete Šuchov dünne Stahldrähte zwischen den gegenüberliegenden Profilendpunkten.

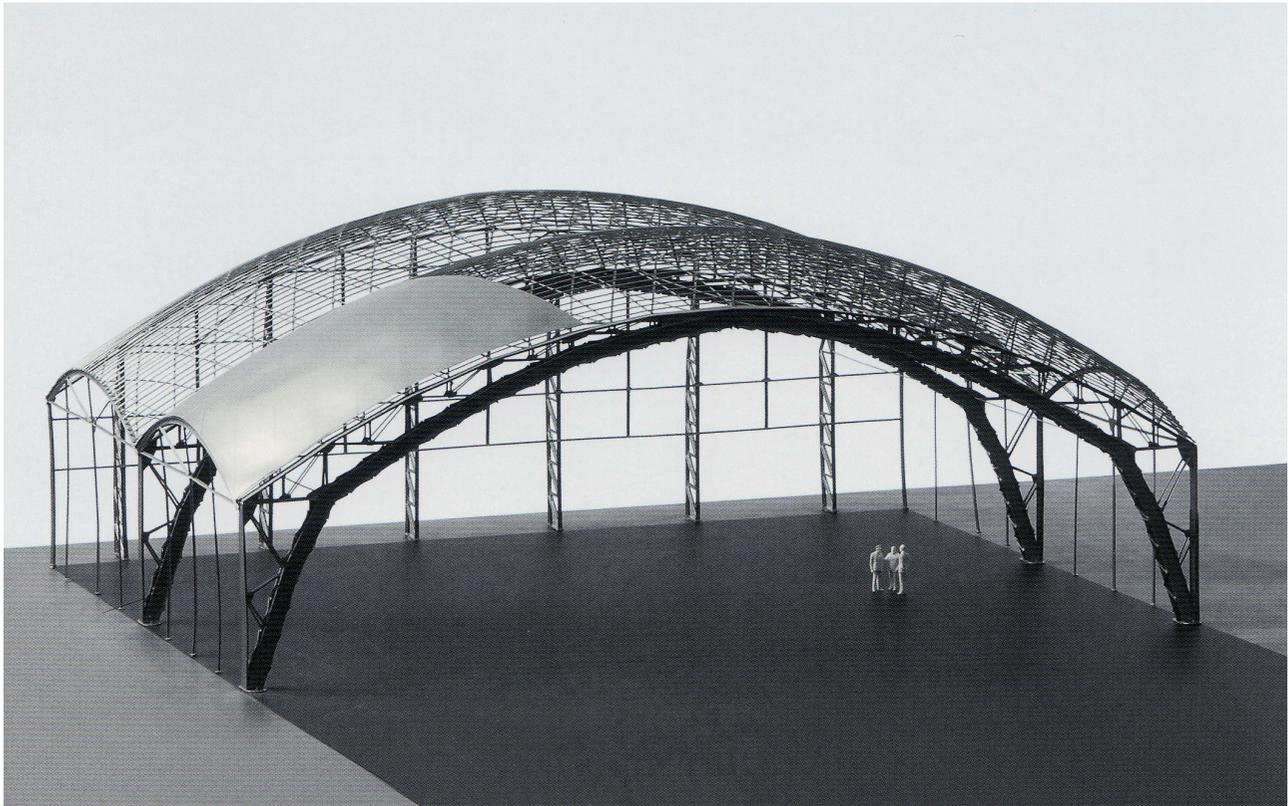
Kleine Stahlwinkel, die parallel zu dem Parabelbogen der Dreigelenksrahmen verlegt sind, bilden den Unterbau für die nur 1 mm dünne Blecheindeckung des Daches. <sup>11</sup>

Šuchovs Dachtragwerk ist die erste, aus gleichen Elementen erzeugte Gitterschale der Welt. Die zuvor erzeugten Stabtragwerke bestanden aus Elementen, die je nach Funktion differenziert ausgebildet waren.

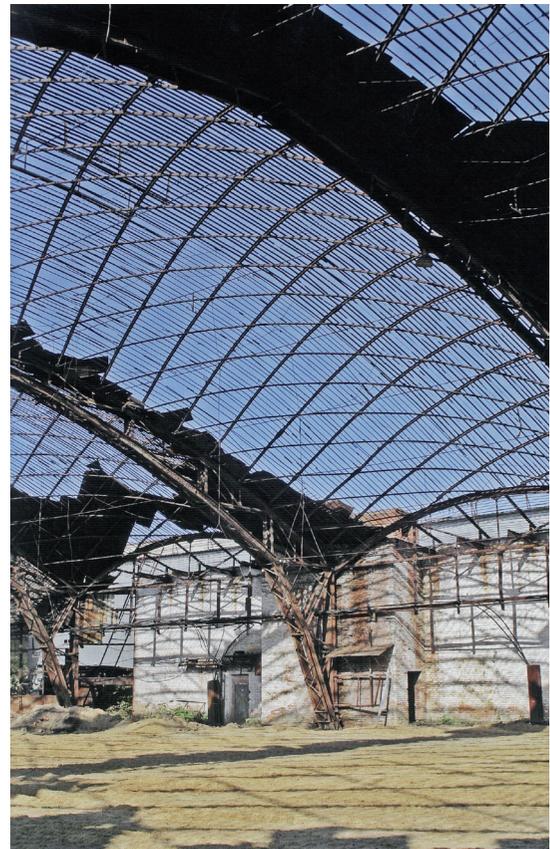
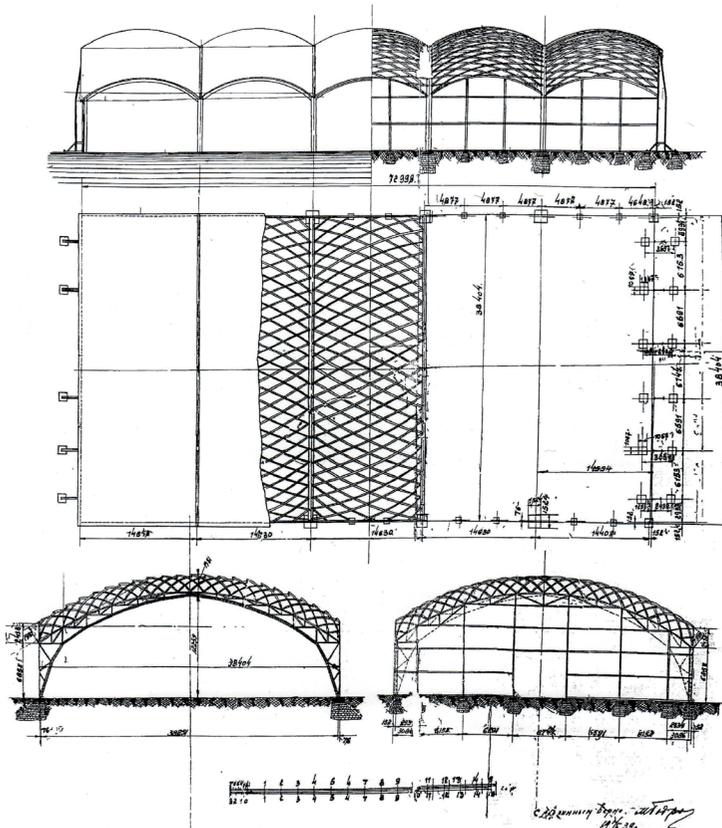
Das gebildete Tragwerk ist also nicht nur in statischer, sondern auch in wirtschaftlicher Hinsicht äußerst effizient. Diese Effizienz entstand aus dem massiven Eisenmangel im Russland der damaligen Zeit. Šuchov antizipierte mit diesem Tragsystem weit ins 20. Jahrhundert hinein die Schalenkonstruktionen der High-Tech Architektur. Noch heute, über 110 Jahre nach ihrer Errichtung, zeugt die Konstruktion von Leichtigkeit und Eleganz, obwohl das Gebäude mittlerweile seiner Dacheindeckung beraubt wurde und sich in einem ruinösen Zustand befindet. <sup>11</sup>

7.2.1 Modellnachbau der Blechwalzwerkhalle von Vladimir Šuchov; das Tragwerk wirkt effizient und entmaterialisiert. 2009  
 7.2.2 Plandarstellung der Halle; Grundriss und Schnitte - die rautenförmige homogene Gitterschalenausbildung ist zu erkennen.  
 7.2.3 Zustand der Halle im Jahr 2007.

7.2.1



7.2.2



7.2.3

---

 PRINZIP DES SALATSIEBS
 

---

QUELLEN:

12 Vgl. Nerdinger, Winfried: *Wendepunkt(e) im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur*, München 2010, 42-45.

ISBN: 978-3-920034-40-9

Verlag: Edition Detail, herausgegeben durch Winfried Nerdinger

13 Vgl. Schlaich, Bergermann und Partner: *Projektpool in: <http://www.sbp.de> Stand 2012*

---

PROJEKT: MULTIHALLE  
ORT: Mannheim, Deutschland  
ARCHITEKT: Frei Otto  
AUSFÜHRUNG: 1975

Nachdem sich Frei Otto ab 1960 vermehrt mit dem Bau von Hängemodellen befasst, entwickelt er ein Prinzip zur Herstellung von doppelt gekrümmten Tragwerken. Die von Antonio Gaudi zur Planung seiner sakralen Mauerwerksskulpturen verwendete Methode diente Frei Otto zur Ermittlung von Stützflächen, die zur Erzeugung von hauptsächlich druckbeanspruchten Strukturen notwendig sind. Das von ihm daraus entwickelte System basiert auf einem quadratischen Netz, das in seinen Mascheneckpunkten verdrehbar ist und eben abgewickelt werden kann. Bringt man eine derartige Struktur zum Durchhängen, entsteht ein Gitterschale mit gleichen Stablängen, nur die Umformung der Quadrate zu Rauten ermöglicht eine dreidimensionale Formänderung. Frei Otto konnte dieses Prinzip nach einigen Versuchsbauten bei der Errichtung einer Gitterschale für die Bundesgartenschau in Mannheim in die Realität umsetzen.

Das Gitternetz aus langen Holzplatten wurde am Boden ausgelegt und montiert, um anschließend mit Gabelstaplern aus der Ebene gedrückt zu werden. Um die zuvor verschieblichen Rechtecke zu fixieren, wurden diese mit diagonal über die Schalenfläche gezogenen Seilen verspannt, bzw. die Schrauben in den Verbindungsgelenken angezogen.<sup>12</sup>

PROJEKT:  
 Schwimmbadüberdachung  
ORT: Neckarsulm, Deutschland  
INGENIEURE: Schlaich, Bergermann  
ARCHITEKTUR:  
 Kohlmeier und Bechler, Heilbronn  
AUSFÜHRUNG: 1989

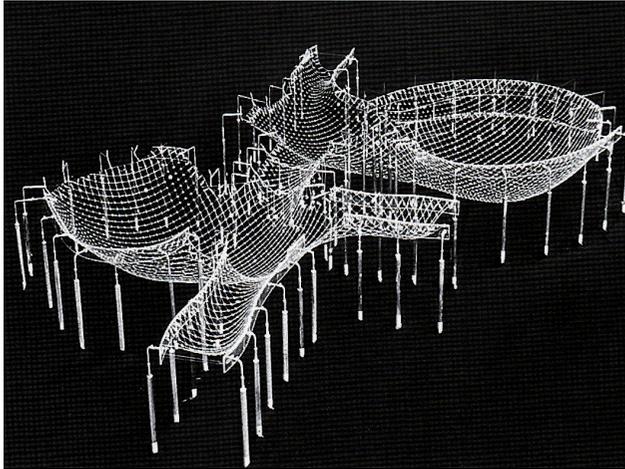
Der Tragwerksplaner Jörg Schlaich realisierte basierend auf derselben Systematik extrem leichte und effiziente Stabwerksschalen. Ein Beispiel hierfür ist die Schwimmbadüberdachung bei Neckarsulm. Die Setzkuppel besteht aus Flachstäben mit vorgespannten Diagonalseilen über dem Beckenbereich und ist mit sphärisch gekrümmten, viereckigen Isoliergläsern eingedeckt. Der große Vorteil des sogenannten Salatsiebprinzips liegt in den stets gleichen Stablängen, die verknüpft mit drehbaren Knoten doppelsinnig gekrümmte Flächen annähern können und dabei eine effiziente Herstellung der Stäbe erlauben. Die flächigen Deckelemente der Strukturen unterscheiden sich jedoch weiterhin.<sup>12 13</sup>

PROJEKT:  
 Flusspferdehaus Zoo Berlin  
ORT: Berlin, Deutschland  
INGENIEURE: Schlaich, Bergermann  
ARCHITEKTUR:  
 J. Gribl, München  
AUSFÜHRUNG: 1996

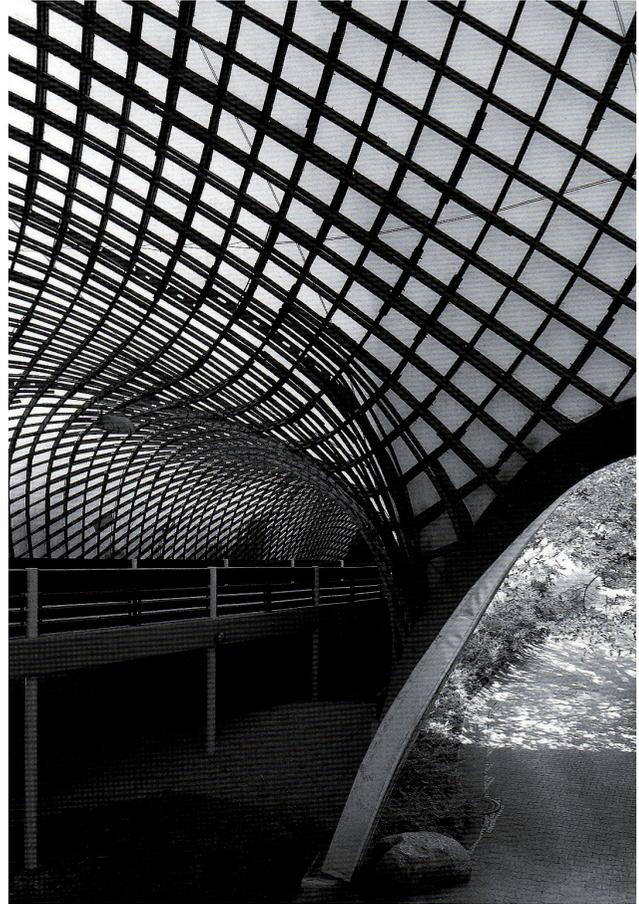
Die Kuppel der Schwimmbadüberdachung beruht auf einer flachen Kugelkalotte, auch andere Tragwerke von Jörg Schlaich und Rudolf Bergermann bedienen sich der geometrischen Formfindung, wie zum Beispiel der Konstruktion von Translationsflächen. Ein Beispiel hierfür ist das Dach des Flusspferdehauses im Berliner Tiergarten, das wiederum mit konstant gleichen Gitterstablängen realisiert und mit ebenen Scheiben eingedeckt werden konnte. Die Doppelschale überspannt zwei kreisrunde Becken mit 21, beziehungsweise 29 Meter Durchmesser. Scheinbar frei geformt gehorcht sie jedoch effizienten Gesetzmäßigkeiten.<sup>12 13</sup>

7.3.1 Otto Frei; Hängemodell der Multihalle Mannheim. 7.3.2 Das Gitternetztragwerk aus langen Holzlatten wurde in der Ebene montiert und anschließend in die Höhe gedrückt.  
7.3.3, 7.3.4, 7.3.5 Hallenbadüberdachung Neckarsulm. Die flache Kugelkalotte überspannt 24 m bei konstanter Gitternetzstablänge.  
7.3.6 Die erste durch Translationsflächen erzeugte Gitterschale; Flusspferdehaus des Berliner Zoos.

7.3.1



7.3.2



7.3.3



7.3.4



7.3.5



7.3.6



---

## GEODÄTISCHE KUPPELN

---

QUELLEN:

14 Vgl. Nerdinger, Winfried: *Wendepunkt(e) im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur*, München 2010, 43, Ebd. 110-111.  
ISBN: 978-3-920034-40-9  
Verlag: Edition Detail

15 Vgl. Heinle, Erwin/Schlaich, Jörg: *Kuppeln. aller Zeiten aller Kulturen*. Stuttgart 1996, 155-157.  
Deutsche Verlags-Anstalt DVA

PROJEKT:

*Ford Rotunda Dome*  
*ORT: Dearborn, USA*

KONSTRUKTEUR:

*Richard Buckminster Fuller*

*AUSFÜHRUNG: 1952/53*

Ein Verfahren bei dem Kugeln oder Kugelsegmente elementiert werden können, ist die geodätische Projektion von platonischen Grundkörpern auf die Kugeloberfläche.

Der amerikanische Erfinder Richard Buckminster Fuller griff dieses Verfahren zur Herstellung seiner Geodesic domes auf, nachdem es zuvor schon bei der Errichtung des Zeiss Planetariums in Jena angewendet wurde.

Fuller projiziert die Außenkanten eines regelmäßigen Ikosaeders, der im Zentrum einer Kugel positioniert ist, auf deren Oberfläche. Durch die Projektion entstehen zwanzig gleichseitige, sphärisch gekrümmte Dreiecke, die durch ihre Winkelhalbierenden weiter unterteilt werden können.

Durch die weitere Unterteilung kann zwar ein annähernd homogenes Netz erzeugt werden, es ist jedoch nicht möglich ausschließlich gleiche Dreiecke zu erzeugen.

An den zwölf Ecken des regelmäßigen Ikosaeders treffen fünf Flächen zusammen, diese Eckpunkte erzeugen nach der Projektion Fünfecke, wobei an allen anderen elementierten Bereichen Sechsecke entstehen. Es ist also möglich, gewisse sich wiederholende Zonen mit gleichen Modulen zu erzeugen, eine gänzlich homogene Parkettierung der Kugel kann aber nicht umgesetzt werden.<sup>15</sup>

Aus Fullers Untersuchungen zur strukturellen Geometrie entstanden die geodätischen Kuppeln, die er zunächst in Holz, Karton und Kunststoff umsetzte. Das Ziel, rationale Konstruktionen durch industrielle Produktionstechniken zu realisieren, erreichte er mit dem Ford Rotunda Dome in Dearborn. Das Projekt brachte ihm zugleich den internationalen Durchbruch.

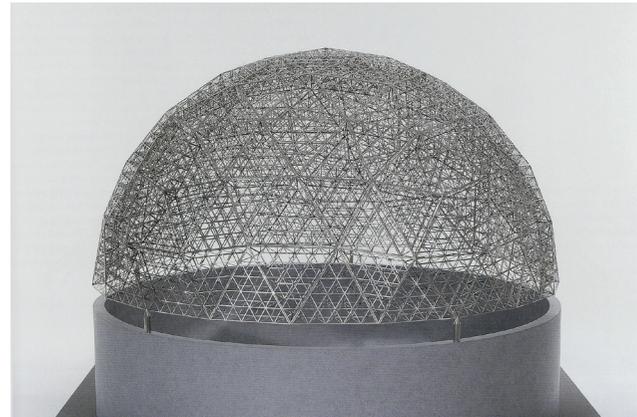
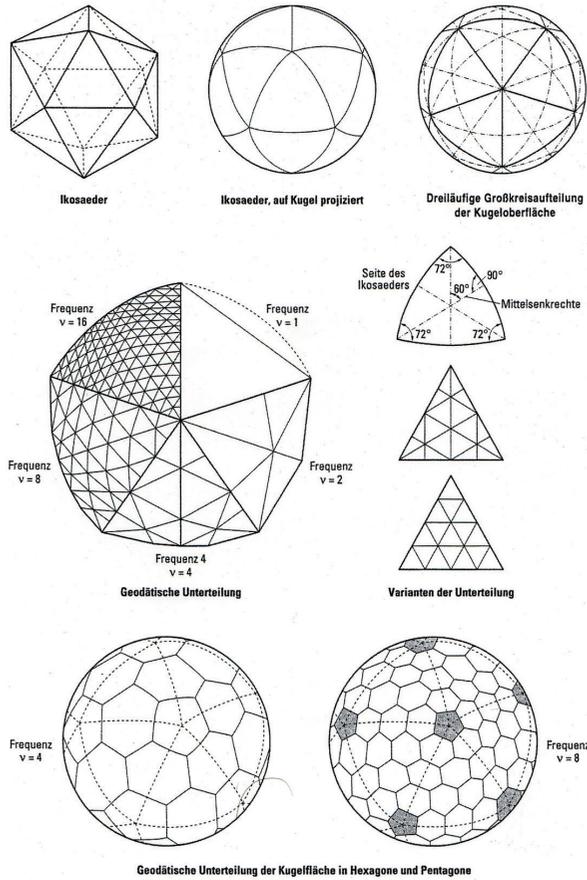
Die Konstruktion für die Überdachung des runden Ford Verwaltungsgebäudes war aber nicht nur die erste realisierte geodätische Kuppel, sondern brachte durch die von Ford selbst als Lizenznehmer industriell produzierten Kuppelteile auch die erhoffte Kooperation mit der Großindustrie mit sich.<sup>14</sup>

In nur fünf Wochen wurde die Kuppel komplett vormontiert und musste anschließend nur noch in Position gehoben werden. Das leichte, genietete Aluminiumstabwerk ist mit Kunststoff überspannt und überzeugt durch seine hohe Leistungsfähigkeit. Die 28 Meter weit spannende Kuppel wiegt nur achteinhalb Tonnen, was einem Zwanzigstel des Gewichts einer gleichwertigen Stahlkuppelkonstruktion entspricht. Die filigrane Erscheinung der Konstruktion im Herzen des massiven Rundbaus weist deutlich auf Buckminster Fullers Willen zu effizienten zukunftsweisenden Konstruktion hin und spiegelt seine technologisch, sowie sozial visionären Entwurfsgedanken wieder.<sup>14</sup>

In den Folgeaufträgen nutzte Fuller die grazile Leistungsfähigkeit und Lichtdurchlässigkeit der Konstruktion für viele verschiedene Einzelgebäude und sogar für visionäre Überdachungen ganzer Stadtzentren in teils extremen Klimazonen.<sup>14</sup>

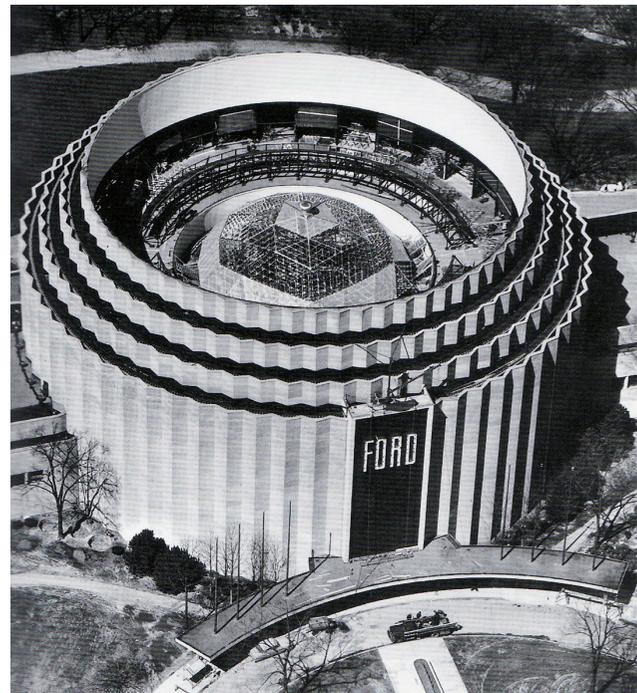
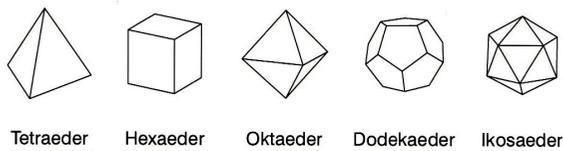
7.4.1 Geodätische Kuppeln; Projektion der 30 Außenkanten eines Icosaeders auf eine Kugeloberfläche und weitere Unterteilung der Großdreiecke. 7.4.2 Platonische Körper. 7.4.3 Zeichnungen aus den Patentschriften von Buckminster Fuller. 7.4.4 Modell der ersten realisierten geodätischen Kuppel; 2002. 7.4.5 Ford Rotunda Dome; das Gebäude wurde ursprünglich ohne Fullers Kuppel als Ausstellungshalle genutzt.

7.4.1



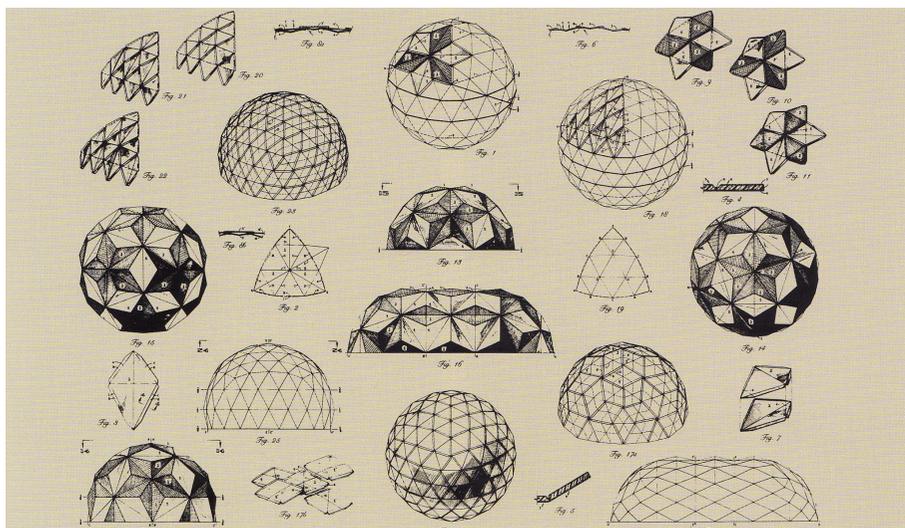
7.4.4

7.4.2



7.4.5

7.4.3



---

## BETONSCHALEN VON NERVI UND CANDELA

---

QUELLE:

16 Vgl. Nerdinger, Winfried: *Wendepunkt(e) im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur*, München 2010, 112-115  
ISBN: 978-3-920034-40-9

QUELLE:

17 Vgl. Faber, Colin: *Candela und seine Schalen*, München 1965, 204-209  
Verlag Georg D.W. Callwey

PROJEKT:

*Palazzetto dello Sport*

ORT: Rom, Italien

TRAGWERKSPLANUNG:

Pier Luigi Nervi

ARCHITEKTEN:

Pier Luigi Nervi, Annibale Vitellozzi

AUSFÜHRUNG: 1956/57

Ein wichtiger Aspekt von Pier Luigi Nervis Werk ist die ganzheitlich Betreuung des gesamten Bauprozesses. Nervi versuchte stets nicht nur den Entwurf und die Planung, sondern auch Berechnung und Konstruktion bis hin zur Ausführung selbst zu erledigen. Aus diesem Grunde gründete Nervi ein eigenes Bauunternehmen zur Umsetzung seiner Konstruktionen. Dieser Punkt macht deutlich, dass auch für Nervi die wirtschaftliche Produktion seiner Entwürfe ein wichtiger Faktor war. Ein Ziel Nervis war es, die Strukturen, Potentiale und die Gestaltungsmöglichkeiten von «Eisenbeton» in seinen Konstruktionen auszuschöpfen und dabei immer eine rationale Fertigungslösung mitzuentwickeln. Industrielle Baumethoden, wie Vorfertigung und serielle Herstellung, nutzte er wie selbstverständlich, so auch beim 1960 in Rom errichteten Palazzetto dello Sport.

Hierbei handelt es sich um eine flache Betonrippenschale mit knapp 60 Metern Durchmesser, die von einem Kranz aus 36 tangential angeordneten Streben getragen wird.

Zur Herstellung der Rippenschale wurden 1620 vorgefertigte, rautenförmige Ferrozement-Elemente verlegt, deren Stärke 2.5 Zentimeter betrug. Die Elemente konnten innerhalb von 30 Tagen auf einem Lehrgerüst angebracht werden und bildeten abschließend, bewehrt und im Verbund mit Ortbeton, die nur 12 cm dicke Schale.<sup>16</sup>

PROJEKT:

*Los Manantiales*

ORT: Stadt Mexiko

TRAGWERKSPLANUNG:

Felix Candela

ARCHITEKTEN:

Joaquin und Fernando Alvarez

Ordonez

AUSFÜHRUNG: 1957-58

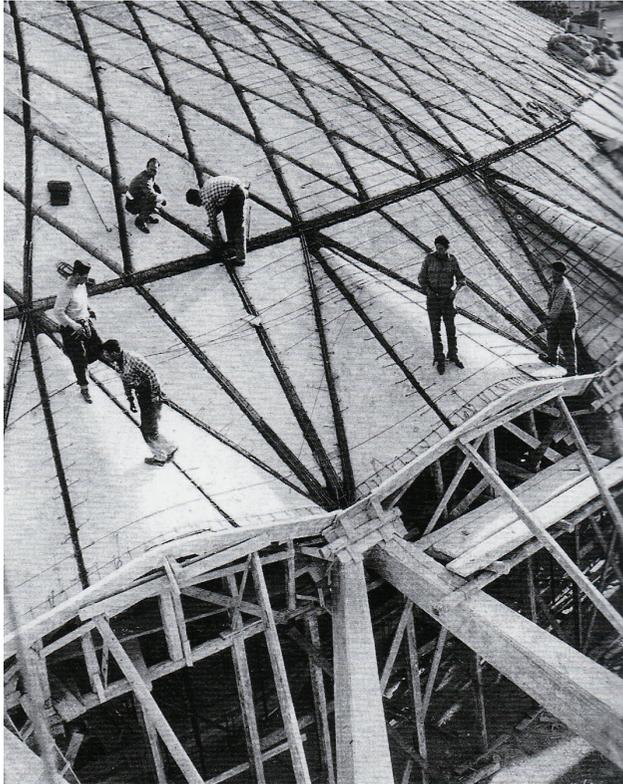
Nur ein Jahr später realisiert Felix Candela sein für ihn selbst bedeutendstes Werk. Der nach Mexiko emigrierte spanische Architekt setzt unzählige Schalen in Stahlbeton um, deren Formen fast ausschließlich durch geometrische Konstruktion erzeugt wurden. Obwohl es sich bei seinen ersten Versuchen um Seilliniengewölbe handelte, nutzte er in seinen weiteren Bauwerken die Geometrie zur Formfindung. Die von ihm dabei erreichte Formenvielfalt umfasst unzählige Variationen von hyperbolischen Paraboloiden, Kegeln, sphärischen Abschnitten und Rotationsparaboloiden. So entsteht auch das von Candela selbst als seine beste Arbeit bezeichnete Restaurant in Xochimilco aus der Verschneidung von vier hyperbolischen Paraboloiden. Die gebildete Schale überspannt an den Auflagerpunkten dreißig Meter bei einer lichten Höhe von ca. sechs Metern.

Candela sieht in diesem Werk alle an eine Schale gestellten Anforderungen erfüllt und weist dabei auf ihre Schlichtheit, Grazilität und Leichtigkeit hin. Die nur vier Zentimeter dicke Schale konnte aufgrund ihrer Symmetrie und den an den Schnittflächen entstehenden Graten realisiert werden, die die Lasten ideal zu den Auflagern führen.

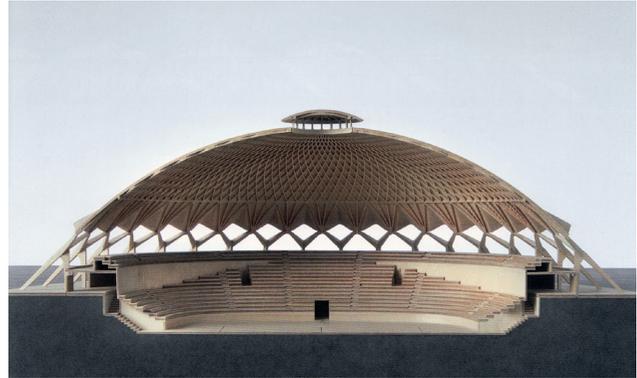
Auch Heinz Isler, als einer der letzten großen Schalenbauer, lobt nicht nur die minimale Dicke der Schale, sondern vielmehr die formale Gestalt.<sup>17</sup>

7.5.1 Pier Luigi Nervi; Verlegung der vorgefertigten Ferrozement-Elemente auf einem Lehrgerüst. 7.5.2 Schnitt durch ein Modell der schlanken Betonrippenschale des Palazzetto dello Sport. 7.5.3 Außenansicht; die Y-Streben erinnern an humane Gestalten, die scheinbar die Kuppel stützen. 7.5.4 Felix Candela; das Restaurant Los Manantiales in Xochimilco gilt als eine der dünnsten Schalen der Welt. 7.5.6 Mit einer Mindestdicke von nur 4 cm können 30 Meter überspannt werden.

7.5.1



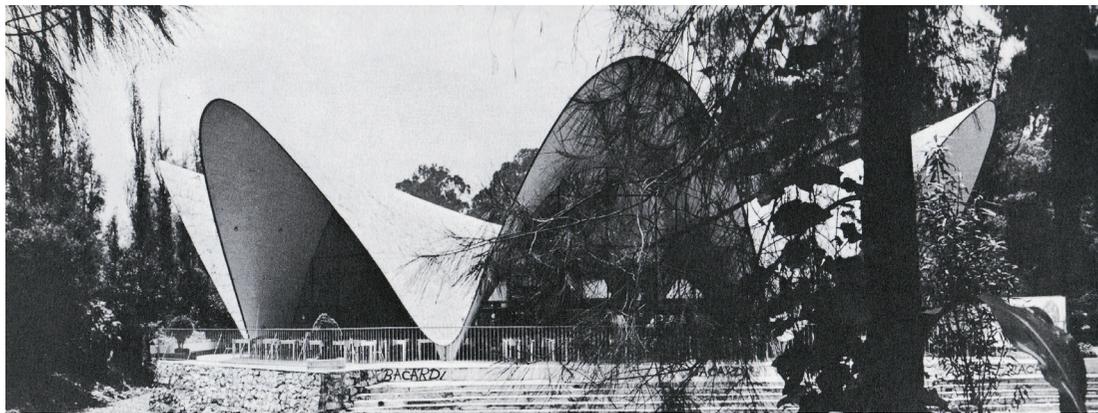
7.5.2



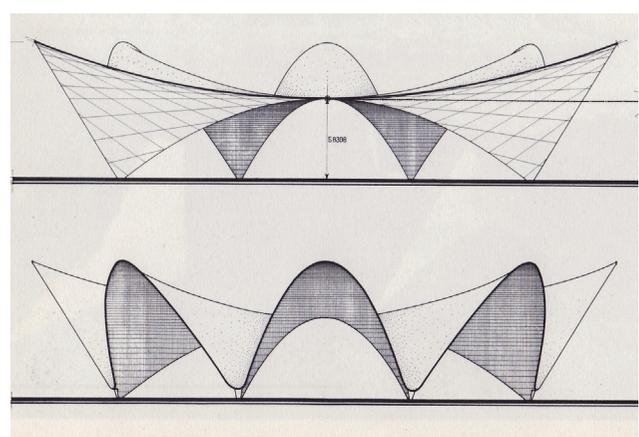
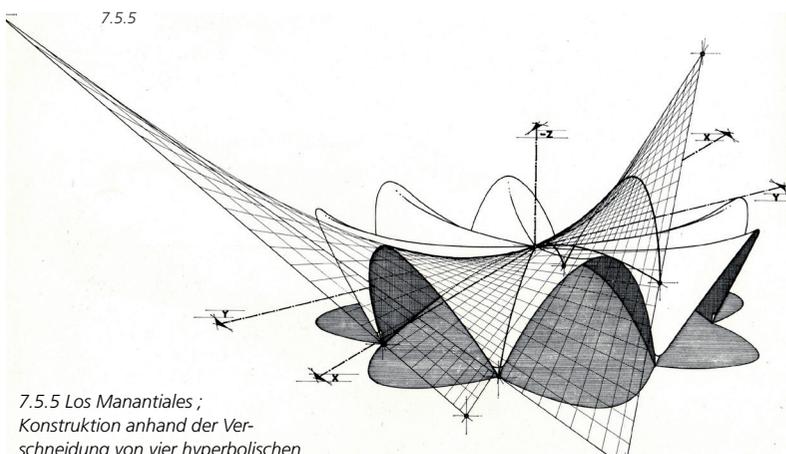
7.5.3



7.5.4



7.5.5



7.5.6

7.5.5 Los Manantiales ;  
Konstruktion anhand der Ver-  
schneidung von vier hyperbolischen  
Paraboloiden.

---

 HEINZ ISLER
 

---

QUELLEN:

18 Vgl. Chilton, John: *The Engineers Contribution to contemporary Architecture*. HEINZ ISLER, London2000, 32-47 Ebd. 46-67  
 Thomas Telford Publishing  
 ISBN: 0 7277 2878 4

19 Vgl. Heinle, Erwin/Schlaich, Jörg: *Kuppeln. aller Zeiten aller Kulturen*. Stuttgart 1996, 155/157.  
 Deutsche Verlags-Anstalt DVA

Wie bereits in Kapitel 1.5 angeschnitten, realisierte der Schweizer Ingenieur Heinz Isler unzählige Betonschalen, deren Geometrien aus experimentellen Formfindungsmethoden entstanden sind. Isler konnte ab 1955 als erster Ingenieur solche frei geformten Betonschalen umsetzen und bedachte dabei stets die wirtschaftliche Herstellung der Schalen. Die Effizienz seiner Tragwerke wurzelt also nicht nur im rationalen Umgang mit dem Material aufgrund der Formfindungsmethoden, sondern auch in der Planung der Schalung und des gesamten Fertigungsprozesses. Grundsätzlich versuchte Heinz Isler Schalungen mehrfach zu verwenden, und zwar nicht nur innerhalb eines Objektes, sondern auch projektübergreifend.<sup>18</sup>

PROJEKT:

Firma Eschmann, Fabrikdach

ORT: Thun, Schweiz

TRAGWERKSPLANUNG:

Heinz Isler

AUSFÜHRUNG: 1958

Abb. 7.6.2

Isler entwickelt zunächst, angeregt durch die Betrachtung eines Kissens, seine Buckelschalen. Diese Schalen dienen zur Überspannung von rechtwinkligen Grundrissen und können als geschlossenes, kontinuierlich gestütztes System auf orthogonale Stützenraster aufgesetzt werden. Zur Ermittlung einer derartigen Schalengeometrie verwendete Isler Gummimembrane, die eingespannt in einen rechteckigen Rahmen mit einem Innendruck beaufschlagt wurden. Isler konnte auf diese Weise doppelt gekrümmte Flächen störungsfrei in einen Rahmen aus geraden, orthogonalen Linien einpassen. Die auf diese Weise erzeugten Buckelschalen wurden von Isler in ein Standard-System integriert, das von 1955-1959 33 mal, hauptsächlich zur Umsetzung von Industrie- und Gewerbegebäuden, realisiert wurde. Hinzu kommen jedoch noch weitere, individuell geplante Buckelschalen.<sup>18</sup>

PROJEKT:

Garten-Center Bürgi

ORT: Camorino, Schweiz

TRAGWERKSPLANUNG:

Heinz Isler

AUSFÜHRUNG: 1973

Abb. 7.6.4, 7.6.5

Die Beobachtung von expandierenden Materialien in offenen Gefäßen, wie zum Beispiel Polyurethan-Schaum oder ein im Ofen aufbackender Teig, inspirierte Isler zur Untersuchung von frei geformten Flächen. Die auf diese Weise gefundenen Formen wurden mehrfach mit Hilfe von Modellversuchen auf ihre Tragfähigkeit und ihr Verformungsverhalten untersucht, um die tragende Funktion gewährleisten zu können (Abb. 7.6.10). Isler entwickelte aufgrund der Ergebnisse Lösungen zur Aussteifung aller seiner Schalen, wie zum Beispiel die vertikale Vorspannung im Bereich der Auflager und der Erzeugung von Auffaltungen an den freien Schalenrändern. Die finale Geometrie der Expansionsschalen wurde abschließend wieder auf die reale Größe skaliert.

PROJEKT:

Naturtheater Grötzingen

ORT: Deutschland

TRAGWERKSPLANUNG:

Heinz Isler

ARCHITEKT

Michael Balz

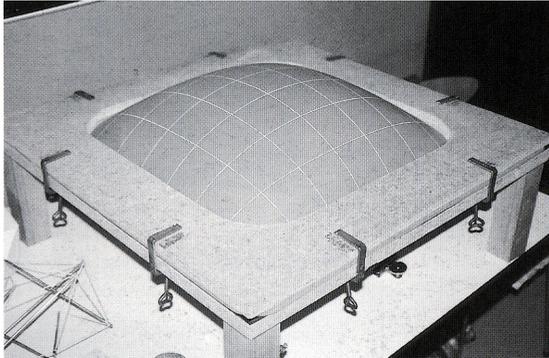
AUSFÜHRUNG: 1977

Abb. 7.6.7

Die wohl eindrucksvollsten von Heinz Isler geplanten Strukturen sind die durch das Umkehren eines Hängemodells erzeugten Schalen. Die natürliche Formensprache der ihrer Stützlinie entsprechenden Geometrien bewirkt gleichsam ein atemberaubendes Erscheinungsbild, als auch die maximal erzeugbare Effizienz des Betonflächentragwerks. Die ideal durch Druckkräfte belastbaren Schalen wurden von Heinz Isler an ihren Auflagern vorgespannt ausgeführt und bilden an ihren freien Seitenkanten leichte Hochzüge aus, um diese zu stabilisieren. Die Sinnhaftigkeit dieser Randausformung wurde ebenfalls in den Hängemodellen ersichtlich. Auf diese Weise konnte Heinz Isler Spannweiten von 30 Metern mit nur 9 cm dicken Betonschalen überdecken, die Scha-

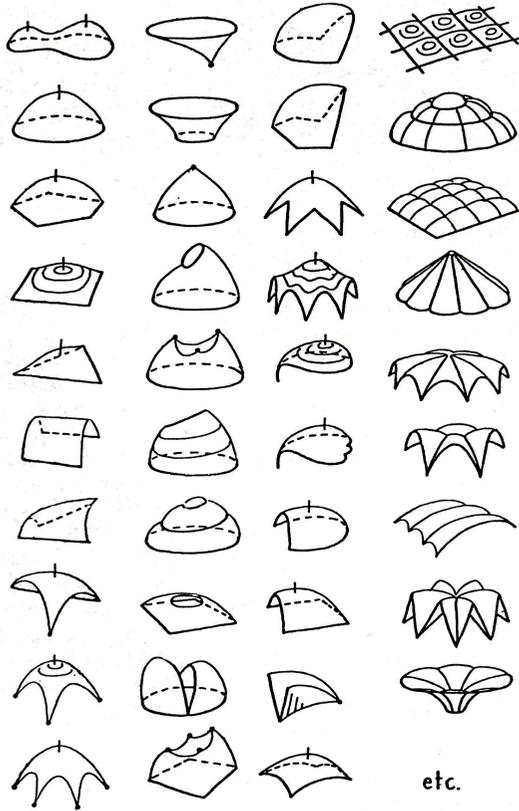
7.6.2 Standardisierte Buckelschalen; die einzelnen Schalen können aneinandergereiht werden, Einzelschale 14 x 20 Meter.  
 7.6.4 Beispiel für eine Expansionsschale Islers; Formfindung durch die Beobachtung von expandierenden Materialien.  
 7.6.5 Innenansicht des Garten Centers Bürgi (7.6.4); die selbsttragende Glasfassade fasst den gesamten Innenraum ein.  
 7.6.7 Schalenform erzeugt durch ein Hängemodell; der überdachte Bereich beträgt 28 auf 42 Meter.

7.6.1



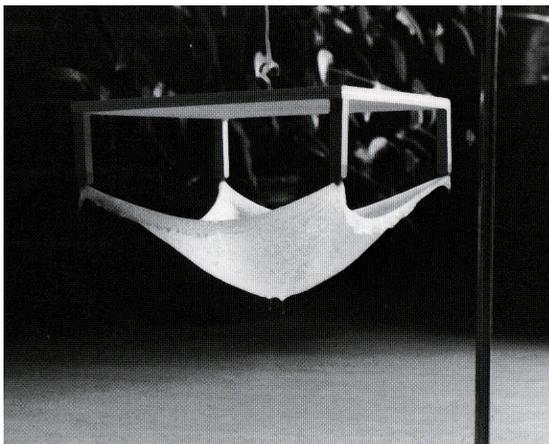
7.6.1 Buckelschalenmodell; eine Gummimembran wird durch einen Innendruck verformt.

7.6.3

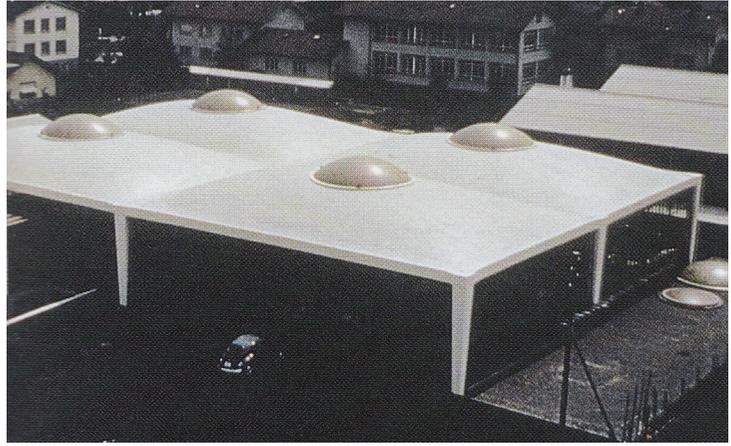


7.6.3 Skizzen von erzeugbaren Schalenformen, gezeichnet von Heinz Isler.

7.6.6



7.6.36 Hängemodell; das Textil wurde mit aushärtenden Harzen behandelt und behält nach dem Umdrehen seine Form.



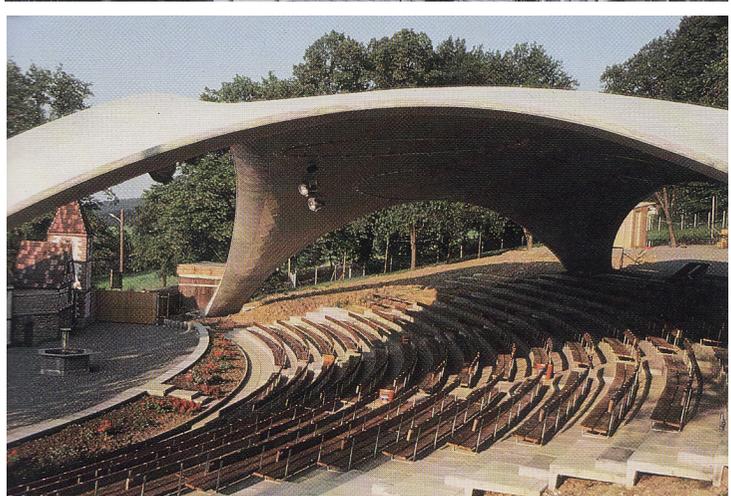
7.6.2



7.6.4



7.6.5



7.6.7

PROJEKT:  
Tennishalle Düdingen  
ORT: Schweiz  
TRAGWERKSPLANUNG:  
Heinz Isler  
AUSFÜHRUNG: 1978

Abb. 7.6.8, 7.6.9

---

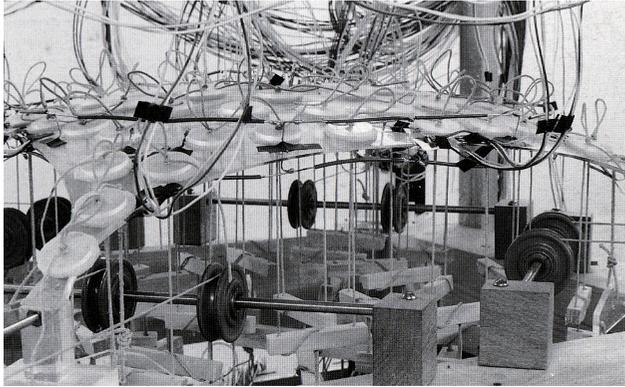
lendicke steigt jedoch dem Kraftfluss entsprechend im Bereich der Auflager an. Isler entwickelte auch hier ein System zur effizienten Herstellung der Schalen, das eine Wiederverwendung der Schalung erlaubte und mehrere gleiche Schalenabschnitte aneinandergereiht zu einer großen Gesamtstruktur zusammenführt. Dieses System wurde ab 1970 zur Errichtung von mindestens zwölf Tennishallen genutzt, die aus 2 - 6 Einzelschalen zusammengesetzt sind.<sup>19</sup>

Die Schalen von Heinz Isler sind grundsätzlich zweilagig, mit 6 mm dicken Stahlstäben bewehrt und in Normalbeton ausgeführt, der durch Rütteln verdichtet wurde. Viele der bereits fünfzig Jahre alten Schalen zeigen sich heute noch in ausgezeichnetem Zustand.<sup>18</sup>

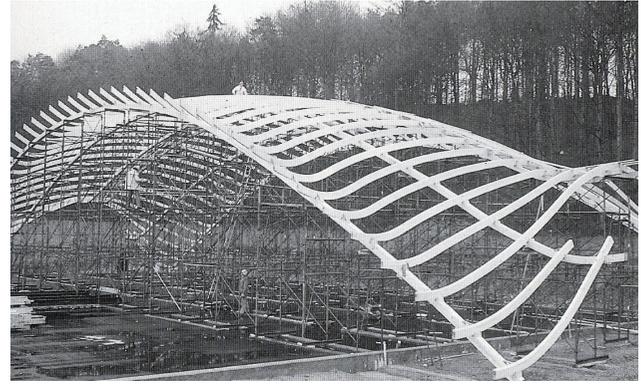
Diese Fertigungstechniken für Ortbetonschalen haben sich seit den Werken von Heinz Isler kaum geändert und finden in dieser Art noch immer Anwendung.

7.6.8, 7.6.9 Wiederverwendbare Schalung zur Herstellung von Modulschalen; Tennishalle Düdingen. Das System zur effizienten Herstellung von umgekehrten Membranschalen beruht auf gleichen Schalen, die aneinandergereiht werden.  
 7.6.10 Analyse der Tragstruktur durch Modellstatik; es können Aussagen über das Verformungs- und Tragverhalten getroffen werden. 7.6.12 Betonschale der Raststätte Deitingen Süd, 2011; die Schale ist nach 40 Jahren noch in gutem Zustand.

7.6.10

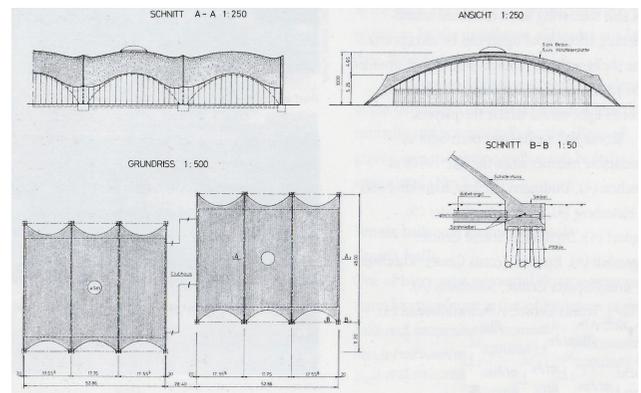


7.6.11



7.6.8

7.6.9



7.6.12





---

## 8 QUELLENANGABEN

---

### BÜCHER

- Bigalke, Hans-Günther/Wippermann, Heinrich: Reguläre Parkettierungen. Mit Anwendungen in Kristallographie, Industrie, Baugewerbe, Design und Kunst, Heidelberg 1994
- Cachola Schmal, Peter: Digital, real - Blobmeister. Erste gebaute Projekte, Basel 2002
- Chilton, John: The Enineers Contribution to contemporary Architecture. HEINZ ISLER, London 2000
- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton, Berlin 2008
- Faber, Colin: Candela und seine Schalen, München 1965
- Heesch, Heinrich/Kienzle, Otto: Flächenschluss. System der Formen lückenlos aneinanderschließender Flachteile, Hannover 1963
- Heinle, Erwin/Schlaich, Jörg: Kuppeln. aller Zeiten aller Kulturen. Stuttgart 1996
- Nerdinger, Winfried (Hg.): Wendepunkt(e) im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur, München 2010
- Walser, Frederic: Formfindung von Schalen mit numerischen Hängemodellen, Diplomarbeit, Stuttgart 2011
- Zimmermann, Gregor: Membran Beton Gitterschalen Tragwerke. Entwicklung und Verbesserung, Kassel 2007

---

## AUFSÄTZE, PUBLIKATIONEN, BROSCHÜREN

- Eigensatz, Michael: Case Studies in Cost-Optimized Paneling of Architectural Freeform-Surfaces. project paper, Zürich 2010
- Isler, Heinz: Die Kunst der leichten Schalen. Moderner Schalenbau, in: Arcus 2003, 18, 50-66
- Kemmler, Roman: Formfindung: Die Interaktion von Kraft und Geometrie, in: Stahlbau, 81 (2012), Heft 6, 176-480
- Lamarre, François, (2012): VILLA NAVARRA, [http://www.lafarge.com/05142008-research\\_innovation-liflet\\_Villa\\_Navarra-uk.pdf](http://www.lafarge.com/05142008-research_innovation-liflet_Villa_Navarra-uk.pdf), in: <http://www.lafarge.com>, 15.09.2012
- Piker, Daniel,( 2012): Using Kangaroo, a draft manual, <http://www.food4rhino.com/project/kangaroo>, in: <http://www.food4rhino.com> ,15.09.2012
- Preisinger, Clemens,(2012): Karamba User Manual, <http://www.karamba3d.com/downloads>, in: <http://www.karamba3d.com>, 15.09.2012
- SGL Technologies GmbH, (2012): Bauverstärkungsmaterialien aus Carbonfasern, [http://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/cm/textile-products/index.html?\\_\\_locale=de](http://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/cm/textile-products/index.html?__locale=de), in: <http://www.sglgroup.com> , 15.09.2012
- Stadt Kassel,(2006) :Gärtnerplatzbrücke, <http://www.gaertnerplatzbruecke.de>,15.09.2012
- Wallisser, Tobias: Forschung: Von Computerisation zur Computation, Vom Blob zur algorithmisch generierten Form. Forschung, in: Archplus, 189 (2008), 120-123

---

## ONLINE

### SOFTWARE

- <http://www.rhino3d.com>, 15.09.2012
- <http://www.food4rhino.com>, 15.09.2012
- <http://www.karamba3d.com>, 15.09.2012
- <http://www.giuliopiacentino.com/weaverbird>, 15.09.2012
- <http://www.grasshopper3d.com>, 15.09.2012
- <http://www.dlubal.de>, 15.09.2012
- <http://www.ninsight.at>, 15.09.2012
- <http://wiki.mcneel.com/labs/panelingtools> , 15.09.2012

### GEOMETRIE

- <http://www.brefeld.homepage.t-online.de/geodaetische-kuppeln.html> , 15.09.2012
- <http://www.mathematische-basteleien.de/parkett2.htm>, 15.09.2012
- <http://spacesymmetrystructure.wordpress.com>, 15.09.2012

### PRODUKTE

- <http://www.sglgroup.com>, 15.09.2012
- <http://www.halfen.at>, 15.09.2012
- <http://www.lafarge.at/forschung-entwicklung>, 15.09.2012
- <http://aut.sika.com>, 15.09.2012
- 

### ALLGEMEIN

- <http://de.wikipedia.org>, 15.09.2012
- <http://www.flickr.com>, 15.09.2012

---

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS****1.5.2 Chilton, John: *The Engineers Contribution to contemporary Architecture.*****HEINZ ISLER, London 2000, 37.**

3.2.1 Ebda., 92-92.

7.6.1 Ebda., 35.

7.6.3 Ebda., 24.

7.6.5 Ebda., 87.

7.6.6 Ebda., 37.

7.6.8 Ebda., 107.

7.6.9 Ebda., 108.

7.6.10 Ebda., 83.

7.6.11 Ebda., 115.

**7.5.4 Faber, Colin: *Candela und seine Schalen, München 1965,* 208.**

7.5.5 Ebda., 204.

7.5.6 Ebda., 206.

**3.6.4 *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb: Sachstandsbericht Itrahochfester Beton, Berlin 2008,* 9.**

3.6.5 Ebda., 10.

**5.1.3 *Bilderarchiv, Institut für Tragwerksentwurf, Technische Universität Graz***

5.3.1 Ebda.

5.3.2 Ebda.

5.3.3 Ebda.

5.3.4 Ebda.

5.3.5 Ebda.

**7.1 *Heinle, Erwin/Schlaich, Jörg: Kuppeln. aller Zeiten aller Kulturen. Stuttgart 1996,* 169.**

7.2 Ebda., 156.

7.3 Ebda., 173.

7.4 Ebda., 208.

7.5 Ebda., 187.

7.1.1 Ebda., 205.

7.1.2 Ebda., 202.

7.1.3 Ebda., 205.

7.1.4 Ebda., 202.

7.1.5 Ebda., 209.

7.1.6 Ebda., 207.

7.1.7 Ebda., 209.

7.4.2 Ebda., 155.

7.4.3 Ebda., 157.

7.6.2 Ebda., 187.

7.6.4 Ebda., 187.

---

7.6.7 Ebda., 187.

**7.2.1 Nerdinger, Winfried: Wendepunkt(e) im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur, München 2010, 89.**

7.2.2 Ebda., 90.

7.2.3 Ebda., 91.

7.3.1 Ebda., 42.

7.3.2 Ebda., 42.

7.4.1 Ebda., 43.

7.4.4 Ebda., 111.

7.4.5 Ebda., 111.

7.5.1 Ebda., 112.

7.5.2 Ebda., 113.

- 1.5.1 [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/Deitingen\\_Sued\\_Raststaette%2C\\_Schalendach\\_01\\_09.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/Deitingen_Sued_Raststaette%2C_Schalendach_01_09.jpg), 20.07.2012
- 3.6.1 <http://www.gaertnerplatzbruecke.de>, 20.07.2012
- 3.6.3 <http://www.lafarge.com/wps/portal/Search?mode=search&query=villa>, 05.08.2012
- 3.6.2 [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Machine\\_element\\_made\\_of\\_UHPC.jpg&filetimestamp=20120827110217](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Machine_element_made_of_UHPC.jpg&filetimestamp=20120827110217), 20.07.2012
- 3.7.2 [http://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/cm/textile-products/index.html?\\_\\_locale=de](http://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/cm/textile-products/index.html?__locale=de), 07.08.2012
- 7.3.3 [http://www.sbp.de/de#build/show/1641-Freizeitbad\\_Aquatoll\\_Neckarsulm](http://www.sbp.de/de#build/show/1641-Freizeitbad_Aquatoll_Neckarsulm), 15.09.2012
- 7.3.4 [http://www.sbp.de/de#build/show/1641-Freizeitbad\\_Aquatoll\\_Neckarsulm](http://www.sbp.de/de#build/show/1641-Freizeitbad_Aquatoll_Neckarsulm), 15.09.2012
- 7.3.5 [http://www.sbp.de/de#build/show/97-Flusspferdehaus\\_Zoo\\_Berlin](http://www.sbp.de/de#build/show/97-Flusspferdehaus_Zoo_Berlin), 15.09.2012
- 7.3.6 [http://www.sbp.de/de#build/show/97-Flusspferdehaus\\_Zoo\\_Berlin](http://www.sbp.de/de#build/show/97-Flusspferdehaus_Zoo_Berlin), 15.09.2012
- 7.5.3 <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/D+C-winter-2010/curvature/examples-of-curvature/3613346.jpg>, 07.08.2012
- 7.6.12 <http://www.flickr.com/photos/carlofumarola1978/6080074885>, 20.07.2012



